H. Oruvee, A. Adamson

EHITUSFÜÜSIKA

Tallinn 1967

A-28789

TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT
Arhitektuuri kateeder

H. Oruvee
A. Adamson

E H I T U S F Ü Ü S I K A

Õppevahend

Tallinn
1967

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра архитектуры

Орувээ Х.
Адамсон А.

СТРОИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

Учебное пособие

На эстонском языке

N
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
110499

S I S U K O R D

		Lk.
I ptk.	Arhitektuuriakustika	6
	Sissejuhatus	6
	1. Akustika põhimõisted ja ühikud . . .	6
	2. Ruumiakustika alused	11
	a. Helilainete peegeldumine	11
	b. Ruumi järelkõla ja selle arvutamine	15
	c. Akustilised viimistlusmaterjalid	19
	d. Ruumiakustika lokaalsed tunnused	20
	3. Ehitusakustika	23
	a. Müra ja selle iseloom	23
	b. Õhumüra leviku tõkestamine	25
	c. Müra edasikandumine hoones	27
	d. Ühekihiliste konstruktsioonide mürakindlus	28
	e. Kriitiline sagedus ja lainete kokkulangemise efekt	30
	f. Ühekihiliste piirete heliisolatsiooni arvutus	32

g. Mitmekihiliste piirete heliisolatsioon 34
h. Löögimüra tõrje 35
II ptk. Valgustustehnika 37
Sissejuhatus 37
1. Põhimõisted ja ühikud 38
2. Loomulik päevavalgustus 40
a. Ruumide loomuliku valgustuse arvutuse üldidee 40
b. Vahetu päevavalgustusteguri e_v arvutus 43
c. Ruumi pindadelt peegeldunud valguse e_p arvutus 46
d. Vastasasuvate hoonete seintelt peegeldunud valguse e_t arvutus 47
e. Maapinnalt ruumi peegeldunud valguse e_m arvutus 47
3. Ruumide insolatsioon 49
a. Insolatsioonikestus 49
b. Insolatsiooni soojuslik mõju. . . . 51
III ptk. Ehituslik soojafüüsika 54
Sissejuhatus 54
1. Põhimõisted ja ühikud 54
2. Piirdekonstruktsioonide soojatehnilised näitajad 67
3. Hoone piirdekonstruktsioonide soojapidavuse arvutus 76
4. Piirdekonstruktsioonide niiskusrežiim 84
Soovitatav kirjandus 91

S õ n a s e l e t u s i

akustiline signaal - vajalikku informatsiooni või katsematerjali sisaldav heliprotsess

artikulatsioon - seoseta silpide selge kuuldavus, hinnatakse tavaliselt selgesti kuuldud silpide protsendina hääldatud silpidest

baar - helirõhu ühik = 10^{-1} N/m^2

detsibell - füüsikaline helitugevuse (või helirõhu) nivoo ühik - kümnekordne logaritm helitugevuse ja sellega võrreldava helitugevuse (etaloni) suhtest

foon - psühhofüüsikaline helivaljuse ühik, oleneb nii helitugevusest kui ka -sagedusest, arvuliselt võrdne detsibellidega helisageduse juures 1000 Hz

(kuuldav) heli - elastses keskkonnas kulgev mehaaniline lainetus, mis tekitab inimkõrvas kuulmisaistingu sagedusega 16 - 16000 Hz

hääl - loomulike heliallikate (laulja, kõneleja, pill) vahetult või reprodutseeritult tajutav heliprotsess

helivälja difuussus - helivälja olukord, kus erinevatest suundadest saabuvate helipeegelduste arv on küllalt suur ja energiahulgad võrdsed

helitoitumus - saalis või auditooriumis kuulajate kohtadel kujunev helivaljus, mis on vajalik normaalseks kuuldetajuks, arvestades ruumi sügavmüra maskeerivat toimet

müra - soovimatu või segav heli

müraspekter - müra koostisosade analüüs helisageduse ja -intensiivsuse järgi

piirde aurutakistus - piiret läbiva auruvoolu pöördväärtus

piirde müratakistus - kümnekordne logaritm piirdele langeva ja piiret läbiva müratugevuse suhtes

piirde soojatakistus - piiret läbiva soojavoolu pöördväärtus

päevavalgustuse tegur - ruumi valgustust välisvalgustusega võrdlev suurus (protsentides)

valgustugevus - valgusallika (fotomeetriline) tugevus

valgustustugevus - pinnavalgustus, oleneb pinnale langeva valgusvoo suurusest

E e s s õ n a

"Ehitusfüüsika" on mõeldud järgmiste erialade üliõpilastele: arhitektuur, tööstus- ja tsiviilehitus ning ehitustööstuse organiseerimine. Õppevahend on osa arhitektuuri kursusest (ehitajaile ja ehitusökonomistidele), samuti vastab samanimelisele kursusele arhitektide õppeplaanis, kuid on tunduvalt lühendatud.

Töö kujutab esmakordset katset süstemaatilise ehitusfüüsika kursuse väljaandmiseks eesti keeles ja on sellepärast vajalikuks materjaliks ka projekteerijatele, arhitektidele ning inseneridele.

Norme ja eeskirju on töös käsitletud minimaalselt ning seda ainult mõningate põhiküsimuste praktiliseks tõlgendamiseks. Küll on aga selgitatud normeerimise põhimõtteid ning normide rakendusalasid.

I ja II peatüki ("Arhitektuuriakustika" ja "Valgustustehnika") autoriks on H. Oruvee, III peatüki ("Ehituslik soojafüüsika") autoriks on A. Adamson.

I peatükk

ARHITEKTUURIAKUSTIKA

Sissejuhatus

Sajanditepikkusele suhtelisele vaikusele tehnilises akustikas järgnes selle teadusharu tormiline areng alates 20. saj. kahekümnendaist aastaist. Tänapäeva akustika mitmekülgsed ülesanded võib jagada kahte põhirühma, mille lahenduse lõppeesmärgid on erinevad. Esimese rühma moodustavad probleemid, mille eesmärgiks on tagada kuulajatele saalis täisväärtuslik ning moonutusteta helitoitumus, mis on seotud tämbri loomulikkusega, segavkaja puudumise ja parima kõlavusega. Heli on nendel juhtudel kasuliku informatsiooni kandjaks - signaaliks.

Teise rühma kuuluvad ülesanded, mis on seotud segavhelide nõrgendamise või isoleerimisega. Taolisi helisid nimetatakse müraks. Helide jaotus signaalideks ja müraks põhjustab ehitustega seotud akustika jagunemise kahte ossa: arhitektuuri- ja ehitusakustikaks. Mõlemad osad on omavahel vahetult seotud ning jaotus on vaid tinglik, kuid see võimaldab käsitleda materjali süsteemikindlamalt.

1. Akustika põhimõisted ja ühikud

Juba Aristoteles (4. saj. e.m.a.) seletas heli olemust võnkuva keha tekitatud hõrenduste ja tihendustega õhus. Heli kõrguse ja võnkesageduse seostamine toimus aga alles 17. saj. (G. Galilei ja M. Mersenne). 1738.a. määras L.Eu-

ler kuuldava heli võnkesageduse vahemikus 20 - 4000 võnget sekundis. 1856.a. ilmusid H. Helmholtzi tööd, kus antakse heli analüüs ja kaasaegse muusikaakustika alused. 1878.a. ilmus J. Rayleigh' "Hääle teooria", milles esitatakse akustika ühtne teooria.

Helivõnked levivad mistahes elastses keskkonnas korrapäraste (piki)lainetena, mis on moodustatud keskkonna hõrenduste ja tihendustena, seega rõhu muutuste pideva levikuga. Helilainete levikuala nimetatakse heliväljaks. Helivälja füüsikalist olukorda iseloomustatakse helirõhu ja võnkekiirusega.

Helirõhk p väljendab väga kiiret keskkonna rõhu muutumist, võrreldes keskmise rõhuga helilainete puudumise korral.

Helirõhu ühikuks on b a a r $(= 10^{-1} \frac{N}{m^2})$.
Tihenduse faasis on rõhk positiivne, hõrenduse faasis aga negatiivne.

Võnkekiiruseks v nimetatakse keskkonna osakeste liikumise kiirust helilaines. Ühikuks on m/s. Kui keskkonna osakesed liiguvad lainerinde liikumise suunas, on v positiivne, vastupidisel juhtumil aga negatiivne.

Kui keskkonna tiheduse muutused on võrdelised rõhu muutustega, sõltuvad helirõhk ja võnkekiirus teineteisest järgmiselt:

$$p = \rho c v,$$

kus ρ - keskkonna tihedus,
c - heli kiirus selles keskkonnas.

Suurust ρc nimetatakse keskkonna akustiliseks e r i t a k i s t u s e k s, mida mõõdetakse akustilistes oomides $(10^5 \frac{N \cdot s}{m^5} = \frac{dyn \cdot s}{cm^5})$.

Helilainete levikuga kaasneb ühtlasi helienergia edasikandumine.

Heli i n t e n s i i v s u s I antud heliväljapunktis näitab helienergia hulka, mis 1 sekundi jooksul lä-

bib helilainete levikusuunale ristiolevat pinnaühikut (näiteks 1 m^2). Heli intensiivsust mõõdetakse vattides ruutmeetri kohta W/m^2.

Praktilistel mõõtmistel on kasulik heli intensiivsust väljendada helirõhu kaudu. Viimast võib määrata mikrofoni võimendiga seotud mõõteriistaga:

$$I = pv = \frac{p^2}{\rho c} .$$

Avaldusest nähtub, et heli intensiivsus on võrdeline helirõhu ruuduga.

Looduses esinev ja ka kõrvaga tajutav heliintensiivsuste skaala on väga lai. Minimaalne kuulmisaistingut tekitav heli intensiivsus on $10^{-13} W/m^2$, kõrvas valutunnet tekitav intensiivsus aga $10^{-1} W/m^2$. Arhitektuuriakustikas kasutatakse nii heli intensiivsuse kui ka heli rõhu hindamiseks suhtelisi logaritmilisi ühikuid d e t s i b e l l e (dB).

Detsibellides määratav heli tugevuse tase (nivco) on kümnekordne logaritm võrreldavate heliintensiivsuste suhtest ehk kahekümnekordne logaritm vastavate helirõhkude suhtest:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} .$$

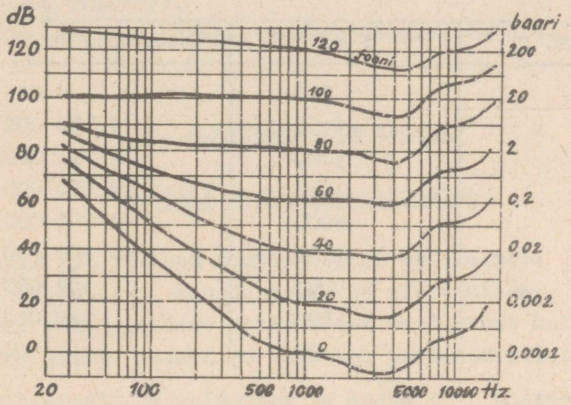
Heli tugevuse taset võrreldakse tavaliselt rahvusvaheliselt määratud kuuldelävele vastava suurusega I_0 etalonheli puhul (sagedusega 1000 Hz), kus $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2.

10 korda suuremat mõõtühikut bell (B) kasutatakse vähe. Inimkõrv tajub heli tugevust võrdeliselt intensiivsuse logaritmiga. Seega on nivoode skaala otstarbekohane, kuid jääb ikkagi puhtfüüsikaliseks. Subjektiivne heli valjuse taju sõltub peale selle veel heli sagedusest.

Heli valjust kui psühhofüüsilist suurust mõõdetakse f o o n i d e s.

1000-hertsise sagedusega heli valjus on 1 foon, kui tema intensiivsuse tase on 1 detsibell. Definitsioonist järeldub, et 1000-hertsise sageduse korral on heli intensiivsuse

tase detsibellides võrdne heli valjusega foonides. Teiste sageduste korral on arvud erinevad, kuna kõrv on vähem tundlik helisagedustele, mis on väiksemad kui 1000 Hz ja suuremad kui 7 kHz. Kõrva tundlikkus on suurim vahemikus 2 - 5 kHz, mistõttu selles piirkonnas hinnatav heli valjus on suurem kui intensiivsuse tase. Seejuures kõrge intensiivsuse taseme puhul on erinevused detsibellide ja foonide skaalal tunduvalt väiksemad kui madala taseme puhul (joon. 1).



Joonis 1.

Kui heli sagedust mõõdetakse hertsides (Hz), siis sageduse i n t e r v a l l i mõõtühikuna kasutatakse o k t a a v i. Ühe oktaavi korral on intervalli äärmiste sageduste suhe 2, kahe oktaavi korral 4 jne.

Arhitektuuriakustikas on kasutusel järgmised standardsagedused (oktaaviliste intervallidega):[x]

62,5, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz. Normaalne kõrv tajub helisagedusi 20 - 16000 (20 000) Hz. Ku-

---

[x] Kui $\frac{f_2}{f_1} = 1{,}26$, loetakse heliriba laiuseks 1/3 oktaavi.

na heli sagedus on pöördvõrdeline lainepikkusega, on lainepikkused õhus normaaltemperatuuril vastavalt 17 - 0,017 m.

Lainepikkus leitakse avaldusest:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

kus λ - helilaine pikkus m,
c - heli kiirus m/s,
f - sagedus.

T a b e l 1

Heli kiirused ja akustilised takistused (20°C)

Materjal	V m/s	$\rho \cdot c$ kg/m^2·s
Õhk	342	413
Vesi	1450	1 430 000
Puit	3000	2 770 000
Tellismüür	3600	7 610 000
Betoon	4000	8 000 000
Teras	5000	40 400 000
Klaas	5200	17 300 000
Kork	500	120 000
Kummi	40	4 600

T a b e l 2

Helilaine pikkused

	Heli sagedus	20	50	100	200	500	1000	2000	4000	10000	20000
Helilaine pikkus m	Õhus	17	7	3,4	1,7	0,68	0,34	0,17	0,085	0,034	0,017
	Puidus	150	60	30	15	6	3	1,5	0,75	0,33	0,15
	Tellis-seinas	180	72	36	18	7,2	3,6	1,8	0,9	0,36	0,18

Heliintensiivsuste taseme skaala (dB)

0 - (alumine) kuuldelävi,
10 - tasane sosin, lehtede nõrk sahin,
20 - kella tiksumine, väga vaikne korter,

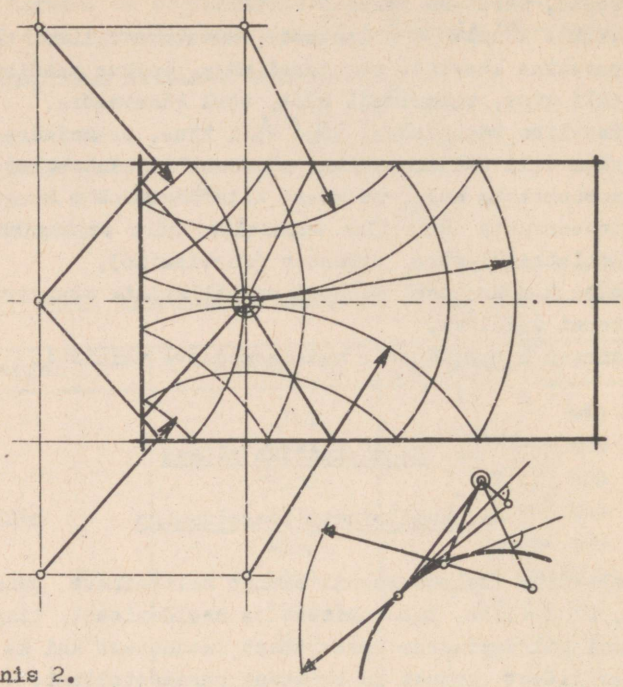
30 - sosin, müratase vaikses korteris,
40 - vaikne kõnelus 1 m kaugusel, müratase vaiksel tänaval,
50 - tavaline kõnelus, veekraani müra, vaikne raadiomuusika,
60 - vali kõne, tolmuimeja müra, nõrk tänavamüra,
70 - tavaline tänavamüra, väga vali kõne, trammimüra,
80 - väga vali raadiomuusika, müratase liiklusmagistraalil,
90 - mootorratta müra, müratase kiirrongist 4 m kaugusel,
100 - mootorratta müra ilma summutita, müra sepatsehhis,
110 - katlatsehhi müra, orkester (fortissimo),
120 - müra 3 m kaugusel lennuki propellerist: standardse tooni valulävi,
130 - sireen 2 m kaugusel: madalsageduste valulävi.

2. Ruumiakustika alused

a. Helilainete peegeldumine

Helivälja iseloom ruumis oleneb helilainete peegeldumisest, hajumisest, koondumisest ja neeldumisest, tingituna nii ruumi piirdepindade vastavatest omadustest kui ka ruumi geomeetrilisest kujust ja teistest parameetritest.

Helilainete peegeldumist ja hajumist piirdepindadelt võib kujutada nn. lainerinde abil. Liikuva laine rinne ruumis kujutab endast pidevat pinda, mille kõik punktid antud momendil on ühesuguses võnkefaasis. Laine liikumise suund (telg) mistahes punktis on risti lainerinde puutujaga. Praktilistel kaalutlustel asendatakse lainerinne sageli helitrajektooridega (laine liikumise teljega teatud suunas). Helilaine võib pinnalt peegelduda või hajuda, olenevalt pinna iseloomust, suurusest ja viimase suhtest heli lainepikkusega. Suhteliselt siledalt ja lainepikkusega võrreldes suurelt pinnalt peegelduvad helilained ühes kindlas suunas, kusjuures langemisnurk võrdub peegeldumisnurgaga ja langeva laine ning peegeldunud laine telg asuvad ühes tasapinnas peegelpinna normaaliga (samas kokkupuutepunktis). Need reeglid võimaldavad projekteerijal teadlikult määrata helilaineid peegeldavate pindade orientatsiooni saalis.



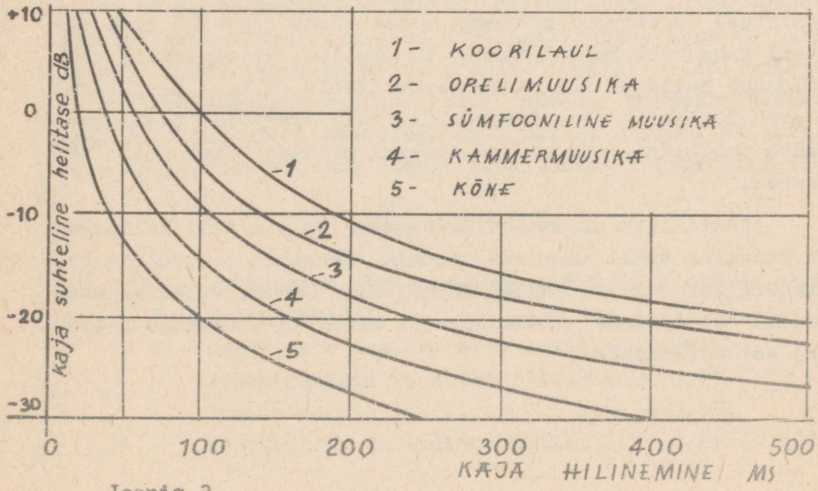
Joonis 2.

Heli hajumist esineb juhtudel, kui piirdepindade liigendus on mõõtmeilt lähedane heli lainepikkusele, samuti ka suhteliselt väikesemõõdulisest heliallikast lähtuva helilaine kokkupuutumisel tasa- või kumerpinnaga. Vastupidine nähtus, helilainete koondumine, esineb peegeldumisel suhteliselt väikese kõverusraadiusega nõguspindadelt. Nõguspinnad ruumis (näit. nõgus tagasein sektorikujulise põhiplaaniga ruumis, kuppellagi jne.) projekteeritagu sellise raadiusega, et lainete koondumise fookused ei satuks kuulajate tsooni.

Mõnel juhul võib nõguspind ka hajutada helilaineid. Kui heliallikas on pinnale lähemal kui 0,5 r või kui kaugus peegeldava pinna ja kuulaja vahel on mitu korda suurem kui pinna kõverusraadius (näiteks gooti kirikutes), on helilainete levikusuunad ikkagi hajuvad, kuigi läbivad ühe või mitu pinnalähedast fookust.

Väikese kõverusraadiusega kumerpindade (poolsilindrid) kasutamine on soovitav näiteks elliptilise põhiplaaniga saalis. Põhjuseks ei ole ainult nõguspinnast tekkivate fookuste ärahoidmine. Siledapinnalises ümmarguses saalis peegelduvad helilained peamiselt perimetraalselt, sattumata saali keskmisse tsooni. Peegeldumisel kumerpindadelt suundub aga osa helilaineid "sügavamale" saali.

Seoses peegeldumisnähtustega peab projekteerija arvestama ka ajalisi intervalle otsese helilaine ja sama informatsiooni kandvate peegeldunud helilainete vahel. Intervallist olenevalt võivad helipeegeldused a) tugevdada otsest heli ja sellega parandada kuuldavust või b) mõjuda otsesele helile segavalt, halvendades kuuldavust. Kriitilise intervalli suurus oleneb ettekande liigist. Kõne puhul on lubatavaks intervalliks 50 millisekundit ($\frac{1}{20}$ s). Muusikapalade puhul lubatav maksimaalne hilinemine võib olla 100 millisekundit (ms) ja enam, olenevalt muusika rütmist ning ettekande iseloomust. Olukorda mõjutavad veel peegeldunud helilainete intensiivsuse tase, suund ja heli tämber. Kui peegeldunud heli on tunduvalt otsesest nõrgem, võib kriitiline intervall pikeneda. Üle 10-dB vahe puhul peegeldunud helilained kuuldavust ei mõjuta (vt. joon. 3).



Joonis 3.

