

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Sabina Paulauskaitė, Kęstutis Valančius

STATYBINĖ ŠILUMINĖ FIZIKA

Mokomoji knyga



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2012

S. Paulauskaitė, K. Valančius. Statybinė šiluminė fizika:
mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2012. 109 p. [3,07 aut. l.
2012-05-18]

Leidinyje pateikiami statybinės šiluminės fizikos teoriniai ir praktiniai pagrindai. Aprašomos ir išaiškinamos tokios temos, kaip pastato šiluminis režimas, vienmatis ir dvimatis šilumos perdavimas per atitvaras, sudėtingi šilumos mainai patalpoje, komforto sąlygos ir kt.

Leidinyi skirtas VGTU Aplinkos inžinerijos fakulteto magistrantūros studijų studentams, studijuojantiems statybinę šiluminę fiziką ir pastato šilumos režimą.

Leidinį rekomendavo VGTU Aplinkos inžinerijos fakulteto studijų komitetas

Recenzavo: vyr. moksl. bendr. dr. Jūratė Karbauskaitė, KTU ASI
Statybinės šiluminės fizikos laboratorija
doc. dr. Violeta Motuzienė, VGTU Pastatų energetikos
katedra

Leidinyi parengtas ir išleistas už Europos socialinio fondo lėšas vykdant projektą „Transporto ir civilinės inžinerijos sektorių mokslo, verslo ir studijų integralumo didinimas (TRANCIV)“, VP1-2.2-ŠMM-09-V-01-008

VGTU leidyklos TECHNIKA 1300-S
mokomosios literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-183-1
doi:10.3846/1300-S

Redagavo *Rita Malikėnienė*
Maketavo *Antanas Dvilevičius*

© Sabina Paulauskaitė, 2012
© Kęstutis Valančius, 2012
© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2012

TURINYS

Ivadas.....	4
1. Pastato šilumos režimas	7
2. Šilumos perdavimas per išorines atitvaras	9
3. Šilumos mainai patalpoje.....	14
3.1. Spinduliniai šilumos mainai patalpoje.....	15
3.2. Konvekciniai šilumos mainai patalpoje.....	26
3.3. Šilumos balansai patalpoje	33
4. Vienmatis šilumos perdavimas per atitvaras.....	45
4.1. Šilumos laidumo lygtis diferencialine ir baigtinių dydžių forma	45
4.2. Šilumos ir drėgmės režimas bei atskirų sluoksnių išdėstymo nuoseklumas atitvaroje.....	47
5. Apsauginės atitvarų savybės.....	52
5.1. Apsauginės atitvarų savybės.....	52
5.2. Skaičiuojamoji išorės oro temperatūra $t_{i\bar{s}}$	53
6. Šilumos perdavimas per atitvaros elementus, kuriuose formuojasi dvimatis temperatūrinis laukas	57
6.1. Dvimatis temperatūrinis laukas atitvaroje	57
6.2. Sprendimo metodai.....	59
7. Komforto sąlygos patalpoje	72
7.1. Žmogaus šilumos balansas patalpoje.....	72
7.2. Šiluminės sąlygos patalpoje	75
8. Atitvaros ir patalpos šiluminis pastovumas	84
8.1. Atitvaros šiluminis pastovumas.....	84
8.2. Patalpos šiluminis pastovumas	94
8.3. Patalpos temperatūros kitimas esant periodiniams šilumos išsiskyrimams.....	100
Kontroliniai klausimai	103
Literatūra	108

IVADAS

Statybinė šiluminė fizika nagrinėja procesus, vykstančius tiek ant atitvarų paviršių, tiek pačiose atitvarose. Tai susieta su atitvarų šilumine apsauga, o tai lemia pastato šiluminės energijos poreikius. Todėl statybinė šiluminė fizika svarbi visų pirma dėl to, kad nuo išorinių atitvarų šiluminių charakteristikų priklauso pastato šilumos nuostoliai, darantys įtaką šildymo sistemų galiai ir šilumos poreikiams šildymo periodo metu. Antra, išorinių atitvarų drėgmės režimas keičia šilumines apsaugines jų savybes, kartu ir pastato mikroklimatą užtikrinančių sistemų galią. Trečia, šilumos mainų koeficientai ant išorinių atitvarų paviršių svarbūs ne tik nustatant visuminę šiluminę atitvarų varžą, bet ir išorinės atitvaros vidinio paviršiaus temperatūrą. Ketvirta, atitvarų ir patalpų šiluminis pastovumas lemia oro temperatūrą patalpose esant kintamiems šiluminiams poveikiams, ypač šiuolaikiniuose pastatuose, kuriuose išorės oro apykaita artima minimaliai normai.

Šiandienė išorinių atitvarų šiluminių techninių skaičiavimų specifika pasireiškia tuo, kad:

- kyla reikalavimai pastatų šiluminei apsaugai;
- būtina įvertinti efektyvių termoizoliacinių medžiagų įtaką, nes jų šilumos laidumo koeficientai maži ir svarbu, kaip keičiasi jų savybės eksploatacijos sąlygomis;
- atitvarose atsirado įvairių sandūrų, kurios mažina jų šiluminę varžą.

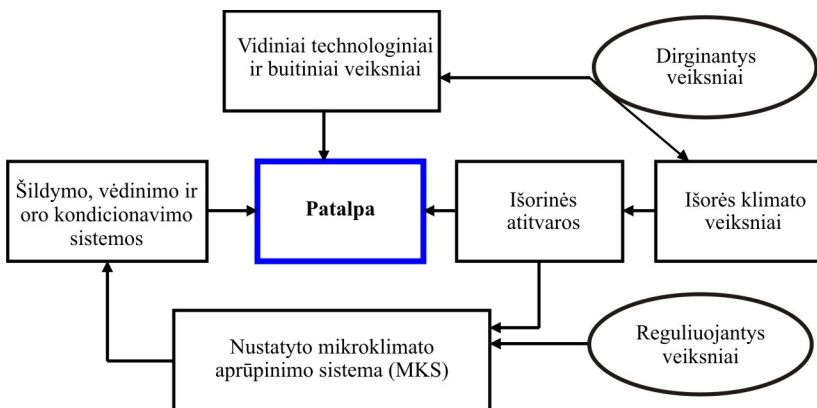
Statybinės šiluminės fizikos specifika ta, kad ši disciplina yra statybos ir energetikos mokslų sandūroje. Ji naudojasi termodinamikos, šilumos mainų, klimatologijos, sanitarijos ir higienos bei architektūros mokslų duomenimis.

Disciplinos tikslas – remiantis sisteminiu požiūriu suprasti pastato šilumos ir oro bei drėgmės režimo fizinę esmę kaip mikroklimato užtikrinimo technologijų pagrindą.

Uždavinys – išmokti apskaičiuoti šilumos ir masės mainų procesus, mokėti prognozuoti juos ir tokiu būdu rasti optimalius pastatų, jų konstrukcijų ir sistemų sprendimus.

Išgytos žinios leis suprasti pastato šilumos, oro ir drėgmės režimo formavimąsi; šilumos, oro ir drėgmės pernešimo dėsnius medžiagoje, konstrukcijose ir pastato elementuose; žinoti išorinių atitvarinių konstrukcijų šiluminės apsaugos normatyvus, reikalavimus pastato išoriniams ir vidiniams parametrams; spręsti atitvarų šiluminės renovacijos uždavinius.

Šiuolaikinis pastatas – tai sudėtinga šilumos ir masės mainų sistema – bendra energetinė sistema, kurią galima pavaizduoti schema, pateikta 1 pav.



1 pav. Pastatas kaip bendra energetinė sistema

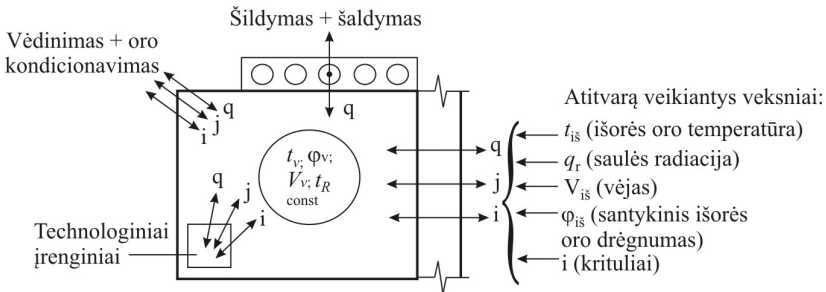
Patalpos mikroklimato parametrus veikia tiek vidiniai technologiniai ir buitiniai veiksniai, tiek išorės klimato veiksniai. Išorinės atitvaros ne tik apsaugo patalpą nuo išorinės aplinkos poveikio, bet ir keičiasi su ja šiluma ir drėgme, praleidžia orą tiek į vidų, tiek į išorę. Palaikyti patalpoje reikiamus parametrus turi inžinerinės šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemos. Tačiau nustatyti šių sistemų šiluminę galią ir darbo režimus neįmanoma, neįvertinant

atitvarų šiluminių ir drėgmės bei šiluminės inercijos savybių. Todėl nustatyto mikroklimato aprūpinimo sistema arba mikroklimato kondicionavimo sistema (MKS) sujungia visas inžinerines priemones, užtikrinančias reikiamą mikroklimatą aptarnaujamose patalpose: pastato atitvarines konstrukcijas ir inžinerines šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemas.

Trumpai MKS galima apibūdinti taip: mikroklimato aprūpinimo sistema (MKS) – tai visuma inžinerinių metodų ir įrenginių, užtikrinančių reikalingą mikroklimatą pastato patalpose.

1. PASTATO ŠILUMOS REŽIMAS

Pastato šilumos režimas – tai visų veiksmų ir procesų visuma, kuri lemia šiluminę jo patalpų būklę (1.1 pav.).



1.1 pav. Pastato šilumos režimo formavimosi schema:
q – šiluma; j – oras; i – drėgmė

Išorinės pastato atitvaros apsaugo patalpas nuo atmosferos veiksnių ir sudaro galimybę šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemomis palaikyti patalpoje reikalaujamas mikroklimato sąlygas.

Trikdantys šiluminiai srautai – per išorines atitvaras patenkantys šilumos srautai ir technologiniai bei buitiniai šilumos išsiskirimai patalpose.

Reguliuojantys šiluminiai srautai – srautai nuo šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo įrenginių. Jie neutralizuoja dirginančių srautų poveikį.

Pagrindiniai mikroklimato parametrai patalpoje:

- t_v – vidaus oro temperatūra;
- ϕ_v – santykinė oro drėgmė patalpoje;
- v_v – vidaus oro judrumas;
- t_R – radiacinė (spinduliavimo) temperatūra.

Patalpos šiluminę būklę lemia šie veiksniai:

- oro temperatūra patalpoje;
- patalpos oro drėgnumas;
- patalpos oro judrumas;

- oro srovės patalpoje;
- oro parametrų pasiskirstymas plane ir pagal patalpos aukštį (ypač svarbu temperatūrinis gradientas);
- aplinkinių atitvarų spinduliavimas, priklausantis nuo paviršių temperatūros, paviršių geometrijos, išsidėstymo ir radiacinių paviršių savybių.

Pastato šilumos režimo formavimo uždavinys – įvertinant žadinančius poveikius, remiantis reguliuojančiais šiluminiais poveikiais palaikyti patalpoje reikalaujamą mikroklimato parametrų santykį: t_v , t_R , ϕ_v , v_v (parametrų santykis gali būti optimalus ir leistinasis).

Norint išspęsti šį uždavinį būtina nustatyti:

- apsaugines atitvarų savybes;
- šildymo ir šaldymo sistemų charakteristikas;
- patalpos vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemų charakteristikas.

Šio uždavinio sprendimas galimas išsprendus šilumos, oro ir drėgmės balansų lygčių sistemą, kurią labai supaprastintai galima užrašyti taip:

$$\Sigma_q = 0,$$

$$\Sigma_j = 0,$$

$$\Sigma_i = 0.$$

Išsprendus lygčių sistemą galima nustatyti ieškomus šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemų parametrus, kuriems esant patalpoje palaikomi nustatyto mikroklimato parametrai.

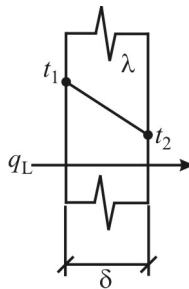
2. ŠILUMOS PERDAVIMAS PER IŠORINES ATITVARAS

Šilumos perdavimas – tai sudėtingas šilumos mainų procesas, kuriame dalyvauja elementarūs šilumos sklidimo būdai:

- Laidumas šilumai.
- Konvekciniai šilumos mainai.
- Spinduliniai šilumos mainai.
- Srautiniai šilumos ir masės mainai.

Laidumas šilumai – tai šilumos pernešimo procesas nejudančioje aplinkoje nuo labiau įkaitusių dalelių mažiau įkaitusioms.

Pagrindinis dėsnis – Furje dėsnis. Atliekant inžinerinius skaičiavimus paprastai naudojama tokia paprasčiausia schema, kuri pateikta 2.1 pav.



2.1 pav. Šilumos laidumo per viensluoksnę sienelę schema

Viensluoksnei sieniei stacionariomis sąlygomis šilumos srautas q_L gali būti skaičiuojamas taip:

$$q_L = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t, \text{ W/m}^2 \quad (2.1)$$

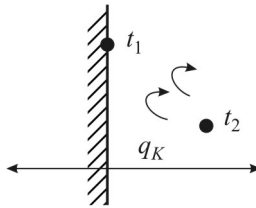
čia t_1 ir t_2 – paviršių temperatūros; λ – medžiagos šilumos laidumo koeficientas, W/mK; δ – sienelės storis, m.

Konvekciniai šilumos mainai – tai šilumos pernešimas judančiomis dalelėmis.

Pagrindinis konvekcinių šilumos mainų dėsnis – tai Niutono dėsnis. Atliekant inžinerinius skaičiavimus remiamasi paprasčiausia schema (2.2 pav.), kai paviršius, kurio temperatūra t_1 , apiplaunamas oro srautu, kurio temperatūra t_2 . Dėl temperatūrų skirtumo atsiranda konvecinis šilumos srautas q_k :

$$q_k = \alpha_k (t_1 - t_2) \text{ W/m}^2, \quad (2.2)$$

čia α_k – konvekcinių šilumos mainų koeficientas vadinamas šilumos atidavimo koeficientu, $\text{W/m}^2\text{K}$; t_1 – sienelės paviršiaus temperatūra; t_2 – oro temperatūra.



2.2 pav. Konveciniai šilumos mainai tarp sienelės ir oro

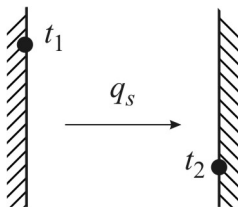
Spinduliniai šilumos mainai – tai šilumos perdavimo procesas nuo vieno paviršiaus kitam elektromagnetinėmis bangomis per skaidrią (spinduliams) aplinką – orą.

Pagrindinis spindulinių šilumos mainų dėsnis – tai Stefano Bolcmano dėsnis. Inžineriniams skaičiavimams paprastai naudojama schema (2.3 pav.) – šilumos mainai spinduliuojant tarp dviejų paviršių.

Spindulinės šilumos srautas q_s :

$$q_s = \alpha_s (t_1 - t_2) \text{ W/m}^2 \quad (2.3)$$

čia α_s – spindulinių šilumos mainų koeficientas, $\text{W/m}^2\text{K}$; t_1 ir t_2 – paviršių temperatūros, tarp kurių vyksta šilumos mainai.



2.3 pav. Šilumos spinduliavimas tarp dviejų paviršių

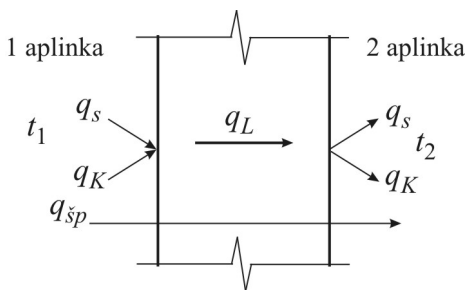
Šilumos perdavimas – tai sudėtingas šilumos mainų procesas tarp dviejų skirtingos temperatūros aplinkų per šias aplinkas skiriančią sienelę. Šiame procese gali dalyvauti visi elementarūs šilumos sklaidimo būdai (2.4 pav.).

Šilumos srautas $q_{\dot{s}p}$ inžinerinėje praktikoje skaičiuojamas pagal formulę:

$$q_{\dot{s}p} = k(t_1 - t_2) \text{ W/m}^2 \quad (2.4)$$

čia k – šilumos perdavimo koeficientas, $\text{W/m}^2\text{K}$; R – šilumos perdavimo terminė varža, $\text{m}^2\text{K/W}$;

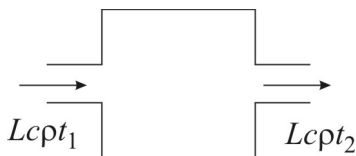
$$R = \frac{1}{k}, \text{ m}^2 \text{ K/W} \quad (2.5)$$



2.4 pav. Šilumos perdavimas per viensluoksnę atitvarą

Šilumos masės mainai (srautiniai) – tai šilumos mainai, vykstantys dėl turbulentinio neizoterminių oro masių maišymosi.

Srautiniai šilumos mainų dėsnis – tai šilumos imlumo dėsnis. Šiuos šilumos ir masės mainus atvaizduoja 2.5 pav. schema.



2.5 pav. Srautiniai šilumos – masės mainai

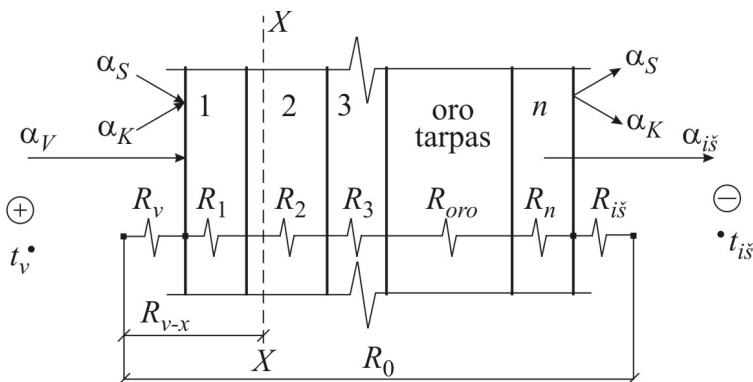
Šilumos srautas Q skaičiuojamas taip:

$$Q = L \cdot c \cdot \rho (t_2 - t_1), \quad (2.6)$$

čia L – pratekančio oro kiekis, m^3/h ; $c \cdot \rho$ – oro tūrinė specifinė šiluma, $\text{kJ}/\text{m}^3\text{K}$; t_1 ir t_2 – įtekančio į patalpą ir ištekančio iš patalpos oro temperatūra

Šilumos perdavimas per daugiasluoksnę atitvarą

Daugiasluoksinės išorinės atitvaros schema su oro tarpu pavaizduota 2.6 pav.



2.6 pav. Daugiasluoksinė išorinė atitvara su oro tarpu

Visuminė šilumos perdavimo terminė varža R_o šiuo atveju skaičiuojama taip:

$$R_o = R_v + R_l + R_2 + R_{oro} + R_n + R_i = R_v + \sum R_i + R_{oro} + R_{i\check{s}}. \quad (2.7)$$

Temperatūra bet kuriame sluoksnyje x skaičiuojama pagal šią formulę:

$$t_x = t_v - \frac{R_{v-x}}{R_o} (t_v - t_{i\check{s}}), \quad (2.8)$$

čia t_v – vidaus oro temperatūra, °C; $t_{i\check{s}}$ – išorės oro temperatūra; R_o – visuminė šilumos perdavimo terminė varža, m²K/ W; R_{v-x} – terminių varžų suma nuo vidaus aplinkos iki pjūvio x , m²K/ W;

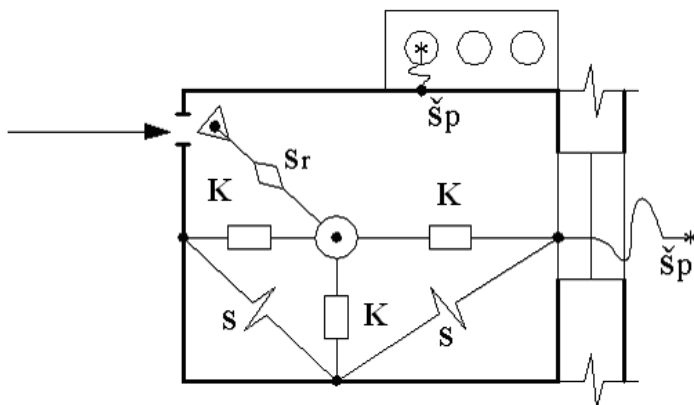
Sprendžiant įvairius statybinės šiluminės fizikos uždavinius dažnai tenka skaičiuoti išorinės atitvaros vidinio paviršiaus temperatūrą:

$$\tau_v = t_v - \frac{R_v}{R_o} (t_v - t_{i\check{s}}). \quad (2.9)$$

3. ŠILUMOS MAINAI PATALPOJE

Sudėtingų šilumos mainai sukuria patalpoje tam tikrą šilumos režimą. Norint patalpos šilumos režimą reguliuoti, būtina žinoti jo formavimosi dėsnius.

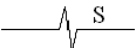
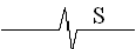
Bendrus šilumos mainus patalpoje galima nagrinėti pagal 3.1 pav. pateiktą schemą



3.1 pav. Šilumos mainų patalpoje schema

Pagrindiniai elementai, dalyvaujantys šilumos mainuose, ir šilumos mainų būdai, pavaizduoti 3.1 pav., paaiškinti 3.1 lentelėje. Tarp patalpos oro ir atitvarų paviršių vyksta konveciniai šilumos mainai K. Tarp atitvarų paviršių, turinčių skirtingas temperatūras, vyksta spinduliniai šilumos mainai S. Tarp išorinės atitvaros vidinio paviršiaus ir išorės oro vyksta šilumos perdavimo procesas Šp. Tarp šilumnešio šildymo skydelyje ir skydelio paviršiaus vyksta šilumos perdavimo procesas Šp. Tarp vėdinimo ar oro kondicionavimo sistemos tiekiamo oro srauto ir patalpos oro vyksta srautiniai šilumos ir masės mainai Sr.

3.1 lentelė. Šilumos mainų būdai ir šilumos mainų procese dalyvaujantys elementai

Pagrindiniai elementai dalyvaujantys šilumos mainų procese	Šilumos mainų būdai
 - Pagrindinio patalpos tūrio oras	 - Konvekciniai šilumos mainai tarp oro ir atitvaros paviršiaus
- Atitvarų vidiniai paviršiai	 - Spinduliniai šilumos mainai tarp atitvarų paviršiaus
- Išorės aplinka (išorės oras, šilumnešis)	 - Sroviniai šilumos mainai tarp neizoterminių oro tūrių
 - Neizoterminis oro srovės tūris	 - Šilumos perdavimas (nuo vidinio atitvaros paviršiaus išorinei aplinkai arba nuo šilumnešio atitvaros paviršiui)

3.1. Spinduliniai šilumos mainai patalpoje

Norint nagrinėti šilumos mainus patalpoje ir patalpos šiluminį režimą būtina:

1. Žinoti atskirus šilumos mainų būdus patalpoje, kurie pavaizduoti 3.1 pav. schemeje.
2. Išnagrinėti šiluminio režimo formavimąsi patalpoje.
3. Nustatyti žmogaus komforto sąlygas.
4. Išmokti projektuoti reikalingą šiluminį režimą patalpoje.

Jau išnagrinėjome vieną iš šilumos mainų sudėtinių dalių – šilumos perdavimą ir šilumos laidumą per atitvarą. Dabar išnagrinėsime kitus šilumos mainų būdus patalpoje: spindulinius ir konvekcinius šilumos mainus.

