EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Kaarel Paurson

KIIRGUSKADUDE MÕJU ANALÜÜS HOONE SOOJUSBILANSILE

THE ANALYSIS OF THE EFFECTS OF RADIATIVE HEAT LOSSES ON THE HEAT BALANCE OF A BUILDING

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendaja: dotsent Eugen Kokin, *DSc*

Tartu 2021

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Kaarel Paurson		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Kiirguskadude mõju analüüs hoone soojusbilansile			
Lehekülgi: 76	Jooniseid: 27	Tabeleid: 4	Lisasid: 4
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika 4.17. Energeetikaalased uuringud T140 Energeetika Juhendaja(d): Eugen Kokin Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2021			

Vastavalt standarditele ja eeskirjadele võetakse soojuskadude määramisel läbi hoone välispiirete üldjuhul arvesse ainult juhtivuslikku ja konvektiivset soojuslevi, kuid kiirguslikku soojusülekannet ei arvestata. Sellest lähtuvalt oli töö eesmärgiks hinnata kiirguskadude mõju hoone arvutuslikele soojuskadudele.

Selle eesmärgi nimel selgitati käesolevas töös taeva temperatuuri määramist nii pilvise kui ka selge taeva korral, kirjeldati seosed mille abil saab leida kiirgusliku soojusvoo suuruse erinevates olukordades, selgitati tasakaaluolukorra tingimusi mil vaadeldavasse süsteemi sisenevad ja lahkuvad soojusvood on võrdsed, tutvustati tasakaaluolukorra korral hoone välispinna temperatuuri leidmist neljanda astme võrrandi lahendamise teel ning esitleti kirjeldatud meetodite abil saadud näidistulemusi.

Jõuti järeldusele, et kiirguskadudega arvestamine suurendab hoone soojuskadusid piisavalt hea soojusisolatsiooni ja standardis ettenähtud välispinna soojustakistuse korral vaid paari protsendi võrra, sest kiirguskao mõjul piirde pinnatemperatuuri langemisel alla välisõhu temperatuuri hakkab piirde ja välisõhu vaheline konvektiivne soojusvoog väga efektiivselt kompenseerima kiirguse mõjul tekkivat soojuskadu.

Märksõnad: Stefan-Boltzmanni seadus, taeva temperatuur, kiirguslik soojuskadu, neljanda astme võrrand, Wieni nihkeseadus

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Kaarel Paurson		Curriculum: Energy Application Engineering	
Title: The Analysis of the Effects of Radiative Heat Losses on the Heat Balance of a Building			
Pages: 76	Figures: 27	Tables: 4	Appendixes: 4

Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering

Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering

4.17. Energetic research

T140 Energy research

Supervisor: Eugen Kokin

Place and date: Tartu, 2021

According to standards and regulations, only conductive and convective heat transfer are generally taken into account when determining heat losses through the boundaries of a building. But heat is also dissipated by radiation. Based on this, the aim of the thesis was to assess the impact of radiation losses on the calculated heat losses of the building.

To this end, the calculation of sky temperature for both cloudy and clear sky was explained, formulas for calculating the radiant heat flux in differing situations were developed, the conditions of the equilibrium situation under which the heat flows entering and leaving the system were clarified, finding the temperature of the external surface of the building during the state of equilibrium in the form of solving the quartic equation was described, and sample results calculated using the aforementioned methods and equations were presented.

It was concluded that taking into account the radiant heat flux increased the heat loss of a building only by a few percent, and this is explained by the fact that convection heat flux coming from the ambient air will effectively balance out the heat losses caused by radiative flux.

Keywords: Stefan-Boltzmann law, sky temperature, radiant heat loss, quartic equation, Wien's displacement law

SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID 6
SISSEJUHATUS 9
1. SOOJUSÜLEKANDE VIISIDE KIRJELDUS 11
1.1. Juhtivuslik ja konvektiivne soojuslevi välispiirde soojuskao määramisel 11
1.2. Kiirguslik soojuslevi 15
1.3. Kiirgusliku soojuslevi eripära akende korral 17
2. TAEVA TEMPERATUUR 19
2.1. Pilvise taeva temperatuur 19
2.2. Selge taeva temperatuur 20
3. KIIRGUSLIKU SOOJUSKAO ARVUTAMINE 23
3.1. Lihtsustused 23
3.2. Pilves taevas, horisontaalne katus 23
3.3. Pilves taevas, vertikaalne sein 25
3.4. Pilves taevas, nurga all olev katus 26
3.5. Selge taevas, horisontaalne katus 27
3.6. Selge taevas, vertikaalne sein 30
3.7. Selge taevas, nurga all olev katus 31
4. PIIRDE VÄLISPINNA TEMPERATUUR TASAKAALUOLUKORRAS 33
4.1. Tasakaaluolukorra kirjeldus 33
4.2. Neljanda astme võrrandi lahendamine 38
4.3. Piirde välispinna temperatuuri arvutamise näide 40
4.4. Neljanda astme võrrandi kordajate *a*, *d* ja *e* väärtused erinevatel juhtudel 44
4.5. Välispinna temperatuuri leidmine kahe vabalt valitud pinnatemperatuuri väärtuse alusel 46
4.6. Välispinna temperatuuri leidmine keskkonnas *Scilab* 49
5. NÄITED ERINEVATE VÄLISPIIRETEGA 52
5.1. Arvutuslike soojuskadude erinevus 52
5.2. Õhkvahe mõju kiirguslikule soojuskaole *Scilab*'i mudeli näitel 62
KOKKUVÕTE 65
SUMMARY 67
KIRJANDUSE LOETELU 69
LISAD 71
Lisa A. *Scilab*'i mudel tasakaaluolukorra kirjeldamiseks 72

Lisa B. *Scilab*'i mudel õhkvahe kirjeldamiseks 73
Lisa C. *SciLab*'i mudeli kontekst 74
Lisa D. Välispinna soojusülekandeteguri leidmine vabakonvektsiooni tingimustes 76
LIHTLITSENTS..... 77

TÄHISED JA LÜHENDID

a – neljanda astme tundmatu kordaja

A – välispiirde pindala m^2

b – kolmanda astme tundmatu kordaja

b_{Wien} – Wieni konstant μm·K, b_{Wien} = 2898

c – piirde erisoojus J/(kg·K)

c – teise astme tundmatu kordaja

d – esimese astme tundmatu kordaja

$d\tau$ – väike ajaühik s

dT – piirde temperatuuri muutus väikese ajaühiku jooksul K

e – vabaliige neljanda astme võrrandis

E – hallkeha kiirgusvoo tihedus W/m^2

E_b – mustkeha kiirgusvoo tihedus W/m^2

g – raskuskiirendus m/s^2, g = 9,81

h – piirde kõrgus m

k – sirge tõus

K_0 – taeva pilvituse kordaja (*sky clearness index*)

m – piirde mass kg

Nu – Nusselti arv

Pr – Prantdli arv

Ra_L – Rayleigh' arv

Q_0 – ainult juhtivust ja konvektsiooni arvestav soojusvoog W

Q_{juht} – juhtivuslikul teel leviv soojusvoog W

q_{kogu} – soojusvoo tiheduste summa välispinna temperatuuri T_{vp} korral W/m^2

q_{kogu1} – soojusvoo tiheduste summa välispinna temperatuuri T_{vp1} korral W/m^2

q_{kogu2} – soojusvoo tiheduste summa välispinna temperatuuri T_{vp2} korral W/m^2

Q_{konv} – konvektiivsel teel leviv soojusvoog W

q_{rad} – kiirgusliku soojusvoo tihedus W/m^2

Q_{rad} – piirde välispinnalt kiirguslikult lahkuv soojusvoog W

q_{rad1} – kiirgusliku soojusvoo tihedus välispinna temperatuuri T_{vp1} korral W/m^2

q_{rad2} – kiirgusliku soojusvoo tihedus välispinna temperatuuri T_{vp2} korral W/m^2

$q_{sise\%}$ – kiirguskao arvestamise tõttu lisanduv piiret läbiv soojuskadu %

q_{sise} – läbi välispiirde liikuva juhtivusliku soojusvoo tihedus W/m^2

Q_{sise} – hoone seest läbi piirde juhtivuslikult välispinnani saabuv soojusvoog W

Q_{sise0} – soojusvoog läbi piirde arvestades ainult juhtivust ja konvektsiooni W

q_{sise1} – piiret läbiva soojusvoo tihedus välispinna temperatuuri T_{vp1} korral W/m^2

q_{sise2} – piiret läbiva soojusvoo tihedus välispinna temperatuuri T_{vp2} korral W/m^2

$Q_{vp_maapind}$ – piirde välispinna ja maapinna vaheline kiirguslik soojusvoog W

Q_{vp_taevas} – piirde välispinna ja taeva vaheline kiirguslik soojusvoog W

$q_{võ}$ – piirde välispinna ja välisõhu vaheline soojusvoo tihedus W/m^2

$Q_{võ}$ – välisõhu ja piirde välispinna vaheline konvektiivne soojusvoog W

$q_{võ1}$ – konvektiivse soojusvoo tihedus välispinna temperatuuri T_{vp1} korral W/m^2

$q_{võ2}$ – konvektiivse soojusvoo tihedus välispinna temperatuuri T_{vp2} korral W/m^2

R_p – piirde soojustakistus m^2·K/W

R_{piire} – piirde soojustakistus siseõhust välispinnani m^2·K/W

R_s – piirde sisepinna soojustakistus m^2·K/W

$R_{võ}$ – piirde välispinna soojustakistus m^2·K/W

p – õhurõhk Pa

p_d – auru osarõhk Pa

s – õhu eriniiskus kg/kg

T – kiirgava keha temperatuur K

T_1 – esimese keha pinnatemperatuur K

T_2 – teise keha pinnatemperatuur K

T_f – välispinna piirikihi keskmine õhutemperatuur K

t_{sp} – piirde sisepinna temperatuur °C

t_{sp0} – piirde sisepinna temperatuur kiirguslikku soojuskadu arvestamata °C

t_{taevas} – taeva temperatuur °C

T_{taevas} – taeva temperatuur K

$t_{taevas}(x)$ – nurkkõrgusel x olev taeva temperatuur °C

$T_{taevas}(x)$ – nurkkõrgusel x olev taeva temperatuur K

t_{vp} – piirde välispinna temperatuur °C

T_{vp} – piirde välispinna temperatuur K

t_{vp0} – piirde välispinna temperatuur kiirguslikku soojuskadu arvestamata °C

T_{vp0} – piirde välispinna temperatuur kiirguslikku soojuskadu arvestamata K

T_{vp1} – esimene suvaliselt valitud välispinna temperatuur K

T_{vp2} – teine suvaliselt valitud välispinna temperatuur K

$t_{võ}$ – välisõhu temperatuur °C

$T_{võ}$ – välisõhu temperatuur K

U – piirde soojusjuhtivus standardi järgi W/(m^2·K)

U_{piire} – piirde soojusjuhtivus siseõhust välispinnani W/(m^2·K)

$U_{võ}$ – välispinna piirikihi soojusjuhtivus W/(m^2·K)

x – nurkkõrgus horisondist °

x – neljanda astme võrrandi tundmatu

α – neeldumistegur

α_s – piirde sisepinna soojusülekandetegur W/(m^2·K)

α_v – piirde välispinna soojusülekandetegur W/(m^2·K)

β – õhu paisumistegur 1/K

θ – katuse nurk horisondist °

δ – piirde paksus m

δ_i – kihi i paksus m

ε – emissioonitegur (ka kiirgustegur, mustusaste)

λ – materjali soojuserijuhtivus W/(m·K)

λ_i – kihi i soojuserijuhtivus W/(m·K)

λ_{max} – kiirgusvoo spektraalse maksimumi lainepikkus μm

σ – Stefan-Boltzmanni konstant W/(m^2·K^4), σ = 5,67·10^{-8}

ν – õhu kinemaatiline viskoossus m/s^2

ρ – peegeldustegur

τ – läbitavustegur

SISSEJUHATUS

Arvutamaks adekvaatse täpsusega vajaminevat küttevõimsust, tuleb määrata hoone kõikvõimalikud soojuskaod, ning mida põhjalikumalt seda teha, seda parema tulemuse saab. Soojuskaod läbi piirdekonstruktsioonide moodustavad väga olulise osa hoone kogusoojuskaost. Selliste kadude arvutamise hõlbustamiseks on välja töötatud vastavad riiklikud standardid ja eeskirjad [1], mis omakorda tuginevad soojustehnikas üldtuntud põhitõdedele.

Soojustehnikas eristatakse kolme soojusülekande viisi: juhtivuslik, konvektiivne ja kiirguslik [2]. Hoone soojuskadude määramisel vastavalt üldlevinud meetoditele arvestatakse paraku vaid juhtivusliku ja konvektiivse soojusülekandega ning kiirguslikku soojusülekannet kas ei mainita üldse või tehakse seda väga pealiskaudselt, kuigi kiirguslik soojuslevi eraldiseisva nähtusena on soojustehnika käsiraamatutes vägagi põhjalikult ära kirjeldatud. Mõnedes allikates mainitakse endas nii konvektiivset kui ka kiirguslikku komponenti kätkevat liitsoojusülekande tegurit, kuid sellisel juhul on tegu eelkõige küttekehade soojusarvutusega, ning mitte hoone soojuskadude määramisega [3]. Kiirgusliku soojuslevi mõju selline arvestamata jätmine tugineb ilmselt ajaloolistele põhjustele, kuna võrreldes juhtivusliku ja konvektiivse soojusülekandega on kiirguslike soojusvoogudega seonduvate suuruste väljaarvutamine käsitsi märgatavalt töömahukam. Arvestades tänapäevase arvutustehnika võimalusi ning eelkõige kasutajasõbralike tarkvaraliste keskkondade kättesaadavust, peaks järele jääma järjest vähem ettekäändeid kiirgusliku soojuslevi mõjudele piisava tähelepanu mittejuhtimiseks.

Ülalmainitust on tõukunud ka käesoleva töö eesmärk – kirjeldada meetodeid ja lahendusi, mille abil saaks määrata hoone kiirguslikke soojuskadusid ning eelkõige hinnata, mil määral mõjutab kiirgusliku komponendi kaasamine standardi järgi arvutatud hoone soojuskadusid. Selleks on töös põgusalt meelde tuletatud soojuslevi põhilisi printsiipe; kirjeldatud taeva temperatuuri määramist (taevas on tavaliselt tunduvalt külmem kui välisõhk ning on seega põhiline kiirgusliku soojuskao põhjus); välja töötatud seosed kiirgusliku soojusvoo määramiseks hoone piirdekonstruktsioonide välispinnalt erinevate olukordade jaoks; ning

kirjeldatud kolme meetodit arvutamaks välja kõigi kolme soojusülekande viisi arvestamise korral resulteeruvat piirde välispinna arvutuslikku temperatuuri. Keskendutud on eelkõige soojuskadudele – ehk siis välistingimused on valitud sellisena nagu standard neid ette näeb, ning pole arvesse võetud Päikese soojendavat mõju hoonele päevasel ajal.

Käesoleva töö eesmärk pole anda konkreetseid ning üheseid vastuseid hoone soojuskadude määra kohta erinevate konstruktsiooni– ja soojusisolatsioonimaterjalide, välistingimuste jms korral, vaid eelkõige pigem aidata kaasa terviklikuma arusaama kujunemisele hoone soojustehniliste protsesside kirjeldamisel ning ühtlasi tekitada arutelu esmapilgul ehk veidi üllatavatena tunduvate järelduste osas.

1. SOOJUSÜLEKANDE VIISIDE KIRJELDUS

1.1. Juhtivuslik ja konvektiivne soojuslevi välispiirde soojuskao määramisel

Läbipaistmatus tahkes aines toimub soojusülekanne üldjuhul juhtivuslikul teel kõrgema temperatuuriga osast madalama temperatuuriga osasse vastavalt Fourier' seadusele [4]. Läbi ühekihilise piirde juhtivuslikul teel liikuvat soojusvoogu Q_{juht} arvutatakse valemiga [5]

$$Q_{juht} = A\lambda \frac{t_{sp} - t_{vp}}{\delta}, \tag{1.1}$$

kus A – välispiirde pindala m^2;

λ – materjali soojuserijuhtivus W/(m·K);

t_{sp} – piirde sisepinna temperatuur °C;

t_{vp} – piirde välispinna temperatuur °C;

δ – piirde paksus m.

Piirde soojustakistus R_p on võrdeline piirde paksuse ja pöördvõrdeline piirde materjali soojuserijuhtivusega:

$$R_p = \frac{\delta}{\lambda}. \tag{1.2}$$

Kui piire koosneb mitmest erinevast materjalikihist (näiteks tugikonstruktsioon, soojustus ja laudis), siis soojustakistus R_p on vastavate kihtide paksuste ja soojuserijuhtivuste suhete summa:

$$R_p = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \tag{1.3}$$

kus δ_i on kihi i paksus m;

λ_i – kihi i soojuserijuhtivus W/(m·K).

Hoone piirete korral arvestatakse soojusvoo leidmisel lisaks juhtivuslikule soojuslevile ka konvektiivset soojuslevi. Konvektiivse soojusvahetuse korral põhjustab soojuse edasikandumist ebaühtlase temperatuuriga vedelas või gaasilises keskkonnas eelkõige keskkonna liikumine ja vähemal määral ka soojusjuhtivus [6]. Konvektiivne soojusvoog Q_{konv} õhult piirdele ja ka piirdelt õhule on arvutatav järgmise valemiga [5]:

$$Q_{konv} = \alpha_v A\left(t_{v\tilde{o}} - t_{vp}\right), \tag{1.4}$$

kus α_v on välisõhu ja piirde välispinna vaheline soojusülekandetegur W/(m^2·K);

$t_{v\tilde{o}}$ – välisõhu temperatuur °C.

Valemit (1.4) saab kasutada nii soojuse liikumisel soojemalt pinnalt jahedamasse õhku (näiteks piirde välispinnalt välisõhku) kui ka soojemalt õhult jahedamale pinnale (näiteks ruumi siseõhult piirde sisepinnale), soojusülekandetegur α käitub mõlema olukorra puhul analoogiliselt [7]. Soojusülekandeteguri pöördväärtust nimetatakse pinna soojustakistuseks:

$$R_{v\tilde{o}} = \frac{1}{\alpha_v}, \tag{1.5}$$

kus $R_{v\tilde{o}}$ on piirde välispinna soojustakistus m^2·K/W.

Samamoodi saab piirde sisepinna soojusülekandeteguri α_s pöördväärtusena leida ka sisepinna soojustakistuse R_s.

Arvestades nii juhtivust kui ka konvektsiooni saab läbi mitmekihilise piirde liikuvat soojusvoogu Q_0 arvutada valemiga [5]:

$$Q_0 = A\frac{t_{s\tilde{o}} - t_{v\tilde{o}}}{\frac{1}{\alpha_s} + \sum\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_v}}. \tag{1.6}$$

Valemi (1.6) põhjal toimub soojuskadude arvutamine standardi järgi. [1]

Kogu piirde soojustakistus R vastavalt valemile (1.6) on

$$R = R_s + \sum\frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_v. \tag{1.7}$$

Kogu piirde soojustakistust teades saame arvutada soojusjuhtivuse ehk piirde U-arvu sellisel kujul, nagu seda erialakirjanduses ja ehitusmaterjalide kirjeldustes kasutatakse [5]:

$$U = \frac{1}{R}, \tag{1.8}$$

kus U on piirde soojusjuhtivus W/(m^2·K).

Piirde välispinna temperatuur on arvutatav valemiga:

$$t_{vp} = t_{v\tilde{o}} + \frac{R_v}{R}(t_{s\tilde{o}} - t_{v\tilde{o}}). \tag{1.9}$$

Kuna käesolevas töös on erilise tähelepanu all piirde välispind, kus „saavad kokku" põhilised soojusülekande viisid, siis on mõistlik läbi piirde tuleva juhtivusliku soojusvoo arvutamise lihtsustamiseks piirde soojustakistuse juures välispinna piirikihi soojustakistus eraldada ja arvestada eraldi omaette soojusvoo juures. Sellisel juhul avaldub kogu piirde soojustakistus R_{piire} ainult sisepinna soojustakistuse ja piirde materjalide soojustakistuste summana:

$$R_{piire} = R_s + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \tag{1.10}$$

Piirde soojusjuhtivus U_{piire} sellisel juhul on

$$U_{piire} = \frac{1}{R_{piire}}. \tag{1.11}$$

Soojusvoog Q_{sise0} läbi piirde siseõhust piirde välispinnani on seega arvutatav valemiga

$$Q_{sise0} = U_{piire} A\left(t_{s\tilde{o}} - t_{vp}\right). \tag{1.12}$$

Q_{sise0} on soojuskadu läbi hoone välispiirde arvutatuna standardi kohaselt, võttes arvesse ainult juhtivuslikku ja konvektiivset soojusülekannet. See on suurus, mille me hiljem käesolevas töös võtame aluseks hindamaks seda, kui palju kiirgusliku komponendi lisamine suurendab arvestuslikku soojuskadu läbi hoone välispiirde. Analoogiline juhtivuslikult läbi

piirde liikuv soojusvoog, mis on saadud juhul kui hoone soojuskadude juures on arvestatud ka kiirguslikku komponenti, on tähistatud kui Q_{sise}.

Kuna kiirgusliku soojusülekande mõju arvestamisel hoone arvutuslikule soojuskaole omab piirde välispinna konvektiivne komponent väga suurt osakaalu, tuleb käesoleva töö raames täpsemalt määratleda välispinna soojusülekandeteguri α olemust, eelkõige selle võimalikke väärtusi erinevates olukordades. Soojusülekandeteguri α õige väärtuse määramine kõiki asjaolusid arvestades võib olla võrdlemisi keerukas [8].

Konvektiivse soojuslevi juures eristatakse põhimõtteliselt kahte olukorda: sundkonvektsioon ja vabakonvektsioon.

Sundkonvektsiooni korral sõltub soojusülekandeteguri väärtus peamiselt õhu liikumiskiirusest [9]. Antud töös on sundkonvektsiooni põhiliseks tekitajaks väliskeskkonnas olev tuul; tabelis 1.1 on esitatud soojustakistuse väärtused tuule kiiruse erinevate väärtuste korral. Tartumaal on keskmine tuule kiirus kolmel kõige külmemal kuul 4,5 m/s [10], sellele vastavat välispinna soojustakistust 0,04 $m^2 \cdot K/W$ on mainitud mitmetes kirjandusallikates [11].

Tabel 1.1. Välispinna soojustakistus olenevalt tuule kiirusest [12]

Tuule kiirus, m/s	**Soojustakistus, $m^2 \cdot K/W$**
1	0,08
2	0,06
3	0,05
4	0,04
5	0,04
7	0,03
10	0,02

Vabakonvektsiooni põhjustab õhu tiheduse muutus piirde pinnal – soojenenud ning seega kergemaks muutunud õhk liigub ülespoole, jahenedes tihedamaks muutunud õhk liigub allapoole. Kuna käesolevas töös vaadeldavatel juhtudel on välispinna soojustakistus suurim just vabakonvektsiooni ehk täieliku tuulevaikuse korral, tuleb sellele suuremat tähelepanu

pöörata. Välispinna soojustakistuse leidmine vabakonvektsiooni tingimustes on esitatud lisas D.

Kuna käesolevas töös moodustab välisõhu ja piirde välispinna vaheline soojusvoog väga olulise osa, tuleb lisaks eelpool mainitud juhtivuslikule soojusvoole Q_{sise} siinkohal kirjeldada ka välisõhu ja piirde välispinna vahelist konvektiivset soojusvoogu $Q_{võ}$:

$$Q_{võ} = U_{võ}A\left(t_{võ} - t_{vp}\right), \tag{1.13}$$

kus $U_{võ}$ on välispinna piirikihi soojusjuhtivus W/(m^2·K).

Välispinna piirikihi soojusjuhtivus $U_{võ}$ on omakorda välispinna piirikihi soojustakistuse $R_{võ}$ pöördväärtus:

$$U_{võ} = \frac{1}{R_{võ}}. \tag{1.14}$$

1.2. Kiirguslik soojuslevi

Lisaks juhtivusele ja konvektsioonile toimub soojuslevi veel soojuskiirguse ehk elektromagnetilise lainetuse teel. Kõik kehad kiirgavad pidevalt elektromagnetkiirgust, temperatuuri mõjul tekkiv soojuskiirgus toimub eelkõige lainepikkustel vahemikus 0,1 .. 100 μm, hõlmates seega ka nähtava valguse lainepikkuste vahemiku (0,38 .. 0,76 μm) [13].

Kui kiirgus langeb mingi keha peale, siis mingi osa sellest neeldub (α), mingi osa peegeldub tagasi (ρ) ja mingi osa läbib keha (τ) [14]:

$$\alpha + \rho + \tau = 1, \tag{1.15}$$

kus α on neeldumistegur;

ρ – peegeldustegur;

τ – läbitavustegur.