Kriitilise intervalli ületamise korral (helipeegelduste kõrge taseme puhul) hilinenud helipeegeldused põhjustavad kaja. Otsese ja peegeldunud heli vahel kujuneb paus ehk teisiti öeldult: heliprotsess katkeb. Kõne puhul ja lühikestest heliimpulssidest koosneva ettekande korral on maksimaalseks lubatavaks otsese ja peegeldunud laine teekonna pikkuste vaheks normaaltemperatuuril 17 m.

Kaja vältimiseks kasutatakse hilinenud peegeldusi põhjustavate pindade katmiseks heli neelavaid materjale, samuti annab tulemusi nende pindade liigestamine.

Eriline korduv kaja võib tekkida intensiivselt peegeldavate paralleelsete seintega saalides (silekrohv, marmor). Lühikestest heliimpulssidest tekkiv mitmekordne kaja e. flatter mõningates ruumi punktides moonutab tugevasti ettekannet. Selle vältimiseks piisab ühe seina viimistlusmaterjali muutmisest või selle seina geomeetrilise kuju muutmisest.

Heli peegeldumise nähtusi kasutatakse teadlikult suurtes kontserdi- ja teatrisaalides vastavate akustiliste ekraanide projekteerimisel. Helitaseme tõstmiseks saali kaugemas osas paigutatakse estraadi või lava kohale kaldasendis peegelpinnad - ekraanid, mille mõjujõud sõltub heli lainepikkuse ja ekraani mõõtmete vahekorrast ($d_e \gg \lambda$) ning ekraani kaugusest heliallikani. On oluline, et ekraanilt peegeldunud helid ei moonutuks tämbriliselt, s.o. peegelduma peavad ühtlaselt kõik komponendid heli spektris. Madalsageduste peegeldumiseks peavad ekraani mõõtmed olema küllaltki suured.

Akustiliste ekraanide ülesandeks pole ainult helitaseme tõstmine saali kaugemas tsoonis. Ekraanid peavad osa helienergiast suunama tagasi esinejaile. See on vajalik esinejate "enesetunde" tõstmiseks ja ansambli koosmängu (-laulu) soodustamiseks.

b. Ruumi järelkõla ja selle arvutamine

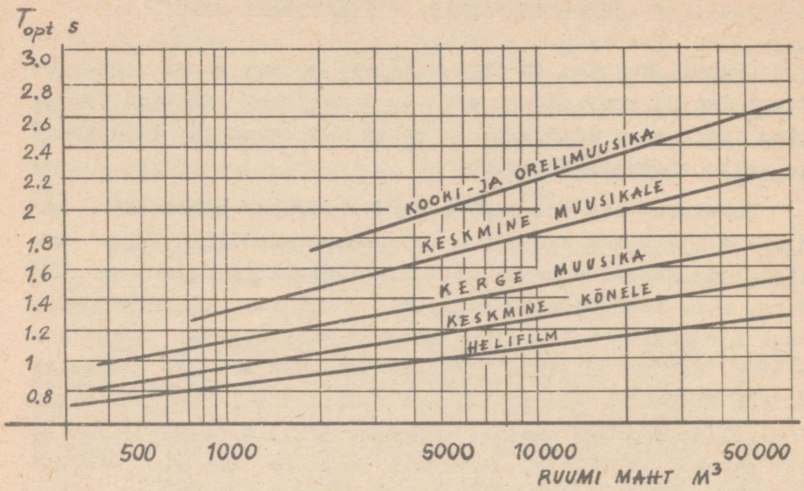
Ruumi akustika on orgaaniliselt seotud ruumi arhitektuurilise ja konstruktsioonilise lahendusega. Helide vastuvõtu tingimused sõltuvad nii ruumi suurusest ja kujust kui ka selle siseviimistlusest.

Ruumiakustika vanimaks kvantitatiivseks näitajaks on j ä r e l k õ l a k e s t u s, s.o. aeg, mille vältel helienergia tase langeb 60 dB võrra. Järelkõla mõiste on üldine, s.o. iseloomustab ruumi kui tervikut. Järelkõlakestust mõõdetakse heliallika tegevuse katkestamise momendist alates. Kui heliallikas lõpetaks tegevuse väljas, järgneks vaikus otsekohe. Ruumis toimuva akustilise protsessi tõttu (helilainete peegeldumine, hajumine jne.) kuuleme lühemat või pikemat järelkõla. Järelkõla on pidev, kui ei ületata ülalmainitud kriitilist intervalli helipeegelduste ja otsese heli vahel.

Liiga pikk järelkõla põhjustab üksteisele järgnevate helide kattumist ning on ebasoovitav mitte ainult kõnele, vaid ka kiiretempolisele ja -rütmilisele muusikale. Osa muusikat - eriti sümfooniline ja orelimuusika - pääseb aga paremini mõjule just pika järelkõlaga ruumis. Lühike järelkõlakestus ei soodusta muusikalisi ettekandeid. Liiga väikese järelkõlakestusega ruumis on kõneldagi raske. Kõne on kuiv ja vähekandev. Muusika kõlab hoopis "matilt". Sellepärast on järelkõlakestuse suuruse valik ruumide projekteerimisel oluliseks teguriks. Katsetega on kindlaks tehtud, et järelkõla optimaalne väärtus oleneb ruumimahust logaritmiliselt:

$$T_{opt}^{500} = k \log V,$$

kus T_{opt}^{500} - optimaalne järelkõlakestus 500-Hz sageduse puhul,
V - ruumi maht m^3,
k - tegur, mis iseloomustab ruumi otstarvet:
ooperiteatrid ja kontserdisaalid - 0,41,
draamateatrid ..... - 0,36,
kinoteatrid ja auditooriumid ... - 0,29.



Joonis 4.

Järelkõlakestus muutub koos helisagedusega, sest ruumi viimistlusmaterjalide helineeldumine oleneb helisagedusest. Sageli ei ole selline muutus soodus helitaju seisukohast. Arvestades subjektiivse helitaju iseärasusi ning ettekannete iseloomu, tuleb pidada soovitavaks:

kõnesaalides - muutumatut järelkõlakestust sagedusalas 250 - 3000 Hz. All- ja ülevalpool seda ala võib järelkõlakestus langeda;

kinosaalides - muutumatut järelkõlakestust sagedusalas 250 - 2000 Hz ±15%. Allpool 250 Hz võib järelkõlakestus muutuda ±25 ...15% ja ülevalpool 2000 Hz -30%;

muusikateatrites ja kontserdisaalides - 125 Hz puhul on tõus järgmine: $T_{opt}^{125} = 1{,}5\ T_{opt}^{500}$; vahemikus 250 - 2000 Hz konstantne ±10%, ülevalpool 2500 Hz kerge tõus kuni 4000 Hz, seejärel langus -30%.

Ruumi järelkõlakestust on võimalik arvutada, kui heliväli on isotroopne ja difuusne. Viimane asjaolu tähendab, et kuulajani peab saabuma helipeegeldusi küllaltki väikeste ajaintervallide tagant võimalikult paljude ruuminurkade ulatuses. See asjaolu eeldab ruumi pindade vastavat geo-

meetrilist käsitlust kui ka helineelavate materjalide ühtlast paigutust.

Põhimõtteliselt määrame järelkõlakestuse T kogu helilaine poolt läbikäidud tee pikkuse L_1 (alates heliallika tegevuse katkestamisest, kuni heliintensiivsuse taseme languseni 60 dB võrra) jagamisega heli levimiskiirusega.

Järelkõla lõpuni läbikäidud tee pikkuse võib leida ka helilaine keskmise vaba teekonna pikkuse abil, mõõdetuna ruumi piirdepindade vahel (ühest piirdega kokkupuutepunktist teiseni) P_k, korrutades seda n peegeldusega, mis on kulunud selleks, et helienergia tase langeks 60 dB võrra.

Seega $P_k n = L_1$.

Samuti $L_1 = cT$ (c - heli kiirus),

järelikult

$$T = \frac{P_k n}{c}.$$

Keskmine vaba teekonna pikkus P_k on statistiline suurus. Risttahukakujulises saalis

$$P_k = \frac{4V}{S},$$

kus V - ruumi maht,
S - ruumi pindade kogupindala.

Arvutused näitavad, et ka teistsuguse kujuga saalides P_k erineb vähe. Asendades P_k saadud tulemusega, saame:

$$T = \frac{4Vn}{cs},$$

kuna c = 340 m/s, siis

$$T = \frac{4Vn}{340\,S}.$$

Avaldusest selgub, et ruumi järelkõlakestus tuntud suuruste V ja S kõrval oleneb vaid tundmatust n, s.o. peegelduste arvust kuni helienergia nivoo languse -60 dB saavutamiseni.

Selle suuruse tuletame järgmiselt. Olgu helienergia ruumtihedus E_0. Oletades, et kõikide pindade keskmine helineeldumistegur on α (α näitab, milline osa helienergiast neeldub ühekordsel helilaine kokkupuutumisel piirdepinnaga), siis helienergia tihedus pärast esimest peegeldust on

$$E_1 = E_0 - E_0 = E_0(1 - \alpha),$$

pärast teist peegeldust:

$$E_2 = E_0(1 - \alpha) - E_0(1 - \alpha) = E_0(1 - \alpha)^2,$$

pärast kolmandat peegeldust:

$$E_3 = E_0(1 - \alpha)^3$$

ja pärast n peegeldust:

$$E_n = E_0(1 - \alpha)^n.$$

Esitame nüüd selle avalduse järgmisel kujul:

$$\frac{1}{(1-\alpha)^n} = \frac{E_o}{E_n},$$

$$(1-\alpha)^{-n} = \frac{E_o}{E_n}.$$

Et $\frac{E_o}{E_n} = 10^6$, siis $(1-\alpha)^{-n} = 10^6$.

Logaritmides avalduse (naturaallogaritmide kasutamisega)

$$-\ln (1-\alpha)^n = 10^6,$$

millest

$$n = \frac{\ln 10^6}{-\ln (1-\alpha)}.$$

Sama kümnendlogaritmide kasutamisel:

$$n = \frac{2{,}3 \log 10^6}{-\ln (1-\alpha)} = \frac{2{,}3 \cdot 6}{-\ln (1-\alpha)} = \frac{13{,}8}{-\ln (1-\alpha)}.$$

Leitud n väärtust järelkõlakestuse valemisse asetades saame:

$$T = \frac{4\ V\ 13{,}8}{-340\ S \ln (1-\alpha)}$$

ehk $$T = \frac{0{,}162\ V}{-S \ln (1-\alpha)}.$$

Kui α keskmine väärtus on väiksem kui 0,2, võrdub $\ln(1-\alpha)$ ligikaudu α-ga. Sellel juhtumil on praktiline järelkõlakestus

$$T = \frac{0{,}164\ V}{\Sigma \alpha S}.$$

Selles valemis $\alpha = \frac{A}{S}$,

kus $A = \alpha_1 \cdot F_1 + \alpha_2 \cdot F_2 + \alpha_3 \cdot F_3 + \ldots \alpha_n F_n$,

s.o. ruumi piirdepindade kogu helineeldumine,

S = helineelavate pindade kogupind ΣF.

Peale ruumis olevate piirete ja esemete püsiva helineeldumise tuleb arvestada veel muutuvat helineeldumist, mille suurus oleneb kuulajate-vaatajate arvust. Muutuvale helineeldumisele vastav A saadakse inimeste arvu korrutamisel vastava teguriga α.

c. Akustilised viimistlusmaterjalid

Viimistlusmaterjalide helineeldumistegureid määratakse erilistes pika järelkõlaga ruumides, nn. reverberatsioonikambrites. Tegur α arvutatakse järelkõlakestuste vahest, mis tekib küllaldase koguse katsematerjali sisseviimisel. Kambri maht peab olema vähemalt 200 m^3, heliväli selles - täielikult hajus. Katsetatava materjali kogus peab olema 10–12 m^2. Heliallikana kasutatakse kas müra- või tuiksagedusgeneraatorit (müra kasutatakse 1/3-oktaavribadena), järelkõlakestust registreeritakse isekirjutava reverberomeetriga.

Seni kasutatavad akustilised materjalid ei ole universaalsed. Igal konkreetsel juhtumil on tarvis valida saalide viimistluseks mitu eri materjali, mille akustilised omadused annaksid kombineeritult soovitud tulemuse.

Akustilised materjalid jagunevad nelja põhirühma:

1) kerged poorsed materjalid,
2) õhukeseseinalised siledapinnalised materjalid,
3) perforeeritud kattega (poorsed) materjalid,
4) kombineeritud materjalid ruumilistest elementidest.

T a b e l 3

Pinnamaterjalide helineeldumistegurid (α)

Materjali nimetus	Helisagedus Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
A. Tavalised ehitusmaterjalid						
Krohvimata tellissein	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Krohvitud ja värvitud tellissein	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Aknaklaas puitraamidel	0,49	-	0,12	-	0,05	-
Linoleum	0,02	-	0,03	-	0,04	-
Männipaneel	0,10	0,11	0,10	0,09	0,08	0,11
Kummipõrand	-	0,05	0,05	0,10	0,05	-
Puitpõrand	0,09	-	0,08	-	0,10	-
Valubetoon	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Vilt (2,5 cm paks)	0,09	0,34	0,55	0,66	0,52	0,39

Materjali nimetus	Helisagedus Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Puuvillkangas seinal 360 g/m^2	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
B. Akustilised materjalid ja poolfabrikaadid						
Arboriit, tavaline, 2 cm paks	0,28	0,32	0,44	0,46	0,48	0,53
Akustiline krohv 3,5 cm	0,22	0,27	0,31	0,31	0,33	0,40
Poroloon 2 cm	0,12	0,32	0,5	0,6	0,6	0,6
Mipoor (vahtplastmass) 3 cm	-	0,25	0,6	0,7	0,9	0,9
TEP-plaat (ENSV toode) 7 cm, alusraamile kinnitatult	0,15	0,59	0,59	0,65	0,63	0,80
Sama, tihedalt vastu seina	0,10	0,30	0,59	0,65	0,63	0,80
Mineraalvattplaat 5 cm	0,20	0,53	0,74	0,78	0,75	0,77
Sama, 10 cm	0,68	0,84	0,82	0,78	0,75	0,77
Vahtklaasplaat	0,40	-	0,48	-	0,48	-
Puitnarmasplaat (ENSV toode) 1,2 cm, alusraamile kinnitatult	0,38	0,15	0,21	0,32	0,36	0,51
Sama, tihedalt vastu seina	0,13	0,14	0,21	0,32	0,36	0,51
Puitvillplaat "Insuliit" alusraamil	0,21	0,30	0,38	0,44	0,46	0,50
Linaluuplaat (ENSV toode)	0,12	0,21	0,33	0,45	0,46	0,44
C. Lihtsaimad akustilised konstruktsioonid						
5-cm mineraalvatt perforeeritud vineerist ekraani all (avad 10 mm, intervall 40 mm)	0,26	0,46	0,58	0,52	0,42	0,31
5-cm mineraalvatt pilutellistest ekraani all (pilud avatud ruumi poole)	0,13	0,42	0,64	0,60	0,55	0,57
5-cm mineraalvatt, kaetud jämedakoelise riidega	0,50	0,58	0,63	0,68	0,69	0,68
5-cm mineraalvatt, kaetud kunstnahaga	-	0,65	0,50	0,30	0,21	0,15

d. Ruumiakustika lokaalsed tunnused

Kogemustest on selgunud, et järelkõlakestus on küll vajalik ning oluline ruumiakustika kriteerium, kuid ta ei iseloomusta akustilist olukorda täielikult. Vaatamata optimaal-

sele järelkõlakestusele võivad kuulamistingimused eri istekohtadel olla kas soodsad või ebasoodsad. Lisaks järelkõlakestusele kui üldisele mõistele tuleb abiks võtta mõned lokaalsed mõisted.

Esimene nendest on nn. helitoitumus. Selle all mõistetakse helitaseme jaotust kuulajate kohtadel ning kuulajate helineelava toime kui ka kauguse tõttu tekkivate energiakadude asendamist nn. efektiivse heliga.

Teiseks teguriks on helivälja difuussuse määr antud ruumi punktides. Ka siin tuleb arvesse helivälja ühtlus, kuid veidi erinevast seisukohast. Võrreldakse otsese heli tugevust peegeldunud helilainete tekitatud helitugevusega. Selleks on tarvis summeerida teatud ruuminurkadest saabuvad peegeldused ja nende energia. Esialgu puuduvad veel rahvusvaheliselt tunnustatud kokkulepped ja katsemetoodika. Erinevad autorid on kasutanud küllaltki erinevat katsemetoodikat. Laiemateks üldistusteks on andmeid saalide kohta veel napilt.

Kolmandaks kriteeriumiks on nn. kustuva signaali selgus (puhtus), s.o. heliallika väljalülimise järel tekkiv nn. kasuliku ja segava heli toime suhe (D).

Kasulikuks heliks järelkõla jooksul loetakse otsese heli ja esimeste peegelduste energiat, mis saabub mingisse ruumipunkti mitte hiljem kui 50 ms pärast otsest helilainet. Segava heli all mõistetakse energiat, mis saabub ülejäänud ajavahemikus kuni helienergia täieliku kustumiseni.

$$D = \frac{\int_0^{50} \varepsilon(t)dt}{\int_0^{\infty} \varepsilon(t)dt} .$$

Katsed näitavad, et see kriteerium on oluline draamateatris ja kõnesaalis, kuna siin heale kustuva signaali selgusele vastab hea artikulatsioon (silpide selge kuuldavus). Kontserdisaalis ja muusikalises teatris on olulisem teine tingimus - helivälja difuussus. Ühtlane helitoitumus on oluline mõlemat tüüpi saalidele.

Ruumides, kus on ühtlane helitoitumus ja difuussus, on järelkõla vältel helienergia langus hüpeteta ning anomaaliateta. Vastupidi, seal, kus difuussus jätab soovida, kujutab helienergia languse joon ebakorrapärast ja suurte hüpetega kõverat, eriti siis, kui heliallikas annab lühikesi helisignaale. Seega võib ka ostsillograafi ekraanil vaadeldavat heliprotsessi kulgu pidada ruumi difuussust iseloomustavaks näitajaks. Sellel põhjusel on viimasel ajal hakatud ruumiakustika analüüsi korraldama lühikeste heliimpulsside ja mikrofoni võimendajaga ühendatud ostsillograafide abil. Ostsillograafi ekraanil nähtavaid impulsside kustumise pilte võib pildistada või filmida, et neid hiljem täpsemalt analüüsida.

Ruumide difuussus on oluline tegur, mida arvestamata pole võimalik tagada järelkõla arvutuste tõepärasust. Helilainete maksimaalseks hajutamiseks peavad ruumi piirdepinnad tagama, et kuulajateni jõuaks võimalikult suur arv helipeegeldusi väikeste ajaintervallidega. See on saavutatav ühest küljest pindade arhitektuurilise liigendusega (intensiivsete peegelduste hajutamiseks), teisest küljest aga ka helineelavate materjalide ühtlase jaotusega ruumis (nõrgemate peegelduste hajutamiseks). Parimad tulemused saadakse ruumi ebakorrapärase ja ebasümmeetrilise kuju puhul ning pindade sujuva (plastilise) liigenduse abil. Kõige rohkem hajutavad keskmisi ja kõrgemaid helisagedusi prismalised, püramidaalsed ja silindrilised pinnad. Tasapinnalised kujundid (kaldpinnad, sakilised seinad) hajutavad suhteliselt paremini madalaid helisid. Küllaldast helienergia hajumist kõikides sagedusalades võimaldab lae ja seinapindade liigendus sammuga vähemalt 2 m ning väljaulatusega mõni dm. Ruumikujunduse mõttes tuleb esialgseid akustilisi vahendeid mõningal määral korrigeerida sel moel, et mitte kõikidel ruumi piiretel ette näha korduvaid ruumilisi elemente. Saalides, kus heliprotsess on loomulik (draator, koor, orkester), tuleks eelistada seinapindade liigendust, kuna lagi peab täitma helipeegli ülesandeid; ja vastupidi, saalides, kus heliallika võimsus on suur ning pealegi reguleeritav (ruumid elektroakustiliste seadmetega, kinoteatrid jt.) tuleks eelistada laepindade liigendust.

3. Ehitusakustika

a. Müra ja selle iseloom

Müra all mõistetakse igasugust segavat heli, mis häirib inimeste puhkust või tegevust.

Kitsamas mõttes, müraisolatsiooni tehnikas puutume kokku järgmiste müra alaliikidega:

õhumüra, mis levib peamiselt õhu kaudu,

materiaalne müra, mis levib konstruktsioonides ja materjalides,

löögimüra, mis tekib ja levib löögi mõjul konstruktsioonides ning kandub edasi õhule.

Müra mõju inimorganismile sõltub müra tugevusest, spektri koostisest ja kestusest. Nii segab suhteliselt madalatasemeline omamüra vaatesaalides kõne või muusika kuulamist, keskmise tasemega kontorimüra (kirjutusmasinad, telefon jne.) väsitab, kõrgetasemelised tsehhimürad kutsuvad esile kiire väsimuse, mõjutades kesknärvisüsteemi. Kui varem arvati, et müra kahjustab ainult kuulmisorganit, siis uuemad andmed tõendavad tema üldisemat mõju. Müra põhjustab peaaju koore närvirakkude ülepingutust ning muudab närviprotsesside dünaamikat. Müra mõjul töövõime langeb, võib tekkida peavalu, emotsionaalne püsimatus, ilmnevad tähelepanu ja mälu nõrgenemine. Valjus müras töötajatel arenevad südametegevuse ja vererõhu muutused ning teised siseelundite häired. Kesknärvisüsteemi häired arenevad mõnikord isegi sellise müra juures, mis ei tundugi eriti häirivana.

Kõigil mainitud põhjustel on müra kujunenud kaasaja tõsisemaks arstiteaduse ja ehitustehnika probleemiks.

