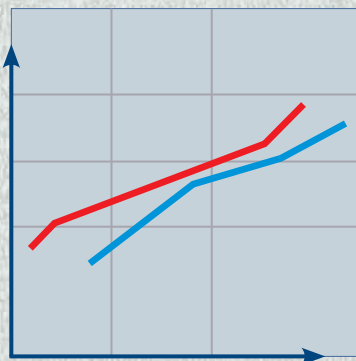




Giedrius ŠIUPŠINSKAS, Violeta MISEVIČIŪTĖ

ŠILUMINIŲ PROCESŲ INTEGRAVIMO UŽDAVINYNAS



Vilnius „Technika“ 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Giedrius ŠIUPŠINSKAS, Violeta MISEVIČIŪTĖ

ŠILUMINIŲ PROCESŲ INTEGRAVIMO UŽDAVINYNAS

Mokomoji knyga

Vilnius „Technika“ 2012

UDK 697(076.1)
Ši-117

G. Šiupšinskas, V. Misevičiūtė. Šiluminių procesų integravimo uždavinynas: mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2012. 76 p.

Leidinyje pateikiamas šiluminių procesų integravimo aiškinamasis uždavinynas. Supažindinama su *pinč* metodo pagrindais ir jo taikymu projektuojant naujus ar modernizuojant jau esamus šilumos atgavimo įrenginius energetinėse sistemose. Uždavinyne detaliai aiškinami ir aptariami sudėtinių kreivių, pagrindinės sudėtinės kreivės formavimo ir šilumokaičių tinklo projektavimo pavyzdžiai. Kiekvieno skyriaus pabaigoje pateikiami keli uždaviniai su atsakymais.

Leidinyz skirtas VGTU Energijos inžinerijos antrosios pakopos pagrindinių ir tęstinių studijų studentams, studijuojantiems procesų ir sistemų integracijos modulį.

Leidinį rekomendavo VGTU Aplinkos apsaugos fakulteto
studijų komitetas

Recenzavo: prof. dr. Egidijus Saulius Juodis,
VGTU Pastatų energetikos katedra
doc. dr. Vytautas Grigonis,
VGTU Miestų statybos katedra

Leidinyz parengtas ir išleistas už Europos struktūrinių
fondų lėšas, jomis finansuojant VGTU Statybos fakulteto
projektą „Transporto ir civilinės inžinerijos sektorių moks-
lo, verslo ir studijų integralumo didinimas (TRANCIV)“,
VP1-2.2-ŠMM-09-V-01-008

VGTU leidyklos TECHNIKA 1301-S mokomosios
metodinės literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-181-7
doi:10.3846/1301-S

© Giedrius Šiupšinskas, 2012
© Violeta Misevičiūtė, 2012
© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2012

Turinys

1. Įvadas	4
2. Procesų ir sistemų integravimas	6
3. Sudėtinių technologinių kreivių konstravimas ir energetinių tikslų nustatymas.....	8
3.1. Dviejų technologinių srautų pavyzdžio analizė.....	12
3.2. Trečiojo skyriaus uždaviniai	22
4. Tikslinių rodiklių paieška. Šilumos srautų lentelės algoritmas	26
4.1. Ketvirtąjo skyriaus uždaviniai	36
5. Pagrindinė sudėtinė kreivė ir jos konstravimo principai.....	39
5.1. Penktojo skyriaus uždaviniai.....	42
6. Šilumokaičių maksimalaus šilumos atgavimo tinklo projektavimas	43
6.1. Skaičiavimo pavyzdys.....	45
6.2. Tinklo projektavimas skaidant srautus.....	51
6.3. Šeštojo skyriaus uždaviniai	57
Literatūra	61
A priedas. Detalus šilumokaičių tinklo projektavimo pavyzdys	62
Terminai ir santrumpos	75

1. Įvadas

Įvairių pramonės šakų (chemijos, naftos, mineralinių trąšų, juodųjų ir spalvotųjų metalų metalurgijos, celiuliozės ir miško, statybos medžiagų, maisto, vaistų ir kt.) įmonės yra didžiausi pasaulio energijos išteklių vartotojai tiek žaliavos, naudojamos tarpiniams ir galutiniams produktams, tiek įvairių formų energijos, reikalingos pramoniniams procesams.

Energijos poreikių išteklių mažinimas pramonėje ir pastatų sektoriuje susijęs su plačiu įvairių šiuolaikinių technologijų įdiegimu, kuriant efektyvius energetinius kompleksus. Nors šis procesas nėra naujas (pavyzdžiui, chemijos pramonei), bet per paskutinius dešimtmečius prisidėjo du veiksniai, kurie suteikė ypatingą reikšmę energijos taupymui ir privertė plėsti taikomus šiam tikslui metodus ir priemones.

Pirma, tai energijos kainų augimas, verčiantis daug taupiau naudoti išteklius tokiu būdu mažinant išlaidas. Be to, visos gamyklos, kurios pastatytos, kai šie ištekliai buvo pigūs, šiuo metu energijos vartojimo požiūriu veikia toli gražu ne optimaliu režimu.

Antra, gerokai sumažėjo gamybos augimo tempai. Tai reiškia, kad sumažėjo galimybė įrengti naujas gamyklas, įsisavinti naujus technologinius procesus ir dėmesys vis dažniau sutelkiamas siekiant efektyviau naudoti esamą įrangą.

Rezultatas pasiekiamas modernizuojant esamas gamyklas, tobulinant pramonines operacijas. Jei pavyksta pastatyti naują gamyklą, labai svarbu, kad ji būtų suprojektuota veikti ekonominiu požiūriu efektyviausiai ne tik esant gamybos augimui, bet ir tuo atveju, kai jo nėra arba jis krenta.

Įmonės darbo efektyvumas vertinamas ne tik ekonominiais rodikliais, bet prie šio faktoriaus reikėtų priskirti ir gamybos įtaką aplinkai, t. y. ekologinį faktorių, patikimumo ir technologinio saugumo faktorius, technologinių linijų ir procesų kontrolės paprastumą, taip pat lankstumą reaguojant į įvairius išorinius ir vidinius dirgiklius.

Pramoniniai procesai chemijos, naftos ir giminingose šakose apibūdinami dideliu produktų įvairumu ir taip pat dideliu sudėtingumu. Šių procesų bendras būdingas požymis yra tas, kad norint pa-

versti pirminę žaliavą galutiniu produktu, santykinai reikia nemažai funkcionaliai skirtingų perdirbimo pakopų. Atskirų stadijų vykimo sąlygos gali būti labai skirtingos: nuo aukštatemperatūrių (daugiausia kaip 1500 °C) dujinių angliavandenilių elektrokrekingo metu iki labai žemų temperatūrų skaidant orą, nuo didelių slėgių gaminant amoniaką ir metanolį iki mažų vakuuminio perdirbimo atveju.

Nepaisant didelių kokybinių ir kiekybinių atskirų procesų skirtumų, skirtingų galių, produktų, veikimo reikalavimų ir t. t., visi jie turi būdingų bruožų: struktūriniu požiūriu sudėtingų procesų metu perdirbama žaliava ir energija, be to, aktyviai sąveikaujama su aplinka.

Vertinant minėtas problemas būtina taikyti tinkamą metodą, kuris leistų mažinti bendras energijos sąnaudas esamoje sistemoje ir padėti, jei to reikia, optimaliai (energinio, ekonominio ir ekologinio požiūriais) suprojektuoti naują. Toks metodas vadinamas procesų ir sistemų integravimu. Dažnai šis metodas gretinamas su vadinamąja *pinch* (liet. *pinč*) analize (angl. *Pinch Analysis*), kurios esminiai žingsniai ir aptariami šiame leidinyje, pateikiant skaičiavimo eigą, pavyzdžius ir uždavinius.

Uždavinyną parengė Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos fakulteto Pastatų energetikos katedros dėstytojai: 1–2 skyrius – doc. dr. Violeta Misevičiūtė, 3–7 skyrius su priedu – doc. dr. Giedrius Šiupšinskas.

2. Procesų ir sistemų integravimas

Nemažą dalį energijos būtų galima sutaupyti taikant integruotą sistemų projektavimo būdą (Kemp 2007). Sąvoka „procesų integracija“, vartojama chemijos inžinerijoje, gali turėti dvi reikšmes:

- 1) holistiniu požiūriu – tai proceso projektavimas kaip atskirų elementų visumos, o ne proceso kaip atskiro elemento optimizavimas atskirai. Tai taip pat dar gali būti vadinama integruotu procesų projektavimu arba procesų sinteze (El-Halwagi 1997, 2006; Smith 2005).
- 2) *pinch* (*pinč*) analizė – metodika, skirta procesams projektuoti, siekiant mažinti energijos sunaudojimą ir didinti šilumos atgavimą, taip pat ji žinoma kaip šilumos integracija arba *pinch* technologija.

Tarptautinė energetikos agentūra (angl. *International Energy Agency* (IEAA) procesų integraciją 1993 metais apibrėžė kaip sisteminis ir bendruosius metodus, jungiančius individualius procesus į visumą, pabrėžiančius efektyvų energijos vartojimą ir poveikio aplinkai mažinimą, kurie skirti integruotos gamybos sistemoms projektuoti (Gundersen 2002).

Procesų integracija priskiriama perspektyviai sričiai, kuria siekiama pagerinti darbo efektyvumą, energijos naudojimo, poveikio aplinkai, investicijų efektyvumo, procesų projektavimo ir procesų valdymo kontrolę ir valdymą (El-Sayed 2002).

Šilumos (energijos) integracijos metodas buvo plačiai taikomas cheminių procesų pramonėje, projektuojant ir sintezuojant naujus procesus. Derinant procesų modeliavimo paketus ir energijos integracijos metodikas įmanoma suprojektuoti itin integruotas sistemas (Godat, Marechal 2003).

Procesų integracijai taikant modeliavimą sisteminės analizės būdu galima analizuoti pramonės procesus ir sąveikas tarp atskirų jos dalių. Todėl procesų integracijos metodas gali būti taikomas (Natural resources Canada 2003):

- 1) energijai taupyti ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų susidarymui mažinti;

- 2) kritiškiems sistemų elementams šiuose procesuose nustatyti;
- 3) maišymo procesams optimizuoti;
- 4) vandenilio naudojimui optimizuoti;
- 5) reaktorių projektavimui ir valdymui gerinti;
- 6) vandens naudojimui ir nuotekų susidarymui minimizuoti;
- 7) atliekoms mažinti.

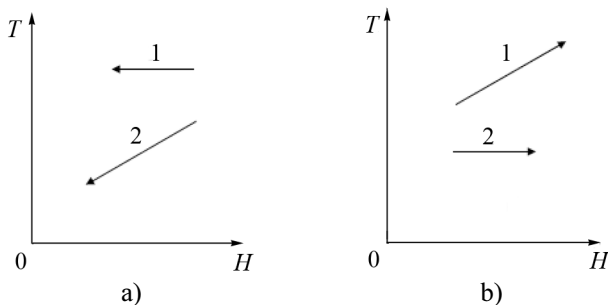
Galima teigti, kad procesų integracija skatina ekologišką termodinamiką, kurios pagrindiniai principai buvo nustatyti 2003 metų gegužės mėnesį vykusioje vyriausybės, mokslininkų, inžinierių ir kitų veikėjų konferencijoje „Ekologiška inžinerija: nustatant principus“ (JAV). Joje pabrėžta, kad inžineriniai procesai ir gaminiai turėtų būti holistiniai, jiems turėtų būti taikoma sisteminė analizė ir integruotas aplinkos poveikių nustatymas, o visa inžinerinė veikla vertinama pagal gyvavimo ciklo sampratą. Gyvavimo ciklas apima sistemų kūrimą, naudojimą ir sunaikinimą.

Kuriant ir taikant inžinerinius sprendimus, taip pat turėtų būti atsižvelgiama į vietinę geografinę padėtį, siekius ir kultūras. Siekiant darnumo, reikia skatinti priimti inžinerinius sprendimus esančioms arba vyraujančioms technologijoms gerinti ir atnaujinti, siekti išrasti naujas technologijas. Ekologinio projektavimo taikymas reikalauja vadovautis šiais principais jau ankstesniame projektavimo ir proceso (gaminio) kūrimo etape, nes tada patiriamas didžiausias poveikis aplinkai (Cengel 2007).

Procesų integracija susideda iš optimalių sąveikų tarp įvairių rodiklių ir jų ryšių paieškos. Ekonominiu požiūriu, procesų integracija apibūdinama kaip efektyvi priemonė, leidžianti pramonei didinti pelningumą, mažinant energijos, vandens ir žaliavų suvartojimą, šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą ir atliekų susidarymą. *Pinch* analizė yra vienas iš plačiai taikomų procesų integracijos metodų, nes tai gana paprastas metodas, pasauliniu mastu pasižymintis atliktų projektų efektyviais rezultatais.

3. Sudėtinių technologinių kreivių konstravimas ir energetinių tikslų nustatymas

Visus technologinius srautus galima skaidyti į dvi grupes. Viena sudarys tie srautai, kuriuos reikia ataušinti / atšaldyti prieš toliau apdirbant. Juos vadinsime karštais srautais. Antrąją grupę sudarys tie srautai, kuriuos reikia šildyti / kaitinti – tai šalti srautai. Srautų šilumos kitimą patogiu analizuoti temperatūros-entalpijos diagramoje (1 pav.) (Смит 2004).

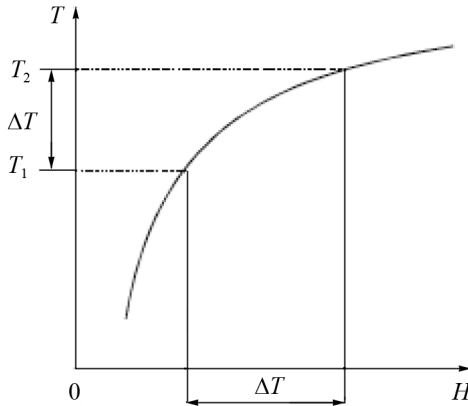


1 pav. Technologinių srautų pateikimas temperatūros-entalpijos diagramoje: karšti srautai (a): 1 – kondensacija, 2 – vėsinimas; šalti srautai (b): 1 – šildymas, 2 – garavimas

Karštus technologinius srautus temperatūros-entalpijos koordinatėse įprasta vaizduoti vektoriais, nukreiptais iš dešinės į kairę. Tai susiję su tuo, kad karštų šilumos srautų tiek vėsinimo, tiek fazės kitimo atvejais mažėja šilumos kiekis – entalpija (1 pav., a).

Analogiškai šaltų technologinių procesų atveju šildant arba keičiant fazę šilumos kiekis didėja, todėl koordinatinių temperatūros-entalpijos plokštumoje jis bus vaizduojamas vektoriumi, nukreiptu iš kairės į dešinę.

Technologinio proceso entalpijos pokytį tiesiškai vaizduoti galima tik tų srautų, kurių šiluminė talpa analizuojama temperatūros intervale ir laikoma pastoviuoju dydžiu. Atliekant analizę, būtina atsižvelgti į šią priklausomybę ypač tuo atveju, kai šis kitimas yra ne tiesinės priklausomybės.



2 pav. Technologinio srauto entalpijos funkcinė priklausomybė nuo temperatūros

Ryšys tarp temperatūros pokyčio ir šilumos kiekio (entalpijos skirtumo) mažėjimo bendruoju atveju gali būti išreikštas netiesine funkcija (2 pav.). Srauto entalpijos padidėjimas kintant temperatūrai nustatomas tokiu būdu:

$$dH = c_p \cdot M dT, \quad (1)$$

čia c_p – technologinio srauto savitoji šiluma esant pastoviajam slėgiui, J/kgK; M – srauto masė, kg/s; T – temperatūra, K; H – srauto šilumos galia, W.

Bendras technologinio srauto galios skirtumas jo temperatūros pokyčio ribose gali būti nustatytas:

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} c_p \cdot M dT. \quad (2)$$

Jei medžiagos srauto galios pokytis temperatūrų (T_1 , T_2) ribose išlieka pastovus, tuomet (2) lygtis bus tokia:

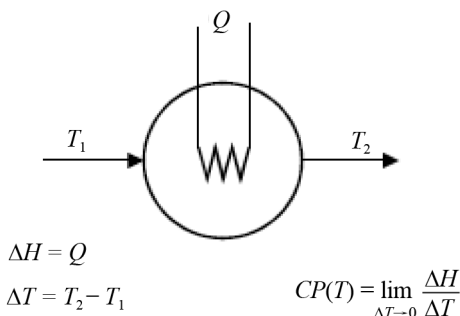
$$\Delta H = c_p \cdot M (T_2 - T_1). \quad (3)$$

Savitosios šilumos ir medžiagos kiekio sandauga žymima indikatoriumi CP ir vadinama srauto šilumine talpa.

$$CP = c_p \cdot M . \quad (4)$$

Srauto šiluminė talpa matuojama J/Ks arba W/K (kW/K).

Taikant *pinch* metodą, reikia labai aiškiai suvokti santykinų ir srautinių dydžių skirtumą. Srautinė šilumos talpa CP yra energijos kiekis, kurį reikia suteikti srautui, kad pratekančios per skersinį medžiagos srauto pjūvį temperatūra per vieną sekundę būtų padidinta vienu laipsniu. Formaliai nustatyti srauto talpą galima išanalizavus tą srautą, kuris šildomas šilumokaičiu (3 pav.).



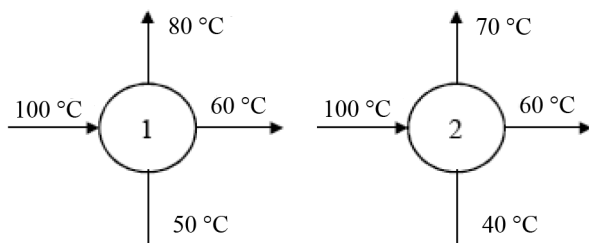
3 pav. Srauto šiluminės talpos CP nustatymas

Iš (3), (4) lygčių matyti, kad srauto entalpijos pokytis ΔH nustato energijos kiekį, kurį reikia suteikti srautui, pakeičiant medžiagos srauto, pratekančio per skerspjūvį per 1 sekundę, temperatūrą nuo T_1 iki T_2 . Iš čia faktiškai ΔH yra energijos galia, kurią reikia pateikti srautui, kad būtų užtikrintas projektinis poreikis.

Kitas esminis terminas, kuris vartojamas *pinch* analizei, yra minimalus technologinių srautų temperatūrų skirtumas $\Delta T_{\min}$ šilumokaitos įrenginiuose. Šis dydis priklauso nuo įvairių veiksnių:

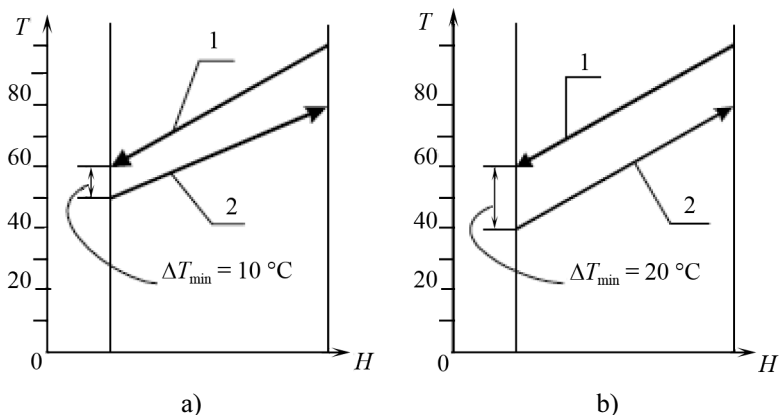
- Techninio, kai mažiausią temperatūrų skirtumą, kad vyktų šilumos mainai, tarp srautų lemia techniniai rodikliai, srautų būvis (skystis, dujos), šilumokaičių konstrukcija ir pan.;

- Ekonominis, kai mažiausias temperatūrų skirtumas tarp analizuojamų srautų nustatomas atliekant ekonominę investicijų ir išlaidų analizę per numatomą eksploatacijos laikotarpį.