Enamus tahkeid materjale neelavad peaaegu kogu pealelangeva kiirguse, nii et läbitavustegur τ võrdub peaaegu ühega (sellised materjalid on läbipaistmatud). Mõned tahked materjalid (näiteks klaas) on läbipaistvad ainult teatud lainepikkusega soojuskiirgusele. Keha, mis neelab kogu talle pealelangeva soojuskiirguse, nimetatakse *mustkehaks*. Mustkeha ise kiirgab vastavalt Stefan-Boltzmanni seadusele [14]:

$$E_b = \sigma T^4, \tag{1.16}$$

kus E_b on mustkeha kiirgusvoo tihedus W/m^2;

σ – Stefan-Boltzmanni konstant W/(m^2·K^4), σ = 5,67·10^{-8};

T – kiirgava keha temperatuur K.

Kui üks mustkeha asub täielikult teise, tunduvalt suurema õõnsa mustkeha sees ning nende pinnatemperatuurid on vastavavalt T_1 ja T_2, siis summaarne kiirguslik soojusvoo tihedus q_{rad} nende kahe keha vahel on arvutatav valemiga [14]:

$$q_{rad} = \sigma(T_1^4 - T_2^4), \tag{1.17}$$

kus T_1 on esimese keha pinnatemperatuur K;

T_2 – teise keha pinnatemperatuur K.

Reaalsed objektid kiirgavad väiksema intensiivsusega kui mustkehad, seda suhet, mis näitab kui intensiivselt mingi keha kiirgab võrreldes mustkehaga, nimetatakse *emissioonitegu*r*iks*:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b}, \tag{1.18}$$

kus ε on emissioonitegur (ka kiirgustegur, mustusaste);

E – hallkeha kiirgusvoog W/m^2;

Keha, mis kiirgab väiksema intensiivsusega kui mustkeha, kuid mille emissioonitegur ei sõltu lainepikkusest (st kiirgab igal lainepikkusel võrdse intensiivsusega) nimetatakse *hallkehaks*.

Tuginedes valemitele (1.16) .. (1.18), omandab Stefan-Boltzmanni seadus kuju

$$Q_{rad} = A\sigma\varepsilon(T_1^4 - T_2^4), \tag{1.19}$$

kus Q_{rad} on kiirguslik soojusvoog W;

A – pindala m^2.

See valem kirjeldab olukorda, kus „väike hall keha on täielikult ümbritsetud suure halli pinna poolt“. „Väike hall keha“ käesolevas tähenduses on hoone, „suur hall pind“ on taevas ja maa. Kuna taeva ja maa pindala on palju kordi suuremad kui hoone seinad ja katus, siis taevas ja maapind käituvad sisuliselt hoone suhtes mustkehadena – see tähendab, et kiirgus, mis on hoonest peegeldunud, hajub väga suure tõenäosusega kusagil kaugemal ning arvestatavat osa sellest hoone pinnale enam tagasi ei tule. See tähendab, et sisuliselt võib käesoleva töö raames taevast ja maapinda käsitleda mustkehadena. [14]

1.3. Kiirgusliku soojuslevi eripära akende korral

Enamasti on hoone välispiirded *läbipaistmatud difuussed* kehad [2]. Läbipaistmatute difuussete kehade eripäraks on, et neile langevkiirgusvoog ei tungi kehasse, vaid kas neeldub või peegeldub. Siinkohal moodustavad aknad erandi – aknaklaas on teatud osale elektromagnetkiirgusest läbipaistev (eelkõige nähtavale valgusele). Kogemustest võime öelda, et Päikeselt tulev kiirgus läbistab aknaklaasi ning soojendab hoones olevaid objekte, kuid kas vastupidi, hoones olevate objektide soojus liigub arvestataval määral läbi klaasi ka väliskeskkonda? Vastuse annab Wieni nihkeseadus. Aknaklaas on läbipaistev elektromagnetkiirgusele lainepikkusega 0,1..4 μm, suurema lainepikkusega elektromagnetlained (ehk infrapunakiirgus) neelduvad klaasis [15]. Wieni nihkeseaduse järgi saab arvutada mingi temperatuuriga keha poolt kiiratava spektraalse maksimumi lainepikkuse [14]:

$$\lambda_{max} = \frac{b_{Wien}}{T}, \tag{1.20}$$

kus λ_{max} on kiirgusvoo spektraalse maksimumi lainepikkus μm;

b_{Wien} – Wieni konstant μm·K, b_{Wien} = 2898;

Kuna ruumis olevate objektide temperatuuri võime lugeda võrdseks siseõhu temperatuuriga (ca 21°C ehk 294 K), saame spektraalse maksimumi lainepikkuseks

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{294} = 9{,}86\ \mu\text{m}.$$

Kuna 9,86 µm on suurem kui 4 µm, võib öelda et aknad on toast tuleva soojuskiirguse jaoks läbipaistmatud ning hoones olev soojus kiirguslikul teel läbi akende olulisel määral väliskeskkonda ei liigu [15].

Wieni nihkeseaduse järgi saab arvutada ka Päikeselt tuleva elektromagnetkiirguse spektraalse maksimumi lainepikkuse. Eeldades, et Päikese pinna temperatuur on 5800 K, saame

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{5800} = 0{,}499\ \mu m.$$

Elektromagnetkiirgus lainepikkusega 0,5 µm, olles nähtava valguse spektris, suudab aknaklaasist läbi tungida ning seega Päikeselt tulev kiirgus soojendab ka toas olevaid objekte.

2. TAEVA TEMPERATUUR

2.1. Pilvise taeva temperatuur

Käesolevas töös on termini „pilvine taevas“ all mõeldud sellist olukorda, kus taeva temperatuur on konstantne sõltumata nurkkõrgusest. Taeva temperatuuri määramine ei ole triviaalne tegevus, selleks on erinevate autorite poolt esitatud mitmeid üksteisest võrdlemisi erinevaid arvutusviise. Vaatleme neist ühte, tuginedes allikale [16]. Selle järgi taeva temperatuur avaldub:

$$T_{taevas} = 94 + 12{,}6ln(p_d) - 13K_0 + 0{,}341T_{v\tilde{o}}, \quad (2.1)$$

kus T_{taevas} on taeva temperatuur K;

p_d – auru osarõhk Pa;

K_0 – taeva pilvituse kordaja (*sky clearness index*);

$T_{v\tilde{o}}$ – välisõhu temperatuur K.

Valemis (2.1) vajaminev auru osarõhk on arvutatav valemiga

$$p_d = \frac{ps}{0{,}622 + s}, \quad (2.2)$$

kus p on õhurõhk Pa;

s – õhu eriniiskus kg/kg.

Kuna antud peatükis vaatleme olukorda, kus taevas on täiesti pilves, valime taeva pilvituse kordaja K_0 väärtuseks nulli.

Käesolevas töös vaadeldavate näidete korral pilvise taeva temperatuuri arvutamisel eeldame, et välisõhu temperatuur $t_{v\tilde{o}}$ = –24 °C (ehk $T_{v\tilde{o}}$ = 249,15 K), õhurõhk p = 101325 Pa ja õhu eriniiskus s = 0,001 kg/kg. Sellisel juhul on auru osarõhk vastavalt valemile (2.2)

$$p_d = \frac{101325 \times 0{,}001}{0{,}622 + 0{,}001} = 162{,}64 \text{ Pa}$$

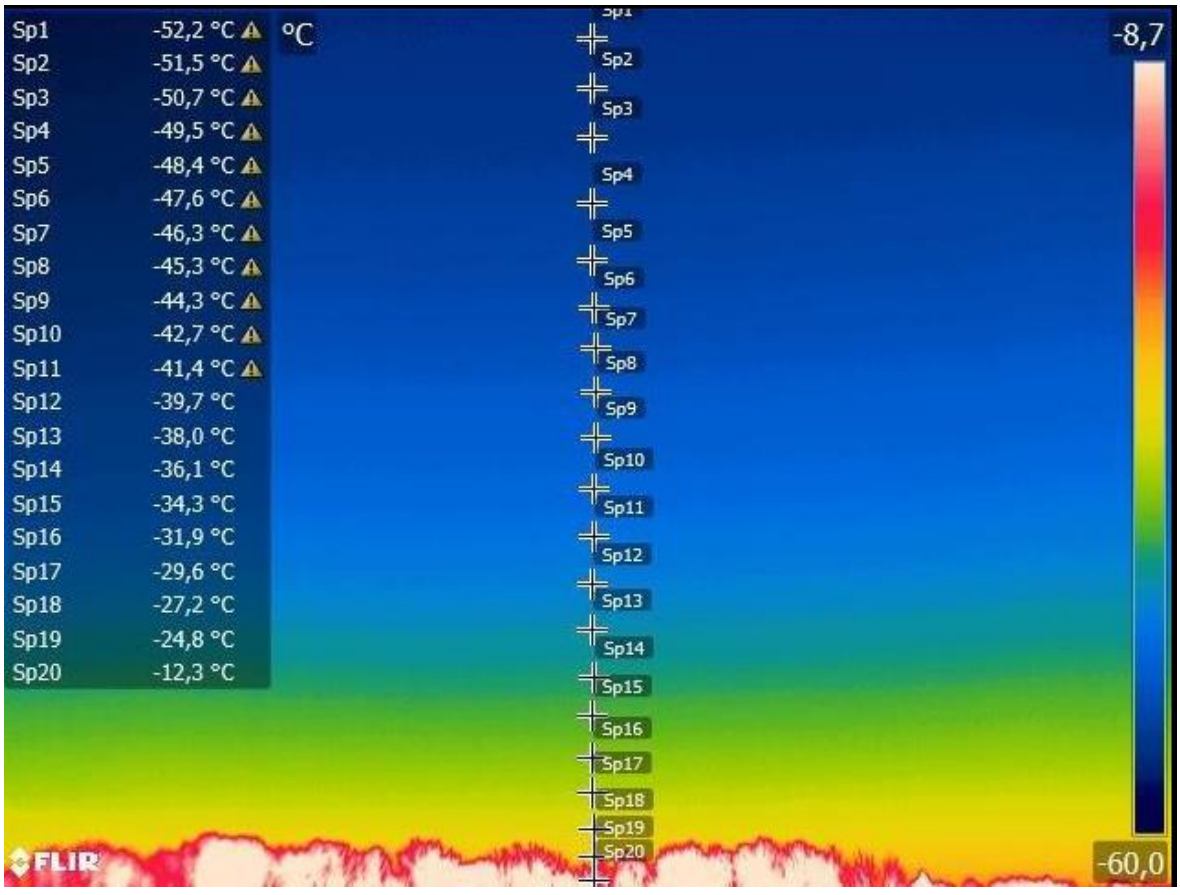
ning taeva temperatuur vastavalt valemile (2.1) on

$$T_{taevas} = 94 + 12{,}6 \times ln(162{,}64) - 13 \times 0 + 0{,}341 \times 249{,}15 = 243{,}11 \text{ K}.$$

Kuna 243,11 K = –30,04 °C, siis järgnevates peatükkides kirjeldatud arvutuskäikudes ja näidetes võtame pilvise taeva temperatuuriks ümardatult –30 °C.

2.2. Selge taeva temperatuur

Erinevalt pilvisest taevast sõltub käesoleva töö raames selge taeva korral taeva temperatuur nurkkõrgusest – mida kõrgemale seniidi poole liikuda, seda madalamaks muutub temperatuur. Joonisel 2.1 on esitatud talvisest taevast termokaameraga tehtud pilt, millelt on näha taeva temperatuur erinevatel nurkkõrgustel (kaamera objektiivi vaatenurk on 45° [17]).



Joonis 2.1. Selge taeva temperatuur sõltuvalt nurkkõrgusest. [18]

Esitatud andmete põhjal on võimalik konstrueerida funktsioon, mis kirjeldab selge taeva temperatuuri sõltuvust nurkkõrgusest ning võimaldab ka ekstrapoleerida taeva temperatuuri kuni 90°-ni:

$$t_{taevas}(x) = -13{,}33 \cdot ln(1{,}034 \cdot x)\,, \tag{2.3}$$

kus $t_{taevas}(x)$ on selge taeva temperatuur nurkkõrgusel x °C;

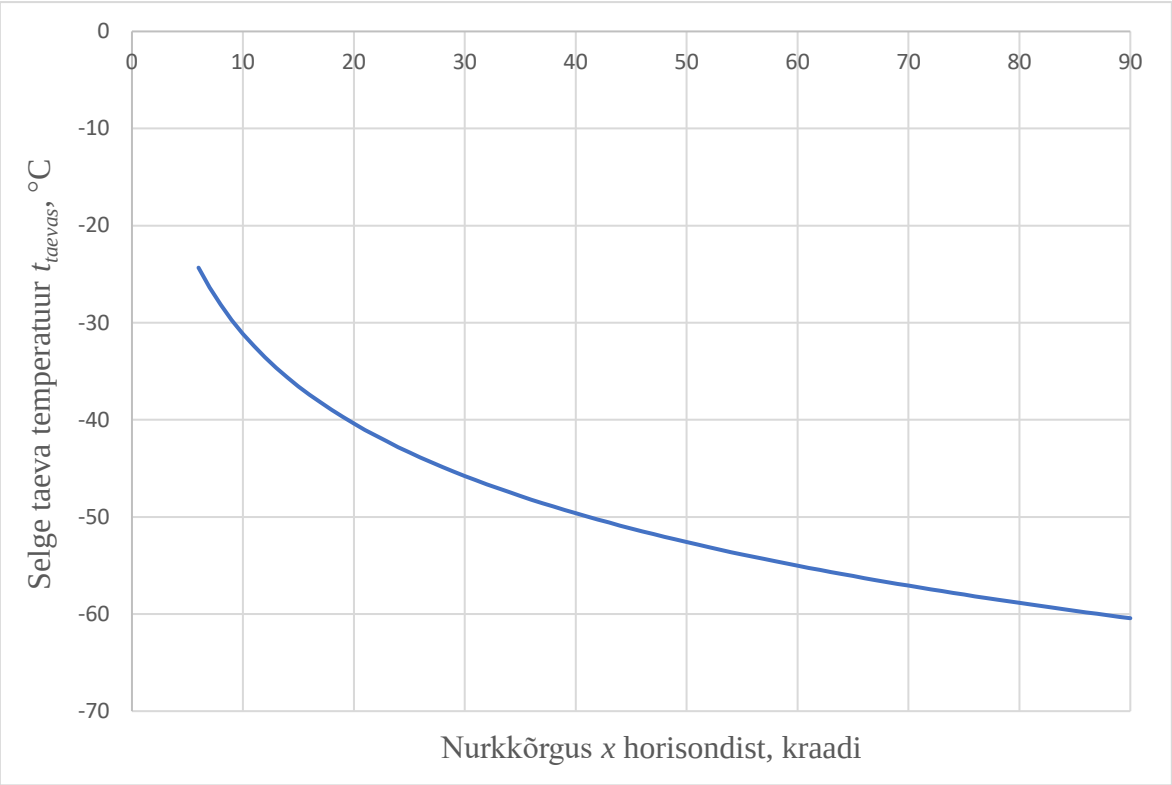
x – nurkkõrgus horisondist °.

Tähelepanu tuleb juhtida asjaolule, et valemi (2.3) järgi arvutades tuleb temperatuur madalatel nurkkõrgustel logaritmfunktsiooni eripära tõttu kõrgem kui välisõhu temperatuur – sellistel nurkkõrgustel tuleks arvutatud taeva temperatuuri väärtus asendada välisõhu temperatuuri väärtusega. Tabelis 2.1 on esitatud mõningad selge taeva temperatuuri väärtused arvutatuna funktsiooni (2.3) põhjal.

Tabel 2.1. Selge taeva temperatuur sõltuvalt nurkkõrgusest

Nurkkõrgus x, °	**t_{taevas}, °C**	**T_{taevas}, K**
1	–24,00	249,15
5	–24,00	249,15
10	–31,14	242,01
15	–36,54	236,61
20	–40,38	232,77
25	–43,35	229,80
30	–45,78	227,37
35	–47,84	225,31
40	–49,62	223,53
45	–51,19	221,96
50	–52,59	220,56
55	–53,86	219,29
60	–55,02	218,13
65	–56,09	217,06
70	–57,08	216,07
75	–58,00	215,15
80	–58,86	214,29
85	–59,67	213,48
90	–60,43	212,72

Joonisel 2.2 on esitatud graafilisel kujul selge taeva temperatuuri sõltuvus nurkkõrgusest *x*.



Joonis 2.2. Selge taeva temperatuuri sõltuvus nurkkõrgusest *x*.

Tuleb rõhutada, et funktsioon (2.3) kirjeldab ainult ühte võimalikku varianti taeva temperatuurist ning käesolevas töös täidab pigem illustreerivat rolli. Põhiline eesmärk mainitud sõltuvusel on näidata, et taeva temperatuuri ei ole vaja ilmtingimata konstantseks lihtsustada, vaid ka liitfunktsioonide korral on võimalik kiirguslikke soojusvoogusid välja arvutada, luues niiviisi aluse spetsiifilistes rakendustes täpsemate tulemuste saamiseks.

3. KIIRGUSLIKU SOOJUSKAO ARVUTAMINE

3.1. Lihtsustused

Kiirguslikul teel piirde välispinnalt lahkuva soojusvoo arvutamise hõlbustamiseks tuleb teha mitmeid lihtsustusi ja eeldusi, neist põhilised on järgmised:

- Kõik välispiirded on tasapinnalised – see tähendab et ükski seina ega katuse element ei ole ei kumer ega nõgus. Tasapinnalt „nähtav“ ruuminurk moodustab poolsfääri ehk 2π steradiaani (sr) [19].

- Hoone ükski välispinna osa ei „näe“ ühtki teist välispinda – näiteks hoone pole pealtvaates L-kujuline, katustel puuduvad räästad, aknad asuvad välisseinaga samal tasapinnal jne. Iga välispinna osa „näeb“ ainult taevast ja maapinda (horisontaalse pinna puhul ainult taevast). Selle lihtsustuse eesmärgiks on elimineerida kiirgusliku soojuskao valemites vaatetegurite kasutamise vajadus.

- Hoone välispinnad käituvad kui hallkehad – ehk välispinna kiirguslik soojuskadu on võrdne kõigil lainepikkustel.

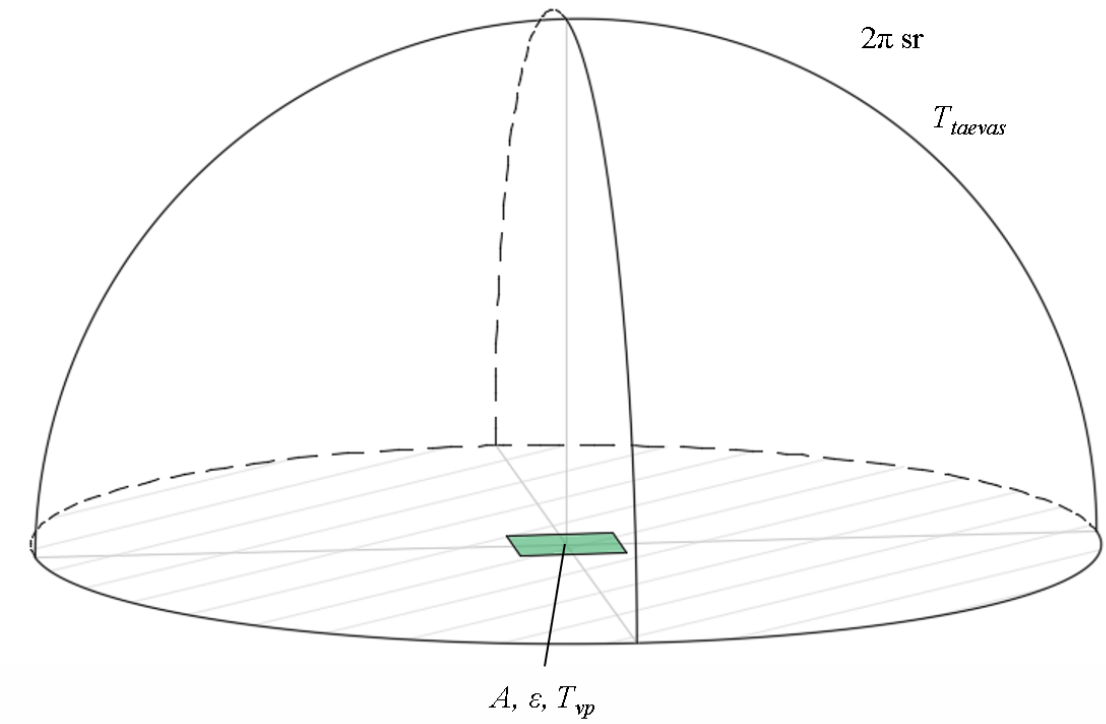
- Taevas ja maapind käituvad kui mustkehad.

- Hoone seinad on vertikaalsed, katus võib olla horisontaalne või mingi nurga all.

3.2. Pilves taevas, horisontaalne katus

Järgnevalt vaatleme lähemalt valemeid mille abil on võimalik välja arvutada kiirguslik soojuskadu hoone piirde välispinnalt. Kõige lihtsam olukord on siis, kui tegemist on pilves taeva ja horisontaalselt asetseva katusega. Pilves taeva korral on taeva temperatuur

konstantne sõltumata nurkkõrgusest, ning horisontaalne pind „näeb“ ainult taevast (joonis 3.1).



Joonis 3.1. Horisontaalselt pinnalt „nähtav“ ruuminurk.

Sellisel juhul on piirde välispinna ja taeva vahel kiirguslikult leviv soojusvoog Q_{rad} väga lihtsasti leitav Stefan–Boltzmanni seaduse järgi, tuginedes valemile (1.19):

$$Q_{rad} = A\sigma\varepsilon\left(T_{vp}^4 - T_{taevas}^4\right), \tag{3.1}$$

kus A – piirde pindala m^2;

σ – Stefan-Boltzmanni konstant W/(m^2·K^4), σ = 5,67·10^{-8};

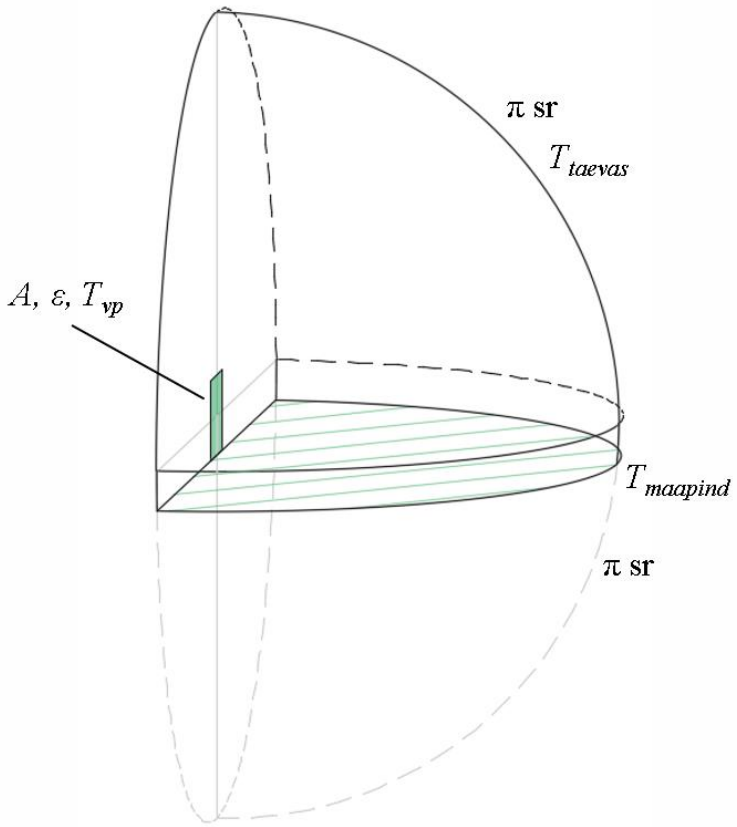
ε – emissioonitegur;

T_{taevas} – taeva temperatuur K;

T_{vp} – piirde välispinna temperatuur K.

3.3. Pilves taevas, vertikaalne sein

Vertikaalse pinna korral jaguneb „nähtav“ ruuminurk võrdselt maapinna ja taeva vahel, kumbki neist moodustab ühe veerandsfääri (joonis 3.2). Veerandsfääri ruuminurk on π sr, ning sellise ruuminurga osakaal poolsfääri ruuminurgast on 1/2.



Joonis 3.2. Vertikaalse pinna korral „nähtav“ ruuminurk.

Kiirguslikult leviv soojusvoog koosneb seega antud juhul kahest komponendist, mis tuleb omavahel kokku liita:

$$Q_{rad} = Q_{vp_taevas} + Q_{vp_maapind}, \tag{3.2}$$

kus Q_{vp_taevas} on piirde välispinna ja taeva vaheline kiirguslik soojusvoog W;

$Q_{vp_maapind}$ – piirde välispinna ja maapinna vaheline kiirguslik soojusvoog W.