Müra spektraalset koostist hinnatakse tema sageduskarakteristikuga, s.o. müra taseme sõltuvusega üksikute mürakomponentide sagedusest. Tavaliselt graafilises väljenduses on ordinaatteljel helitugevuse tase, abstsissteljel aga helisagedus. Sageduskomponentide olemasolu ja jaotuse poolest võib müra spekter olla pidev või diskreetne. Vastavalt tea-

tud helisageduste domineerimisele võib müra olla madal- (alla 300 Hz), kesk- (300-800 Hz) või kõrgsageduslik (üle 800 Hz). Kõrgeim lubatav intensiivsuse tase tööstuses on vastavalt 90, 80 ja 75 dB. Sellest nähtub, et kõrgsagedusmürad, vastavalt kuulmistaju iseärasustele, häirivad kõige rohkem.

Kui müra sisaldab praktiiselt kõiki kuuldavaid helisagedusi, nimetatakse müra statistiliseks. Sellist müra tekitatakse mõõtmistehnikas ka kunstlikult. Ühe või mõne helisageduse ilmsel domineerimisel müra spektris kujuneb nn. tonaalne müra.

Isolatsioonitehnikas on tavaliselt raskemaks probleemiks madalsagedusmürade tõkestamine. Siia kuuluvad näiteks transpordivahendite, ventilaatorite, sepatsehhide, liftimootorite jne. mürad.

Iseloomu poolest võivad mürad olla püsivad või episoodilised nii ajaliselt kui ka spektri suhtes. Kõige rohkem häirivad perioodiliselt korduvad võrdlemisi kitsa spektriga mürad.

Müritaset mõõdetakse detsibellidesse ja foonidesse graadueeritud helitasememõõtja abil. Mitme võrdse müraallika puhul kujunev summaarne tase, kui ühe allika puhul on see L:

$$L_s = L + 10 \lg n,$$

kus n - müraallikate arv.

Tavaliselt summaarne müratase ruumides kujuneb kolmest komponendist: inimeste omamüra, seadmed ja välised müraallikad. Statistiliste andmete kohaselt iga komponendi osatähtsus tööstushoonetes on vastavalt 10, 80 ja 10%, ühiskondlikes hoonetes aga 45, 25 ja 30%.

Lubatav müratase oleneb mürafoonist, mis tavaliselt esineb ruumides ja tänavail. Klassiruumides ja auditooriumides on müra tase näiteks 40-45 dB, tänavail 60-70 dB.

Tabel 4

Lubatav müratugevuse tase ruumides

Ruumi nimetus	Lubatav müratugevuse tase dB
Raadio- ja televisioonistuudiod	20 - 30
Palatid ja toad haiglates ja sanatooriumides, grupiruumid lasteasutustes	30 - 35
Eluruumid, raamatukogude lugemissaalid	35
Auditooriumid ja klassid	40
Vaatesaalid	40
Tööstusruumid	
madalsagedusmüra puhul	90
kesksagedusmüra puhul	80
kõrgsagedusmüra puhul	75

b. Õhumüra leviku tõkestamine

Müratõrje abinõusid peab silmas pidama juba linna või asula planeerimisest alates. Detailplaneerimisel ja üksikobjektide projekteerimisel on siis lihtsam lahendada müratõrje probleeme. Linna planeerimisel on vaja linna territoorium või mikrorajoon jaotada erineva müratasemega tsoonideks. Toome näite territooriumi jaotamise kohta neljaks tsooniks:

1) intensiivse liiklusega magistraalidega tööstustsoon; müra tugevus kuni 80 dB;

2) linna ühiskondlik ja kaubanduskeskus intensiivse transpordivahendite ning jalakäijate liiklusega; müra tugevus kuni 70 dB;

3) linna elutsoonid, suhteliselt vaiksem osa; müra tugevus kuni 60 dB (päeval);

4) linna vaikuse tsoon, milles paiknevad haiglad, raadio-, televisiooni- ja kinostuudiod, raamatukogud jt.

Tööstuse ja elamute vahelise müra- ja sanitaarkaitse tsooni laius määratakse elurajooni müratugevuse piirnormi-

dest lähtudes. Lubatav müratase sõltub seejuures müra spektrist.

Tabel 5

Maksimaalselt lubatav müratugevus linna elurajoonide piiril

Linna suurus	Ettevõtete töö kestus	Müra sagedus Hz					
		100	200	400	800	1600	3200
Suurlinnad	Kogu ööpäev	61	54	49	45	41	39
	ainult päeval	70	64	58	55	52	50
Väikelinnad ja asulad	Kogu ööpäev	51	45	39	35	32	29
	ainult päeval	61	54	49	45	41	39

Linnamüra võib levida järgmistes tingimustes:

vabalt - väljakutel, haljastamata aladel jne.; osaliselt hajutatult ja neeldunult - haljasaladel, sisekvartalis jne.

ekraneeritult - hoonete, mullavallide, tihedate haljasribade jne. tõttu.

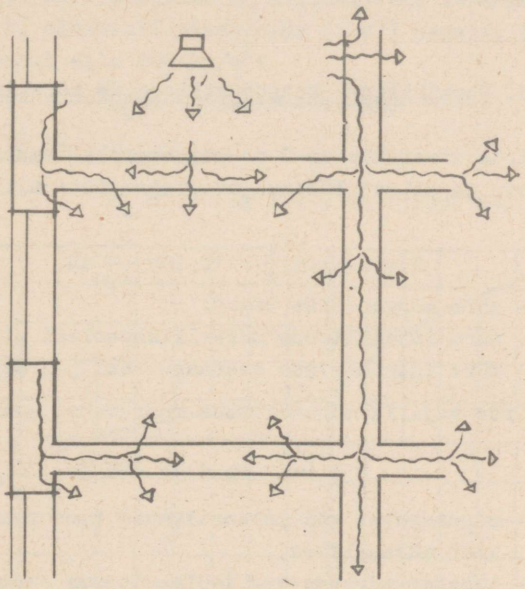
Mikrorajoonide, kvartalite ja tänavate planeerimisel tuleb taotleda tänavamüra vähendamist õige hoonestusskeemi valikuga. Müra tuleb arvestada ka tänavate laiuse ja hoonestuse kõrguse määramisel: kitsastel ja frontaalselt täisehitatud tänavatel on müra tugevus tunduvalt suurem kui laiadel ja harvema hoonestusega tänavatel. Ka on müratase alumistel korrustel kõrgem ülemistega võrreldes.

Vähem olulised pole müratõrje küsimused arhitektuursel projekteerimisel. Sektsioonelamutes on peamisteks müraallikateks liftid, trepikojad, inseneriseadmete võrk, prügitorud jne. Taolisi müraallikaid leidub ka ühiskondlikes hoonetes, kus sageli töötavad veel ventilaatorid ja kliimaseadmed, mitmesugused elektrimootorid, pumbad jne.

Tööstushoonete projekteerimisel on oluline mürarikkad ruumid ühendada ja teistest ruumidest eraldada.

c. Müra edasikandumine hoones

Õhumüra võib tungida materjalisse ja seejärel uuesti kanduda üle õhule. Sellised müra muundumised on alati seotud märgatava energiakaoga, mistõttu müra levikuala on teatud määral piiratud. Materiaalne müra võib levida tunduvalt suurematele kaugustele kui õhumüra. Tinglikult nimetatakse müra (külgsuunalist) levikut konstruktsioonides suurematele kaugustele kaudseks. Otseseks müra ülekandeks loetakse müra levimist läbi seina või vahelae ühest ruumist teise.



Joonis 5.

Tungimisel läbi piirde müratugevuse tase langeb vastavalt piirde helineelavale toimele, mida hinnatakse müra nõrgenemise määraga, mõõdetult detsibellides. Müra ülekandmine seina (vahelae) kaudu toimub:

1) läbi lahtiste pooride, avade ja ebatiheduste,

2) piirdekonstruktsiooni kaasavõnkumisega,

3) antud piirdekonstruktsiooniga seotud teiste konstruktsioonide kaudu (joon. 5).

Kõige olulisemaks ülekandeviisiks on piirde kaasavõnkumine, mille iseloom sõltub konstruktsiooni massist ja jäikusest, teiste sõnadega - piirde mõõtmetest, kaalust ning kinnitusviisist hoone teistele konstruktsioonidele. Tülikam on arvestada kaudseid teid kaudu levivat müra. Kaudse leviku osatähtsus kasvab neil juhtudel, kui ruumi peamine piirdekonstruktsioon (mis eraldab mürarikast keskkonda) on helikindlam kui temaga külgnevad piirdekonstruktsioonid.

d. Ühekihiliste konstruktsioonide mürakindlus

Piirde müratakistus R on kümnekordne logaritm piirdele langeva ja piiret läbinud müralaine intensiivsuste suhtest:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{I_i}{I_\tau} \text{ dB},$$

kus τ - müra nõrgenemise tegur,

I_i - müra intensiivsus müraallikapoolsel piirdepinnal,

I_τ - müra intensiivsus vastaspoolsel piirdepinnal.

Piirde vajalik müratakistus määratakse avaldusest:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A},$$

kus L_1 - müratugevus või intensiivsuse tase ruumis, kus asub müraallikas,

L_2 - lubatav müratugevus isoleeritavas ruumis,

S - isoleeriva piirde (seina, vaheseina või -lae) pindala,

A - isoleeritava ruumi pindade summaarne helineelduvus, mis leitakse avaldusest $A = \alpha \cdot S$.

Piirde müratakistuse ligikaudseks hindamiseks määratakse tegur R_k avaldusest:

$$R_k = \frac{R_1 + R_2 + \ldots + R_n}{n},$$

kus R_1, R_2, R_n - piirde müratakistused erinevates helisagedusribades,

n - helisagedusribade arv.

Praktikas kasutatakse järgmisi helisagedusribasid: 75–150 (geom. keskm. 100), 150–300 (keskm. 200), 300–500 (keskm. 400), 600–1200 (keskm. 800), 1200–2400 (keskm. 1600) ja 2400–4800 Hz (keskm. 3200).

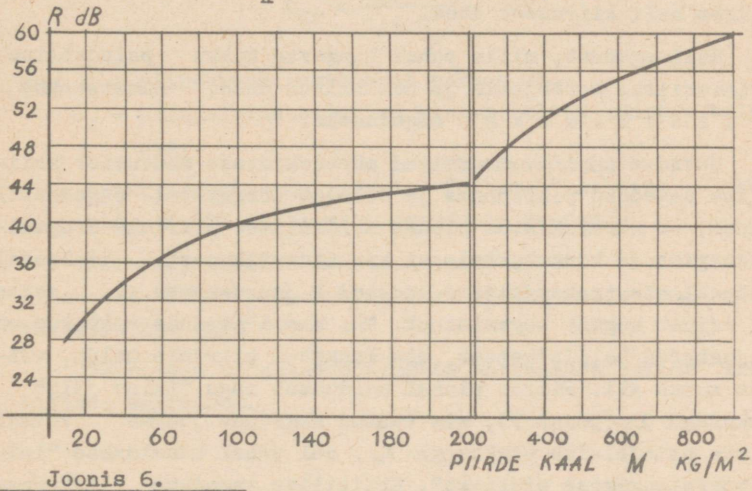
Ligikaudseed valemid akustiliselt ühtlaste piirdekonstruktsioonide[x] müratakistuse R_k arvutamiseks keskmistel helisagedustel, olenevalt pinnaühiku (1 m^2) massist P on

1) P puhul alla 200 kg/m^2:

$$R_k = 13 \log P + 13 \text{ dB},$$

2) P puhul üle 200 kg/m^2:

$$R_k = 23 \log P - 9 \text{ dB (joon. 6).}$$



Joonis 6.

[x] Akustiliselt ühtlased piirdekonstruktsioonid võivad koosneda ühest või mitmest materjalikihist, olles omavahel jäigalt seotud üle kogu pinna või rea jäikade ühendite kaudu (näiteks kahelt poolt krohvitud tellissein, pilutellistest sein jne.).

Nn. massi seaduse kohaselt kasvab müratakistus 6-dB helisageduse tõusul 1 oktaavi võrra.

Valemid pole kehtivad kergete vaheseinte puhul ruutmeetri kaaluga 30–100 kg. Nendes tekkivate paindelainete mõjul väheneb R_k tunduvalt.

e. Kriitiline sagedus ja lainete kokkulangemise efekt

Heli levimiskiirus õhus ei olene helisagedusest. Seda ei saa öelda helide leviku kohta materjalides ja konstruktsioonides. Paindelainete kiirus tasapinnalistes piirdekonstruktsioonides oleneb helisagedusest ja peale selle elemendi põiklõike kujust. Paksemates elementides levivad paindelained kiiremini kui õhukestes elementides. Kõrgema sagedusega lained levivad kiiremini madalsagedusega võrreldes. Mõningatel helisagedustel võib heli paindelaine kiirus materjalis olla väiksem heli kiirusest õhus.

Helisagedust, mille puhul langevad kokku paindelaine levimiskiirus materjalis ja helikiirus õhus, nimetatakse k r i i t i l i s e k s sageduseks.

Uurides piirdekonstruktsiooni müratakistuse muutumist kriitilise sageduse piirkonnas ja sellest kõrgematel sagedustel ilmneb, et müratakistus oleneb helilainete piirdele langemise nurgast ja konstruktsiooni kinnitusjäikusest. Paljudel juhtudel plaatmaterjalides oodatud R juurdekasvu ei esine või esineb koguni tagasiminek. Nn. massi seaduse kehtetus on põhjustatud helilainetest, mis langevad piirdele kaldu, väikese nurga all. Piirde pinnal moodustub nagu "laine jälg" pikkusega λ_δ (joon. 7), mis teatud sageduse juures võrdub piirde paindelaine pikkusega λ_M. Sel juhul kõneldakse "laine kokkulangemise efektist". Kriitilise sageduse piirkonnas võib see põhjustada plaadi võnkeamplituudi suurenemist, mille tõttu R langeb. Siis

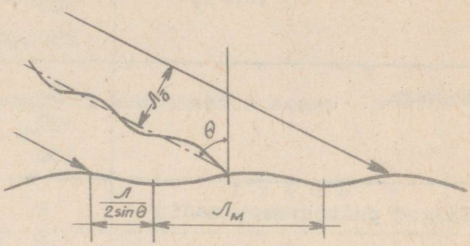
$$\frac{\lambda_\delta}{\sin\theta} = \lambda_M .$$

Korrutades mõlemaid pooli sagedusega f, saame:

$$\frac{C_{õ}}{\sin\theta} = C_M,$$

kus $C_{õ}$ - heli kiirus õhus,
C_M - heli kiirus materjalis.

Nurka, mille puhul tekib lainete kokkulangemine, nimetatakse kokkulangemisnurgaks ja vastavat sagedust, mille puhul $\frac{C_{õ}}{\sin\theta} = C_M$, kokkulangemissageduseks.



Joonis 7.

Müratakistuse langus lainete kokkulangemise tõttu algab kriitilisest sagedusest, mille võib määrata valemist

$$f_{kr} = \frac{c^2}{1{,}8\ C_M \partial},$$

kus ∂ - piirdekonstruktsiooni paksus cm,
C_M - paindelainete leviku kiirus selles konstruktsioonis.

Seina paksuse suurendamine "nihutab" lainete kokkulangemise efekti madalamate sageduste suunas.

Näiteks, lainete kokkulangemise efekti vältimiseks allapoole 140 Hz betoonvaheseinas peaks seina kaal olema vähemalt 220 kg/m^2.

Tabelis 6 on antud mõningate ehitusmaterjalide kriitilised sagedused.

Tabel 6

Seinte või vahe-seinte materjal	Seina paksus cm	Seina kaal kg/m^2	Kriitiline sagedus Hz
Tellis	65	110	215
	120	200	115
	250	450	55
Betoon	50	110	280
	100	220	140
	200	440	70
Jäigad puitnarmasplaadid	4	4	9000
	6	6	6000
	10	10	3500

f. Ühekihiliste piirete heliisolatsiooni arvutus

Projekteeritavate piirete mürakindluse määramiseks on tarvis konstrueerida selle sageduskarakteristik ja seda võrrelda normatiivse kõveraga (joon. 9).

Kogu sagedusala jagatakse kolmeks osaks: 1) madalsageduse ala ($f < \frac{1}{2} f_{kr}$), kus kehtib "massi" seadus, 2) piirsageduse ala, kus heliisolatsiooni määr sageduse tõusuga jääb muutumatuks ja 3) piirsagedusest nõrgemate sageduste ala, kus heliisolatsioon kasvab kiiremini kui "massi" seaduse järgi.

Sageduskarakteristik konstrueeritakse järgmiselt:

a) määratakse piirdekonstruktsiooni 1 m^2 mass P kg-des;

b) abstsissteljele kantakse helisagedused f Hz logaritmilises mõõdus, s.o. iga helisageduse kahekordistumine e. üks oktaav kõrgem toon kantakse joonisele võrdsete lõikudena, kokku 6 võrdset jaotust (50-100-200-400-800-1600-3200 Hz);

c) ordinaatteljele kantakse heliisolatsiooni tegur R lineaarses mõõdus dB;

d) "massi" seaduse kohaselt leitakse esimeses sagedusribas mistahes sagedusele vastav R ja läbi selle punkti tõmmatakse sirgjoon kaldega 6 dB/oktaavile; olenevalt helisagedusest ja ruutmeetri massist on hajusa helivälja korral "massi seadus" järgmine:

$$R = 20 \log P \cdot f - 47{,}5 \text{ dB},$$

kus P - ruutmeetri mass kg,

f - helisagedus Hz;

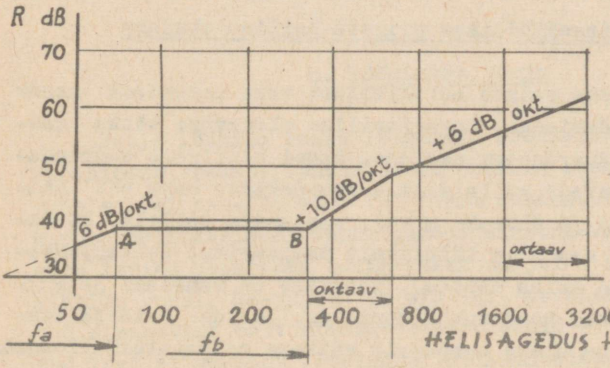
e) esimese lõigu lõpupunkti abstsissi A saame vastavalt materjalile tabelist 7:

T a b e l 7

Materjali nimetus	Mass kg/m^3	Karakteristiku horis. osa ordinaat dB	$\frac{f_b}{f_a}$
Tihe betoon, raudbetoon	2400	38	4,5
Tellismüür	2100	37	4,5
Räbubetoon	2000	29	6,4
Klaas	2600	27	10
Vineer	600	19	6,5
Alumiinium	2700	29	11

f) teise lõigu lõpupunkti B saame samuti tabelist 7, korrutades sageduse f_a suhtega $\frac{f_b}{f_a}$;

g) punktist B tõmbame joone kaldega 10 dB/oktaavile esimese oktaavi ulatuses, seejärel aga 6 dB/oktaavile.



Joonis 8.

Näide. Konstrueerida 12 cm paksuse betoonpaneeli sageduskarakteristik:

a) paneeli m^2 mass on $P = 23 \cdot 12 = 276$ kg/m^2,

b) 100 Hz puhul $p \cdot f = 276 \cdot 100 = 2{,}76 \cdot 70^4$ kg/m^2 Hz,

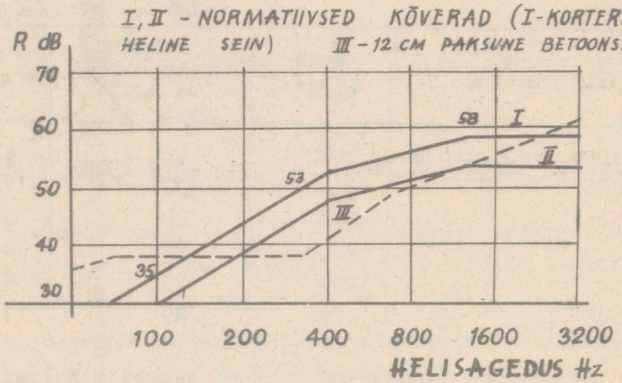
c) $R = 20 \log \cdot 2{,}76 \cdot 10^4 - 47{,}5 = 41$ dB,

d) punkti A ordinaat, vastavalt tab. 7 on 38 dB,

e) $F_A = 70$ Hz, $F_B = 70 \cdot 4{,}5 = 315$ Hz.

Kuni sageduseni 630 Hz sirge tõus on 10 dB/okt, edasi aga 6 dB/okt.

Saadud karakteristiku võrdlus normatiivsega näitab, et 12 cm paksune betoonpaneel ei rahulda korterivahelise seina nõudeid (seeria 1-464).



Joonis 9.

g. Mitmekihiliste piirete heliisolatsioon

Ühekihiliste seinte mürakindlust võib parendada nende paksuse suurendamisega. Logaritmilise olenevuse tõttu massist on aga R juurdekasv aeglane. Massi oluliselt suurendamata võib saavutada küllaldase R juurdekasvu kahe või enama kihiga seina ja õhkvahe arvel, vaatamata sellele, et üksikud kihid ei saa olla täielikult isoleeritud (kokkupuutepinnad esinevad seina äärtes). Soovitav on vahelael ja seintel kokkupuutuvad konstruktsioonid isoleerida materjalidega, mille jäikus oleks tunduvalt väiksem seinamaterjali omast.

Mitmekihilise piirde müratakistus R oleneb paneelide massist, õhkvahe laiusest, kummagi paneeli kriitilisest sagedusest, kogu konstruktsiooni resonantssagedusest ja samuti helilaine langemisnurgast. Olulisemaid tegureid on paneelide omasagedus. Sama massi juures kujuneb tegur R suuremaks kui ühekihilises seinas ainult siis, kui süsteemi omasagedus on küllaltki madal. Omasagedus on arvutatav avaldusest

$$f = \frac{600}{\sqrt{\delta}} \sqrt{\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2}} ,$$

kus δ - õhkvahe laius cm,

P_1 P_2 - seinapaneelide kaalud kg/m^2.