4 pav. Mažiausias temperatūrų skirtumas tarp srautų ir šilumokaičių

Peržvelkime 4 paveiksle pateiktus du šilumokaičius ir nustatyme $\Delta T_{\min}$ kiekvienam iš jų. Šiluminius srautus pavaizduokime temperatūros-entalpijos diagramoje. Kadangi šilumos pokytis absoliučiojo dydžio yra toks pats šaltojo ir karštojo srautų, lengvai nustatysime $\Delta T_{\min}$ (Смит 2004).



5 pav. $\Delta T_{\min}$ nustatymas pagal temperatūros-entalpijos diagramą

Pirmame šilumokaityje mažiausias temperatūrų skirtumas tarp srautų yra 10 °C (5 pav., a), o antrajame – 20 °C (5 pav., b). Pagal 5 paveiksle pateiktus pavyzdžius karšti srautai atvėsunami iki tam

tikrų temperatūrų, o šalti – pašildomi, prie kiekvieno srauto nurodant pradines (T_s) (angl. *supply*) ir tikslo (siektinas) (T_t) (angl. *target*) temperatūras. Šiuose analizuojamuose pavyzdžiuose matyti, kad visa šiluma iš karšto srauto perduodama šaltam srautui. Tokiu atveju papildomos energijos nereikia, poreikis užtikrinamas per vadinamuosius vidinius šilumokaičius. Vidiniai šilumokaičiai yra tie, kurie užtikrina šilumos mainus tarp analizuojamų srautų (karšto ir šalto). Šie šilumokaičiai išnaudoja vidinius sistemos energijos srautų išteklis.

Tuo atveju, jei numatyti vidiniai šilumokaičiai negali užtikrinti technologijos reikalaujamų tikslo temperatūrų T_t , turi būti naudojamas papildomas šilumos ar vėsos / šalčio šaltinis. Ši energija dažniausiai perduodama per išorinius šilumokaičius, per kuriuos naudojant išorinius šaltinius, srautas atvėsintas arba pašildomas iki reikiamos temperatūros.

3.1. Dviejų technologinių srautų pavyzdžio analizė

Kokie galimi technologiniai sprendimai dviem srautams, kurių vienas yra karštas, o kitas šaltas, atvėsinti ir pašildyti iki tikslo temperatūrų? Srautų duomenys – srautų tipas, pradinės temperatūros, tikslo temperatūros ir srautų entalpijos pokytis pateikti 1 lentelėje.

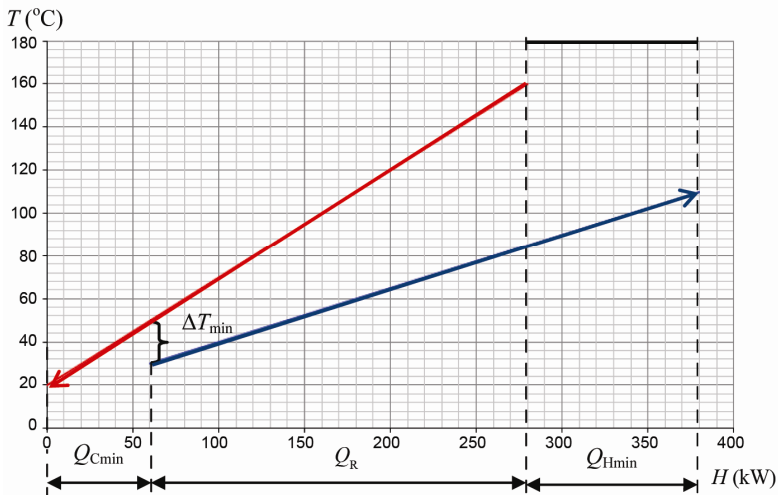
1 lentelė. Pagrindiniai duomenys dviejų srautų šilumos atgavimo uždaviniui spręsti

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, T_s , °C	Tikslo temperatūra, T_t , °C	Srauto šilumos galia (entalpijos skirtumas), ΔH , kW
Karštas	1	160	20	–280
Šaltas	2	30	110	320

Išoriniai energijos šaltiniai šiuo atveju gali būti garas, kurio temperatūra 180 °C, ir aušinamasis vanduo, kurio temperatūra 8 °C.

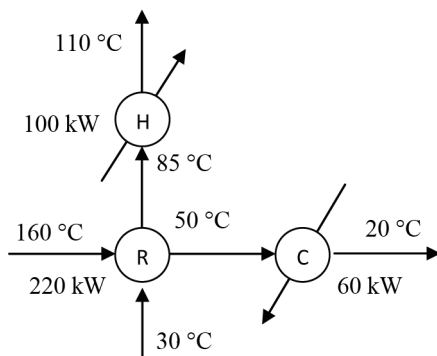
Pats paprasčiausias būdas būtų šalto srauto šildymas garu, o karšto – aušinimas šaltu vandeniu. Tačiau toks būdas reikalauja didelių energijos išlaidų ir didina aplinkos taršą.

Tam, kad nagrinėjamoje sistemoje įvertintume kitus energinių požiūriu efektyvesnius sprendimo variantus, pateikime abu technologinius srautus temperatūros-entalpijos diagramoje. Šilumos mainų tarp nagrinėjamų srautų galimybė egzistuoja tik tuo atveju, jei visuose taškuose karšto srauto temperatūra bus didesnė už šalto srauto temperatūrą (6 pav.). Numatyta, kad minimalus temperatūrų skirtumas $\Delta T_{\min}$, kuriam esant tarp srautų vyksta šilumos mainai, yra $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Galima nagrinėjamo pavyzdžio technologinių įrenginių išdėstymo schema pateikta 7 paveiksle.



6 pav. Dviejų srautų šilumos atgavimo uždavinys (kai $\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

6 paveiksle pateikta analizuojamo uždavinio temperatūros-entalpijos diagrama, kurioje karštas srautas pavaizduotas viršutinėje diagramos dalyje, o šaltas – apatinėje. Persiklojantis plotas (srautai yra vienas virš kito) išilgai entalpijos ašies apibrėžia šilumos galią Q_R , kurią galima atgauti nurodytame procese (kai $\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Analizuojamo pavyzdžio atveju galima atgauti 220 kW . Šis šilumos kiekis bus perduotas per vidinį šilumokaitį, kuris jungs šiltą ir šaltą srautus. Dalis šalto srauto, kuri yra už karšto srauto pradžios, negali būti šildoma dėl šilumos mainų su karštu srautu, todėl turi būti pašildyta garu (iš išorinio šaltinio). H – išorinis šildytuvas, C – išorinis aušinimo įrenginys, R – vidinis šilumokaitis (7 pav.).

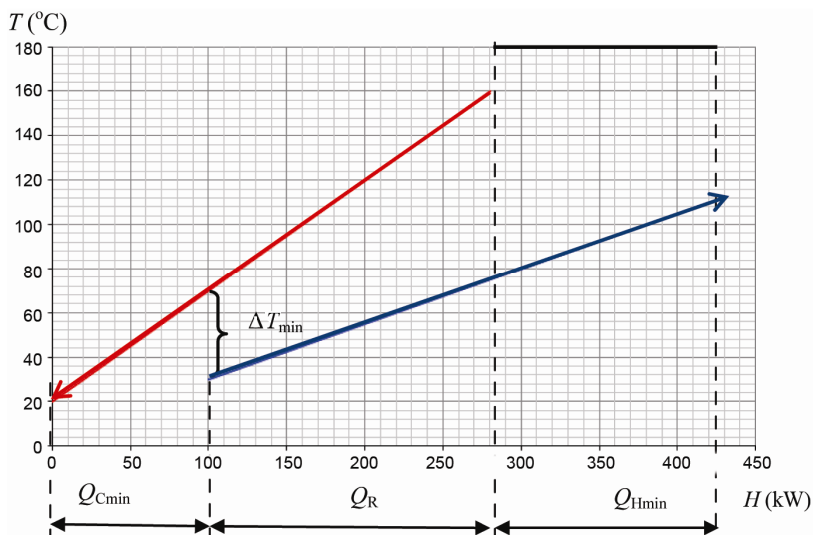


7 pav. Dviejų srautų šilumos atgavimo šilumokaičių išdėstymo schema (kai $\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

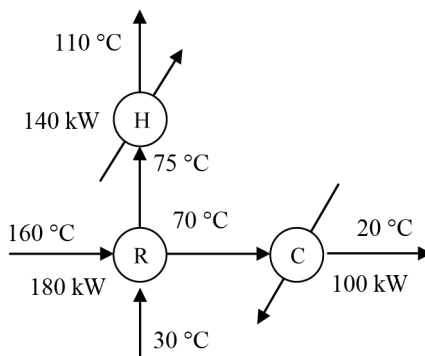
Tai ir yra mažiausias išorinis šilumos poreikis $Q_{H\min}$, kurį turi užtikrinti išorinis įrenginys. Analizuojamame uždavinyje $Q_{H\min} = 100\text{ kW}$. Dalis karšto srauto, kuri yra už šalto srauto pradinio taško, negali būti atvėsinta šilumos mainų su karštu srautu būdu, todėl jam atvėsinti papildomai reikia šalto vandens (7 pav.). Tai minimali išorinio įrenginio aušinimo / vėsinimo galia, kai $\Delta T_{\min}$ yra $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Šiuo atveju tai sudaro $Q_{C\min} = 60\text{ kW}$.

Šilumos srautų pradinės ir tikslo temperatūros (t. y. temperatūros-entalpijos diagramoje pateiktų srautų pasvirimo kampas) yra iš anksto numatyti dydžiai ir jų reikšmės negali būti keičiamos. Tačiau jų padėtis temperatūros-entalpijos ($T-H$) diagramoje gali būti keičiama, perstumiant kreives lygiagrečiai su entalpijos ašimi, t. y. horizontalia kryptimi. Šildyti šaltą technologinės sistemos srautą galima, nepriklausomai nuo karštų srautų vėsinimo, pavyzdžiui, tam naudojant išorinio šaltinio energiją.

8 paveiksle pateikti nagrinėjamo varianto srautai išsidėstę tokiu būdu, kad naujoje pozicijoje $\Delta T_{\min} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Srautų persidengimo plotas sumažėja (t. y. sumažėja atgaunamos šilumos kiekis) iki 180 kW . Didelė dalis šalto srauto atsidūrė už karšto srauto pradžios, todėl išorinis energijos kiekis, kurį suteikia išorinis garo įrenginys H, padidėja iki 140 kW (9 pav.). Diagramos apačioje karštas srautas taip pat yra toliau už šalto srauto pradžios, o tai didina šalinamos šilumos kiekį išoriniu įrenginiu C (t. y. aušintuvės) iki 100 kW .



8 pav. Dviejų srautų šilumos atgavimo uždavinys (kai $\Delta T_{\min} = 40^{\circ}\text{C}$)



9 pav. Dviejų srautų šilumos atgavimo šilumokačių išdėstymo schema (kai $\Delta T_{\min} = 40^{\circ}\text{C}$)

Paprastos dviejų srautų technologinės schemos analizė leidžia daryti keletą svarbių išvadų:

Pirma: techninių srautų bendras vaizdavimas temperatūros-entalpijos diagramoje leidžia nustatyti mažiausią reikalingą išorinio įrenginio galios šildymo ir vėsinimo / aušinimo poreikį, priklausomai nuo $\Delta T_{\min}$. Tai rodo, kad šie dydžiai yra tarpusavyje glaudžiai susiję.

$\Delta T_{\min}$ negali būti didesnis nei pradinių karšto ir šalto srautų temperatūrų skirtumas.

Antra: jei procesui suteiksime didelę galią, šią didelę galią taip pat reikės ir pašalinti, t. y. $Q_{H\min} + X$ turi įtakos $Q_{C\min} + X$. Kelių technologinių srautų analizės pavyzdys.

Aptartas būdas gali būti pritaikytas uždaviniams, kuriuose sprendžiami keli karšti ir šalti srautai.

Daroma prielaida, kad temperatūros ir kiekvieno srauto šilumos poreikis yra žinomi. Technologinė schema turi du karštus srautus (šilumos išteklį) ir du šaltus srautus (šilumos poreikį). Visi reikalingi duomenys pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Uždavinio, kuriame analizuojami keli srautai, užduotis

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslo temperatūra, °C	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	260	40	1,5	-330
Karštas	H2	200	80	2,5	-300
Šaltas	C1	20	180	2,0	320
Šaltas	C2	140	230	3,0	270

2 lentelėje pateiktos karštų srautų galios atveju pažymėtos su minuso ženklu. Ženklas prie galios žymi galimo proceso kryptį.

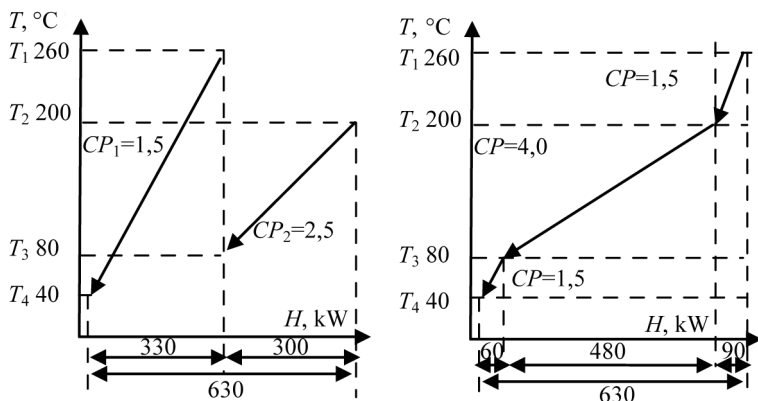
Pavaizduokime du karštus srautus temperatūros-entalpijos plokštumoje atskirai vieną nuo kito. Jų pradinės ir tikslo temperatūros dalija temperatūros ašį į tris intervalus T_1-T_2 , T_2-T_3 ir T_3-T_4 (10 pav.).

Temperatūrų intervale T_1 ir T_2 (nuo 260 °C iki 200 °C) yra tik vienas srautas H1 ir šilumos kiekis šiame intervale gali būti apskaičiuotas pagal išraišką

$$\Delta H = CP_1(T_1 - T_2) = 1,5 \cdot 60 = 90 \text{ kW}.$$

Temperatūrų intervale T_2 ir T_3 (nuo 200 °C iki 80 °C) yra du srautai, todėl bendras šilumos kiekis turi būti nustatomas sumuojant atskirų srautų entalpijos skirtumus, veikiančius šiame intervale.

$$\Delta H = (CP_2 + CP_1)(T_2 - T_3) = (1,5 + 2,5) \cdot 120 = 480 \text{ kW}.$$



10 pav. Karštų technologinių srautų sujungimas į bendrąją kreivę

Kitame temperatūrų intervale vėl randame srautą H1, todėl entalpijų pokytis šiame intervale bus

$$\Delta H = CP_1(T_3 - T_4) = 1,5 \cdot 40 = 60 \text{ kW}.$$

Toliau temperatūrų intervaluose, kurie sudaryti pagal ribines srautų temperatūras, nuosekliai atidedami bendri srautų entalpijos pokyčiai, kaip tai parodyta 10 paveikslo dešinėje pusėje esančiame brėžinyje. Taip iš dviejų srautų gauname vieną karštų srautų sudėtinę kreivę.

Sukonstruota karštų srautų sudėtinė kreivė rodo, kaip vyktų atskirų srautų entalpijos ir temperatūros pokyčiai, jei jie būtų vienas srautas, t. y. srautas, kurio srautinė šiluminė talpa priklauso nuo temperatūros, o nagrinėjamuose temperatūros intervaluose galėtume ją laikyti pastovia.

Analogiška procedūra leidžia sudėlioti pagrindinę šaltų srautų sudėtinę kreivę (11 pav.).

Čia taip pat kaip ir karštų srautų atveju pradinės ir tikslo temperatūros dalija temperatūros ašį į tris intervalus T_1-T_2 , T_2-T_3 ir T_3-T_4 (11 pav.). Temperatūrų intervale T_1 ir T_2 (nuo 230 °C iki 180 °C) yra tik vienas srautas – C2 ir šilumos kiekis šiame intervale gali būti apskaičiuotas išraiška

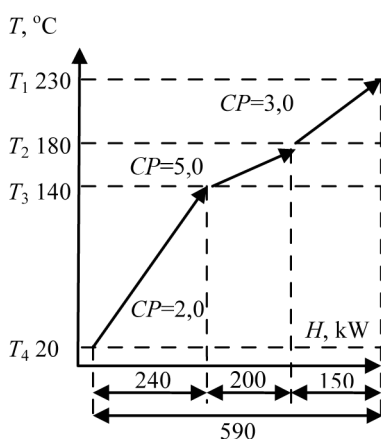
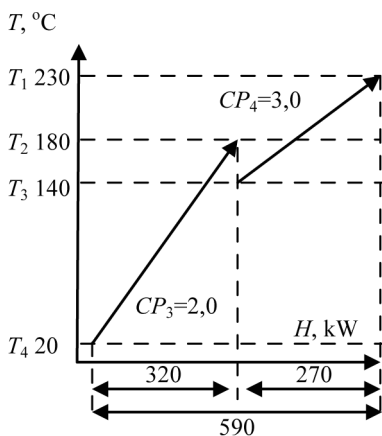
$$\Delta H = CP_4(T_1 - T_2) = 3,0 \cdot 50 = 150 \text{ kW}.$$

Temperatūrų intervale T_2 ir T_3 (nuo $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $140\text{ }^{\circ}\text{C}$) yra du šalti srautai, todėl bendras šilumos kiekis turi būti nustatomas sumuojant atskirų srautų entalpijos skirtumus, veikiančius šiame intervale.

$$\Delta H = (CP_3 + CP_4)(T_2 - T_3) = (2,0 + 3,0) \cdot 40 = 200 \text{ kW}.$$

Kitame temperatūrų intervale yra vienas srautas C1. Entalpijų pokytis šiame intervale lygus:

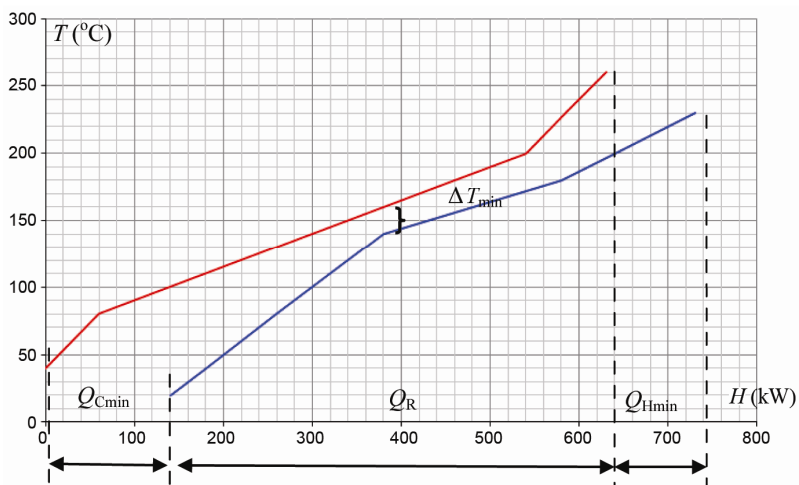
$$\Delta H = CP_3(T_3 - T_4) = 2,0 \cdot 120 = 240 \text{ kW}.$$



11 pav. Šaltų technologinių srautų pagrindinės sudėtinės kreivės konstravimas

Sudėtinės šaltų ir karštų srautų kreivės gali būti braižomos vienoje temperatūros-entalpijos plokštumoje (12 pav.). Mažiausias atstumas tarp sudėtinių kreivių lygiagrečiai su temperatūros ašimi nurodo mažiausią leistiną temperatūrų skirtumą tarp srautų $\Delta T_{\min}$, o temperatūros, esančios šiose karšto ir šalto sudėtinių kreivių vietoje, – *pinch* temperatūrą (12 pav.). *Pinch* temperatūros nustatymas yra labai svarbus tolesnei *pinch* metodikos analizei.

12 paveiksle kreivės pavaizduotos, kai mažiausias temperatūrų skirtumas $\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



12 pav. Bendras karštos ir šaltos sudėtinių kreivių vaizdavimas leidžia nustatyti tikslines energines karštų ir šaltų technologinių srautų reikšmes

Persidengiančių kreivių dengiamas plotas lygiagrečiai su entalpijos ašimi apibrėžia šilumos kiekį, kuris karštų srautų sudėtinės kreivės vertikalčiai gali būti perduotas šaltų srautų sudėtinei kreivei. Sudėtinių kreivių T–H diagramoje paslinkimas lygiagrečiai su entalpijos ašimi eis didžiausio kreivių persidengimo ploto link, t. y. prie didžiausio šilumos atgavimo / rekuperacijos esant $\Delta T_{\min}$. Analizuojamo uždavinio atveju, kai $\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, didžiausias galimas visos sistemos atgaunamas šilumos kiekis $Q_R = 490\text{ kW}$.