Spindulinių šilumos mainų ypatumai

Spinduliniai šilumos mainai patalpoje vyksta:

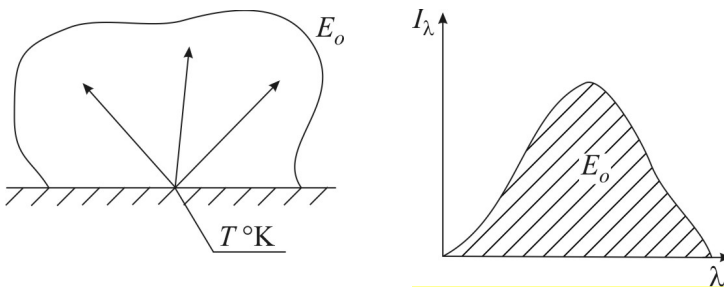
1. Esant ribotam temperatūrų diapazonui 0–150 °C (dažniau 5–95 °C).
2. Esant tam tikroms atitvarų paviršių spindulinėms savybėms, visi paviršiai yra pilki kūnai, kurių juodumo laipsnis $\varepsilon = 0,85–0,98$ artimas absoliučiai juodam kūnui.
3. Esant ribotam patalpos tūriui, kurį nusako patalpos geometrija.

Absoliučiai juodų kūnų spektrinis spinduliavimas

Absoliučiai juodų kūnų spektrinio spinduliavimo intensyvumo I_λ priklausomybę nuo bangos ilgio nusako Planko dėsnis. Gana žemose temperatūrose, kurios būdingos paviršiams patalpoje, šiluminis spinduliavimas apima palyginti siaurą bangų ilgio intervalą ir gali būti nagrinėjamas kaip monochrominis, t. y. susidedantis iš vienodo ilgio bangų.

Absoliučiai juodų kūnų integralinis spinduliavimas

Absoliučiai juodų kūnų integralinis spinduliavimas pavaizduotas 3.2 pav. Toliau nagrinėsime tik integralinį spinduliavimą ir vadinsime jį spinduliavimu.



3.2 pav. Absoliučiai juodo kūno integralinis spinduliavimas

Absoliučiai juodo kūno integralinio spinduliavimo intensyvumo dydis nustatomas pagal Stefano ir Bolcmano dėsnį:

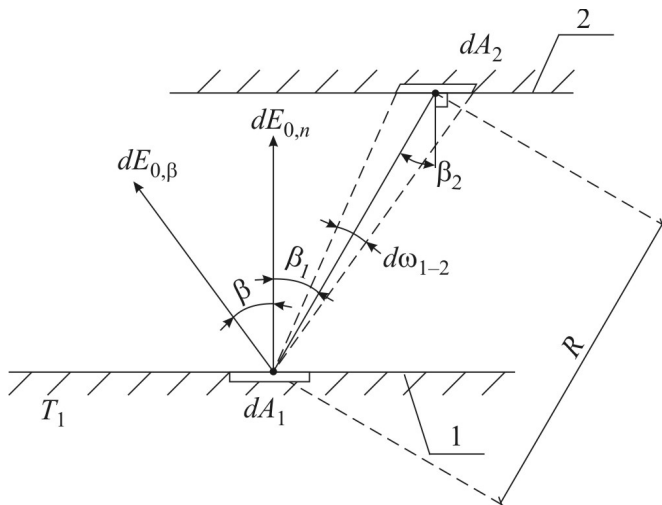
$$E_o = \int dE_o = \int I_\lambda d\lambda = c_o \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ W/m}^2, \quad (3.1)$$

čia c_o – absoliučiai juodo kūno spinduliavimo koeficientas $c_o = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Integralinio spinduliavimo intensyvumas tam tikra kryptimi

Išskirsime paviršiuje 1 elementarų plotelį dA_1 (3.3 pav.).

Nuo šio paviršiaus sklis šiluminių spindulių srautai įvairiomis kryptimis. Spinduliavimui tam tikra kryptimi galioja Lamberto dėsnis.



3.3 pav. Spinduliavimo tam tikra kryptimi atvejai

Išnagrinėsime tris spinduliavimo tam tikra kryptimi atvejus:

1) Spinduliavimo normalės kryptimi:

$$dE_{o,n} = (1/\pi) E_o dA_1 W. \quad (3.2)$$

2) Spinduliavimo kampu β :

$$dE_{o,\beta} = (1/\pi) E_o \cos \beta dA_1. \quad (3.3)$$

3) Spinduliavimo kampu β_1 į elementarų plotelį dA_2 :

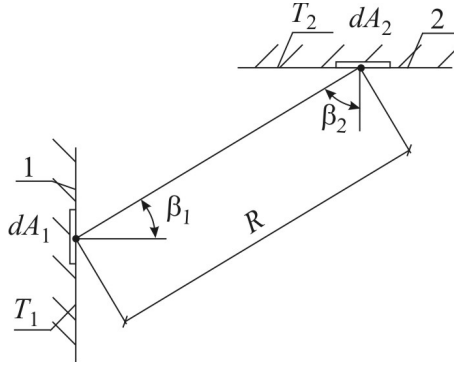
$$dE_o = (1/\pi) E_o \cos \beta_1 d\omega_{1-2} dA_1, \quad (3.4)$$

čia $d\omega_{1-2} = (\cos \beta_2 / R^2) dA_2$ – erdvinis kampas.

Tada:

$$dE_{o,dA2} = (1/\pi) E_o (\cos \beta_1 \cos \beta_2 / R^2) dA_1 dA_2. \quad (3.5)$$

Spinduliniai šilumos mainai tarp dviejų absoliučiai juodų kūnų 1 ir 2 (3.4 pav.)



3.4 pav. Spinduliniai šilumos mainai tarp dviejų absoliučiai juodų paviršių

Absoliučiai juodų kūnų paviršių 1 ir 2 spindulinių šilumos mainų balansas:

$$\begin{aligned}
 S_{1-2} &= E_{0,1-2} - E_{0,2-1} = \\
 &\iint (1/\pi) E_{0,1} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{R^2} dA_1 dA_2 - \\
 &\iint (1/\pi) E_{0,2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{R^2} dA_1 dA_2 = \\
 &(E_{0,1} - E_{0,2}) \iint (1/\pi) \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{R^2} dA_1 dA_2,
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

čia $E_{0,1}$ ir $E_{0,2}$ – absoliučiai juodų kūnų 1 ir 2 spinduliavimo intensyvumas

Kampinis spinduliavimo koeficientas

Vartosime kampinio spinduliavimo koeficiento sąvoką, kuris skaičiuojamas taip:

$$\varphi = 1/A_1 \iint (1/\pi) \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{R^2} dA_1 dA_2, \tag{3.7}$$

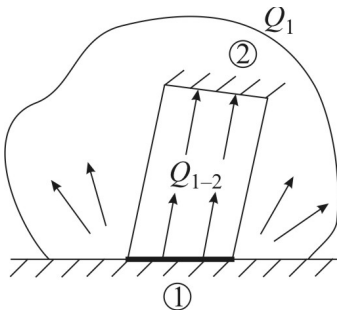
tada

$$S_{1-2} = (E_{0,1} - E_{0,2}) \varphi_{1-2} A_1. \quad (3.8)$$

Fizinė kampinio spinduliavimo koeficiento prasmė (3.5 pav.)

φ_{1-2} – tai geometrinė charakteristika, rodanti, kokia spindulinio srauto dalis nuo paviršiaus 1 patenka į paviršių 2, palyginti su visu paviršiaus 1 išspinduliuojamu srautu.

Spinduliavimo koeficientas priklauso tik nuo paviršių matmenų ir tarpusavio padėties, todėl ir yra geometrinė charakteristika.



$$\varphi_{1-2} = \frac{Q_{1-2}}{Q_1}$$

$\varphi_{1-2} A_1$ – tai geometrinis spindulinis srautas.

3.5 pav. Fizinė kampinio spinduliavimo koeficiento prasmė

Trys pagrindiniai geometrinių spindulinių srautų dėsniai

1. Tarpusavio ryšio dėsnis

Srautas nuo paviršiaus 1 į paviršių 2 lygus srautui nuo paviršiaus 2 į paviršių 1:

$$\varphi_{1-2} A_1 = \varphi_{2-1} A_2. \quad (3.9)$$

2. Uždarumo dėsnis

Spinduliavimo koeficientų nuo paviršiaus 1 į aplinkinius paviršius suma lygi 1.

$$\sum \varphi_{1-i} = 1, \quad (3.10)$$

čia i – visi paviršių 1 gaubiantys paviršiai.

Ši savybė leidžia patikrinti, ar teisingai nustatyti spinduliavimo koeficientai nuo vieno paviršiaus patalpoje į kitus paviršius.

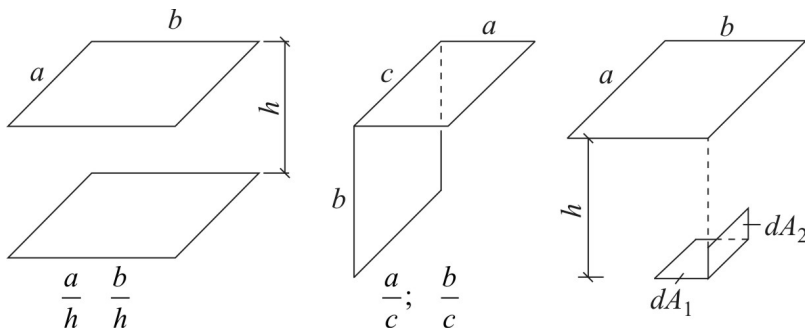
3. Pasiskirstymo dėsnis

Srautas nuo paviršiaus 1 į paviršių 2 gali būti užrašytas kaip suma dviejų srautų tarp atskirų paviršiaus 2 dalių:

$$\Phi_{1-2} = \Phi_{1-2'} + \Phi_{1-2''}. \quad (3.11)$$

Galima išvesti palyginti paprastas formules įvairiems paviršių išdėstymo patalpoje atvejams.

Charakteringieji paviršių išdėstymo patalpoje atvejai (3.6 pav.)



3.6 pav. Charakteringi paviršių išdėstymo atvejai

Spinduliavimo koeficientai charakteringiems paviršių patalpoje išdėstymo atvejams gali būti nustatyti grafikais.

Pilko kūno paviršiaus spinduliavimas

Pilko kūno išspinduliuojamas šilumos srautas yra visada mažesnis už absoliučiai juodo kūno išspinduliuojamą srautą toje pačioje paviršiaus temperatūroje. Nuosavas pilkų kūnų išspinduliavimas nustatomas pagal šią formulę:

$$E = \varepsilon E_0, \quad (3.12)$$

čia E_0 – absoliučiai juodo kūno išspinduliavimas; ε – juodumo laipsnis arba koeficientas, rodantis santykį tarp pilko ir juodo kūno išspinduliuojamo srauto:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} < 1. \quad (3.13)$$

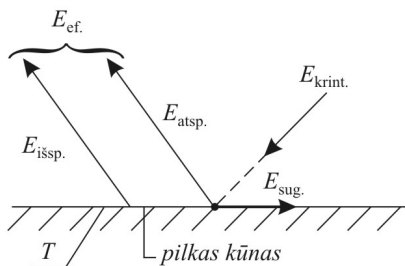
Istatę jau žinomą E_o reikšmę gauname:

$$E = \varepsilon c_o \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (3.14)$$

Pilko kūno išspinduliavimui galioja Kirchofo dėsnis, kuris teigia, kad esant monochrominiam išspinduliavimui pilko kūno paviršiaus išspinduliavimo koeficientas lygus sugėrimo koeficientui (paviršiaus juodumo laipsniui).

Spindulinių srautų bendra struktūra ant pilko kūno paviršiaus

Spindulinių šilumos mainų balansą ant paviršiaus galima rašyti išnagrinėjus spindulinių srautų struktūrą ant pilko kūno paviršiaus (3.7 pav.).



3.7 pav. Spindulinių srautų struktūra ant pilko paviršiaus

Schemoje pavaizduoti šie spinduliniai srautai:

$E_{krint.}$ – krintantis ant paviršiaus spindulinis srautas;

$E_{sug.}$ – sugertas srautas:

$$E_{sug.} = \varepsilon E_{krint.}; \quad (3.15)$$

$E_{atsp.}$ – atspindėtas srautas:

$$E_{atsp.} = (1 - \varepsilon) E_{krint.}, \quad (3.16)$$

$E_{issp.}$ – nuosavas paviršiaus išspinduliavimas;

E_{ef} – efektyvus spinduliavimas. Tai bendras šiluminių spindulių srautas, kuris eina nuo paviršiaus. Jis susideda iš $E_{\text{atasp.}}$ ir $E_{i\text{šsp.}}$:

$$E_{\text{ef.}} = E_{i\text{šsp.}} + E_{\text{atasp.}} = \varepsilon E_o + (1 - \varepsilon) E_{\text{krint.}} \quad (3.17)$$

Literatūroje pateikiama išsami skaičiavimo metodika, įvertinanti daugkartinį atspindėjimą. Tačiau žinant tai, kad pagrindinių statybinų medžiagų ε artima 1 ($\varepsilon \approx 0,85-0,95$), skirtumas $(1 - \varepsilon)$ artimas 0, todėl atliekant inžinerinius skaičiavimus tariama:

$$E_{\text{ef.}} \approx E_{i\text{šsp.}} = \varepsilon E_o = \varepsilon c_o (T/100)^4. \quad (3.18)$$

Spinduliniai šilumos mainai tarp dviejų pilkų kūnų paviršių

Spindulinių šilumos mainų balansas tarp dviejų pilkų paviršių 1 ir 2 lygus:

$$S_1 = E_{1-2} - E_{2-1} = (E_1 - E_2) \varphi_{1-2} A_1 = \varepsilon_{1-2} c_o \varphi_{1-2} A_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (3.19)$$

čia $\varepsilon_{1-2} c_o$ – tariamas paviršiaus 1 spinduliavimas; $\varphi_{1-2} A_1$ – geometrinis spindulinis srautas

Temperatūrinis koeficientas b_{1-2}

Inžineriniuose spindulinių šilumos mainų skaičiavimuose tarp dviejų paviršių 4-ojo laipsnio absoliutinių temperatūrų skirtumas pakeičiamas pirmojo laipsnio skirtumu naudojant temperatūrinį koeficientą b_{1-2} :

$$S = \varepsilon_{1-2} c_o \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{1-2} A_1 = \varepsilon_{1-2} c_o b_{1-2} (t_1 - t_2) \varphi_{1-2} A_1. \quad (3.20)$$

Temperatūrinis koeficientas lygus:

$$b_{1-2} = \frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{t_1 - t_2}. \quad (3.21)$$

Kambario temperatūrų diapazone b_{1-2} galima nustatyti apytikriai, žinant šilumos mainuose dalyvaujančių dviejų paviršių temperatūras, pagal tokią formulę:

$$b_{1-2} \cong 0,81 + 0,01\tau_{\text{vid.}}, \quad (3.22)$$

čia $\tau_{\text{vid.}}$ – vidutinė paviršių temperatūra. Patalpoje b_{1-2} dažnai artimas 1 ($b_{1-2} \approx 1$).

Tariamasis spinduliavimo koeficientas pilkiems paviršiams ε_{1-2}

Tariamam spinduliavimo koeficientui ε_{1-2} nustatyti išnagrinėsime tris charakteringus paviršių išdėstymo patalpoje atvejus:

1 atvejis. Dvi lygiagrečiosios plokštumos, atstumas tarp kurių mažas, palyginti su jų matmenimis. Šiuo atveju:

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad (3.23)$$

čia ε_1 ir ε_2 – paviršių 1 ir 2 spinduliavimo koeficientai. Dydis ε_{1-2} mažesnis už ε_1 ir ε_2 :

$$\varepsilon_{1-2} < \varepsilon_1, \quad \varepsilon_{1-2} < \varepsilon_2.$$

2 atvejis. Vieną paviršių iš visų pusių gaubia panašios geometrinės formos kitas paviršius (tai sfera sferoje, cilindras cilindre).

Šiuo atveju, jei mažesnio paviršiaus plotas yra A_1 , o didesnio – A_2 , tai ε_{1-2} lygus:

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (3.24)$$

Jeigu $A_1/A_2 \rightarrow 0$, tai $\varepsilon_{1-2} \approx \varepsilon_1$.

3 atvejis. Maži paviršiai nutolę vienas nuo kito. Šiuo atveju atspindinčio srauto dalis, grįžtanti ant išspinduliuojančio paviršiaus, nėra didelė.

$$\varepsilon_{1-2} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \quad (3.25)$$

$$\text{ir } \varepsilon_{1-2} < \varepsilon_1.$$

Spinduliniai šilumos mainai tarp paviršiaus 1 ir kitų paviršių patalpoje

Spindulinių šilumos mainų balansas ant paviršiaus 1 lygus:

$$S = \Sigma (E_{1-i} - E_{i-1}) = \Sigma \varepsilon_{1-i} c_o \varphi_{1-i} A_i b_{1-i} (t_1 - t_i), \quad (3.26)$$

čia $\varepsilon_{1-i} c_o$ – išspinduliavimo koeficientas; $\varphi_{1-i} A_i$ – geometrinis spindulinis srautas; $b_{1-i} (t_1 - t_i)$ – temperatūrų skirtumas.

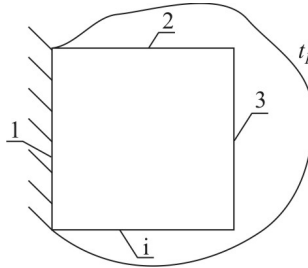
Spindulinio srauto išraišką galima supaprastinti naudojant radiacinę (spinduliavimo) patalpos temperatūrą kokio nors vieno paviršiaus atžvilgiu, ant kurio ir nagrinėjami spinduliniai šilumos mainai.

Spindulinė patalpos temperatūra

Spindulinė patalpos temperatūra t_{R1} – tai apibendrinta visų paviršių, gaubiančių paviršių 1, temperatūra. Apibendrinti temperatūrą reikia pagal lygių (vienodų) spindulinių šilumos mainų intensyvumo principą (3.8 pav.).

Šį principą geriausia atspindi kampinis spinduliavimo koeficientas, todėl t_R teisingausia nustatyti kaip vidutinę pagal φ .

$$t_{R,1} = \frac{\Sigma \varphi_{1-i} t_i}{\Sigma \varphi_{1-i}}. \quad (3.27)$$



3.8 pav. Paviršius 1 ir kiti paviršiai, charakterizuojami temperatūra t_R

Pagal spindulinių srautų uždarumo dėsnį patalpoje paprastai

$$\sum_{i=1}^{\infty} \varphi_{1-i} = 1, \quad (3.28)$$

todėl

$$t_{R,1} = \sum_1^{\infty} \varphi_{1-i} t_i, \quad (3.29)$$

čia t_R – tai vidutinė visų paviršių temperatūra patalpoje, nustatyta pagal kampinius spinduliavimo koeficientus.

Yra tendencija nustatyti radiacinę patalpos temperatūrą kaip vidutinę pagal paviršių plotus:

$$t_R \approx \frac{\sum A_i t_i}{\sum A_i}. \quad (3.30)$$

Tai paprasčiau, bet mažiau teisinga ir tikslu.

Spinduliniai šilumos mainai patalpoje įvertinant t_R

Spindulinių šilumos mainų balansas ant paviršiaus 1, naudojant radiacinę temperatūrą:

$$S_1 = \varepsilon_{1-R} c_o \varphi_{1-R} \times A_1 b_{1-R} (t_1 - t_R). \quad (3.31)$$

Paviršiaus spindulinių šilumos mainų koeficientas patalpoje

Vartosime sąvoką „spindulinių šilumos mainų koeficientas“, kuris lygus:

$$\alpha_{s,1} = \varepsilon_{1-R} c_o \varphi_{1-R} b_{1-R}. \quad (3.32)$$

Tada spinduliniai šilumos mainai tarp paviršiaus 1 ir jį gaubiančių paviršių lygūs:

$$S_1 = \alpha_{s,1} (t_1 - t_R) A_1. \quad (3.33)$$

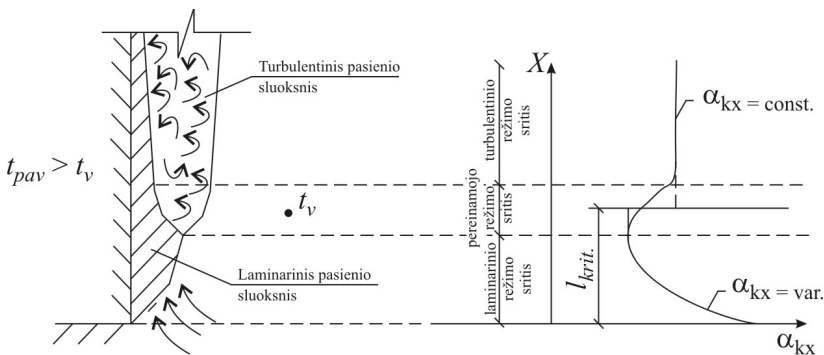
3.2. Konvekciniai šilumos mainai patalpoje

Šilumos mainai vykstant laisvai konvekcijai neribotame patalpos tūryje

Paprasčiausias yra laisvų konvekcinių šilumos mainų ant paviršiaus atvejis, kai jie vyksta neribotoje erdvėje. Jie vadinami laisva arba natūralia konvekcija. Laisva konvekcija vadinamas šilumos mainų procesas ant laisvai išdėstyto neizoterminio paviršiaus neribotame nejudančio oro tūryje.

Šiuos šilumos mainus lemia tik gravitacinių jėgų poveikis (dėl temperatūrų skirtumo) ir oro klampumas γ .

Jei paviršius šiltas, tai šalia jo esantis oras įšyla ir kyla į viršų, iš apačios yra išstumiamas šalto oro masės (3.9 pav.).



3.9 pav. Pasienio sluoksniai prie šiltos sienelės ir konvekcinių šilumos mainų koeficiento kitimas

Šalia vertikalios įkaitusios paviršiaus susidaro pasienio sluoksnis, kurio storis didėja pagal oro judėjimo kryptį.

Pradinėje judėjimo zonoje pasienio sluoksnis yra laminarinis. Tam tikru atstumu nuo apatinės paviršiaus ribos tekėjimo režimas tampa turbulentinis.

Šis judėjimas įvyksta ne iš karto ir charakterizuojamas pereinamąja sritimi. Tačiau atliekant inžinerinius skaičiavimus paprastai imamos dvi sritys: turbulentinių ir laminarinių šilumos mainų. Tuo tikslu varto-

jama kritinio atstumo sąvoka $l_{kr.}$ – tai atstumas nuo apatinės paviršiaus ribos, kuriame laminarinis režimas pereina į turbulentinį.

Laisvų konvekcinių šilumos mainų aerodinamiką lemia temperatūrų skirtumas ($\Delta t = t_{pav.} - t_v$) ir oro klampumas γ .

Iš panašumo teorijos žinome, kad šiuo atveju nusakantis procesą kriterijus yra Grashofas (Gr) ir Prandlis (Pr), tiksliau, jų sandauga:

$$Gr \cdot Pr = \frac{\beta g \Delta t l^3}{\gamma^2} \frac{\gamma}{a}, \quad (3.34)$$

čia $\beta = \frac{1}{T}$ – aplinkos oro temperatūrinis tūrinio plėtimosi koeficientas, $1/K$; g – laisvojo kritimo pagreitis $9,8 \text{ m/s}^2$; γ – kinematinio klampumo koeficientas, m^2/s ; l – charakteringas paviršiaus matmuo pagal srauto kryptį, m ; $\Delta t = t_{pav.} - t_v$ charakteringas temperatūrų skirtumas.