Kahe erineva massiga paneelist koosneva seina puhul on R juurdekasv suurem. Allpool omasagedust on kahekihilise seina R ligikaudu sama, mis ühekihilisel seinal sama massi juures.

Keskmise müratakistuse arvutamiseks kasutatakse samu valemeid, mida ühekihiliste seinte puhulgi. Õhkvahe arvel saadav ΔR võetakse tabelist 8.

T a b e l 8

Müratakistuse juurdekasv õhkvahe arvel

Õhkvahe laius cm	3	4	5	6	8	10
ΔR dB	1	3	4,5	5,5	6,5	7

h. Löögimüra tõrje

Peale löökide tekib löögimüra kõndimisest ja vibratsioonidest eeskätt vahelagedel. Õhumüra hästi isoleeriv vahelagi ei rahulda veel löögimüra suhtes, kui põranda ja kandekonstruktsiooni vahel puudub elastne vahelüli. Löögimüra leviku peamiseks takistuseks on jäiga seose puudumine kihtide vahel. Seejuures on oluline, et elastselt ühendatud elementide omavõnkesagedused oleksid erinevad. Riputatud lagi ei vähenda löögimüra läbikandumist, sest vahelae

ülemises kihis tekkivad paindelained levivad alumisse ruumi peamiselt vaheseintega kokkupuutumise tõttu, n.-ö. möödudes laekonstruktsioonist.

Ehituses on kõige rohkem tuntud nn. ujuvad põrandad (ühtlaselt jaotatud elastne materjal või materjaliribad põranda ja laagide all) ja põrandad, kus elastsed sidemed on asetatud äärtesse.

Kaudse müraülekande vältimiseks peab põrand olema isoleeritud ka seintest (elastse materjali ribad).

Löökidest (kõndimisest jne.) tekkiva müratasemе tunduv alanemine on saavutatav pehme põrandamaterjali valikul (kummi, linoleum, reliin) või pehme aluskihi kasutamisel suhteliselt elastse pindkihi all (plastikaat). Ehituses laialdaselt kasutatud vahelagede tüüpide sageduskarakteristikud on üldiselt teada (määratud katseliselt akustika laboratooriumides). Normeeritud müratase vahelae all, mis tekib standardse löögimasina töötamisel vahelae peal (4 500-grammist vasarat teevad 10 lööki sekundis 4 cm kõrguselt), on vastavalt sagedusele järgmine: 100...320 Hz - 70 dB; 400 Hz - 69 dB; 800 Hz - 66 dB; 1600 Hz - 59 dB; 3200 Hz - 50 dB.

Eesti NSV-s laialdaselt kasutuselolev suurpaneelmajade seeria 1-464 kasutab vahelagedeks 10 cm paksusi paneele, mis toetuvad äärtes. Laudpõrand asetatakse laagidele, mida laepaneelist ei isoleerita.

Selline konstruktsioon rahuldaks löögimüra isolatsiooni tingimusi ainult siis, kui laagide alla paigutataks 2,5 cm paksused puitnarmasplaatide ribad. Veel parem lahendus oleks elastsete vahematerjali ribadega isoleeritud omaette põrandaplaat, millele kleebitakse reliin. Liiva- või räbutäidised ei taga normitud helitaset löögimüra suhtes.

Laagide kasutamise korral on vajalik õhumüra täiendav isoleerimine, mida ei võimalda löögimüra kaitsevahendina kasutatavad elastse materjali ribad. Rahuldav lahendus mõlema müraliigi suhtes on reliin- või linoleumpõrand tsemendist tasanduskihil, mis tehakse 2,5 cm paksustele (kahes kihis) puitnarmasplaatidele.

II p e a t ü k k

VALGUSTUSTEHNIKA

Sissejuhatus

Ehituslik valgustustehnika on ehitusfüüsika nooremaid harusid. Valgustustehnika ülesanded kerkisid esile alates 19. saj. lõpust seoses tehnika progressiga tööstuses. Mõõtmismetoodika ja selleks vajalik aparatuur hakkas täiustuma alles 20. saj. 30-ndail aastail.

Kaasaegne ehituslik valgustustehnika käsitleb loomuliku (päeva-) valgustuse kõrval tehisvalgustust, värvi ja valguse psühhofüsioloogilisi mõjusid ning insolatsiooninähtusi (insolatsioon - ruumide kiiritamine Päikesega).

Valgustustehnika ülesanne on kindlustada ruumide otstarbekohane ja meeldiv valgustus. Valgustustehnika esteetiline ülesanne on valguse kasutamine nii linnapildis kui ka hoonetes endis, mis peab andma võimalusi ühe või teise arhitektuurilise lahenduse esiletoomiseks.

Töökohtade valgustustingimuste parandamine aitab tõsta tööviljakust (eriti täppistööl), hoiab töötajate tervist ja tõstab üldist töökultuuri.

Ruumist olenevalt võib valgustuse ülesanne olla erinev. Nii on vaatesaalides oluline luua valgusküllane üldmulje, mis on sisekujundusega kooskõlas. Tööruumides on tähtsaks teguriks hea nähtavus ja detailide eraldatavus tööpinnas, raamatukogu lugemissaalides otstarbekohane lugemislaua valgustus jne. Oluliseks küsimuseks on ka inimest ümbritseva ruumi valgustuse ja selle pinna valgustuse suhe, kuhu on pööratud tema tähelepanu.

1. Põhimõisted ja ühikud

Valgus levib ainult ühel viisil, kiirguse teel.

Võimsaim kiirgusallikas on Päike; keskmistel laiuskraadidel saab iga m^2 maakera pinnast 0,7 kW energiat. Päikesekiirgus on kõrge temperatuuri kiirgus. Maakerale, mis on Päikesest 150 miljoni km kaugusel, langeb ainult üks kahemiljardik osa kogu Päikese kiirgusest, kuid see moodustab tervelt 180 biljonit (10^{12}) kW. Enne Maa atmosfääri jõudmist moodustab kogu energiast nähtav valgus 41%, infrapunane kiirgus 50% ja ultravioletttkiirgus 9%. Maapinnale jõudvast kiirgusenergiast moodustab nähtav valgus umbes 52%, infrapunane kiirgus 43% ja ultravioletttkiirgus 5%. Seega kõige intensiivsemalt neeldub atmosfääri veeaurudes, osoonis jm. lühilainelisem ultravioletttkiirgus.

Ehituslik valgustustehnika vaatleb nähtavat kiirgust, mille lainepikkus on 760...380 nm (nanomeetrit; 1 nm = 1 millimikron ($m\mu$) = $1 \cdot 10^{-6}$ mm), samuti ka ultravioletttkiirgust (lainepikkus 10...380 nm) ja infrapunast kiirgust (lainepikkus 0,77...340 μ).

Mistahes kiirgust iseloomustab selle intensiivsus ja spekter. Monokromaatiline kiirgus on kindla lainepikkusega λ. Ühtlased ühesuguse intensiivsusega kiirgusribad, mis erinevad lainepikkuse poolest, mõjutavad nägemisorganit erinevalt. Silma tundlikkus on kõige suurem lainepikkuse 556 nm suhtes (kollakasroheline kiirgus). Tundlikkus langeb nähtava spektri servade poole. Et tekitada taju võrdselt kollakasrohelise kiirgusega, tuleks violetse monokromaatilise kiirguse intensiivsust tõsta 16·60 korda, punast kiirgust aga 9·35 korda.

Mingile pinnale S langev valgusvoog Φ annab pinnal valgustustugevuse (valgustustiheduse) E:

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

Valgustustugevust mõõdetakse luksides (lx). Pinna valgustustugevus on 1 luks, kui 1 m^2 suurusele pinnale jaotub

ühtlaselt valgusvoog 1 luumen. Valgustustugevus ei sõltu valgustatava pinna omadustest.

Valgusvoo ühik luumen on 1 kandela tugevusega valgusallika kiirgus ruuminurka 1 steradiaan. Seega annab 1 kandela 4π luumenit.

Valgust peegeldava keha pinna ühikult kiirguvat valgusvoogu nimetatakse valgusvoo tiheduseks (valgustiheduseks) R:

$$R = \frac{\Phi}{S_k} .$$

Valgusvoogu mõõdame luumenites ruutmeetri kohta lm/m^2. Kiirgava keha pinna ühikult teatavas suunas kiirguv valgusvoog on pinna heledus B.

Pinna heledus on 1 nitt (nt), kui 1 m^2 suurune pind annab normaali suunas valgustugevuse 1 kandela. Sel juhul

$$B = \frac{I}{S} ,$$

kus I - valgustugevus.

Valemist selgub, et valgustatud või kiirgavast pinnast tekkinud valgustaju ei sõltu silma ja pinna vahelisest kaugusest. Tegelikult on see õige ainult siis, kui vahepeal valguskiired ei neeldu.

Üldjuhul on pinna heledus eri suunas erinev.

Kiirgav tasapind, mille heledus mistahes suunas on konstantne, kiirgab nn. koosinuse (Lamberti) seaduse kohaselt:

$$B = \frac{I_\alpha}{S \cos\alpha} = \frac{I}{S} = \text{const.}$$

$$I_\alpha = I \cos\alpha$$

Tabel 9

Valgusallikate ja valgustatud pindade heledus

Pinna nimetus	Heledus nitt (nt)
Pilves taevas, keskpäeval	7000–8000
Selge taevas, seniidis keskpäeval	2500–4000
Päike, seniidis	$1{,}5 \cdot 10^9$
Täiskuu	2500

Pinna nimetus	Heledus nitt (nt)
Lumi päikesepaistel	25000
Lumi kuuvalgel (täiskuu)	0,05
100-W lambi hõõgniit (220 V, T=2700°)	$5{,}5 \cdot 10^6$
Küünlaleek	5000

Heleduse ja valgustiheduse vaheline seos, kui valgustus on ideaalselt jaotatud pinnal:

$$\Phi_\beta = \beta \cdot E \cdot S = R \cdot S,$$

kus β - pinna peegeldustegur.

Pinnalt peegeldunud valgusvoogu võib avaldada ka valgustugevuse I kaudu:

$$\Phi_\beta = \pi \cdot I = \pi \cdot B \cdot S,$$

kus I - valgustugevus, mis peegeldub pinnalt normaali suunas,
B - pinna heledus.

Kuna avalduste mõlemad pooled on võrdsed, siis

$$\beta E = \pi B,$$

millest

$$B = \frac{E \cdot \beta}{\pi} \text{ nt}$$

ehk

$$B = \frac{R}{\pi}.$$

2. Loomulik päevavalgustus

a. Ruumide loomuliku valgustuse arvutuse üldidee

Ajaliselt väga muutliku iseloomuga päevavalgustuse hindamiseks kasutatakse suhtelist näitajat - loomuliku päevavalgustuse tegurit e. Loomuliku päevavalgustuse tegur antud ruumi mingi punkti kohta tähendab ruumi antud punkti rõhtsa valgustustugevuse samaaegset suhet väljas taevavõlvi hajusast valgustusest tingitud valgustustugevusega:

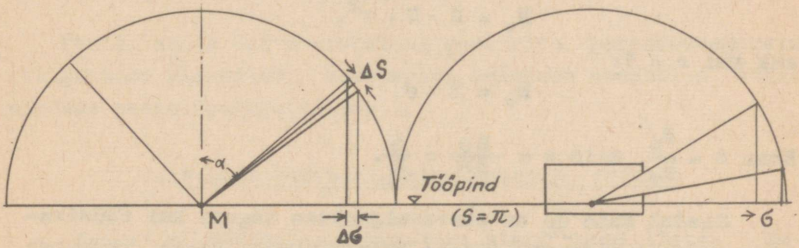
$$e = \frac{E_s}{E_v} 100\%.$$

Seega tegur e näitab, millise osa või protsendi moodustab valgustustugevus ruumis samal momendil mõjuvast välisvalgustusest rõhtpinnas, kui selle valgustamisest otsesed päikesekiired osa ei võta. Selles ruumi punktis olevat absoluutset valgustustugevust on võimalik tuletada järgmiselt:

$$E_s = \frac{E_v \cdot e}{100}.$$

Ruumide loomuliku valgustuse arvutus põhineb ruuminurga projektsiooni ja valgustustehnilise analoogia seadustel.

Ruuminurga projektsiooni seadus ütleb, et taevavõlvi kiirgusest tekitatud valgustustugevus ruumi mingi pinna punktis on võrdeline taevavõlvi heledusega ja antud punktist nähtava akna avaga piiratud taevavõlvi ruuminurga projektsiooniga valgustatavale pinnale (vt. joon. 10).



Joonis 10.

Valgustustehnilise analoogia seadus võimaldab võtta kujuteldavat taevavõlvi mistahes raadiusega, seejuures ka ühikraadiusega (r = 1), samuti kasutada erinevaid joonise mastaape. Võtame sellise ühikraadiusega taevavõlvi heleduseks B ja leiame valgustustugevuse horisontaalpinnal, mille põhjustab väga väikese taevavõlvi pinna osa (ΔS) kiirgus (joon. 10).

Valgustugevus, mida tekitab taevavõlvi osa ΔS:

$$\Delta I = B \cdot \Delta S.$$

Valgustustugevus punktis M kujuneb:

$$\Delta E_m = \frac{\Delta I \cdot \cos\alpha}{r^2}.$$

Väljendades ΔI heleduse kaudu ja võttes $r = 1$, saame:

$$\Delta E_M = B \cdot \Delta S \cos\alpha.$$

Kuna aga $\Delta S \cos\alpha = \Delta\sigma$ (ΔS projektsioon horisontaalpinnal), siis

$$\Delta E_m = B\,\Delta\sigma.$$

Kui poolkera heledus on kõikjal sama, siis

$$E_m = B\sigma.$$

Sellega avaldubki ruuminurga projektsiooni seadus.

Kui punkt M asub väljas ja seda valgustab kogu taevavõlvi poolkera, mille heledus on ühtlane, siis

$$E_v = B \cdot \pi \cdot r^2,$$

ehk kui $r = 1$:

$$E_v = B \cdot \sigma.$$

Kuna $e = \frac{E_m}{E_v}$, siis $e = \frac{B\sigma}{B\pi} = \frac{\sigma}{\pi}$.

Saadud suhe $\frac{\sigma}{\pi}$ on päevavalgustuse teguri kui füüsikalise suuruse geomeetriliseks tõlgenduseks. Seega kujutab päevavalgustuse tegur läbi valgusava nähtava taevavõlvi osa horisontaalprojektsiooni σ suhet π-sse. σ suuruse määramiseks kasutatakse graafilist meetodit.

Päevavalgustus arvutatakse ruumis harilikult punktide suhtes, mis asuvad nn. tööpinnas tüüpilises ruumi lõikes (1 m kõrgusel põrandast). Tüüpiline on lõige ruumi keskel, läbi valgusava või valgusavade vahel.

Loomuliku päevavalgustuse tegur mistahes ruumi punktis määratakse avaldusest (vt. joon. 11):

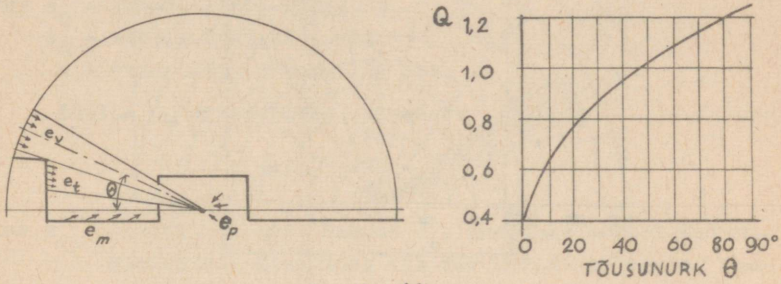
$$e = e_v + e_p + e_t + e_m,$$

kus e_v - ruumi punktist nähtava taevavõlvi osast tulenev tegur e,

e_p - ruumi pindadelt peegeldunud valguse lisategur,

e_t - vastasasuvate hoonete fassaadidelt tagasipeegeldunud valguse lisategur,

e_m - maapinnalt (tänavakattelt jne.) ruumi peegeldunud valguse lisategur.



Joonis 11.

Peale selle tuleb arvestada veel rida parandustegureid (valguskaod klaasides, taevavõlvi heleduse ebaühtlus, seinapindade peegeldustegurid jne.).

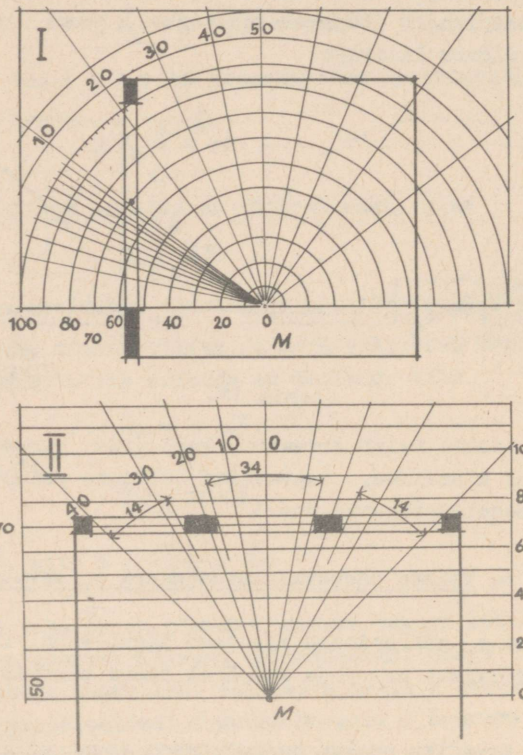
b. Vahetu päevavalgustusteguri e_v arvutus

Teguri e_v määramiseks kasutame algul ruumi lõikes Daniljuki graafikut nr. 1 ja seejärel ruumi plaanis graafikut nr. 2.

1. I graafiku poolus paigutatakse ruumi põiklõikes sellesse punkti ja graafiku alus sellesse tasapinda, mille suhtes e_v määratakse. Ära lugenud graafikult kiirte arvu, mis läbivad akna ava (n_1), määrame suuruse e_1 (= 0,01 n_1). Ühtlasi leiame graafikult poolringide numbri, mis läbib valgusava keskpunkti. See number väljendab tinglikult kaugust valgusava keskele.

2. II graafikul leiame kõigepealt horisontaali, mille number vastaks eespool saadud poolringi numbrile. Selle horisontaali asetame ruumi plaanis läbi valgusava keskpunkti,

nii et graafiku poolus (alus) jääks ruumis valitud lõikejoonele, millel asus antud ruumi punkt. Nüüd loeme kiirte arvu, mis läbivad valgusava plaanis (n_2) ja leiame e_2 (= 0,01 n_2).



Joonis 12.

3. Korrutades ($e_1 \cdot e_2$) saame suuruse e, arvestamata valguskadusid ja peegeldunud valgust ruumis. Tegeliku e_v saame, korrutades e vajalike parandusteguritega τ_o ja q (vt. järgm. lk.).

Graafikute kasutamisel on vajalik, et ruumi plaan ja lõige oleksid samas mõõdus. Absoluutne mõõtkava pole oluline. Arvestust hõlbustab läbipaistva paberi kasutamine plaa-

ni ja lõike tarvis. Arvutuste ülevaatlikkuse tõstmiseks on soovitav andmed koondada tabelisse.

Ülavalgustuse või kombineeritud valgustuse puhul määratakse ruumi tarvis keskmine e_v:

$$e_v^{keskm.} = \frac{e_o/2 + e_1 + e_2 + \ldots + e_n/2}{n},$$

kus e_o - aknale lähim punkt,
e_n - aknale kaugeim punkt,
n - vaadeldavate punktide arv.

Lõplik e_v arvutatakse valemist:

$$e_v = e_v' \cdot \tau_o \cdot q,$$

kus e_v' - graafikute abil saadud e_v', kus pole arvestatud valguskadusid klaasides ega taevavõlvi heleduse ebaühtlust,
τ_o - valguse läbilaskvustegur (tabel 10),
q - taevavõlvi heleduse ebaühtlust arvestav tegur, mis oleneb valgusava keskpunkti läbiva sirge ja horisontaaltasapinna vahelisest nurgast.

T a b e l 10

Valguse läbilaskvustegur τ_o

Klaasi asend	Puitraamid			Metallraamid			Klaasplokid
	1x klaas	2x klaas	kaksikklaas	1x klaas	2x klaas	kaksikklaas	
Vertikaalsed klaasid	0,5	0,35	0,4	0,6	0,4	0,5	0,35
Kaldklaasid	0,4	0,25	0,3	0,5	0,3	0,4	0,25

M ä r k u s: ruumides, kus klaasid määrduvad sageli, tuleb τ_o vähendada ühe kümnendiku võrra.

Teguri q väärtused

Nurk kraadides	15	30	45	50	60	75	91
q	0,65	0,85	1	1,1	1,15	1,2	1,25

c. Ruumi pindadelt peegeldunud valguse e_p arvutus

Ruumis peegeldunud valguse mõju arvutatakse üldjuhul järgmisest valemist:

$$e_p = e_v^{min} (r - 1) \tau_o ,$$

kus e_v^{min} - graafikute abil leitud ruumi kaugeima punkti päevavalgustustegur (külgvalgustuse puhul) või ruumi keskmine päevavalgustustegur (kombineeritud valgustuse puhul),

r - peegeldunud valguse tegur (vt. tabel 11),

τ_o - valguse läbilaskvustegur.

T a b e l 11

Peegeldunud valguse tegur r

Pindade iseloom ja värv	Keskm. peegeld.-tegur ρ	Ühepoolne valgustus	Kahepoolne valgustus	Kombineeritud valgustus
Heledad värvid (valge, helesinine jne.)	0,5	4	2,2	1,9 - 1,5
Keskmised värvid (kollane, hall jne.)	0,4	3	1,7	1,7 - 1,4
Tumedad värvid (sinine, punane jne.)	0,3	2	1,2	1,5 - 1,2

M ä r k u s: 1. Kombineeritud valgustuse puhul (ülavalgustus + aknad) tegur r suureneb ruumi kõrguse ja laiuse suhte suurenemisel. Maksimaalne väärtus vastab suhtele 1:1, minimaalne aga 0,16:1.