Entalpijos ašies srityje, kur bendra šaltos sudėtinės kreivės dalis yra už karštos sudėtinės kreivės ribų, šilumos atgavimas nėra galimas, ir šaltam srautui energija turi būti tiekiamą papildomai iš išorinių karštų šaltinių / įrenginių, pavyzdžiui, garo katilo. Ta sritis entalpijos ašyje apibūdina tikslinę reikšmę $Q_{H\min}$. Analizuojamame uždavinyje, kai $\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_{H\min} = 100\text{ kW}$.

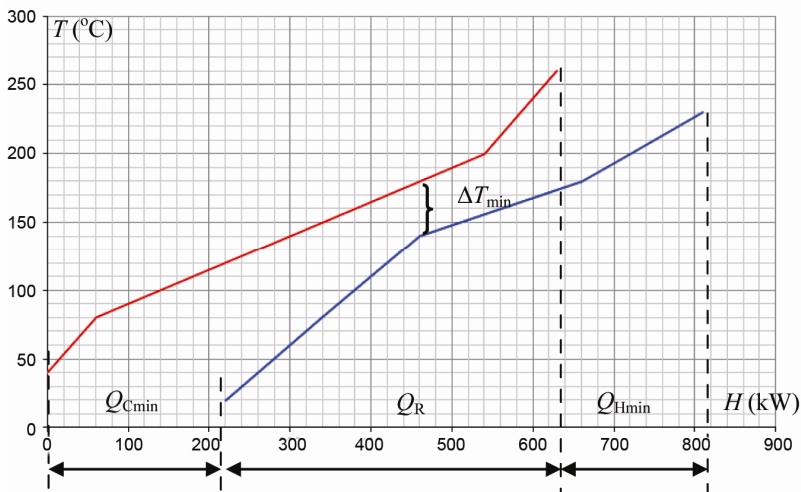
Entalpijos srityje, kur bendra karštos sudėtinės kreivės dalis išsikiša prieš bendrą šaltos sudėtinės kreivės pradžią, šilumos atgavimas nėra galimas ir karštos sudėtinės kreivės šilumos perteklius turi būti atiduotas (papildomai naudojant aušinimą arba šaldymą) išoriniams šaltiniams, pavyzdžiui, šalto vandens srautams. Ši sritis api-

brėžia šaltų šaltinių / įrenginių mažiausią galios poreikį. Analizuojamu atveju, kai $\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_{C\min} = 140\text{ kW}$.

Tikslios išorinių įrenginių / šaltinių galios ir $\Delta T_{\min}$ reikšmės fiksuoja santykinę sudėtinių kreivių padėtį. Analizuojamo proceso atveju (12 pav.) santykinis sudėtinių kreivių išdėstymas apibrėžia šilumos mainų sistemos projektavimo laisvės laipsnį. Panašiai kaip dvisrautis uždavinys, kuris išanalizuotas anksčiau, santykinis sudėtinių kreivių išdėstymas gali būti pakeistas horizontaliai perstumiant kreives viena kitos atžvilgiu. Savaimė suprantama, kad vyktų šilumos mainai, sudėtinė karštų srautų kreivė turi būti pavaizduota virš šalto srauto sudėtinės kreivės. Faktiškai tai reiškia, kad karštą srautą vaizduojanti sudėtinė kreivė turi būti braižoma arčiau temperatūros y ašies, esant visoms jos temperatūroms, nei šalto srauto sudėtinė kreivė (12 pav.).

13 paveiksle pateiktos sudėtinės kreivės taip, kad $\Delta T_{\min} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tai pasiekta sudėtinę kreivę patraukiant lygiagrečiai su H ašimi.

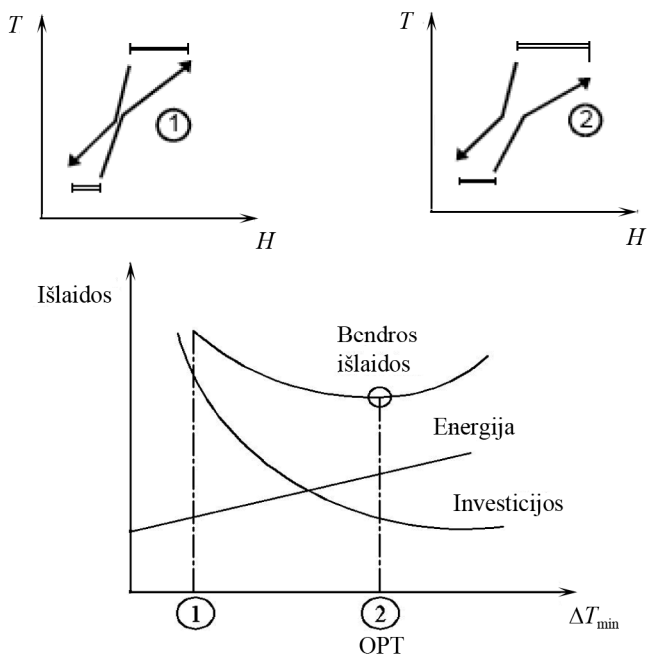
Pagrindinių sudėtinių kreivių entalpijos persidengimo sritis sumažėja, o tai reiškia, kad sumažėja energijos kiekis, kurį galima atgauti iš vidinių procesų išteklių, šiuo atveju iki $Q_R = 410\text{ kW}$. Tikslinės karštų ir šaltų išorinių įrenginių reikšmės atitinkamai padidėja iki 180 kW ($Q_{H\min}$ atveju) ir 220 kW ($Q_{C\min}$ atveju).



13 pav. $\Delta T_{\min}$ padidinimas lemia tikslinių energetinių dydžių reikšmių padidėjimą

Kadangi projekto technologinių srautų šilumos mainų kaina (tiksliau – išlaidos) susideda tiek iš išorinių įrenginių kainos, tiek iš šilumos mainų įrangos, tai $\Delta T_{\min}$ dydis turi esminę įtaką viso projekto kainai.

14 paveikslas iliustruoja bendrų išlaidų priklausomybę nuo $\Delta T_{\min}$. Jei sudėtinės kreivės liečia viena kitą, tai viename iš proceso kreivių taškų temperatūrų skirtumas lygus nuliui, o tai reiškia, kad galutiniam šilumos kiekiui, kurį turime perduoti iš karštų srautų šaltesiems, reikia be galo didelio ploto šilumokaičio, t. y. be galo didelių investicijų. Didinant temperatūrų $\Delta T_{\min}$ skirtumą didėja temperatūrų skirtumas tarp srautų, tačiau mažėja atgaunamos energijos kiekis. Abu šie veiksniai turi įtakos bendram atgaunančių šilumą šilumokaičių paviršiaus ploto mažėjimui, t. y. mažina investicijas. Kita vertus,



14 pav. Tinkama $\Delta T_{\min}$ temperatūros reikšmė nustatoma darant ekonominį kompromisą tarp konkuruojančių išorinių energijos šaltinių ir investicijų priklausomybių nuo $\Delta T_{\min}$

$\Delta T_{\min}$ temperatūros skirtumo didinimas turi įtakos tikslinių išorinių šaltinių galių didėjimui, t. y. išlaidoms vartojamai energijai ir vėsai didėti. Vadinasi, bendros projekto išlaidos susideda iš dviejų konkuruojančių dydžių. Vienas iš jų yra investicijos vidiniams srautų šilumokačiams, kurios mažėja didinant $\Delta T_{\min}$ temperatūrų skirtumą, o kitas – išlaidos išorinių šaltinių įrangai ir suvartotai energijai, kurios didėja, priklausomai nuo $\Delta T_{\min}$ kitimo (14 pav.).

Tai reiškia, kad esant šių finansinių srautų prieštaravimui atsiranda galimybė formuluoti ir išspręsti optimizacijos uždavinį, kuriame kaip optimizacijos kriterijus yra bendros projektuojamos ar modernizuojamos technologinės sistemos išlaidos. Savaimė suprantama, kad optimizavimo metu turi būti nustatyta tokia $\Delta T_{\min}$ reikšmė, kad bendros išlaidos būtų kiek įmanoma mažesnės (14 pav.) (Смит 2004).

3.2. Trečiojo skyriaus uždaviniai

1 uždavinys

Lentelėje pateikiami technologinių srautų duomenys. Pagal pateiktus duomenis ir ankstesniuose skyriuose aprašytą metodiką temperatūros-entalpijos diagramoje nubraižykite sudėtines kreives, kai $\Delta T_{\min}$ reikšmė visiems srautams lygi 16 °C.

Pagal sudėtinę kreivę nustatykite karšto ir šalto srauto *pinch* temperatūras (T_{Hpinch} ir T_{Cpinch}), minimalų reikiamą išorinio šildymo (Q_{Hmin}) ir vėsinimo (Q_{Cmin}) galios poreikį ir didžiausią galimą atgauti šilumos kiekį (Q_R).

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslo temperatūra, °C	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	160	60	2,5	–250,0
Karštas	H2	150	30	1,0	–120,0
Šaltas	C1	20	135	1,5	172,5
Šaltas	C2	80	140	3,0	180,0
Šaltas	C3	40	60	1,0	20,0

Atsakymai:

$T_{Hpinch} = 96\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{Cpinch} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q_{Hmin} = 48,5\text{ kW}$; $Q_{Cmin} = 46\text{ kW}$;
 $Q_R = 324\text{ kW}$.

2 uždavinys

Lentelėje pateikiami technologinių srautų duomenys. Pagal pateiktus duomenis temperatūros-entalpijos diagramoje nubraižykite sudėtines kreives, kai ΔT_{min} reikšmė visiems srautams yra $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pagal sudėtinę kreivę nustatykite karšto ir šalto srauto *pinch* temperatūras (T_{Hpinch} ir T_{Cpinch}), minimalų reikiamą išorinio šildymo (Q_{Hmin}) ir vėsinimo (Q_{Cmin}) galios poreikį bei didžiausią galimą atgauti šilumos kiekį (Q_R).

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Tikslo temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	166	70	2,5	-240,0
Karštas	H2	170	20	1,0	-150,0
Karštas	H3	135	40	4,0	-380,0
Šaltas	C1	60	140	3,0	240,0
Šaltas	C2	40	190	2,0	300,0

Atsakymai:

$T_{Hpinch} = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{Cpinch} = 115\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q_{Hmin} = 112,5\text{ kW}$;
 $Q_{Cmin} = 342,5\text{ kW}$; $Q_R = 427,5\text{ kW}$.

3 uždavinys

Gamykloje yra 800 kW galios $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros atliekinio garo (Q_{Hmin}). Pasitelkdami sudėtines kreives grafiškai nustatykite, kokia turėtų būti ΔT_{min} reikšmė visiems srautams, kad šis išorinis garo perteklius būtų visas panaudotas technologinių srautų sistemai šildyti. Lentelėje pateikiami technologinių srautų duomenys. Taip pat nurodykite, kokį šilumos kiekį (Q_R) šiuo atveju atgaus vidiniai šilumokaičiai.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslo temperatūra, °C	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	150	20	25,0	–3250
Karštas	H2	120	50	3,0	–210
Šaltas	C1	20	180	15,0	2400
Šaltas	C2	50	100	20,0	1000

Atsakymai:

$$\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}; Q_R = 2600 \text{ kW}.$$

4 uždavinys

Pagal pateiktus duomenis ir ankstesniuose skyriuose aprašytą metodiką temperatūros-entalpijos diagramoje nubraižykite sudėtinės kreives, kai $\Delta T_{\min}$ reikšmė visiems srautams yra 10 °C.

Pagal sudėtinę kreivę nustatykite karšto ir šalto srauto *pinch* temperatūras (T_{Hpinch} ir T_{Cpinch}), minimalų reikiamą išorinio šildymo (Q_{Hmin}) ir vėsinimo (Q_{Cmin}) galios poreikį.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslo temperatūra, °C	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	160	60	2,5	–250,0
Karštas	H2	150	30	1,0	–120,0
Šaltas	C1	20	135	1,5	172,5
Šaltas	C2	80	140	3,0	180,0

Atsakymai:

$$T_{Hpinch} = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{Cpinch} = 120^{\circ}\text{C}; Q_{Hmin} = 400 \text{ kW}; \\ Q_{Cmin} = 50 \text{ kW}.$$

5 uždavinys

Nustatykite bendras technologinių srautų sistemos gamykloje modernizavimo projekto investicijas *I*. Srautų duomenys pateikiami lentelėje.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslo temperatūra, °C	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	300	90	2,0	–420
Karštas	H2	220	100	1,0	–120
Karštas	H3	150	50	1,5	–150
Šaltas	C1	70	260	3,0	570
Šaltas	C2	50	220	1,0	170
Šaltas	C3	20	50	1,0	30

Santykinė įrenginių kaina yra tokia:

Išorinio šilumokaičio – 400 Lt/kW; išorinio aušinimo įrenginio – 150 Lt/kW; vidinių šilumokaičių – 300 Lt/kW.

Minimalus temperatūrų skirtumas tarp srautų $\Delta T_{\min} = 40$ °C.

Galias rekomenduojama nustatyti pasitelkiant sudėtinės kreives.

Atsakymas:

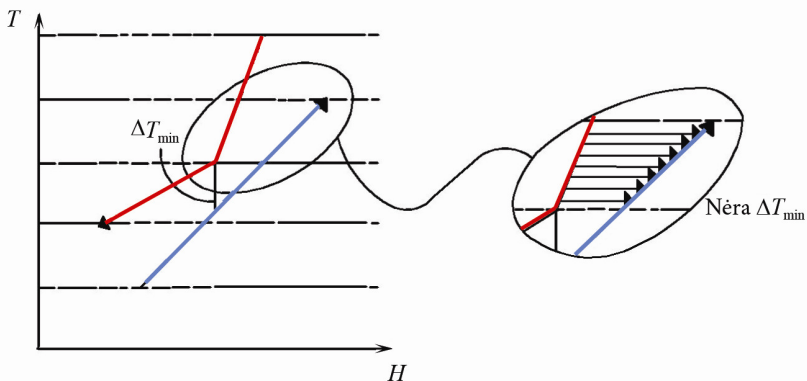
$$I = 182,5 \text{ tūkst. Lt.}$$

4. Tikslinių rodiklių paieška. Šilumos srautų lentelės algoritmas

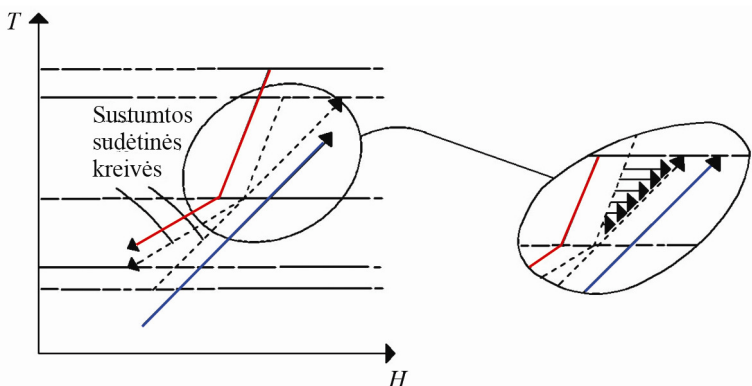
Anksčiau apžvelgtas sudėtinių kreivių vaizdavimo būdas gali būti taikomas nustatant minimalias išorinių ir maksimalias vidinių šilumokaičių galias. Taip pat šis būdas gali padėti ieškant ekonominių požiūriu priimtino minimalaus temperatūrų skirtumo tarp karšto ir šalto srautų. Tačiau šio būdo pagrindinis trūkumas yra tas, kad rezultatai gaunami grafiniu būdu. Tai labai nepatogu, nors toks vaizdavimo būdas kaip mokomoji priemonė yra labai informatyvus. Toliau analizuojamas būdas leidžia be grafinio srautų vaizdavimo nustatyti minėtus tikslinius energinius rodiklius.

Temperatūrų, kuriose vyksta technologinių srautų temperatūros pokyčiai, intervalai pirma suskaidomi į mažesnes atkarpas taip, kaip tai buvo atlikta formuojant sudėtines kreives. Tai reiškia, kad intervalų sienos / ribos bus nustatomos atsižvelgiant į atskirų srautų pradines ir tikslo temperatūras (15 pav.).

15 paveiksle matyti, kad visos karštų srautų šilumos negalima perduoti tame pačiame temperatūrų intervale esančiam šaltam srautui, nes ne visoms sudėtinių kreivių dalims pasirinktame temperatūrų intervale bus užtikrintas ne mažesnis kaip $\Delta T_{\min}$ temperatūrų skirtumas.



15 pav. Temperatūros-entalpijos diagramos skaidymas į atskirus temperatūros intervalus ($\Delta T_{\min}$ neužtikrinamas visiems numatytiems intervalams)



16 pav. Sudėtinių kreivių paslinkimas leidžia analizuojamame intervale visiškai perduoti šilumą šaltiems srautams

Ši problema gali būti išspręsta, jei tik dėl konstrukcinio sprendimo įsivaizduotume, kad karšto srauto temperatūra $\Delta T_{\min}/2$ dydžiu yra žemesnė, o šalto srauto $\Delta T_{\min}/2$ dydžiu aukštesnė, negu yra dabar. 16 paveiksle pateiktas galimas šio varianto sprendimas. Šiuo atveju karšto srauto kreivė šiek tiek nusileidžia temperatūros entalpijos skalėje, o šalto srauto kreivė tiek pat pakyla. Tokiu hipotetiniu būdu perstumtos sudėtinės kreivės liečiasi *pinch* temperatūrų taške, be to, kiekviename nagrinėjamame temperatūrų intervale tarp karšto ir šalto srautų galimi šilumos mainai, nes realybėje visuomet užtikrinamas ne mažesnis kaip $\Delta T_{\min}$ temperatūrų skirtumas.

Reikėtų atkreipti dėmesį, kad toks vertikalus kreivių perstūmimas nepakeičia kreivėmis dengiamų šilumos galios plotų, t. y. Q_R vidinių šilumokaičių galia nekinta. Taigi, nekinta ir išorinės šilumokaičių galios ir papildomam išoriniam šildymui ir vėsinimui.

Toks kreivių perstūmimas leidžia grafinį sudėtinių kreivių uždavinį spręsti taikant tam tikrą skaitinį sprendimo algoritmą.

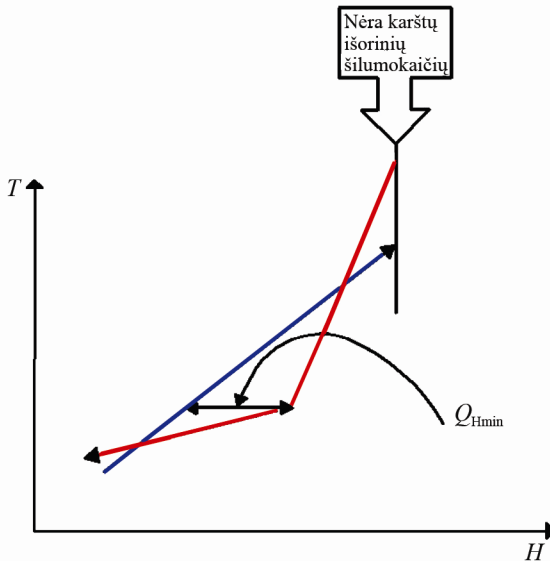
- Sudėtinių kreivių kiekvieno temperatūrų intervalo perstūmimas per $\Delta T_{\min}/2$ dydį karštų srautų temperatūrą sumažina, o šaltų srautų – padidina.
- Nustačius perstumtų srautų temperatūrų intervalus, kiekviename jų skaičiuojamas energinis balansas:

$$\Delta H_i = \left(\sum CP_C - \sum CP_H \right) \Delta T_i, \quad (5)$$

čia ΔH_i yra šilumos balansas i -ajam perstumtam temperatūros intervalui; ΔT_i – perstumto intervalo temperatūra. ΔH_i yra entalpijų skirtumas, kuris analizuojamame temperatūrų intervale turėtų būti perduotas iš karšto srauto šaltam. Tuo atveju, jei vyrauja šaltas srautas, šiame temperatūrų intervale bus šilumos trūkumas ir ΔH_i dydis bus teigiamas. Tačiau jei vyrauja karšti srautai, tai entalpijų skirtumas bus neigiamas.