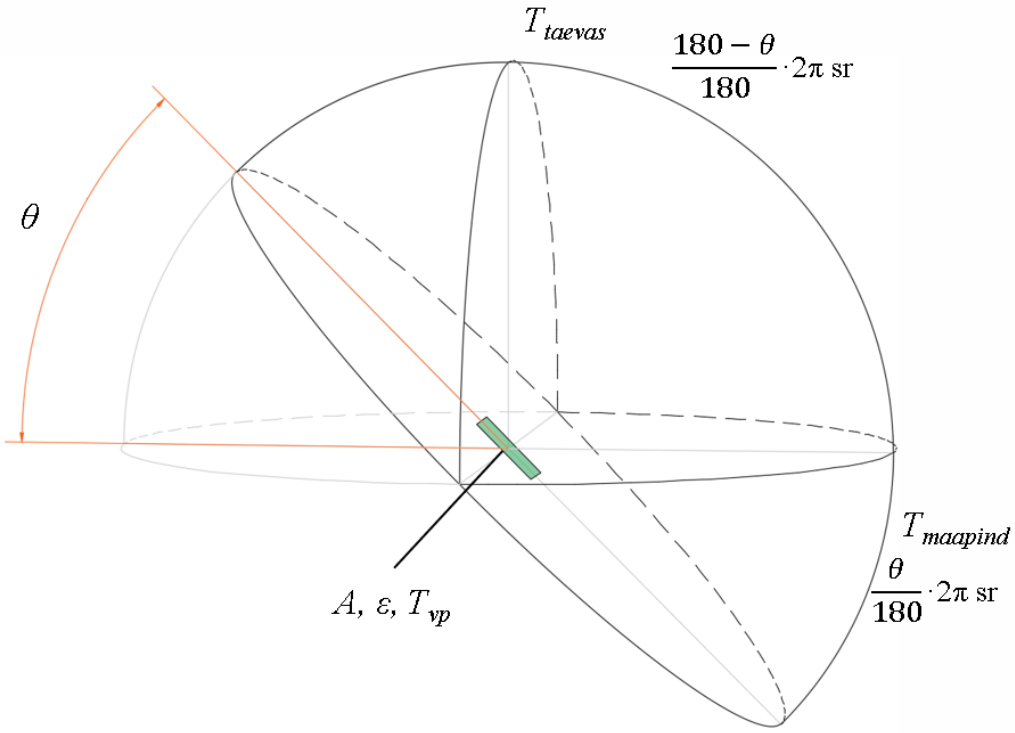
Piirde välispinna ja taeva ning piirde välispinna ja maa vaheline kiirguslik soojusvoog arvutatakse järgmiste valemitega. Kordaja 1/2 mõlemas valemis näitab, et poole kogu „nähtavast“ ruuminurgast moodustab parajasti sõltuvalt valemist kas taevas või maapind.

$$Q_{vp_taevas} = A\sigma\varepsilon\left(T_{vp}^4 - T_{taevas}^4\right)\cdot\frac{1}{2}. \tag{3.3}$$

$$Q_{vp_maa} = A\sigma\varepsilon\left(T_{vp}^4 - T_{maapind}^4\right)\cdot\frac{1}{2}. \tag{3.4}$$

3.4. Pilves taevas, nurga all olev katus

Antud juhul on tegemist hoone katusega, mis asub horisondi suhtes mingi nurga θ all (joonis 3.3). See nurk võib omada väärtusi vahemikus 0..90°; kui θ = 0°, siis on sisuliselt tegemist peatükis 3.2 kirjeldatud horisontaalse katuse olukorraga ning kui θ = 90°, siis on tegemist peatükis 3.3 kirjeldatud vertikaalse seina olukorraga.



Joonis 3.3. Nurga θ all olevalt pinnalt „nähtavad“ ruuminurga osad.

Kiirguslikult leviv soojusvoog koosneb praeguselgi juhul kahest komponendist, analoogiliselt peatükis 3.3 esitatud valemile (3.2):

$$Q_{rad} = Q_{vp_taevas} + Q_{vp_maapind}.$$

Nurk θ määrab ära, kui suure osa „nähtavast“ ruuminurgast moodustab taevas ja kui suure osa maapind. Taeva osakaal moodustab (180–θ)/180 osa poolsfäärist:

$$Q_{vp_taevas} = A\sigma\varepsilon\left(T_{vp}^4 - T_{taevas}^4\right)\frac{180-\theta}{180}, \tag{3.5}$$

kus θ on katuse nurk horisondist °.

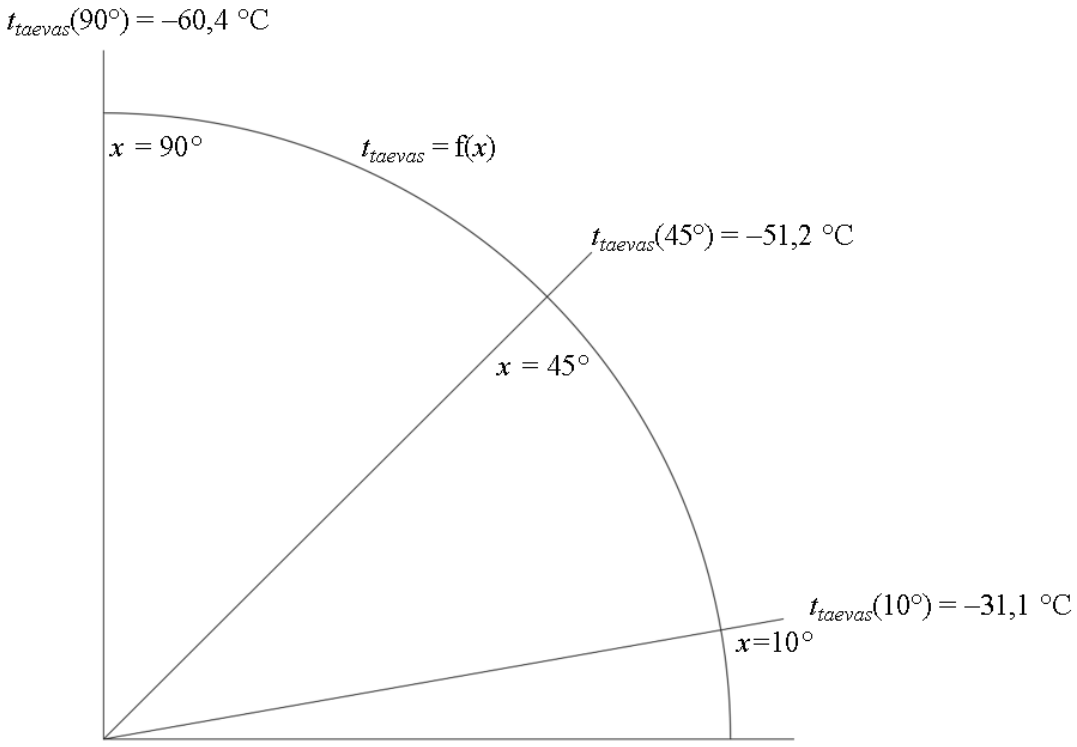
Maapinna ruuminurga osakaal moodustab kogu “nähtavast“ ruuminurgast ehk poolsfäärist θ/180 ning vastav kiirguslik soojusvoog avaldub järgmiselt:

$$Q_{vp_maapind} = A\sigma\varepsilon\left(T_{vp}^4 - T_{maapind}^4\right)\frac{\theta}{180}. \tag{3.6}$$

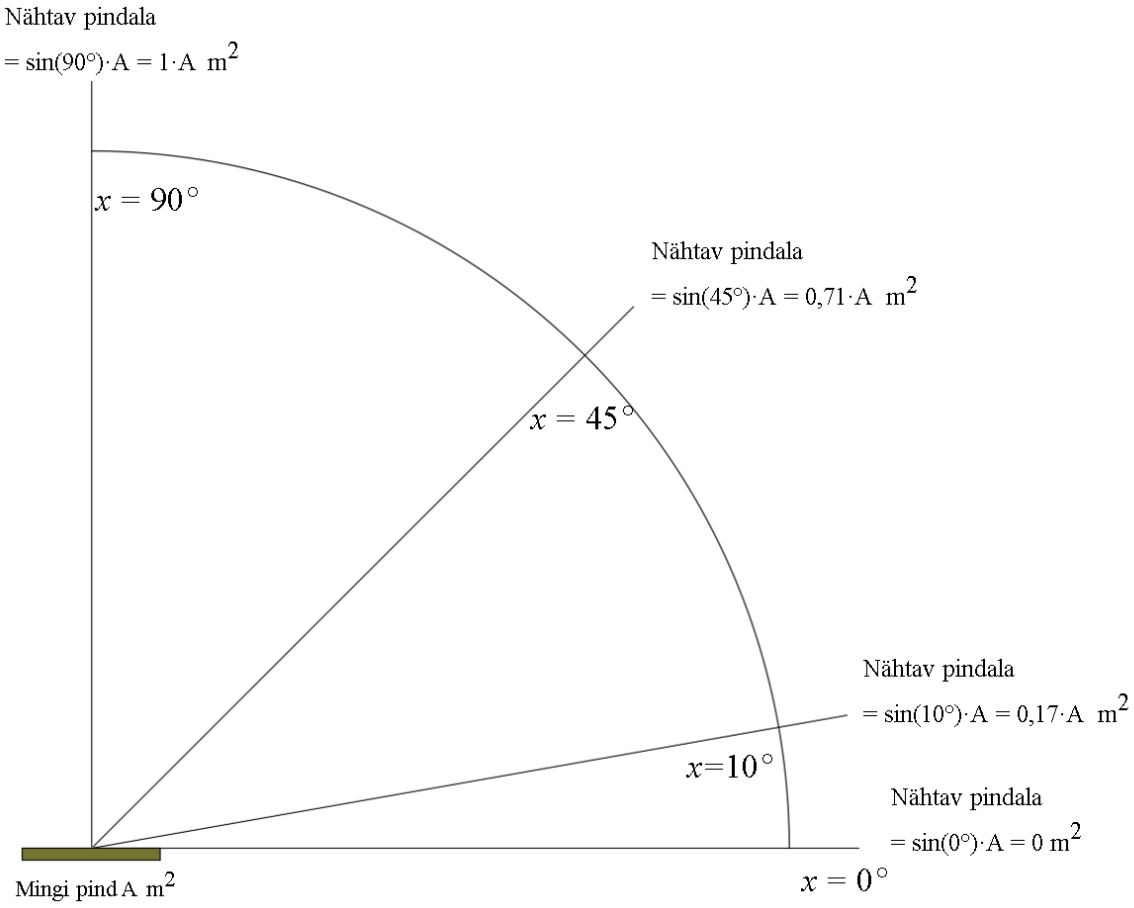
3.5. Selge taevas, horisontaalne katus

Väljend „selge taevas“ tähendab käesolevas töös seda, et taeva temperatuur muutub logaritmfunktsiooni järgi sõltuvalt nurkkõrgusest x vastavalt valemile (2.3); olukorda illustreerib joonis 3.4, kus on esitatud taeva temperatuur mõningatel nurkkõrgustel.

Samaaegselt sõltub nurkkõrgusest ka piirde näha olev pindala – kui piiret vaadata näiteks horisondilt (x = 0°), siis nähtav pindala võrdub nulliga, sest sin(0°) = 0; kui aga piiret vaadata seniidist (otse ülevalt, x = 90°), siis on näha kogu pindala (sest sin(90°) = 1). Kirjeldatud olukorda illustreerib joonis 3.5.

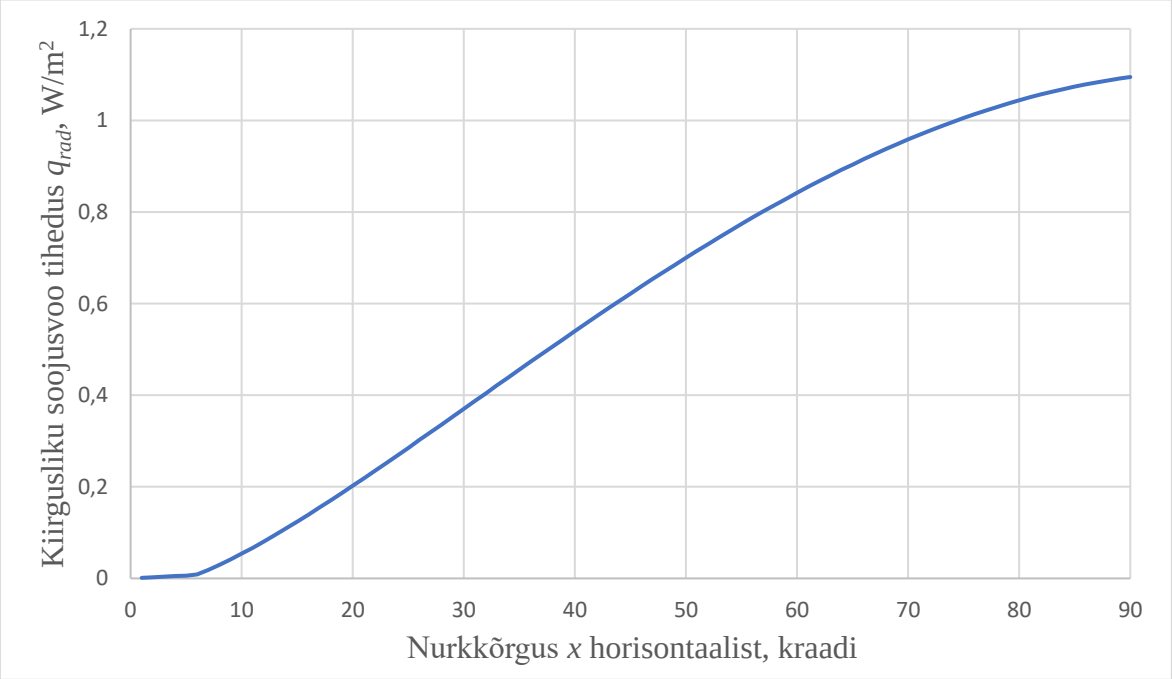


Joonis 3.4. Selge taeva temperatuur sõltuvalt nurkkõrgusest *x*.



Joonis 3.5. Välispiirde nähtav pindala sõltuvalt nurkkõrgusest *x*.

Piirde välispinnalt suvalisse taeva punkti kiirguslikult leviv soojusvoog sõltub seega samaaegselt nii logaritm– kui ka siinusfunktsioonist. Mida väiksem on nurkkõrgus, seda väiksem on ka piirde „nähtav“ pindala ning ühtlasi seda väiksem on ka temperatuuride vahe konkreetse taeva punkti ja piirde välispinna vahel. Sellisele nurkkõrgusele vastab vastavalt Stefan-Boltzmanni seadusele teatud kiirgusliku soojusvoo tihedus q_{rad}. Mida suuremaks muutub nurkkõrgus, seda suurem osa piirde pindalast muutub „nähtavaks“ ning ühtlasi suureneb ka temperatuuride erinevus taeva ja välispiirde vahel. Seetõttu suureneb vastavalt Stefan-Boltzmanni seadusele ka kiirgusliku soojusvoo tihedus. Kiirgusliku soojusvoo tiheduse sõltuvus nurkkõrgusest on esitatud joonisel 3.6.



Joonis 3.6. Kiirgusliku soojusvoo tiheduse q_{rad} sõltuvus nurkkõrgusest horisontaalse pinna ja selge taeva korral.

Saamaks teada kogu kiirgusliku soojusvoo tihedust piirde välispinnalt kogu „nähtavasse“ ruuminurka, tuleb leida joonisel 3.6 esitatud graafiku alune pindala ehk vastav liitfunktsioon integreerida. Sellest lähtudes saab esitada selge taeva korral horisontaalselt pinnalt lahkuva kiirgusliku soojusvoo valemi üldkujul:

$$Q_{rad} = \int_{x=0}^{90} A\sigma\varepsilon\left[T_{vp}^4 - T_{taevas}^4(x)\right] sin(x) \frac{1}{90}\, dx, \tag{3.7}$$

kus x – nurkkõrgus horisondist °;

$T_{taevas}(x)$ –selge taeva temperatuur sõltuvalt nurkkõrgusest x K.

Nurkkõrguse vahemik horisondist seniidini on jagatud kokku 90-ks osaks ehk kraadiks, seega tuleb valemis (3.7) kasutada kordajat 1/90, tagamaks olukorda et igale nurkkõrguse kraadile vastav taeva temperatuur ja välispiirde pindala võtavad kiirgusliku soojuslevi mõttes osa ainult proportsionaalsest osast kogu „nähtavast" poolsfäärist.

Kuna seoses (3.7) esineb liitfunktsioonina naturaallogaritmi ja siinuse korrutis, siis see paraku tähendab, et ilmselt pole ühtegi head lahendust seose (3.7) mõistlikuks integreerimiseks rajades 0-st 90-ni. Seega, selleks et kiirguslikku soojusvoogu näiteks *Excel*'is või ka spetsiaalselt sellel otstarbel loodud tarkvaras mugavamalt arvutada, saab seose (3.7) esitada lihtsustatud kujul, kaotamata oluliselt arvutustulemuste täpsuses:

$$Q_{rad} = \sum_{x=1}^{90} A\sigma\varepsilon\left[T_{vp}^4 - T_{taevas}^4(x)\right] sin(x) \frac{1}{90}. \tag{3.8}$$

Tähelepanu tuleb juhtida asjaolule, et seoses (3.8) algab nurkkõrgust ühest kraadist, mitte nullist nagu seoses (3.7) – põhjuseks asjaolu et naturaallogaritm nullist on matemaatiliselt defineerimata. Lõpptulemust selline lihtsustus olulisel määral siiski ei mõjuta.

3.6. Selge taevas, vertikaalne sein

Analoogiliselt peatükis 3.3 kirjeldatule jaguneb ka käesoleval juhul selge taeva ja vertikaalse seina korral „nähtav" ruuminurk ehk poolsfäär võrdselt taeva ja maapinna vahel, ning kiirguslik soojusvoog koosneb analoogiliselt seosele (3.2) kahest komponendist:

$$Q_{rad} = Q_{vp_taevas} + Q_{vp_maapind}.$$

Seina ja maapinna vaheline kiirguslik soojusvoog on arvutatav analoogiliselt seosega (3.3):

$$Q_{vp_maapind} = A\sigma\varepsilon\left(T_{vp}^4 - T_{maapind}^4\right)\frac{1}{2}.$$

Seina ja taeva vaheline kiirguslik soojusvoog on arvutatav analoogiliselt seosega (3.7), erinevuseks on siinuse asendamine koosinusega, kuna nüüd on tegemist horisontaalse pinna asemel vertikaalse pinnaga; ühtlasi lisandub ka kordaja 1/2, kuna „nähtav" taevas moodustab poole kogu poolsfäärist:

$$Q_{vp_taevas} = \int_{x=0}^{90} A\sigma\varepsilon\left[T_{vp}^4 - T_{taevas}^4(x)\right] cos(x)\frac{1}{90}\cdot\frac{1}{2}dx. \tag{3.9}$$

Arvutuste hõlbustamiseks saab ka seose (3.9) esitada lihtsustatud kujul:

$$Q_{vp_taevas} = \sum_{x=1}^{90} A\sigma\varepsilon\left[T_{vp}^4 - T_{taevas}^4(x)\right] cos(x)\frac{1}{90}\cdot\frac{1}{2}. \tag{3.10}$$

3.7. Selge taevas, nurga all olev katus

Analoogiliselt eelpool kirjeldatud seosele (3.2) koosneb selge taeva ja nurga all oleva katuse puhul kiirguslik soojusvoog kahest komponendist:

$$Q_{rad} = Q_{vp_taevas} + Q_{vp_maapind}.$$

Katuse ja maapinna vaheline kiirguslik soojusvoog on arvutatav analoogiliselt seosega (3.6):

$$Q_{vp_maapind} = A\sigma\varepsilon\left(T_{vp}^4 - T_{maapind}^4\right)\frac{\theta}{180}.$$

Katuse ja taeva vaheline kiirguslik soojusvoog– tuginedes analoogiale seostega (3.5) ja (3.7) – on arvutatav järgnevalt:

$$Q_{vp_taevas} = \int_{x=0}^{90} A\sigma\varepsilon\left[T_{vp}^4 - T_{taevas}^4(x)\right] sin(x+\theta)\frac{180-\theta}{180}\cdot\frac{1}{90}\,dx. \quad (3.11)$$

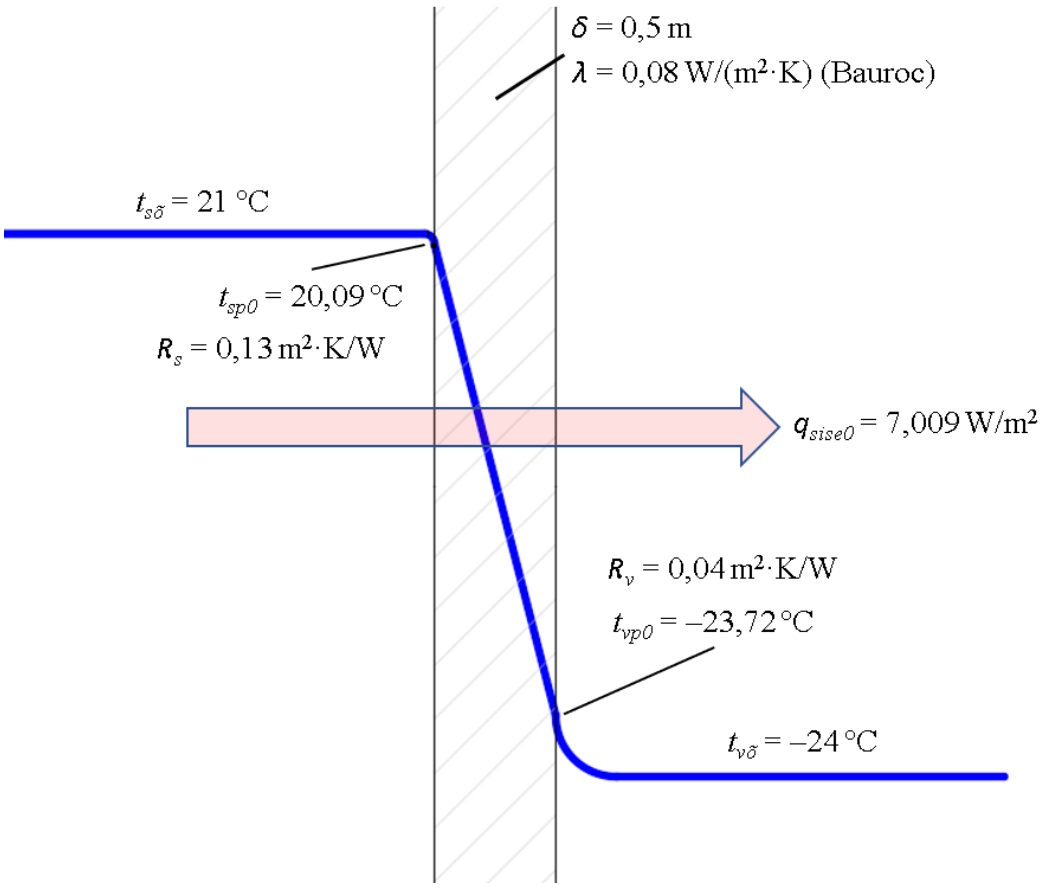
Arvutuste hõlbustamiseks kasutame integraali asemel summeerimist:

$$Q_{vp_taevas} = \sum_{x=1}^{90} A\sigma\varepsilon\left[T_{vp}^4 - T_{taevas}^4(x)\right] sin(x+\theta)\frac{180-\theta}{180}\cdot\frac{1}{90}. \quad (3.12)$$

4. PIIRDE VÄLISPINNA TEMPERATUUR TASAKAALUOLUKORRAS

4.1. Tasakaaluolukorra kirjeldus

Traditsiooniliselt – vastavalt standarditele ja käsiraamatutele – võetakse hoone välispiirde soojuskao määramisel arvesse ainult juhtivuslikku ja konvektiivset soojusülekannet [1]. Sellisel juhul liigub tasakaaluolukorra tingimustes läbi välispiirde kõikide kihtide sisuliselt konstantse suurusega soojusvoog, mis vastavalt piirde osa iseloomule on parajasti kas juhtivuslik või konvektiivne. Teades seda soojusvoogu ning piirde soojustakistusi, saab esitada nn temperatuurikõvera, mis kujutab temperatuuri muutust välispiirdes (joonis 4.1.) [5].