2. Peegeldunud valguse teguri arvutamiseks tuleb eelnevalt määrata kõikide ruumi pindade (põrand, lagi, seinad) keskmine peegeldustegur:

$$\rho_k = \frac{\rho_1 S_1 + \rho_2 S_2 + \rho_3 S_3}{S_1 + S_2 + S_3},$$

kus ρ_1, ρ_2, ρ_3 - vastavate pindade peegeldustegurid,
S_1, S_2, S_3 - vastavad põranda, lae jne. pinnad.

d. Vastasasuvate hoonete seintelt peegeldunud valguse e_t arvutus

Üldjuhul e_t arvutatakse avaldusest:

$$e_t = 0{,}1\ e_t \cdot \tau_o,$$

kus e_t - graafikute abil saadav vastasasuva hoonega varjatud taevavõlvist põhjustatud päevavalgustustegur,
τ_o - valguse läbilaskvustegur.

M ä r k u s. Heledate fassaadide puhul võetakse koefitsiendi 0,1 asemel 0,15.

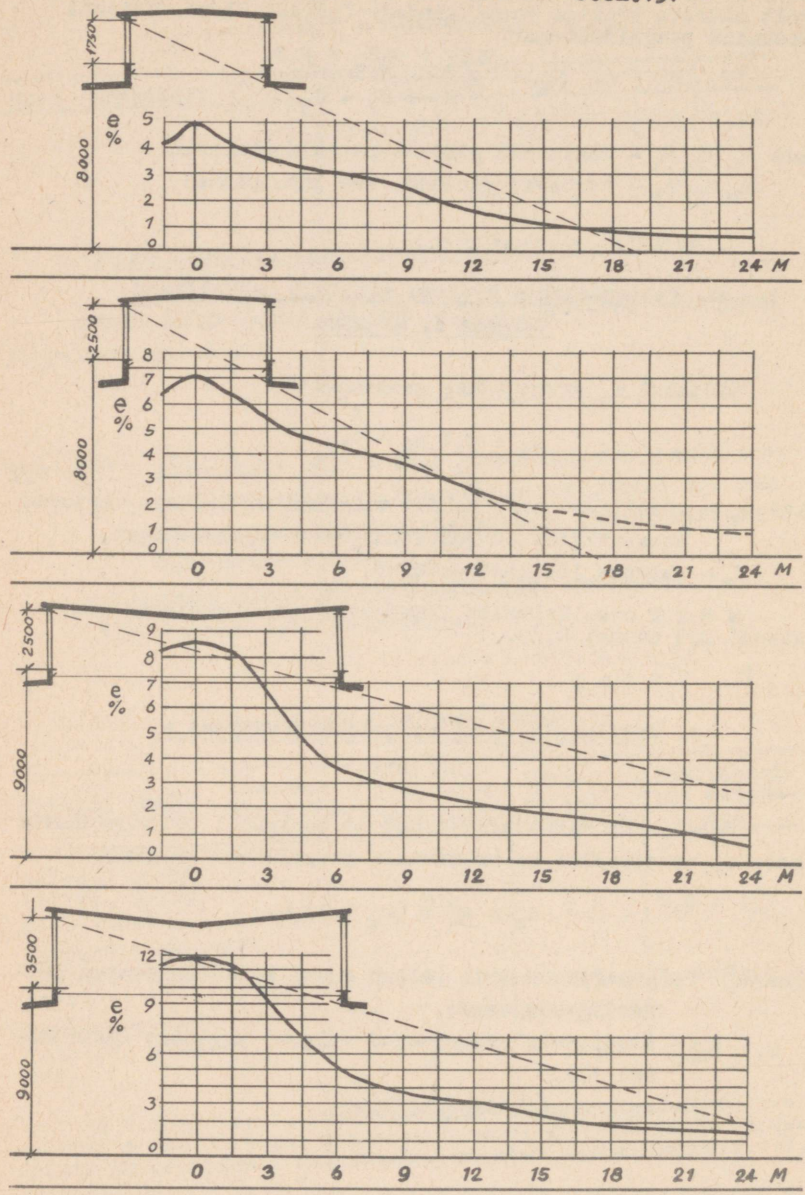
e. Maapinnalt ruumi peegeldunud valguse e_m arvutus

Juhul, kui vastasasuvad hooned on kaugel või puuduvad hoopis, arvutatakse ka maapinnalt peegeldunud valgust:

$$e_m = e_v^{min} (r_m - 1)\tau_o,$$

kus e_v^{min} - graafikute abil leitud ruumi kaugeima punkti päevavalgustustegur,
r_m - maapinnalt peegeldunud valgust arvestav tegur (tabel 12),
τ_o - valguse läbilaskvustegur.

Joon.13.


1750
8000
e %
0 1 2 3 4 5
0 3 6 9 12 15 18 21 24 M
2500
8000
e %
0 1 2 3 4 5 6 7 8
0 3 6 9 12 15 18 21 24 M
2500
9000
e %
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9
0 3 6 9 12 15 18 21 24 M
3500
9000
e %
0 3 6 9 12
0 3 6 9 12 15 18 21 24 M

Tabel 12

Maapinnalt peegeldunud valguse tegur r_m

Maapinna peegeldustegur		Ruumi lae peegeldus-tegur	r_m
Tume pind (asfalt jne.)	0,2	0,7	1,1
Muru, põõsad jne.	0,3	0,7	1,2
Hall pind (kivisillutis jne.)	0,4	0,7	1,3
Hele pind (lumi jne.)	0,6	0,7	1,5

Joon. 13 kujutab teguri e_v olenevust ülavalguslaternate põiklõike kujust ja mõõtmetest.

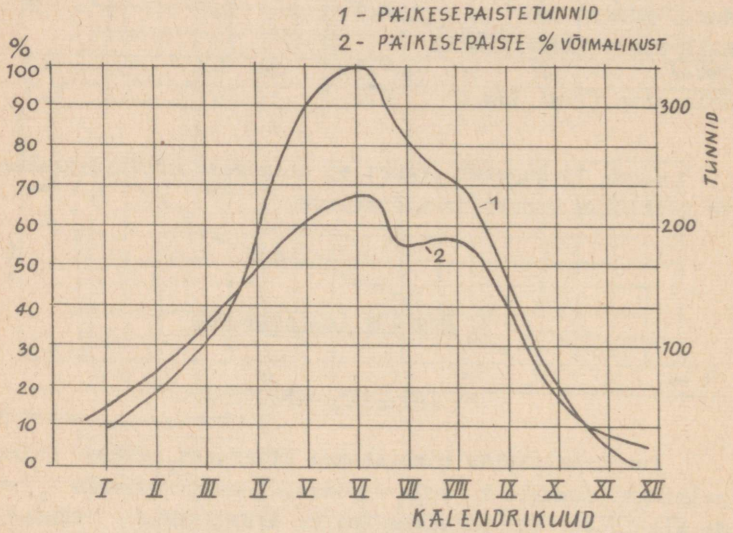
3. Ruumide insolatsioon

a. Insolatsioonikestus

Insolatsiooniks nimetatakse kiiritust otsese päikesepaistega (itaalia k. sole - päike) , arhitektuuris - ruumide kiiritust. Nii pilvisus kui ka aknaklaasid vähendavad ruumi sattuva päikesekiirguse tugevust, kuid ei kõrvalda sellele mõju täiesti. Läbi aknaklaasi pääseb hästi lühilaineline (kõrge temperatuuri) infrapunane kiirgus. Nii ultravioletsel kui ka infrapunasel kiirgusel on tervistav ja bakteritsiidne (baktereid hävitav) toime. Päikesepaistet tuleb pidada eriti väärtuslikuks maades, kus päikesepaisteliste päevade arv on väike. Jooniselt 14 selgub, et ka Tallinnas moodustavad päikesepaistetunnid isegi südasuvel vaid 67% võimalikust, kevadel ja sügisel 30-50%, talvel aga vaid 10-30%.Päike ei paista (Tallinnas) üldse 130 päeval aastas.

Arvestades insolatsiooni tähtsust eriti elamus, oleks tarvis pikemat insolatsioonikestust kevadel, talvel ja sügisel.

Insolatsioonikestus on aeg, mille vältel otsene päikesekiirgus langeb eluruumi. Meie oludes peetakse vajalikuks insolatsioonikestuseks suvel mitte alla 5 tunni, veebruaris, märtsis, septembris ja oktoobris - 3 tundi, novembris, detsembris ning jaanuaris - 2 tundi.



Joonis 14.

Insolatsioonikestus oleneb ka sellest, kas hoone ümbrus on hoonestatud ja kui tihedalt. Vaba silmapiiri puhul mõjutab ruumi insolatsioonikestust akna asend (orientatsioon) ja valgustusnurk (see oleneb aknaava laiusest ning seina paksusest).

Insolatsioonikestuse määramiseks kasutatakse tavaliselt graafikuid Päikese näiva teekonna kohta antud geograafilises punktis. Graafikutel on üheaegselt kujutatud Päikese asimuut ja kõrgusnurk mistahes aasta- ja kellaajal. Hoonete varjava mõju määramiseks tuleb nende graafikute järgi määrata ka see aeg, mille vältel hoone varjab otsest Päikest ja see üldisest insolatsioonikestusest lahutada.

b. Insolatsiooni soojuslik mõju

Päikese infrapunase kiirguse intensiivsust (soojavoolu) nimetatakse tavaliselt radiatsiooniks ja seda väljendatakse kcal/m^2 h või W/m^2 (1 kcal/h·m^2 = 1,163 W/m^2). Meie kliimavöötmes on soojavool kõige tugevam aprillis ja kõige nõrgem detsembris.

Päikese soojakiirgus väljaspool atmosfääri on 1960 W/m^2. Maapinnale pääseb sellest umbes pool. Päikesekiirguse intensiivsus maapinnal oleneb Päikese kõrgusest taevavõlvil. Selge ilmaga rõhtpinnale langeva kiirguse intensiivsus langeb järsult, kui Päike on madalamal kui 30° horisondilt. Kiirtega risti olevale pinnale on kiirguse tugevus tunduvalt suurem ja kasvab väga kiiresti Päikese kõrgusnurga kasvuga 0...30°, nimelt 0...810 000 W/m^2. Vahemikus 30°...90° on intensiivsuse kasv ainult 116 000 W/m^2.

Osa päikesekiirgusest muutub hajuvaks kiirguseks, mida tuntakse taevakiirgusena. Kuigi taevakiirgus on otsesest päikesekiirgusest palju nõrgem, on sellel väga suur tähtsus, kuna kiirgab väga suur pind ja kiirgus kestab kogu päeva. Seejuures on kiirgus pilves ilmaga suurem kui selgega. Taevakiirgus on suurem rõhtsal pinnal, sest selline pind saab kiirguse kogu taevavõlvilt, püstpind aga ainult poolelt.

Kui Päikese kõrgus on 10, 20, 30 ja 40°, siis keskmine taevakiirgus püstaknale on vastavalt 23, 35, 58 ja 78 W/m^2. Sellest pääseb läbi klaaside kahekordse akna puhul 71%, ühekordse puhul üle 80%.

Soojakulu läbi akna (ainult otsejuhtivuse ja konvektsiooni teel) ei olene akna orientatsioonist. Toa esemete temperatuur on suhteliselt madal, sellega seoses on soojakiirguse lainepikkus suur. Sellist kiirgust klaas ei juhi. Järelikult on aken Päikese soojakiirguse püüdjaks.

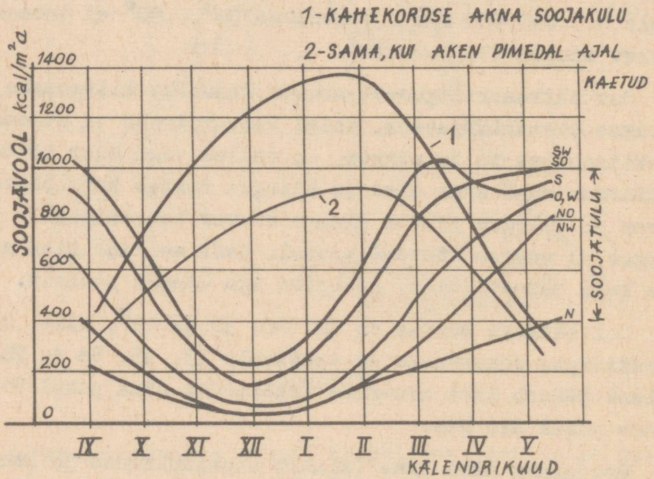
Aken kaotab sooja, olenevalt välistemperatuurist, peamiselt pimedal ajal.

Tuleb silmas pidada, et kütteperioodil kestab pime aeg kauem kui valge (näiteks detsembris 19 tundi ööpäevas).

TRÜ Raamatukogu

Seda soojakadu on võimalik vähendada metallist või plastmassist ribakardinate abil (šalusiid), mida on soovitav asetada klaaside vahele. Kahekordse akna soojajuhtivus langeb suuruselt K = 2,2 suurusele 1,2. Akna soojabilansi arvutamiseks on tarvis teada akna soojakulu ja samuti soojatulu.

Soojatulu arvutamine on küllaltki keerukas, sest peale Päikese kõrguse oleneb soojatulu veel ilmakaarest, pilvisusest, kadudest klaasides jne. Klaasikadude suurus oleneb näiteks klaasist ja nurgast, mille all kiir klaasipinnale langeb. Lihtsam on arvutada soojatulu taevakiirgusest, mis tuleb liita soojatuluga otsesest kiirgusest.



Joonis 15.

Arvestades akende soojabilanssi, võib arvutuste põhjal öelda, et lõunaaken on tunduvalt soodsam põhjaaknast. Kahekordse lõunaakna soojatulu on 182 kWh/m^2 aastas ja soojakulu 278 kWh/m^2 aastas. Põhjaaken saab vaid 42 kWh/m^2 aastas (joon. 15).

Neto-soojakulu (akna soojakulu ja soojatulu vahe) moodustab seega lõunaaknal kogukulust 36%, põhjaaknal aga 85%. Lõunaaken on samaväärne seinaga, mille soojapidavus $R_{ü}$ =1,2, põhjaaken aga seinaga, mille soojapidavus on vaid $R_{ü}$ = 0,5. Kagu- ja edelaakna soojapidavus on ligikaudu $R_{ü}$ = 0,9.

Praeguste vahendite juures pole võimalik kütta ruume päikesekiirguse abil, küll aga saab suuresti parandada akende soojabilanssi.

Projekteerijate teine, otse vastupidine ülesanne on seotud päikesekiirguse negatiivse mõjuga, mis ilmneb kahjulikus toimes mõningatele materjalidele (kangad, paber) ja värvidele, ruumide ülekuumenemises suveperioodil ning ereda valguse pimestavas toimes, kui see paistab tööobjektile või otse silma.

Ruumide optimaalsed insolatsioonitingimused saavutatakse arhitektuurilise plaanilahendusega, samuti ka reguleeritavate aknakatete abil. Kaitsevahendina ruumide ülekuumenemise vastu kasutatakse ka selliseid mittereguleeritavaid vahendeid, nagu varikatted, rõdud, lodžad.

Kaasaegsed elamud jagunevad plaanilahenduselt peamiselt kahte rühma - ühepoolsete korteritega (nn. meridionaalne tüüp) ja kahepoolsete korteritega (nn. ekvatoriaalne tüüp). Viimasel on tunduvaid eeliseid eelmise suhtes, kuna võimaldab vabamat orientatsiooni looduses, mis kindlustab ka vajaliku insolatsioonikestuse.

III peatükk

EHITUSLIK SOOJAFÜÜSIKA

Sissejuhatus

Ehituslik soojafüüsika on ehitusfüüsika haru, mis uurib ehitusmaterjalide ja hoone piirdetarindite soojatehnilisi omadusi ning neis toimuvaid sooja ja niiskuse ülekandeprotsesse. Arenes iseseisvaks teadusharuks 20. sajandi 20-ndail aastail. NSV Liidus oli ehitusliku soojafüüsika rajajaks V. Matšinski. O. Vlassov uuris soojapüsivust ja niiskusrežiimi. Pööramatute termodünaamiliste protsesside teooria rajamine (Onsager, de Groot) andis ehitusliku soojafüüsika arengule uue suuna. Sooja- ja massivahetuse teooria lõi A. Lõkov. Põhiline ehitusliku soojafüüsika ülesanne on hoone välispiirete soojapidavuse arvutusmeetodite väljatöötamine. Piirdetarindi materjal, asetus ja paksus peab tagama nõutava mikrokliima hoone sees ja sobiva soojus- ja niiskusrežiimi piirdes. Sealjuures arvestatakse välis- ja siseõhu temperatuuride erinevust ja niiskust, piirde õhu- ja aurujuhtivust, päikesekiirgust jne.

1. Põhimõisted ja ühikud

Ehitusmaterjalide mahukaal ja poorsus. Üheks ehitusmaterjalide põhiliseks näitajaks on mahukaal:

$$\gamma = \frac{P}{V},$$

kus γ - materjali mahukaal kg/m^3,
P - materjali mass kg,
V - materjali maht m^3.

Ehitusmaterjalide mahukaal kõigub 25...30 kg/m^3 (poorsed plastmassid) kuni 2800...3000 kg/m^3 (graniit, marmor). Levinumad ehitusmaterjalide mahukaalud on esitatud tabelis 1.

Peaaegu kõik ehitusmaterjalid on teatud määral poorsed. Materjali poorsuse aste määratakse valemiga

$$\varepsilon = \frac{g - \gamma}{g} \cdot 100\%,$$

kus ε - materjali poorsus %,
g - materjali erikaal.

T a b e l 13

Ehitusmaterjalide füüsikaliste näitajate väärtused (Eesti NSV-s)

Jrk. nr.	Materjali nimetus	Keskmine mahukaal konstruktsioonis kg/m^3	Arvutuslikud näitajad: Soojaerijuhtivus λ kcal/mh°C	Soojaerisalvestus S_2 kcal/m^{2}h°C	Aurueerijuhtivus μ g/mh mm Hg
1	2	3	4	5	6
	A. Asbesttsementtooted				
1.	Asbesttsemendist lainelised ja tasased plaadid	1900	0,30	5,45	0,0035
2.	Asbesttsemendist soojaisolatsiooniplaadid	500	0,11	1,70	0,052
3.	Sama	300	0,08	1,12	0,052

1	2	3	4	5	6
	B. Asfalt- ja bituumenmaterjalid				
4.	Asfaltpõrand,-võõp	1800	0,65	11,0	0,001
5.	Asfaltbetoon	2100	0,90	14,0	0,001
6.	Naftabituumen	1050	0,15	4,05	0,001
	C. B e t o o n i d				
7.	Raudbetoon (kruusast või looduslikust kivist killustikuga)	2500	1,4	13,4	0,004
8.	Betoon (kruusast või looduslikust kivist killustikuga)	2400	1,25	12,5	0,004
9.	Betoon (tellisest killustikuga)	2000	0,90	9,8	0,007
10.	Šlakkbetoon	1800	0,75	8,4	0,010
11.	Sama	1400	0,55	6,4	0,012
12.	Sama	1000	0,35	4,25	0,018
13.	Šlakkvahtbetoon (termosiitbetoon)	1600	0,50	6,45	-
14.	Sama	1400	0,40	5,40	-
15.	Sama	1200	0,35	4,68	-
16.	Perliitbetoon	1200	0,35	4,68	0,020
17.	Sama	1000	0,28	3,82	0,025
18.	Sama	800	0,22	3,02	0,035
19.	Keramsiitbetoon	1800	0,70	8,10	0,012
20.	Sama	1200	0,40	5,00	0,014
21.	Sama	800	0,25	3,22	0,025
22.	Sama	400	0,15	1,75	0,045
23.	Mullbetoon (gaasbetoon, vahtbetoon, gaas- ja vahtsilikaat)	1000	0,35	4,25	0,015
24.	Sama	800	0,25	3,20	0,018
25.	Sama	600	0,18	2,35	0,023
26.	Sama	400	0,12	1,58	0,030

1	2	3	4	5	6
27.	Sama	300	0,11	1,30	0,035
28.	Gaastuhkbetoon ja vahttuhkbetoon	1200	0,35	4,70	0,010
29.	Sama	1000	0,27	3,76	0,013
30.	Sama	800	0,20	2,88	0,016
	D. Ehitusmördid ja krohvid				
31.	Tsementmört või -krohv	1800	0,80	8,65	0,012
32.	Segamört (tsement-lubi-liiv) või -krohv	1700	0,75	8,15	0,013
33.	Lubimört või -krohv	1600	0,70	7,65	0,016
34.	Lubimört krohvimattidel	1400	0,55	6,35	0,016
	E. Kipsdetailid ja -materjalid				
35.	Kipsplaadid ja -kivid	1100	0,35	4,45	0,014
36.	Vaht- ja gaaskips	500	0,16	2,05	0,050
37.	Kuivkrohvplaadid	1000	0,20	3,50	vt.tbl. 21
	F. Looduslikud kivid				
38.	Marmor, graniit	2800	3,00	21,90	0,0015
39.	Paekivi	2000	1,00	10,80	0,008
40.	Korrapärase kujuga kividest müüritis külmal mördil				
	γ = 2800 kg/m^3	2680	2,75	20,60	0,0028
	γ = 2000 kg/m^3	1960	0,97	10,40	0,0086
	G. M e t a l l i d				
41.	Ehitusteras	7850	50	108,40	0
42.	Malmdetailid	7200	43	96,40	0
43.	Alumiinium	2600	190	121,50	0
	H. Mineraal- ja klaasvatt				
44.	Mineraalvatt	150	0,06	0,65	0,065
45.	Klaasvatt	100	0,05	0,48	0,065