Jei lauko oro temperatūra $t_v \cong 20^\circ \text{C}$, tai

$$\beta = \frac{1}{273 + 20} = \frac{1}{293} \text{ } 1/K; \gamma = 15,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad Pr \cong 0,709.$$

Tada

$$Gr \cdot Pr = \frac{1 \cdot 9,81 \cdot 0,709}{293 \cdot 15,6 \cdot 10^{-6}} \Delta t \cdot l^3 = 1,05 \cdot 10^8 \Delta t \cdot l^3 \cong 1 \cdot 10^8 \Delta t \cdot l^3, \\ Gr \cdot Pr = 1 \cdot 10^8 \Delta t \cdot l^3. \quad (3.35)$$

Perėjimo nuo laminarinių į turbulentinius šilumos mainus kritinis atstumas

Eksperimentais nustatyta, kad perėjimas nuo laminarinių į turbulentinius šilumos mainus vyksta, kai

$$Gr \cdot Pr \cong 2 \cdot 10^7. \quad (3.36)$$

Galima nustatyti atstumą nuo paviršiaus pradžios (kritinį atstumą $l_{kr.}$), kuriame įvyksta šis perėjimas.

Tam prilyginsime lygčių (3.35) ir (3.36) dešiniąsias puses ir l pakeisime l_{kr} :

$$1 \cdot 10^8 \Delta t l_{kr}^3 = 2 \cdot 10^7,$$

$$\Delta t l_{kr}^3 = 2 \cdot 10^{-1}.$$

Tada

$$l_{kr} = \sqrt[3]{\frac{0,2}{\Delta t}}. \quad (3.37)$$

Nustatę temperatūrų skirtumą Δt , galime paskaičiuoti l_{kr} . Patalpoje paprastai $\Delta t = 3-5$ °C, ir $l_{kr} \cong 0,3$ m, o tai daug mažiau už geometrinius patalpos matmenis. Todėl galima galvoti, kad visi paviršiai patalpoje (sienos, lubos, grindys) yra turbulentinio šilumos mainų režimo srityje.

Konvekcinų šilumos mainų koeficientas

Turbulentiniam šilumos mainų režimui eksperimentiškai nustatyta tokia priklausomybė:

$$Nu = 0,135 (Gr Pr)^{1/3}, \quad (3.38)$$

$$Nu = \frac{\alpha_k l}{\lambda}. \quad (3.39)$$

Jei $t_v = 20$ °C, $\lambda = 0,0257$ W/mK,

$$\text{tada } \frac{\alpha_k l}{0,0257} = 0,135 (1,05 \cdot 10^8 \Delta t l^3)^{1/3}, \quad (3.40)$$

$$\frac{\alpha_k}{0,0257} = 0,135 (1,05 \cdot 10^8 \Delta t)^{1/3}. \quad (3.41)$$

Galima padaryti išvadą, kad esant turbulentiniam režimui, α_k nepriklauso nuo geometrinių matmenų.

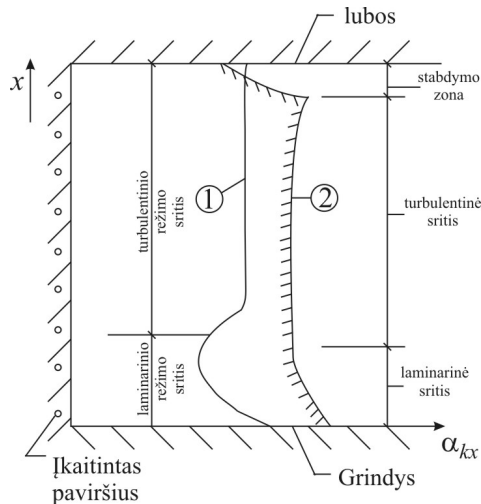
Tačiau α_k priklauso nuo paviršiaus padėties patalpoje. Bet kaip laisvai išdėstytiems paviršiams eksperimentiškai patvirtinta, kad

$$\alpha_k = A \sqrt[3]{\Delta t}. \quad (3.42)$$

Vertikaliųjų paviršių $A = 1,66$, šiltų lubų arba šaltų grindų $A = 1,16$, šiltų grindų arba šaltų lubų $A = 2,26$.

Konvekciniai šilumos mainai patalpoje esant ribotam patalpos tūriui

Panagrinėkime procesą ant įkaitintos pertvaros patalpoje (3.10 pav.).



3.10 pav. Pasienio sluoksniai prie šiltos sienelės ir konvekcinių šilumos mainų koeficiento kitimas esant ribotam patalpos tūriui

Natūralios konvekcijos ribotame patalpos tūryje ypatumai:

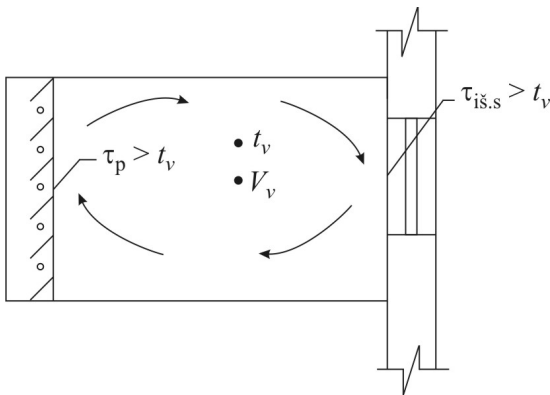
1. Stabdymo zonos atsiradimas prie lubų.
2. Turbulentinėje zonoje α_k didėja didėjant geometriniam matmeniui x .
3. Deformuojasi laminarinių ir turbulentinių šilumos mainų zonos dėl lubų įtakos ir bendros oro cirkuliacijos patalpoje.
4. Šilumos mainų intensyvumas padidėja dėl bendro oro judrumo įtakos patalpoje ir patalpos geometrijos.

Bendro oro judrumo patalpoje įtaka konvekcinių šilumos mainų intensyvumui

Mišri konvekcija

Dėl temperatūrų skirtumo ir kitų priežasčių oro judėjimas sukelia bendrą oro judėjimą patalpoje – v_v .

Oro judėjimas v_v keičia šilumos mainų ant patalpos paviršių intensyvumą (3.11 pav.). Bendras oro judrumas patalpoje gali būti nagrinėjamas kaip priverstinis judėjimas prie paviršiaus.



3.11 pav. Patalpa su oro judėjimo srautais

Dėl bendro natūralios ir priverstinės konvekcijos veikimo ant paviršiaus susidaro mišrioji konvekcija:

$$\alpha_k(\Delta t, v_v) \gg \alpha_k(\Delta t).$$

α_k priklauso nuo oro judėjimo išilgai paviršiaus intensyvumo, o jis duotuoju momentu susijęs ne tik su Δt , bet ir su bendru oro judrumu patalpoje v_v , kyla uždavinys nustatyti $\alpha_k(\Delta t, v_v)$ naudojant sustartinį rodiklį $\Delta t_{\text{sut.}}$ arba $(v_v)_{\text{sut.}}$.

Konvekcinio oro srauto energijos balansas prie įkaitinto paviršiaus

Dėl oro temperatūrų skirtumo Δt oro judėjimas vyksta išilgai įkaitintos plokštės. Tam tikru atstumu nuo plokštės apačios kylančio

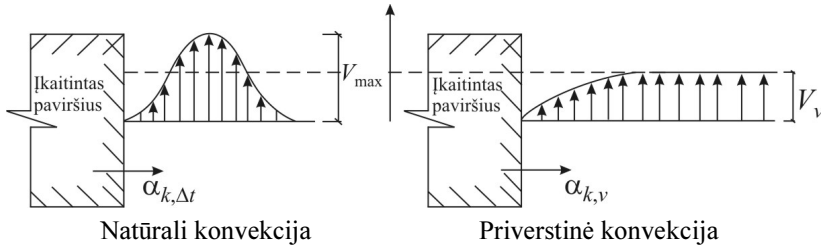
oro srauto greitis bus maksimalus $v_{\max}$. Gravitacinio lauko potencinė energija pereina į oro srauto šalia įkaitintos plokštės kinetinę energiją. Nevertinant nuostolių, visa potencinė energija pereis į srauto kinetinę energiją:

$$W_p \cong W_k \quad (3.43)$$

arba
$$\Delta t \beta l = \frac{v_{\max}^2}{2g} . \quad (3.44)$$

Gauta lygtis, kurioje Δt susijusi su v , t. y. žinant Δt galima nustatyti v , ir atvirkščiai.

Laisvos ir priverstinės konvekcijos eksperimentiniai duomenys palyginti 3.12 pav.



3.12 pav. Laisva ir priverstinė konvekcija patalpoje

Iš eksperimentų žinoma, kad jeigu $v_v \cong \frac{v_{\max}}{2}$, tai konvekcinių šilumos mainų intensyvumas abiem atvejais vienodas:

$$\alpha_{k(\Delta t)} \cong \alpha_{k(V_v)} . \quad (3.45)$$

Ekvivalentiškas oro judrumui v_v temperatūrų skirtumas Δt_v

Žinant, kad $\alpha_{k(\Delta t)} \cong \alpha_{k(V_v)}$, kai $v_v \cong \frac{v_{\max}}{2}$, galima nustatyti temperatūrų skirtumą esant laisvai konvekcijai, kuris sukelia tokį pat šilumos mainų intensyvumą, kaip ir oro judrumas v_v , esant priverstinei

konvekcijai. Šis temperatūrų skirtumas vadinamas ekvivalentišku Δt_v .

Energijos balansas prie paviršiaus:

$$l\Delta t\beta = \frac{v_{\max}^2}{2g}. \quad (3.46)$$

Ištačius $2v_v = v_{\max}$ gaunama:

$$l\Delta t_v\beta = \frac{(2v_v)^2}{2g}, \quad (3.47)$$

$$\Delta t_v = \frac{(2v_v)^2}{2g}, \quad (3.48)$$

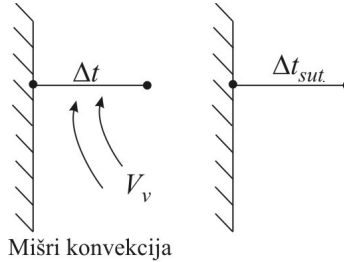
kai $t_v = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $\beta = \frac{1}{293}\text{ }1/\text{K}$, $g = 9,81\text{ m}^2/\text{s}$

$$\Delta t_v = \frac{2^2}{2 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{293}} \cdot \frac{v_v^2}{l} \cong 60 \frac{v_v^2}{l},$$

$$\Delta t_v \cong 60 \frac{v_v^2}{l}. \quad (3.49)$$

Mišriosios konvekcijos Δt ir v_v įvertinimas naudojant bendrą rodiklį $\Delta t_{\text{sut.}}$

Pereisime nuo mišriosios konvekcijos prie tokios schemos, kai bendras Δt ir v_v veikimas pakeičiamas bendru rodikliu – sutartiniu temperatūrų skirtumu – $\Delta t_{\text{sut.}}$ (3.13 pav.).



3.13 pav. Mišriosios konvekcijos įvertinimas naudojant Δt_{sut} .

Tuo tikslu taikomas superpozicijos metodas (sudedami atskiri sprendiniai):

$$\Delta t_{sut} = \Delta t + \Delta t_v, \quad (3.50)$$

čia Δt – temperatūrų skirtumas tarp paviršiaus ir oro patalpoje; Δt_v – temperatūrų skirtumas, kuris sukelia tokį pat konvekcinių šilumos mainų intensyvumą, kaip ir priverstinis oro srautas, judantis greičiu v_v .

Vadinasi, α_k esant mišriai konvekcijai (sąlygoms, kuriomis ir yra patalpoje) bus lygus:

$$\alpha_k = A \sqrt[3]{\Delta t_{sut}} = A \sqrt[3]{\Delta t + \Delta t_v}. \quad (3.51)$$

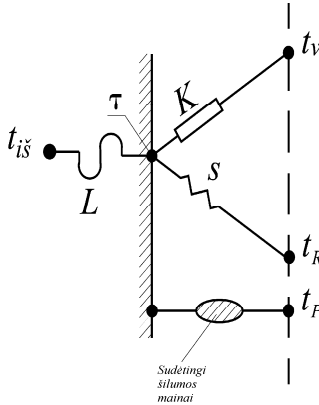
3.3. Šilumos balansai patalpoje

Šilumos mainai patalpoje ir paviršiaus šilumos balansas

Patalpos paviršiuje šilumos balansas:

$$S + K + L = O.$$

Vartosime sąvoką „patalpos temperatūra t_p “, kuria remiantis galima konvekcinius ir spindulinius šilumos mainus ant paviršiaus pakeisti vienais sudėtingais šilumos mainais (3.14 pav.).



3.14 pav. Šilumos srautų struktūra ant išorinės sienos vidinio paviršiaus

Patalpos temperatūra t_p

Patalpos temperatūra dar vadinama atstojamąja temperatūra t_p – tai tokia sutartinė vidutinė (tarp oro temperatūros t_v ir radiacinės temperatūros t_R) temperatūra patalpoje, kuri ekvivalentiška t_v ir t_R pagal šilumos mainų sąlygas patalpoje.

Paprastai $t_v \neq t_R$. Naudojant t_p , daroma prielaida, kad $t_p = t_R = t_v$.

Esant mažam oro judrumui, kai paprastai būna patalpoje $v_v = 0,1\text{--}0,2$ m/s:

$$t_p = \frac{t_v + t_R}{2} \quad (3.52)$$

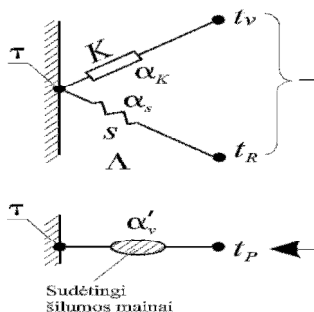
Esant skirtingiems oro judrumo greičiams, patalpos arba atstojamąją temperatūrą galima nustatyti pagal formulę:

$$t_{\text{atst.}} = A t_v + (1 - A) t_R, \quad (3.53)$$

čia A – oro judrumą įvertinantis koeficientas:

$V_{\text{oro}}, \text{ m/s}$	$\leq 0,2$	$0,2\text{--}0,6$	$0,6\text{--}1,0$
A	$0,5$	$0,6$	$0,7$

Sudėtingi spinduliniai ir konvekciniai šilumos mainai ant paviršiaus patalpoje pavaizduoti 3.15 pav.



3.15 pav. Sudėtingi spinduliniai ir konvenciniai šilumos mainai

1 m² paviršiaus ploto galima užrašyti:

$$S + K = \alpha_s(\tau - t_R) + \alpha_k(\tau - t_v) = \alpha_v(\tau - t_p), \quad (3.54)$$

čia α_v – šilumos mainų (sudėtingų spindulinių ir konvekcinių) koeficientas.

Sudėtingų spindulinių ir konvekcinių šilumos mainų ant paviršiaus patalpoje koeficientas α_v

Iš formulės (3.53) gauname α_v išraišką:

$$\alpha_v = \alpha_s \frac{\tau - t_R}{\tau - t_p} + \alpha_k \frac{\tau - t_v}{\tau - t_p}. \quad (3.55)$$

Tai teisinga, kai α_v nustatoma įvertinant t_p . Inžinerinėje praktikoje skaičiuojant dažnai patogų α_v nustatyti t_v atžvilgiu, t. y. laikoma, kad

$$Q_{S+K} = \alpha_v(\tau - t_v), \quad (3.56)$$

tada

$$\alpha_v = \alpha_k + \alpha_s \frac{\tau - t_R}{\tau - t_v}. \quad (3.57)$$

Koeficientas α_v gali būti lygus $\alpha_k + \alpha_s$, tuo atveju, jei $t_v = t_R$, bet realiomis sąlygomis paprastai $t_v \neq t_R$.

Paviršiaus šilumos mainai laidumu

Bendruoju atveju šilumos srautas, patenkantis į paviršių (3.16 pav.):

$$L = -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{pav}. \quad (3.58)$$

Stacionariomis sąlygomis terminė varža nuo vidinio paviršiaus į išorinę aplinką

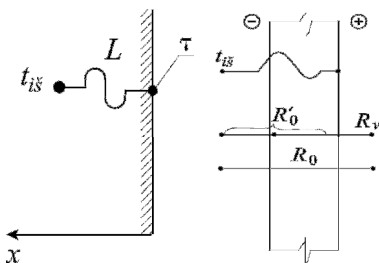
$$R'_o = R_o - R_v. \quad (3.59)$$

Šilumos perdavimo koeficientas:

$$k' = \frac{1}{R'_o}. \quad (3.60)$$

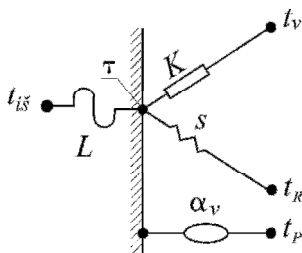
Šilumos perdavimą nuo paviršiaus laidumu (šilumos perdavimu) tokiomis sąlygomis galima apskaičiuoti pagal lygtį:

$$L = \frac{1}{R'_o} (\tau - t_{is}) = k' (\tau - t_{is}). \quad (3.61)$$



3.16 pav. Šilumos perdavimas per išorinę sieną

Paviršiaus šilumos balansas patalpoje



3.17 pav. Šilumos mainų ant išorinės sienos paviršiaus schema

Paviršiaus šilumos balansas bendriausiu atveju (3.17):

$$S + K + L = 0. \quad (3.62)$$

Stacionariomis sąlygomis paviršiaus, turinčio temperatūrą τ , šilumos balansą galima užrašyti:

$$\alpha_s(\tau - t_R) + \alpha_k(\tau - t_v) + k'(\tau - t_{is}) = 0. \quad (3.63)$$

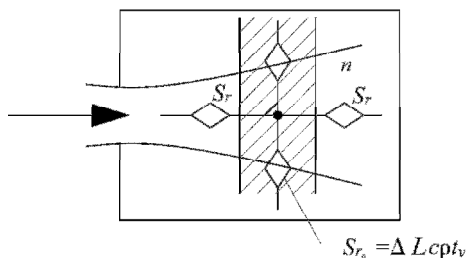
Naudojant vidinio paviršiaus šilumos atidavimo koeficientą α_v balanso lygtis turi pavidalą:

$$\alpha_v(\tau - t_p) + k'(\tau - t_{is}) = 0. \quad (3.64)$$

Šilumos balanso užrašymo taisyklė: visi nariai rašomi vienoje lygties pusėje su pliuso ženklu, o ieškomoji temperatūra τ visada rašoma toje pačioje vietoje temperatūrų skirtume.

Šilumos mainai patalpoje ir oro šilumos balansas

Laisva neizoterminė oro srovė (3.18 pav.)

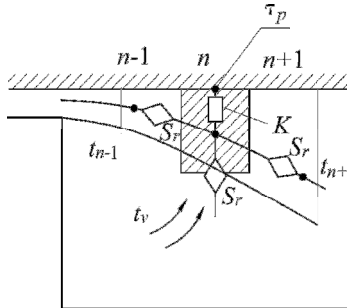


3.18 pav. Laisvos neizoterminės oro srovės patalpoje schema

Srovė neprilimpa prie paviršiaus. Neizoterminės srovės elementaraus tūrio n srautinių šilumos mainų visų dedamųjų suma:

$$\Sigma S r_n = 0. \quad (3.65)$$

Prilimpanti prie paviršiaus neizoterminė srovė



3.19 pav. Prilimpančios prie paviršiaus neizoterminės oro srovės schema

Srovė prilimpa prie paviršiaus. Šiuo atveju yra stebimi elementaraus srovės tūrio n srautiniai šilumos mainai su patalpos oru ir konvekciniai šilumos mainai su lubų paviršiumi (3.19 pav.). Šilumos balansas:

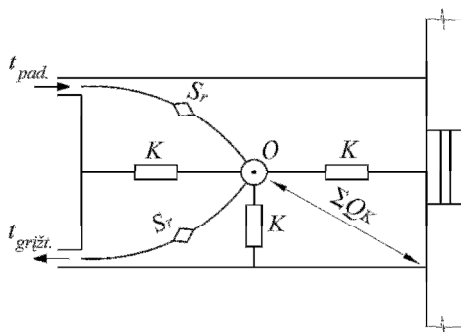
$$\Sigma S r_n + K_n = 0. \quad (3.66)$$

Šilumos mainai ir pagrindinio patalpos tūrio oro šilumos balansas

Tiesiogiai į patalpas gali patekti konvekcinė šiluma Q_K nuo įkai-tintų įrengimų, konvektorių ir t. t. Tai įvertinant oro šilumos balansą patalpoje (3.20 pav.) galima užrašyti taip:

$$\Sigma K_o + \Sigma S r_o \pm \Sigma Q_{K_o} = 0, \quad (3.67)$$

čia ΣQ_{K_o} – tiesioginiai konvekciniai šilumos išsiskirimai į patalpos orą.



3.20 pav. Patalpos oro tūrio šilumos balanso sudarymo schema

Šilumos mainai ir patalpos šilumos balansas

Pilna šilumos mainų patalpoje lygčių sistema

Pilna šilumos mainų patalpoje lygčių sistema susideda iš trijų lygčių kategorijų:

I. Šilumos balanso lygtys visiems charakteringiems šiluminiu techniniu požiūriu paviršiams patalpoje (visam jų paviršiui A_i)

$$S_1 + K_1 + L_1 = 0$$

$$S_2 + K_2 + L_2 = 0 \text{ i lygčių.} \quad (3.68)$$

$$S_i + K_i + L_i = 0$$

i lygčių skaičius atitinka charakteringų paviršių skaičių.

II. Elementarių neizoterminių oro srovių tūrių šilumos balanso lygtys:

$$\sum S r_1 + K_1 = 0$$

$$\sum S r_2 + K_2 = 0 n \text{ lygčių.} \quad (3.69)$$

$$\sum S r_n + K_n = 0$$

n lygčių – visiems n elementariems neizoterminių srovių tūriams.

III. Pagrindinio oro tūrio patalpoje šilumos balanso lygtis:

$$\Sigma S_{r_o} + \Sigma K_o + \Sigma Q_{K.o.} = 0 \} - \text{viena lygtis.} \quad (3.70)$$

Pilną lygčių sistemą sudaro visi elementai, dalyvaujantys šilumos mainuose ir lygčių skaičius lygus $i + n + 1$.

Paprastai šilumos balanso lygčių skaičius patalpoje būna 30–50. Inžinerinėje praktikoje išspręsti tokią lygčių sistemą galima tik kompiuterinėmis skaičiavimo programomis.

Pilnai lygčių sistemai supaprastinti galima sugrupuoti charakteringus paviršius tokiu būdu:

1. Įkaitę paviršiai – 1 lygtis.
2. Atšalę paviršiai – 1 lygtis.
3. Neutralūs paviršiai – 1 lygtis.
4. Oro tūris – 1 lygtis.

Gaunamos keturios lygtys.

Viena bendrų šilumos mainų patalpoje lygtis

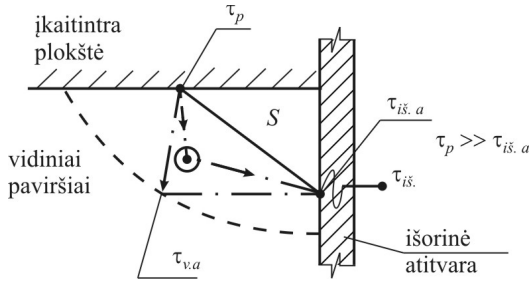
Iš esmės patalpoje vyksta šilumos mainai tarp šilumos šaltinių (įkaitę paviršiai, šilto pritekančio oro srovės) ir šilumos sugėriklių (atšalusį paviršių, išmetamojo oro). Todėl visi kiti paviršiai ir patalpos oras yra kaip perduodanti, neutrali aplinka.

Patalpoje tai gali būti šilumos mainai tarp įkaitintos plokštės (P) ir atšalusios išorinės atitvaros (IS).

Šilumos mainų būdai atvaizduoti 3.21 pav.