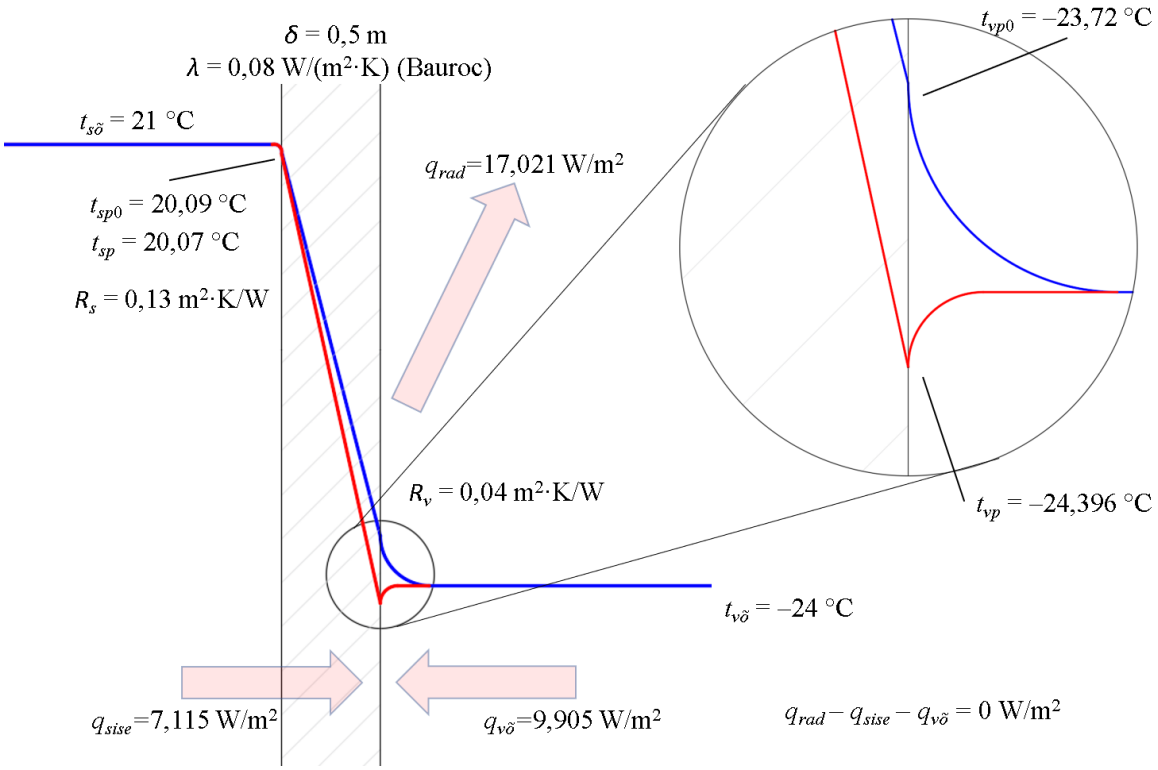


Joonis 4.1. Temperatuuri muutus ühekihilises välispiirdes.

Paneme tähele, et välispinna temperatuur on sellisel juhul välisõhust mõnevõrra kõrgem, ning üldiselt sõltub välispinna temperatuur piirde soojustakistusest ning välisõhu piirikihi soojusülekandetegurist.

Kui lisaks juhtivuslikule ja konvektiivsele soojuslevile võtta arvesse ka kiirguslik soojuslevi, siis muutub olukord keerukamaks. Kiirgusliku soojuskao suurus sõltub otseselt välispinna temperatuurist t_{vp} – mida kõrgem on välispinna temperatuur, seda suurem on ka kiirguslik soojuskadu. Samas sellise soojuskao tulemusena hakkab piirde välispinna temperatuur vähenema. Kui välispinna temperatuur on võrdsustunud välisõhu temperatuuriga, võrdsustub konvektiivne soojuskadu nulliga. Kuna aga taeva temperatuur on üldiselt madalam kui välisõhu temperatuur, jätkub endiselt kiirguslik soojuskadu ning piirde välispinna temperatuur langeb allapoole välisõhu temperatuuri, ning sellisel juhul hakkab välisõhust soojust piirde pinnale konvektiivselt hoopis juurde tulema. Mingil hetkel saabub tasakaal, kus kiirguslikult lahkuv soojusvoog Q_{rad} on kompenseeritud hoonest tuleva juhtivusliku soojusvoo Q_{sise} ja välisõhust tuleva konvektiivse soojusvoo $Q_{võ}$ poolt (joonis 4.2). On selge, et kui piirde välispinna temperatuur langeb, siis suureneb ka hoonest tulev juhtivuslik soojusvoog Q_{sise}. Käesolevas töös ongi kesksel kohal küsimus, et kuidas kiirgusliku soojuskaoga arvestamine mõjutab hoone seest tulevat arvutuslikku soojusvoogu (sisuliselt hoone küttevõimsust)?

Kahe olukorra võrdlus on kujutatud joonisel 4.2. Sinise joonega on näidatud temperatuuri muutus arvestades ainult juhtivuslikku ja konvektiivset soojuslevi, nii nagu see on standardis ette nähtud. Välispinna temperatuur on sel juhul kõrgem kui välisõhu temperatuur. Punase joonega on näidatud temperatuuri muutus sellisel juhul, kus lisaks juhtivuslikule ja konvektiivsele soojuslevile on arvestatud ka kiirguslikku soojuskadu. Sellisel juhul piirde välispinna temperatuur langeb välisõhu temperatuurist madalamale, kuni saabub tasakaaluolukord mil kiirgusliku soojusvoo kompenseerivad hoonest läbi piirde tulev juhtivuslik ja välisõhust piirde pinnale tulev konvektiivne soojusvoog. Järgnevalt vaatame, kuidas seda välispinna temperatuuri t_{vp} tasakaaluolukorras leida saaks.



Joonis 4.2. Temperatuuri muutus ühekihilises piirdes ja soojusvoogude suunad tasakaaluolukorras. Sinine joon näitab temperatuuri muutust kiirguskadu arvestamata, punane joon näitab temperatuuri muutust arvestades ka kiirguslikku soojuskadu.

Piiret mõjutavate soojusvoogude tasakaaluolukorda saab kirjeldada järgmise seosega [20]:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT}{d\tau} = Q_{rad} - Q_{sise} - Q_{võ}, \tag{4.1}$$

kus m on piirde mass kg;

c – piirde erisoojus J/(kg·K);

dT – piirde temperatuuri muutus ajaühiku jooksul K;

$d\tau$ – ajaühik s;

Q_{rad} – piirde välispinnalt kiirguslikult lahkuv soojusvoog W;

Q_{sise} – hoone seest läbi piirde juhtivuslikult välispinnani saabuv soojusvoog W;

$Q_{võ}$ – välisõhust konvektiivselt piirde välispinnale saabuv soojusvoog W.

Üritades olukorda veelgi lihtsustada ning keskendudes üksnes piirde välispinnale, paneme tähele, et kuigi piirde välispinnal on pindala, pole tal paksust, ning seega pole ka massi ega soojusmahtuvust. See tähendab, et valemis (4.1) vasak pool võrdsustub nulliga – ehk

vaadeldes ainult piirde pinda, on selge, et soojusvoogude süsteem peab igal ajahetkel olema tasakaalus, soojusvoogude algebraline summa peab alati võrduma nulliga (soojust ei saa tühjast kohast võtta ning samuti ei saa ka soojust tühja kohta panna). Selle lihtsustuse tulemusena omandab seos (4.1) kuju

$$Q_{rad} - Q_{sise} - Q_{võ} = 0. \tag{4.2}$$

Väljend „soojusvoogude algebraline summa“ käesolevas töös tähendab seda, et positiivse märgiga soojusvoog on vaadeldavast süsteemist lahkuv soojuskadu ning negatiivse märgiga on süsteemi saabuv soojusvoog, just nii nagu valem (4.2) näitab. Lisaks, võttes arvesse, et kõigis kolmes soojusvoos on esindatud pindala *A*, võime selle võrrandis ära taandada ning edaspidi opereerida soojusvoo asemel mõistega *soojusvoo tihedus*, mille ühikuks on W/m^2 [8]. Sisuliselt tähendavad mõlemad terminid – soojusvoog ja soojusvoo tihedus – antud töös sama asja, kuna arvutustes kasutatakse läbivalt ühikpindala (1 m^2). Sellest lähtudes omandab võrrand (4.2) kuju

$$q_{rad} - q_{sise} - q_{võ} = 0, \tag{4.3}$$

kus q_{rad} on kiirgusliku soojusvoo tihedus W/m^2;

q_{sise} – läbi hoone piirde juhtivuslikult liikuva soojusvoo tihedus W/m^2;

$q_{võ}$ – konvektiivselt välisõhust piirde välispinnale liikuva soojusvoo tihedus W/m^2;

Tasakaaluolukorras välispiirde pinnatemperatuuri arvutamist alustame kõige lihtsamast olukorrast – horisontaalne pind pilvise ilma korral. Kiirgusliku soojusvoo tihedus avaldub sellisel juhul seose (3.1) põhjal

$$q_{rad} = \sigma\varepsilon\left(T_{vp}^4 - T_{taevas}^4\right), \tag{4.4}$$

kus σ on Stefan-Boltzmanni konstant W/(m^2·K^4), σ = 5,67·10^{-8};

ε – emissioonitegur;

T_{vp} – piirde välispinna temperatuur K;

T_{taevas} – taeva temperatuur K.

Juhtivuslik soojuskadu hoone seest piirde välispinnale seose (1.12) põhjal on

$$q_{sise} = U_{piire}\left(T_{sõ} - T_{vp}\right), \tag{4.5}$$

kus U_{piire} on piirde soojusjuhtivus siseõhust välispinnani W/(m^2·K);

$T_{sõ}$ – siseõhu temperatuur K.

Konvektiivne soojusvoo tihedus piirde välispinna ja välisõhu vahel seose (1.4) põhjal on

$$q_{võ} = U_{võ}\left(T_{võ} - T_{vp}\right), \tag{4.6}$$

kus $T_{võ}$ on välisõhu temperatuur K;

$U_{võ}$ – välispinna piirikihi soojusjuhtivus W/(m^2·K).

Asendame seosed (4.4), (4.5) ja (4.6) võrrandisse (4.3):

$$\sigma\varepsilon\left(T_{vp}^4 - T_{taevas}^4\right) - U_{piire}\left(T_{sõ} - T_{vp}\right) - U_{võ}\left(T_{võ} - T_{vp}\right) = 0. \tag{4.7}$$

Avades sulud saame:

$$\sigma\varepsilon T_{vp}^4 - \sigma\varepsilon T_{taevas}^4 - U_{piire}T_{sõ} + U_{piire}T_{vp} - U_{võ}T_{võ} + U_{võ}T_{vp} = 0 \tag{4.8}$$

Muudame liikmete järjekorda:

$$\sigma\varepsilon T_{vp}^4 + U_{piire}T_{vp} + U_{võ}T_{vp} - \sigma\varepsilon T_{taevas}^4 - U_{piire}T_{sõ} - U_{võ}T_{võ} = 0 \tag{4.9}$$

Viies liikme T_{vp} sulgude taha, saame:

$$\sigma\varepsilon T_{vp}^4 + \left(U_{piire} + U_{võ}\right)T_{vp} - \sigma\varepsilon T_{taevas}^4 - U_{piire}T_{sõ} - U_{võ}T_{võ} = 0 \tag{4.10}$$

Näeme, et tegemist on neljanda astme võrrandiga, kus otsitavaks tundmatuks on T_{vp}.

4.2. Neljanda astme võrrandi lahendamine

Käesolevas peatükis kirjeldame lähemalt neljanda astme võrrandi lahendamist ning seetõttu kasutame parema jälgitavuse huvides tähistusi, mis on matemaatikas üldlevinud – neil tähistustel ei ole mingit seost soojuslevi ega muude käesolevas töös kirjeldatud suuruste ega nähtustega, ning need kehtivad ainult selles peatükis. See märkus on vajalik, kuna järgmisena vaadeldavat funktsiooni on suhteliselt keeruline jälgida ning ebastandardsete, matemaatikas üldiselt mittelevinud tähistuste kasutamine võib suurendada tähelepanematusest tingitud vigade tekkimise tõenäosust. Neljanda astme võrrand üldkujul on [21]:

$$ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = 0, \tag{4.11}$$

kus x on võrrandi tundmatu;

a, b, c, d – otsitava tundmatu kordajad;

e – vabaliige.

Esitamaks eelmises alapeatükis tutvustatud võrrandit (4.10) üldkujul, teeme järgmised asendused:

$$x = T_{vp}.$$

$$a = \sigma\varepsilon. \tag{4.12}$$

$$b = 0.$$

$$c = 0.$$

$$d = U_{piire} + U_{võ}. \tag{4.13}$$

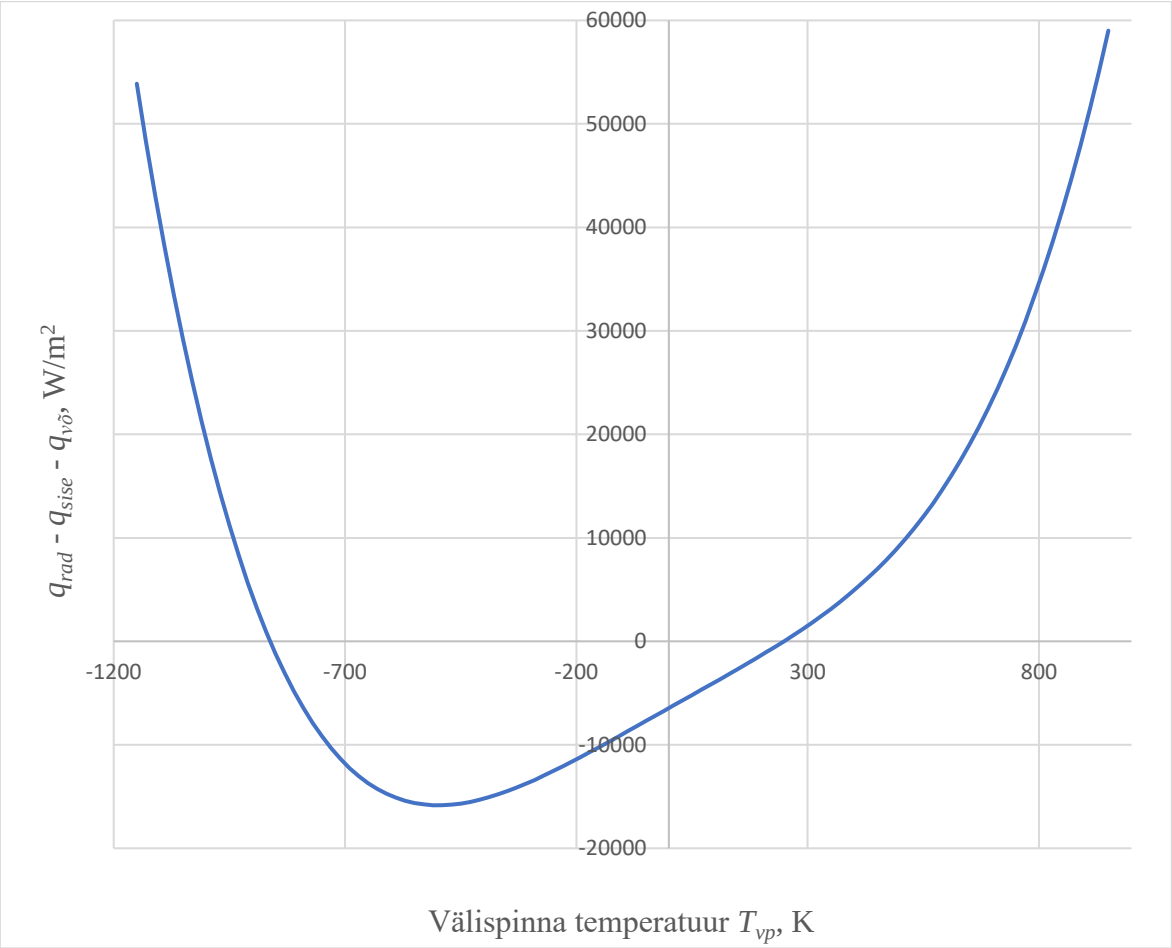
$$e = -\left(\sigma\varepsilon T_{taevas}^4 + U_{piire}T_{sõ} + U_{võ}T_{võ}\right). \tag{4.14}$$

Kuna kordajad c ja b võrduvad nulliga ehk võrrandis teise ja kolmanda astme tundmatud puuduvad, lihtsustub võrrand (4.11) olulisel määral:

$$ax^4 + dx + e = 0. \tag{4.15}$$

Sellisel neljanda astme võrrandil on neli lahendit, etteruttavalt võib öelda, et kaks lahendit on komplekskujul ning ülejäänud kaks lahendit reaalkujul, millest omakorda üks sobibki otsitavaks välispiirde pinnatemperatuuriks. Funktsiooni graafik on esitatud joonisel 4.3,

graafikult on näha et käesolevas töös kasutatavate lähteandmete põhjal tekkiva kujuga võrrandil on tõepoolest kaks reaalarvulist lahendit, ning ainult üks mõttekas lahend (teise lahendi järgi oleks tasakaaluolukorras välispinna temperatuur ca –850 K, kuid see pole reaalses maailmas kuidagi võimalik).



Joonis 4.3. Neljanda astme võrrandi (4.10) graafik. Tasakaaluolukord kehtib sel juhul, kui soojusvoogude algebraline summa võrdub nulliga.

Võrrandi lahendamiseks kasutame lahenduse üldmeetodit, mis on ammendavalt kirjeldatud allikas [22]. Kuna lahenduskäigu põhjalikuks selgituseks vajalikul tasemel matemaatika valdamine jääb käesoleva töö ulatusest kaugele väljapoole, on siinkohal piirdutud ainult lahenduskäigu vaheetappide äramärkimisega; need vaheetapid on vajalikud lahenduskäigu jälgitavuse huvides, vastasel korral oleks üldkujul lõpplahendit oma pikkuse ja keerukuse tõttu väga raske kasutada. Lahenduskäigu vaheetappide tähistus on võetud muutmata kujul allikast [22], ning nendele tähistele ei ole vaja omistada mingit seost käesoleva töö ülejäänud osades kirjeldatud soojuslevisse puutuvate tähistustega. Samuti on ühikud vaheetappide

arvutustulemustes enamasti ära jäetud, kuna oma olemuselt muutuksid need ühikud ülearu keerulisteks ning mõjuksid kirjeldatava protsessi hoomamisele pigem negatiivselt. Järgnevad vaheetapid on juba lihtsustatud, arvestades et kordajad *b* ja *c* võrduvad antud töös alati nulliga. Kujul (4.15) oleva neljanda astme võrrandi lahendamise vaheetapid on järgmised:

$$\Delta_1 = 27ad^2. \tag{4.16}$$

$$\Delta_0 = 12ae. \tag{4.17}$$

$$Q = \sqrt[3]{\frac{\Delta_1 + \sqrt{\Delta_1^2 - 4\Delta_0^3}}{2}}. \tag{4.18}$$

$$S = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{3a}\left(Q + \frac{\Delta_0}{Q}\right)}. \tag{4.19}$$

$$q = \frac{d}{a}. \tag{4.20}$$

Nende vaheetappide läbimise järel saab välja arvutada lahendi. Esitatud on ainult selline lahendi kuju, mis annab sobiva ja mõtteka reaalarvulise vastuse, ülejäänud lahendid on komplekskujul või annavad vastuseks temperatuuri negatiivse väärtuse kelvinites, ning sellisena pole vajadust neid siin eraldi välja tuua. Neljanda astme võrrandi sobiv lahend on järgmine:

$$x = -S + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{-4S^2 + \frac{q}{S}}. \tag{4.21}$$

4.3. Piirde välispinna temperatuuri arvutamise näide

Arvutame piirde välispinna temperatuuri tasakaaluolukorras järgmistel tingimustel:

- Hoone siseõhu temperatuur $T_{sõ}$ = 294,15 K (21 °C).

- Välisõhu temperatuur $T_{v\tilde{o}}$ = 249,15 K (–24 °C).
- Pilvise taeva temperatuur T_{taevas} = 243,15 K (–30 °C).
- Välispinna emissioonitegur ε = 0,9.
- Piirde soojusjuhtivus U_{piire} = 0,157 W/(m^2·K) (nt Bauroc, 500 mm [23]).
- Välispinna piirikihi soojusjuhtivus $U_{v\tilde{o}}$ = 25 W/(m^2·K) ($R_{v\tilde{o}}$ = 0,04 m^2·K/W [1]).

Nende andmete põhjal leiame kõigepealt kordajad *a*, *d* ja *e*:

$$a = \sigma\varepsilon = 5{,}67 \times 10^{-8} \times 0{,}9 = 5{,}103 \cdot 10^{-8}\ \frac{W}{m^2 \cdot K^4}.$$

$$d = U_{piire} + U_{v\tilde{o}} = 0{,}157 + 25\ = 25{,}157\ \frac{W}{m^2 \cdot K}.$$

$$\begin{aligned} e &= -\left(\sigma\varepsilon T_{taevas}^4 + U_{piire}T_{s\tilde{o}} + U_{v\tilde{o}}T_{v\tilde{o}}\right) = \\ &= -\left(5{,}67 \times 10^{-8} \times 0{,}9 \times 243{,}15^4 + 0{,}157 \times 294{,}15 + 25 \times 249{,}15\right) = \\ &= -6453{,}302\ \frac{W}{m^2}. \end{aligned}$$

Leiame vahetulemuse Δ_1 vastavalt seosele (4.16):

$$\Delta_1 = 27ad^2 = 27 \times 5{,}103 \times 10^{-8} \times 25{,}157^2 = 8{,}720 \times 10^{-4}.$$

Leiame vahetulemuse Δ_0 vastavalt seosele (4.17):

$$\Delta_0 = 12ae = 12 \times 5{,}103 \times 10^{-8} \times (-6453{,}302) = -0{,}00395.$$

Leiame vahetulemuse *Q* vastavalt seosele (4.18):

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt[3]{\frac{\Delta_1 + \sqrt{\Delta_1^2 - 4\Delta_0^3}}{2}} = \\ &= \sqrt[3]{\frac{8{,}720 \times 10^{-4} + \sqrt{(8{,}720 \times 10^{-4})^2 - 4 \times (-0{,}00395)^3}}{2}} = \\ &= 0{,}0979. \end{aligned}$$

Leiame vahetulemuse *S* vastavalt seosele (4.19):

$$S = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{3a}\left(Q + \frac{\Delta_0}{Q}\right)} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{3 \times 5{,}103 \times 10^{-8}}\left(0{,}0979 + \frac{-0{,}00395}{0{,}0979}\right)} =$$

$$= 306{,}44.$$

Leiame vahetulemuse *q* vastavalt seosele (4.20):

$$q = \frac{d}{a} = \frac{25{,}157}{5{,}103 \times 10^{-8}} = 4{,}930 \cdot 10^{8}\ \mathrm{K}^3.$$

Viimaks leiame ainukese positiivse reaalarvulise lahendi *x* vastavalt seosele (4.21):

$$x = T_{vp} = -S + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{-4S^2 + \frac{q}{S}} =$$

$$= -306{,}44 + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{-4 \cdot 306{,}44^2 + \frac{4{,}930 \cdot 10^{8}}{306{,}44}} =$$

$$= 248{,}754\ \mathrm{K}.$$

Arvutuste tulemusena saame, et valitud lähtetingimuste korral on piirde välispinna temperatuur tasakaaluolukorras 248,754 K ehk –24,396 °C.

Kuidas välispinna temperatuuri selline muutus mõjutab piiret läbivat arvutuslikku soojuskadu (ja ühtlasi ka hoone arvutuslikku küttevõimsust)?

Kiirguslikku komponenti arvestamata oleks välispinna temperatuur t_{vp0} kirjeldatud lähteandmete korral

$$t_{vp0} = t_{v\tilde{o}} + \frac{U_{piire}}{U_{piire} + U_{v\tilde{o}}}(t_{s\tilde{o}} - t_{v\tilde{o}}) =$$

$$= -24 + \frac{0{,}157}{0{,}157 + 25} \times \left(21 - (-24)\right) = -23{,}719\ ^{\circ}\mathrm{C}. \qquad (4.22)$$

Sellise välispinna temperatuuri korral on läbi piirde tulev soojusvoo tihedus seose (1.12) põhjal:

$$q_{sise0} = U_{piire}\left(t_{sõ} - t_{vp0}\right) = 0{,}157 \times \left(21 - (-23{,}719)\right) = 7{,}021\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

Kiirguslikku komponenti arvestades – välispinna madalama temperatuuri korral – on läbi piirde liikuv soojusvoo tihedus

$$q_{sise} = U_{piire} \times \left(t_{sõ} - t_{vp}\right) = 0{,}157 \times \left(21 - (-24{,}396)\right) = 7{,}127\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

Järelikult tuleks kiirguslikku soojuskadu arvestades hoone arvutuslikku küttevõimsust vaadeldud piirde korral võrreldes „traditsiooniliselt" arvutatule suurendada

$$q_{sise\%} = \frac{q_{sise} - q_{sise0}}{q_{sise0}} = \frac{7{,}127 - 7{,}021}{7{,}021} \times 100\% = 1{,}51\%, \qquad (4.23)$$

kus $q_{sise\%}$ on kiirguskao arvestamise tõttu lisanduv piiret läbiv soojuskadu %.

Arvutame ka konvektiivse ja kiirgusliku soojusvoo tihedused uue välispinna temperatuuri korral:

$$q_{võ} = U_{võ}\left(t_{võ} - t_{vp}\right) = 25 \times \left(-24 - (-24{,}396)\right) = 9{,}905\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

$$q_{rad} = \sigma\varepsilon\left(T_{vp}^4 - T_{taevas}^4\right) =$$

$$= 5{,}67 \times 10^{-8} \times 0{,}9 \times (248{,}754^{\,4} - 243{,}15^4) = 17{,}021\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

Kontrollime vastavust võrrandile (4.3):

$$q_{rad} - q_{sise} - q_{võ} = 17{,}021 - 7{,}127 - 9{,}905 = -0{,}01\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

Saadud tulemus erineb nullist sel põhjusel, et eelnevates arvutustes pole arvesse võetud piisavalt palju komakohti. *Excel*'is ja *MathCAD*'is tehtud arvutuste korral võrdus kontrolltulemus nulliga vähemalt kaheksanda komakohani.