1	2	3	4	5	6
46.	Mineraalvatist matid paberümbrises	200	0,06	0,75	0,009
47.	Mineraalvatist plaadid (bituumeniga immutatud)	400	0,10	1,37	0,045
48.	Sama	300	0,08	1,06	0,055
49.	Mineraalvatist plaadid sünteetilisel sideainel	200	0,06	0,75	0,065
	I. Orgaanilised soojaisolatsioonimaterjalid				
50.	Ehitusvilt	150	0,05	0,88	0,045
51.	Takud	150	0,06	0,97	0,065
52.	Turbaplaadid	250	0,065	1,30	0,025
	K. P i n n a s e d				
53.	Tambitud savi või toortellisseinad	2000	0,80	9,10	0,013
54.	Saviliivmört	1800	0,60	7,50	0,013
55.	Kuiv liiv	1600	0,50	6,45	0,022
56.	Mustmuld	1800	1,00	9,70	-
	L. Plastmassid ja poorsed polümeerid				
57.	Mipoor	20	0,04	0,27	0,075
58.	Pordoon	30...300	0,04 ..0,08		
59.	Vahtplast ПХВI	90...130	0,05	0,93	
60.	" ПС 254	100	0,04	0,5	
61.	Stiropoor	30	0,04	0,33	0,008
62.	Polüstürool	1100	0,065		
63.	Polüetüleen (kõrgrõhu)	920	0,24		
64.	Sama (madalrõhu)	940...960	0,33		
65.	Aminoplast	1400...1800	0,10...0,26		
66.	Polüvinüülkloriid	1100...1140	0,26		
	M. Puit ja puittooted				
67.	Mänd ja kuusk (risti kiudu)	550	0,15	3,60	0,0082

1	2	3	4	5	6
68.	Mänd ja kuusk (piki kiudu)	550	0,30	5,00	0,043
69.	Tamm (risti kiudu)	800	0,20	5,00	0,0075
70.	Sama (piki kiudu)	800	0,35	6,60	0,040
71.	Liimitud vineer	600	0,15	3,75	0,003
72.	Ksüloliit	1800	0,70	14,00	0,012
73.	Sama	1000	0,30	6,25	0,017
74.	Saepuru	250	0,08	1,75	0,035
75.	Fibroliit (TEP-plaat)	600	0,20	3,90	0,014
76.	Sama	350	0,13	2,60	0,035
77.	Puitkiudplaat	1000	0,29	6,75	0,016
78.	Sama	600	0,14	3,60	0,015
79.	Sama	200	0,06	1,37	0,032
	N. Rullmaterjalid				
80.	Linoleum	1800	0,33	7,35	0,0002
81.	Sama	1600	0,28	6,40	0,0002
82.	Sama	1350	0,20	5,00	0,0002
83.	Sama	1100	0,16	4,00	0,0002
84.	Ehituspapp	1000	0,20	4,25	vt.tbl.21
85.	Sama	700	0,15	3,10	vt.tbl.21
86.	Reliin	1200	0,19	4,60	0,0002
87.	Ruberoid, pergamiin, tõrvapapp	600	0,15	2,85	vt.tbl.21
	O. Soojaisolatsioonitäidised				
88.	Katlašlakk	1000	0,25	3,63	0,026
89.	Sama	700	0,19	2,60	0,029
90.	Keramsiit	900	0,35	4,05	0,028
91.	Sama	500	0,18	2,16	0,040
92.	Sama	300	0,13	1,42	0,050
	P. Tellismüüritis				
93.	Punasest tellisest müüritis külmal mördil	1800	0,70	8,30	0,014
94.	Sama, soojal mördil γ = 1400 kg/m^3	1700	0.65	7,75	0,016

1	2	3	4	5	6
95.	Silikaattellistest müüritis	1900	0,95	8,20	0,014
96.	Kärgtellistest müüritis külmal mördil (105 auguga kivid)	1300	0,45	5,65	0,020
97.	Sama (60 auguga kivid)	1300	0,50	6,00	0,020
98.	Sama (31 auguga kivid)	1400	0,55	6,50	0,018
	R. Klaasmaterjalid				
99.	Gaas- või vahtklaas	400	0,12	1,58	0,003
100.	Sama	300	0,10	1,25	0,003
101.	Aknaklaas	2500	0,65	9,20	0,0

Orgaaniliste materjalide erikaal g = 1450 ... 1550 kg/m^3; anorgaaniliste materjalide g = 2400 ... 3000 kg/m^3.

Kivimaterjalide poorsus muutub nullist (graniit) kuni 75%-ni (poorne tellis).

Ehitusmaterjalide niiskus. Hoone piirdetarindis ehitusmaterjalid sisaldavad alati teatud hulga niiskust. Materjali niiskumise astet iseloomustab tema kaaluline ja mahuline niiskus (%-des).

Materjali kaaluline niiskus

$$\omega_k = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \cdot 100\%,$$

kus ω_k - materjali kaaluline niiskus %,
P_1 - niiske materjali kaal g,
P_2 - kuiva materjali kaal g.

Materjali mahuline niiskus

$$\omega_M = \frac{V_1}{V_2} \cdot 100\%,$$

kus ω_M - materjali mahuline niiskus %,

V_1 - materjalis oleva niiskuse maht cm^3,
V_2 - kuiva materjali maht cm^3.

Seos sama materjali kaalulise ja mahulise niiskuse vahel väljendub alljärgnevalt:

$$\frac{\omega_M}{\omega_k} = \frac{\gamma}{1000}.$$

Enamikus ehitusmaterjalides ei esine suletud poore, vaid poorid on omavahel ja ümbritseva õhuga ühenduses.

Materjali kokkupuutumisel niiskusega imendub viimane kapillaarjõudude mõjul materjali pooridesse. Sel moel niiskub materjal nii atmosfääri sademetest ja niiskusest kui ka ruumisisesest niiskusest.

Ehitusmaterjalide soojajuhtivus. Ehitusmaterjalide põhiliseks soojatehniliseks näitajaks on soojajuhtivus, s.o. materjali omadus lasta läbi sooja. Materjali soojajuhtivust iseloomustab soojaerijuhtivuse λ väärtus, mis näitab, mitu kilokalorit sooja voolab 1 tunnis läbi ruutmeetrisuuruse pinna, kui temperatuuri langus on 1^oC meetripikkuse teekonna kohta kcal/mh^oC. Mittemetalsetel ehitusmaterjalidel kõiguvad soojaerijuhtivuse väärtused 0,04 kcal/mh^oC ja 3,0 kcal/mh^oC vahel.

Materjali soojaerijuhtivuse λ väärtusele avaldavad mõju materjali poorsus, niiskus, temperatuur ja materjali keemilis-mineraloogiline koostis.

a. Soojaerijuhtivuse λ sõltuvus materjali poorsusest. Põhilised ehitusmaterjalid on poorse struktuuriga. Nad koosnevad kõvast ainest, mis moodustab materjali skeleti, ja õhust, mis täidab tahke materjali vahel olevad poorid. Kõva materjali soojajuhtivus on keskmiselt 100 korda suurem kui materjali poorides oleval õhul. Poorides oleva õhu soojajuhtivus oleneb pooride läbimõõdust. Pooride läbimõõdu vähenemisega kahaneb ka õhu soojajuhtivus. Poorse materjali soojaerijuhtivuse väärtus on materjali ja õhu soojaerijuhtivuste väärtuste vahepealne. Üldiselt, mida kergem (poorsem) on materjal, seda väiksem on ka tema soojaerijuhtivus, näiteks vahtbetoonil,

kui γ = 1000 kg/m^3 λ = 0,35 kcal/mh°C,
" = 600 kg/m^3 = 0,18 " ,
" = 300 kg/m^3 = 0,11 " .

b. Soojaerijuhtivuse λ sõltuvus materjali keemilis-mineraloogilisest koostisest. Kristalse struktuuriga materjalide soojaerijuhtivus on mitu korda suurem kui sama keemilise koostisega amorfse struktuuriga materjalidel. Näiteks kvartsi (kristalse struktuuriga SiO_2) soojaerijuhtivus λ = = 7,71 kcal/mh°C, aga treepelil (amorfse struktuuriga) ainult 1,19 kcal/mh°C.

c. Soojaerijuhtivuse λ sõltuvus materjali temperatuurist. Ehitusmaterjalide soojaerijuhtivus sõltub materjali keskmisest temperatuurist, milles toimub soojavool. Temperatuuri tõusuga suureneb materjali λ väärtus.

Temperatuurivahemikus 0°...+100°C muutub materjali soojaerijuhtivus järgmise empiirilise valemi järgi:

$$\lambda_t = \lambda_0(1 + \rho t),$$

kus λ_0 - materjali soojaerijuhtivus temperatuuril 0°C,
λ_t - materjali soojaerijuhtivus temperatuuril t°C,
t - materjali temperatuur °C,
ρ - tegur, mille väärtus võrdub 0,0025-ga.

d. Soojaerijuhtivuse λ sõltuvus materjali niiskusest. Materjali niiskumisel tõrjub niiskus kas osaliselt või täielikult õhu materjali pooridest välja. Sealjuures on aga vee soojaerijuhtivus ligikaudu 20 korda suurem kui õhul.

Vee külmumisel täituvad poorid jääga, mille λ ületab 4 korda vee ja 80 korda õhu soojaerijuhtivuse. Seega materjali niiskumisel selle soojaerijuhtivus suureneb.

Ehitusnormides nähakse ette niiskete ruumide ($\varphi > 60\%$) piiretes arvutuslikud soojaerijuhtivused 10...15% suuremad kui kuivades ruumides ($\varphi < 50\%$).

Ehitusmaterjalide soojamahtuvus. Soojaerimahtuvust C mõõdetakse kilokalorite hulgaga, mis kulub ühe kg materjali soojendamiseks 1°C võrra kcal/kg°C.

Et tõsta mingi keha temperatuuri Δt kraadi võrra, on vajalik soojahulk

$$Q = c \gamma V \Delta t,$$

kus Q - soojahulk kcal,
c - materjali soojaerimahtuvus kcal/kg°C,
γ - materjali mahukaal kg/m^3,
V - materjali maht m^3,
t - materjali temperatuuri muutus °C.

Tavalistel ehitusmaterjalidel kõigub soojaerimahtuvuse c väärtus 0,18 (betoon)...0,6 (puit) vahel. Materjali niiskuse suurenemisel suureneb ka tema soojaerimahtuvus (veel c = = 1 kcal/kg°C).

Soojakiirgus ja -neeldumine. Kõik ehitusmaterjalid ja ka füüsikalised kehad kiirgavad pidevalt ümbritsevasse keskkonda energiat, kuid samaaegselt ka neelavad ja peegeldavad teistelt kehadelt neile langenud kiirgusenergiat. Materjali soojakiirgusmoodul C sõltub tema keemilisest koostisest ja kiirgavate pindade iseloomust (karedad pinnad kiirgavad sooja paremini kui siledad). Arvuliselt on suurim erikiirguse C väärtus absoluutselt mustal kehal (C_o = 4,96 kcal/m^2 °C). Tavalistel ehitusmaterjalidel (tellis, krohv, puit, kips, klaas, papp) on C = 4,3...4,76. Materjali omadust neelata soojakiirguse energiat iseloomustab soojaerineelduvus ε:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_o} = \frac{C}{4,96},$$

kus C - materjali soojaerikiirgus samal temperatuuril kui absoluutselt musta keha soojaerikiirgus C_o.

Soojavool kujutab endast keerulist füüsikalist protsessi ning võib toimuda kolmel eri teel:

1) soojajuhtivuse (konduktsiooni), 2) soojaringluse (konvektsiooni) ja 3) kiirguse (radiatsiooni) teel.

Soojajuhtivus, s.o. sooja edasikandumine vahetu kokkupuute (kontakti) teel erinevate temperatuuridega kehade (või osakeste) vahel. Soojavool materjalis soojajuhtivuse teel on väljendatav järgnevalt:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2),$$

kus q - soojavool kcal/m^{2}h,
δ - seina paksus m,
t_1-t_2 - temperatuuride vahe piirde välis- ja sisepinna vahel,
λ - materjali soojaerijuhtivus kcal/mh°C.

Soojaringluse teel kandub soe edasi liikuvate vedelike või gaaside osakestega. Tavaliselt esineb konvektiivne soojaülekanne tahke keha pinna ja teda vahetult puutuva (liikumises oleva) vedeliku või gaasilise keskkonna vahel. Soojaülekanne tahke keha pinna ja õhu vahel toimub järgneva valemi kohaselt:

$$Q = \alpha_{ko} (t_õ - t_p) F,$$

kus Q - soojahulk kcal/h,
F - tahke keha pind m^2,
$t_õ$ - õhu temperatuur °C,
t_p - tahke keha pinna temperatuur °C,
α_{ko} - konvektiivne soojaeriülekanne kcal/m^{2}h°C.

Piirde sisepinna konvektiivne soojaeriülekanne määratakse valemitega:

a) kui $\Delta t = (t_s - \tau_s) < 5°$
$\alpha_{ko} = 3 + 0{,}08 (t_s - \tau_s)$,

kus $\Delta t = (t_s - \tau_s)$ - ruumi õhu ja piirde sisemise pinna temperatuuride vahe,

b) kui $\Delta t = (t_s - \tau_s) \geqslant 5°$

$$\alpha_{ko} = b \sqrt[4]{t_s - \tau_s},$$

kus b - koefitsient, mis ruumis oleva seisva õhu puhul võetakse 2,2; tootmisruumis pöörlevate mehhanismide või külmade pindade (aken, uks) puhul 2,75.

Piirde välispinna α_{ko} määratakse valemiga:

$$\alpha_{ko} = 6,31\ v^{0,656} + 3,25\ e^{-1,91},$$

kus v - tuule kiirus m/s,
e - naturaallogaritmi alus (e = 2,718).

Arvutuslikuks tuule kiiruseks võetakse suurim keskmine tuule kiirus erinevatest ilmakaartest jaanuaris. 15 kuni 30m kõrgustel hoonetel suurendatakse tuule kiirust 15% võrra, 31 kuni 50 m kõrguste hoonete juures aga 40% võrra.

T a b e l 14

Suurimad keskmised tuulekiirused erinevatest ilmakaartest Eesti NSV-s jaanuaris

A s u k o h t	Tuule kiirus m/s
Tallinn	6,8
Tartu	4,4
Pärnu	7,4
Narva	5,0
Kõpu	7,3

Kiirguse teel kandub soe materiaalselt kehalt õhku või ka õhuta ruumi, sõltumata ruumi temperatuurist. Stefan-Boltzmanni seaduse järgi on soojavool võrdeline absoluutse temperatuuri 4. astmega:

$$q = C\ (\frac{T}{100})^4,$$

kus q - soojavool kcal/m^2h,
C - materjali pinna soojaerikiirgus,
T - absoluutne temperatuur ^oK.

Eeltoodud valemit võib praktiliselt kasutada ka ehitusmaterjalide kohta (kehtib absoluutselt musta keha puhul).

Kui esineb kaks paralleelset pinda, mis asetsevad suhteliselt teineteise lähedal, siis vastastikuse kiirguse teel ülekandunud soojavool

$$q_{ki} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_o}} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

kus q_{ki} - kiirguse teel ülekandunud soojahulk kcal/m^{2}h,
C_1, C_2 - pindade erikiirgused,
C_o - absoluutselt musta keha erikiirgus,

või lihtsustatud valem:

$$q_{ki} = \alpha_{ki} (t_1 - t_2),$$

kus

$$\alpha_{ki} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_o}} \cdot \frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{t_1 - t_2},$$

kus α_{ki} - kiirguslik soojaeriülekanne kcal/m^{2}h^{o}C,
t_1-t_2 - vastastikku kiirgavate pindade t^o-ide vahe kraadides.

Kui kahe vastastikku asetseva pinna erikiirgused on C_1 ja C_2, siis nende omavaheline erikiirgus

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_o}}.$$

Alljärgnevas on toodud näiteid pindade omavahelistest kiirgusteguritest:

	Läikiv alumiinium (C_1 = 0,3)	Alumiiniumlakk (C_1=1,68)	Tavaline ehitusmaterjal (C_1 = 4,6)
Läikiv alumiinium (C_2=0,3)	0,155	0,268	0,298
Tsingitud plekk (C_2 = 1,3)	0,256	0,855	1,270
Alumiiniumlakk (C_2 = 1,68)	0,270	1,010	1,640
Tavaline ehitusmaterjal (C_2=4,6)	0,300	1,640	4,300

2. Piirdekonstruktsioonide soojatehnilised näitajad

Soojavahetus hoone piirde ja ümbritseva keskkonna vahel toimub peamiselt konvektsiooni ja kiirguse teel. Konvektiivselt kandub soe õhult piirde pinnale nende temperatuuride erinevuse puhul.

Konvektsiooni teel toimuv soojavool

$$q = \alpha_{ko} (t_1 - t_2),$$

kus t_1-t_2 - piirde pinna ja õhu temperatuuride vahe kraadides.

Soojaülekanne kiirguse teel toimub kehade vahel, mis asuvad teatud kaugusel teineteisest ja on erineva temperatuuriga või erineva soojakiirgusmooduliga.

Hoone piirdekonstruktsiooni pinnad on kiirguslikus soojavahetuses järgnevate kehadega:

a) hoone sees - sisemiste piirdekonstruktsioonidega ja ruumis asuvate esemete ning inimestega,

b) väljaspool hoonet - välispiirde vastas olevate esemetega (hooned, puud jne.), maaga ja õhuruumiga.

Kehade temperatuur, millega hoone piirdekonstruktsioon on soojavahetuses, võetakse võrdseks õhu temperatuuriga, milles nad asuvad.

Kiirguse teel toimuv soojavool

$$q = \alpha_{ki} (t_1 - t_2),$$

kus t_1-t_2 - vastastikku kiirgavate pindade temperatuuride vahe kraadides.

Soojavool, mis toimub üheaegselt konvektsiooni ja kiirguse teel piirdekonstruktsiooni pinna ja teda ümbritseva õhu vahel

$$q = (\alpha_{ki} + \alpha_{ko})(t_1 - t_2) = \alpha (t_1 - t_2),$$

kus α - piirdekonstruktsiooni pinna soojaeriülekanne. Kui $(t_1 - t_2) = \Delta t = 1$, siis $q = \alpha$.

Piirdekonstruktsiooni pinna soojaeriülekanne kujutab endast soojavoolu, mis tekib siis, kui piirdepindade ja ümbritseva õhu temperatuuride vahe on 1°C.

Piirdekonstruktsiooni sise- ja välispinna soojaeriülekanded on tinglikud suurused ja eri väärtustega. Peamist mõju avaldavad nende väärtustele konvektiivse soojavahetuse tingimused.

Loomuliku konvektsiooni (ilma ventilaatorita) puhul hoone sees ja tuule korral väljas on ehitusnormides toodud järgnevad soojaeriülekannete väärtused:

a) piirde sisepinnal:

α_s = 7,5 kcal/m^{2}h°C, kui piirde pind on tasane;

α_s = 7,0 kcal/m^{2}h°C, kui ribilae puhul ribi kõrguse h suhe ribidevahelisse kaugusse a on 0,2...0,3;

α_s = 6,5 kcal/m^{2}h°C, kui h/a > 0,3;

siinjuures α_s - piirde sisepinna soojaeriülekanne kcal/m^{2}h°C;

b) piirde välispinnal:

α_v = 20 kcal/m^{2}h°C, kui välispind on vahetult kokkupuutes välisõhuga;

α_v = 7 kcal/m^{2}h°C, kui välispind asub kütmata ruumis (pööningul), ja = 5 kcal/m^{2}h°C - külmade keldriruumide peal.

Siin α_v - piirde välispinna soojaeriülekanne kcal/m^{2}h°C.

Soojaeriülekande pöördväärtust nimetatakse piirdekonstruktsiooni vastava pinna soojatakistuseks:

a) piirde sisepinnal:

$R_s = \frac{1}{\alpha_s}$ = 0,133 m^{2}h°C/kcal, kui piirde pind on tasane. Kui lae pind on ribidega või kessoonidega, suureneb piirde sisepinna soojatakistus R_s; soojaülekanne konvektsiooni teel aga väheneb, võrreldes siledate lagedega, ja

R_s = 0,143 m^{2}h°C/kcal, kui h/a = 0,2...0,3 ja

R_s = 0,154 m^{2}h°C/kcal, kui h/a > 0,3;

b) piirde välispinnal:

$$R_v = \frac{1}{\alpha_v} = 0{,}05 \ m^2h^oC/kcal,$$

kui piirde välispind on vahetult kokkupuutes välisõhuga. Kui välispind puutub kokku kütmata ruumiga, näiteks pööninguga, siis piirde välispinna soojatakistus R_v suureneb ning

$R_v = 0{,}143 \ m^2h^oC/kcal$, kütmata keldriruumide peal aga $0{,}20 \ m^2h^oC/kcal$.

Soojavool läbi ühtsest materjalist tasaste pindadega piirdekonstruktsiooni avaldub järgnevalt:

$$q = \frac{\tau_1 - \tau_2}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{\tau_1 - \tau_2}{R}, \text{ seega } R = \frac{\delta}{\lambda},$$

kus R - piirde soojatakistus $m^2h^oC/kcal$.

Mida suurem on piirde soojatakistus R, seda soojapidavam on vaadeldav piirdekonstruktsioon.

Mitmest ühtlasest materjalist koosneva piirde soojatakistus

$$R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \ldots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} = R_1 + R_2 + \ldots + R_n,$$

kui üksikud kihid asuvad paralleelselt piirde pinnaga,

kus $\delta_1, \delta_2, \delta_n$ - üksikute piirdekonstruktsiooni kihtide paksused m,

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_n$ - vastavad soojaerijuhtivused $kcal/mh^oC$,

$R_1, R_2, \ldots R_n$ - vastavad soojatakistused $m^2h^oC/kcal$.