Šilumos mainai ant paviršiaus:

$$S + K = Q_S + \Delta Q_S + Q_K. \quad (3.71)$$



3.21 pav. Schema pilno spinduliavimo koeficiento prasmę paaiškinti
Tiesioginiai spinduliniai šilumos mainai (plokštė – išorinė atitvara) Q_S

- - - - - Konvekciniai šilumos mainai (plokštė – oras – išorinė atitvara) Q_K

— · — · — · — Atspindėti spinduliniai šilumos mainai (plokštė – vidinės atitvaros – išorinė atitvara) ΔQ_S

— 〰 — Šilumos mainai (laidumu) šilumos perdavimu nuo vidinio išorinės atitvaros paviršiaus išorės aplinkai

Spinduliniai šilumos mainai ant plokštės paviršiaus S_p

$$S_p = Q_S + \Delta Q_S. \quad (3.72)$$

Vartojame pilno spinduliavimo koeficiento Φ sąvoką:

Pagal fizinę prasmę:

$$\Phi = \varphi + \Delta\varphi, \quad (3.73)$$

čia φ – kampinis spinduliavimo koeficientas (tiesioginis) nuo plokštės į išorinę atitvarą; $\Delta\varphi$ – atspindėto spinduliavimo koeficientas nuo plokštės į išorinę atitvarą per tarpininką – vidinius paviršius.

Koeficientas Φ rodo, kuri spindulinių šilumos mainų dalis eina nuo plokštės išorinės atitvaros link (tiesiogine ir atspindėta spinduliuote), palyginti su visa spinduline šiluma, kurią atiduoda plokštė ($\Phi < 1,0$).

$$\Phi = \frac{\frac{A_{i\check{s}.a} - \varphi^2}{A_p}}{\frac{A_{i\check{s}.a} - 2\varphi + 1}{A_p}}, \quad (3.74)$$

čia $A_{i\check{s}.a}$ ir A_p – išorės atitvaros ir plokštės plotas.

Plokštės spinduliniai šilumos mainai:

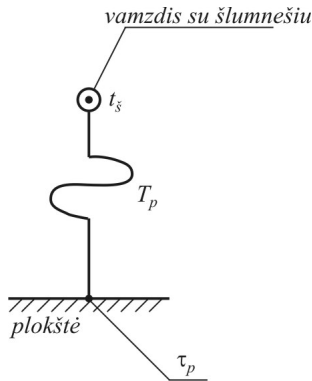
$$S = \varepsilon_{p-i\check{s}.a} \cdot c_0 \Phi_{p-i\check{s}.a} A_p b_{p-i\check{s}.a} (\tau_p - \tau_{i\check{s}.a}) = \alpha'_s (\tau_p - \tau_{i\check{s}.a}) A_p, \quad (3.75)$$

čia α'_s – spindulinių šilumos mainų koeficientas, kuris įvertina temperatūrų skirtumą $(\tau_p - \tau_{i\check{s}.a})$ skirtingai; α_s – įvertina temperatūrų skirtumą $(\tau_p - \tau_R)$.

Konvekciniai šilumos mainai ant plokštės paviršiaus

$$K_p = \alpha_k (\tau_p - t_v) A_p. \quad (3.76)$$

Šilumos laidumo dedamoji L ant plokštės paviršiaus (3.22 pav.)



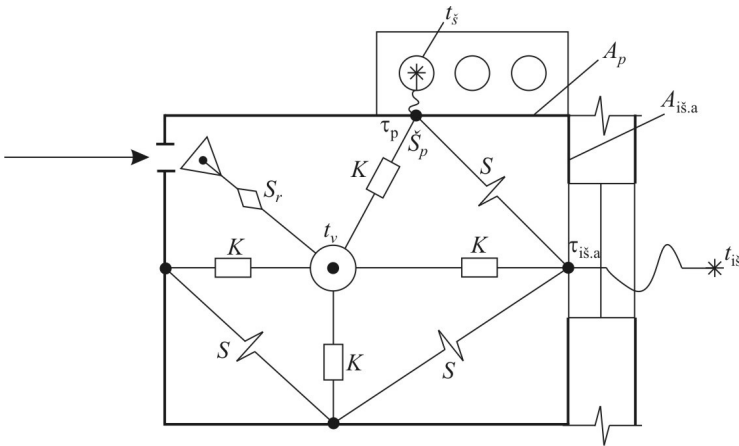
3.22 pav. Šilumos perdavimas nuo šilumnešio iki šilto paviršiaus

Perduodamą šilumos srautą nuo šilumnešio iki šiltos plokštės paviršiaus galima skaičiuoti taip:

$$L_p = k'_p (\tau_p - t_s) A_p, \quad (3.77)$$

čia t_s – vidutinė šilumnešio temperatūra šildymo sistemos vamzdyuose, įrengtuose šildymo plokštėje; k'_p – nepilnas šilumos perdavimo koeficientas nuo šilumnešio laidumu per plokštę iki jos paviršiaus.

Viena bendrų šilumos mainų patalpoje lygtis (3.23 pav.)



3.23 pav. Šilumos mainų patalpoje schema

Tai šilumos mainų lygtis tarp šilumos šaltinių (plokštės) ir šilumos išorinių atitvarų:

$$S_p + K_p + L_p = [\alpha'_s (\tau_p - \tau_{i.s.a.}) + \alpha_k (\tau_p - t_v) + k'_p (\tau_p - t_s)] A_p \quad (3.78)$$

$$L_p = S_p + K_p = L_{i.s.a.} \quad (3.79)$$

arba

$$k'_p (\tau_p - t_s) A_p = [\alpha'_s (\tau_p - \tau_{i.s.a.}) + \alpha_k (\tau_p - t_v)] A_p = k'_{i.s.a.} (\tau_{i.s.a.} - t_{i.s.}) A_{i.s.a.} \quad (3.80)$$

čia $k'_{i.s.a.}$ – nepilnas išorinės atitvaros šilumos perdavimo koeficientas:

$$k'_{\text{iš.a.}} = \frac{1}{R'_o}; R'_o = R_o - R_v.$$

Schemoje (3.23 pav.) pavaizduoti visi dydžiai, įeinantys į šilumos balanso lygtis.

4. VIENMATIS ŠILUMOS PERDAVIMAS PER ATITVARAS

4.1. Šilumos laidumo lygtis diferencialine ir baigtinių dydžių forma

Šilumos laidumo procesas aprašomas Furje lygtimi diferencialinėje formoje:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (4.1)$$

čia t – temperatūra, °C; c – atitvaros medžiagos masinė savitoji šiluma, J/kg K; ρ – medžiagos tankis kg/m³; z – laikas, s; x – koordinatė, m; λ – atitvaros medžiagos šilumos laidumo koeficientas, W/mK.

Jei $\lambda = \text{const}$:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial z} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (4.2)$$

Atliekant inžinerinius skaičiavimus patogiu naudotis Furje lygtimi, parašyta baigtinių dydžių forma:

$$c\rho \frac{\Delta t}{\Delta z} = \lambda \frac{\Delta^2 t}{\Delta x^2}. \quad (4.3)$$

Pertvarkius lygtį:

$$\Delta_z t \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\Delta z}{\Delta x^2}, \quad \Delta_x^2 t = \frac{a \Delta z}{\Delta x^2} \Delta_x^2 t. \quad (4.4)$$

Šilumos perdavimo procese naudojamas Furje (F_0) kriterijus:

$$F_0 = \frac{a \cdot z}{l^2}, \quad F_{0\Delta} = \frac{a \Delta z}{\Delta x^2}. \quad (4.5)$$

Naudojant F_0 kriterijų, lygtis baigtinių dydžių forma užrašoma taip:

$$\Delta_z t = F_{0\Delta} \cdot \Delta x^2 t. \quad (4.6)$$

Pagal šį užrašą daroma išvada: temperatūros pasiskirstymas laiko atžvilgiu tiesiog proporcingas kreiviniam temperatūros pasiskirstymui erdvėje.

Skaičiuojant kartais naudojamas ir kitoks (4.4) lygties užrašas, taikant elementaraus sluoksnio terminę varžą R ir elementaraus sluoksnio šiluminį inlumą C :

$$\frac{\Delta x}{\lambda} = R; \quad c \rho \Delta x = C. \quad (4.7)$$

Tada pritaikius pakeitimus:

$$F_{0\Delta} = \frac{\Delta z}{RC}. \quad (4.8)$$

Šilumos laidumo lygtis baigtinių dydžių forma turi tokią išraišką:

$$\Delta_z t = \frac{\Delta z}{RC} \Delta_{x^2} t. \quad (4.9)$$

Stacionarus šilumos perdavimas per daugiasluoksnę atitvarą

Stacionarus šilumos perdavimas yra paprasčiausias atvejis, kai $\frac{\partial t}{\partial z} = 0$ ir visos medžiagos charakteristikos nekinta.

Diferencialinė stacionaraus šilumos laidumo lygtis:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) = 0. \quad (4.10)$$

Taikant šioje lygtyje terminę varžą R :

$$R = \frac{x}{\lambda}. \quad (4.11)$$

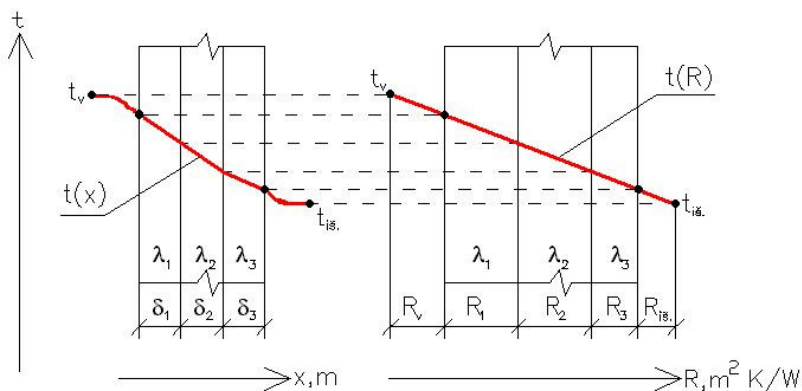
Tada

$$\frac{\partial^2 t}{\partial R^2} = 0. \quad (4.12)$$

Integruojant šią lygtį gaunama, kad temperatūros pasiskirstymas atitvaros skerspjūvyje terminių varžų mastelyje yra tiesės:

$$t = AR + B. \quad (4.13)$$

Temperatūros kitimas daugiasluoksnėje atitvaroje atskiruose sluoksniuose x koordinatėse ir terminių varžų mastelyje grafiškai pavaizduotas 4.1 pav. X mastelių temperatūra kinta pagal laužtinę liniją, terminių varžų masteliu – pagal tiesę.



4.1 pav. Temperatūros kitimas daugiasluoksnėje atitvaroje x ir R masteliu

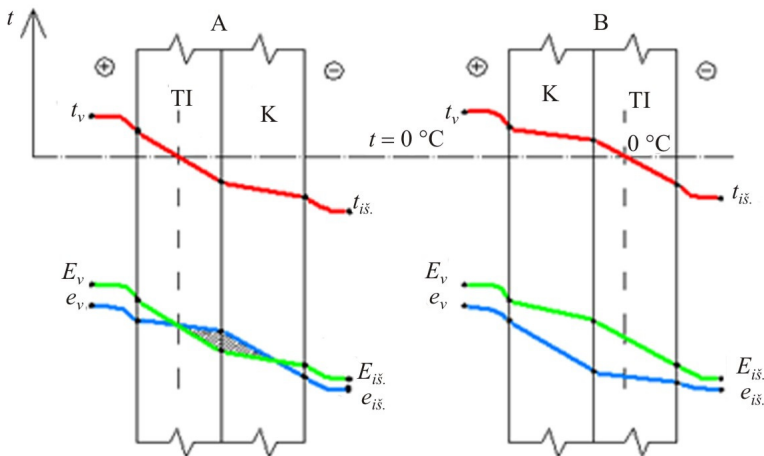
4.2. Šilumos ir drėgmės režimas bei atskirų sluoksnių išdėstymo nuoseklumas atitvaroje

Šiuolaikiniuose pastatuose paprastai naudojamas daugiasluoksnės atitvarinės konstrukcijos (4.2 pav.). Tai apdailos sluoksniai, garų izoliacija, konstrukcinis sluoksnis, šiluminė izoliacija (termoizoliacija) ir t. t.

Iš visų šių sluoksnių šiluminės technikos požiūriu svarbiausi yra du:

- konstrukcinis K;
- temoizoliacinis TI.

Konstrukcinis sluoksnis – tai paprastai tanki, sunki medžiaga, gerai praleidžianti šilumą, blogai praleidžianti drėgmę ir orą.



4.2 pav. Temperatūros, dalinio slėgio ir sočiųjų vandens garų slėgio pasiskirstymo linijos dvisluoksnėje išorinėje atitvaroje

Termoizoliacinis sluoksnis – tai poringa, lengva medžiaga, gera šilumos izoliacija ir lengvai praleidžianti orą ir drėgmę.

Pažymėsime šių sluoksnių šilumos laidumo koeficientus λ_{TI} ir λ_{K} , garų laidumo koeficientus μ_{TI} ir μ_{K} .

Pagal tai, kaip apibūdinome šias medžiagas, galime užrašyti, kad:

$$\lambda_{\text{TI}} \ll \lambda_{\text{K}},$$

$$\mu_{\text{TI}} \gg \mu_{\text{K}}.$$

Labai svarbus uždavinys – teisingai parinkti TI ir K sluoksnių išdėstymą atitvaroje.

Išnagrinėsime dvi vienodas dvisluoksnes konstrukcijas, kurias skiriasi tik TI ir K sluoksnių išdėstymo nuoseklumu.

Palyginsime dviejų variantų A ir B šilumos ir drėgmės perdavimo procesus

Šilumos perdavimo procesas

Suminė terminė varža:

$$R_o = R_{o(A)} = R_{o(B)} = R_v + R_{TI} + R_K + R_{iš}. \quad (4.14)$$

R_o dydis nepriklauso nuo sluoksnių išdėstymo, todėl A ir B atveju tas pats.

Šilumos srautai vienodi:

$$q_A = q_B.$$

Temperatūros pasiskirstymas $t(x)$ skaičiuojamas taip:

$$t_x = t_v - \frac{R_{v-x}}{R_o} (t_v - t_{iš}). \quad (4.15)$$

Gauname, kad temperatūros pasiskirstymas $t(x)$ skirtingas. Konstrukcinio sluoksnio zonoje temperatūrinis gradientas $\text{grad } t$ – mažas, o termoizoliaciniame sluoksnyje – didelis.

Esant B variantui, didžioji atitvaros dalis yra teigiamų temperatūrų zonoje.

Drėgmės pernešimo procesas

Konstrukcijos pasipriešinimas garų pralaidumui abiem atvejais yra lygus:

$$R_{ga} = R_{g(A)} = R_{g(B)} = R_{gv} + R_{gTI} + R_{gK} + R_{giš}. \quad (4.16)$$

Bet kurio sluoksnio garinė varža skaičiuojama taip:

$$R_{gi} = \frac{\partial_i}{\mu_i}. \quad (4.17)$$

Garinė varža dar žymima ir z raide, jai naudojama ir kita dimensija:

$$\frac{\text{m}^2\text{sPa}}{\text{kg}}.$$

Drėgmės srautai lygūs:

$$i_A = i_B.$$

Vandens garų dalinių slėgių pasiskirstymas skaičiuojamas pagal lygtį, analogišką temperatūros pasiskirstymui:

$$e_x = e_v - \frac{R_{gv-x}}{R_{ga}} (e_v - e_{i\check{s}}), \quad (4.18)$$

$$e_v = E_v \cdot \varphi_v, \quad (4.19)$$

$$e_{i\check{s}} = E_{i\check{s}} \cdot \varphi_{i\check{s}}. \quad (4.20)$$

Didžiausių vandens garų dalinių slėgių (atitinkančių iki galo prisotintą vandens garais medžiagos porose esančio oro būklę) pasiskirstymas tiesiogiai priklauso nuo temperatūros.

Todėl $E(x)$ charakteris analogiškas $t(x)$ kitimui.

Skaičiuojant drėgmės režimą temperatūros kitimo kreivė nustatoma imant $t_{i\check{s}}$ šalčiausio mėnesio temperatūrą, nes drėgmės perdavimo procesas vyksta labai lėtai, palyginti su šilumos perdavimo procesu.

$E(t)$ priklausomybę galima rasti iš fizinių parametrų lentelių arba apskaičiuoti pagal formulę:

$$E = 477 + 133,3 (1 + 0,14 t)^2, \text{ Pa}. \quad (4.21)$$

Variante A kreivė $E(x)$ kertasi su kreive $e(x)$. Kreivių susikirtimas reiškia, kad atitvaroje kondensuosis vandens garai.

Išvados

Šiluminės technikos požiūriu geresnis yra B variantas, kai termoizoliacinis sluoksnis yra išorinėje atitvaros pusėje, nes:

- A variantu sluoksnių sandūroje gali kondensuotis vandens garai;
- A variantu sluoksnių sandūra yra neigiamųjų temperatūrų zonoje, todėl iš skystosios fazės gali susidaryti ledas ir ardyti medžiagą bei siūlę, nes $\rho_{\text{ledo}} = 0,914 \text{ kg/m}^3$ o $\rho_{\text{vandens}} = 1 \text{ kg/m}^3$, todėl $V_{\text{ledo}} > V_{\text{vandens}}$;
- atitvaros šiluminis pastovumas vidaus ir išorės oro temperatūrų svyravimo atžvilgiu variantu B yra geresnis (bus kalbama vėliau).

B varianto trūkumas: termoizoliacinės medžiagos neilgaamžės ir neatsparios atmosferos poveikiams, todėl būtinas apsauginis sluoksnis.

5. APSAUGINĖS ATITVARŲ SAVYBĖS

5.1. Apsauginės atitvarų savybės

Kiekviena atitvara turi turėti tam tikras apsaugines savybes. Svarbiausia yra šiluminė apsauga.

Šiluminės apsauginės savybės apibūdinamos taip:

1. Pakankama šaltam metų periodui **terminė varža** R_0 (nagrinėjamos sąlygos, artimos stacionarioms).
2. **Šiluminės inercijos rodiklio** D (nestacionariomis vasaros sąlygomis).

Oro ir drėgmės apsauga

Ši apsauga apibūdinama orine ir garine varžomis R_g ir R_l . Apsaugodamos patalpas atitvaros turi turėti atitinkamos garų sorbcijos ir oro skvarbumo savybes. Atitvaros turi „kvėpuoti“.

Atitvaros terminė varža

Visais atvejais atitvara turi atitikti sanitarinius higienos reikalavimus ir jos terminė varža turi būti ne mažesnė už norminę terminę varžą R_0^n , tuo pat metu atitvara turi atitikti techninius-ekonominius reikalavimus, apibūdinamus ekonomine termine varža R_0^{ek} .

Būtina sąlyga, kad $R_0 > R_0^n$, bet ji nepakankama, nes jei $R_0^{ek} > R_0^n$, tai parenkama $R_0 \cong R_0^{ek}$.

Norminė terminė varža R_0^n , STRe norminis šilumos perdavimo koeficientas $U < U^N$.

Norminė terminė varža R_0^n nustatoma remiantis **sanitariniais higienos reikalavimais**. Jie pasireiškia vidinio atitvaros paviršiaus temperatūros apribojimu:

1. τ_v turi būti didesnė už norminę τ_v^n , kuri nustatoma pagal leidžiamo žmogaus radiacinio atšalimo sąlygas, kai žmogus yra šalia paviršiaus, ribojama paviršiaus temperatūra arba paviršiaus ir oro temperatūrų skirtumas $\Delta\tau^N$:

$$\tau_v > \tau_v^n.$$

2. Paviršiaus temperatūra τ_v turi būti aukštesnė už rasos taško temperatūrą ir neleisti susidaryti kondensatui ant vidinio atitvaros paviršiaus

$$t_{r.t.} = 20,1 - (5,75 - 0,00206 e_v)^2, \quad (5.1)$$

$$\tau_v > t_{r.t.}$$

Norminė terminė varža skaičiuojama įstatant į formulę normines visų dydžių reikšmes

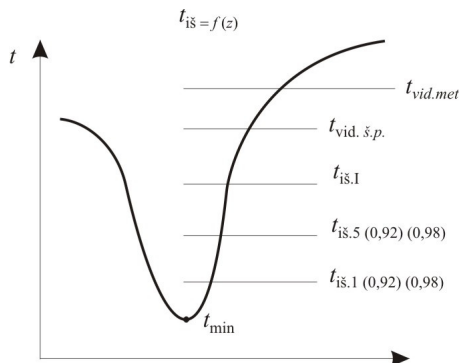
$$R_0 = R_v \frac{t_v - t_{is}}{t_v - \tau_v}, \quad (5.2)$$

$$R_0^n = \frac{(t_v - t_{is}) \cdot n}{\alpha_v \Delta t^n}. \quad (5.3)$$

Patalpos vidaus oro temperatūra t_v normuojama higienos normomis ir priklauso nuo patalpų paskirties. Normuojamas temperatūrų skirtumas $\Delta t^n = t_v - \tau_v$ daugeliu atvejų yra 2 °C.

5.2. Skaičiuojamoji išorės oro temperatūra $t_{i\bar{s}}$

Skaičiuojamosios išorės oro temperatūros $t_{i\bar{s}}$ parinkimas gana sudėtingas. Taip yra todėl, kad išvedant R_0^n formulę laikomasi stacionaraus šilumos perdavimo sąlygos. Iš tikrųjų skaičiuojamuoju laikotarpiu vyksta gana dideli $t_{i\bar{s}}$ svyravimai (5.1 pav.).



5.1 pav. Išorės oro temperatūrų kitimo schema

Statistinis meteorologinių duomenų apdorojimas leidžia išryškinti $t_{iš}$ išorės oro temperatūros kitimo dėsningumus žiemą. Šie dėsningumai visiems rajonams yra pastovūs ir analogiškai atvaizduotai schemai.

Grafike atidėtos šios Vilniaus miesto temperatūros:

$t_{\min} = -37,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ – absoliučiai minimali išorės oro temperatūra;

$t_{1(0,92)} = -27\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{1(0,98)} = -31\text{ }^{\circ}\text{C}$ – vidutinė šalčiausios paros temperatūra;

$t_{5(0,92)} = -23\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{5(0,98)} = -26\text{ }^{\circ}\text{C}$ – vidutinė šalčiausio penkiadienio temperatūra;

$t_I = -6,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ – vidutinė sausio mėn. temperatūra;

$t_{š.p.} = 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ – vidutinė šildymo periodo temperatūra ($t < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$);

$t_{š.p.} = -0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ – vidutinė šildymo periodo temperatūra ($t < 8\text{ }^{\circ}\text{C}$);

$t_{vid. met.} = +6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ – vidutinė metinė temperatūra;

$n_{šp} = 225$ – šildymo periodo trukmė paromis ($t < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$);

$n_{šp} = 204$ – šildymo periodo trukmė paromis ($t < 8\text{ }^{\circ}\text{C}$);

$DL = 4005$ – dienolaipsniai ($t < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$);

$DL = 3815$ – dienolaipsniai ($t < 8\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Dienolaipsniai apskaičiuojami kaip šildymo periodo trukmės paromis ir vidutinio temperatūrų skirtumo pagal laiką ir patalpose sandauga, kai vidaus oro temperatūra imama $18\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$DL = 225 \times (0,2 - 18) = 4005\text{ } (t < 10\text{ }^{\circ}\text{C}),$$

$$DL = 204 \times (-0,7 - 18) = 3815\text{ } (t < 8\text{ }^{\circ}\text{C}).$$

$t_{iš}$ reikia parinkti įvertinant atitvaros šiluminę inerciją.

Kokią temperatūrą imti skaičiuojant R_0^n ?

Atitvaros šiluminės inercijos rodiklis D

Atitvaros šiluminė inercija įvertinama šiluminės inercijos rodikliu D :

$$D = \sum R_i S_i, \quad (5.4)$$

čia R_i – atskirų atitvaros sluoksnių terminė varža:

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (5.5)$$

čia s_i – atskirų medžiagos sluoksnių šilumos įsisavinimo koeficientas:

$$s = \sqrt{\frac{2\pi\lambda c\rho}{T}}, \quad (5.6)$$

čia T – temperatūros kitimo periodo trukmė ($T = 24$ val.). Tada

$$s = 0,51\sqrt{\lambda c\rho}. \quad (5.7)$$

Kuo mažesnis atitvaros šiluminis inertiškumas D , tuo mažesnė turi būti imama išorės oro skaičiuotinė temperatūra t_{i8} . t_{i8} parenkama iš 5.1 lentelės.