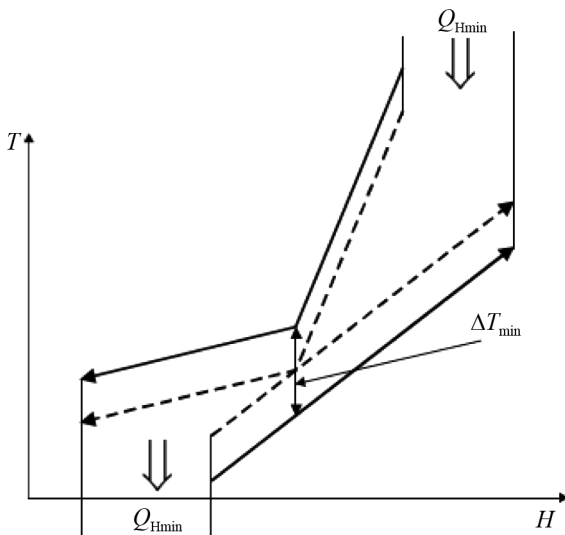
Kadangi atlikdami perstumtų temperatūrų intervalų skaičiavimus nevertiname išorinių šilumos šaltinių suteikiamos energijos, tai skaičiavimai atitinka ne tik vertikalų sudėtinių kreivių perstūmimą, bet ir papildomą horizontalų šalto srauto perstūmimą į kairę pusę per Q_{Hmin} (17 pav.).

- Toks sudėtinių kreivių perstūmimas rodo, kad šilumos mainai yra neįmanomi. *Pinch* temperatūrų taške, kur kreivės turėjo liesti viena kitą, dabar yra didžiausias atstumas, kuris atitinka mažiausią išorinio šilumokaičio galią Q_{Hmin} .



17 pav. Sudėtinių kreivių perstūmimo etapas

Tam, kad būtų pataisyta sudėtinių kreivių padėtis ir jos liestų viena kitą *pinch* taške, būtina įvertinti išorinio šilumos šaltinio galią ir ją tolygiai perskirstyti per kiekvieną iš analizuotų temperatūrų intervalų. Tačiau faktinės sudėtinės kreivės bus nutolusios per minimalų temperatūrų atstumą $\Delta T_{\min}$ (18 pav.).



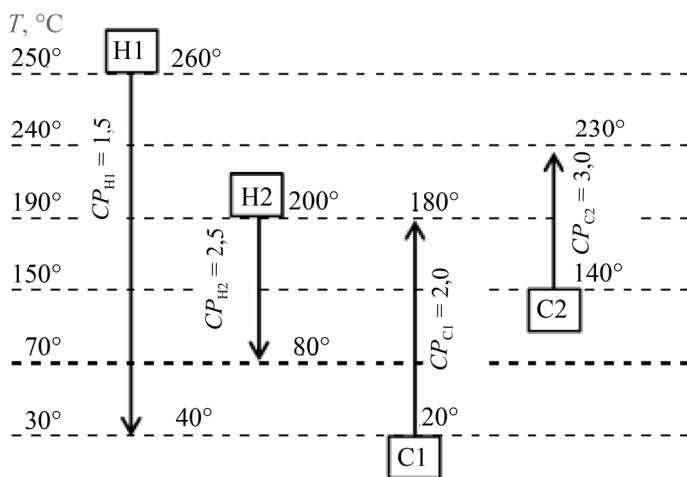
18 pav. Paskutinis sudėtinių kreivių perstūmimo etapas

Šilumos srautų lentelės skaičiavimo algoritmo taikymas pateikiamas pagal ankstesniame skyriuje išnagrinėtą pavyzdį, kurio pagrindiniai srautų duomenys buvo pateikti 3 skyriaus 2 lentelėje. 3 lentelėje pateiktos srautų faktinės ir modifikuotos temperatūros, kai $\Delta T_{\min}$ yra 20 °C.

19 paveiksle pateikiamos srautų modifikuotos temperatūros ir šiuo atveju temperatūros intervalai jau sudaromi pagal modifikuotas temperatūras. Analizuojamuoju atveju temperatūros modifikuojamos per $\Delta T_{\min}/2 = 10$ °C dydį.

3 lentelė. Analizuojamo uždavinio užduotis

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslo temperatūra, °C	Modifikuota pradinė temperatūra, °C	Modifikuota tikslo temperatūra, °C
Karštas	H1	260	40	250	30
Karštas	H2	200	80	190	70
Šaltas	C1	20	180	30	190
Šaltas	C2	140	230	150	240



19 pav. Analizuojamo uždavinio temperatūrų srautų išdėstymas modifikuotų temperatūrų intervaluose

19 paveiksle kairėje pusėje nurodomi modifikuotų temperatūrų intervalai. Punktyrinės linijos žymi tų intervalų ribas. Taip pat nagrinėjami keturi srautai: du karšti ir du šalti, nurodomos jų faktinės pradinės ir tikslo temperatūros. Pagal algoritmą kitas žingsnis apima entalpijų balanso nustatymą kiekviename iš nustatytų modifikuotų temperatūrų intervalų. 4 lentelėje pateikiami gauti rezultatai.

4 lentelė. Analizuojamojo uždavinio temperatūros intervalų šilumos balansas

Intervalų ribų temperatūros, °C	Srautų išsidėstymas	Intervalų ΔT , °C	Šilumos talpų skirtumas, kW/°C	ΔH , kW
250°				
240°		10	-1,5	-15
190°		50	1,5	75
150°		40	1,0	40
70°		80	-2,0	-160
30°		40	0,5	20
				

Lentelėje pateikiami modifikuotų temperatūrų intervalai, kiekvieno intervalo nustatytas entalpijų skirtumas. Pavyzdžiui, temperatūrų intervalo nuo 250 °C iki 240 °C entalpijų skirtumas nustatytas taip:

$$\Delta H_1 = (0 - CP_{H1}) \Delta T_{1-2} = (0 - 1,5) \cdot (250 - 240) = -15 \text{ kW}.$$

Pirmajame intervale yra tik vienas karštas srautas, todėl neigiamas entalpijų balansas rodo, kad tai šilumos perteklius.

Analizuojant antrąjį temperatūrų intervalą (nuo 240 °C iki 190 °C), jau yra du srautai – vienas karštas H1 ir kitas šaltas C2. Entalpijos balansas nustatomas taip:

$$\Delta H_2 = (CP_{C2} - CP_{H1}) \Delta T_{2-3} = (3,0 - 1,5) \cdot (240 - 190) = 75 \text{ kW}.$$

Trečiajame intervale tarp modifikuotų temperatūrų (nuo 190 °C iki 150 °C) yra visi keturi srautai:

$$\Delta H_3 = ((CP_{C1} + CP_{C2}) - (CP_{H1} + CP_{H2})) \Delta T_{3-4} = \\ ((2,0 + 3,0) - (1,5 + 2,5)) \cdot (190 - 150) = 40 \text{ kW}.$$

Ketvirtajame – tarp modifikuotų temperatūrų nuo 150 °C iki 70 °C yra trys srautai: vienas šaltas ir du karšti. Šiame intervale yra didžiausias entalpijos perteklius:

$$\Delta H_4 = (CP_{C1} - (CP_{H1} + CP_{H2})) \Delta T_{4-5} = \\ (2,0 - (1,5 + 2,5)) \cdot (150 - 70) = -160 \text{ kW}.$$

Paskutiniame penktajame modifikuotų temperatūrų intervale nuo 150 °C iki 70 °C yra du srautai: vienas karštas, o kitas šaltas. Bendras balansas atrodo taip:

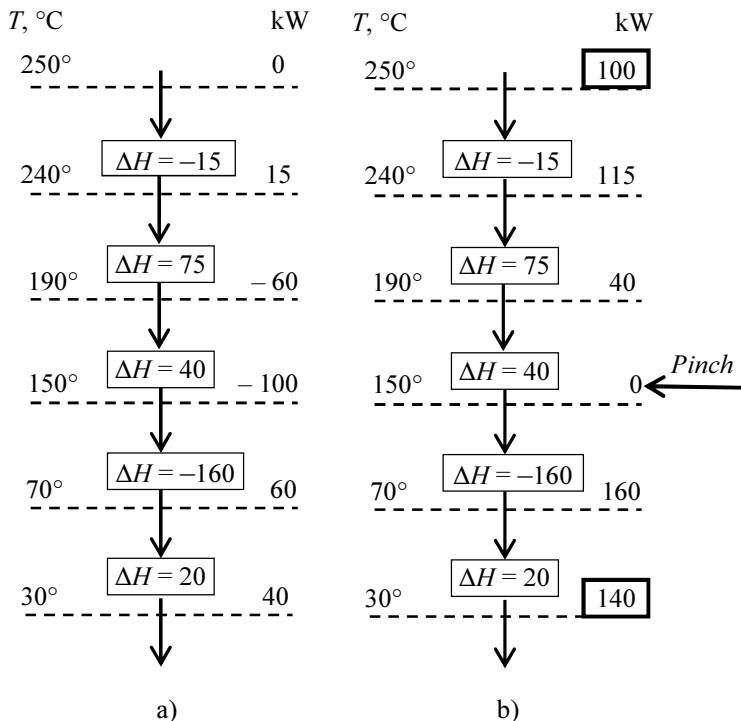
$$\Delta H_5 = (CP_{C1} - CP_{H1}) \Delta T_{5-6} = (2,0 - 1,5) \cdot (70 - 30) = 20 \text{ kW}.$$

Išdėstykite gautus rezultatus nuosekliai pagal temperatūros intervalus laiptų principu ir nukreipkite šilumos perteklių žemyn per atskirus temperatūrų intervalus. Tai galima todėl, kad šilumos perteklius, esantis aukštesnės temperatūros intervale, gali būti termodinamiškai perduotas (nes tai leidžia temperatūrų skirtumas tarp srautų) žemesniame intervale esantiems šaltiems srautams. 20 paveiksle analizuojamam pavyzdžiui pateiktas toks šilumos perdavimo atvejis. Daroma prielaida, kad pirmasis temperatūros intervalas negauna šilumos iš išorinių šilumos šaltinių (paveikslo kairėje pusėje), todėl ten nurodoma nulinė reikšmė.

Pirmajame temperatūrų intervale yra 15 kW šilumos perteklius, kuris perduodamas tolesniam intervalui. Antrasis temperatūros intervalas turi šilumos trūkumą, kurį sudaro 75 kW. Šis dydis sumažėja iki 60 kW dėl iš pirmojo intervalo perduotos perteklinės šilumos. Trečiajame intervale vėl yra šilumos trūkumas (40 kW), todėl jis sumuojamas su antrajame intervale nustatyta galia (60 kW), taigi, gauname 100 kW. Analogiškai skaičiuojami visi temperatūros intervalai. Neigiamas ženklas rodo, kad šiame intervale trūksta šilumos, o teigiamas, kad yra jos perteklius. Šiluma žemyn perduodama iš in-

tervalo į kitą intervalą iki išorinio šalto šaltinio. Toliau pateikiama visa skaičiavimo grandinė (laiptai), o tarpiniai rezultatai nurodomi laužtiniuose skliaustuose.

$$0 - (-15) = [15] - 75 = [-60] - 40 = [-100] - (-160) = [60] - 20 = [40]$$



20 pav. Atskirų temperatūros intervalų entalpijos perdavimo žemyn grandinė: kairėje, kai išorinis šildymas prilygintas nuliui; dešinėje, kai ieškoma tikslinių išorinių įrenginių galių

Atlikę skaičiavimus matome, kad kai kuriuose intervaluose (20 pav., kairėje) gaunamos neigiamos srautų reikšmės, o tai neįmanoma. Šilumos negalima perduoti į viršų, t. y. iš žemesnių temperatūrų į aukštesnes. Norint tai ištaisyti, reikia iš išorinio šilumos šaltinio tiekti tiek šilumos, kad ją perduodant vadinamaisiais laiptais žemyn

per temperatūros intervalus, neigiamos galių reikšmės taptų teigiamos arba lygios nuliui. Mažiausias toks šilumos kiekis yra lygus didžiausiai neigiamai intervalo reikšmei (20 pav., a ši reikšmė yra 100 kW).

Taigi, pradiniam intervale pridėjimas 100 kW nekeičia šiluminio kiekvieno temperatūros intervalo balanso, tačiau padidina šilumos srautą tarp intervalų, užtikrinant, kad visuose intervaluose būtų teigiamos galių reikšmės, o viena iš jų – lygi nuliui, t. y. toje vietoje, kur intervalo modifikuota temperatūra lygi 150 °C. Pirmam temperatūros intervalui gali būti perduota ir didesnis išorinis šilumos kiekis, tačiau šiuo atveju nebūtų pasiekta pagrindinių uždavinio tikslų – užtikrinti kiek įmanoma mažesnę išorinių šilumos šaltinių galių poreikį, esant numatytam $\Delta T_{\min}$. Iš viso grandinės pabaigoje lieka 140 kW šiluminės galios perteklius, kuris turi būti atiduotas / ataušintas, šis dydis nagrinėjamoju atveju yra $Q_{C\min}$. Šie rezultatai atitinka grafinio sprendimo pagal sudėtinės kreivės rezultata.

Šis skaitinis sprendimas pateikia taip pat labai svarbią informaciją apie *pinch* temperatūrų vietą, kuri nagrinėjamo atveju yra 150 °C esant modifikuotai temperatūrai; ji vadinama *pinch* tašku, nes faktinės *pinch* šalto srauto temperatūros yra 140 °C, o karšto – 160 °C.

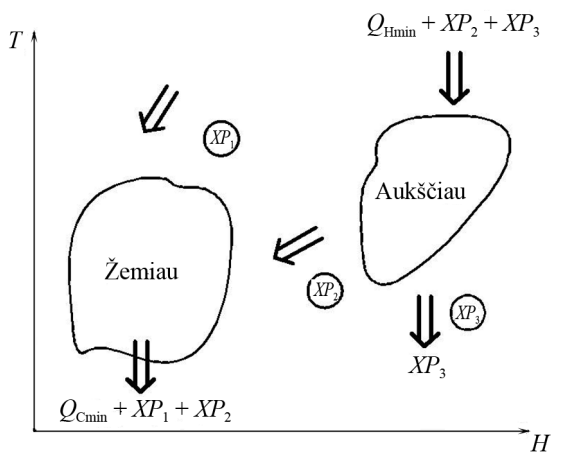
Apibendrinus analizuotą pavyzdį galima pateikti šilumos srautų lentelės algoritmo pagrindinius žingsnius:

1. $\Delta T_{\min}$ temperatūros koregavimas, taikant srautų perstūmimo taisyklę.
2. Naujų temperatūros intervalų ribų nustatymas.
3. Šiluminių balansų skaičiavimas kiekviename temperatūrų intervale.
4. Šilumos perdavimo grandinės / laiptų sukūrimas nesant papildomo išorinio šilumos poreikio.
5. Šilumos perdavimo grandinės pertvarkymas siekiant tik teigiamų kiekvieno intervalo reikšmių.

Šis pasiūlytas algoritmas leidžia nustatyti $Q_{H\min}$, $Q_{C\min}$ ir *pinch* temperatūros vietą nebraižant sudėtinių kreivių. Palyginus sudėtinių kreivių konstravimo metodą ir lentelių algoritmą galima teigti, kad vaizduojant grafiškai lengviau susipažinti su *pinch* metodo skaičiavimo principu, o antrasis būdas labiau tinka skaitiniams skaičiavimams.

Apibendrinant galima sakyti, kad šilumos laiptai pateikia svarbią informaciją inžinieriams, kuri naudinga projektuojant šilumokaičių tinklą siekiant minimalių energijos sąnaudų:

1. Minimalus energijos poreikis (išorinis šilumos ar aušinimo poreikis) gali būti apskaičiuotas remiantis srautų duomenimis ir šiluminei talpai numatytu temperatūrų skirtumu.
2. Proceso *pinch* taškai gali būti nustatyti pagal tą vietą, kur šilumos perdavimas lygus nuliui. Tai tos vietos, kur temperatūrų skirtumas yra minimalus, kad vyktų šilumos mainai tarp srautų.
3. *Pinch* taškas išskirsto procesą į dvi atskiras dalis: viena – tai šilumos trūkumas virš *pinch* taško, kita – šilumos perteklius žemiau *pinch* taško.
4. Minimalus energijos poreikis gali būti pasiektas, kai projektuojant šilumokaičių tinklą remiamasi šiomis pagrindinėmis taisyklėmis (21 pav.):
 - šiluma neturi būti tiekiama skersai *pinch* taško;
 - virš *pinch* taško neturi būti jokio išorinio aušinimo;
 - žemiau *pinch* taško neturi būti jokio išorinio šildymo.
5. Geriausias būdas laikytis minėtų taisyklių – tai sukurti atskirus šilumokaičių tinklus vietoje, esančioje virš *pinch* taško, ir vietoje, esančioje žemiau *pinch* taško.



21 pav. Šiluminio srauto, einančio per *pinch* tašką, trys sudėtinės dalys

21 paveikslas iliustruoja pagrindines klaidas, kurios didina išorinių šilumos šaltinių poreikį ir automatiškai – išlaidas ir investicijas. Projektuojant šilumokaičių tinklą šių klaidų galima būtų išvengti, jei būtų laikomasi 4-osios taisyklės.

4.1. Ketvirtąjo skyriaus uždaviniai

6 uždavinys

Pagal lentelėje pateiktus technologinių srautų duomenis ir anksčiau skyriuje aprašytą lentelės algoritimą nustatykite karšto ir šalto srauto *pinch* temperatūras (T_{Hpinch} ir T_{Cpinch}), minimalų reikiamą išorinio šildymo (Q_{Hmin}) ir vėsinimo (Q_{Cmin}) galios poreikį. ΔT_{min} reikšmė visiems srautams yra lygi 10 °C.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslo temperatūra, °C	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	165	55	2,5	–275,0
Karštas	H2	150	30	1,0	–120,0
Šaltas	C1	20	135	1,5	172,5
Šaltas	C2	80	140	3,0	180,0
Šaltas	C3	45	65	1,0	20,0

Atsakymai:

$$T_{Hpinch} = 90 \text{ °C}; T_{Cpinch} = 80 \text{ °C}; Q_{Hmin} = 15 \text{ kW}; \\ Q_{Cmin} = 37,5 \text{ kW}.$$

7 uždavinys

Pagal pateiktus duomenis nustatykite karšto ir šalto srauto *pinch* temperatūras (T_{Hpinch} ir T_{Cpinch}), minimalų reikiamą išorinio šildymo (Q_{Hmin}) ir vėsinimo (Q_{Cmin}) galios poreikį, kai ΔT_{min} reikšmė visiems srautams yra lygi 18 °C.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslo temperatūra, °C	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	170	70	1,5	–150,0
Karštas	H2	190	20	3,0	–510,0
Karštas	H3	137	40	4,0	–388,0
Šaltas	C1	65	140	3,0	225,0
Šaltas	C2	40	180	3,5	490,0

Atsakymai:

$$T_{Hpinch} = 137 \text{ °C}; T_{Cpinch} = 119 \text{ °C}; Q_{Hmin} = 68,0 \text{ kW};$$

$$Q_{Cmin} = 401,0 \text{ kW}.$$

8 uždavinys

Pagal pateiktus duomenis nustatykite karšto ir šalto srauto *pinch* temperatūras (T_{Hpinch} ir T_{Cpinch}), minimalų reikiamą išorinio šildymo (Q_{Hmin}) ir vėsinimo (Q_{Cmin}) galios poreikį, kai ΔT_{min} reikšmė visiems srautams yra lygi 30 °C.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslo temperatūra, °C	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	152	8	22,0	–3168,0
Karštas	H2	130	55	3,0	–225,0
Šaltas	C2	10	180	16,0	2720,0
Šaltas	C1	60	110	18,0	900,0

Atsakymai:

$$T_{Hpinch} = 90 \text{ °C}; T_{Cpinch} = 60 \text{ °C}; Q_{Hmin} = 1336,0 \text{ kW};$$

$$Q_{Cmin} = 1109,0 \text{ kW}.$$

9 uždavinys

Pagal lentelėje pateiktus technologinio proceso srautų duomenis nustatykite karšto ir šalto srauto *pinch* temperatūras (T_{Hpinch} ir T_{Cpinch}), minimalų reikiamą išorinio šildymo (Q_{Hmin}) ir vėsinimo (Q_{Cmin}) galios poreikį, kai ΔT_{min} reikšmė visiems srautams yra lygi 25 °C.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslo temperatūra, °C	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	170	55	1,5	-172,5
Karštas	H2	160	30	2,0	-260,0
Šaltas	C1	-2	-1	20,0	20,0
Šaltas	C1	20	155	1,5	202,5
Šaltas	C2	80	130	2,5	125,0

Atsakymai:

$$T_{Hpinch} = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{Cpinch} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}; Q_{Hmin} = 30 \text{ kW};$$

$$Q_{Cmin} = 115 \text{ kW}.$$

10 uždavinys

Nustatykite bendras technologinių srautų sistemos gamykloje modernizavimo projekto investicijas I , kai $\Delta T_{min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kaip pasikeis bendrosios investicijos, jei ΔT_{min} bus padidintas iki $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$?