Kui statsionaarne soojavool tungib tasaste pindadega piirdekonstruktsiooni kaudu siseõhust välisõhku, siis soojavool ei muutu ei suuruses ega suunas. Järelikult ka üksikutel teelõikudel jääb soojavool muutumatuks ja soojavool siseõhust piirde sisepinnale

$$q = \frac{t_s - \tau_s}{R_s},$$

soojavool läbi piirde materjali

$$q = \frac{\tau_s - \tau_v}{R}$$

ja soojavool piirde välispinnalt välisõhku

$$q = \frac{\tau_v - t_v}{R_v} .$$

Siit järeldub, et

$$q = \frac{t_s - t_v}{R_s + R + R_v} = \frac{t_s - t_v}{R_ü} ,$$

kus $R_ü$ - piirde üldine soojatakistus $m^2h^oC/kcal$.

Piirde üldine soojatakistus $R_ü$ on põhiliseks näitajaks, mille järgi hinnatakse piirde soojatehnilisi omadusi.

Piirde soojajuhtivus $K = \frac{1}{R_ü}$, mis näitab, mitu kcal soojavoolab tunnis läbi piirde m^2, kui kahel pool piiret oleva õhu temperatuuride vahe on 1^oC ($kcal/m^2h^oC$).

Et leida temperatuuri jaotust piirde mingis punktis, on küllaldane, kui meil on teada temperatuurid piirde mõningais iseloomulikes tasapindades, nimelt välispinnas ja sisepinnas ning erinevate kihtide kokkupuutepindades. Ühtlasest materjalist kihi sees jaotub temperatuur sirgjooneliselt (vt. joon. 16).

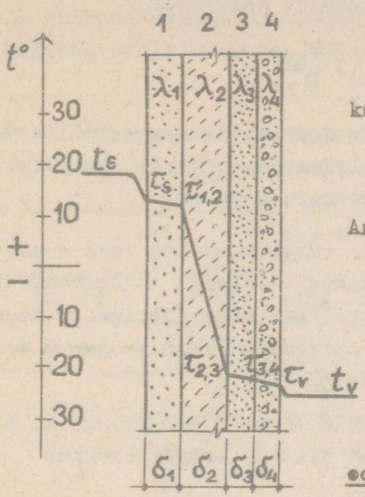
Statsionaarses olukorras esineb piirdes konstantne soojavool, seega

$$\frac{t_s - \tau_s}{R_s} = \frac{t_s - t_v}{R_ü} .$$

Siit saame leida piirde sisepinna temperatuuri τ_s:

$$\tau_s = t_s - \frac{R_s}{R_ü}(t_s - t_v).$$

Näiteks joonisel 16 esitatud neljakihilisel piirdekonstruktsioonil esimese ja teise kihi kokkupuutepinnal esineva temperatuuri τ_1 saame leida samuti soojavoolude võrdsusest:



Joonis 16.

$$\frac{t_s - t_v}{R_ü} = \frac{t_s - \tau_1}{R_s + R_1},$$

kust

$$\tau_1 = t_s - \frac{t_s - t_v}{R_ü}(R_s + R_1).$$

Analoogiliselt

$$\tau_2 = t_s - \frac{t_s - t_v}{R_ü}(R_s + R_1 + R_2).$$

<u>Õhkvahega piirdekonstruktsioon</u> soojatehniline efekt põhineb piirde suletud tühimikke täitva õhu märksa väiksemal soojaerijuhtivusel kui tavalistel ehitusmaterjalidel. Õhkvahega piirde soojapidavuse arvutus ei erine tavalisest, välja arvatud õhkvahe soojatakistuse leidmine.

Kui läbi tühimiketa piirde toimub soojavool soojajuhtivuse teel, siis läbi õhkvahe toimub soojaülekanne kõigil kolmel viisil, s.o. soojajuhtivuse, konvektsiooni ja kiirguse teel.

Soojahulk, mis kandub läbi liikumatu õhu piirdes soojajuhtivuse teel, on võrdeline õhkvahe laiusega ja väljendub järgmiselt:

$$q = (\tau_1 - \tau_2)\frac{\lambda_{õhk}}{\delta_õ},$$

kus τ_1, τ_2 – õhkvahe pindade temperatuurid kraadides,
$\lambda_{õhk}$ – õhu soojaerijuhtivus kcal/m²h°C,
$\delta_õ$ – õhkvahe laius m.

Kuna õhkvahe soojavooluga risti olevad pinnad on erineva temperatuuriga, tekib suletud õhkvahes õhu loomulik kon-

vektsioon, koos sellega ka konvektiivne soojaülekanne. Konvektsiooni teel õhkvahest ülekanduv soojavool

$$q = (\tau_1 - \tau_2)\frac{\lambda_{ko}}{\delta_õ},$$

kus λ_{ko} – tinglik konvektiivne soojaeriülekanne, mille väärtus sõltub õhkvahe laiusest, pindade temperatuuride vahest ja soojavoolu suunast.

Õhkvahe laiuse ja pindade temperatuuride vahe suurenemisega λ_{ko} väärtus kasvab. Õhkvahe laiuse vähenemisel 5 mm-ni muutub λ_{ko} väärtus ligilähedaseks nulliga. Samuti on $\lambda_{ko} = 0$ horisontaalsetes õhkvahedes, kus soojavool suundub ülalt alla (kütmata keldri laes).

Kiirguse teel õhkvahest ülekandunud soojahulk ei sõltu vahe laiusest, vaid õhkvahe pindade temperatuuride vahest:

$$q = \lambda_{ki}(\tau_1 - \tau_2),$$

kus $\lambda_{ki} = \alpha_{ki}$ – kiirguslik soojaeriülekanne, mis määratakse III ptk. p 1 (lk. 64) toodud vastava valemi järgi.

Üldine soojahulk, mis kandub läbi õhkvahe, võrdub kolmel viisil ülekandunud soojahulkade summaga:

$$q = (\tau_1 - \tau_2)\frac{\lambda_{õhk} + \lambda_{ko} + \vartheta_õ \lambda_{ki}}{\delta},$$

$\lambda_{õhk} + \lambda_{ko}$ väärtused on toodud tabelis 15.

T a b e l 15

$\lambda_{õhk} + \lambda_{ko}$ väärtused vertikaalse õhkvahe puhul (K. Fokini järgi)

$\tau_1 - \tau_2$ °C	Õhkvahe laius cm				
	1	5	10	15	20
1	0,02	0,021	0,07	0,096	0,12
5	0,021	0,032	0,106	0,143	0,178
10	0,022	0,038	0,125	0,17	0,213
15	0,024	0,042	0,138	0,188	0,236
20	0,026	0,045	0,148	0,202	0,256
25	0,028	0,048	0,157	0,214	0,268

Praktilistes arvutustes ei ole nii suur täpsus vajalik ja ehitusnormides soovitatakse kasutada tabelis 16 toodud õhkvahe soojatakistuse väärtusi.

T a b e l 16

Õhkvahe soojatakistused, kui õhkvahe pindade temperatuuride erinevus $\Delta\tau = 10^{o}C$

Õhkvahe laius $\delta_{õ}$ cm	Õhkvahe soojatakistus $R_{õv}$ $m^2h^{o}C/kcal$			
	vertikaalsete õhkvahede ja alt üles suunduva soojavoolu puhul, horisontaalsete õhkvahede puhul		horisontaalses õhkvahes ülalt alla suunduva soojavoolu puhul	
	suvel	talvel	suvel	talvel
1	0,147	0,172	0,151	0,179
2	0,155	0,183	0,182	0,222
3	0,16	0,19	0,192	0,238
5	0,165	0,196	0,204	0,256
10	0,172	0,208	0,213	0,27

Kui õhkvahe pindade temperatuuride erinevus on alla 10^{o}, tuleb tabelis 16 toodud $R_{õv}$ väärtused korrutada järgnevate koefitsientidega c:

$\Delta\tau = 8^{o}$, c = 1,05,
$\Delta\tau = 6^{o}$, c = 1,1,
$\Delta\tau = 4^{o}$, c = 1,25,
$\Delta\tau = 2^{o}$, c = 1,4.

Märgatavalt vähendab soojaülekannet õhkvahes tema sisemisele pinnale asetatud alumiiniumkile, mille kiirgustegur on väga väike (C = 0,2...0,4). Selline kile töötab soojapeeglina, takistades sooja kiirgumist ühelt õhkvahe pinnalt teisele. Õhkvahe soojatakistus suurenes alumiiniumkile kasutamisel kuni 69%.

Õhkvahe asetamine piirde konstruktsiooni välispinna lähedale suurendab õhkvahe soojapidavaid omadusi, sest väheneb soojaülekanne kiirguse teel läbi õhkvahe.

Hoone välispiirde konstruktsioonid alluvad pidevalt muutuvatele välis- ja siseõhu temperatuuride mõjule. Enamasti toimub temperatuuri muutus perioodiliselt: a) välisõhu temperatuur langeb öösiti ja tõuseb päeval, b) siseõhu temperatuuri muutus sõltub kütmise iseloomust. Piiret ümbritsevate õhutemperatuuride muutus kutsub esile ka temperatuuride kõikumise piirdes endas. Piirdekonstruktsiooni ekspluatatsiooniomadused sõltuvad suurel määral temperatuuri kõikumise astmest piirde sisemisel pinnal. Viimane aga ei sõltu niivõrd piirde soojatakistusest, kui just piirde soojapüsivusest ja tema sisemise pinna soojasalvestusvõimest.

Piirde võimet omastada erineval määral sooja perioodiliselt muutuva soojavoolu puhul, nimetatakse piirde soojasalvestuseks. Viimane oleneb kihtide materjalist ja nende paigutusest piirdes. Vastavalt õhu temperatuuri muutustele piirde pinnal levib temperatuuri kõikumine ka piirde sisemusse ning kõikumiste amplituud väheneb piirdepinnast eemaldumisel. Koos temperatuuri kõikumisega piirdes muutub ka soojavool ajaliselt, sõltudes ümbritseva õhu temperatuuride muutustest. Maksimaalne soojavoolu kõikumise amplituud piirde pinnal on võrdeline sama piirdepinna maksimaalse temperatuurikõikumise amplituudiga. Võrdelisuse tegur nimetatud piirde pinna soojaerisalvestuseks on avaldatav alljärgnevalt:

$$S_s = 2{,}507\sqrt{\frac{\lambda c \gamma}{T}},$$

kus S_s - piirde sisepinna soojaerisalvestus kcal/m^{2}h$^\circ$C,
T - temperatuuri ja soojavoolu kõikumiste perioodi kestus tundides,
λ, c, γ - piirde materjali soojaerijuhtivus ja soojaerimahtuvus ning mahukaal.

Ühekihilise piirde puhul osutub piirde sisepinna soojaerisalvestus võrdseks piirde materjali soojaerisalvestusega:

$$s = S_s = 2{,}507\sqrt{\frac{\lambda c \gamma}{T}},$$

kus s - piirde materjali soojasalvestustegur kcal/m^2h^oC.

Piirde materjali soojaerisalvestus iseloomustab materjali omadust omastada sooja tema pinna temperatuuri kõikumisest olenevalt. Arvuliselt sõltub teguri väärtus materjalist ja temperatuuri kõikumise perioodist.

Piirdekonstruktsioonide soojatehnilisel arvutusel võetakse tavaliselt temperatuuri kõikumiste perioodiks T = 24 tundi ja vastav piirde materjali soojaerisalvestus

$$S_{24} = 0{,}51\sqrt{\lambda c \gamma}\ ,$$

kus S_{24} - materjali soojaerisalvestus 24-tunnilise temperatuurikõikumiste perioodi puhul, mille arvulised väärtused on toodud tabelis 13 lahtris 5.

Temperatuurikõikumiste ulatus sõltub suuresti piirde soojapüsivusest ehk inertsusest. Piirdekonstruktsiooni võimet teatud määral piirde sisemise pinnaga tasakaalustada läbi piirde mineva soojavoolu kõikumisest tingitud temperatuuri muutusi nimetatakse piirde soojapüsivuseks. Mida väiksemad on temperatuurikõikumised piirde sisepinnal, seda soojapüsivam on piire. Piirde soojapüsivusest sõltub ka temperatuuri püsivus ruumi sees. Soojapüsivust iseloomustab dimensioonita suurus D:

$$D = R_s = \frac{\partial}{\lambda}\sqrt{\lambda c \gamma \frac{2\pi}{T}}\ ,$$

kus ∂ - piirde paksus m.

Mitmekihiliste erinevatest materjalidest piirete puhul

$$D = R_1S_1 + R_2S_2 + \ldots + R_nS_n,$$

kus $R_1, R_2, \ldots, R_n$ - piirde üksikute kihtide soojatakistused $m^2h^oC/kcal$,

$S_1, S_2, \ldots, S_n$ - piirde üksikute kihtide soojaerisalvestused kcal/m^2h^oC.

Kui elamu seinad on suure soojasalvestusvõimega, kulub hulk aega ja sooja, enne kui külmad seinad soojenevad. Kui

aga sellised seinad on soojenenud ehk läbini soojaks köetud, siis püsivad nad ka kauem soojad. Peamised soojasalvestajad elamutes on siseseinad, vahelaed, ahjud ja sisustus. Kivi on üldiselt võrdlemisi hea soojasalvesti ja on seepärast soovitatavam siseseinamaterjal kui puit või kerge plaat. Välisseina pinna temperatuuri ööpäevaseid kõikumisi aitab mõjuvalt tasandada ainult seina seesmine kiht, mis peaks olema suure soojasalvestusega. Ruumides, kus soojust on tarvis vaid lühemaks ajaks, nagu paljud ühiskondlikud hooned, on soovitatav, et kiviseinad oleksid seestpoolt kaetud mingi materjaliga, millel on suur soojatakistus, kuid väike soojasalvestusvõime.

3. Hoone piirdekonstruktsioonide soojapidavuse arvutus

Hoone piirdekonstruktsioonide projekteerimisel on vaja teada:

a) geograafilise koha kliima iseärasusi,

b) hoone siseruumide soojus- ja niiskusrežiimi.

Andmed geograafilise koha kliima kohta on toodud ehitusnormides (СНиП II-А.6-62). Hoone siseruumide mikrokliima sõltub ruumi kasutusotstarbest. Vastavalt ehitusnormidele on kindlaks määratud mikrokliimad erinevais hooneis, mis on toodud tabelis 17.

Tabel 17

Arvutuslikud sisehu temperatuurid ja suhtelised niiskused

Hoone nimetus	Sisehu $t^{o}C$	Suhteline õhuniiskus %
1. Elamud	18	55
2. Haiglad	20	55
3. Lasteasutused	20	60
4. Koolid, laboratooriumid	16	45
5. Teatrid, klubid	18	50
6. Kauplused	15	40

Ruumi soojus- ja niiskusrežiim avaldab suurt mõju ka piirde materjali niiskusele ja soojapidavatele omadustele.

Kõik ruumid jaotatakse sõltuvalt nende niiskusrežiimist (õhu suhtelisest niiskusest φ): kuivadeks ($\varphi < 50\%$), normaalseteks ($\varphi = 50...60\%$), niisketeks ($\varphi = 61...75\%$) ja märgadeks ($\varphi > 75\%$).

Ruumi mugavus oleneb peale ruumi õhutemperatuuri veel välispiirete sisepinna temperatuurist, seda eriti talvel. Piirde sisepinna temperatuuri langusega suureneb nii kiirgus, kui ka konvektiivne soojavahetus piirde sisepinna ja hoone sisemuse vahel. Intensiivistub soojavahetus piirete ja inimese keha vahel (nn. seina külmahõõgus, mis on tervisele ohtlik, kuna see jahutab vaid ühte, vastu seina pööratud külge). Tekib oht veeauru kondenseerumiseks välispiirde sisemisel pinnal või piirdes endas.

Piirde sisepinna temperatuuri kõikumiste amplituud sõltub piirde soojapüsivusest.

Ehitusnormides (СНиП II-А.7-62) on toodud lubatud siseõhu ja piirde sisepinna temperatuuride erinevused. Tabelis 18 on esitatud mõnede ruumide kohta eelmainitud normitud temperatuuri langus ($\Delta t^n = t_s - \tau_s$) siseõhu ja piirde sisepinna vahel.

T a b e l 18

Normitud Δt^n väärtused kraadides

Ruumi nimetus	Välissein-tel	Pööningualusel ja katuslael
1. Eluruumid, raviasutused, laste- ja kooliruumid	6	4,5
2. Teatrid, kinod, klubid, kontoriruumid, jaamahooned	7	5,5
3. Köetavad tööstushooned, õhu arvutusliku niiskusega		
$\varphi < 50\%$	10	8
$\varphi = 50..60\%$	8	7

Ruumi nimetus	Välisseintel	Pööningualusel ja katuslael
4. Tööstushooned tootmises tekkiva sooja eraldumisega ja siseõhu arvutusliku niiskusega ≤ 45%	12	12
5. Tööstushooned siseõhu arvutusliku niiskusega >60%, kus piirde sisepinnal **ei lubata** niiskuse kondenseerumist	$t_s - \tau_k$	$t_s - \tau_k - 1^\circ$
6. Loomapidamishooned, kus piirde sisepinnal ei lubata niiskuse kondenseerumist (τ_k - siseõhu kastepunkti temperatuur)	$t_s - \tau_k$	$t_s - \tau_k$

Arvutuslikuks välisõhu temperatuuriks võetakse 8 kõige külmema talve vastava ajavahemiku keskmised väärtused 50 aasta jooksul. Ajavahemiku pikkus sõltub piirde soojapüsivusest D, mis iseloomustab temperatuurikõikumiste levimist ja kahanemist sama üldise soojatakistusega $R_{ü}$, kuid erinevatest materjalidest piiretes.

Kergete piirdekonstruktsioonide puhul, kui D ≤ 4, võetakse arvutuslikuks välisõhu temperatuuriks (t_v^1) kõige külmema ööpäeva keskmine temperatuur. Massiivsetel piiretel, kus D > 7, võetakse arvutuslik välisõhu temperatuur võrdseks kõige külmema viispäevaku keskmise temperatuuriga (t_v^5). Keskmise massiivsusega piiretel (4 < D < 7) võetakse t_v võrdseks eelmainitud arvutuslike välisõhu temperatuuride keskmise väärtusega ($t_v = \frac{t_v^1 + t_v^5}{2}$).

Tabel 19

Arvutuslikud välisõhu temperatuurid Eesti NSV-s, Moskvas ja Leningradis

Asukoht	t_v^1 °C	t_v^5 °C
1. Tallinn	-26	-21
2. Tartu	-27	-22
3. Narva	-28	-23
4. Pärnu	-26	-21
5. Moskva	-31	-26
6. Leningrad	-28	-24

Põhiliseks piirdekonstruktsiooni soojatehniliste omaduste iseloomustajaks on selle üldine soojatakistus, mille väärtus on ehitusmäärustega normeeritud:

$$R_{ü}^{n} = \frac{(t_s - t_v)\, n \cdot b}{\Delta t^n} \cdot R_s,$$

kus t_s - arvutuslik siseõhu temperatuur,

t_v - " välisõhu temperatuur,

n - koefitsient, mille väärtus sõltub piirde välispinna asendist välisõhu suhtes,

b - koefitsient, mis arvestab soojaisolatsiooni iseloomu välispiirdes.

Koefitsient n võetakse välisseinte ja katuslagede puhul võrdseks n = 1; pööningualuse lae ja ventileeritava katuslae puhul n = 0,9; kütmata keldrite peal oleva lae puhul, kui keldriseinas on aknad, n = 0,6, kui aknad puuduvad, n = = 0,4.

Välispiiretes kasutatavate, kuid aja jooksul tihenduvate või deformeeruvate (räbuvillast plaadid, vilt, stiropoor, puistetäidis jms.) soojatäitematerjalide koefitsient b võetakse mahukaalust sõltumata: b = 1,2; soojaisolatsioonimaterjalide puhul, mille mahukaal on < 400 kg/m^3 (v.a. eespool mainitud soojaisolatsioonimaterjalid) b = 1,1; kõigi teiste välispiirdekonstruktsioonide puhul b = 1.

Piirdekonstruktsioonide majanduslikkus. Ehituslikud normid lähtuvad minimaalse lubatava välispiirete soojapidavuse kindlaksmääramisel sellest, et eluruumi seintel ei tekiks märgumist kasteniiskusest, et ruumis oleks tagatud normaalne temperatuur ja niiskus. Majanduslike kaalutluste kohaselt võib osutuda kasulikuks anda piirdekonstruktsioonidele suurem soojustamise aste, kui seda ette näevad normide nõuded, vaatamata sellele, et taoliste piirete esialgne maksumus suureneb. Elamupiirete majanduslikkust iseloomustavad kaks põhilist tegurit:

1) piirde ehituskulud (soojustamine), s.o. ühekordsed kulud ja

2) iga-aastased ekspluatatsioonikulud, s.o. küttekulud.

Elamuehituses on majanduslikkuse nõue täidetud siis, kui piirdekonstruktsioonid on soojustatud optimaalselt nii soojustamiskulude kui ka ekspluatatsioonikulude seisukohalt. Eesti NSV Teaduste Akadeemia Majanduse Instituudi uurimused on selgitanud, et elamute soojapidavus on tegelikult väiksem, kui seda näeb ette optimaalne soojapidavuse määr, kuna elamute piirdekonstruktsioonide projekteerimisel ei võeta arvesse jooksvaid, s.o. küttekulusid. Tänapäeval ehitatavate elamute massiivse seina keskmine soojapidavus $R_{ü}$ on piirdel ligikaudu 1,0. Majanduslikult õige oleks aga ehitada elamud keskmise soojapidavusega $R_{ü} \geqslant 1{,}3$.

Piirde läbipuhuvus. Läbi piirde võib esineda õhuvool, kui õhurõhud piirde väliste pindade vahel on erinevad. Õhuvool tekib suurema õhurõhuga keskkonnast väiksema rõhuga keskkonna poole.