5.1 lentelė. Atitvaros šiluminis inertiškumas D

Atitvarų charakteristika pagal šiluminę inerciją	Inercinė	Mažo inertiškumo	Vidutinio inertiškumo	Didelio inertiškumo
D	$<1,5$	$1,5-4,0$	$4,0-7,0$	$>7,0$
t_{i8}	$t_{1(0,98)}$	$t_{1(0,92)}$	$t_3 = \frac{t_1 + t_5}{2}$, kai $k = 0,92$	t_5 , kai $k = 0,92$

Išorės oro skaičiuotinės temperatūros t_1 ir t_5 nustatomos pagal meteorologinių stebėjimų duomenis iš 8 šalčiausių žiemų per 50 metų laikotarpį.

Tikimybinis koeficientas

Tikimybinis koeficientas pagal atvejų skaičių – n :

$$K_n = 1 - n/N. \quad (5.8)$$

Tikimybinis koeficientas pagal trukmę – Δz :

$$K_{\Delta z} = 1 - \Delta z / Z. \quad (5.9)$$

Mikroklimato nukrypimo rodikliai:

Δz – bendra nukrypimų trukmė skaičiuotiniu periodu;

n – nukrypimo atvejų skaičius;

N – bendras atvejų skaičius (paros);

Z – bendra trukmė valandomis.

Skaičiuotinių sąlygų užtikrinimas pagal reikalavimų lygį pateiktas 5.2 lentelėje.

5.2 lentelė. Skaičiuotinių sąlygų užtikrinimas

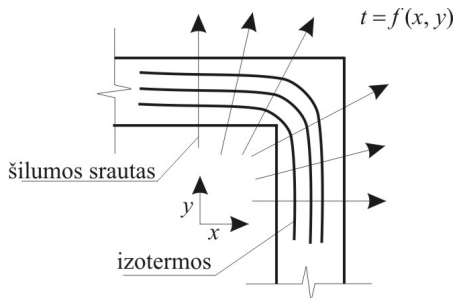
Pagrindinių patalpų charakteristika	Reikalavimų lygis	K_n	$K_{\Delta z}$	Δz , val.
Ypač aukšti reikalavimai sanitarinėms ir higieninėms sąlygoms	Padidintas	1,0	≈ 1	0
Žmonės patalpoje būna ištisą parą arba nepertraukiamas technologinis procesas	Aukštas	0,9	$\approx 0,98$	≈ 50
Ribota žmonių buvimo trukmė patalpoje	Vidutinis	0,7	$\approx 0,92$	≈ 200
Trumpalaikis žmonių buvimas patalpoje	Žemas	0,5	0,8	≈ 400

6. ŠILUMOS PERDAVIMAS PER ATITVAROS ELEMENTUS, KURIUOSE FORMUOJASI DVIMATIS TEMPERATŪRINIS LAUKAS

6.1. Dvimatis temperatūrinis laukas atitvaroje

Dvimatis temperatūrinis laukas yra toks, kai šiluminio srauto kryptis ir temperatūra tam tikrame skerspjūvyje kinta ašių x ir y kryptimi. Toks laukas atsiranda konstrukcijoje, turinčioje medžiagų intarpus, kurių laidumas šilumai skirtingas. Tačiau ir vienalytėje (vienarūšėje) konstrukcijoje yra charakteringi ruožai, kuriuose temperatūros pasiskirstymas yra sudėtingas, tai: kampai (6.1 pav.), atitvarų sandūros, nišos.

Temperatūros pasiskirstymas dvimačiuose laukuose yra dviejų koordinačių funkcija, t. y. $t = f(x, y)$.



6.1 pav. Šilumos srauto linijos ir izotermos išoriniame kampe

Diferencialinė lygtis, aprašanti dvimatį temperatūrinį lauką (stacionariomis sąlygomis) turi tokią išraišką:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) = 0. \quad (6.1)$$

Jeigu $\lambda = \text{const}$, t. y. nėra x ir y koordinačių funkcija $\lambda \neq f(x, y)$, tai:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0 - \text{Laplaso lygtis.} \quad (6.2)$$

Naudojamas taip pat toks užrašas:

$$\nabla^2 t = 0. \quad (6.3)$$

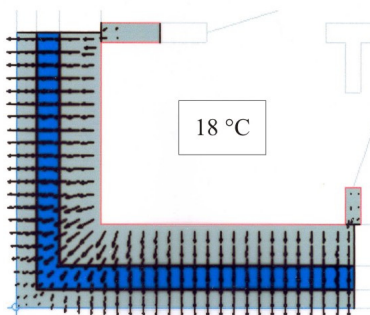
Baigtinių dydžių forma Laplaso lygtis:

$$\frac{\Delta^2 t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 t}{\Delta y^2} = 0. \quad (6.4)$$

Dvimačių temperatūrinių laukų sprendimo metodai:

1. Analitinis.
2. Tinklo metodas.
3. Elektros ir šilumos analogijos metodas.
4. Grafinis metodas.
5. Skaičiavimas naudojant kompiuterines programas (6.2 pav.).

Dvimatis temperatūros laukas

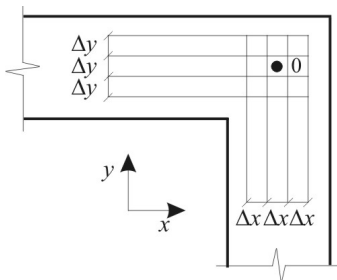


6.2 pav. Šilumos srauto linijos išoriniame kampe, gautos THERM kompiuterine skaičiavimo programa

6.2. Sprendimo metodai

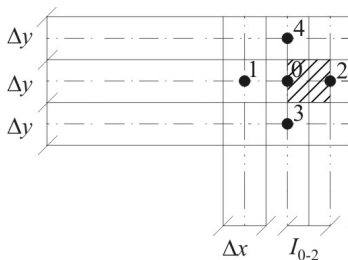
Tinklo metodas

Paprasčiausias ir gana plačiai taikomas yra tinklo metodas. Jis pagrįstas baigtinių dydžių schema (6.3 pav.).



6.3 pav. Išorinio kampo dvimačio temperatūrinio lauko suskirstymas į elementarius plotelius

Reikia apskaičiuoti temperatūrinį lauką išorinės atitvaros kampe. Dvimačio pjūvio sritį atitvaroje $t(xy)$ suskirstome tinklu, Δx ir Δy žingsnių elementarius plotelius (6.4 pav.).



6.4 pav. Dvimačio temperatūrinio lauko tinklas

Tokiam tinklui dvimačio lauko lygtis baigtinių dydžių forma (kai $\lambda = \text{const}$) ir $\lambda \neq f(xy)$ įgauna tokią išraišką:

$$\frac{\Delta_x^2 t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta_y^2 t}{\Delta y^2} = 0. \quad (6.5)$$

Jeigu suskirstėme žingsniu $\Delta x = \Delta y$, tai lygtis supaprastėja:

$$\Delta_x^2 t + \Delta_y^2 t = 0.$$

Bet kuriam elementariam ploteliui, pvz., 0, baigtiniai temperatūros kitimo skirtumai yra:

$$\Delta_x^2 t = (t_1 - t_0) - (t_0 - t_2) = t_1 - 2t_0 + t_2, \quad (6.6)$$

$$\Delta_y^2 t = (t_3 - t_0) - (t_0 - t_4) = t_3 - 2t_0 + t_4.$$

Ištačius gautas reikšmes į prieš tai esančią lygtį gaunama:

$$t_1 - 2t_0 + t_2 + t_3 - 2t_0 + t_4 = 0$$

arba

$$t_0 = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4}, \quad t_0 = \frac{\sum t_i}{4}. \quad (6.7)$$

Gavome, kad kiekvieno elementaraus plotelio temperatūra dvimačiame stacionarijame lauke lygi gretimų elementarių plotelių temperatūrų aritmetiniam vidurkiui.

Bendruoju atveju, kai suskirstymo žingsniai nevienodi, $\Delta x \neq \Delta y$ ir $f(xy)$:

$$t_0 = \frac{\sum k_{0-i} t_i}{\sum k_{0-i}}, \quad (6.8)$$

čia k_{0-i} – šilumos laidumo rodiklis tarp atitinkamų elementarių plotelių.

Pavyzdžiui, anksčiau parodytai schemai (6.4 pav.):

$$k_{1-0} = \frac{\Delta y \lambda}{\Delta x}. \quad (6.9)$$

Bendruoju atveju temperatūra kiekvieno elementaraus plotelio centre lygi vidutinei aplink jį esančių plotelių centrų temperatūrų reikšmei (pagal šilumos laidumo rodiklius).

Norint apskaičiuoti visą temperatūrinį lauką, reikia sudaryti lygčių sistemą kiekvienam elementariam ploteliui ir išspręsti ją, pvz., iteracijų (parinkimo) metodu.

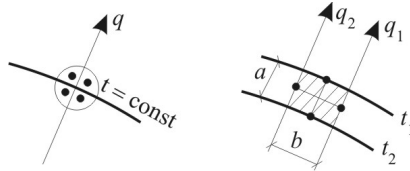
Tinklo metodu remiasi dauguma kompiuterinių skaičiavimo programų.

Grafinis metodas

Pagal šį metodą braižome kreivinių kvadratų stačiakampį tinklą, kurį sudaro izotermos ir šilumos srauto linijos.

Braižymo taisyklės:

1. Būtina įvertinti ribines sąlygas (sąlygas ant atitvaros paviršiaus).
2. Tinklas turi būti stačiakampis (bet kuriame taške izotermos turi būti statmenos šilumos srauto linijoms (6.5 pav.)).



6.5 pav. Šilumos srauto linijos statmenos izotermoms

3. Tinklas turi sudaryti kreivinius kvadratus, t. y. $a = b$ (a ir b vidutinis atstumas kvadrato tarp izotermų ir šilumos srauto linijų (6.6 pav.)).

Prielaidos, būtinos sąlygos braižymui, ir eiga:

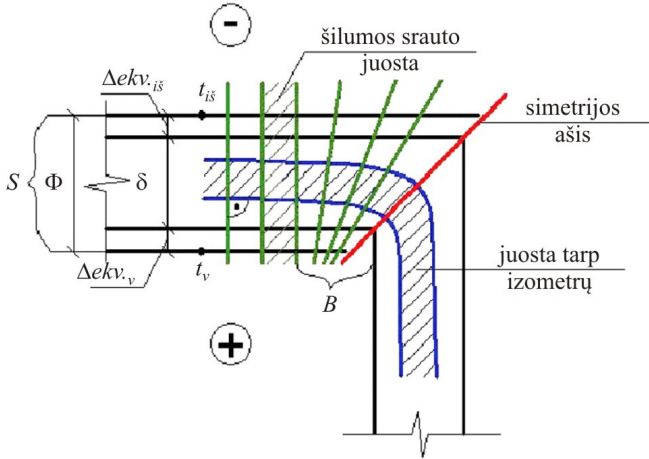
1. Atitvaros paviršiuose užduotos ribinės sąlygos III rūšies: α_v , $\alpha_{i\delta}$, t_v , $t_{i\delta}$.

Būtina pereiti prie ribinių I rūšies sąlygų. Tuo tikslu naudojami sluoksniai, ekvivalentiniai šilumos mainų terminėi varžai ant šių paviršių. Naudojant šiuos sluoksnius, ant jų paviršių temperatūra lygi aplinkos temperatūrai t_v ir $t_{i\delta}$:

$$R_v = \frac{1}{\alpha_v} = \frac{\Delta ekv_v}{\lambda}; \quad \Delta ekv_v = R_v \lambda = \frac{\lambda}{\alpha_v}; \quad (6.10)$$

analogiškai

$$\Delta ekv_{i\check{s}} = \frac{\lambda}{\alpha_{i\check{s}}} . \quad (6.11)$$



6.6 pav. Išorinio kampo dvimatis temperatūrinis laukas su šilumos srauto linijomis ir izotermomis: S – izotermų skaičius; B – šilumos srauto juostų skaičius

2. Temperatūrinis laukas $t(xy)$ yra simetriškas kampo ašies atžvilgiu.

3. Nustatome tinklo ribas.

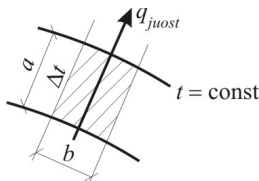
4. Nagrinėjamoje išorinio kampo srityje nustatome izotermų juostų skaičių S ir šilumos srauto juostų skaičių B .

5. Šilumos srautas per kampo sritį lygus

$$Q_{i\check{s}.k.} = \frac{B}{S} \lambda (t_v - t_{i\check{s}}), \quad (6.12)$$

čia $\frac{B}{S}$ – santykis tarp šilumos srauto juostų skaičiaus ir izotermų juostų skaičiaus nagrinėjamoje srityje.

Išvada. Šilumos perdavimo ypatumai dvimačiame elemente apibūdinami santykiu $\frac{B}{S}$, t. y. jie priklauso tik nuo geometrinės šio elemento formos (6.7 pav.).



6.7 pav. Elementarus dvimačio temperatūrinio lauko plotelis

Elementarus šilumos srautas q vienoje šilumos srauto juostoje:

$$q_{juost.} = k_{q-t} \Delta t = \frac{\lambda a}{b} \left(\frac{t_v - t_{i\check{s}}}{S} \right) = \frac{\lambda}{S} (t_v - t_{i\check{s}}), \quad (6.13)$$

čia Δt – temperatūrų skirtumas tarp gretimų izotermų:

$$\Delta t = \frac{t_v - t_{i\check{s}}}{S}, \quad (6.14)$$

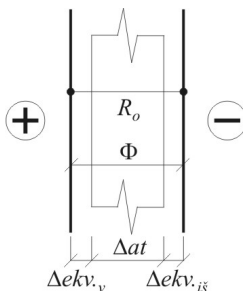
$q_{juost.}$ – šilumos srautas per kiekvieną elementarią juostą. Jei šilumos srauto juostų skaičius B , tai bendras šilumos srautas per kampą bus

$$Q_{kampo} = q_{juost} \times B = \frac{\lambda B}{S} (t_v - t_{i\check{s}}). \quad (6.15)$$

Dvimačio elemento formos veiksnys

Iš padarytos išvados išeina, kad galima rasti rodiklį (formos faktorių), nusakantį šilumos srauto padidėjimą dvimačiame elemente, palyginti su vienmačiu elementu.

Patogu geometriniais masteliais imti sąlyginį atitvaros storį, kurį pavadinsime kalibru ϕ (6.8 pav.).



6.8 pav. Ryšys tarp kalibro ir terminės varžos

$$R_0 = R_v + R_{at} + R_{is}, \quad (6.16)$$

$$\phi = \Delta ekv_v + \Delta at + \Delta ekv_{is}. \quad (6.17)$$

Kadangi $R = \frac{\Delta}{\lambda}$, $\Delta = R\lambda$, tariama, kad

$$R_0 = \frac{\Phi}{\lambda}, \quad \Phi = R_0 \lambda. \quad (6.18)$$

Kalibras ϕ – tai sąlyginis atitvaros storis, atitinkantis jos suminę terminę varžą. Kalibras yra ir šiluminis, ir geometrinis atitvaros mastelis.

Paprastai temperatūrinio lauko dvimatiškumas pasireiškia dviem kalbrais nuo elemento, pažeidžiančio vienmatį temperatūrinį lauką, todėl visą šilumos nuostolių padidėjimą per dvimatį elementą visada nagrinėsime atitvaros plote, kuris lygus dviem kalbams:

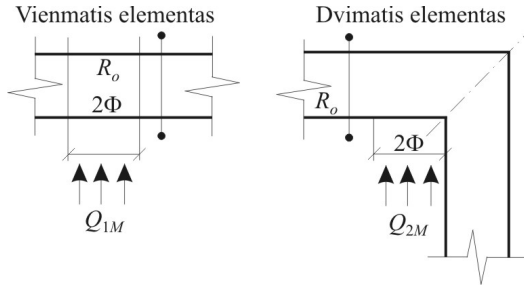
$$2\Phi = 2R_0 \lambda. \quad (6.19)$$

Šilumos srauto, pereinančio per dvimatį ir vienmatį elementą palyginimas pateiktas 6.9 pav.

Formos veiksnys f lygus:

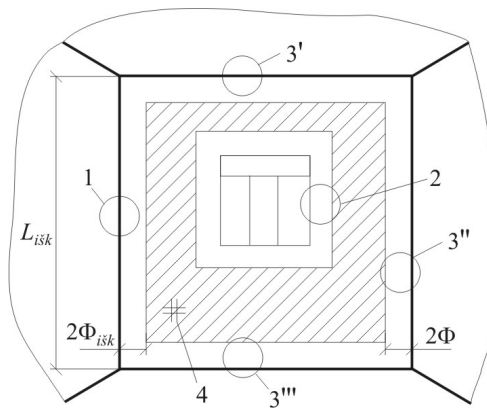
$$f = \frac{Q_{2M}}{Q_{1M}}. \quad (6.20)$$

Formos veiksnys parodo, kiek kartų padidėja šilumos nuostoliai per dvimatį elementą, palyginti su vienmačiu tame pačiame 2ϕ kalibrų atitvaros plote.



6.9 pav. Šilumos srauto, pereinančio per dvimačį ir vienmačį elementą, palyginimas

Charakteringi išorės atitvaros dvimačiai elementai ir jų charakteristikos (6.10 pav.)



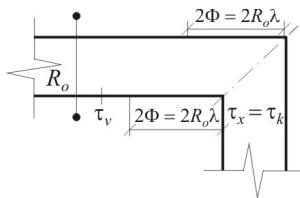
6.10 pav. Išorės sienos su išskirtais vienmačiais ir dvimačiais elementais:
 1 – išorinis kampas; 2 – lango rėmas; 3 – vidinių konstrukcijų sandūra su išorinėmis; 3' – lubų perdangos; 3'' – vidinės pertvaros; 3''' – grindų perdangos; 4 – šilumai laidūs tarpai

Norint atlikti dvimačio elemento šiluminius skaičiavimus, reikia žinoti:

1. Šilumos nuostolių padidėjimą (juos lemia formos veiksnys).
2. Žemiausią išorinės atitvaros elemento vidinio paviršiaus temperatūrą τ_x .

Dvimačių elementų šiluminės ir techninės charakteristikos

1. Išorinis kampas (6.11 pav.)



6.11 pav. Išorinio kampo schema, kurioje parodytos vietos su dvimačiais temperatūriniais laukais

Išorinio kampo formos veiksnio ypatumai $f_{i\bar{s}k}$:

- elementas, simetriškas x ašies atžvilgiu;
- $f_{i\bar{s}k}$ nustatomas į vieną pusę nuo simetrijos ašies;
- formos veiksnys pagal vidinius ir išorinius matmenis turi konkrečias skirtingas reikšmes:

$$f_{k.i\bar{s}} = 0,68,$$

$$f_{k.v} = 1,18.$$

Norint rasti šilumos nuostolių dydį reikia žinoti:

- atitvaros plotą prie kampo 2Φ :

$$A_k = 2\Phi l_k, \quad (6.21)$$

čia l_k – sienos aukštis išilgai kampo;

- lyginamuosius šilumos nuostolius per vienmatę sieną q_{1M} :

$$\underline{Q}_k = q_{1M} f_k A_k. \quad (6.22)$$

τ_x nustatymas

Žemiausia temperatūra bus kampe $\tau_x = \tau_k$. Kai R_0 reikšmė apie 1, kampo temperatūrą galima apskaičiuoti pagal apytikrą formulę:

$$\frac{\tau_v - \tau_k}{t_v - t_{i\bar{s}}} \approx 0,18(1 - 0,23R_0). \quad (6.23)$$

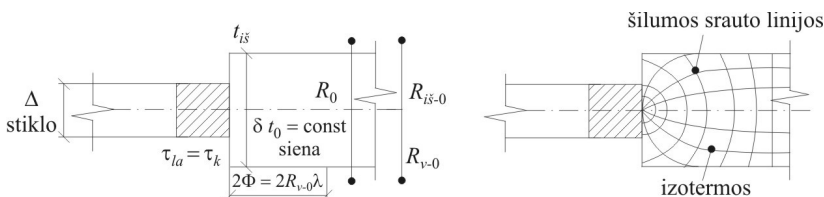
Ši formulė tinka tik seniems pastatams, kurių $R_0 \approx 1$.

τ_v – atitvaros vidinio paviršiaus temperatūra toli nuo kampo. Kitais atvejais kampo temperatūra apytikriai apskaičiuojama taip:

$$\tau_k = t_v - \frac{(t_v - t_{i\check{s}})3 / \alpha_v}{R_\lambda + \frac{1}{\alpha_v}}, \quad (6.24)$$

čia R_λ – tik konstrukcinių sluoksnių šiluminė varža, kuri neįvertina šilumos atidavimo varžų.

2. Lango (angos kraštas) užkarpa (6.12 pav.)



6.12 pav. Lango užkarpos schema. Δ – lango angos užpildo storis

Izoterma t_0 sutampa su lango angos užpildo simetrijos ašimi, todėl

$$\frac{t_v - t_0}{R_{v-0}} = \frac{t_0 - t_{i\check{s}}}{R_{0-i\check{s}}}, \quad (6.25)$$

čia $R_0 = R_{v-0} + R_{i\check{s}-0}$.

Tikslinga tarti, kad:

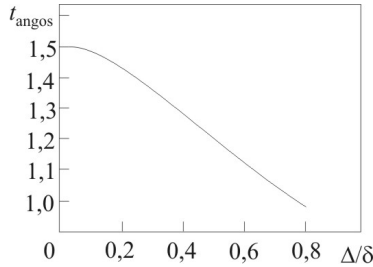
$$2\phi = 2R_{v-0} \lambda. \quad (6.26)$$

Ypatumai:

1. Formos veiksnys

- simetrija $t_0 = \text{const}$ atžvilgiu;
- formos veiksnys imamas tik į vieną pusę nuo simetrijos ašies;

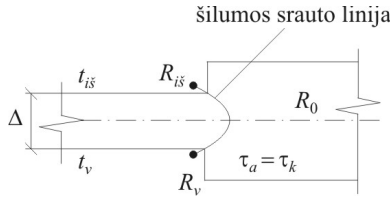
- imama $2\phi = 2R_{v-0} \lambda$;
 - formos veiksnys yra santykio Δ/δ funkcija:
- $t_{\text{angos}} = \varphi(\Delta/\delta)$ (6.13 pav.).



6.13 pav. Lango formos veiksnio nustatymo grafikas $f_{\text{angos}} = \varphi(\Delta/\delta)$

2. Žemiausia temperatūra $\tau_{\text{angos}} = \tau_x$.

Šilumos srauto linijos statmenos izotermoms ir artimos angos krašto zonoje pusapskritimiui (6.14 pav.). Jei įvertintume, kad lango angos užpildo storis Δ , tai šilumos srauto linija eis apskritimu, kurio skersmuo $\pi\Delta/2$.



6.14 pav. Lango angos schema

Tada

$$\frac{t_v - \tau_a}{R_v} = \frac{t_v - t_{is}}{R_v + \frac{\pi \Delta}{2\lambda} + R_{is}}, \quad (6.27)$$

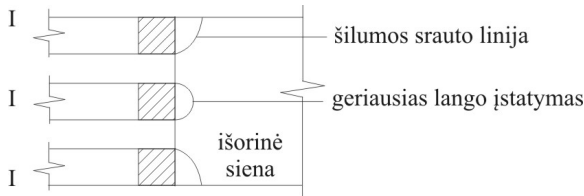
kai

$$R_v \cong 0,1, \quad R_{is} \cong 0,1,$$

$$\frac{t_v - \tau_a}{t_v - t_{iš}} = \frac{0,1}{0,2 + 1,57 \frac{\Delta}{\lambda}}. \quad (6.28)$$

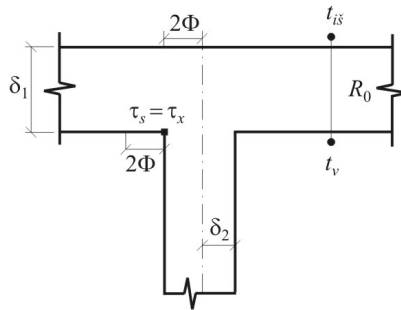
Langų angos užpildymo variantai

Gali būti trys pasirinkimai (6.15 pav.). Iš šilumos srauto linijų matyti, kad I variantas geresnis už II ir už III, nes šilumos srauto linijos yra trumpesnės.