Saadud tulemustest võib järeldada, et kiirguslik soojusvoog on vaadeldud tingimustel kõigist soojusvoogudest kõige suurem, ning läbi hoone liikuv arvutuslik piirde soojuskadu on neist kolmest kõige väiksem. Samas, kiirgusliku kao mõju arvestamine ei suurenda olulisel määral hoone arvutuslikku vajaminevat küttevõimsust, kuna valdavalt kompenseerib välisõhust piirde välispinnale saabuv konvektiivne soojusvoog kiirgusliku kao mõju.

4.4. Neljanda astme võrrandi kordajate *a*, *d* ja *e* väärtused erinevatel juhtudel

Eelnevates alapeatükkides oli vaatluse all olukord, kus piirde välispinna temperatuur leiti kõige lihtsamal juhul, horisontaalse pinna ja pilvise taeva korral. Neljanda astme võrrandi kordaja *d* jääb samaks ka ülejäänutel peatükis 3 kirjeldatud juhtudel, kordaja *a* on sama pilvise taeva olukordade puhul ja erinev selge taeva olukordade puhul ning vabaliige *e* on erinev kõikidel juhtudel, sõltudes kiirgusliku soojuskao arvutamise valemitest. Siinkohal vaatleme täpsemalt nende kordajate väärtusi, samuti kordame üle ka juba esitatud väärtused, et need kõik oleks ühes peatükis koos esitatud.

Pilves taevas, horisontaalne katus:

$$a = \sigma\varepsilon.$$
$$d = U_{piire} + U_{v\tilde{o}}.$$
$$e = -\left(\sigma\varepsilon T_{taevas}^4 + U_{piire}T_{s\tilde{o}} + U_{v\tilde{o}}T_{v\tilde{o}}\right).$$

Pilves taevas, vertikaalne sein:

$$a = \sigma\varepsilon.$$
$$d = U_{piire} + U_{v\tilde{o}}.$$
$$e = -\left[\sigma\varepsilon\frac{(T_{taevas}^4 + T_{maa}^4)}{2} + U_{piire}T_{s\tilde{o}} + U_{v\tilde{o}}T_{v\tilde{o}}\right]. \quad (4.23)$$

Pilves taevas, mingi nurga θ all olev katus:

$$a = \sigma\varepsilon.$$

$$d = U_{piire} + U_{v\tilde{o}}.$$

$$e = -\left[\sigma\varepsilon\left(T_{taevas}^4 \frac{180-\theta}{180} + T_{maa}^4 \frac{\theta}{180}\right) + U_{piire}T_{s\tilde{o}} + U_{v\tilde{o}}T_{v\tilde{o}}\right]. \quad (4.24)$$

Selge taevas, horisontaalne katus:

$$a = \sigma\varepsilon \frac{1}{90}\sum_{x=1}^{90} sin(x). \quad (4.25)$$

$$d = U_{piire} + U_{v\tilde{o}}.$$

$$e = -\left[\sigma\varepsilon \frac{1}{90}\sum_{x=1}^{90} (sin(x)T_{taevas}^4(x)) + U_{piire}T_{s\tilde{o}} + U_{v\tilde{o}}T_{v\tilde{o}}\right]. \quad (4.26)$$

Selge taevas, vertikaalne sein:

$$a = \sigma\varepsilon \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{90}\sum_{x=1}^{90} \cos(x)\right). \quad (4.27)$$

$$d = U_{piire} + U_{v\tilde{o}}.$$

$$e = -\left[\sigma\varepsilon \frac{1}{2}\left(T_{maa}^4 + \frac{1}{90}\sum_{x=1}^{90} (cos(x) \cdot T_{taevas}^4(x))\right) + U_{piire}T_{s\tilde{o}} + U_{v\tilde{o}}T_{v\tilde{o}}\right]. \quad (4.28)$$

Selge taevas, mingi nurga θ all olev katus:

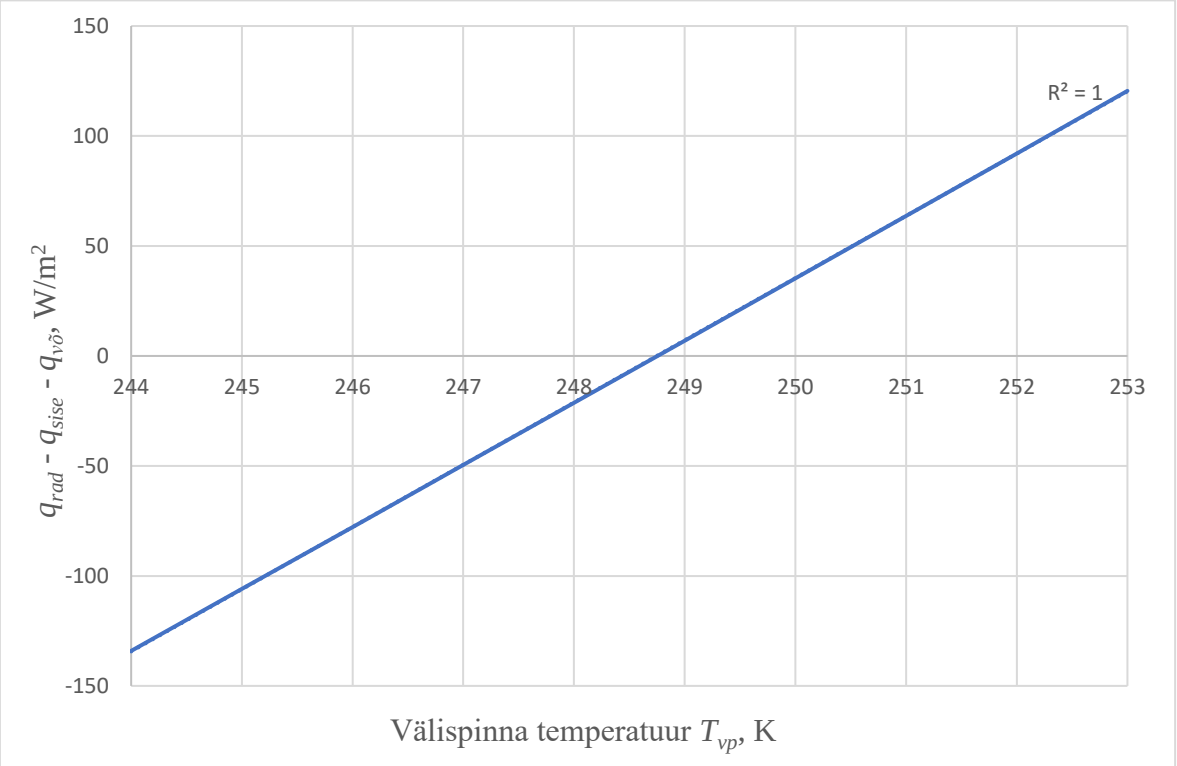
$$a = \sigma\varepsilon \frac{180-\theta}{180} \cdot \frac{1}{90}\sum_{x=1}^{90} sin(x+\theta) + \sigma\varepsilon \frac{\theta}{180}. \quad (4.29)$$

$$d = U_{piire} + U_{v\tilde{o}}.$$

$$e = -\left[\sigma\varepsilon\left(\frac{\theta}{180}T_{maa}^4 + \frac{180-\theta}{180} \cdot \frac{1}{90}\sum_{x=1}^{90} (sin(x+\theta) \cdot T_{taevas}^4(x))\right) + U_{piire}T_{s\tilde{o}} + U_{v\tilde{o}}T_{v\tilde{o}}\right]. \quad (4.30)$$

4.5. Välispinna temperatuuri leidmine kahe vabalt valitud pinnatemperatuuri väärtuse alusel

Eespool joonisel 4.3 on kujutatud näidisarvutuses kasutatud tingimustele vastava neljanda astme funktsiooni graafikut. Joonisel 4.4 on esitatud sama graafik, kuid seekord hoopis tasakaaluolukorras oleva välispinna temperatuuri lähedases lõigus. On märgatav, et selles kitsas vahemikus on neljanda astme funktsiooni graafik väga lähedane sirgele. Funktsiooni sellist eripära vaadeldavas kitsas temperatuurivahemikus saab ära kasutada tasakaaluolukorras piirde välispinna temperatuuri leidmise tunduvaks lihtsustamiseks – võrreldes eelnevates peatükkides kirjeldatud neljanda astme võrrandi korrektse lahendamise suhteliselt suure arvutusmahuga tuleb käesolevas alapeatükis kirjeldatud meetodil teha ainult mõned arvutused.



Joonis 4.4. Neljanda astme funktsiooni graafik tasakaaluolukorras oleva välispinna temperatuuri läheduses. Selles lühikeses lõigus on funktsiooni graafik väga sarnane sirgele.

Lahenduskäik on järgmine. Valime suvaliselt kaks välispinna temperatuuri T_{vp1} ja T_{vp2}, mis ei erine eeldatavast tasakaaluolukorra temperatuurist rohkem kui paari K võrra. Leiame nendele temperatuuridele vastavad soojusvoogude tihedused q_{rad1}, q_{sise1}, $q_{võ1}$, q_{rad2}, q_{sise2} ja

$q_{võ2}$ ning nende põhjal omakorda piirde välispinnale saabuvate ja lahkuvate soojusvoogude summad q_{kogu1} ja q_{kogu2}. Neid suurusi teades saame konstrueerida sirge, mis ühendab punkte (T_{vp1};q_{kogu1}) ja (T_{vp2};q_{kogu2}). Järgmiseks leiame leitud sirge tõusu *k* [24]:

$$k = \frac{q_{kogu2} - q_{kogu1}}{T_{vp2} - T_{vp1}}, \tag{4.31}$$

kus q_{kogu1} on soojusvoo tiheduste summa välispinna temperatuuri T_{vp1} korral W/m^2;

q_{kogu2} – soojusvoo tiheduste summa välispinna temperatuuri T_{vp2} korral W/m^2;

T_{vp1} – esimene suvaliselt valitud välispinna temperatuur K;

T_{vp2} – teine suvaliselt valitud välispinna temperatuur K.

Teades sirge tõusu *k*, saame kirja panna sirge võrrandi [24]:

$$q_{kogu} - q_{kogu2} = k(T_{vp} - T_{vp2}), \tag{4.32}$$

kus q_{kogu} on soojusvoo tiheduste summa välispinna temperatuuri T_{vp} korral W/m^2;

T_{vp} – välispinna temperatuur tasakaaluolukorras K.

Sirge võrrand (4.32) peale liikmete ümberpaigutamist ja sulgude avamist:

$$q_{kogu} = kT_{vp} - kT_{vp2} + q_{kogu2}. \tag{4.33}$$

Tasakaaluolukorras on võrrand (4.33) võrdne nulliga (ehk q_{kogu} = 0, pinnale saabuvate ja pinnalt lahkuvate soojusvoogude tiheduste algebraline summa on null), ning seega saab avaldada välispinna temperatuuri T_{vp}:

$$T_{vp} = \frac{kT_{vp2} - q_{kogu2}}{k}. \tag{4.34}$$

Näide. Kui välisõhu temperatuur on –24 °C ehk 249,15 K, siis valime välispinna temperatuurideks näiteks T_{vp1} = 248 K ja T_{vp2} = 250 K. Arvutame vastavad soojusvoogude tihedused:

$$q_{rad1} = \sigma\varepsilon\left(T_{vp1}^4 - T_{taevas}^4\right) =$$

$$= 5{,}67 \times 10^{-8} \times 0{,}9 \times (248^4 - 243{,}15^4) = 14{,}663\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

$$q_{võ1} = U_{võ}\left(T_{võ} - T_{vp1}\right) = 25 \times (249{,}15 - 248) = 28{,}750\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

$$q_{sise1} = U_{piire}\left(T_{sõ} - T_{vp1}\right) = 0{,}157 \times (294{,}15 - 248) = 7{,}246\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

$$q_{kogu1} = q_{rad1} - q_{võ1} - q_{sise1} = 14{,}66298 - 28{,}75 - 7{,}24555 = -21{,}333\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

$$q_{rad2} = \sigma\varepsilon\left(T_{vp1}^4 - T_{taevas}^4\right) =$$

$$= 5{,}67 \times 10^{-8} \times 0{,}9 \times (250^4 - 243{,}15^4) = 20{,}966\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

$$q_{võ2} = U_{võ}\left(T_{võ} - T_{vp2}\right) = 25 \times (249{,}15 - 250) = -21{,}250\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

$$q_{sise2} = U_{piire}\left(T_{sõ} - T_{vp2}\right) = 0{,}157 \times (294{,}15 - 250) = 6{,}932\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

$$q_{kogu2} = q_{rad2} - q_{võ2} - q_{sise2} = 20{,}966 + 21{,}250 - 6{,}932 = 35{,}284\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

Leiame sirge tõusu *k* vastavalt valemile (4.31):

$$k = \frac{q_{kogu2} - q_{kogu1}}{T_{vp2} - T_{vp1}} = \frac{35{,}284 + 21{,}333}{250 - 248} = 28{,}308.$$

Leiame otsitava välispinna temperatuuri T_{vp} vastavalt seosele (4.34):

$$T_{vp} = \frac{kT_{vp2} - q_{kogu2}}{k} = \frac{28{,}308 \times 250 - 35{,}284}{28{,}308} = 248{,}754\ \mathrm{K}.$$

Saab kasutada ka natuke teistsugust lahenduskäiku. Kui on teada punktid (T_{vp1};q_{kogu1}) ja (T_{vp2};q_{kogu2}), siis nendevahelise sirge võrrandi saab määrata ka kujul [24]:

$$\frac{T_{vp}-T_{vp1}}{T_{vp2}-T_{vp1}}=\frac{q_{kogu}-q_{kogu1}}{q_{kogu2}-q_{kogu1}}. \tag{4.35}$$

Meid huvitavas tasakaaluolukorras on q_{kogu} = 0, seega saame edasi liikuda otsitava temperatuuri T_{vp} avaldamisega:

$$\left(T_{vp}-T_{vp1}\right)\left(q_{kogu2}-q_{kogu1}\right)=-q_{kogu1}\left(T_{vp2}-T_{vp1}\right). \tag{4.36}$$

$$T_{vp}=T_{vp1}-\frac{q_{kogu1}\left(T_{vp2}-T_{vp1}\right)}{q_{kogu2}-q_{kogu1}}. \tag{4.37}$$

Pannes arvud asemele, saame:

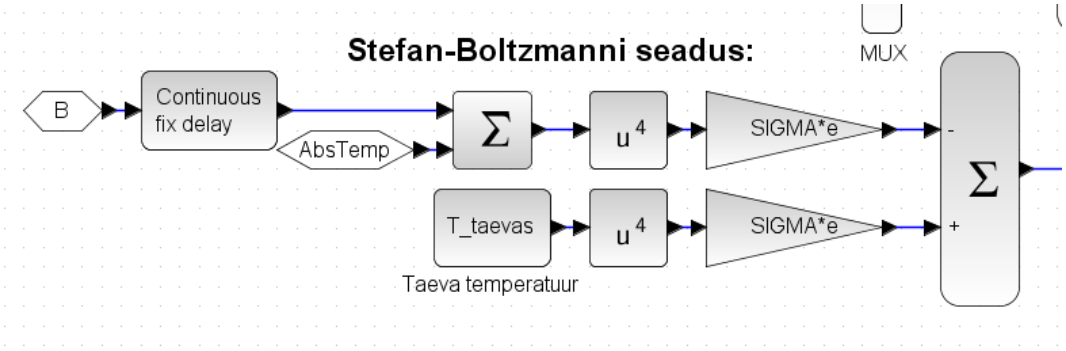
$$T_{vp}=T_{vp1}-\frac{q_{kogu1}\left(T_{vp2}-T_{vp1}\right)}{q_{kogu2}-q_{kogu1}}=248-\frac{-21{,}333\times(250-248)}{35{,}284+21{,}333}=248{,}754\ \text{K}.$$

Lihtsustatud meetodi mõlemal juhul saime välispinna temperatuuriks tasakaaluolukorras 248,754 K ehk –24,396 °C. See tulemus on sama mis eespool neljanda astme võrrandi korrektse lahendamisena saadud. *Excel*'is ja *MathCAD*'is tehtud arvutused näitasid, et kirjeldatud kahe meetoditega leitud temperatuuride erinevus avaldub alles neljanda komakoha juures, seega võib autori hinnangul käesolevas peatükis käsitletud lahendust praktiliste rakenduste jaoks piisavalt täpseks lugeda.

4.6. Välispinna temperatuuri leidmine keskkonnas *Scilab*

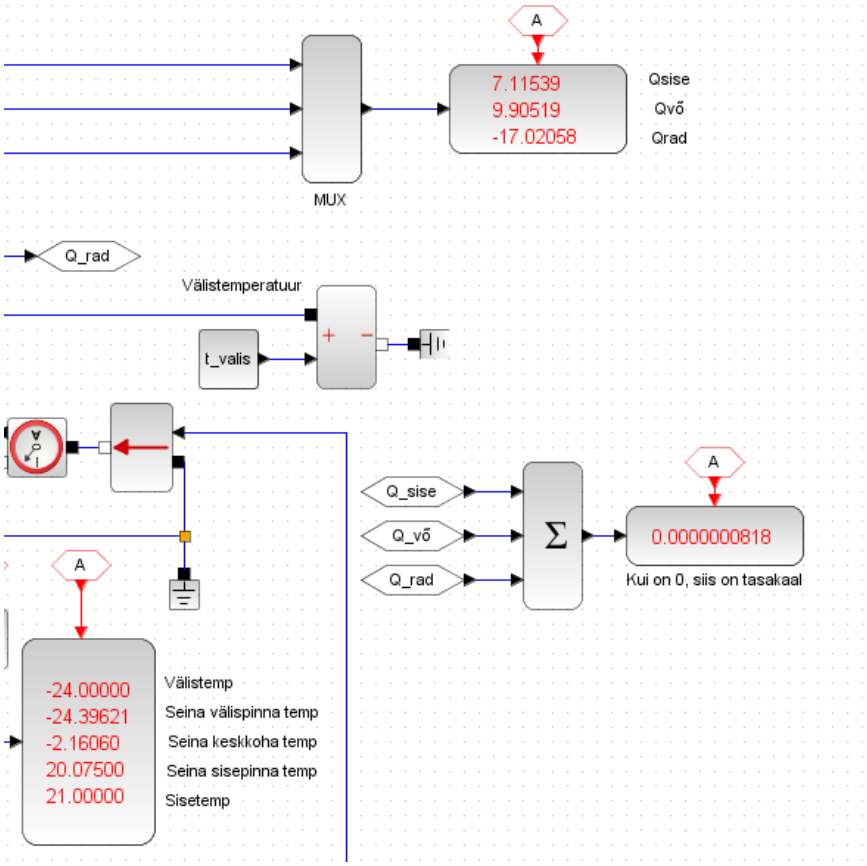
Lisaks eelpool kirjeldatud kahele võimalusele saab piirde välispinna temperatuuri tasakaaluolukorras leida ka modelleerimistarkvara *Scilab* abil. Selleks tuleb keskkonnas *Xcos* luua vastav mudel asjakohaste parameetritega, üks võimalik variant on esitatud lisas A ning mudelile sobiv „kontekst" on esitatud lisas C. Joonisel 4.5 on esitatud Stefan-

Boltzmanni seadus koostatuna Scilab'i plokkide abil. Ei tohi unustada, et Stefan-Boltzmanni seaduse jaoks on vaja temperatuurid esitada absoluutskaalal.



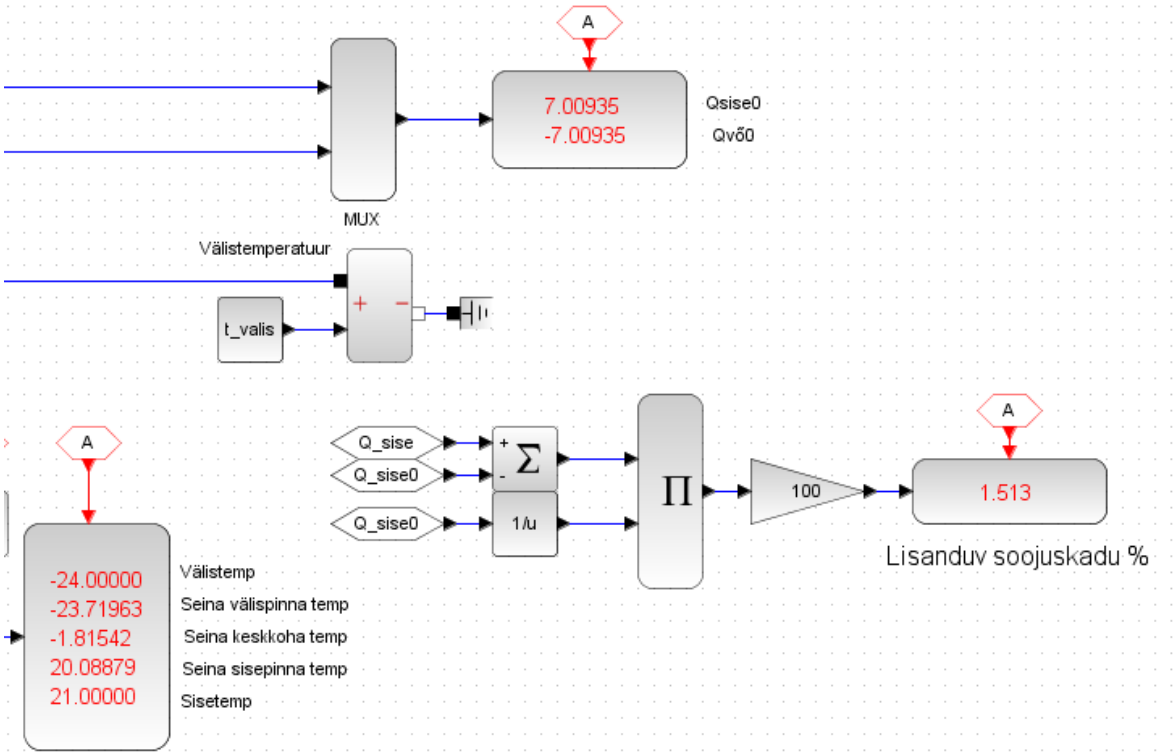
Joonis 4.5. Stefan-Boltzmanni seadus *Scilab*'i sobival kujul.

Joonisel 4.6 on esitatud *Scilab*'i simulatsiooni tulemused. Soojusvoogude väärtused ning piirde pinnatemperatuurid on võrreldavad eelnevates näidisarvutustes saadutega.



Joonis 4.6. Scilab'i simulatsiooni tulemused. Näha sarnased väärtused nagu eelnevates näidetes arvutatud.

Joonisel 4.7 on kujutatud selline Scilab'i simulatsiooni olukord, kus kiirgusliku soojuskaoga pole arvestatud. Piirde välispinna temperatuur on seetõttu välistemperatuurist kõrgem ning ühtlasi on vaadeldaval juhtumil väiksem läbi piirde tulev juhtivuslik soojusvoog q_{sise0}. Mudel võimaldab ka arvutada kiirguskao arvestamise tõttu tekkivat lisasoojuskadu, nagu jooniselt näha on selleks 1,513%, analoogiliselt seose (4.23) põhjal arvutatule.



Joonis 4.7. Scilab'i simulatsiooni tulemused. Soojusvood ja temperatuurid sellisel juhul, kui kiirguslikku soojuskadu ei arvestata.

Lisas A esitatud mudelis on piirde soojusmahtuvuseks teadlikult väike väärtus seatud, eesmärgiga kiirendada simulatsiooni käiku ning jõuda kiiremini tasakaaluolukorrani.

5. NÄITED ERINEVATE VÄLISPIIRETEGA

5.1. Arvutuslike soojuskadude erinevus

Eelnevates peatükkides kirjeldatud valemid ja arvutuseeskirjad võimaldavad konstrueerida mitmesuguseid sõltuvusi ja neid graafikute kujul esitada. Järgnevalt vaatleme mõningaid konkreetseid piirdeid ning kuidas kiirgusliku soojuskao kaasamine mõjutab hoone arvutuslikku soojuskadu erinevate tingimuste korral.

Sein1 on ühekihiline, koosneb 500 mm paksusest *Bauroc*'ist. „*Bauroc Ecoterm+ 500*" soojuserijuhtivus on 0,08 W/(m·K) [23], arvestades siseõhu piirikihi soojusjuhtivust ja seina paksust saame soojusjuhtivuseks 0,157 W/(m^2·K). Selle seina emissioonitegur on 0,9 [25].

Sein2 koosneb kolmest kihist – Fibo 3 kergplokist, EPS 100 soojustusest ja krohvist. Piirde materjalide andmed on esitatud tabelis 5.1.

Tabel 5.1. Kolmekihilise seina materjalide soojustehnilised andmed

Materjal	**Paksus δ, m**	**Soojuserijuhtivus λ, W/(m·K)**	**Soojustakistus R_p, m^2·K/W**
Fibo 3	0,2	0,2 [26]	1,00
EPS 100	0,3	0,036 [27]	8,33
Krohv	0,005	0,48 [28]	0,01
Kokku			**9,34**

Sellise seina soojusjuhtivus on 0,107 W/(m^2·K), krohvi emissioonitegur on 0,94 [2].

Aken käitub lihtsustatult nagu tavaline välispiire. Akna soojusjuhtivus on 0,9 W/(m^2·K) [29] ning klaasi emissiooniteguriks on 0,92 [25].