Srautų duomenys pateikiami lentelėje.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslo temperatūra, °C	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	310	50	1,4	-364,0
Karštas	H2	200	100	1,0	-100,0
Karštas	H3	140	45	1,5	-142,5
Šaltas	C1	66	250	2,5	460,0
Šaltas	C2	58	230	1,5	258,0
Šaltas	C3	20	51	1,0	31,0

Santykinės investicijos yra tokios:

Išoriniam šilumokaičiui – 500 Lt/kW.

Išoriniam aušinimo įrenginiui – 180 Lt/kW.

Vidiniams šilumokaičiams – 350 Lt/kW.

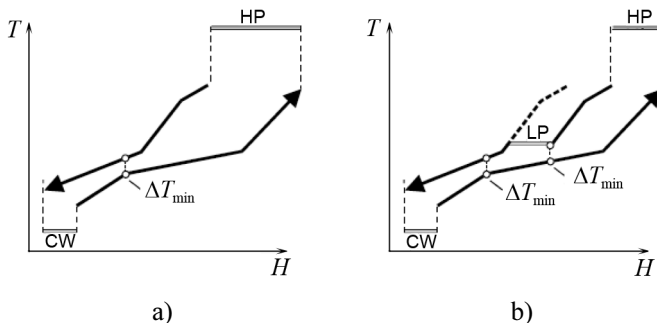
Atsakymas:

Kai $\Delta T_{min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 306,2$ tūkst. Lt.

Kai $\Delta T_{min} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 315,8$ tūkst. Lt.

5. Pagrindinė sudėtinė kreivė ir jos konstravimo principai

Kaip buvo analizuota ankstesniuose skyriuose, sudėtinės kreivės yra tinkama vaizdinė priemonė norint nustatyti karštų ir šaltų technologinių srautų šilumos atgavimo galimybes. Pagrindinis šio metodo trūkumas – sudėtingas tikslių skaitinių rezultatų nustatymas ir nepakankamas lankstumas, keičiant vieną ar kitą kreivės parametą. Sudėtinės kreivės leidžia nustatyti didžiausią atgaunamą šilumos kiekį tarp analizuojamų technologinių srautų, mažiausią reikalingą išorinį šildymo ir vėsavimo poreikį ir kiekvieno srauto *pinch* temperatūras. Tačiau ne visuomet išoriniai šaltiniai gali būti vienalyčiai, t. y. vienodų temperatūrų lygių. Jei yra įvairių lygmenų įrenginių, pvz., garo, šaldymo, karštos naftos (tepalų), degimo produktų, pagrindinis uždavinys yra maksimizuoti pigiausio energijos šaltinio lygmens naudojimą. Pavyzdžiui: vietoje didelio slėgio garo naudoti mažo slėgio garą. O sudėtinės kreivės pateikia tik energijos tikslus dydžius, bet aiškiai neparodo, kiek energijos reikia tiekti skirtingų lygmenų įrenginiams (22 pav.) (Kemp 2007).



22 pav. Sudėtinės kreivės, rodančios įprastus išorinius šilumos šaltinius (a): didelio slėgio garo (HP) ir šalto vandens (CW); dviejų lygių šilumos šaltinius (b): didelio slėgio garo (HP) ir mažo slėgio garo (LP)

Sudėtinės kreivės, pateiktos 22 pav., a, parodo papildomą šilumos poreikį esant dideliame slėgiui ir aušinimo vandeniui, o 22 pav., b

pateiktas kitas sudėtinės kreivės konstravimo būdas naudojant mažo slėgio garą, kuris mažina didelio slėgio poreikį. Vidutinį slėgį galima naudoti iki leistino minimalaus temperatūros skirtumo. Kreivėje matome maksimalų didžiausią mažo slėgio dydį, kuris gali pakeisti didelio slėgio garo poreikį. Kiekvieną kartą, kai pridodamas papildomas įrenginys, panaši procedūra ir vėl turi būti pakartota, norint pasiekti naują įrenginio poreikio lygį. Taigi, sudėtinės kreivės forma keisis, kai tik bus įdiegtas naujas įrenginys ar priemonė. Todėl ji gali tapti gana sudėtinga, jei yra keli energijos šaltinių lygiai.

Įvertinus minėtą problemą, sudėtinė kreivė nėra pats geriausias būdas, leidžiantis efektyviai išnaudoti įvairius įrenginių gamyklos lygius, nes šios kreivės dydis ir forma keisis, keičiant įrenginių išsidėstymą. Tačiau reikalinga aiški grafinė priemonė, kuri leistų optimaliai išdėstyti įrenginių tinklą, naudojant kiek įmanoma pigesnę energijos šaltinį. Šiai problemai spręsti naudojama pagrindinė sudėtinė kreivė (angl. *grand composite curve*)

Šilumos srautų lentelės algoritmo rezultatai yra pagrindas konstruojant pagrindinę sudėtinę kreivę.

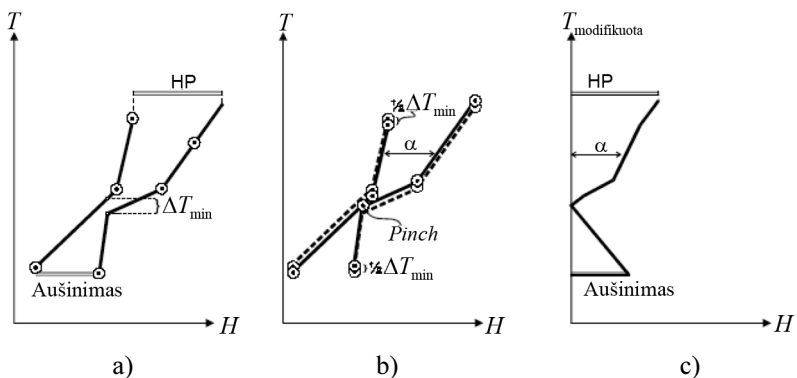
Reikia atkreipti dėmesį, kad pasirinktas $\Delta T_{\min}$ daro įtaką šilumos laiptų grandinei, taip pat pagrindinei sudėtinei kreivei. Tačiau sudėtinei kreivei šio dydžio pokytis turi įtakos tik esant lygiagrečiam poslinkiui vienas kito atžvilgiu. Reikia pastebėti, kad proceso *pinch* temperatūros, priklausomai nuo $\Delta T_{\min}$, taip pat gali turėti gana staigių pagrindinės sudėtinės kreivės pokyčių.

Jei vidutinės ar modifikuotos atskirų intervalų temperatūros yra pateiktos, tuomet pagal jas galima pavaizduoti šilumos srautus grafiškai. Vidutinės temperatūros taip pat yra modifikuotos temperatūros, kurios perskaičiuojamos tam, kad toje pačioje diagramoje nereikėtų braižyti dviejų šiltų ir šaltų srautų. Kol tenkinamas $\Delta T_{\min}$, tarp realių (T) ir modifikuotų (T^*) temperatūrų egzistuoja toks ryšys:

karštų procesų įrenginiai / srautai $T_h = T_h - \Delta T_{\min} / 2$.

šaltų procesų įrenginiai / srautai $T_c = T_c + \Delta T_{\min} / 2$.

Grafinis didžiosios sudėtinės kreivės sudarymo procesas pateikiamas 23 paveiksle.

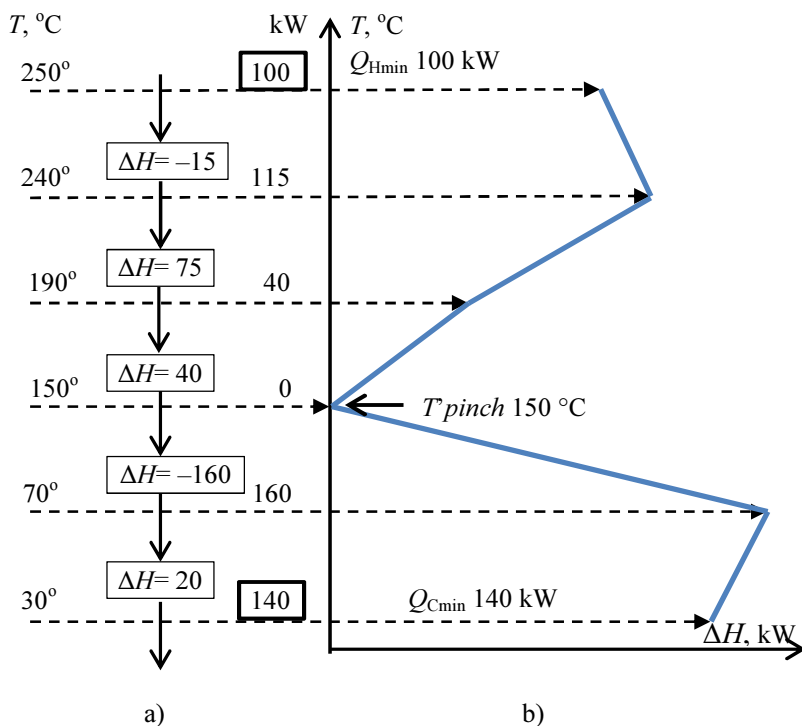


23 pav. Pagrindinės sudėtinės kreivės konstravimo eiliškumas: sudėtinės kreivės (a); perstumtos sudėtinės kreivės, esant modifikuotoms temperatūroms (b); pagrindinė sudėtinė kreivė (c) (Kemp 2007)

23 paveiksle grafiškai pateikta pagrindinės sudėtinės kreivės sudarymo eiga arba principas. Įprastos dvi karšto ir šalto technologinių srautų sudėtinės kreivės (23 pav., a) yra sustumiamos modifikuojant temperatūras. Abu srautai liečiasi *pinch* taške. Paskutiniame etape (23 pav., c) karšto srauto kreivė ištiesinama, o šalto srauto sudėtinė kreivė braižoma išlaikant tuos pačius atstumus tarp karštos ir šaltos technologinių sudėtinių kreivių.

Konkretus pagrindinės sudėtinės kreivės formavimo pavyzdys pateiktas 24 paveiksle. Analizuojamo pavyzdžio, kuris šiame leidinyje naudojamas visuose pagrindiniuose skyriuose, duomenys pateikti 3 skyriaus 2 lentelėje.

23 pav., a pateikta šilumos laiptų grandinė, einanti per visus analizuotus modifikuotos temperatūros intervalus. Dešinėje pusėje vaizduojama pagrindinė sudėtinė kreivė. Ji formuojama temperatūros-entalpijos diagramos skalėje prie kiekvienos modifikuotos temperatūros atidedant kiekvieno intervalo galią (jau įvertinus išorinių šaltinių indėlį).



24 pav. Pagrindinės sudėtinės kreivės konstravimas naudojant temperatūros intervalų šilumos laiptų grandinę

Pastaba: pateikto pavyzdžio temperatūros intervalai išdėstyti ne pagal mastelį, nes siekta, kad būtų aiškiai matomos visos detalės, tačiau realiai konstruojant pagrindinę sudėtinę kreivę, būtina laikytis mastelio.

5.1. Penktojo skyriaus uždaviniai

Siekiant geriau įsisavinti pagrindinės sudėtinės kreivės sudarymo principus rekomenduojama naudotis jau išspręstų uždavinių (nuo 6 iki 10) duomenimis ir rezultatais.

Taip pat galima naudotis 1–5 ir 11–15 uždavinių duomenimis, tačiau šiuo atveju papildomai reikės atlikti lentelių skaičiavimus. Minėtų uždavinių atsakymai jau yra pateikti.

6. Šilumokaičių maksimalaus šilumos atgavimo tinklo projektavimas

Šilumokaičių šilumos atgavimo tinklas projektuojamas naudojant srautų tinklo diagramą (arba tiesiog tinklo diagramą), kurioje labai aiškiai ir suprantamai išdėstomi karšti ir šalti srautai. Pagal anksčiau aptartą metodiką nustatytos *pinch* šaltų ir karštų srautų temperatūros taip pat nurodomos pradinėje tinklo diagramoje. Šios temperatūros dalija diagramą į dvi dalis: esančias virš *pinch* taško ir žemiau *pinch* taško. Dažniausiai *pinch* temperatūros tinklo diagramoje žymimos punktyrine linija, ant karštų ir šaltų srautų nurodant nustatyto *pinch* taško temperatūras. Tarp karštų ir šaltų srautų *pinch* temperatūrų turi būti minimalus leistinas temperatūrų skirtumas, kuris jau buvo apibrėžtas užduotyje (sprendžiant sudėtingus optimizavimo uždavinius šis rodiklis nustatomas pagal techninius ir ekonominius kriterijus).

Tuo atveju, kai tinklas planuojamas siekiant didžiausio šilumos atgavimo, tinklo projektavimo metodika reikalauja, kad šilumokaičiai būtų projektuojami dalyse atskirai: virš *pinch* taško ir žemiau *pinch* taško, t. y. esama sistema skaidoma per *pinch* temperatūras į dvi dalis / posistemes – prieš *pinch* tašką ir už *pinch* taško. Tuomet pagal tam tikras taisykles šilumokaičių tinklai projektuojami kiekvienai posistemei atskirai.

Šilumokaičių šilumos atgavimo tinklas pradedamas projektuoti nuo diagramos vidurio, t. y. nuo *pinch* temperatūrų. Taip daroma todėl, kad būtent ten yra mažiausia šilumokaičių išdėstymo pasirinkimo laisvė ir problemiškesniausia viso tinklo vieta, nes šilumokaičiai turi ataušinti arba pašildyti analizuojamą srautą iki *pinch* temperatūrų. Tokie šilumokaičiai vadinami *pinch* šilumokaičiais. Reikia paminėti, kad tinklo diagramoje vaizduojami šilumokaičiai gali būti dviejų tipų: vidiniai ir išoriniai. Vidiniai šilumokaičiai diagramoje dažniausiai žymimi dviem tarp srautų sujungtais apskritimais (šalia dažniausiai nurodoma šio šilumokaičio galia).

Išoriniai šilumokaičiai žymimi ant srauto apskritimu, kurio viduryje nurodoma šilumokaičio paskirtis. Šilumokaitis, srautą pašil-

dantis iki projekcinės temperatūros, žymimas raide H (angl. *hot*), atvėsinantį – C (angl. *cold*).

Šilumokaičių tinklas projektuojamas (ypač *pinch* šilumokaičių) tam tikra tvarka, kuri gerokai palengvina sprendimų priėmimą ir leidžia gana greitai pasiekti gerą rezultatą. Reikėtų atkreipti dėmesį į tai, kad kuo daugiau atliekant analizę nagrinėjama karštų ir šaltų srautų, tuo daugiau yra galimų šilumokaičių tinklo įrengimo variantų, nes tokiu atveju padidėja galimų atskirų srautų jungimo variantai.

Pagrindiniai šio šilumokaičių tinklo projektavimo metodo etapai yra šie:

- Sistemos suskaidymas schemeje į dvi atskiras dalis per *pinch* temperatūras;
- Projektuoti pradedama nuo *pinch* temperatūrų ir einama tolyn nuo jų;
- *Pinch* šilumokaičiams, kurie vaizduojami projektavimo schemeje, abiejose *pinch* temperatūros ribos pusėse galioja taisyklės:
 - srautų, kurie išteka nuo *pinch* temperatūros linijos, turi būti daugiau arba lygu skaičiui tų srautų, kurie įteka.
 - srautų, kurie išteka nuo *pinch* temperatūros linijos, šiluminė talpa turi būti didesnė arba lygi įtekančio srauto šiluminei talpai.
- Šilumokaičius lengviau įrengti tarp srautų pagal šiluminių talpų ir srautų lentelę (kurioje nurodomos šiltų ir šaltų srautų šiluminės talpos mažėjančia tvarka bei šaltų ir karštų srautų skaičius);
- Projektuojant siekiama perduoti visą srauto šilumą – tokiu būdu užtikrinamas mažiausias šilumokaičių skaičius. Jei visa srauto šiluma perduodama, tuomet srautas schemeje pažymimas;
- Po suprojektuotais *pinch* šilumokaičiais numatomi projektuoti kiti šilumokaičiai, kurie naudojami likusiam šilumos atgavimo potencialui panaudoti;
- Galutinio šilumokaičių projekto sujungimas per *pinch* temperatūras.

Remiantis aprašytąja metodika toliau pateikiamas skaičiavimo pavyzdys.

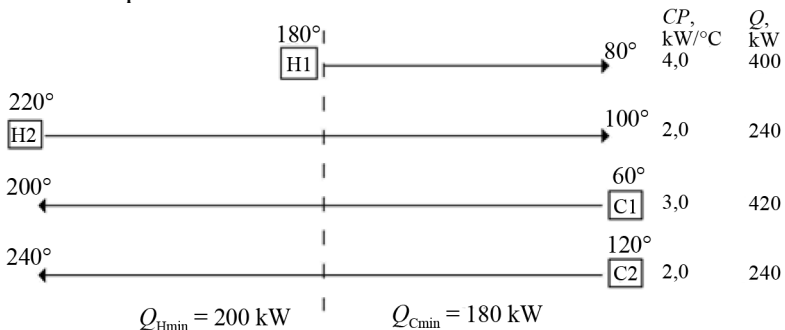
6.1. Skaičiavimo pavyzdys

Analizuojama šilumos atgavimo šilumokaičių įrengimo galimybė, projektuojant naują šilumokaičių tinklą. Siekiama atgauti didžiausią galimą šilumos kiekį. Sistemą sudaro du karšti srautai, kuriuos reikia ataušinti, ir du šalti srautai, kuriuos reikia pašildyti. 5 lentelėje pateikiami pagrindiniai rodikliai.

5 lentelė. Analizuojamo uždavinio užduotis

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslinė temperatūra, °C	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	180	80	4,0	–400
Karštas	H2	220	100	2,0	–240
Šaltas	C1	60	200	3,0	420
Šaltas	C2	120	240	2,0	240

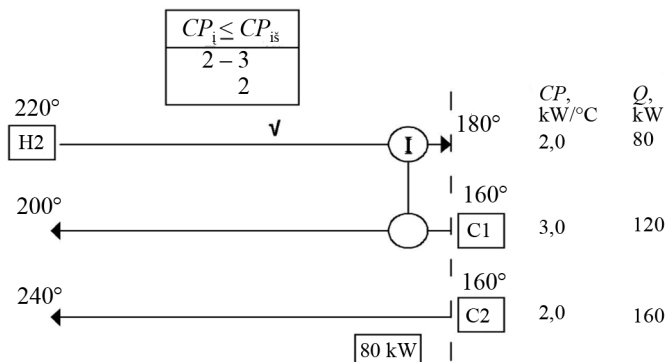
Remiantis 5 lentele, braižoma visų srautų tinklo diagrama (25 pav.). Nurodomi srautų pavadinimai ir kryptis, pradedant nuo karštų srautų (iš kairės į dešinę). Šiuo atveju srautų temperatūros neturi įtakos tinklo diagramos skalei, t. y. srautai vaizduojami vieno ilgio. Virš srautų pateikiamos pradinės ir tikslo temperatūros, srauto šiluminė talpa ir bendra viso srauto galia, kurios reikia srautui pašildyti arba atvėsinti iki tikslo temperatūros. Punktyrinė linija žymi *pinch* temperatūros vietą. *Pinch* temperatūros nurodomos tolesniuose analizės etapuose.