Õhuvoolu e. infiltratsiooni tekkimiseks läbi piirde peab esinema õhurõhkude vahe piirde välispindade vahel. Arvutustes väljendatakse rõhkude erinevust Δp tavaliselt mm-tes veesammast (mm VS). Õhurõhkude erinevus võib tekkida kas siseja välisõhu temperatuuride erinevuse või tuule mõjul.

Talvel on köetavates ruumides õhu temperatuur alati kõrgem kui väljas. Kuid sama baromeetrilise rõhu puhul on külmema välisõhu mahukaal suurem kui ruumi sees oleval õhul.

Õhu mahukaalude erinevus põhjustabki õhurõhkude erinevuse välispiirde erinevatel külgedel. Välispiirde alumises osas voolab õhk väljast sisse, ülemises osas aga seest välja. Välispiirete arvutustes võetakse ruumi kõrguse keskkohal välis- ja siseõhu rõhud võrdseks. Maksimaalne õhurõhkude erinevus määratakse valemiga:

$$\Delta p = 0{,}5\ H\ (\gamma_v - \gamma_s),$$

kus H - ruumi kõrgus m,
γ_v - välisõhu mahukaal kg/m^3,
γ_s - siseõhu mahukaal kg/m^3,

Tuule rõhk risti tema levimise suunas asuva pinnaga määratakse valemi järgi:

$$p = \frac{v^2 \gamma}{2g},$$

kus p - tuule rõhk mm VS ehk kg/m^2,
v - tuule kiirus m/s,
γ - õhu mahukaal kg/m^3,
g = 9,81 m/s^2 - raskuskiirendus.

Tuule rõhk piirde välispinnale sõltub hoone kujust ja tuule suunast. Vertikaalsete piirete puhul on aerodünaamilise teguri väärtus tuulepoolsel küljel n_1 = +0,8 ja tuulealusel küljel n_2 = -0,4 (õhu hõrendusest). Tuulerõhkude erinevus vertikaalpindadele

$$\Delta p = \frac{0{,}8 + 0{,}4}{2} \cdot \frac{1{,}293}{2 \cdot 9{,}81} v^2 = 0{,}04 v^2.$$

Tuule kiiruseks võetakse jaanuarikuu keskmine tuulekiirus, kuid mitte vähem kui 5 m/s (vt. tabel 14).

Piirde takistust õhuvoolule väljendab valem

$$R_i = \frac{\partial}{i},$$

kus R_i - piirde takistus õhuvoolule (infiltratsioonitakistus) m^{2}h mm VS/kg,

δ - materjali kihi paksus m,

i - materjali õhuerijuhtivus kg/mh mm VS.

Õhu laminaarse liikumise korral piirdematerjali poorides voolab läbi 1 m^2 suuruse materjalipinna 1 tunni jooksul õhu hulk, mis võrdub:

$$W = i \frac{\Delta p}{\delta},$$

kus W - läbi piirde voolava õhu hulk kg/m^2h,

Δp - õhurõhkude erinevus mm VS,

Turbulentse õhuvoolu korral ei kehti eeltoodud seos W ja Δp vahel.

Läbi mitmekihilise piirde voolanud õhu hulk

$$W = \frac{\Delta p}{\Sigma R_i},$$

kus $\Sigma R_i = R_{i.1}+R_{i.2}+\ldots+R_{i.n}$ - kõigi piirdekihtide õhuvoolu takistuste summa m^2h mm VS/kg.

Mõningate materjalide õhuvoolu takistused on toodud tabelis 20.

T a b e l 20

Jrk. nr.	Materjali või konstruktsiooni nimetus	Kihi paksus mm	R_i m^2h mm VS/kg
1	2	3	4
1.	Betoon	100	2000,0
2.	Tapeet	-	2,0
3.	Ehituspapp	1,3	6,5
4.	Tellissein	$\geqslant 250$	1,8
5.	Tellissein	< 250	0,2
6.	Laudvooderdus	20...25	0,01
7.	Laudvooderdus (punnitud laudadest)	20...25	0,15
8.	TEP-plaat, pehmetest puitkiudplaatidest vooderdus (kaetud vuukidega)	15...70	0,25

1	2	3	4
9.	Kuivkrohvplaadid (kaetud vuukidega)	10	2,0
10.	Vahtbetoon	100	200,0
11.	Ruberoid	1,5	läbipuhumatu
12.	Tõrvapapp	1,5	50,0
13.	Vineer	3...4	300,0
14.	Tsementkrohv kiviseinal	15	38,0
15.	Lubikrohv kiviseinal	15	14,5
16.	Lubikipskrohv puidul	20	1,7

Piirde nõutav takistus õhuvoolule R_i^n arvutatagu alljärgnevalt:

a) välisseintes ja katuslagedes (elamud, ühiskondlikud hooned):

$$R_i^n = 0{,}1\ v^2\ R_ü^n,$$

b) välisseintes ja katuslagedes (tööstushooned):

$$R_i^n = 0{,}05\ v^2\ R_ü^n,$$

c) pööningualustes lagedes:

$$R_i^n = 0{,}75\ R_ü^n,$$

kus $R_ü^n$ - nõutav piirde üldine soojatakistus.

Suurpaneelhoonete (elu- ja ühiskondlikud hooned) välisseintes olevates vuukides

$$R_i^n = 0{,}13\ v^2\ R_ü^n.$$

Seina hingamise all mõtleme toaõhu puhastumist läbi seina difusiooni teel, ilma et õhk tarvitseks voolata läbi seina. Õhu puhastumiseks piisab sellest, et temast eralduksid väljahingatud reogaasid ja veeaur ning et välisõhust tuleks asemele hapnikku. Sellist gaasivahetust võimaldabki piirde kaudu toimuv difusioon. Difusioon ei olene õhuvoolust ja võib toimuda ka läbi sellise kihi, mis õhku ei juhi. Seetõttu on parimaks seinamaterjaliks väikese difusioonitakistusega ma-

terjalid. Sellistes ruumides on õhk puhas, värske ja kuiv (urbsed täidised, paber, papp, puit, urbne tellis jne. - suure difusioonitakistusega on aga klaas, metallid, ruberoid, tihe kivi, betoon).

4. Piirdekonstruktsioonide niiskusrežiim

Materjali niiskumine avaldab suurt mõju piirde ekspluatatsiooniomadustele. Suureneb piirde soojajuhtivus, alaneb piirde sisepinna temperatuur ning võib esineda ka sisepinna märgumist. Väheneb piirde iga materjali külmakindluse, niiskuse- ja mädanemiskindluse alanemise tõttu.

Õhu niiskusesisaldus määratakse kui absoluutne või suhteline niiskus. Õhu absoluutne niiskus väljendatakse kas veeauru hulgana grammides, mida sisaldab 1 m^3 õhku (g/m^3), või õhus oleva veeauru osarõhu kaudu.

Veeauru osarõhku (e) mõõdetakse ehitusfüüsikas mm Hg-des, meteoroloogias aga millibaarides (1 millibaar = 0,75 mm Hg).

Igale kindlale õhutemperatuurile vastab teatud maksimaalne võimalik õhus oleva veeauru osarõhk, nn. küllastatud veeauru osarõhk ehk sadestussurve, mida tähistatakse E mm Hg.

Õhk võib sisaldada niiskust ainult teatud hulga, mis sõltub õhu temperatuurist. Mida soojem on õhk, seda enam võib ta sisaldada veeauru. Jahtudes peab õhk selle osa veeaurust, mida ta antud temperatuuril enam kanda ei suuda, kasteniiskusena välja sadestama.

Õhu küllastusastet veeauruga iseloomustab tema suhteline niiskus $\varphi = \frac{e}{E} \cdot 100\%$. Seega õhu suhteline niiskus sõltub õhu temperatuurist ja niiskusesisaldusest. Sama niiskusesisalduse juures suureneb õhu suhteline niiskus temperatuuri alanemisel ja vastupidi, väheneb õhu temperatuuri tõusul. Kui õhu tegelik veeauru rõhk saab võrdseks maksimaalse võimalikuga, s.o. küllastusrõhuga, siis õhu suhteline

niiskus $\varphi = 100\%$. Temperatuuri, mille puhul antud niiskusesisalduse juures õhk osutub veeauruga küllastunuks, nimetatakse kastepunktiks ja tähistatakse τ_k. Edasine õhu temperatuuri alanemine allapoole kastepunkti või õhu niiskusesisalduse suurendamine viib veeauru kondenseerumisele.

Veeauru kondenseerumine õhust võib toimuda ka õhu kokkupuutel pindadega, mille temperatuur $\tau_s < \tau_k$.

Selline nähtus tekib hoonetes, kus välispiirde sisepinna temperatuur on allpool antud ruumi õhu kastepunkti.

Et vältida ruumi välispiirete sisepinnal kondensaadi tekkimist, tuleks rakendada järgmisi abinõusid:

a) alandada ruumi õhuniiskust kas tehisliku või loomuliku ventilatsiooni abil;

b) tõsta piirde sisepinna temperatuuri piirde üldise soojatakistuse $R_ü$ suurendamise teel;

c) tõsta ruumi siseõhu temperatuuri.

Väga niisketes ruumides, kus piirde sisepinnal on veeauru kondenseerumine vältimatu, tuleb tarvitusele võtta abinõud niiskuse tungimise vastu piirdesse. Selleks kaetakse piirde sisepind aurutihedate materjalidega.

Toa õhk sisaldab peaaegu alati rohkem veeauru kui välisõhk, seda eriti talvel. Veeaur voolab (ka läbi piirde) sinnapoole, kus veeauru osarõhk on väiksem. Seepärast esineb meie kliimas talvel välispiirdes veeauru vool seestpoolt väljapoole. Sel põhjusel tuleks välissein tarindada nii, et toaõhu niiskus pääseks seinast kergemini välja, kui ta sisse saab tungida. Seega aurutihedad kihid olgu elamu välisseina sise-, mitte aga välisküljel.

Veeauru difusioon läbi piirde on molekulaarne nähtus, mille puhul veeauru molekulid liiguvad üksnes veeauru väiksema osarõhu suunas. Veeauru difusioon ei olene õhuvoolust.

Veeaur võib tungida läbi seina ka siis, kui seal pole õhuvoolu. Näiteks tsellofaanleht on võrdlemisi vee- ja õhutihe, kuid veeauru voolule ta märgatavat takistust ei osuta.

Materjali veeaurujuhtivust iseloomustab auruerijuhtivus μ, mis näitab mitu g veeauru voolab 1 tunni jooksul läbi materjali 1 m^2 suuruse pinna, kui kihi paksus on 1 m ja aururõhkude erinevus kihi vastaskülgedel on 1 mm Hg (g/mh mm Hg).

Statsionaarse veeauru difusiooni puhul on läbi piirde mineva auru hulk esitatav valemiga

$$p = \frac{\mu}{\delta}(e_s - e_v),$$

kus p - veeauru hulk g/m^2h,
μ - veeauruerijuhtivus g/mh mm Hg,
δ - piirdekihi paksus m,
e_s, e_v - sise- ja välisõhu veeauru osarõhud mm Hg.

Veeauruerijuhtivuse μ sõltuvust temperatuurist, materjali niiskusest ja läbi piirde voolava veeauru rõhust on võrdlemisi vähe uuritud ja võetakse seetõttu tinglikult muutumatu suurusena.

Läbi piirde voolav veeaur kohtab oma teel piirde materjalis takistust, mis on analoogiline piirde materjali soojatakistusega soojavoolu korral. Seda takistust auruvoolule nimetatakse piirde materjali auruvoolutakistuseks (difusioonitakistus) R_a mm Hg hm^2/g. Ühe kihi takistus auruvoolule

$$R_a = \frac{\delta}{\mu}.$$

Mitmekihilise piirde auruvoolutakistus

$$R_a = R_{a1} + R_{a2} + \ldots + R_{an} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \ldots + \frac{\delta_n}{\mu_n},$$

kus R_{a1}, R_{a2}, R_{an} - üksikute kihtide materjali auruvoolutakistused mm Hg hm^2/g.

Üldine piirde auruvoolutakistus

$$R_{aü} = R_{as} + R_a + R_{av},$$

kus R_{as}, R_{av} - auruülekandetakistus õhu ja piirdepindade vahel.

Kuna R_{as} ja R_{av} väärtused on arvuliselt väga väikesed, võrreldes piirde üksikute kihtide auruvoolutakistustega, siis jäetakse need praktilistes arvutustes arvesse võtmata ja

$$R_{aü} = R_a.$$

Veeauru osarõhk väheneb piirde materjali auruvoolutakistuse tõttu difundeerumisel ruumi seest välisõhku $e_s \rightarrow e_v$-ni. Veeauru osarõhk langeb ühtsest materjalist kihis lineaarselt:

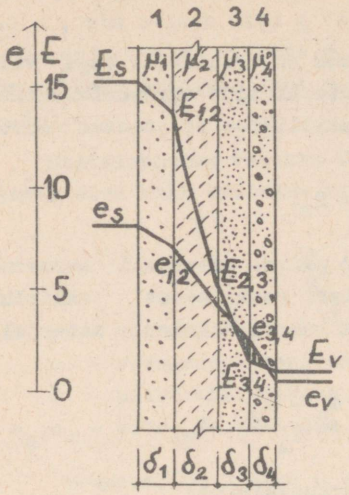
$$e_x = e_s - \frac{e_s - e_n}{R_a} \cdot R_{ax},$$

kus R_a - kogu piirde auruvoolutakistus,
R_{ax} - x meetri paksuse materjalikihi auruvoolutakistus,
e_x - veeauru osarõhk x meetri kaugusel piirde sisepinnast.

Veeauru osarõhu muutus mitmekihilises piirdes leitakse veeauru osarõhkude arvutamisega piirde kihtide kokkupuutepindadel:

$$e_{an} = e_s - \frac{e_s - e_n}{R_a} \cdot \Sigma R_{an},$$

kus e_{an} - n kihi välispinnal olev veeauru osarõhk,
e_s - siseõhu veeauru osarõhk,
e_v — välisõhu veeauru osarõhk,
ΣR_{an} - piirde n esimese kihi materjali summaarne auruvoolutakistus.



Joonis 17.

Joonisel 17 on esitatud näitena graafiliselt veeauru osarõhkude ja veeauru külastussurve kõverad piirdekonstruktsioonis. Jooniselt on näha, millises piirde osas esineb veeauru sadestumine. Tabelis 21 on toodud mõnede kasutatavamate rull- ja lehtmaterjalide ning võõpade arvutuslikud auruvoolutakistuste väärtused.

T a b e l 21

Ehitusmaterjalide auruvoolutakistused R_a

Jrk. nr.	Materjali nimetus	Kihi paksus mm	R_a m^2 mm Hg h/g
1	2	3	4
1.	Tavaline papp	1	0,12
2.	Kuivkrohvplaadid	8	0,9
3.	Kõvad puitkiudplaadid	8	0,8
4.	Pehmed puitkiudplaadid	10	0,4
5.	Ühekordne bituumenvõõp	-	2,0
6.	Kahekordne õlivärv	-	4,8
7.	Emailvärv	-	3,6
8.	Kahekordne polüvinüülkloriidlakist kile	-	29,0
9.	Pergamiin	0,4	2,5
10.	Ruberoid	1,5	8,3
11.	Kahekordne hüdroisolatsioonikiht (1 kiht ruberoidi ja 1 kiht pergamiini kuumal bituumenmastiksil)	6	12,8

1	2	3	4
12.	Kolmekordne hüdroisolatsioonikiht (1 kiht ruberoidi ja 2 kihti pergamiini kuumal bituumenmastiksil)	10	18,6
13.	Tõrvapapp	1,9	3,0
14.	Kolmekihiline vineer	5	1,7

Materjali pind võib niiskuda õhust ka siis, kui tema ja ümbritseva õhu temperatuurid ei erine. Seega niiskuse imamine õhust sõltub materjali iseloomust, veeauru osarõhust ja õhu temperatuurist. Niiskuse imamine õhust toimub kuni teatud piirini, millal saavutatakse tasakaal materjali õhust imatud niiskuse ja õhus oleva veeauru vahel mingil kindlal temperatuuril. Materjali niiskuseimavuse aste antud temperatuuril määratakse katseliselt iga materjali kohta eraldi ning on erineva suurusega, sõltuvalt õhu suhtelisest niiskusest.

T a b e l 22

Puidu kaalulise niiskuse ω_k sõltuvus õhu suhtelisest niiskusest 0°C juures

φ	40	50	60	70	80	90	100	%
ω_k	8,1	10,2	12	14	16,7	21,9	31,3	%

Seoses üleminekuga uuele rahvusvahelisele mõõtühikute süsteemile SI muutuvad ka kõigi eeltoodud soojafüüsikaliste suuruste mõõtühikud. Seos vanade ja uute mõõtühikute vahel on toodud tabelis 23.

T a b e l 23

Suuruse nimetus	Mõõtühiku tähis	Seos SI süsteemi mõõtühikutega
1. Soojahulk	kcal	1 kcal = 4186,8 J
2. Soojamahtuvus	kcal/°C	$1 \frac{\text{kcal}}{^\circ\text{C}}$ = 4186,8 J/deg

Suuruse nimetus	Mõõtühiku tähis	Seos SI süsteemi mõõtühikutega
3. Erisoe	$\frac{kcal}{kg\,^{o}C}$	$1\ \frac{kcal}{kg\,^{o}C} = 4186{,}8\ J/kg \cdot deg$
4. Soojavool	kcal/h	$1\ \frac{kcal}{h} = 1{,}163\ W$
5. Soojaeriülekanne	$\frac{kcal}{m^2 h\,^{o}C}$	$1\ \frac{kcal}{m^2 h\,^{o}C} = 1{,}163\ \frac{W}{m^2\ deg}$
6. Soojaerijuhtivus	$\frac{kcal}{m\ h\,^{o}C}$	$1\ \frac{kcal}{m\ h\,^{o}C} = 1{,}163\ \frac{W}{m\ deg}$
7. Soojatakistus	$\frac{m^2 h\,^{o}C}{kcal}$	$1\ \frac{m^2 h\,^{o}C}{kcal} = 0{,}859\ \frac{m^2 deg}{W}$
8. Veeauru rõhk	mm Hg	$1\ mm\ Hg = 133{,}322\ \frac{N}{m^2}$
9. Õhurõhk	mm VS	$1\ mm\ VS = 9{,}8\ \frac{N}{m^2}$
10. Aurueriijuhtivus	$\frac{g}{mh\ mm\ Hg}$	$1\ \frac{g}{mh\ mm\ Hg} = 2{,}083\ \frac{kgm}{GN\ sek}$
11. Õhuerijuhtivus	$\frac{kg}{mh\ mm\ VS}$	$1\ \frac{kg}{mh\ mm\ VS} = 28{,}35\ \frac{kgm}{MN\ sek}$
12. Aurutakistus	$\frac{m^2 h\ mm\ Hg}{g}$	$1\ \frac{m^2 h\ mm\ Hg}{g} = 0{,}479\ \frac{GN\ sek}{kg}$
13. Õhutakistus	$\frac{m^2 h\ mm\ VS}{kg}$	$1\ \frac{m^2 h\ mm\ VS}{kg} = 35{,}28\ \frac{KN\ sek}{kg}$

Soovitatav kirjandus

Akustika alal

1. К. Ганус. Архитектурная акустика. Госстройиздат, 1963.

2. Л. Контюри. Акустика в строительстве. Госстройиздат, 1960.

3. В.Н. Никольский, В.И. Заворов. Звукоизоляция крупнопанельных зданий. Стройиздат, 1964.

4. Ф. Эйхлер. Борьба с шумом и звукоизоляция зданий. Госстройиздат, 1962.

5. В.В. Фурдуев. Акустические основы вещания. Гос. изд-во лит-ты по вопросам радио и связи, 1960.

6. Борьба с шумом. Под ред. проф. Е.Я. Юдина. Стройиздат, 1964.

7. Н.М. Гусев, П.П. Климов. Строительная физика. Стройиздат, 1965.

8. Х.А. Орувеэ. Проблемы архитектурно-акустического проектирования музыкальных залов и студий. Труды ТПИ, серия А, №212, 1964.

9. H. Oruvee. Elamuehitus ja ehitusakustika. "Ehitus ja Arhitektuur" nr. 3, 1963.

10. H. Oruvee. Mullbetoonist seinte helikindlus. "Ehitus ja Arhitektuur" nr. 1, 1963.

Valgustustehnika alal

1. Н.М. Гусев. Естественное освещение зданий. Госстройиздат, 1960.

2. Н.М. Гусев, П.П. Климов. Строительная физика. Стройиздат, 1965.

3. Б.А. Дунаев. Инсоляция жилых зданий. Госстройиздат, 1962.

4. Н.М. Гусев. Архитектурная светотехника. Архитектурное издательство, 1949.

Soojafüüsika alal

1. К.Ф. Фокин. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Гос.изд-во лит-ры по строительству и архитектуре, 1954.

2. В.М. Ильинский. Проектирование ограждающих конструкций с учетом физико-климатических воздействий. Гос.изд-во лит-ры по строительству и архитектуре, 1955.

3. А.М. Шкловер, Б.Ф. Васильев, Ф.В. Ушков. Основы строительной теплотехники. Гос. изд-во по строительству и архитектуре, 1956.

4. Н.М. Гусев, П.П. Климов. Строительная физика. Стройиздат, 1965.

5. L. Jürgenson. Elamuehitus I. RK "Teaduslik Kirjandus", Tartu 1949.

6. L. Jürgenson. Elamu soojapidavus. Tartu Eesti Kirjastus, 1942.

Vastutav toimetaja M.Jaaniso

Trükkimisele antud 20.II 67. Paber 60x84
Trükipg.5,75. Tingpg.5,35. Tiraaž 400. MB-01166
TPI rotaprint,1967. Tell. nr.103
Hind 20 kop.

Hind 20 kop.

A
28789
4733921

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00473392 1