Katus koosneb viiest kihist (profiilplekk 0,8 mm, vill 50 mm, EPS 50 120 mm, vill 30 mm, SBS kate 10 mm). Materjalide andmed on esitatud tabelis 5.2. Katuse soojusjuhtivus on 0,186 W/(m^2·K) ning emissioonitegur on 0,93 [2]. Katuse kaldenurk on 2° horisontaalist.

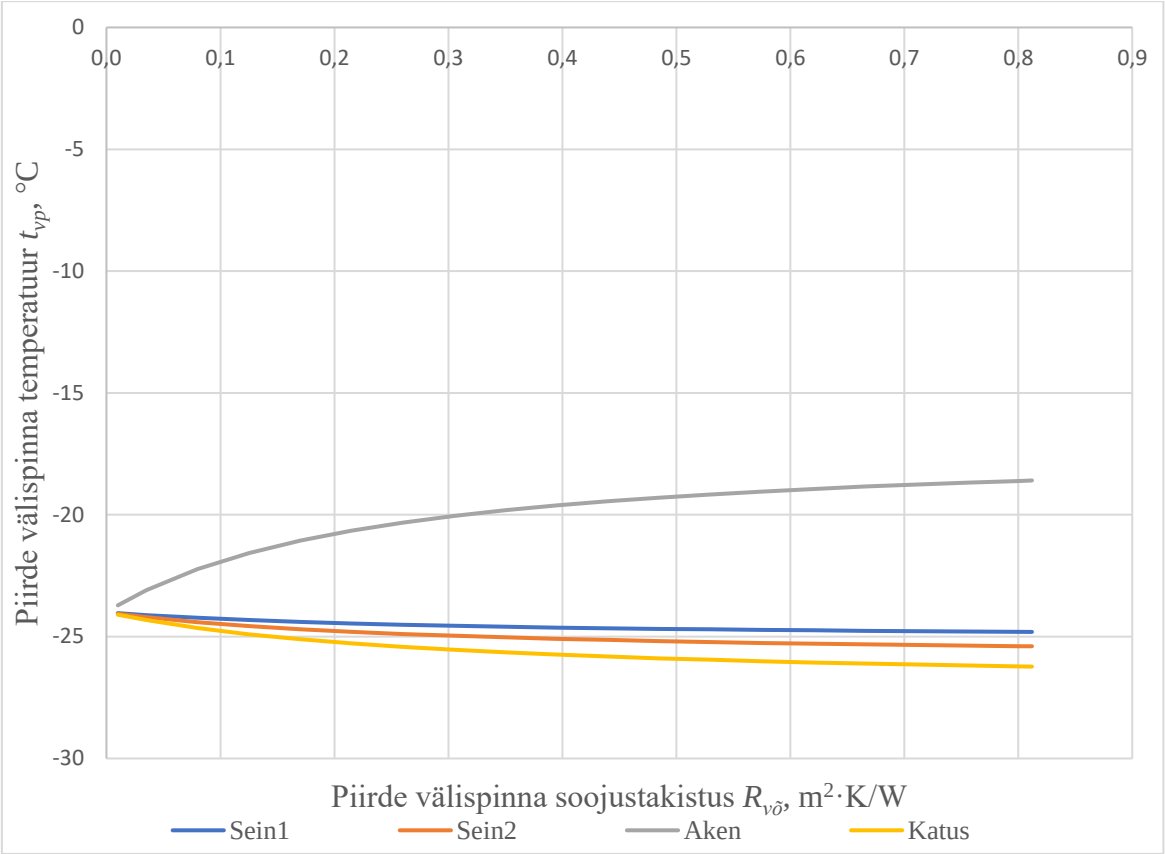
Tabel 5.2. Katuse materjalide soojustehnilised andmed

Materjal	**Paksus δ, m**	**Soojuserijuhtivus λ, W/(m·K)**	**Soojustakistus R_p, m^2·K/W**
Profiilplekk	0,0008	54 [28]	0,00
Vill	0,05	0,035 [26]	1,43
EPS 60	0,12	0,039 [27]	3,08
Vill	0,03	0,035	0,86
SBS kate	0,01	0,75 [2]	0,01
Kokku			**5,38**

Tingimused, kui pole märgitud teisiti, on järgmised:

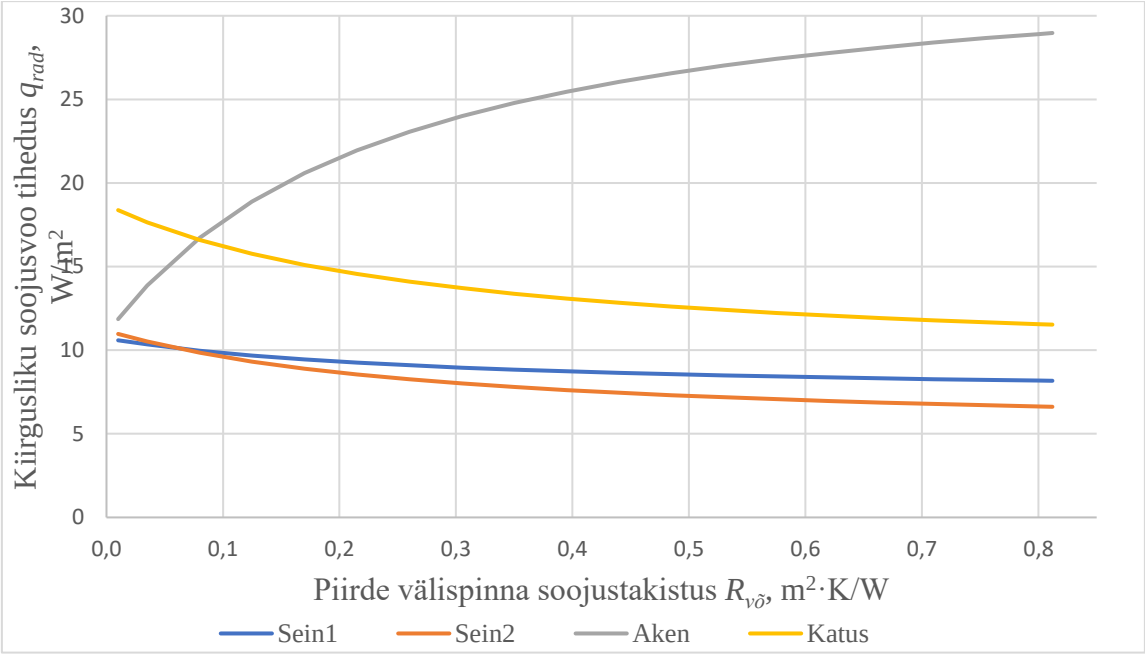
- Pilvise taeva temperatuur –30 °C.
- Selge taeva temperatuur vastavalt tabelile 2.1.
- Välisõhu temperatuur –24 °C.
- Maapinna temperatuur –25 °C.
- Välisõhu piirikihi soojustakistus 0,04 m^2·K/W.
- Välisõhu piirikihi soojustakistus vabakonvektsiooni korral 0,812 m^2·K/W.

Sõltuvus välispinna piirikihi soojustakistusest. Joonisel 5.1 on kujutatud kirjeldatud piirete välispindade temperatuuride sõltuvused välispinna soojustakistusest $R_{v\delta}$. Välispinna soojustakistus muutub vahemikus 0,01 .. 0,812 m^2·K/W, see tähendab tuule kiirusest ca 15 m/s kuni täieliku tuulevaikuseni ehk vabakonvektsiooni olukorrani. Kolme piirde – sein1, sein2 ja katus – pinnatemperatuur on madalam kui välisõhu temperatuur, ning pinnatemperatuur väheneb ühes välispinna soojustakistuse suurenemisega. See on seletatav asjaoluga, et mida suurem on välispinna soojustakistus, seda vähem tuleb välisõhust ka soojust konvektiivsel teel piirde välispinnale ning seda vähem kompenseerib konvektiivne soojusvoog kiirguslikku soojuskadu. Hoopis teistsugune on olukord akna korral – kuna akna soojusjuhtivus on võrreldes teiste piiretega suhteliselt suur, siis kiirguskao mõjul ei lange akna pinnatemperatuur kunagi välisõhu temperatuurist madalamale, ning nii kiirguslik kui ka konvektiivne soojuskadu kompenseeritakse hoone seest tuleva juhtivusliku soojusvoo poolt. Mida suurem on piirikihi soojustakistus, seda kõrgem on ka akna välispinna temperatuur, sest seda väiksem on konvektiivne soojuskadu.



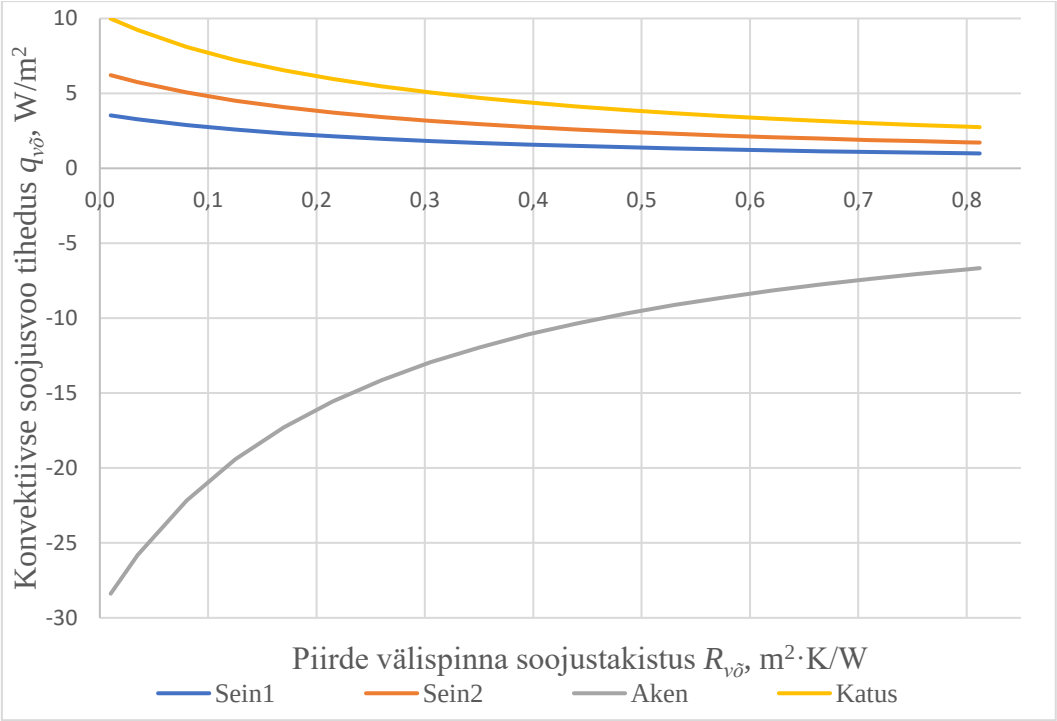
Joonis 5.1. Piirete välispindade temperatuuride sõltuvused välispinna piirikihi soojustakistusest $R_{võ}$.

Joonisel 5.2 on kujutatud kiirguslike soojusvoogude sõltuvust piirde välispinna piirikihi soojustakistusest. Seinte ja katuse korral kiirguslik soojuskadu väheneb piirikihi soojustakistuse suurenedes, seda põhjustab asjaolu et suurema soojustakistuse korral on piirde välispinna temperatuur madalam ning seega ka temperatuuride vahe välispinna ja taeva vahel on väiksem, vähendades vastavalt Stefan-Boltzmanni seadusele kiirguslikku soojusvoogu. Vastupidine on olukord akna puhul, sest suhteliselt suure soojusjuhtivuse tõttu tekib olukord, kus piirikihi soojustakistuse suurenedes suureneb ka akna välispinna temperatuur ning seetõttu suureneb ka kiirguslik soojuskadu. Antud tingimustes on vaadeldava akna soojusjuhtivus nii suur, et hoonest tulev juhtivuslik soojusvoog kompenseerib nii kiirgusliku kui ka konvektiivse soojuskao. See tähendab, et aken põhjustab võrdlemisi suure osa hoone soojuskaost.



Joonis 5.2. Kiirguslike soojuskadude sõltuvused välispinna piirikihi soojustakistusest $R_{võ}$.

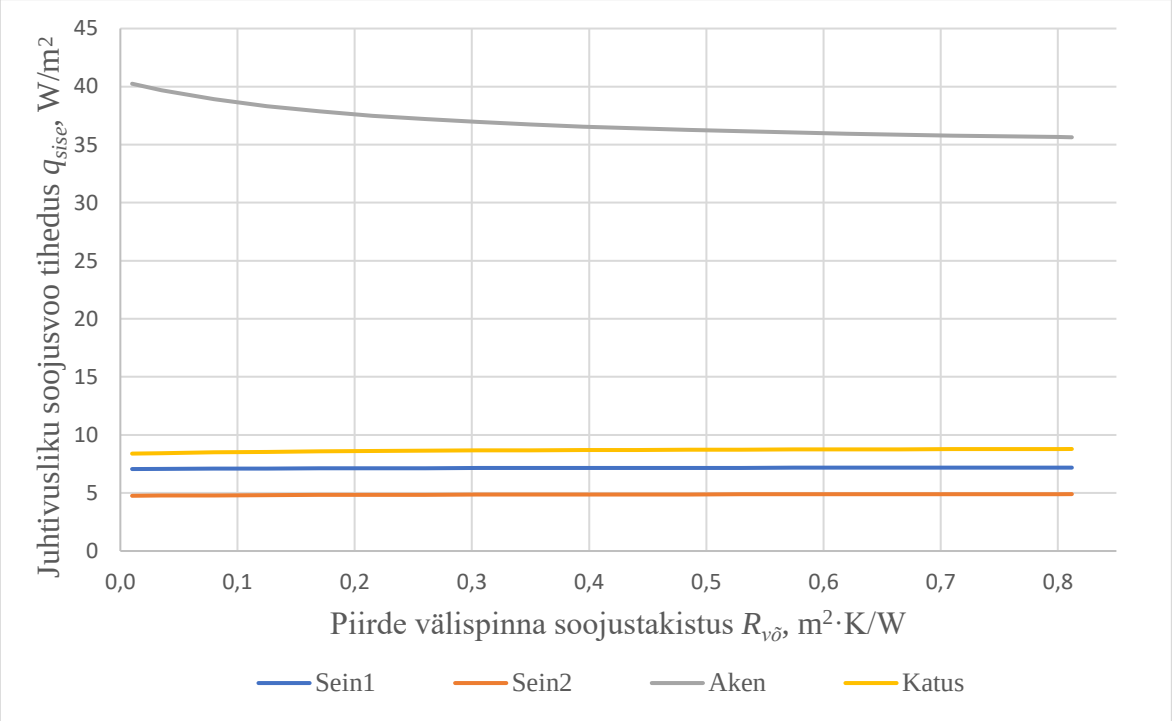
Joonisel 5.3 on kujutatud konvektiivsete soojusvoogude sõltuvust piirde välispinna piirikihi soojustakistusest. Nagu eeldada võibki väheneb konvektiivne soojusvoog välispinna piirikihi soojustakistuse kasvades. Seinte ja katuse konvektiivne soojusvoog on positiivne,



Joonis 5.3. Konvektiivsete soojusvoogude tiheduste $q_{võ}$ sõltuvused välispinna piirikihi soojustakistusest $R_{võ}$.

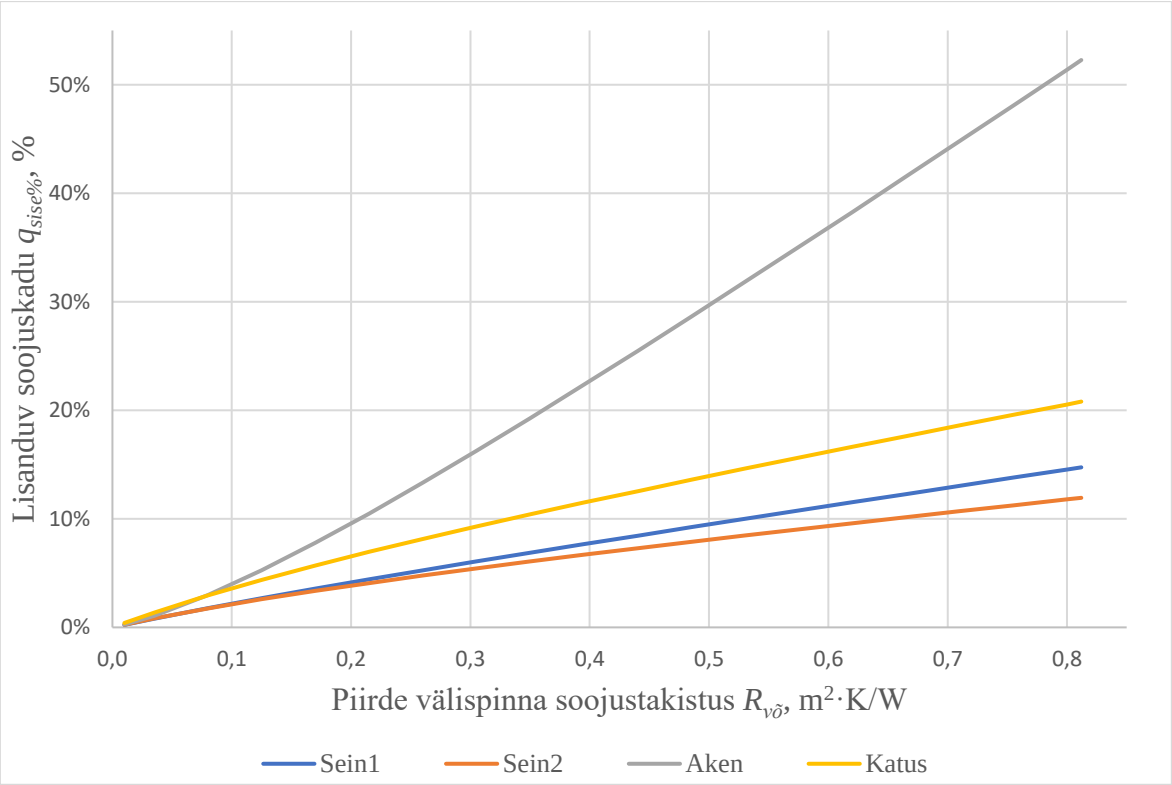
see tähendab et soojust tuleb välisõhust piirde pinnale juurde; akna korral on konvektiivne soojusvoog negatiivne, ehk et soojus lahkub akna pinnalt välisõhku.

Joonisel 5.4 on kujutatud juhtivuslikult läbi piirde hoone seest tuleva soojusvoo tiheduse q_{sise} sõltuvust piirde välispinna piirikihi soojustakistusest. See soojusvoog sisuliselt ongi üks tähtsamaid komponente hoone arvutusliku küttevõimsuse määramisel. Nagu jooniselt näha, siis hoonest läbi piirde tulev soojusvoog on erinevate piirete korral suhteliselt konstantne ehk ei sõltu olulisel määral välispinna piirikihi soojustakistusest. Põhjus on selles, et konvektiivne soojusvoog kompenseerib suures osas kiirgusliku soojuskao, välja arvatud akna korral, mil hoonest tulevast soojusest „jätkub“ nii konvektiivse kui ka kiirgusliku soojuskao jaoks. Eeldustele vastavalt on läbi akna liikuv soojusvoog tunduvalt suurem kui läbi seinte ja katuse liikuv soojusvoog, kuna akna soojusjuhtivus on tunduvalt suurem kui teistel piiretel.



Joonis 5.4. Hoone seest tuleva juhtivusliku soojusvoo tiheduse q_{sise} sõltuvus välispinna piirikihi soojustakistusest $R_{võ}$.

Joonisel 5.5 on kujutatud suhtelise lisanduva soojuskao sõltuvus välispinna piirikihi soojustakistusest. Suhteline lisanduv soojuskadu näitab, kui palju suureneb hoone arvutuslik soojuskadu võrreldes standardi järgi arvutatuga, kui võtta arvesse ka kiirguslikud kaod.

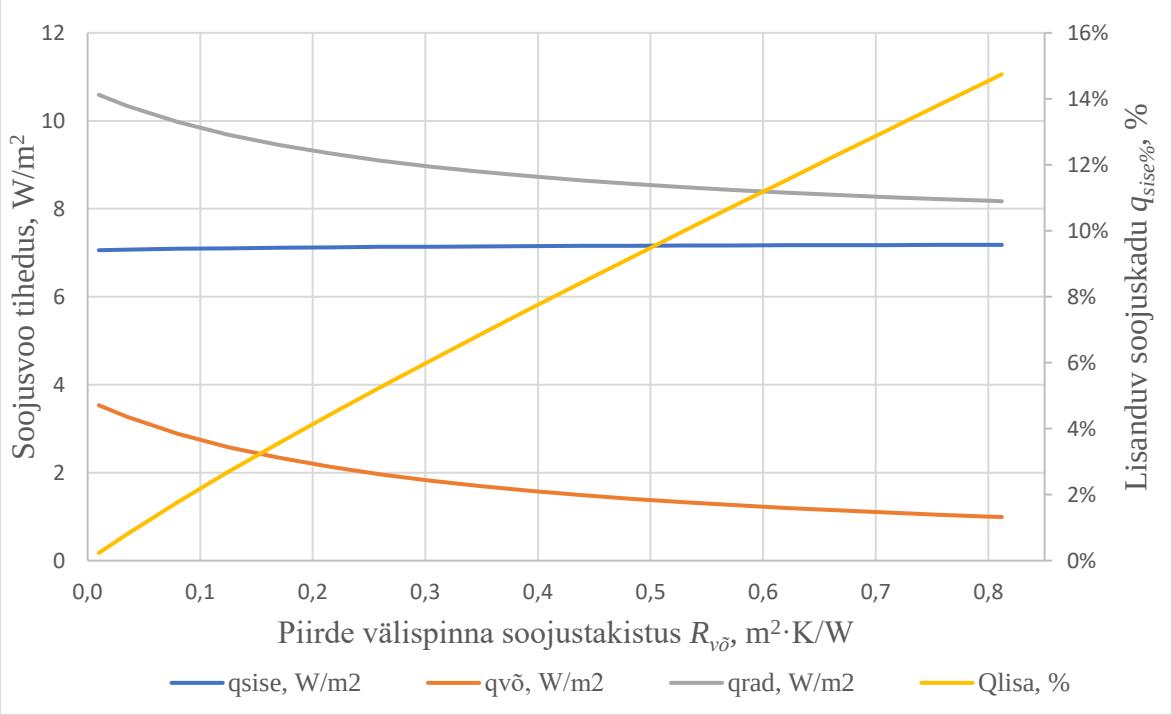


Joonis 5.5. Lisanduva suhtelise soojuskao sõltuvus välispinna piirikihi soojustakistusest $R_{võ}$.