25 pav. Analizuojamo pavyzdžio tinklo srautų diagrama

Remiantis ankstesniuose skyreliuose aprašyta metodika įvertinus numatytą $\Delta T_{\min} = 20^\circ\text{C}$, nustatyta mažiausia reikalinga išorinė šildymo ir vėsinimo galios, lygios išoriniam šildymui $Q_{H\min} = 200\text{ kW}$ ir išoriniam vėsinimui $Q_{C\min} = 180\text{ kW}$.

Šilumokaičių tinklo projektavimas pradedamas nuo *pinch* temperatūrų zonos, dalijant tinklo diagramą į dvi dalis. Pirmieji projektuojami *pinch* šilumokaičiai, kuriuos planuojant būtina atsižvelgti į taisyklę, kad srautų, kurių pradinė temperatūra yra *pinch* temperatūra, šiluminė talpa turi būti didesnė arba lygi srauto, kurio tikslo temperatūra lygi *pinch* temperatūrai, šiluminei talpai. Analizuojamuoju atveju ištekančys srautai, kuriuos reikia pašildyti, yra šalti srautai C1 ir C2. Rekomenduojama pradėti nuo tų srautų, kurių šiluminė talpa yra didžiausia ir kuri pagal reikšmę yra artimiausia įtekančio srauto šiluminei talpai. Kad būtų lengviau identifikuoti, šių srautų reikšmės surašomos lentelėje (26 pav. viršuje).



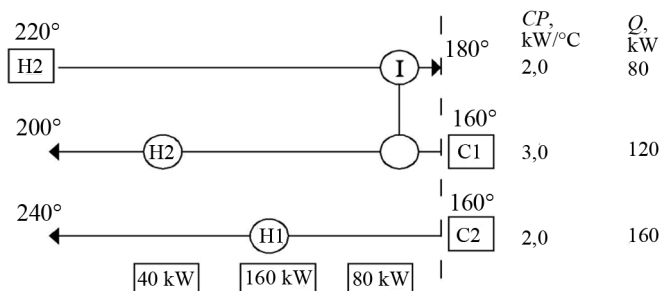
26 pav. I šilumokaičio įrengimas virš *pinch* temperatūrų

Siekiant kiek įmanoma mažinti šilumokaičių skaičių, reikia stengtis, kad šilumokaičio galia atitiktų bent vieno iš jungiamų srautų šilumos galią. 26 paveiksle matyti, kad karštas srautas turi būti atvėsintas iki *pinch* temperatūros nuo 220°C iki 180°C . Šilumos srautas, kurį gali atiduoti šis technologinis srautas, pagal (3) lygtį lygus 80 kW . Didžiausia šiluminė talpa yra šalto srauto C1 – $3,0\text{ kW/}^\circ\text{C}$, o bendra srauto galia yra didesnė nei karšto srauto H2 – 120 kW . Taigi šiuos srautus sujungus šilumokaičiu, kurio galia 80 kW , visa karšto

H2 srauto galia perduodama šaltam srautui C1. Visas buvęs karšto srauto išnaudotas potencialas pažymimas varnele (26 pav.), norint atskirti srautus, kurių potencialas jau išnaudotas.

Analizuojamame pavyzdyje daugiau karštų srautų virš *pinch* temperatūrų nėra, todėl vidinio šilumos pertekliaus, kurį būtų galima perduoti šaltam srautui, taip pat nėra.

Kitas žingsnis – įrengti išorinius šaltinius, kurių galios pakaktų pašildyti šaltiems srautams iki tikslo temperatūros.



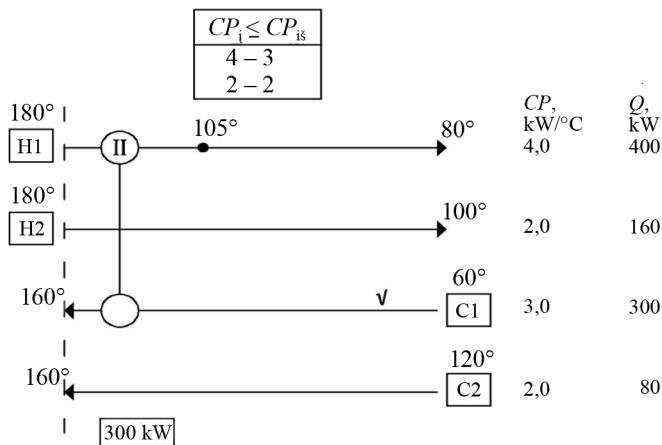
27 pav. Užbaigtas šilumokaičių tinklas virš *pinch* temperatūrų srautų

Skaičiuojamuoju atveju C1 srautui trūksta papildomos 40 kW (šilumokaitis H2) išorinio šilumos šaltinio galios, o srautas C2 turi būti pašildytas nuo 160 °C iki 240 °C, o tai įvertinus srauto šiluminę talpą sudaro 160 kW (šilumokaitis H1) (27 pav.). Susumavę šių dviejų įrenginių galias gauname 200 kW, šis dydis sutampa su (25 pav.) Q_{Hmin} . Šilumokaičių tinklo projektavimas virš *pinch* temperatūrų baigtas.

Pereinama prie kitų srautų, kurie išdėstyti žemiau *pinch* temperatūros. Analogiškai kaip ir virš *pinch* temperatūros projektuotame šilumokaičių tinkle nurodomos kiekvieno srauto galios, atskirų srautų šiluminės talpų reikšmės.

Pagal šiluminės talpos taisyklę susiejami karšti ir šalti srautai. Matome, kad karštam srautui H1 tinkamiausias yra šaltas srautas C1, nes jų šiluminės talpos yra gana artimos ir atitinka šiluminės talpos taisyklės reikalavimus. II šilumokaičio galia bus 300 kW, nes tai maksimalus šilumos kiekis, kurį galima perduoti pašildant šaltą srau-

ta C1 nuo 60 °C iki 160 °C (28 pav.). Tačiau karštas srautas H1 neatvėsta iki tikslo temperatūros, nes srauto galia yra 400 kW. Kitą 100 kW šilumos kiekį arba reikės perimti dar vienu vidiniu šilumokaičiu, arba įrengti išorinį aušinimo įrenginį.



28 pav. Šilumokaičio II įrenginys srautų tinkle, esantis žemiau *pinch* temperatūros ribos

Karšto srauto H1 temperatūra už II šilumokaičio nustatoma pagal tokią formulę:

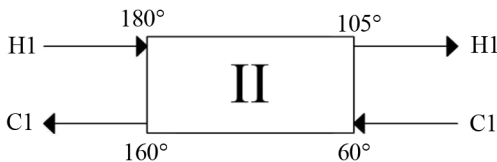
$$T_{Hi} = T_{Hipinch} - \frac{Q_{Hi}}{CP_{Hi}} \quad (5)$$

čia T_{Hi} yra i -ojo karšto srauto temperatūra už šilumokaičio (°C); $T_{Hipinch}$ – i -ojo srauto temperatūra prieš šilumokaitį (°C); Q_{Hi} – i -ojo šilumokaičio galia (kW); CP_{Hi} – i -ojo srauto šiluminė talpa (kW/°C) Įrašius faktines reikšmes:

$$T_{H1} = T_{H1pinch} - \frac{Q_{H1}}{CP_{H1}} = 180 - \frac{300}{4} = 105 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Schemoje nurodžius temperatūras, reikia patikrinti, ar suprojektuotas šilumokaitis užtikrins šilumos mainus. Faktiškai visais atvejais naudojami priešsroviniai šilumokaičiai, nes jie beveik visuomet yra

pranašesni už pasrovinius. Priešsrovinių šilumokaičių yra mažesnis plotas ir užtikrinami pakankami šilumos mainai. 29 paveiksle pateikiamas šilumokaitis, kuriame pažymėti visi įeinantys ir išeinantys karštas ir šaltas srautai ir nurodomos visų šių srautų temperatūros.



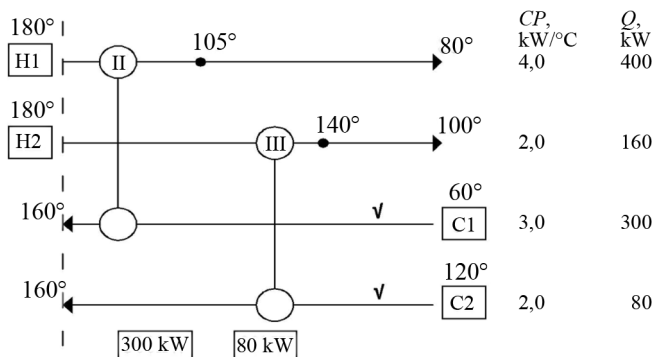
29 pav. II šilumokaičio srautų temperatūrinė analizė

Pagrindinė sąlyga yra ta, kad temperatūrų skirtumas tiek vienoje šilumokaičio pusėje, tiek kitoje būtų lygus arba didesnis už $\Delta T_{\min}$. Priešingu atveju, jei šis skirtumas mažesnis, šilumos mainai šilumokaityje gali nevykti arba tam, kad jie vyktų, reikės ypač didelio šilumokaičio ploto. Toks šilumokaitis ekonomiškai nenaudingas. Būtina atkreipti dėmesį į karšto ir šalto srautų temperatūras – karšto srauto temperatūros tiek prieš, tiek už šilumokaičio visuomet turi būti aukštesnės už šalto srauto, nes kitaip nevyks šilumos mainai.

Kaip matyti iš 29 paveikslo, karšto srauto temperatūros visais atvejais yra aukštesnės už šalto srauto. Įtekančių į šilumokaitį srautų temperatūros skirtumas yra $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – jis prilygsta minimaliam nustatytam temperatūrų skirtumui. Ištekančio iš šilumokaičio karšto srauto temperatūra yra net $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ didesnė nei įtekančio šalto srauto temperatūra. Galima teigti, kad šilumos mainai vyks, nes visi reikalavimai įvykdyti.

Kitame žingsnyje jungiami kiti du technologiniai srautai H2 ir C2. Kadangi jų abiejų šiluminė talpa yra vienoda, tai neprieštarauja anksčiau minėtai entalpijų sąlygai.

Karšto srauto H2 galia yra 160 kW , o šalto srauto – tik 80 kW , todėl siekiant didžiausio šilumos atgavimo geriausias sprendimas yra 80 kW galios šilumokaičio įrengimas, nes šiuo atveju užtikrinamas visas šalto srauto šilumos poreikis.

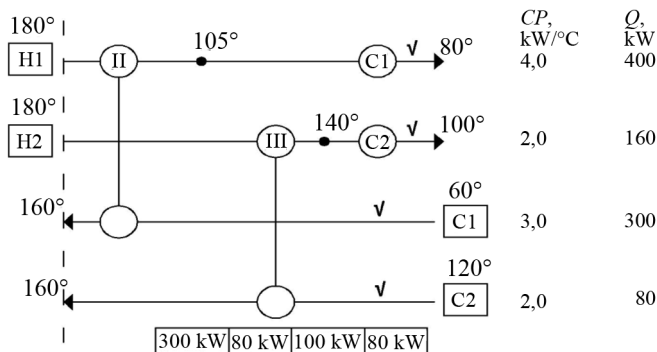


30 pav. Analizuojamo pavyzdžio *pinch* šilumokaičio įrengimas

Tačiau karštas srautas nebus atvėsintas iki tikslo temperatūros, nes dar yra 80 kW galios šilumos perteklius, kuris turi būti pašalintas iš karšto srauto. Karšto srauto temperatūra, įrengus III šilumokaitį, nustatoma taip:

$$T_{H2} = T_{H2\text{pinch}} - \frac{Q_{H2}}{CP_{H2}} = 180 - \frac{80}{2} = 140 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

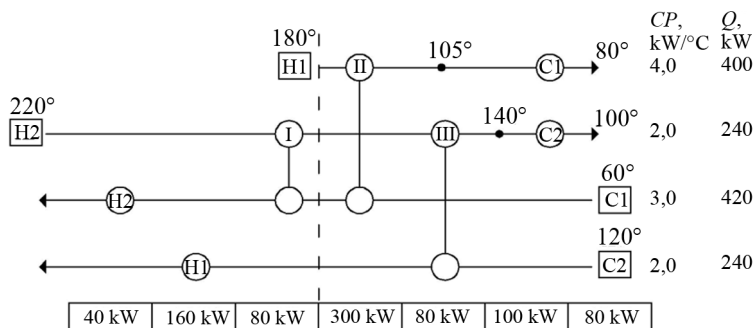
Kaip matyti iš 30 paveikslo, visi šalti srautai, kurių šilumos poreikis užtikrinamas vidiniais šilumokaičiais, jau yra pašildyti iki *pinch* temperatūros. Abu karšti srautai nėra atvėsinti iki tikslo temperatūros, todėl reikalingi papildomi išoriniai aušinimo įrenginiai, kurių išdėstymas pateiktas 31 paveiksle.



31 pav. Išorinių aušinimo šilumokaičių (aušintuvių) įrengimas

Pirmasis išorinis įrenginys – aušintuvė (C1) įrengiama ant karšto srauto H1. Šio įrenginio galia yra 100 kW. Antrasis išorinis įrenginys planuojamas projektuoti 80 kW, galios aušintuvė įrengiama ant C1 šalto srauto. Aušintuvės kaip išorinį šaltinį gali naudoti šaltą vandenį, kuris perimtą šilumą atiduoda į aplinką.

Įrengus paskutinį šilumokaitį ir užtikrinus, kad visi srautai pasiekia projektines temperatūras, baigiamas žemiau *pinch* temperatūrų esančios technologijos srautų posistemės projektavimas.



32 pav. Suprojektuotas šilumokaičių tinklas, esant didžiausiam vidiniam šilumos atgavimui ir nurodytai $\Delta T_{\min}$

Baigiamojoje fazėje abi posistemių dalys sujungiamos per *pinch* temperatūras ir gaunamas galutinis analizuotos technologinių srautų sistemos šilumokaičių tinklas (32 pav.). Šis tinklas užtikrina didžiausią galimą šilumos atgavimą per vidinius šilumokaičius, mažiausią galimą išorinį šildymą ir išorinį aušinimą tarp karšto ir šalto srautų esant nurodytam minimaliam temperatūrų skirtumui $\Delta T_{\min}$.

6.2. Tinklo projektavimas skaidant srautus

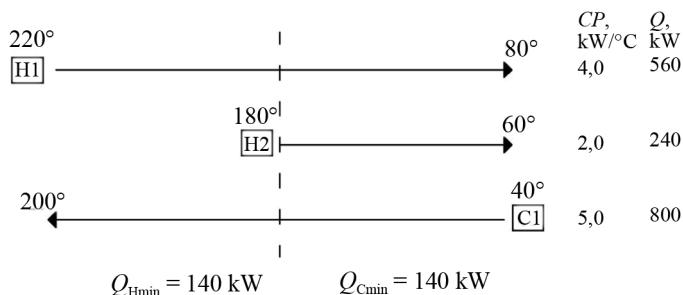
Ankstesniame skyrelyje pateiktas šilumokaičių tinklo projektavimo pavyzdys rodo, kaip galima gana lengvai įrengti šilumokaitį, kai srautų charakteristikos atitinka šiluminės talpos reikalavimus / taisykles. Tačiau ką daryti, jei srautai šių taisyklių neatitinka, arba srautų skaičius, siekiant užtikrinti vidinį šilumos atgavimą, yra

nepakankamas? Toliau nagrinėjamame pavyzdyje (6 lentelė) bus pasiūlytas galimas minėtos problemos sprendimas.

6 lentelė. Analizuojamo uždavinio užduotis

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, °C	Tikslinė temperatūra, °C	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	220	80	4,0	–560
Karštas	H2	180	60	2,0	–240
Šaltas	C1	40	200	5,0	800

Pagal pateiktas srautų charakteristikas braižoma visų srautų tinklo diagrama (33 pav.). Analogiškai kaip ir ankstesniame pavyzdyje pateikiami pagrindiniai srautų rodikliai.

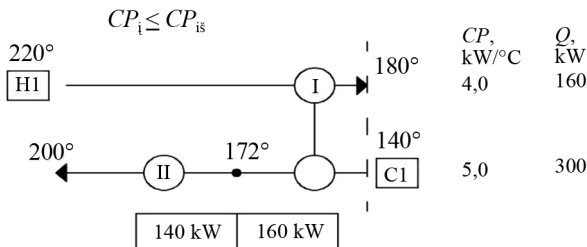


33 pav. Analizuojamo pavyzdžio tinklo srautų diagrama

Remiantis ankstesniuose skyreliuose aprašyta metodika, įvertinus numatytą $\Delta T_{min} = 40 \text{ °C}$, nustatyta mažiausia reikalinga išorinė šildymo ir vėsinimo galios, kurios lygios išoriniam šildymui $Q_{Hmin} = 140 \text{ kW}$ ir išoriniam vėsinimui $Q_{Cmin} = 140 \text{ kW}$.

Tinklo diagramą padalijus į dvi dalis, šilumokaičių tinklo projektavimas pradedamas nuo *pinch* temperatūrų zonos. Pirmieji įrengiami *pinch* šilumokaičiai. Projektuojant šiuos šilumokaičius būtina atsižvelgti į taisyklę, kad srautų, kurie teka nuo *pinch* temperatūros linijos, šiluminė talpa turi būti didesnė arba lygi srauto, kurio tikslo temperatūra sutampa su *pinch* temperatūra, šiluminei talpai. Anali-

zuojamuoju atveju virš *pinch* temperatūros esančioje schemos dalyje yra tik du srautai – vienas šiltas, o kitas šaltas. Jų šiluminės talpos rodikliai atitinka nurodytos taisyklės reikalavimus (34 pav.).

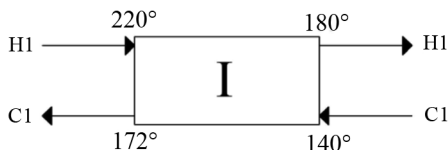


34 pav. I šilumokaičio įrengimas virš *pinch* temperatūros sistemos dalyje

Šiuo atveju siekiant minimizuoti šilumokaičių skaičių įrengiamas tik vienas vidinis šilumokaitis, kuris perduoda visą karšto srauto šilumą šaltam technologiniam srautui. Šilumokaitis projektuojamas nuo *pinch* temperatūros ribos, o jo galia šioje sistemos dalyje atitinka karšto srauto H1 galią 160 kW. Šaltas technologinis srautas nebus pašildytas iki tikslo temperatūros, todėl dar 140 kW galios turi būti papildomai suteikta naudojant išorinį šaltinį. Šalto srauto temperatūra įrengus III šilumokaitį nustatoma taip:

$$T_{C1} = T_{C1pinch} + \frac{Q_I}{CP_{C1}} = 140 + \frac{160}{5} = 172 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

35 paveiksle pateikiamas suprojektuotas priešsrovinis I šilumokaitis, kuriame pažymėti visi įeinantys ir išeinantys karšti ir šalti srautai ir nurodomos visų šių srautų temperatūros prieš šilumokaitį ir už jo.



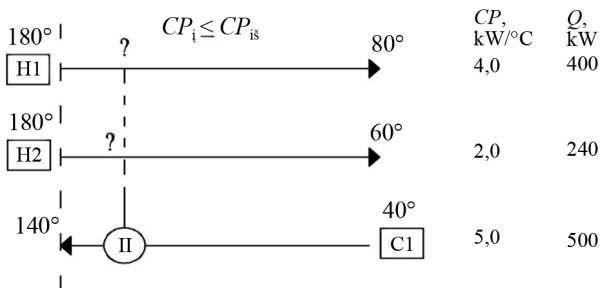
35 pav. I šilumokaičio srautų temperatūros analizė

Kaip matyti iš 35 paveikslo, karšto srauto temperatūros visais atvejais yra aukštesnės už šalto srauto. Ištekancio iš šilumokaičio temperatūros skirtumas yra $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, tai lygu minimaliam nustatytam temperatūrų skirtumui. Įtekančio į šilumokaitį karšto srauto temperatūra yra $48\text{ }^{\circ}\text{C}$, t. y. $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ didesnė nei ištekancio šalto srauto temperatūra. Galima teigti, kad šilumos mainai vyks, nes minimalūs reikalavimai įvykdyti.