6.15 pav. Lango įstatymo sienoje variantai

3. Vidinės atitvaros sandūra su išorine siena (6.16 pav.)



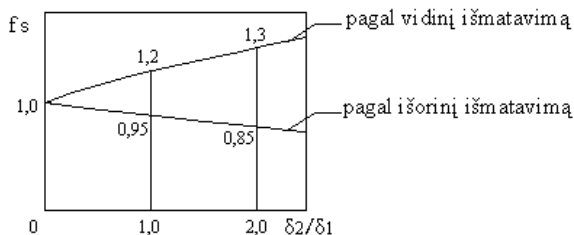
6.16 pav. Vidinės atitvaros sandūros su išorine siena schema

Ypatybės:

1. Formos faktorius f_s :

- simetrija pertvaros ašies atžvilgiu;
- formos veiksnys nustatomas į vieną pusę – nuo ašies;

- formos veiksnys turi skirtingą reikšmę pagal vidinį ir išorinį matmenis $2\phi = 2R_0\lambda$ (6.17 pav.).



6.17 pav. Vidinės atitvaros sandūros su išorine siena formos veiksnio nustatymo grafikas

2. Temperatūra $\tau_s = \tau_x$

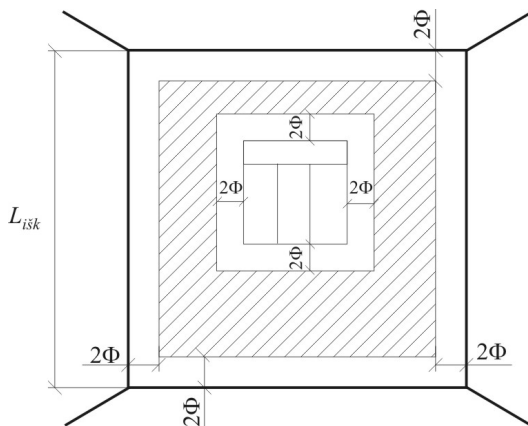
Apytikriai nustatoma:

$$\frac{\tau_v - \tau_s}{t_v - t_{iš}} = 0,09(1 - 0,29R_0). \quad (6.29)$$

Skaičiuojant pastato šildymo sistemos galią pagal STR 2.09.04:2008 „Pastato šildymo sistemos galia. Šilumos poreikis šildymui“ atitvarų nevienalytiškumas ir šilumos nuostolių padidėjimas dvimačiuose elementuose įvertinamas ilginiais šiluminiais tilteliais. Tikslusis skaičiavimas – mūsų išnagrinėtų sutartinių varžų radimas atskiroms atitvaroms arba naudojantis kompiuterinėmis skaičiavimo programomis THERM ir HEAT.

Sudėtingos atitvaros sutartinė terminė varža R_{sut} .

R_{sut} – tai vienmatės atitvaros terminė varža, per kurią šilumos nuostoliai lygūs sudėtingos atitvaros šilumos nuostoliams, esant vienodam plotui (6.18 pav.).



6.18 pav. Išorinės sienos schema sudėtingos atitvaros sutartinei termininei varžai nustatyti

Šilumos nuostoliai per sudėtingą atitvarą (išorinę sieną) skaičiuojami taip:

$$Q_{i\check{s}.s.} = \frac{1}{R_{sut.}} \cdot A_{i\check{s}.s.} (t_v - t_{i\check{s}}). \quad (6.30)$$

Kita vertus, bendri šilumos nuostoliai per atitvarą, turinčią dvimačius elementus, su skirtingais formos faktoriais f ir ilgiu l bus lygūs:

$$Q_{i\check{s}.s.} = \frac{1}{R_0} A_{i\check{s}.s.} (t_v - t_{i\check{s}}) + \Sigma (f_i - 1) \frac{1}{R_0} (t_v - t_{i\check{s}}) \cdot 2\Phi_i l_i. \quad (6.31)$$

Sulyginę abi šias lygtis gauname:

$$R_{sut.} = R_0 \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{i\check{s}.s.}} \Sigma (f_i - 1) 2\Phi_i l_i} = R_0 r. \quad (6.32)$$

čia r įvertina dvimačius elementus atitvaroje $r \ll 1$.

7. KOMFORTO SĄLYGOS PATALPOJE

Patalpos mikroklimato parametrai turi turėti tarpusavyje tam tikrą santykį ir nenukrypti nuo leistinųjų ribų, t. y. būti tam tikroje šiluminio komforto zonoje. Patalpoje mikroklimato sąlygos gali būti nustatytos taip pat pagal požymius:

- a) siekiant užtikrinti komforto sąlygas žmogui;
- b) siekiant užtikrinti optimalias sąlygas technologiniams procesams;
- c) siekiant užtikrinti bendrus komforto ir technologinius reikalavimus.

Technologiniai reikalavimai paprastai nusakomi technologiniame projekte. Todėl čia nagrinėsime svarbiausias komforto sąlygas žmogui.

Mikroklimato parametrai reglamentuojami higienos normomis. Pagrindiniai normatyviniai dokumentai yra HN 69:2003 „Šiluminis komfortas ir pakankama šiluminė aplinka darbo patalpose. Parametrų norminės vertės ir matavimo reikalavimai“ ir HN 42: 2004 „Gyvenamųjų ir viešojo naudojimo pastatų mikroklimatas“.

Šiose higienos normose atspindi ir danų mokslininko prof. O. Fangerio darbų rezultatai. Daug komforto sąlygų nustatymo srityje dirbo ir inžinerinį komforto sąlygų nustatymo metodą pasiūlė rusų mokslininkas prof. V. Bogoslovskis.

7.1. Žmogaus šilumos balansas patalpoje

Šildymo ir vėdinimo sistema turi sukurti palankią šiluminę aplinką žmogui: žmogaus savijauta ir darbingumas priklauso nuo fiziologinės žmogaus organizmo termoreguliacijos sistemos darbo, kuri normaliai funkcionuoja, kai organizmo temperatūra $\approx 36,6$ °C.

Norėdamas palaikyti pastovią temperatūrą, žmogaus organizmas nuolat gamina šilumą, kuri atiduodama jį supančiai aplinkai. Atsižvelgiant į žmogaus fiziologinę ir emocinę būseną, jo drabužius, am-

žių, atliekamo darbo rūši ir individualias organizmo ypatybes šilumos kiekis, kurį žmogus atiduoda aplinkai, gali būti skirtingas.

Žmogaus šilumos balansas skaičiuojamas taip:

$$Q_z = Q_z^{K+S} + Q_z^g + Q_z^d + Q_z^f \pm \Delta Q_z \quad (7.1)$$

čia Q_z – šilumos kiekis, kurį išskiria žmogus; Q_z^{S+K} – šilumos atidavimas konvekcija ir spinduliavimu; Q_z^g – šilumos kiekis, sunaudojamas išgarinimui; Q_z^d – šilumos kiekis darbui; Q_z^f – šiluma, sunaudojama fiziologiniams procesams; ΔQ_z – šilumos debalansas, organizmo perkaitimas arba atšalimas (termoreguliacijos sistema):

$$\Delta Q_z = \Delta t (cp)_z G_z. \quad (7.2)$$

Žmogaus sveikatai jaučiamas perkaitimas $1,1\text{ }^\circ\text{C}$. Imant žmogaus svorį $G_z = 70\text{ kg}$, $(cp)_z \cong 3\text{ kJ/kg K}$, tai esant perkaitimui $\Delta t = 1,1\text{ }^\circ\text{C}$, šilumos debalansas bus

$$\Delta Q_z = 1,1 \times 3 \times 70 \approx 230\text{ kJ/h},$$

t. y. $1/2$ radiatoriaus sekcijos.

Norint įvertinti mikroklimato sąlygų patalpoje komfortiškumą reikia remtis tokia priklausomybe:

$$Q_z^{S+K}, Q_z^g \rightarrow f(t_v, t_R, \phi_v, v_v). \quad (7.3)$$

Komfortinis šių rodiklių santykis atitinka tokias meteorologines sąlygas, kuriomis išlaikoma šiluminė pusiausvyra, nėra termoreguliacijos procese įtempimo.

Šilumos kiekis, kurį išskiria suaugęs žmogus Q_z priklauso nuo žmogaus veiklos pobūdžio. Pateikiami keli pavyzdžiai:

<i>Ramybės būseną:</i>	Q_z (W)
gulint	80
sėdint	85–90
stovint	100
ramiai stovint	105–115

<i>Protinis darbas:</i>	Q_z (W)
skaitymas sėdint	115
darbas su kompiuteriu	135
darbas laboratorijoje	140–160
paskaitos skaitymas	
auditorijoje	200–310

Žmogaus veiklos pobūdis gali būti skirstomas į tris grupes: lengvas, vidutinis, sunkus.

Matavimo vienetas: žmogaus medžiagų apykaitos intensyvumas, tenkantis 1 m² odos paviršiaus W/m². 1 met = 58 W/m².

Pagal veikos pobūdį:

Poilsis sėdint	1 met = 58 W/m ²
Darbas sėdint	1,2 met = 70 W/m ²
Lengvas darbas stovint	2 met = 116 W/m ²

Sąlyginis darbo sunkumo nustatymas, W:

nežymus	iki 140
lengvas	140–170
vidutinio sunkumo	170–290
sunkus	>290

I kategorija. Lengvas darbas atliekamas sėdint, stovint ar vaikštant lėtai, tačiau jis nesusijęs su fiziniu įtempimu ar sunkumų (svorių) pernešimu ($Q < 170$ W).

II kategorija. Vidutinio sunkumo darbas – tai veikla, susijusi su nuolatiniu vaikščiojimu, kuri atliekama stovint ar sėdint, bet nereikalauja sunkumų pernešimo ($Q = 170–230$ W) (IIa kategorija). Jei reikia pernešti sunkumus iki 10 kg – IIb kategorija ($Q = 230–290$ W).

III kategorija. Sunkus darbas, susijęs su nuolatiniu svorių pernešimu >10 kg ($Q > 290$ W).

Sunaudojamos šilumos kiekis drėgmei išgarinti priklauso nuo daugelio priežasčių ir skaičiuoti jį gana sudėtinga. Eksperimentais nustatyta, kiek žmogus drėgmės išgarina, esant tam tikro darbo sunkumui, būdamas komforto sąlygomis:

<i>Fizinis apkrovimas</i>	<i>Žmogus netenka g/h drėgmės</i>
Nežymus darbas	48–72
Lengvas darbas	90–140
Vidutinio sunkumo darbas	150–190
Sunkus darbas	210–240

Jei žmogaus pagaminamas šilumos kiekis ir šilumos nuostoliai nesubalansuoti, tai organizme arba kaupiasi šiluma (ΔQ_s) ir organizmo temperatūra kyla, arba jaučiamas šilumos deficitas, tai veda prie organizmo atšalimo. Žmogaus termoreguliacijos sistema leidžia užtikrinti balansą tarp pagaminamos ir netenkamos šilumos. Tačiau termoreguliacijos sistemos galimybės ribotos, pvz., $\Delta t = 1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

7.2. Šiluminės sąlygos patalpoje

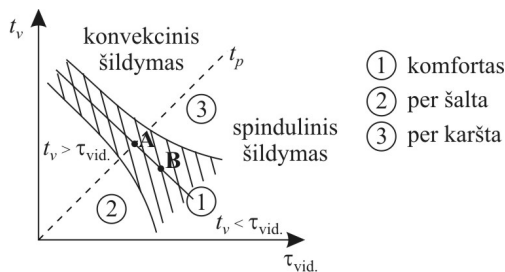
Parametrai, charakterizuojantys šiluminės sąlygas: t_v – vidaus oro temperatūra (sausiojo termometro temperatūra); $\tau_{vid.}$ – vidutinė visų patalpos paviršių temperatūra:

$$\tau_{vid.} = \frac{\sum A_i t_i}{\sum A_i}. \quad (7.4)$$

Pvz., kai $t_v = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, žmogaus šiluminiai pojūčiai priklausomai nuo $\tau_{vid.}$ gali būti skirtingi (7.1 pav.). Tačiau šiluminius pojūčius galima charakterizuoti

- „šalta“, kai $\tau_{vid.}$ žema: pvz., $\tau_{vid.} < 16\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_v = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- „normalu“, $\tau_{vid.} = 16\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_v = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- „karšta“, $\tau_{vid.} \geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_v = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Didinant t_v patalpose, kuriose $\tau_{vid.}$ žemesnė, galima pasiekti tuos pačius šiluminius pojūčius. Todėl kampinėms gyvenamosioms patalpoms $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, o visuomeninėms ir pagalbinėms patalpoms ir gamybinėms pastatams $+5\%$. Ir atvirkščiai, esant didesnei $\tau_{vid.}$, temperatūra t_v gali būti žemesnė.



7.1 pav. Šiluminės sąlygos žmogui, dirbančiam lengvą darbą šildomoje patalpoje: konvekcinis šildymas $t_v > \tau_{\text{vid.}}$; spindulinis šildymas $t_v < \tau_{\text{vid.}}$.

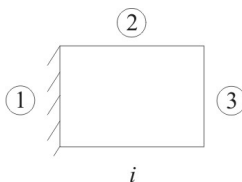
Žmogaus organizmui maloniau komfortiškas santykis t_v ir $\tau_{\text{vid.}}$ esant spinduliniam šildymui.

$$\tau_{\text{vid.}} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}, t_v = 15 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Matoma, kad norint išlaikyti komforto sąlygas, t_v padidinus reikia $\tau_{\text{vid.}}$ žeminti, ir atvirkščiai.

Temperatūrinės sąlygas patalpoje galima charakterizuoti viena patalpos temperatūra t_p arba dar vadinama atstojamąja temperatūra suprasdami, kad tai tokia vienoda oro ir vidutinė paviršių temperatūra, kurioje žmogaus šilumos mainai bus tokie pat, kaip ir esant nevienodoms t_v ir $\tau_{\text{vid.}}$.

Skaičiuojant šilumos mainus naudojama t_R radiacinė temperatūra, ji dar vadinama vidutine spinduliavimo temperatūra. Tai sutartinė vidutinė paviršių, nukreiptų į patalpą, temperatūra, nustatyta to paviršiaus atžvilgiu, ant kurio vyksta šilumos mainai (7.2 pav.).



7.2 pav. Šiltas paviršius 1 ir jį gaubiantys i paviršiai patalpoje

Radiacinė temperatūra 1-ojo paviršiaus atžvilgiu, naudojant kam-pinius spinduliavimo koeficientus, apskaičiuojama taip:

$$t_{R1} = \frac{\sum \varphi_{1-i} t_i}{\sum \varphi_i = 1}. \quad (7.5)$$

Jei t_R nustatoma žmogaus atžvilgiu:

$$t_{Rž} = \sum t_i \varphi_{ž-i}. \quad (7.6)$$

Šiluminės sąlygos apibūdinamos:

1. Temperatūrinėmis sąlygomis – oro temperatūra t_v , radiacine temperatūra t_R arba vadinama vidutine spinduliavimo temperatūra t_{sp} – tai vidutinė apibendrinta visų atitvarų paviršių temperatūra patalpoje:

$$t_R = \frac{\sum A_i \cdot t_i}{\sum A_i}. \quad (7.7)$$

Patogu vartoti terminą *patalpos temperatūra* t_p (atstojamoji temperatūra) – tai tokia sąlyginė vidutinė temperatūra patalpoje (tarp t_v ir t_R), kuri pagal šilumos mainų sąlygas ekvivalentiška t_v ir t_R . Paprastai $t_v \neq t_R$, imama $t_p = t_R = t_v$.

Patalpos temperatūros nustatymo formulės pateiktos 4 skyriuje.

2. Aerodinaminėmis sąlygomis – oro judrumu (greičiu) v_v , m/s.

3. Drėgminėmis sąlygomis – oro drėgnumu φ , % (d_v , e_v).

Pagrindinės yra temperatūrinės sąlygos.

Komfortinės temperatūrinės sąlygos

Jos atitinka tokią patalpos šiluminę būklę, t. y. tokiam parametų t_v , φ_v , v_v , t_R santykiui, kuriam esant žmogus nejaučia nei perkaitimo, nei atšalimo. Temperatūrinė aplinka patalpoje gali būti nusakoma dviem temperatūrinio komforto sąlygomis: pirmoji komforto sąlyga nusako bendrą komfortą visoje patalpoje, antroji – aptarnavimo zonos riboje prie įkaitusių ar atšalusių paviršių (šias sąvokas pasiūlė V. Bogoslovskis).

Komforto sąlygų zona

Tai toks visų mikroklimato parametrų santykis, kuris atitinka komforto sąlygas, kurios nurodomos normose ir taisyklėse.

Komforto zona gali būti:

- a) optimali;
- b) leistinoji.

Komforto zona priklauso nuo fizinio darbo sunkumo, metų laiko, rūbų, amžiaus žmogaus, lyties, tautybės, žmogaus adaptacijos ir t. t.

Komforto supratimui svarbu žmogaus adaptacija, klimatas, jo įpročiai. Pvz., amerikiečių t_v 3° didesnė negu anglų ir prancūzų.

Diskomforto laipsnis

Esant nukrypimui nuo komforto sąlygų, jaučiamas tam tikras diskomfortas, kuris neturi išeiti už leidžiamų diskomforto laipsnio ribų. Tuo pat metu kai kurių parametrų nukrypimai žmonėms yra naudingi. Dinaminis klimatas – klimatas su kintančiais patalpos sąlygų vidaus parametrais.

Žmogui naudingas t_v svyravimas paros metu, tai susieta su organizmo medžiagų apykaita ir žmogaus veikla. Higienistai rekomenduoja naktį 2–3° žemesnę temperatūrą. Įstaigų temperatūra rekomenduojama rytą 19 °C, 21 °C iki pusiaudienio, o po pietų mažinti iki 18 °C. Gamtyboje tirta ir nustatyta, kad t_v nukrypus 3–5 °C, padidėjo nelaimingų atsitikimų skaičius.

Aptarnaujamoji (darbo) zona

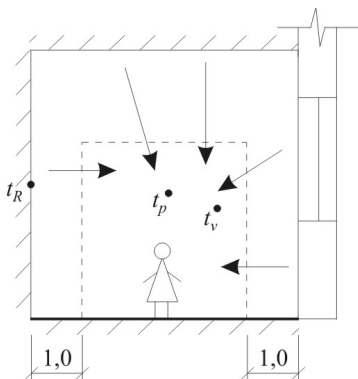
Aptarnaujamoji zona – tai patalpos tūrio dalis, kurioje šildymo, vėdinimo, oro kondicionavimo sistemos ir išorinių atitvarų apsauginės savybės turi užtikrinti komforto sąlygas.

Aptarnaujamoji (darbo) zona – tai patalpos tūris iki 2 m aukščio ir atstumas nuo įkaitusių ar atšalusių paviršių 1 m.

Šiluminės sąlygas patalpoje daugiausia lemia temperatūrinės sąlygos. Temperatūrinės aplinkos komfortiškumas nusakomas dviem komforto sąlygomis. V. Bogoslovskis pasiūlė šį inžinerinį komforto sąlygų nustatymo metodą.

Pirmoji komforto sąlyga

Ji apibūdina bendrą temperatūrinės aplinkos komfortiškumą žmogui, kuris yra aptarnaujamos zonos viduryje (7.3 pav.).



7.3 pav. Pirmosios komforto sąlygos iliustracija

Iš šilumos mainų lygties turime:

$$\mathcal{Q}_z^{k+s} = f'(\{t_v, t_R\} t_p). \quad (7.8)$$

Galima nustatyti santykį tarp t_v , t_R ir t_p , kuris ir nusako komforto zoną. Faktiška radiacinė temperatūra tiksliai apskaičiuojama naudojant kampinius spinduliavimo koeficientus:

$$t_R = \frac{\sum \varphi_i \cdot t_i}{\sum \varphi_i = 1} = \varphi_i \cdot t_i \quad (7.9)$$

arba mažiau tiksliai, įvertinant atitvarų plotus.

Žiemą:

$$t_R = 1,57 t_p(u) - 0,57 t_v \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.10)$$

arba

$$t_R = 29 - 0,57 t_v \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (7.11)$$

Vasarą:

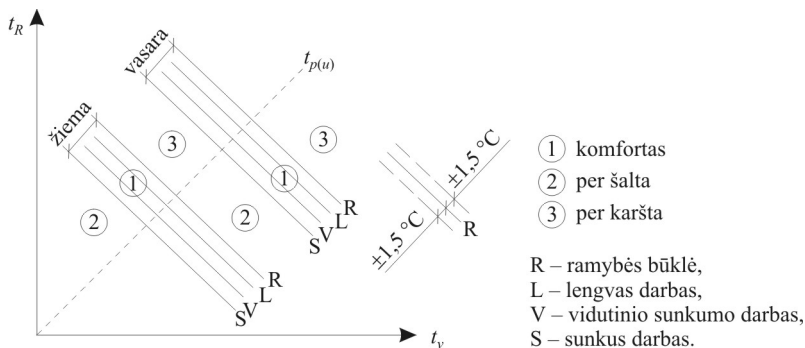
$$t_R = 1,5 t_p(u) - 0,5 t_v \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7.12)$$

čia $t_p(u)$ – komfortiška temperatūra patalpoje, atsižvelgianti atliekamo darbo sunkumą (7.1 lentelė).

7.1 lentelė. t_p reikšmių lentelė pagal atliekamo darbo sunkumą u

Metų laikas \ Fizinio darbo sunkumas	R ramybės būklė	L lengvas darbas	V vidutinio sunkumo	S sunkus darbas
Žiema	21–23	19–21	17–19	14–17
Vasara	28–26	26–24	24–22	22–20

Pirmoji komforto sąlyga, žiemos ir vasaros sąlygomis atliekant įvairaus sunkumo darbą, grafiškai atvaizduota 7.4 pav. Kaip matyti iš formulės, kiekvienu atveju temperatūra gali svyruoti $\pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

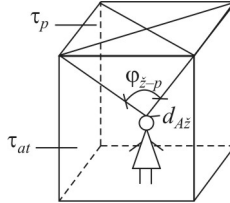


7.4 pav. Grafinis pirmosios komforto sąlygos vaizdas

Taigi žinant patalpos paskirtį ir $t_p(u)$, žinant t_v galima nustatyti t_R . Nustatoma pagal sąlygą ir $t_R = \Sigma \varphi_i t_i$ ir rastoji faktiška radiacinė temperatūra turi neperžengti komforto temperatūrų ribų.

Antroji komforto sąlyga

Ji nusako leidžiamas įkaitintų arba atšaldytų paviršių temperatūras, kai žmogus yra šalia šio paviršiaus (ant aptarnavimo zonos ribos). Radiaciniam perkaitinimui jautriausia yra žmogaus galva (7.5 pav.).



7.5 pav. Antrosios komforto sąlygos iliustracija

Higieniniais bandymais specialioje kameroje nustatyta, kad spindulinio srauto dydis nuo nepatogioje padėtyje esančio elementaraus žmogaus galvos plotelio d_{Az} turi būti toks (kai yra įkaitę ar atšalę paviršiai):

būtinai reikalavimai:

$$12 < q_{d_{Az}}^s < 70,$$

griežti reikalavimai:

$$0 < q_{d_{Az}}^s < 93.$$

Leidžiamą įkaitusio ar atšalusio paviršiaus temperatūrą galima rasti iš spindulinių šilumos mainų balanso lygties

$$q_{d_{Az}}^s = f(\tau_p, \tau_{atlv}, \varphi_{z-p}), \quad (7.13)$$

čia φ_{z-p} – spinduliavimo koeficientas nuo elementaraus žmogaus kūno paviršiaus plotelio d_{Az} šiltam ar šaltam paviršiui.

Leidžiamosios patalpos paviršių temperatūros

Jos yra skirtingos žiemai ir vasarai, šiltiems ir šaltiems paviršiams.

Žiemą:

šaltiems paviršiams būtinas reikalavimas:

$$q_{dAž} > 12, \tau_{p, \text{šilt.}} \leq \tau_{\text{šilt.}}^{\text{leist.}} \cong 19,2 + \frac{8,7}{\varphi_{ž-p}}, \quad (7.14)$$

čia $\varphi_{ž-p}$ – kampinis spinduliavimo koeficientas, randamas iš grafikų;

šaltiems paviršiams:

$$q_{dAž} < 70, \tau_{p, \text{šalt.}} > \tau_{\text{šalt.}}^{\text{leist.}} \cong 23 - \frac{5}{\varphi_{ž-p}}. \quad (7.15)$$

Langų paviršiaus (esant mažiau griežtiems reikalavimams):

$$q_{dAž} < 93, \tau_l > \tau_{\text{lango}}^{\text{leist.}} \cong 14 - \frac{4,4}{\varphi_{ž-l}}. \quad (7.16)$$

Vasarą:

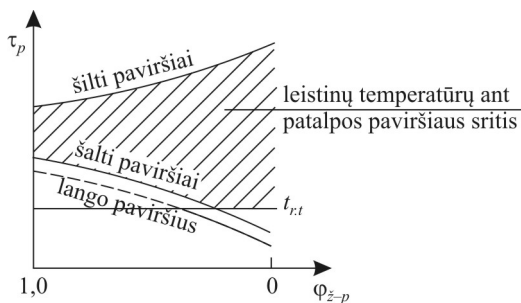
šaltiems paviršiams:

$$\tau_{\text{šilt.}} \leq \tau_{\text{šilt.}}^{\text{leist.}} \cong 29 + \frac{4,7}{\varphi_{ž-p}}, \quad (7.17)$$

šaltiems paviršiams:

$$\tau_{\text{šalt.}} > \tau_{\text{šalt.}}^{\text{leist.}} \cong 23 - \frac{5}{\varphi_{ž-p}}. \quad (7.18)$$

Antrąją komforto sąlygą galima pavaizduoti grafiškai (7.6 pav.).



7.6 pav. Grafinis antrosios komforto sąlygos atvaizdas

Papildoma sąlyga $\tau_p > t_{r.t.}$, $t_{r.t.}$ – rasos taško temperatūra patalpoje, t. y. paviršiaus temperatūra, kurioje ant paviršiaus prasidės vandens garų kondensacija.

Papildomi reikalavimai komfortui:

- apibrėžtas temperatūros kitimo gradientas patalpos tūryje;
- nustatyta leistinoji grindų paviršiaus temperatūra;
- nustatyti leistinasis oro judrumas ir santykinis drėgnumas patalpoje.

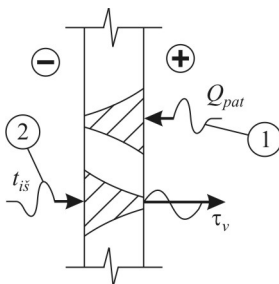
8. ATITVAROS IR PATALPOS ŠILUMINIS PASTOVUMAS

8.1. Atitvaros šiluminis pastovumas

Atitvaros šiluminis pastovumas – tai atitvaros savybė palaikyti vidiniame paviršiuje maždaug pastovią temperatūrą, periodiškai kintant šiluminiais veiksniams, t. y. kintant lauko arba patalpos oro temperatūrai ir pereinančio per atitvarą šilumos srauto tankiui.

Atitvaros šiluminis pastovumas pasireiškia dviem aspektais (8.1 pav.):

1. Atitvaros šiluminis pastovumas vidinių šiluminių poveikių atžvilgiu.
2. Atitvaros šiluminis pastovumas išorės oro temperatūros svyravimų, prasiskverbiančių pro atitvarą, atžvilgiu.



8.1 pav. Atitvaros šiluminį pastovumą iliustruojanti schema vidinių (1) ir išorinių (2) poveikių atžvilgiu

Atitvaros šiluminis pastovumas vidinių šiluminių poveikių atžvilgiu

Atitvaros šiluminis pastovumas nusakomas dviem rodikliais:

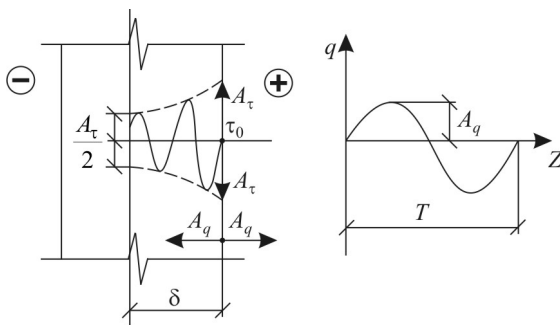
- šilumos imlumo rodikliu Y ;
- šilumos sugėrimo rodikliu B .

Atitvaros paviršiaus šilumos imlumo rodiklis Y

Pagal fizinę prasmę:

$$Y = \frac{Aq}{A\tau} . \quad (8.1)$$

Atitvaros šilumos imlumo koeficientas rodo santykį tarp šilumos srauto tankio, pereinančio per jos paviršių, svyravimų amplitudės A_q ir šio paviršiaus temperatūros svyravimų amplitudės A_τ (8.2 pav.).



8.2 pav. Temperatūros svyravimų amplitudės mažėjimas atitvaroje

Y yra atitvaros šiluminė ir fizinė charakteristika, priklausanti nuo atitvaros medžiagų, atskirų sluoksnių storio, savybių ir išdėstymo nuo-seklumo atitvaroje.

Atitvaros šilumos imlumo koeficiento Y , atliekant inžinerinius skaičiavimus, įvertinama tik dalis atitvaros storio, t. y. aktyvus sluoks-nis, kuriame vyksta dideli temperatūros svyravimai.

Paprasčiausias atvejis, kai atitvara viensluoksniė ir jos storis di-delis ($\delta \rightarrow \infty$).

Šiuo atveju kalbama tik apie medžiagos šilumos imlumo koefi-cientą S , $\frac{W}{m^2K}$.

Temperatūros svyravimai, einant gilyn nuo paviršiaus į atitvarą, silpsta. Tam tikru atstumu nuo paviršiaus temperatūros svyravimų amplitudė sumažėja du kartus. Nustatyta, kad šį storį galim gauti

prilyginus sandaugą RS vienetui. Tokiu būdu temperatūros svyravimų amplitudė sumažėja du kartus, jeigu

$$D = RS = 1 \text{ m},$$

čia D – šiluminės inercijos rodiklis. D yra bedimensis dydis. D dažnai vadinama sutartiniu atitvaros storiu. Kadangi sutartinio storio $D = 1$ temperatūros svyravimų amplitudė sumažėja du kartus, tai dydis D taip pat vadinamas rodikliu, nusakančiu amplitudės sumažėjimą pusiau.

Sluoksnis, kuriame $D = 1$, vadinamas didelių svyravimų sluoksniu ir atliekamas šio sluoksnio Y skaičiavimas.

Didelių svyravimų sluoksnis

Didelių svyravimų sluoksnyje $D = 1$, tada:

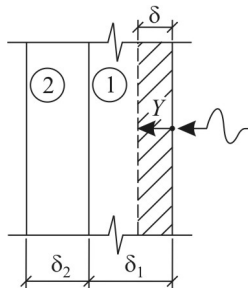
$$D = RS = S \frac{\delta}{\lambda}, \quad (8.2)$$

čia δ – didelių svyravimų sluoksnio storis metrais, iš šios sąlygos jis lygus:

$$\delta = \frac{\lambda}{S}. \quad (8.3)$$

Galimi atitvaros šilumos imlumo koeficiento Y_{at} nustatymo atvejai

Pirmas atvejis



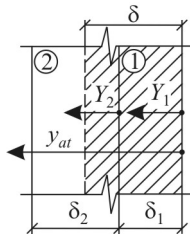
8.3 pav. Didelių svyravimų sluoksnis pirmame atitvaros sluoksnyje

Didelių svyravimų sluoksnis yra pirmo materialaus sluoksnio nuo atitvaros paviršiuje (8.3 pav.), t. y.:

$$D_1 = R_1 S_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} S_1 \geq 1; \quad \delta < \delta_1.$$

Šiuo atveju $Y_1 = S_1$.

Antras atvejis



8.4 pav. Didelių svyravimų sluoksnis apima pirmąjį ir antrąjį atitvaros sluoksnį

Didelių svyravimų sluoksnis yra 1 ir 2 atitvaros sluoksnys nuo atitvaros paviršiaus (8.4 pav.), t. y. $D_1 < 1$, o

$$(D_1 + D_2) > 1 \text{ ir } \delta > \delta_1.$$

Tada

$$Y_{at} \approx \frac{R_1 S_1^2 + Y_2}{1 + R_1 Y_2}, \quad (8.4)$$

čia $R_1 S_1$ – pirmo materialaus sluoksnio terminė varža ir šilumos imlumo koeficientas; Y_2 – antrojo nuo atitvaros paviršiaus sluoksnio šilumos imlumo koeficientas

Iš to išeina, kad atitvaros paviršiaus sluoksnio šiluminis pastovumas tuo didesnis, kuo toliau šilumai nelaidus sluoksnis yra nuo vidinės atitvaros pusės.

Jeigu

$$D_2 > 1, \text{ tai } Y_2 = S_2.$$

Jei didelių svyravimų sluoksnis apima ir trečią materialų sluoksnį $(D_1 + D_2) < 1$, tai Y_2 būtina skaičiuoti pagal (8.4) formulę, pakeitus joje indeksus 1 į 2, 2 į 3 ir t. t.

Trečias atvejis – vidinė atitvara

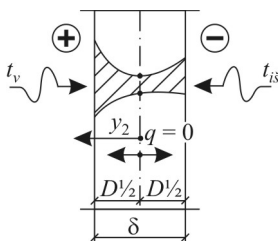
Galimi du variantai:

1. **Atitvara „stora“** $D_{1/2} > 1$ (skaičiuojat D , imama $\frac{\delta}{2}$).

Tuo atveju $Y_{v.at.} = S_1$.

2. Atitvara „plona“ $D_{1/2} < 1$.

Šiuo atveju svyravimai pasiekia šiluminės simetrijos ašį (8.5 pav.). $Y_{v.at.}$ nustatomas pagal (8.4) formulę. Tačiau įvertinant tai, kad simetrijos ašyje $q = 0$ ($A_q = 0$ taip pat), gauname, kad $Y_2 = 0$.



8.5 pav. Didelių vidinės atitvaros sluoksnio svyravimų nustatymas

Tada (8.4) formulė turi tokią išraišką:

$$Y_{v.at.} = R_1 S_1^2. \quad (8.5)$$

3. Grindų paviršiaus šilumos imlumo skaičiavimas pateiktas normatyviniuose dokumentuose.

Ketvirtas atvejis – grindys

Grindų paviršiaus šilumos imlumo skaičiavimas pateiktas STR „Pastatų atitvarų šiluminė technika“.

Galimi du variantai:

1. Jei atitvaros pirmojo sluoksnio šiluminė inercija $D_1 = R_1 S_1 \geq 0,5$, tai grindų paviršiaus šilumos imlumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Y_g = 2 S_1. \quad (8.6)$$

Pirmuoju sluoksniu imama grindų danga (t. y. pirmas atitvaros sluoksnis iš vidaus į išorę).

2. Jei pirmųjų atitvaros konstrukcijos sluoksnių ($n \geq 1$) suminė šiluminė inercija $(D_1 + D_2 + \dots + D_n) < 0,5$, tačiau $(n + 1)$ sluoksnių šiluminė inercija $(D_1 + D_2 + \dots + D_{n+1}) \geq 0,5$, tai vidinio atitvaros paviršiaus šilumos imlumas Y_{si} nustatomas nuosekliai skaičiuojant atskirų atitvaros konstrukcijos sluoksnių paviršių šilumos imlumą, pradedant n -tuoju ir baigiant pirmuoju sluoksniu:

n -tajam sluoksniui Y_n apskaičiuojamas taip:

$$Y_n = \frac{2R_n S_n^2 + S_{n+1}}{0,5 + R_n S_{n+1}}; \quad (8.7)$$

i -tajam sluoksniui ($i = n-1, n-2, \dots, 1$) pagal formulę:

$$Y_i = \frac{4R_i S_i + Y_{i+1}}{1 + R_i S_{i+1}}. \quad (8.8)$$

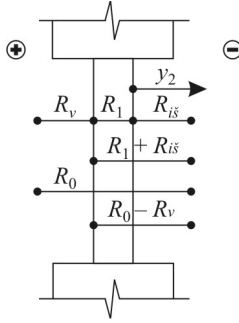
Grindų paviršiaus šilumos imlumas Y_{si} prilyginamas apskaičiuotam pirmojo atitvaros sluoksnio šilumos imlumui.

Penktas atvejis – beineracinė konstrukcija (langas)

Skaičiuojama pagal (8.4) formulę, tačiau įvertinama tai, kad langui $S_1 = 0$, o $Y_2 = \alpha_{i\check{s}}$, gauname, kad:

$$Y_1 = \frac{\alpha_{i\check{s}}}{1 + R_1 \alpha_{i\check{s}}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{i\check{s}}} + R_1} = \frac{1}{R_{i\check{s}} + R_1} = \frac{1}{R_0 - R_v}. \quad (8.9)$$

Atitvaros šilumos imlumo koeficientui didžiausią įtaką turi sluoksniai, esantys arčiau vidinio paviršiaus (8.6 pav.).



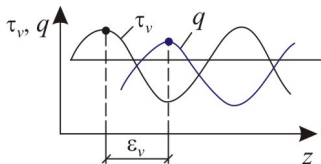
8.6 pav. Lango šilumos imlumo koeficiento nustatymas

Todėl jeigu patalpoje reikia stabiliai palaikyti pastovią temperatūrą, siekiant sumažinti temperatūros svyravimo amplitudę ant vidinio paviršiaus, reikia iš vidinės pusės naudoti sluoksnius, turinčius didesnį šilumos imlumo koeficientą.

Jeigu reikia greito paviršiaus temperatūros pasikeitimo, pasikeitus šildymo režimui, iš vidinės pusės reikia naudoti medžiagas su mažu šilumos imlumo koeficientu. Tai svarbu įrengiant protarpinį šildymą, kai naktį šilumos srautas sumažinamas, paviršiaus temperatūra krinta, o prieš darbo dienos pradžią temperatūrą reikia pakelti. Kuo mažesnį šilumos imlumo koeficientą turinčios medžiagos bus naudojamos iš vidinio atitvaros paviršiaus, tuo ekonomiškesnis bus protarpinis šildymas.

Atsilikimas tarp šilumos srauto ir paviršiaus temperatūros svyravimų (vėlavimas laiko atžvilgiu)

Atitvaros šiluminis pastovumas taip pat charakterizuojamas laiko intervalu (ε_v), t. y. paviršiaus temperatūros (τ_v) svyravimų atsilikimu nuo šilumos srauto svyravimų (8.7 pav.).



8.7 pav. Paviršiaus temperatūros svyravimų atsilikimas šilumos srauto svyravimų atžvilgiu

$$\varepsilon_y = Z_q^{\max} - Z_\tau^{\max}. \quad (8.10)$$

Storų atitvarų ($D > 1$)

$$\varepsilon_y = \frac{T}{8}, \quad (8.11)$$

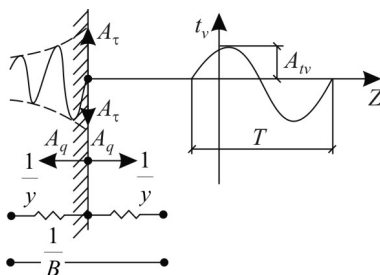
kai $T = 24$ h, $\varepsilon_y = 3$ h.

Atitvaros šilumos sugėrimo rodiklis B

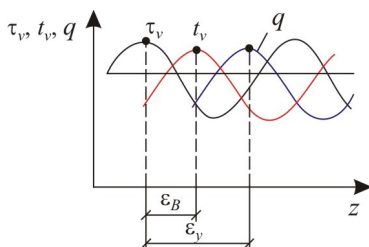
Pagal fizinę prasmę:

$$B = \frac{A_q}{A_{tv}} \left(W / m^2 K \right). \quad (8.12)$$

Atitvaros šilumos sugėrimo koeficientas lygus santykiui tarp šilumos srauto svyravimų amplitudės ant atitvaros paviršiaus A_q ir oro temperatūros šalia atitvaros svyravimų amplitudės A_{tv} (8.8 ir 8.9 pav.).



8.8 pav. Šilumos sugėrimo rodiklio iliustracija



8.9 pav. Šilumos srauto, oro temperatūros ir paviršiaus temperatūros svyravimai

Dydžio B apskaičiavimas

Tarus, kad poslinkio tarp svyravimo fazių $\tau_v q$ ir t_v nėra, tai šilumos srauto svyravimų amplitudė bus lygi:

$$A_q \cong \alpha_v(A_{tv} - A_{\tau v}). \quad (8.13)$$

Tada iš formulės

$$\frac{1}{\alpha_v} = \frac{A_{tv}}{A_q} - \frac{A_{\tau v}}{A_q}, \quad (8.14)$$

kaip žinoma:

$$\frac{A_{tv}}{A_q} = \frac{1}{B} \quad \text{ir} \quad \frac{A_{\tau v}}{A_q} = \frac{1}{Y}.$$

Tada

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{\alpha_v} + \frac{1}{Y}. \quad (8.15)$$

Iš čia išsireiškiame:

$$B = \frac{1}{\frac{1}{Y} + \frac{1}{\alpha_v}}. \quad (8.16)$$

Iš šios lygties išeina, kad atitvaros paviršiaus šilumos sugėrimo terminė varža lygi šilumos atidavimo ir atitvaros paviršiaus šilumos imlumo terminių varžų sumai.

Atsilikimas laiko atžvilgiu ε_B

„Storų“ atitvarų $\varepsilon_B = \frac{1}{16}T$, t.y. $\varepsilon_B \cong \frac{1}{2}\varepsilon_y$ ir jei svyravimų peri-

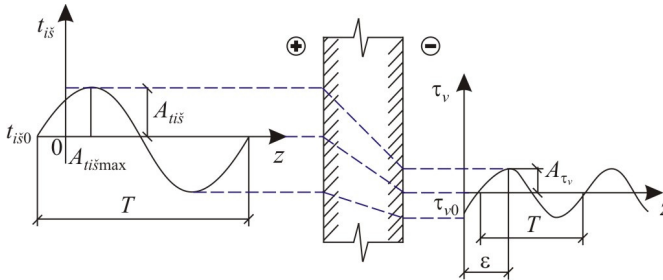
odas $T = 24$ h, $\varepsilon_B \cong 1,5$ h.

Atitvaros šiluminis pastovumas išorės oro temperatūrų svyravimų atžvilgiu

Ši atitvaros savybė apibrėžiama dviem rodikliais:

1. Užgesimo koeficientu γ .
2. Vėlavimo koeficientu ε .

Išnagrinėsime šilumos perdavimo per atitvarą atvejį, kai vidaus oro temperatūra pastovi, o dėl išorės temperatūros periodinių svyravimų vyksta vidinio atitvaros paviršiaus temperatūros svyravimai (8.10 pav.).



8.10 pav. Temperatūros svyravimų užgesimas atitvaroje, kintant išorės oro temperatūrai

Išorės oro temperatūros svyravimai yra harmoningi ir vyksta pagal kosinusoidės dėsnį:

$$t_{is} = t_{is.o} + A_{tis} \cos \frac{2\pi}{T} z, \quad (8.17)$$

čia $t_{is.o}$ – vidutinė išorės oro temperatūra periodo metu (paros metu); A_{tis} – išorės oro temperatūros svyravimų amplitudė; T – svyravimų periodas.

Vidinio paviršiaus temperatūros pokytis taip pat taisyklingas ir harmoningas, bet svyravimai vyksta su mažesne amplitude ir atsilieka laiko atžvilgiu (yra fazės poslinkis):

$$\tau_v = \tau_{v.o} + A_{\tau_v} \cos \frac{2\pi}{T} (z - \varepsilon), \quad (8.18)$$

čia $\tau_{v.o}$ – vidutinė periodo metu (paros metu) atitvaros vidinio paviršiaus temperatūra; ε – vidinio paviršiaus temperatūrų svyravimo atsilikimas išorės oro temperatūros svyravimų atžvilgiu (fazės poslinkis).

Vidutinė reikšmė $\tau_{v.o}$ nusistovėjusio periodinio šilumos perdavimo sąlygomis (kvazistacionarus procesas) nustatoma kaip ir visos vidutinės charakteristikos pagal stacionarų šilumos perdavimo dėsnį:

$$\tau_{v.o} = t_v - \frac{R_v}{R_o} (t_v - t_{ip.o}). \quad (8.19)$$

Išorės oro temperatūros svyravimų amplitudės užgesimo koeficientas γ :

$$A_{\tau_v} = \frac{A_{t_{iš}}}{\gamma}, \quad \gamma = \frac{A_{t_{iš}}}{A_{\tau_v}}. \quad (8.20)$$

čia γ – išorės oro temperatūrų svyravimo amplitudės užgesimo atitvaroje koeficientas; jis parodo, kiek kartų sumažėja temperatūrų svyravimo amplitudė, pereidama per visą atitvaros storį.

Iš to išeina, kad γ bus didesnis tuo atveju, jei konstrukcinis sluoksnis bus iš vidinės atitvaros

Temperatūros svyravimų prasiskverbimo per atitvarą vėlavimas laiko atžvilgiu ε inžinerinėje praktikoje ε nustatomas pagal formulę:

$$\varepsilon \approx 2,7D - 0,4. \quad (8.21)$$

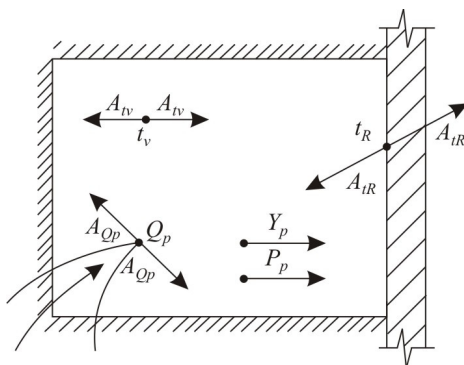
Kadangi γ ir ε priklauso nuo D , konstrukcijų inertiškumas normose priimtas pagrindiniu šiluminio pastovumo rodikliu.

8.2. Patalpos šiluminis pastovumas

Patalpos šiluminis pastovumas – tai patalpos savybė palaikyti palyginti pastovią patalpos temperatūrą kintant šiluminiais veiksniams.

Patalpos šilumos imlumo rodiklis Y_p lygus visų šilumos išsiskyrimų į patalpą svyravimų amplitudės A_{Qp} santykiui su radiacinės temperatūros svyravimų amplitude A_{tR} , čia t_R randama kaip vidutinė visų patalpos paviršių temperatūra (8.11 pav.):

$$Y_p = \frac{A_{Qp}}{A t_R}. \quad (8.22)$$



8.11 pav. Patalpos šilumos imlumo ir šilumos sugėrimo rodiklių nustatymo schema

Y_p nustatomas pagal formulę:

$$Y_p = \sum Y_i A_i, \quad (8.23)$$

čia Y_i ir A_i – visų charakteringų paviršių patalpoje šilumos imlumo koeficientai ir paviršių plotai.

Šilumos mainų intensyvumo rodiklis ant patalpos paviršių Λ

$$\Lambda = \sum \alpha_i A_i = \alpha \sum A_i, \quad (8.24)$$

čia α_i ir α – šilumos mainų koeficientas ant i -tojo paviršiaus ir vidutinis šilumos mainų koeficientas ant paviršių; A_i – charakteringų paviršių plotai.