Nagu jooniselt 5.5 näha, siis kiirguskao mõju hoone arvutuslikule soojuskaole sõltub väga suurel määral välispinna piirikihi soojustakistusest, kuna sellest takistusest omakorda sõltub otseselt konvektiivne soojusvoog, mis kompenseerib kiirguslikku soojuskadu. Mida suurem on soojustakistus, seda vähem soojust tuleb konvektiivselt piirde pinnale juurde, seega piirde temperatuur langeb kiirguskao mõjul, ning see välispinna temperatuuri langus omakorda suurendab hoonest tulevat soojusvoogu. Kui aga välispinna piirikihi soojustakistus on väike (näiteks piisavalt suure tuule korral), siis konvektiivne soojuslevi ei lase piirde temperatuuril liiga madalale minna, ning seega ei suurene ka olulisel määral hoonest läbi piirde liikuv soojusvoog. Aken muidugi kujutab endast praeguses näites erandit, kuna akna välispinna temperatuur suureneb piirikihi soojustakistuse kasvades, kuid kuna seetõttu kasvab ka kiirguslike kadude suurus ning väheneb konvektiivse kao suurus, siis kiirguskaoga arvestamine suurendab ikkagi oluliselt hoone arvutuslikku soojuskadu. Katuse korral on lisanduv suhteline soojuskadu suurem kui seinte puhul, see on seletatav asjaoluga et näites kirjeldatud katus on peaaegu horisontaalne ning seega „näeb“ rohkem taevast kui vertikaalsed seinad, taeva temperatuur aga on madalam kui maapinna temperatuur. Jooniselt 5.5 on näha, et tuulevaikuse ehk vabakonvektsiooni tingimustes on lisanduv suhteline soojuskadu kõige suurem, kuid korralikult soojustatud seina korral ei suurenda see standardi

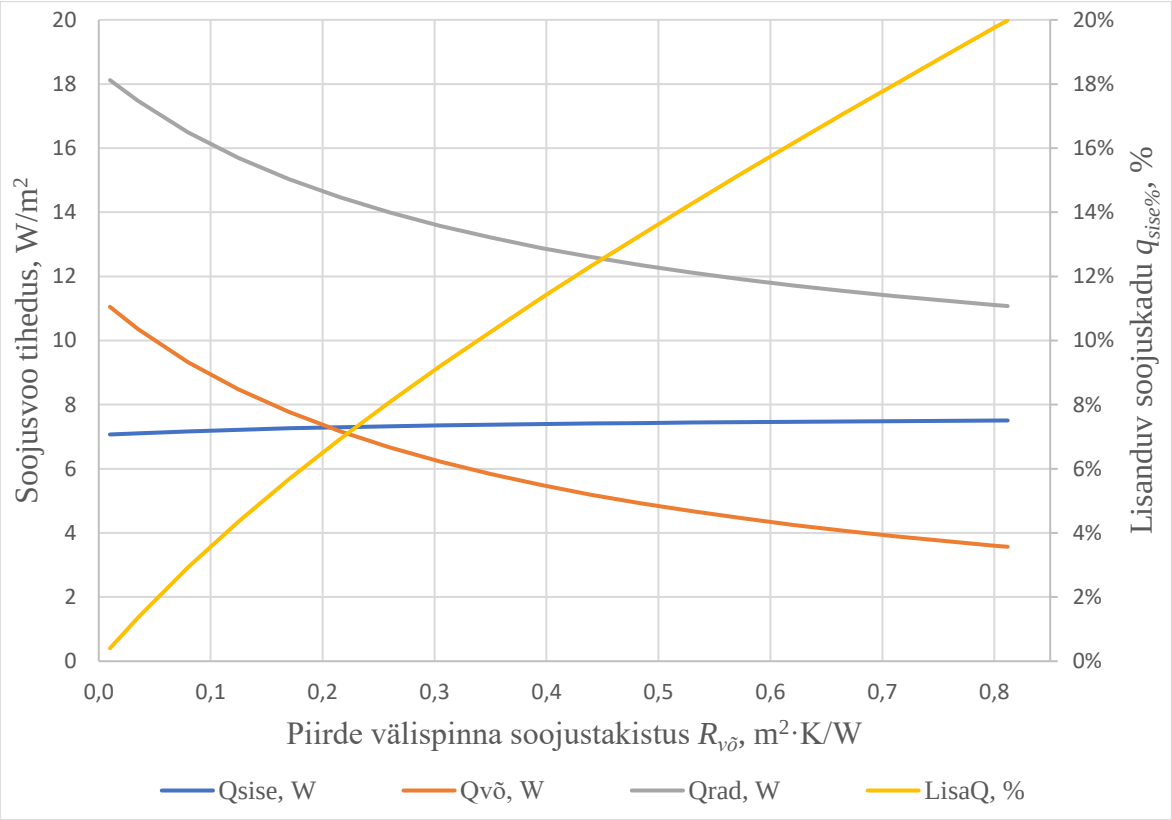
järgi arvutatud piirde soojuskadu rohkem kui 15%. Kui aga aluseks võtta standardis soovitatud piirikihi soojustakistus 0,04 $m^2 \cdot K/W$ (mis vastab tuule kiirusele 4 .. 5 m/s [12]), siis moodustab kiirguskao arvutustesse lisamisest tulenev piirde lisasoojuskadu kõigest ca 1% sellest mis standardi järgi arvutades saadud (katuse ja akna korral on see ca 3%).

Joonisel 5.6 on kujutatud ühekihilise *Bauroc*'ist seina (sein1 eelnevates näidetes) kõigi kolme soojusvoo tiheduse sõltuvus välispinna piirikihi soojustakistusest, lisaks on näidatud ka standardi järgi arvutatud soojuskaole lisanduv soojuskadu. Jooniselt on näha, et piirikihi soojustakistuse tõustes väheneb konvektiivne soojusvoog, samal ajal välispinna temperatuuri alanemise tõttu väheneb kiirguslik soojuskadu. Kõige selle juures püsib hoone seest läbi piirde juhtivuslikult liikuv soojusvoog võrdlemisi konstantsena, andes tunnistust sellest, et konvektiivne ja kiirguslik soojusvoog neutraliseerivad vastastikku võrdlemisi suures ulatuses üksteise mõju. Ühtlasi on näha, et kõigist kolmest soojusvoost on kiirguslik kõige suurem.



Joonis 5.6. Ühekihilise seina (sein1) soojusvoo tiheduste sõltuvused välispinna piirikihi soojustakistusest $R_{võ}$.

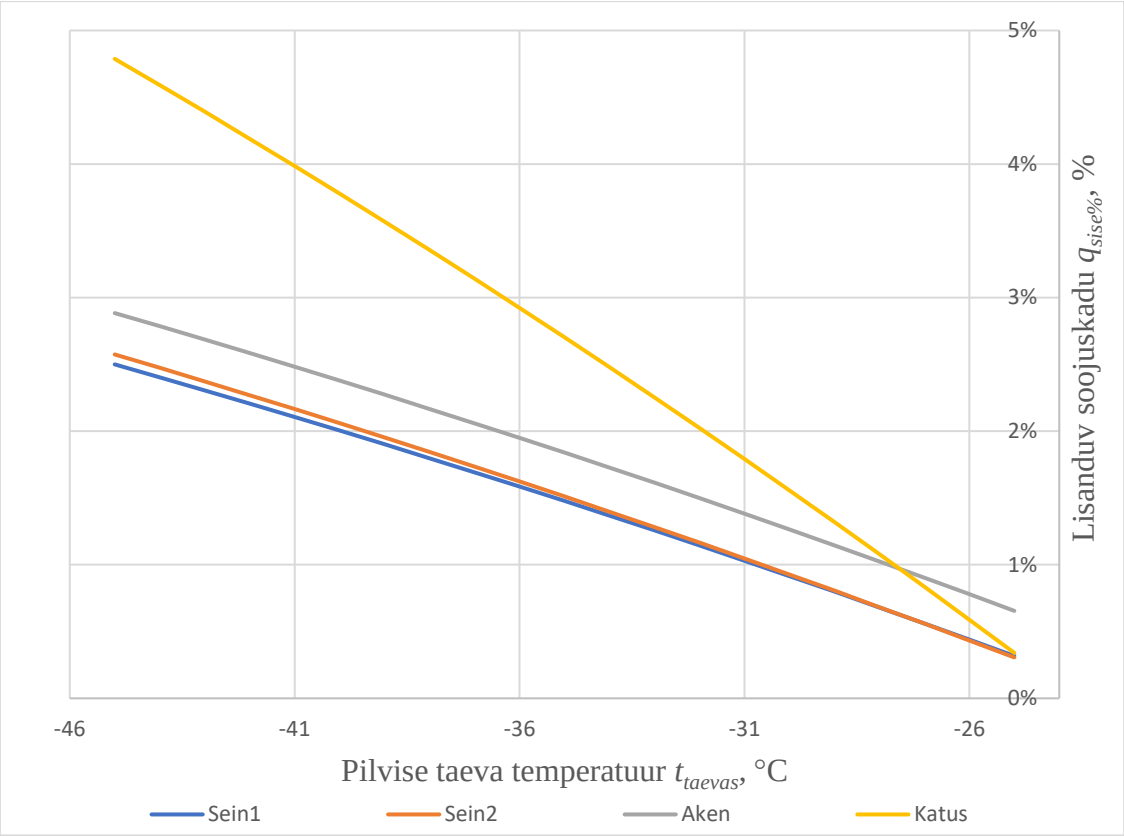
Siiamaani esitletud näidetes oli tegemist pilvise taevaga, kuid arvutusi saab teha ka selge taeva puhul; joonisel 5.7 on esitatud sama olukord mis joonisel 5.6 kuid selge taeva korral.



Joonis 5.7. Ühekihilise seina (sein1) soojusvoo tiheduste sõltuvused välispinna piirikihi soojustakistusest $R_{võ}$ selge taeva korral.

Selge taeva korral on taeva temperatuur madalam kui pilvise taeva korral, ning temperatuur sõltub ka nurkkõrgusest. Vastav mõju on ka joonisel 5.7 näha, kus kiirgusliku soojusvoo suurus on ca kolmandiku võrra suurem kui pilvise taeva korral. Hoonest läbi piirde liikuv soojusvoog siiski kolmandiku võrra ei suurene, andes jällegi tunnistust sellest et konvektiivne ja kiirguslik soojusvoog neutraliseerivad võrdlemisi suures ulatuses üksteise mõju juhtivuslikule soojusvoole. Jooniselt 5.7 on näha, et ka selge taeva korral pole kiirguskao mõju hoonest tulevale soojuskaole suurem kui 2%, kasutada standardis ettenähtud välispinna piirikihi soojustakistust (0,04 m^2·K/W).

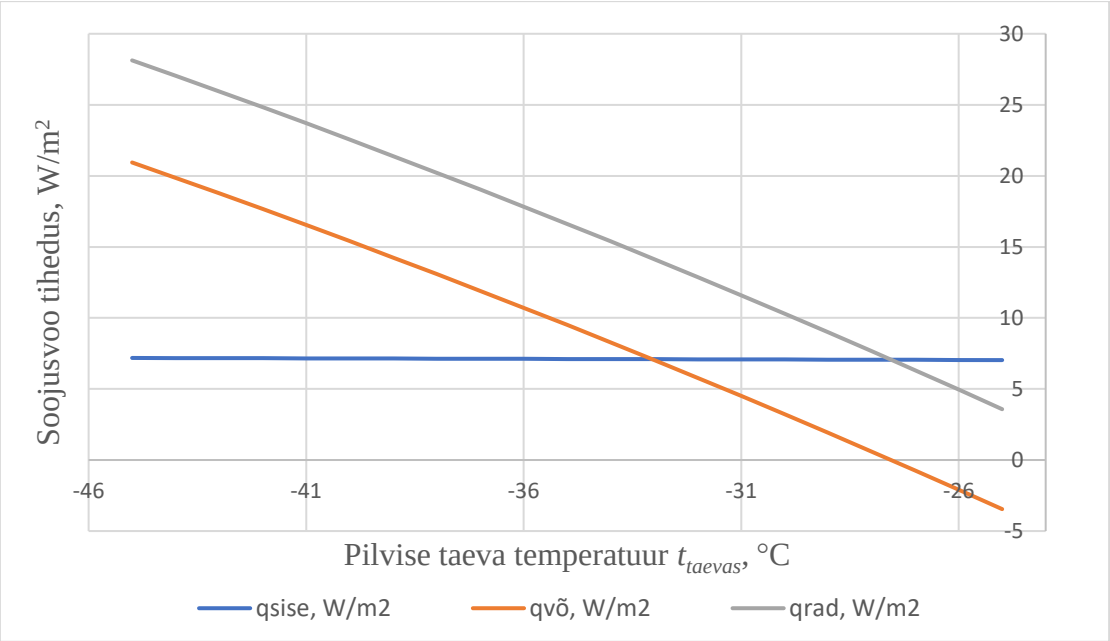
Joonisel 5.8. on kujutatud lisanduva soojuskao sõltuvus taeva temperatuurist. Seekord on vaatluse all olukorrad, kus taeva temperatuur ei ole enam konstantselt –30 °C, vaid muutub vahemikus –25 .. –45 °C, samal ajal muud parameetrid nagu näiteks välisõhu ja maapinna temperatuur jäävad samaks. Tegemist on pilvise taevaga. Kõige rohkem mõjutab taeva temperatuuri langus katust, kuna katus „näeb“ rohkem taevast kui seinad. Välispinna



Joonis 5.8. Lisanduva soojuskao osakaalu sõltuvus taeva temperatuurist.

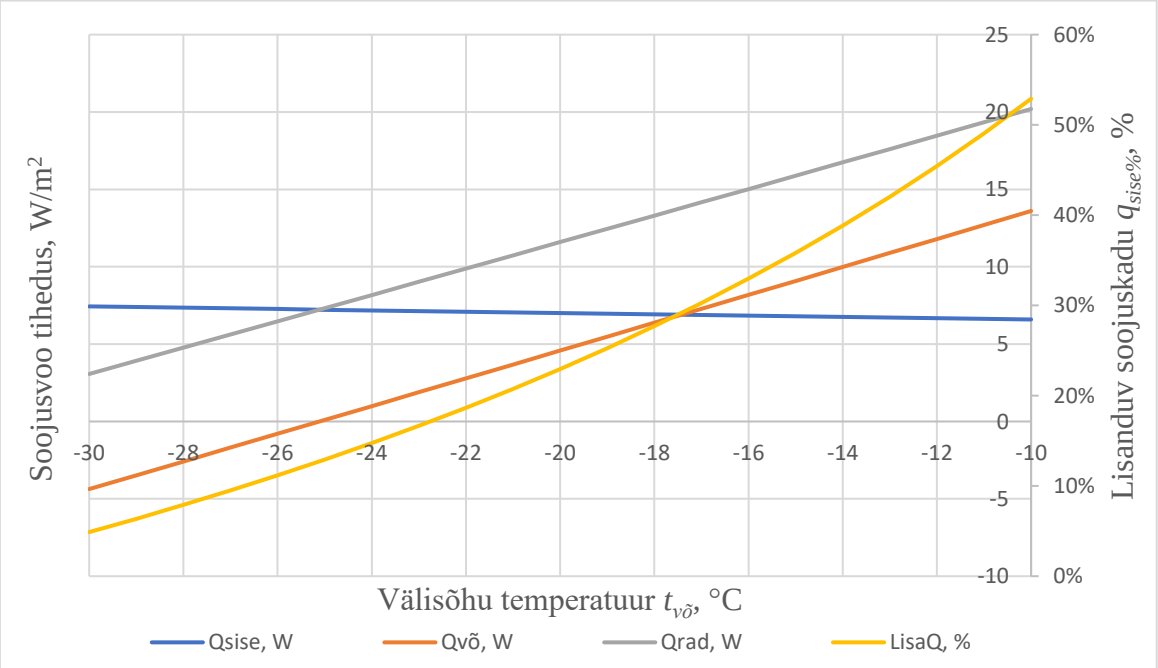
piirikihi soojustakistus on standardikohane 0,04 $m^2 \cdot K/W$, ning selle tulemusena ei suurenda taeva temperatuuri langus oluliselt läbi piirde liikuvat soojusvoogu.

Joonisel 5.9 on kujutatud *Bauroc*'ist seina (sein1) soojusvoogude tiheduste sõltuvus taeva temperatuurist. Mida madalam on taeva temperatuur, seda suuremaks muutub ka kiirguslik soojusvoog. Hämmastavalt sarnaselt kiirguslikule soojusvoole käitub ka konvektiivne soojusvoog, mis peaaegu täpselt kopeerib kiirgusvoo muutust. See on seletatav asjaoluga, et välispinna piirikihi soojustakistus antud arvutuses on konstantselt 0,04 $m^2 \cdot K/W$ ning seega saab konvektiivne soojusvoog vabalt kompenseerida kiirguslikust kaost tekkinud välispinna temperatuuri langust. Tulemuseks on jällegi peaaegu muutumatu hoone soojuskadu (arvestuslik soojuskadu suureneb ainult ca 2,5%, nagu näha eelneval joonisel). See asjaolu kinnitab veelkord konvektiivse soojusvoo tähtsust kiirgusliku soojuskao mõju vähendamisel.



Joonis 5. 9. Ühekihilise seina soojusvoogude tiheduste sõltuvus taeva temperatuurist.

Joonisel 5.10 on kujutatud soojusvoogude tiheduste sõltuvus välisõhu temperatuurist, taeva temperatuur on konstantselt –30 °C. Välisõhu temperatuur muutub vahemikus –10 .. –30 °C. Seekord on tegemist vabakonvektsiooni olukorraga, ehk piirikihi soojustakistus on 0,812 $m^2 \cdot K/W$, ning sellest tulenevalt võib märgata ka oluliselt suuremat kiirguskao mõju lisanduvale juhtivuslikule soojusvoole.



Joonis 5.10. Ühekihilise seina soojusvoogude tiheduste sõltuvus välisõhu temperatuurist.

Soojem välisõhk tähendab soojemat piirde välispinna temperatuuri, ning see omakorda tähendab suuremat kiirguslikku soojuskadu, sest kiirguskadu suureneb temperatuuride vahe kasvades. Samas, kuna konvektiivne soojusvoog on piirikihi suure soojustakistuse tõttu pärsitud, ei suuda see kiirguskao mõju piisavalt kompenseerida ning see tekitabki suhteliselt suure lisanduva arvutusliku soojuskao.

Käesolevas peatükis analüüsitud juhtumid moodustavad vaid väikese osa sellest, mida eelnevates peatükkides kirjeldatud valemid ja mudelid uurida võimaldaksid. Siiski peaksid need andma võrdlemisi hea ülevaate ja arusaama, kuidas kolm soojuslevi viisi tasakaaluolukorras käituvad ning piirde pinnatemperatuuri ja standardi järgi arvutatud hoone soojuskadu mõjutavad. Mõneti üllatav on konvektiivse soojusvoo suur osakaal kiirgusliku soojuskao mõjude kompenseerimisel.

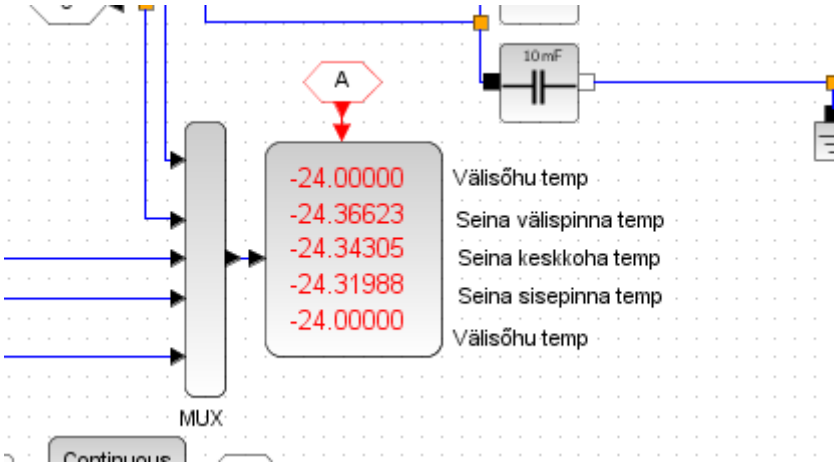
5.2. Õhkvahe mõju kiirguslikule soojuskaole *Scilab*'i mudeli näitel

Võttes arvesse asjaolu, et piisavalt väikese välispinna piirikihi soojustakistuse korral on konvektiivne soojusvoog väga efektiivne piirde välispinna temperatuuri väga madalale langemise vältimisel, tekib arvamus, et ventileeritava õhkvahe kasutamine võiks toimida väga hästi kiirguskao mõju vähendamisel. Kui tavalisel piirdel on ainult üks piirikiht kus soojus võib konvektiivselt välisõhust jahedamale pinnale tulla, siis õhkvahe korral on selliseid piirikihte lausa kolm: hoone enda välissein, järgmiseks peale õhkvahet laudise vms (nimetame seda siin ja edaspidi *ekraaniks,* kuna sisuliselt on tegemist kattega mis asub hoone välisseina ja külma taeva vahel) sisepinna piirikiht, ning selle järel veel ekraani välispinna piirikiht. See tekitab tervelt kolm konvektiivset soojusvoogu, mis võivad vastavate tingimuste korral välisõhus sooja piirdele juurde tuua. Kui õhkvahe pole ventileeritav, siis on õhkvahes tekkivate konvektiivsete soojusvoogude mõju väiksem, ning sellisel juhul toimib õhkvahe sisuliselt järjekordse soojusisolatsioonina hoone välispiirdes.

Olukorra kirjeldamiseks on lisas B esitatud Scilab'i mudel, kus lisas A toodud mudelile on lisatud õhkvahe. Ekraani välispinnal on piirikihi soojustakistus 0,04 $m^2 \cdot K/W$, mis vastab tuule kiirusele 4 m/s. Kuna tuul ei saa õhkvahesse puhuda ning seal valitseb vabakonvektsioon, on õhkvahes ekraani sisepinnal ja hoone seina välispinnal piirikihi

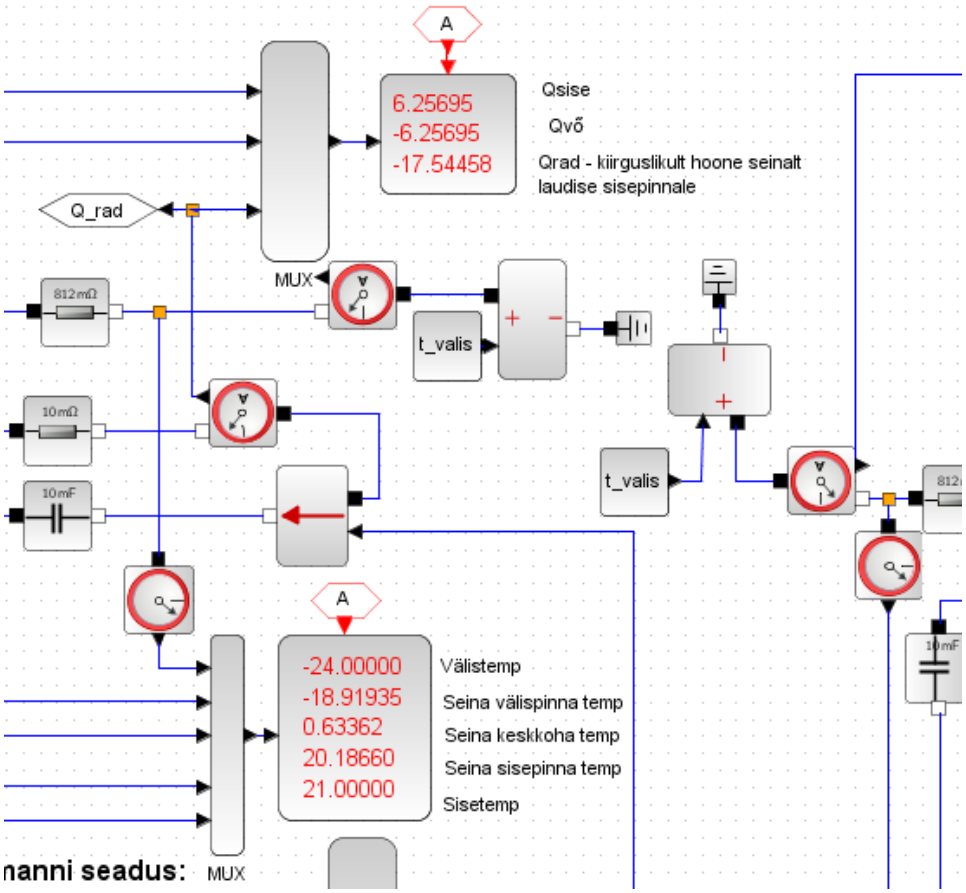
soojustakistus 0,812 $m^2 \cdot K/W$. Simulatsioon näitab, et selline õhkvahe kasutamine likvideerib väga efektiivselt kiirguslikust soojusvoost põhjustatud lisanduva soojuskao. Veelgi enam, õhkvahe kasutamine vähendab hoone üldist soojuskadu ca 10% võrra. See on seletatav järgmiselt – ekraani tõttu on sisuliselt neutraliseeritud kiirguslik soojuskadu, ning kuna õhkvahes on vabakonvektsiooni tõttu väga suur piirikihi soojustakistus, siis seetõttu väheneb ka tavaline konvektiivne soojuskadu. Kui mudelis seada ka õhkvahes piirikihtide soojustakistus 0,04 $m^2 \cdot K/W$, siis on tulemused samad nagu sel juhul kui poleks kasutusel ei õhkvahet ega arvestataks ka kiirgusliku soojusvoo mõjuga hoone soojuskaole.

Joonisel 5.11 on kujutatud mudeli õhkvahe ekraani temperatuure. Kiirguskao mõjul muutub kogu ekraan jahedamaks kui välisõhk.



Joonis 5. 11. Ekraani temperatuuri kiirgusliku soojuskao mõjul. Ekraani väliskülje temperatuur on kiirguskao tõttu madalam kui sisekülje temperatuur; kogu ekraani temperatuur on välisõhu temperatuurist madala.

Joonisel 5.12 on kujutatud hoone välispinnalt lahkuvad soojusvood ning välispinna temperatuur. Tänu ekraanile on välispinna temperatuur kõrgem kui õhutemperatuur, see omakorda põhjustab suhteliselt suure välispinna ja ekraani vahelise kiirgusliku soojusvoo. Kiirguskaod pole siiski piisavalt suured, et välispinna temperatuuri liiga madalaks muuta. Näeme ka, et konvektiivne soojusvoog on negatiivne, see tähendab et hoonest tulev soojus liigub ka konvektiivselt välisõhku.



Joonis 5.12. Hoone välispinna temperatuur ja välispinnale saabuvad ning lahkuvad soojusvood.

Tänu *Scilab*'i keskkonnas loodud mudelile saab tõepoolest kinnitada arvamust, et õhkvahe kasutamine on väga efektiivne vahend kiirguskadude vähendamisel ning lisaks veel ka konvektiivse soojuskao vähendamisel. Sama kinnitavad ka muud tavaelus kogetud nähtused, et isegi lihtsa ekraani kasutamine pärsib väga tõhusalt kiirguslikku soojuslevi, ühtviisi nii ülekuumenemise kui ka mahajahtumise võimaluse vähendamiseks.

KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärgiks oli luua alused kiirguslike soojuskadude mõju ulatuse hindamiseks hoone soojusbilansis. Esimeses peatükis kirjeldati põgusalt juhtivuslikku ja konvektiivset soojusülekannet, andmaks ülevaadet läbi piirdekonstruktsioonide liikuva soojuskao arvutamisest vastavalt standardile; ühtlasi kirjeldati kiirgusliku soojusülekande olemust Stefan-Boltzmanni seaduse näol.