Kita šioje posistemėje šalto srauto C1 šilumos poreikio dalis užtikrinama išoriniu šilumokaičiu, kuris kaip išorinį šilumos šaltinį gali naudoti vandens garą.

Šio įrenginio galia yra 140 kW , šis dydis sutampa su (33 pav.) dydžiu Q_{Hmin} . Šilumokaičių tinklo projektavimas virš *pinch* temperatūrų baigtas.

Pereinama prie kitų srautų, kurie išdėstyti žemiau *pinch* temperatūros, projektavimo. Analogiškai kaip ir virš *pinch* temperatūrų projektuotame šilumokaičių tinkle, nurodomos atskirų srautų šiluminių talpų reikšmės ir kiekvieno srauto galios. Analizuojami technologiniai srautai pateikti 36 paveiksle.

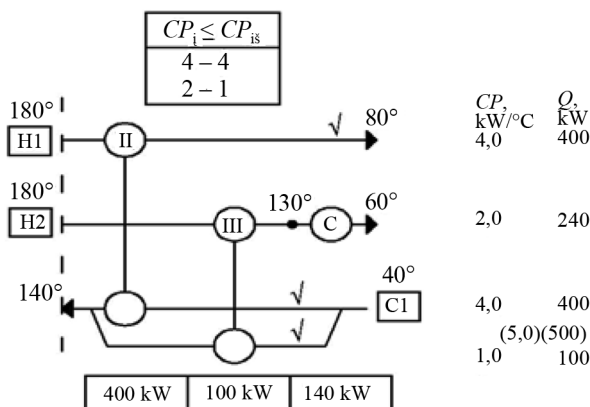


36 pav. Šilumokaičių įrengimas srautų tinkle žemiau *pinch* temperatūrų

36 paveiksle matyti, kad šaltas srautas C1 netenkina srautų šiluminės talpos taisyklės, todėl įrengtas vidinis šilumokaitis negalės perduoti karštų srautų H1 ir H2 perteklinės šilumos. Tuo atveju, jei neatsižvelgtume į šiluminės talpos taisyklę ir įrengtume vidinį šilumokaitį tarp karšto ir šalto srauto, būtų pažeistas minimalaus temperatūrų skirtumo tarp srautų reikalavimas. Tokiu atveju šilumos mainai gali nevykti. Kokį sprendimą galima šiuo atveju rasti, kai skaitinė

analizė rodo, kad karštų srautų šiluma gali būti naudojama šaltam srautui pašildyti?

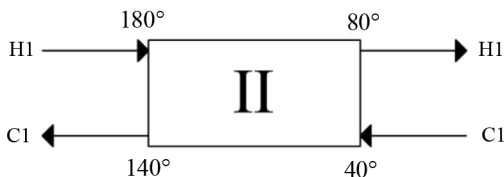
Toks sprendimas galėtų būti šalto srauto C1 skaidymas į dvi dalis / srautus, kurių kiekvieno atskirai šiluminė talpa būtų mažesnė nei suminė ir lygi karšties srautams arba mažesnė. Tokiu atveju būtų užtikrinta šiluminės talpos taisyklė. Srautų skaidymas nėra sudėtingas technologiniu požiūriu, pakanka ant technologiniame sraute esančios atšakos dar įrengti vidinį šilumokaitį. Srautų skaidymas suteikia projektuotojui tam tikrą laisvę, nes srautą galima skaidyti įvairiu santykiu. 37 paveiksle pateiktas vienas iš galimų sprendimų, kaip galima būtų suskaidyti šaltą C1 srautą. Šiuo atveju šaltas srautas skaidomas į du, kurių vieno šiluminė talpa yra 4,0 kW/°C, o kito – 1,0 kW/°C.



37 pav. Šilumokaičių įrengimas srautų tinkle žemiau *pinch* temperatūrų

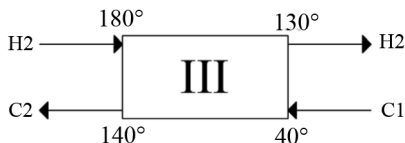
Šaltas srautas C1 skaidomas tokiu būdu, kad atskiros jo šakos būtų jungiamos prie konkrečių karštų srautų. Šalto srauto šaka, kurios šiluminė talpa yra didžiausia ir lygi H1 srauto šiluminei talpai, per vidinį šilumokaitį jungiama su karštu srautu H1. Šiame pavyzdyje karšto šilumos srauto galia (400 kW) visiškai sutampa su šalto srauto šakos poreikiu, todėl visa šiluma perduodama II vidinio šilumokaičio šaltam srautui. Šio šilumokaičio temperatūrų analizė rodo, kad visuose ribiniuose taškuose užtikrinamas minimalus 40 °C tem-

peratūros skirtumas (38 pav.). Galima daryti išvadą, kad šilumokaitis užtikrins reikiamus šilumos mainus, nes užtikrinamos visos minimalios ribinės sąlygos.



38 pav. II šilumokaičio srautų temperatūros analizė

III šilumokaičiui H2 karštas technologinis srautas sujungiamas su antra šalto srauto C1 atšaka, kurios šiluminė talpa po skaidymo yra 1,0 kW/°C (šilumokaičio galia 100 kW). Viename III šilumokaičio gale temperatūrų skirtumas yra minimalus, tačiau kitame jis siekia net 90 °C. Taigi, dėl didelio srautų temperatūrų skirtumo galimas mažas šilumokaičio plotas (todėl ir mažos santykinės investicijos) ir geri šilumos mainai (39 pav.).

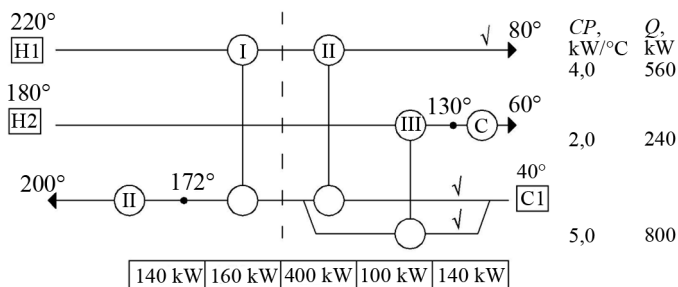


39 pav. III šilumokaičio srautų temperatūrinė analizė

III vidinio šilumokaičio galios nepakanka, kad būtų visiškai iki tikslo temperatūros ataušintas karštas technologinis srautas H2. Todėl likusi perteklinės šilumos 140 kW galia per aušintuvę atiduodama išoriniam aušinimo šaltiniui. Išorinio aušinimo įrenginio įrengimu baigiamas šilumokaičių tinklo projektavimas žemiau *pinch* temperatūrų taškų.

Baigiant projektuoti abi posistemių dalys sujungiamos ties *pinch* temperatūromis ir gaunamas galutinis technologinių srautų sistemos šilumokaičių tinklas su išskaidytu šaltu srautu C1. Šis tinklas užtikri-

na didžiausią galimą šilumos atgavimą per vidinius šilumokaičius, mažiausią galimą išorinį šildymą ir išorinį aušinimą esant nurodytam minimaliam temperatūrų skirtumui tarp karšto ir šalto srautų $\Delta T_{\min}$ (40 pav.).



40 pav. Suprojektuotas šilumokaičių tinklas esant didžiausiam vidiniam šilumos atgavimui ir nurodytai $\Delta T_{\min}$

6.3. Šeštojo skyriaus uždaviniai

Siekiant geriau įsisavinti šilumokaičių tinklo projektavimo principus rekomenduojame naudotis jau išspręstų uždavinių (1–10) uždaviniais ir atliktais skaičiavimais. Papildomai pateikiami dar 5 nauji uždaviniai, kurių užduotys nurodytos toliau.

Šiame skyriuje atsakymų nepateikiama, nes esant didesnei nei dviejų srautų technologinei sistemai, šilumokaičių tinklo projektavimo variantų daugėja, todėl suprojektuoto tinklo variantas gali skirtis nuo pateikto atsakyme. Nepaisant to, visais atvejais mažiausios išorinių šilumokaičių galios, nustatytos ankstesniuose skyriuose, turi išlikti.

11 uždavinys

Suprojektuokite šilumokaičių tinklą, kai $\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Technologinių srautų pagrindinės charakteristikos pateikiamos lentelėje. Nustatyta, kad išorinis šilumos galios poreikis $Q_{H\min} = 280\text{ kW}$, vėsinimo – $Q_{C\min} = 160\text{ kW}$. Srautų *pinch* temperatūros $T_{H\text{pinch}} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{C\text{pinch}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Tikslo temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	200	50	3,0	–450,0
Karštas	H2	240	100	1,5	–210,0
Karštas	H3	120	119	300,0	–300,0
Šaltas	C1	30	200	4,0	680,0
Šaltas	C2	50	250	2,0	400,0

12 uždavinys

Suprojektuokite šilumokaičių tinklą, kai $\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Technologinių srautų pagrindinės charakteristikos pateikiamos lentelėje. Nustatyta, kad išorinis šilumos galios poreikis $Q_{H\min} = 1000\text{ kW}$, o vėsinimo – $Q_{C\min} = 800\text{ kW}$. Srautų *pinch* temperatūros $T_{H\text{pinch}} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{C\text{pinch}} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Tikslo temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	270	160	18,0	–1980
Karštas	H2	220	60	22,0	–3520
Šaltas	C1	50	210	20,0	3200
Šaltas	C2	160	210	50,0	2500

13 uždavinys

Suprojektuokite šilumokaičių tinklą, kai $\Delta T_{\min} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Technologinių srautų pagrindinės charakteristikos pateikiamos lentelėje. Nustatyta, kad išorinis šilumos galios poreikis $Q_{H\min} = 1550\text{ kW}$, o vėsinimo – $Q_{C\min} = 258\text{ kW}$. Srautų *pinch* temperatūros $T_{H\text{pinch}} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{C\text{pinch}} = 145\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Tikslo temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	220	100	10,0	–1200
Karštas	H2	220	145	10,0	–750
Karštas	H3	150	110	6,45	–258
Karštas	H4	160	110	40,0	–2000
Šaltas	C1	90	200	50,0	5500

14 uždavinys

Suprojektuokite šilumokaičių tinklą, kai $\Delta T_{\min} = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Technologinių srautų pagrindinės charakteristikos pateikiamos lentelėje. Nustatyta, kad išorinis šilumos galios poreikis $Q_{H\min} = 840\text{ kW}$, o vėsinimo – $Q_{C\min} = 120\text{ kW}$. Srautų *pinch* temperatūros $T_{H\text{pinch}} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{C\text{pinch}} = 114\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Tikslo temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	140	10	4,0	–520,0
Karštas	H2	190	70	2,0	–240,0
Karštas	H3	150	50	6,0	–600,0
Karštas	H4	90	50	1,5	–60,0
Karštas	H5	210	150	1,0	–60,0
Šaltas	C1	0	220	10,0	2200

15 uždavinys

Suprojektuokite šilumokaičių tinklą, kai $\Delta T_{\min} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Technologinių srautų pagrindinės charakteristikos pateikiamos lentelėje. Nustatyta, kad išorinis šilumos galios poreikis $Q_{H\min} = 200\text{ kW}$, vėsinimo – $Q_{C\min} = 270\text{ kW}$. Srautų *pinch* temperatūros $T_{H\text{pinch}} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{C\text{pinch}} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Srauto tipas	Srautas	Pradinė temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Tikslo temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Šiluminė talpa, kW/K	Srauto šilumos galia, kW
Karštas	H1	150	10	4,000	–560,0
Karštas	H2	240	70	2,000	–340,0
Karštas	H3	140	50	2,000	–180,0
Karštas	H4	100	50	1,000	–50,0
Šaltas	C1	40	240	1,000	200,0
Šaltas	C2	60	200	2,000	280,0
Šaltas	C3	20	100	2,000	160,0
Šaltas	C4	10	220	2,000	420,0

Literatūra

- Cengel, Y. A. 2007. Green thermodynamics, *International Journal of Energy Research* 31(12): 1088–1104.
- El-Halwagi, M. M. 1997. Pollution Prevention through Process Integration. *Clean Products and Processes*, 1998, Vol. 1, No 1, 5–19.
- El-Halwagi, M. M. 2006. *Process Integration*. Elsevier.
- El-Sayed, Y. M. 2002. Application of exergy to design, *Energy Conversion and Management* 43: 1165–1185.
- Godat, J.; Marechal, F. 2003. Optimization of a fuel cell system using process integration techniques, *Journal of Power Sources* 118(1–2): 411–432.
- Gundersen, T. 2002. *A Process Integration Primer*. SINTEF Energy Research. 3rd and Final version. Trondheim, Norway. 90.
- Kemp, I. C. 2007. *Pinch Analysis And Process Integration*. 2nd ed. Elsevier Science & Technology. 416 p. ISBN 9780750682602.
- Natural recourses Canada. 2003. *Pinch Analysis: for the Efficient Use of Energy, Water & Hydrogen* [interaktyvus] [žiūrėta 2009 10 01]. Prieiga per internetą: http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-rncan.gc.ca/fichier.php/codectec/En/2009-052/2009-052_PM-FAC _404-DEPLOI_e.pdf.
- Smith, R. 2005. *Chemical Process Design and Integration*. John Wiley and Sons. ISBN 0471486809.
- Смит, Р.; Клемеш, Й.; Товажнянский, Л. Л.; Капустенко, П. А.; Ульев, Л. М. 2004. *Основы интеграции тепловых процессов*. Москва. 459 p.

A priedas. Detalus šilumokaičių tinklo projektavimo pavyzdys

Užduotis

Alaus darykloje technologiniai srautai šildomi ir vėsinami / aušinami pagal numatytą technologinę schemą.

- Visi karšti srautai turi būti ataušinti iki nurodytos tikslo temperatūros T_t °C.
- Visi šalti srautai turi būti pašildyti iki tikslo temperatūros T_t °C.

Minimalus temperatūrų skirtumas tarp visų srautų $\Delta T_{\min} = 13$ °C.

Nagrinėjamieji srautai ir pagrindiniai duomenys pateikti A 1 lentelėje.

Nustatyti:

- Apskaičiuoti ir nubraižyti pagrindinę sudėtinę kreivę.
- Apskaičiuoti mažiausią reikalingą išorinę šildymo ir vėsinimo galią, didžiausią galimą atgauti šilumos kiekį proceso metu.
- Suprojektuoti naują šilumokaičių tinklą (įvertinus *pinch* temperatūros skaidymą), kad būtų galima atgauti didžiausią šilumos kiekį (idealus tinklas), pavaizduoti suprojektuotą šilumokaičių tinklą.

A 1 lentelė. Pagrindiniai užduoties rodikliai

Srauto vardas	Pradinė temperatūra T_s , °C	Tikslo temperatūra T_t , °C	Šiluminė talpa CP , kW/°C	Srauto šilumos galia Q , kW	Komentaras
H1	26	20	26,1	–156,6	šaltnešio garas
H2	84	70	16,3	–228,2	misa
H3	69	50	4,8	–91,2	misa
H4	49	10	1,3	–50,7	misa
H5	94	13	12,3	–996,3	misa
H6	46	20	2,7	–70,2	cukraus tirpalas
C1	8	80	10,3	741,6	šaltinio vanduo
C2	8	71	17,1	1077,3	šiltas vanduo

Sprendimas

Prieš pradėdant projektuoti šilumokaičių tinklą reikia nustatyti išorinio šilumos šaltinio (Q_{Hmin}) ir išorinio vėsinimo / aušinimo (Q_{Cmin}) galios poreikį. Šiuos dydžius galima nustatyti dviem būdais: grafiniu – braižant sudėtines kreives ir naudojant lentelių algoritmą. Šiame darbe išorinių šilumokaičių galios nustatomos abiem būdais.

Sudaroma A 2 lentelė, kurioje apskaičiuojamos karštų ir šaltų srautų kumuliacinės šiluminės galios. Suminės galios skaičiuojamos tam, kad būtų galima lengviau nubraižyti sudėtines kreives.

A 2 lentelė. Temperatūrų intervalų balanso galios

Karšti srautai

Temperatūros intervalai, °C	Srauto galia intervale, kW	Suminė galia, kW
10	0,0	0,0
13	3,9	3,9
20	95,2	99,1
26	254,4	353,5
46	326,0	679,5
49	40,8	720,3
50	12,3	732,6
69	324,9	1057,5
70	12,3	1069,8
84	400,4	1470,2
94	123,0	1593,2

Šalti srautai

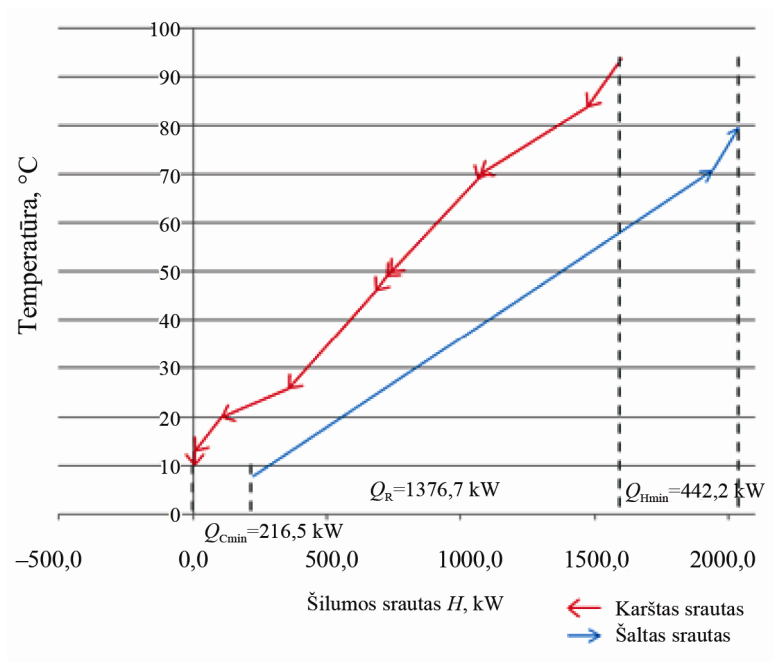
Temperatūros intervalai, °C	Srauto galia intervale, kW	Suminė galia, kW
8	216,5	216,5
71	1701,0	1917,5
80	92,7	2010,2

Didžiausias galimas atgauti šilumos kiekis (Q_R) per vidinius šilumokaičius nustatomas iš karšto srauto suminės galios atimant išorinio įrenginio mažiausią aušinimo galią (Q_{Cmin}).

$$Q_R = 1593,2 - 216,5 = 1376,7 \text{ kW},$$

čia Q_R – didžiausias galimas atgauti per vidinius šilumokaičius šilumos kiekis, kW.

Pagal gautus duomenis braižoma sudėtinė kreivė (A 1 pav.).



A 1 pav. Analizuojamų srautų sudėtinės kreivės

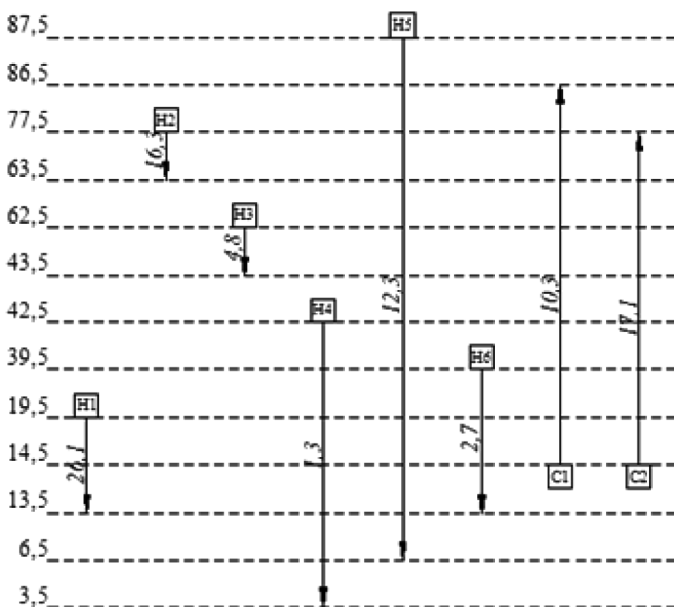
Atliekami skaičiavimai ir braižoma pagrindinė sudėtinė kreivė. Šioje kreivėje pateikiama pagrindinės išorinių įrenginių galios ir modifikuota technologinių srautų *pinch* kreivė, kuri braižoma remiantis šilumos srautų lentelės algoritmo duomenimis. Šie skaičiavimai detalizuojami toliau.