Patalpos šilumos sugėrimo rodiklis P_p (B)

Pagal fizinę prasmę:

$$P_p = \frac{A_{Q_p}}{A_{t_v}}, \quad (8.25)$$

čia A_{Q_p} – šilumos išsiskyrimų į patalpą svyravimų amplitudė; A_{t_v} – oro temperatūros patalpoje svyravimų amplitudė.

P_p nustatymas skaičiavimo būdu

Patalpos šilumos sugėrimo rodiklis lygus visų veiksnių, dalyvaujančių šilumos mainuose patalpoje, šilumos sugėrimo rodiklių sumai:

$$P_p = P_{at} + P_{ved.} + P_{\xi} + P_V. \quad (8.26)$$

Paprastai atliekant inžinerinius skaičiavimus įvertinamas tik ativarų šilumos sugėrimo rodiklis P_{at} ir vėdinimo šilumos sugėrimo rodiklis $P_{ved.}$. Neįvertinama, kad šilumą sugeria įrengimai P_{ξ} ir patalpos tūris P_V . Tada:

$$P_p = P_{at} + P_{ved.} \quad (8.27)$$

čia $P_{ved.}$ – vėdinimo proceso šilumos sugėrimo rodiklis nustatomas taip:

$$P_{ved.} = c\rho L, \quad (8.28)$$

čia L – oro apykaita, m^3/h ; $c\rho$ – oro tūrinė savitoji šiluma.

Šilumos sugėrimo rodiklį reikia rasti, kai šilumos išsiskyrimai yra harmoningi arba su pertrūkiais.

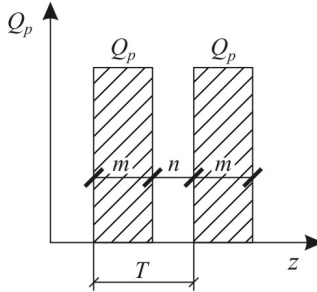
Esant harmoningiems šilumos išsiskyrimams:

$$P_{at} = \Sigma B_i A_i = \frac{1}{\frac{1}{\Sigma Y_i A_i} + \frac{1}{\alpha \Sigma A_i}} = \frac{1}{\frac{1}{Y_p} + \frac{1}{\Lambda}}. \quad (8.29)$$

Tada patalpos šilumos sugėrimo rodiklis, esant harmoningiems šilumos išsiskyrimams, skaičiuojamas pagal formulę

$$P_p = \frac{1}{\frac{1}{Y_p} + \frac{1}{\Lambda}} + Lc\rho. \quad (8.30)$$

Esant periodiškiems (nutrūkstantiems) šilumos išsiskyrimams su pertrūkiais, procesą galima iliustruoti schema, pateikta 8.12 pav.



8.12 pav. Periodiniai šilumos išsiskyrimai: m – šilumos išsiskyrimų Q_p laikas; n – laikas tarp šilumos išsiskyrimų ($Q_p = 0$); T – periodas

Periodas $T = m + n$.

Pagal fizinę prasmę patalpos šilumos sugėrimo rodiklis, kai šilumos išsiskyrimai periodiniai:

$$P_{p.p.} = \frac{A_{Q_p}}{A_{t_v}}. \quad (8.31)$$

P_{pp} šilumos sugėrimo rodiklio apskaičiavimas

Patalpos atitvarų šilumos sugėrimo rodiklis, esant periodiniams šilumos išsiskyrimams, skaičiuojamas taip:

$$P_{at.p} \frac{1}{\frac{\Omega}{Y_p} + \frac{1}{\Lambda}}, \quad (8.32)$$

čia Ω – pertrūkių koeficientas, kuris priklauso nuo santykio $\frac{m}{T}$ ir pateikiamas lentelėse ar randamas iš grafikų.

Galima užrašyti, kam lygus patalpos šilumos sugėrimo rodiklis esant periodiniams šilumos išsiskyrimams:

$$P_{pp} = \frac{1}{\frac{\Omega}{Y_p} + \frac{1}{\Lambda}} + Lcp. \quad (8.33)$$

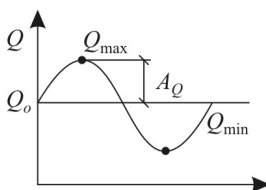
Šilumos išsiskyrimo į patalpą nepastovumas

Šis rodiklis charakterizuojamas šilumos išsiskyrimo nepastovumo koeficientu:

$$M = \frac{Q_{p \max} - Q_{p \min}}{2Q_{p.v}}, \quad (8.34)$$

čia Q – maksimalus, minimalus ir vidutinis šilumos išsiskyrimas į patalpą

Harmoningi šilumos išsiskyrimai į patalpą atvaizduoti 8.13 pav.



8.13 pav. Harmoningi šilumos išsiskyrimai patalpoje

Šilumos išsiskyrimų svyravimo amplitudė:

$$A_Q = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{2}. \quad (8.35)$$

Šilumos išsiskyrimo į patalpą nepastovumo koeficientas:

$$M = \frac{A_Q}{Q_o}. \quad (8.36)$$

Iš čia:

$$A_Q = M Q_o. \quad (8.37)$$

Esant periodiniams (nutrūkstantiems) šilumos išsiskyrimams, pavaizduotiems 8.12 pav.,

$$Q_{\max} = Q_p,$$

$$Q_{\min} = 0.$$

Tada:

$$M = \frac{Q_p}{2Q_{po}}, \quad (8.38)$$

$$Q_{p.o} = \frac{Q_p m}{m+n} \quad (8.39)$$

ir

$$M = \frac{Q_p (m+n)}{2Q_p m} = \frac{m+n}{2m}. \quad (8.40)$$

Laiko pastovioji

Laiko pastovioji (angl. *time constant*) – tai dydis, apibūdinantis kūno šiluminę inerciją. Jis rodo laiką, per kurį (nutraukus šildymą/vėsinimą) temperatūrų skirtumo tarp išorės (lauko) ir vidaus (patalpų) pradiniu laiko momentu santykis su temperatūrų skirtumu tarp išorės (lauko) ir vidaus (patalpų) galutiniu laiko momentu lygus natūrinio logaritmo pagrindo dydžiui $e = 2,71828$.

Standartines laiko pastoviosios ir jai nustatyti reikalingų parametrų vertes nustato standartas LST EN ISO 13790:2008 „Energetinės pastatų charakteristikos. Patalpoms šildyti ir aušinti sunaudojamos energijos skaičiavimas“. Jos gali kisti atsižvelgiant į vietovės klimatinės sąlygas, pastato paskirtį (gyvenamasis, administracinės ar kitos paskirties), šildymo režimo būdą (protarpinis ar nuolatinis šildymas) ir kt. Pagal laiko pastoviosios pasirinkimo variantus, pastatai skirstomi į du tipus: pirmajam (I) tipui priskiriami nuolatos šildomi pastatai, atsižvelgiant į šiluminės energijos sąnaudų skaičiavimo periodą mėnesiui ar šildymo sezonui; antrajam (II) pastatų tipui priskiriami ne nuolat šildomi pastatai, naudojantys protarpinio šildymo metodus.

Didžiosios dalies Lietuvoje vyraujančių pastatų laiko pastoviosios vertė yra 72–240 h; taip yra todėl, kad sugriežtinus pastatų „šiluminius“ reikalavimus, naujuosius pastatus (iki 15 metų) privaloma

projektuoti su ne didesnėmis kaip 0,2–0,3 W/(m²K) šilumos perdavimo koeficientų vertėmis. Mažėjant šilumos nuostoliams per atitvaras, atitinkamai auga pastato šiluminės inercijos vertė. Seniesiems pastatams (iki 1990 m. statybos) nebuvo keliami tokie griežti reikalavimai šiluminiu požiūriu, tačiau juose taip pat vyrauja masyvios, didelės šiluminės talpos konstrukcijos.

8.3. Patalpos temperatūros kitimas esant periodiniams šilumos išsiskyrimams

Uždaviniui supaprastinti teigsime, kad t_p kinta atitinkamai t_v , čia t_p – patalpos temperatūra $\left(t_p \cong \frac{t_v + t_R}{2}\right)$.

Esant harmoningiems šilumos išsiskyrimams, įvertinę, kaip teigiama apibrėžime:

$$P_p \cong \frac{A_{Q_p}}{A_{t_v}}, \quad (8.41)$$

pakeisime

$$P_p = \frac{aA_{Q_p}}{A_{t_p}}, \quad (8.42)$$

čia a – pataisos koeficientas, įvertinantis temperatūros ir šilumos srauto svyravimų fazių nesutapimą, spindulinius ir konvekcinius šilumos mainus patalpoje, įrenginius, baldus ir t. t.

$a \cong 0,9$ žiemos sąlygomis, tada:

$$A_{tp} \cong \frac{0,9mQ_0}{\frac{1}{\frac{1}{Y_p} + \frac{1}{\Lambda}} + Lc\rho}. \quad (8.43)$$

Esant periodiniams šilumos išsiskyrimams:

$$M = \frac{Q_p}{2Q_{p.o}}, \quad (8.44)$$

$$Q_p = 2mQ_{p.o}. \quad (8.45)$$

Žinant, kad

$$P_{pp} = \frac{aA_{Q_p}}{A_{t_p}}, \quad (8.46)$$

gaunama:

$$A_{tp} \cong \frac{1,8MQ_{p.o}}{\frac{1}{\frac{\Omega}{Y_p} + \frac{1}{\Lambda}} + Lc\rho}. \quad (8.47)$$

Normose ribojamas leidžiamas temperatūros pokytis patalpoje: esant krosniniam šildymui:

$$A_{tp}^{leist.} \approx 2,5 - 3^\circ\text{C},$$

esant centriniam šildymui

$$A_{tp}^{leist.} \cong 1,5^\circ\text{C}.$$

Skaičiuojant keliamas uždavinys užtikrinti sąlygą:

$$A_{tp} \leq A_{tp}^{leist.}.$$

Patalpos šiluminio pastovumo skaičiavimo eiga

1. Nustatomi visų atitvarų paviršių (atkreiptų į patalpą) šilumos imlumo Y_i ir šilumos sugėrimo B_i rodikliai.

2. Nustatomi šie patalpos rodikliai:

- šilumos imlumo Y_p ;
- šilumos sugėrimo P_p ;
- šilumos mainų intensyvumo Λ ;

- vėdinimo (proceso) šilumos sugėrimo P_{ved} , esant harmoningo ir periodinio šilumos išsiskyrimo režimams.
- 3. Nustatomas šilumos išsiskyrimo į patalpą nepastovumo koeficientas M .
- 4. Nustatomas patalpos temperatūros kitimas A_{tp} .
- 5. Siekiama, kad $A_{tp} \leq A_{t_p}^{leist.}$ keičiant atitvaros medžiagų šiluminės fizinės savybes, vėdinimą, santykį tarp dydžių m ir n .

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

Ivadas

1. Kokius klausimus nagrinėja statybinė šiluminė fizika?
2. Kuo svarbi statybinė šiluminė fizika energetikos specialistams?
3. Kokia yra išorinių atitvarų šiluminių techninių skaičiavimų specifi-
fika?
4. Kodėl pastatą galime suprasti kaip bendrą energetinę sistemą?

1. Pastato šiluminis režimas

1. Kas tai yra pastato šilumos režimas? Kaip atvaizduoti pastato šilumos režimo formavimąsi?
2. Kokią vaidmenį vaidina išorinės atitarinės konstrukcijos pastato šilumos režime?
3. Kokius vidaus oro parametrus turi užtikrinti šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemos?
4. Kokius žinote žadinančius ir reguliuojančius šiluminius veiksn-
nius?
5. Kaip suprantame, kas yra pastato mikroklimato užtikrinimo sis-
tema?

2. Šilumos perdavimas per išorines atitvaras

1. Ką laikome šilumos pernešimo potencialu?
2. Išvardykite elementarius šilumos sklidimo būdus.
3. Kas yra šilumos laidumas?
4. Kas yra šilumos perdavimas?
5. Apibūdinkite šilumos perdavimo koeficiento fizinę prasmę. Nuo
ko jis priklauso?
6. Kas yra šiluminė varža?
7. Kas yra konvekcija?
8. Kokia šilumos atidavimo koeficiento fizinė prasmė?
9. Kokia šiluminio spinduliavimo fizinė prasmė?
10. Parašykite paprasčiausias šilumos laidumo, konvekcinių, spindu-
linių, srautinių šilumos mainų ir šilumos perdavimo lygtis, iliust-
ruodami jas brėžiniais.

11. Paaiškinkite apie elektros ir šilumos analogiją. Parašykite, kokie elektriniai ir šiluminiai dydžiai analogiški.
12. Parašykite bendrą daigiasluoksnės atitvaros terminės varžos skaičiavimo formulę, paaiškinkite įeinančius dydžius ir iliustruokite tai brėžiniu.
13. Kaip nustatyti temperatūrą bet kuriame atitvaros sluoksnyje ir ant atitvaros paviršių?
14. Nubraižykite temperatūros pasiskirstymo brėžinuką dvisluoksnėje atitvoroje, kai žinomos vidaus ir išorės oro temperatūros ir $\lambda_1 > \lambda_2$.

3. Šilumos mainai patalpoje

1. Pavaizduokite bendrą šilumos mainų patalpoje schemą, pažymėkite visus dalyvaujančius šilumos mainų procese veiksnius ir šilumos mainų būdus patalpoje ir paaiškinkite.
2. Parašykite šilumos balanso lygtį ant vidinio išorinės atitvaros paviršiaus, iliustruokite brėžiniu.

4. Vienmatis šilumos perdavimas per atitvaras

1. Parašykite nestacionaraus šilumos laidumo lygtį diferencialine ir baigtinių dydžių forma, paaiškinkite į formules įeinančius dydžius.
2. Parašykite stacionaraus šilumos laidumo lygtį diferencialine forma ir įrodykite, kodėl atitvoroje temperatūra terminių varžų mastelyje kinta pagal tiesę.
3. Nubraižykite temperatūros ir dalinio vandens garų slėgio pasiskirstymą dvisluoksnėje atitvoroje, sudarytoje iš konstrukcinio ir termoizoliacinio sluoksnio, kai šių sluoksnių išdėstymo tvarka skirtinga. Kuriame sluoksnyje temperatūrinis gradientas yra didesnis?
4. Kaip nustatoma, ar vyksta vandens garų kondensacija atitvaros viduje stacionariomis sąlygomis?
5. Kokia yra vandens garų kondensacijos atitvaros paviršiuje sąlyga?
6. Koks konstrukcinio ir termoizoliacinio sluoksnių išdėstymo variantas daigiasluoksnėje atitvoroje yra geresnis šiluminės technikos požiūriu ir kodėl?

5. Apsauginės atitvarų savybės

1. Kokių rūšių drėgmė veikia pastatą? Charakterizuokite kiekvieną jų.
2. Kokia drėgmės atsiradimo priežastis atitvaros viduje ir ant atitvaros paviršiaus?
3. Kokias žinote plačiausiai naudojamas termoizoliacines medžiagas? Kaip jos skirstomos?
4. Koks turi būti medžiagos šilumos laidumo koeficientas, kad ji būtų priskiriama prie termoizoliacinių medžiagų?
5. Kokias apsaugines savybes turi turėti išorinė atitvara? Kokie dydžiai jas charakterizuoja?
6. Kokie yra orientaciniai norminiai šilumos perdavimo koeficientai įvairioms atitvarinėms konstrukcijoms (sienoms, rūsio perdangoms, stogo dangoms)? Nuo ko jie priklauso?
7. Kaip apskaičiuojamas atitvaros šiluminės inercijos rodiklis ir į kokias grupes pagal šią charakteristiką skirstomos atitvaros?
8. Kokia yra tikimybinio koeficiento prasmė? Kaip jis nustatomas? Ilustruokite pavyzdžiais.
9. Kaip suprantate, kas yra dienolaipsniai ir kaip jie paskaičiuojami?
10. Kaip paskaičiuoti nevienalyčių elementų vidutinės šiluminės varžos? Trumpai paaiškinkite šį metodą?

6. Šilumos perdavimas per atitvaros elementus, kuriuose formuojasi dvimatis temperatūrinis laukas

1. Kas yra dvimatis temperatūrinis laukas ir kokia lygtimi jis aprašomas?
2. Išvardykite charakteringus dvimačius elementus viršutinio aukšto kampinės patalpos išorinėje atitvaroje.
3. Kokie yra dvimačių temperatūrinių laukų nustatymo metodai?
4. Kokia tinklo metodo esmė nustatant dvimatį temperatūrinį lauką?
5. Užrašykite dvimačio temperatūrinio lauko lygties išraišką baigtinių dydžių forma.
6. Paaiškinkite grafinio dvimačio temperatūrinio lauko nustatymo metodo esmę.
7. Kas yra ortogonalinis kreivinių kvadratų tinklas, kam jis taikomas?
8. Kas yra kalibras, kuris naudojamas nustatant formos veiksnį?

9. Kokia yra formos faktoriaus fizinė prasmė?
10. Kas yra sudėtingos atitvaros sutartinė terminė varža? Paaiškinkite sudėtingos atitvaros sutartinės terminės varžos nustatymo formulę.

7. Komforto sąlygos patalpoje

1. Kokie normatyviniai dokumentai apibrėžia komforto sąlygas patalpose?
2. Iš kokių dydžių susideda žmogaus šilumos balansas patalpoje?
3. Kokie parametrai nusako šiluminės sąlygos patalpoje?
4. Kas yra kampinis spinduliavimo koeficientas ir ką jis parodo?
5. Kas yra radiacinė temperatūra ir kaip ji apskaičiuojama?
6. Kas yra patalpos temperatūra, kam ji lygi?
7. Kokios trys temperatūros nusako temperatūrines sąlygas patalpoje?
8. Kas yra komfortinės temperatūrinės sąlygos?
9. Apibrėžkite, kas yra aptarnavimo (darbo) zona?
10. Kokia gali būti komforto sąlygų zona? Kaip suprantate diskomforto laipsnį?
11. Kokia viso spinduliavimo koeficiento fizinė prasmė?
12. Suformuluokite I komforto sąlygą. Parašykite analitinę ir grafinę I komforto sąlygos išraišką.
13. Suformuluokite II komforto sąlygą. Parašykite analitinę ir grafinę II komforto sąlygos išraišką.
14. Kokie yra papildomi reikalavimai komfortui patalpoje?

8. Atitvaros ir patalpos šiluminis pastovumas

1. Kas yra atitvaros šiluminis pastovumas?
2. Kokiais rodikliais įvertinama atitvaros šiluminio pastovumo sąvybė vidinių šiluminių poveikių atžvilgiu?
3. Kokia atitvarinės konstrukcijos šilumos imlumo koeficiento fizinė prasmė?
4. Kam lygus medžiagos šilumos imlumo koeficientas?
5. Kas tai yra ryškių svyravimų sluoksnis? Kam jis lygus?
6. Kokia atitvarinės konstrukcijos dalis įvertinama nustatant šilumos imlumo koeficientą?
7. Kam lygus atitvaros šilumos imlumo koeficientas, jei ryškių svyravimų sluoksnis apima tik vieną materialų konstrukcijos sluoksnį?

8. Kam lygus atitvaros šilumos imlumo koeficientas, jei ryškių svyravimų sluoksnis yra 1 ir 2 materialiaame konstrukcijos sluoksnyje nuo atitvaros paviršiaus?
9. Kam lygus atsilikimas tarp šilumos srauto ir paviršiaus temperatūros svyravimų?
10. Kas yra atitvaros šilumos sugėrimo rodiklis? Kokia jo fizinė prasmė?
11. Nubraižykite schemą, koks tarpusavio santykis tarp t_v , τ_v , ir q laiko atžvilgiu esant periodiniams svyravimams.
12. Nubraižykite atitvaros šiluminio pastovumo išorės oro temperatūrų svyravimų atžvilgiu schemą.
13. Parašyti lygtį, kaip kinta išorinės atitvaros vidinio paviršiaus temperatūra išorės oro temperatūros svyravimų atžvilgiu.
14. Kam lygus išorės oro temperatūros svyravimų užgesimo koeficientas?
15. Kam lygus temperatūrinių svyravimų prasiskverbimo vėlavimo koeficientas ε ?
16. Kas yra patalpos šiluminis pastovumas?
17. Kokia patalpos šilumos imlumo koeficiento fizinė prasmė?
18. Kam lygus šilumos mainų intensyvumo rodiklis ant patalpos paviršių?
19. Kokia patalpos šilumos sugėrimo rodiklio fizinė prasmė?
20. Kam lygus šilumos išsiskyrimų į patalpą nepastovumo koeficientas?
21. Kaip paskaičiuojama patalpos oro temperatūros svyravimo amplitudė?
22. Pagal kokį rodiklį sprendžiame apie patalpos šiluminį pastovumą?

LITERATŪRA

- Barkauskas, V.; Stankevičius, V. 2000. *Pastatų atitvarų šiluminė fizika: vadovėlis*. Kaunas: Technologija. 286 p.
- Bliūdžius, R.; Stankevičius, V. 2001. *Statybinės šiluminės fizikos žinynas*. Kaunas: Technologija. 90 p.
- Hagentoft, C. E. 2001. *Introduction to building physics*. Lund: Studentlitteratur. 422 p.
- Hagentoft, C.-E. 2001. *Introduction to Building Physics*. 422 p.
- HN 42: 2004. Gyvenamųjų ir viešojo naudojimo pastatų mikroklimatas, *Žin.*, 2004, Nr. 105-3911.
- HN 69-2003. 2004. Šiluminis komfortas ir pakankama šiluminė aplinka darbo patalpose, parametrų norminės vertės ir matavimo reikalavimai, *Žin.*, Nr. 45-1485.
- Hens, Hugo S. L. C. 2007. *Building Physics - Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. Ernst & Sohn. 270 p
- Hens, Hugo S. L. C. 2012. *Applied Building Physics: Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties*. John Wiley & Sons. 322 p.
- Incropera, F. P. 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition with Introduction to Heat Transfer Set*. New York: John Wiley&Sons. 1720 p.
- Incropera, F. P.; DeWitt, D. P. 1985. *Introduction to Heat Transfer*. New York: John Wiley&Sons. 711 p.
- LST EN 12831:2003. 2003. *Pastatų šildymo sistemos. Projektinės šilumos apkrovos apskaičiavimo metodas*. Vilnius, 2003. 76 p.
- LST EN ISO 13790:2008. *Energetinės pastatų charakteristikos. Patalpoms šildyti ir aušinti sunaudojamos energijos skaičiavimas*. Vilnius, 2008. 165 p.
- Morris, G. D. 2004. *Building Heat Transfer*. John Wiley and Sons. 500 p.
- Pikutis, R.; Stankevičius, V. 1999. *Pastatų atitvarų renovacija*. Vilnius: Statybos literatūra. 136 p.
- RSN 156-94. *Statybinė klimatologija*. Vilnius, 1995. 136 p.
- Skrinska, A. 2006. *Heat Transfer. Educational Book*. Vilnius: Technika. 240 p.
- Stankevičius, V.; Pikutis, R. 1995. *Gyvenamųjų pastatų apšiltinimas. I dalis*. Vilnius: Technika. 278 p.

- Stankevičius, V.; Pikutis, R. 1996. *Gyvenamųjų pastatų apšiltinimas. 2 dalis*. Vilnius: Statybos literatūra. 287 p.
- STR 2.05.01: 2005. Pastatų atitvarų šiluminė technika, *Žin.*, 2005, Nr. 100-3733.
- Богословский, В. Н. 1982. *Строительная теплофизика*: учебник для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. Москва: Высшая школа. 415 с.
- Кувшинов, Ю. Я. 2007. *Теоретические основы обеспечения микро-климата помещения пособие*. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов. 184 с.
- Кувшинов, Ю. Я. 2010. *Энергосбережение в системе обеспечения микроклимата зданий*. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов. 320 с.
- Малявина, Е. Г. 2011. *Строительная теплофизика*: учебное пособие. Москва: МГСУ. 152 с.
- Самарин, О. Д. 2007. *Теплофизические и техникоэкономические основы теплотехнической безопасности энергосбережения в здании*. Москва: МГСУ. 160 с.
- Самарин, О. Д. 2011. *Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность*: монография. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов. 296 с.