Teises peatükis kirjeldati taeva temperatuuri arvutamist nii pilvise kui ka selge taeva korral, andes mõista et taeva temperatuuri on suhteliselt keeruline üheselt määrata. Kirjandusallikatest leitavad seosed annavad nii pilvise kui ka selge taeva korral taeva temperatuuriks ühe kindla väärtuse, kuigi vaatlused näitavad et selge taeva korral temperatuur sõltub vaadeldava taeva punkti nurkkõrgusest. Sellest lähtudes kirjeldati antud töös taevast tehtud termopildi abil funktsioon, mille abil saab määrata taeva temperatuuri mingil nurkkõrgusel.

Kolmandas peatükis esitati valemid, mis kirjeldavad kiirgusliku soojusvoo arvutamist hoone välispiirde ja taeva/maa vahel. Vaatluse all oli horisontaalne katus, vertikaalne sein ja mingi suvalise nurga all olev katus, need kõik nii pilvise kui ka selge taeva korral – kokku kuus olukorda.

Neljandas peatükis käsitleti piirde välispinna temperatuuri arvutamist tasakaaluolukorras, ehk siis kui pinnale saabuvate ja sealt lahkuvate soojusvoogude algebraline summa on null. Selleks kirjeldati neljanda astme võrrandi lahendamist, ühtlasi esitati lahenduskäik kuidas täpsuses oluliselt kaotamata arvutada välispinna temperatuuri kahe suvaliselt valitud temperatuuri väärtuse järgi. Põgusalt mainiti ka võimalust kuidas jõuda sarnasele lõpptulemusele modelleerimiskeskkonda *Scilab* kasutades.

Viiendas peatükis esitati mõningaid näidistulemusi mis saadi kasutades kolmandas ja neljandas peatükis kirjeldatud meetodeid. Põhitähelepanu oli erinevatel sõltuvustel, st et mil määral mingi parameetri muutudes kiirguslik kadu mõjutab standardi järgi arvutatud

soojuskadu. Ühtlasi kirjeldati *Scilab*'i näitel põgusalt kuidas ventileeritava õhkvahe kasutamine elimineerib väga efektiivselt kiirguslikust soojusülekandest põhjustatud mõju hoone soojuskaole.

Töö tulemusel selgus, et vaadeldud tingimustel on kiirguslik soojusvoog suurem kui välisõhu ja hoone piirde vahel toimuv konvektiivne soojusvoog ning hoone seest läbi piirde tulev juhtivuslik soojusvoog. Kiirguskao toimel võib piirde välispinna temperatuur langeda välisõhu temperatuurist madalamaks, ning siis muutub konvektiivse soojusvoo suund – soojus hakkab liikuma välisõhust hoone välispinnale. Tasakaaluolukorras on kiirguslikul teel lahkuv soojusvoog võrdne juhtivuslikul ja konvektiivsel teel saabuvate soojusvoogudega. Välispinna temperatuuri alanemine suurendab hoonest tulevat juhtivuslikku soojusvoogu ning seega ka arvestuslikku hoone küttevõimsust, kuid see suurenemine pole väga suur kuna välispinna temperatuur alaneb vaid mõne kraadi võrra. Siinjuures on kesksel kohal välisõhu piirikihi soojustakistus: kui see on võrdlemisi suur (näiteks 0,812 $m^2 \cdot K/W$ vabakonvektsiooni tingimustes), siis lisanduv soojuskadu läbi piirde on ca 20%; kui aga piirikihi soojustakistus on selline nagu arvutuseeskirjades ette nähtud (0,04 $m^2 \cdot K/W$), siis jääb kiirguskaost tingitud lisanduv soojuskadu läbi piirde ca 2% juurde.

Autori järeldus on, et kiirguslikku soojusülekannet lisaks arvestades pole tänapäevastele nõuetele vastavat piirde soojusisolatsiooni kasutades lisanduv soojuskadu nii suur, et seetõttu tuleks käsiraamatutes ja standardites kirjeldatud arvutusmeetodeid ümber hindama hakata. Küll aga on arvamus diametraalselt erinev selles osas, mis puudutab EMÜ Tehnikainstituudis tudengitele antavat soojusõpetust – autori arvates tuleks senisest veidi suuremat tähelepanu pöörata kiirgusliku soojusülekande tutvustamisele. Tegemist on ju täpselt sama tähtsa nähtusega nagu on teisedki soojuslevi viisid, olles seega möödapääsmatult vajalik soojustehnikat puudutava tervikliku füüsikalise maailmapildi kujundamises.

SUMMARY

The aim of the Master's Thesis was to create the basis for assessing the effect of radiant heat losses on the heat balance of a building. The first chapter briefly described the conductive and convective heat transfer to provide an overview for the calculation of heat loss of a building according to the official Standard; the nature of radiant heat transfer was also described.

The second chapter described the calculation of the sky temperature for both cloudy and clear sky, showing that the temperature of the sky is relatively difficult to determine. The methods shown in the literature give a certain value for the temperature of the sky in the case of both cloudy and clear skies, although observations show that in the case of clear sky the temperature depends on the angular height of the observed point in the sky. Based on this, a thermal image of the clear sky was used as a basis to describe a function to determine the temperature of the sky at an any given angular height.

In the third chapter, formulas were presented that describe the calculation of the radiant heat flow between the outside surfaces of a building and the sky/earth. The reviewed situations were horizontal roof, a vertical wall and a roof at any angle, both in the case of cloudy and clear sky - a total of six situations.

The fourth chapter dealt with the calculation of the temperature of the outer surface of the barrier at equilibrium, i.e. when the algebraic sum of the heat flows entering and leaving the surface is zero. For this purpose, the solution for the quartic equation was described, as well as the solution of how to calculate the external surface temperature using two arbitrarily selected temperature values, without significant loss in accuracy. The possibility of reaching a similar result using the modeling environment *Scilab* was also briefly mentioned.

Chapter 5 presents some exemplary results obtained using the methods described in Chapters 3 and 4. The focus was on the different dependencies, i.e. to what extent the addition of radiation loss affects the heat loss calculated according to the standard. The example of

Scilab was also briefly described on the use of a ventilated air gap, that effectively eliminates the impact of radiant heat transfer on the heat loss of a building.

As a result of the work, it became clear that under the observed conditions the radiant heat flow is higher than the convective heat flow between the outdoor air and the building's surface and the conductive heat flow coming from inside the building through the walls. Due to the radiation loss, the temperature of the outer surfaces can fall below the outside air temperature, and then the direction of the convective heat flow changes - the heat starts to move from the outside air to the outer surface of the building. At equilibrium, the radiant heat flux is equal to the conductive and convective heat fluxes. A decrease in the external surface temperature increases the conductive heat flux from the building and thus also the estimated heating requirement of the building, but this increase is not very large as the temperature of the external surface decreases by only a few degrees. Central to this is the thermal resistance of the ambient air boundary layer: if it is relatively high (for example, 0,812 $m^2 \cdot K/W$ during free convection), then the additional heat loss through the boundary is about 20%; however, if the thermal resistance of the boundary layer is as prescribed in the official standard (0,04 $m^2 \cdot K/W$), then the additional heat loss due to radiation loss through the boundary is only about 2%.

The author's conclusion is that considering the radiant heat transfer, the additional heat loss is not significant enough to warrant the re-evaluation of the calculation methods described in the manuals and standards. However, the opinion is diametrically different regarding the teaching of heat transfer fundamentals to students at the Institute of Technology - in the author's opinion, slightly more attention should be paid to the introduction of radiant heat transfer. This is just as important as other forms of heat transfer, and is therefore indispensable in shaping a students' complete understanding of the heat transfer fundamentals.

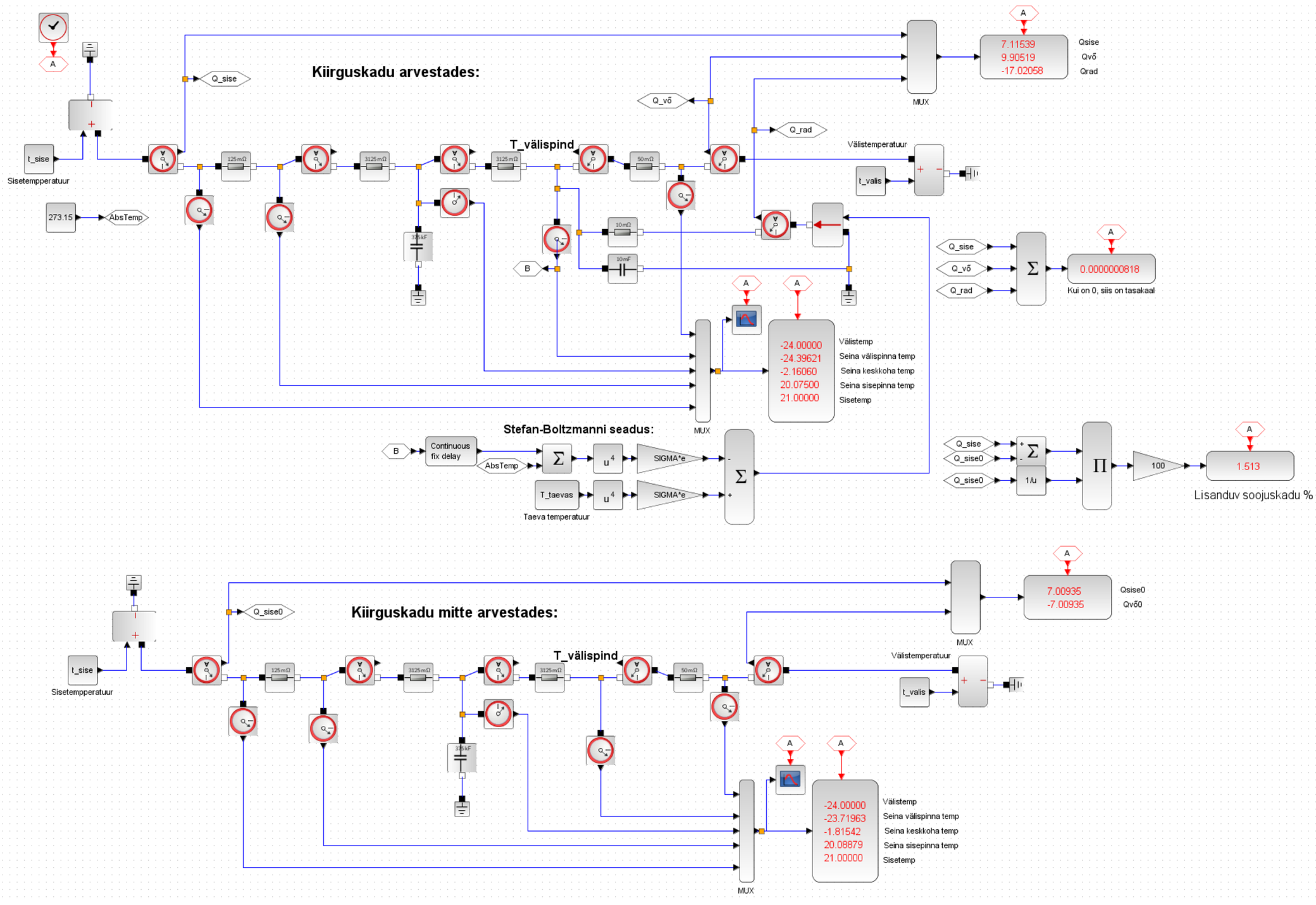
KIRJANDUSE LOETELU

1. EVS 829:2003 Hoone soojuskoormuse määramine. (2003). Tallinn: Eesti Standardikeskus. 22 lk.
2. Soojustehnika käsiraamat. (1977). /Koost. I. Mikk. Tartu: H. Heidemanni nim. trükikoda. 620 lk.
3. **Palge, V.** Elekterkuumutus. Loengukonspekt õppeaines "TE.0528 Põllumajanduslik elektrotehnoloogia."
4. **Rohsenow, W. M.** (1998). Handbook of heat transfer. Boston: McGraw-Hill. 1484 lk.
5. **Liiske, M.** (2002). Sisekliima. Tartu: Eesti Põllumajandusülikooli kirjastus. 188 lk.
6. Tehnikaleksikon. (1981). /Tõlk. L. Abo. Tallinn: Valgus. 655 lk.
7. **Cengel, Y., Ghajar, A.** (2015). Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. New York: McGraw-Hill Education. 1185 lk.
8. **Palge, V.** (2008). Soojusleviprotsesside modelleerimine *Scilab*'i keskkonnas. Tartu: Eesti Maaülikool. 94 lk.
9. **Ivand, J.** (1954). Sisepõlemismootorid. Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus. 545 lk.
10. **Majandusministeerium**. Soojusvarustuse kulude arvestamise ja jaotamise metoodika. [*on-line*] https://www.riigiteataja.ee/akt/12930302 (23.04.2021).
11. Piirdetarindite liitekohtade joonsoojusläbivuste kataloog. (2017). Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
12. Hoonete piirdetarindite soojajuhtivuse arvutusjuhis. Eesti projekteerimisnormid EPN 12.1. (1996). Eesti Ehitusteave ET-1 0404-0129. 12 lk.
13. **Yang, W.-J., Taniguchi, H., Kudo, K.** (1995). Radiative Heat Transfer by the Monte Carlo Method. San Diego: Academic Press, Inc. 215 lk.
14. **Gray, W. A., Müller, R.** (1974). Engineering Calculations in Radiative Heat Transfer. Oxford: Pergamon Press Ltd. 161 lk.
15. **Ficker, T. (**2019). General model of radiative and convective heat transfer in buildings: Part i: Algebraic model of radiative heat transfer. Acta Polytech., vol. 59, no. 3, pp. 211–223, doi: 10.14311/AP.2019.59.0211.
16. **Sima, J., Sikula, O., Kosutova, K.,Plasek, J.** (2014). Theoretical evaluation of night sky cooling in the Czech Republic. Energy Procedia, vol. 48, pp. 645–653, doi: 10.1016/j.egypro.2014.02.075.
17. IRTECH. FLIR P640. [*on-line*]. https://www.irtech-environnement.fr/userfiles/FCKeditor/P640.pdf (28.05.2021).

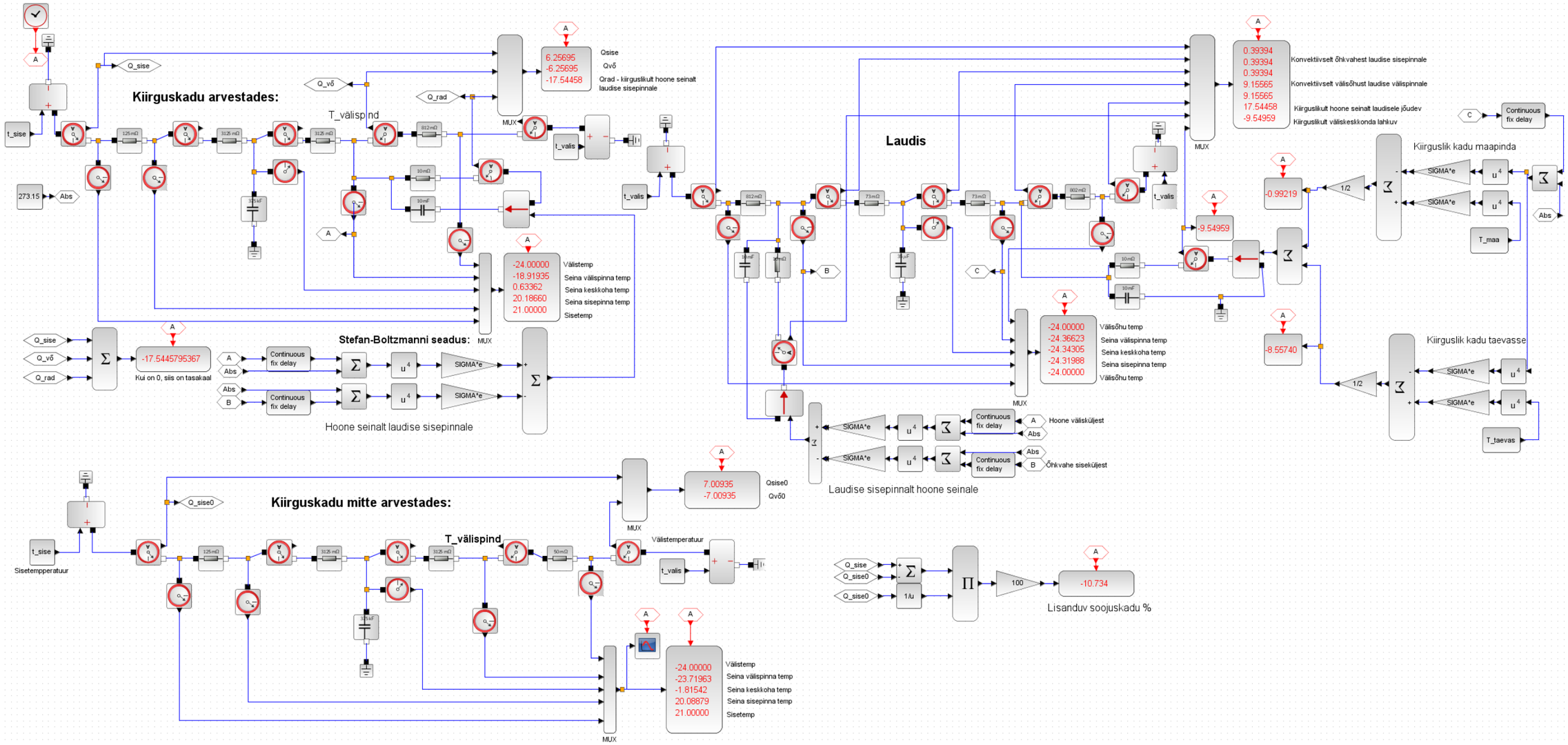
18. Juhendajalt saadud termokaameraga tehtud pilt. Tartu: EMÜ Tehnikainstituut.
19. **Modest, M. F.** (2003). Radiative Heat Transfer. San Diego: Elsevier Science. 822 lk.
20. **Kokin, E., Pennar, M., Palge, V., Jürjenson, K.** (2018). Strawberry leaf surface temperature dynamics measured by thermal camera in night frost conditions. Agron. Res., vol. 16, no. 1, pp. 122–133.
21. **Davidson, J.** (1998). Fourth Degree Polynomials. [*on-line*]. https://www.sscc.edu/home/jdavidso/Math/Catalog/Polynomials/Fourth/Fourth.html (21.05.2021).
22. Quartic function. [*on-line*]. http://physics.ujep.cz/~mlisal/nm_1/QuarticEq.pdf (21.05.2021).
23. Bauroc. ECOTERM+ välisseinaplokid. [*on-line*]. https://bauroc.ee/kalkulaatorid/u-arvu-kalkulaator/ (29.05.2021).
24. **Lind, A.** (1999). Mr Matemaatika. Tallinn: Tallinna Raamatutrükikoda. 134 lk.
25. ThermoWorks. Infrared Emissivity Table. [*on-line*] https://www.thermoworks.com/emissivity-table (29.05.2021).
26. Enamlevinud materjalide soojusjuhtivustegurid. [*on-line*] https://www.vuuk.ee/soojusjuhtivus.php. (29.05.2021).
27. EPS-isolatsioonimaterjalid. (2013). Eesti Ehitusteabe Fond. 4 lk.
28. **Holman, J. P.** (2010). Heat transfer. Boston (Mass.): McGraw Hill. 725 lk.
29. Viking Window AS. SW17 puitaken 3-kordse klaasiga. [*on-line*]. https://www.viking.ee/aknad/. (29.05.2021).

LISAD

Lisa A. *Scilab*'i mudel tasakaaluolukorra kirjeldamiseks



Lisa B. *Scilab*'i mudel õhkvahe kirjeldamiseks



Lisa C. *SciLab*'i mudeli kontekst

```
//Hoone kiirgusliku soojuskao modelleerimine
//2021-05-06 K. Paurson. SciLab 6.1.

A=1;//Seina pindala, m^2
e=0.9;//Emissioonitegur
SIGMA=0.0000000567; //Stefan-Boltzmanni konstant W/(m^2·K^4)

t_sise=21; //Siseõhu temperatuur °C
t_valis=-24; //Välisõhu temperatuur °C
t_taevas=-30; //Taeva temperatuur °C
t_maa=-25; //Maapinna temperatuur °C

T_sise=t_sise+273.15;//Siseõhu temperatuur K
T_valis=t_valis+273.15; //Välisõhu temperatuur K
T_taevas=t_taevas+273.15; //Taeva temperatuur K
T_maa=t_maa+273.15; //Maapinna temperatuur K

lambda=0.08;//Seina soojuserijuhtivus W/(m·K)
delta=0.5;//Seina kihi paksus m
c=2500; //Seina erisoojus J/(kg*K)
roo=300;//Seina tihedus kg/m^3

V=delta*A;//Seina ruumala m^3
m=V*roo;//Seina mass kg
C=c*m;//Seina soojusmahtuvus J/K

//1. Siseõhust seina sisepinnale
R_sise=0.13; //Sisemise õhukihi soojustakistus m^2*K/W
k_sise=1/R_sise;//Siseõhu soojusülekandetegur W/K

//2. Seina sisepinnalt seina keskele
```

```
k1= 1/ ( delta/(2*lambda) );
R1=1/k1;

//3. Seina keskelt seina välispinnale
k2=1 / ( delta/(2*lambda) );
R2=1/k2;

//4. Seina välispinnalt välisõhku
R_valis=0.04; //Sisemise õhukihi soojustakistus m^2*K/W
R_valis_vaba=0.812; //Sisemise õhukihi soojustakistus vabakonvektsiooni korral m^2*K/W
k_valis=1/R_valis;//Välisõhu soojusülekandetegur W/K
k_valis_vaba=1/R_valis_vaba;//Välisõhu soojusülekandetegur W/K vabakonvektsiooni
korral

//Õhkvahe - laudise andmed
delta_laudis=0.020; //Laudise paksus 20 mm
lambda_laudis=0.17; //Puidu soojuserijuhtivus W/(m*K)
c_laudis=2720;//Puidu erisoojus J/lh*K
roo_laudis=415;//Puidu tihedus kg/m^3

V_laudis=A*delta_laudis;// Laudise ruumala m^3
m_laudis=V_laudis*roo_laudis;//Laudise mass kg
C_laudis=m_laudis*c_laudis;//Laudise soojusmahtuvus J/kg

//Laudise välispinnalt keskele
k_laudis= 1/ ( delta_laudis/(2*lambda_laudis) );//Laudise soojusjuhtivus välispinnalt
laudise keskele
R_laudis=1/k_laudis;//Laudise soojustakistus välispinnalt laudise keskele
```

Lisa D. Välispinna soojusülekandeteguri leidmine vabakonvektsiooni tingimustes

Vertikaalne sein. Arvutuskäik vastavalt allikale [7].

Lähteandmed: välisõhu temperatuur $t_{v\tilde{o}}$ = –24 °C; $T_{v\tilde{o}}$ = 249,15 K

piirde välispinna temperatuur t_{vp} = –24,46 °C; T_{vp} = 248,69 K

piirikihi temperatuur $T_f = \frac{T_{v\tilde{o}} + T_{vp}}{2} = \frac{249{,}15 + 248{,}69}{2} = 248{,}92$ K

piirde kõrgus h = 3 m

raskuskiirendus g = 9,81 m/s^2

Õhu andmed –20 °C korral:

soojusjuhtivus U = 0,02211 W/(m·K)

kinemaatiline viskoossus ν = 0,00001169 m/s^2

$$paisumistegur\ \ \beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{248{,}92} = 0{,}0041\ \frac{1}{\mathrm{K}}$$

Prantdli arv Pr = 0,7408

Rayleigh' arv:

$$Ra_L = \frac{g\beta\left(T_{v\tilde{o}} - T_{vp}\right)Pr \cdot h^3}{\nu^2} = \frac{9{,}81 \times 0{,}041 \times (249{,}15 - 248{,}69) \times 0{,}7408 \times 3^3}{0{,}00001169^2} =$$

$$= 2{,}708 \times 10^{10}$$

Nusselti arv:

$$Nu = \left(0{,}825 + \frac{0{,}387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0{,}492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = \left(0{,}825 + \frac{0{,}387(2{,}708 \times 10^{10})^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0{,}492}{0{,}7408}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = 166{,}98$$

Väliskihi soojusülekandetegur:

$$\alpha_v = \frac{U}{h} Nu\ = \frac{0{,}02211}{3} \times 166{,}98 = 1{,}231\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{K}}$$

Väliskihi soojustakistus

$$R_v = \frac{1}{\alpha_v} = \frac{1}{1{,}231} = 0{,}812\ \frac{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{K}}{\mathrm{W}}$$

LIHTLITSENTS

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Kaarel Paurson, sünniaeg 13.02.1982

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

Kiirguskadude mõju analüüs hoone soojusbilansile,

mille juhendaja on Eugen Kokin,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor Kaarel Paurson (allkirjastatud digitaalselt)

allkiri

Tartu, 31.05.2021

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Eugen Kokin (allkirjastatud digitaalselt) 31.05.2021

(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)