Žinodami minimalų leidžiamą temperatūrų skirtumą $\Delta T_{\min}$, perskaičiuojame srautų pradžios ir tikslo modifikuotas temperatūras T_s' ir T_t' . Prie karštų srautų temperatūrų pridedama pusė leidžiamo temperatūrų skirtumo, o iš šaltų srautų – atimama. Rezultatai pateikti A 3 lentelėje.

A 3 lentelė. Modifikuotos technologinių srautų temperatūros

$\Delta T_{\min}$	1	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_t, ^\circ\text{C}$	$CP, \text{kW}/^\circ\text{C}$	$T_s', ^\circ\text{C}$	$T_t', ^\circ\text{C}$
13	H1	26	20	26,1	19,5	13,5
	H2	84	70	16,3	77,5	63,5
	H3	69	50	4,8	62,5	43,5
	H4	49	10	1,3	42,5	3,5
	H5	94	13	12,3	87,5	6,5
	H6	46	20	2,7	39,5	13,5
	C1	8	80	10,3	14,5	86,5
	C2	8	71	17,1	14,5	77,5

Toliau skaičiuojant sudaroma šilumos srautų diagrama, kurioje pateikti visos sistemos temperatūrų intervalai ir srautai, priklausantys kiekvienam intervalui. Šiai diagramai sudaryti perskaičiuotos temperatūros išdėstomos mažėjimo tvarka, sudarant temperatūrų intervalų ribas. Ant kiekvieno srauto linijos nurodyta srauto šiluminė talpa CP ($\text{kW}/^\circ\text{C}$). Diagrama pateikta A 2 paveiksle.



A 2 pav. Modifikuotų temperatūrų intervalų ir šilumos srautų diagrama

Kiekvienam temperatūrų intervalui apskaičiuojamas srautų entalpijų balansas pagal formulę:

$$\Delta H = CP(T_2 - T_1),$$

čia ΔH – entalpijų skirtumas (galia), kW,

ΔT – temperatūrų skirtumas intervale, °C,

CP – srauto šiluminė talpa, kW/°C.

Sudaroma entalpijų balanso ir šilumos srautų lentelė (A 4 lentelė), iš kurios apskaičiuojama *pinch* temperatūra, minimalios šildymo ir aušinimo įrenginių galios.

Iš šios lentelės gauta modifikuota *pinch* temperatūra:

$$T_{pinch} = 19,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

A 4 lentelė. Temperatūrų intervalų entalpijų balansas ir šilumos grandinė/laiptai per analizuojamus intervalus

Modifikuota temperatūra, °C	Temperatūrų intervalo skirtumas ΔT , °C	Intervalo entalpijų balansas ΔH , kW	Nekoreguoti grandinės skaičiavimai, kW	Koreguoti grandinės skaičiavimai, kW	Rodikliai
87,5			0	442,2	Q_{Hmin}
	1	-12,3			
86,5			12,3	454,5	
	9	-18			
77,5			30,3	472,5	
	14	-16,8			<i>pinch</i> temperatūra
63,5			47,1	489,3	
	1	15,1			
62,5			32	474,2	
	19	195,7			
43,5			-163,7	278,5	
	1	15,1			
42,5			-178,8	263,4	
	3	41,4			
39,5			-220,2	222	
	20	222			
19,5			-442,2	0	
	5	-75			
14,5			-367,2	75	
	1	-42,4			
13,5			-324,8	117,4	
	7	-95,2			
6,5			-229,6	212,6	
	3	-3,9			
3,5			-225,7	216,5	Q_{Cmin}

Atskirų srautų temperatūra:

$$T_{Hpinch} = 19,5 + 13/2 = 26 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

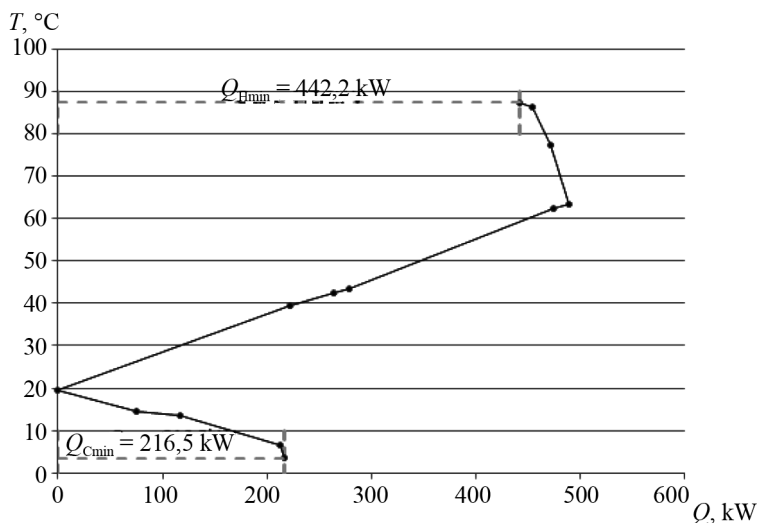
$$T_{Cpinch} = 19,5 - 13/2 = 13 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Minimali išorinių įrenginių galia:

$$\text{Šildymo} - Q_{Hmin} = 442,2 \text{ kW},$$

$$\text{Aušinimo} - Q_{Cmin} = 216,5 \text{ kW}.$$

Pagal gautus duomenis braižoma pagrindinė sudėtinė kreivė (A 3 pav.).



A 3 pav. Analizuojamos užduoties technologinių srautų pagrindinė sudėtinė kreivė

Projektuojamas naujas šilumokaičių tinklas, siekiant atgauti didžiausią šilumos kiekį, esant nurodytai užduotyje ΔT_{min} , ir naudoti kuo mažiau išorinio šildymo ir vėsinimo įrenginių galios. Tokiu principu suprojektuotas šilumokaičių tinklas yra optimalus šilumos atgavimo požiūriu, bet gali būti nepriimtinas vertinant ekonominiu požiūriu.

Naujam šilumokaičių tinklui projektuoti taikoma tinklo diagrama (A 4 pav.). Projektuoti pradedama nuo tinklo skaidymo į du atskirus tinklus ties *pinch* tašku.

Projektuojant būtina laikytis šių taisyklių:

- Šiluma neturi būti tiekama skersai (per) *pinch* taško.
- Neturi būti jokio išorinio aušinimo virš *pinch* taško.
- Neturi būti jokio išorinio šildymo žemiau *pinch* taško.

Pirma įrengiami *pinch* šilumokaičiai (pirmieji, esantys arčiausiai *pinch* linijos). Projektuojant šilumokaičius vadovaujamosi šiomis taisyklėmis:

Virš <i>pinch</i> taško	Žemiau <i>pinch</i> taško
$CP_H \leq CP_C$	$CP_H \geq CP_C$
$N_H \leq N_C$	$N_H \geq N_C$

čia:

CP_H – karšto srauto šiluminė talpa, (kW/°C),

CP_C – šalto srauto šiluminė talpa, (kW/°C),

N_H – karštų srautų skaičius suskaidyto tinklo pusėje,

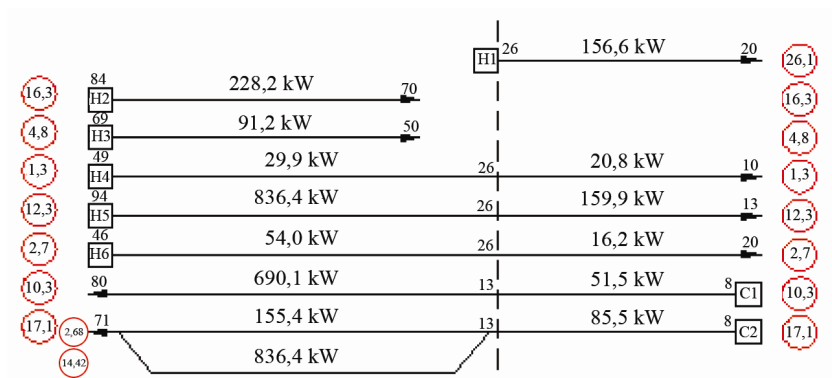
N_C – šaltų srautų skaičius suskaidyto tinklo pusėje.

Paaikškinimas: Projektuojant *pinch* šilumokaitį, virš *pinch* taško jungiamo karšto srauto šiluminė talpa turi būti didesnė nei šalto srauto, o karštų srautų skaičius turi būti mažesnis negu šaltų srautų skaičius. Žemiau *pinch* taško – abi taisyklės taikomos priešingai.

A 5 lentelė. Suskaidyto tinklo srautų CP reikšmės

Virš <i>pinch</i> taško			Žemiau <i>pinch</i> taško	
$N_H \leq N_C$			$N_H \geq N_C$	
$CP_H \leq CP_C$			$CP_H \geq CP_C$	
1,3		2,68	26,1	17,1
2,7	10,3	10,3	12,3	10,3
12,3	17,1	14,42	2,3	
4,8	ne <i>pinch</i> srautas		1,3	
16,3	ne <i>pinch</i> srautas			

Virš *pinch* taško esančioje sistemos dalyje negalioja $N_H \leq N_C$ taisyklė, todėl šaltas srautas yra skaidomas. Srautas dalijamas taip, kad vienas iš padalytų srautų padengtų didžiausios galios karšto srauto poreikį (A 5 lentelė).



A 4 pav. Srautų tinklo diagrama

I šilumokaitis

Projektuojama žemiau *pinch* taško. Pagal A 5 lentelės duomenis, I šilumokaitis turi jungti H1 ir C2 srautus. Šilumokaičio galia parenkama tokia, kad visiškai padengtų C2 srauto energijos poreikį.

$$Q_1 = \Delta T \cdot CP = (13 - 8) \cdot 17,1 = 85,5 \text{ kW.}$$

Tuomet H1 srauto, išeinančio iš šilumokaičio, temperatūra lygi:

$$T_2 = T_1 - \frac{Q_1}{CP} = 26 - \frac{85,5}{26,1} = 22,7 \text{ } ^\circ\text{C,}$$

čia

T_2 – išeinančio iš šilumokaičio srauto temperatūra, $^\circ\text{C}$,

T_1 – įeinančio į šilumokaitį srauto temperatūra, $^\circ\text{C}$,

Q_1 – šilumokaičio galia, kW,

CP – srauto specifinė šiluma, kW/ $^\circ\text{C}$.

II šilumokaitis

II šilumokaitis turi jungti H5 ir C1 srautus. Šilumokaičio galia parenkama tokia, kad visiškai atitiktų C1 srauto energijos poreikį.

$$Q_{II} = \Delta T \cdot CP = (13 - 8) \cdot 10,3 = 51,5 \text{ kW}.$$

Tuomet H5 srauto, išeinančio iš šilumokaičio, temperatūra lygi:

$$T_2 = T_1 - \frac{Q_{II}}{CP} = 26 - \frac{51,5}{12,3} = 21,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

III šilumokaitis

Projektuojama aukščiau *pinch* taško. Pagal 5 lentelės duomenis III šilumokaitis turi jungti H5 ir išskaidytą C2 srautą, kurio $CP = 14,42 \text{ kW/}^\circ\text{C}$, o galia yra $836,4 \text{ kW}$. Šilumokaičio galia parenkama tokia, kad būtų padengti abu srautai.

$$Q_{III} = 836,4 \text{ kW}.$$

IV šilumokaitis

IV šilumokaitis turi jungti H6 ir C1 srautus. Šilumokaičio galia parenkama tokia, kad visiškai padengtų H6 srauto energijos poreikį.

$$Q_{IV} = \Delta T \cdot CP = (46 - 13) \cdot 2,7 = 54,0 \text{ kW}.$$

Tuomet C1 srauto, išeinančio iš šilumokaičio, temperatūra lygi:

$$T_2 = T_1 + \frac{Q_{IV}}{CP} = 13 + \frac{54,0}{10,3} = 18,24 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

V šilumokaitis

V šilumokaitis turi jungti H4 ir C2 išskaidytą srautą, kurio $CP = 2,68 \text{ kW/}^\circ\text{C}$. Šilumokaičio galia parenkama tokia, kad visiškai padengtų H4 srauto energijos poreikį.

$$Q_V = \Delta T \cdot CP = (49 - 26) \cdot 1,3 = 29,9 \text{ kW}.$$

Tuomet C2 srauto, išeinančio iš šilumokaičio, temperatūra lygi:

$$T_2 = T_1 + \frac{Q_V}{CP} = 13 + \frac{29,9}{2,68} = 24,16 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

VI šilumokaitis

$$Q_{VI} = \Delta T \cdot CP = (84 - 70) \cdot 16,3 = 228,2 \text{ kW}.$$

VI šilumokaitis turi jungti H2 ir C1 srautą. Šilumokaičio galia parenkama tokia, kad visiškai padengtų H2 srauto energijos poreikį.

Tuomet C1 srauto, išeinančio iš šilumokaičio, temperatūra lygi:

$$T_2 = T_1 + \frac{Q_{VI}}{CP} = 18,24 + \frac{228,2}{10,3} = 40,40 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

VII šilumokaitis

VII šilumokaitis turi jungti H3 ir C2 išskaidytą srautą, kurio $CP = 2,68 \text{ kW/}^\circ\text{C}$. Šilumokaičio galia parenkama tokia, kad visiškai padengtų H srauto energijos poreikį.

$$Q_{VII} = \Delta T \cdot CP = (69 - 50) \cdot 4,8 = 91,2 \text{ kW}.$$

Tuomet C1 srauto, išeinančio iš šilumokaičio, temperatūra lygi:

$$T_2 = T_1 + \frac{Q_{VII}}{CP} = 24,16 + \frac{91,2}{2,68} = 58,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

CI išorinis aušintuvas

CI aušintuvo galia parenkama tokia, kad ataušintų H1 srautą nuo $22,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ iki $20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$Q_{CI} = \Delta T \cdot CP = (22,7 - 20) \cdot 26,1 = 71,1 \text{ kW}.$$

CII išorinis aušintuvas

CII aušintuvo galia parenkama tokia, kad ataušintų H4 srautą nuo $26 \text{ } ^\circ\text{C}$ iki $10 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$Q_{CII} = \Delta T \cdot CP = (26 - 10) \cdot 1,3 = 20,8 \text{ kW}.$$

CIII išorinis aušintuvas

CIII aušintuvo galia parenkama tokia, kad ataušintų H5 srautą nuo 21,8 °C iki 13 °C.

$$Q_{CIII} = \Delta T \cdot CP = (21,8 - 13) \cdot 12,3 = 108,4 \text{ kW}.$$

CIV išorinis aušintuvas

CIV aušintuvo galia parenkama tokia, kad ataušintų H6 srautą nuo 26 °C iki 20 °C.

$$Q_{CIV} = \Delta T \cdot CP = (26 - 20) \cdot 2,7 = 16,2 \text{ kW}.$$

HI išorinis šildytuvas

HI šildytuvo galia parenkama tokia, kad pašildytų C1 srautą nuo 40,4 °C iki 80 °C.

$$Q_{HI} = \Delta T \cdot CP = (80 - 40,4) \cdot 10,3 = 407,9 \text{ kW}.$$

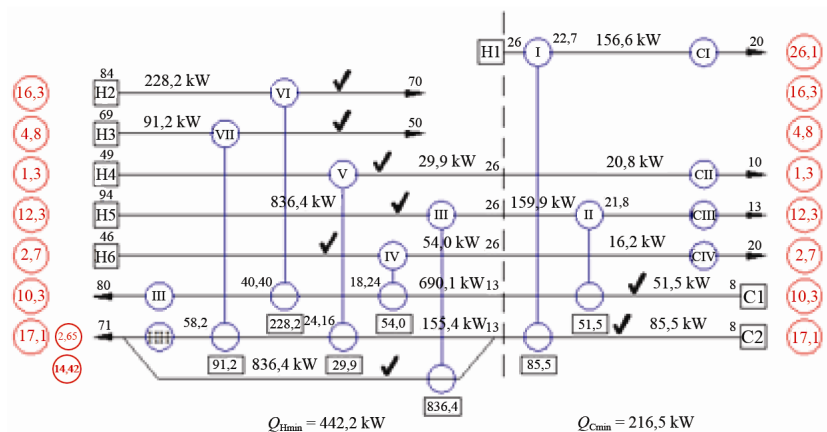
HII išorinis šildytuvas

$$Q_{HII} = \Delta T \cdot CP = (71 - 58,2) \cdot 2,68 = 34,3 \text{ kW}.$$

Suprojektuotos sistemos įrenginių charakteristikos pateikiamos A 6 lentelėje, o jų išdėstymas – tinklinėje diagramoje A 5 paveiksle.

A 6 lentelė. Sistemos įrenginių lentelė

Šilumokaitis	Galia	Aušintuvas	Galia	Šildytuvas	Galia
I	85,5	CI	71,1	HI	407,9
II	51,5	CII	20,8	HII	34,3
III	836,4	CIII	108,4	Σ =	442,2
IV	54	CIV	16,2		
V	29,9	Σ =	216,5		
VI	228,2				
VII	91,2				
Σ =	1376,7				



A 5 pav. Suprojektuotas šilumokaičių tinklas

Suprojektuoto naujo šilumokaičių tinklo išorinių šildytuvų suminė galia atitinka anksčiau nustatytus tikslinius rodiklius $Q_C = Q_{Cmin} = 16,5 \text{ kW}$ ir $Q_H = Q_{Hmin} = 442,2 \text{ kW}$, todėl daroma išvada, kad šilumokaičių tinklas suprojektuotas teisingai.

Terminai ir santrumpos

$\Delta T_{\min}$ – technologiniu ir ekonominiu požiūriu minimalus apibrėžtas temperatūrų skirtumas tarp technologinių srautų šilumokaitos įrenginiuose.

T_s – (*supply*) kiekvieno srauto pradinė temperatūra.

T_t – (*target*) kiekvieno srauto tikslo (siektina) temperatūra.

Vidiniai šilumokaičiai užtikrina šilumos mainus tarp analizuojamų srautų (karšto ir šalto). Jie išnaudoja vidinius sistemos energijos srautų išteklius.

Išoriniai šilumokaičiai yra tokie, per kuriuos naudojant išorinius šaltinius srautas atvėsinamas arba pašildomas iki reikiamos temperatūros.

Sudėtinė kreivė – tai kreivė sudaroma kelis technologinius srautus sumuojant temperatūros-entalpijos diagramoje.

***Pinch* temperatūros** – parodo mažiausią atstumą tarp karšto ir šalto srautų kreivių.

Modifikuotos temperatūros būna tada, kai karšto srauto temperatūros sumažinamos $\Delta T_{\min}/2$ reikšme, o šalto srauto – šia reikšme padidinamos.

***Pinch* šilumokaičiai** yra tokie, kurių du srautai turi *pinch* temperatūras.

Leidiny s parengtas ir i šleistas už Europos struktūrinių fondų lėšas, jomis finansuojant VGTU Statybos fakulteto projektą „Transporto ir civilinės inžinerijos sektorių mokslo, verslo ir studijų integralumo didinimas (TRANCIV)“, VP1-2.2-ŠMM-09-V-01-008

Giedrius ŠIUPŠINSKAS, Violeta MISEVIČIŪTĖ

ŠILUMINIŲ PROCESŲ INTEGRAVIMO UŽDAVINYNAS

Mokomoji knyga

Redaktorė *Nijolė Žuvininkaitė*

Maketuotoja *Loreta Urbanavičienė*

2012-06-18. 3,01 aut. l. Tiražas 100 egz.

El. versija pagal leidinio identifikatorių doi:10.3846/1301-S

Vilniaus Gedimino technikos universiteto

leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius

<http://leidykla.vgtu.lt>

Spausdino UAB „Ciklonas“, J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius