

<https://doi.org/10.3176/hum.soc.sci.1966.2.02>

E. VESKI

### MATEMAATILISE STATISTIKA MEETODITE KASUTAMISEST HOONETE SOOJAMAJANDUSE OPTIMISEERIMISEL

Hoone välispiirete soojapidavuse projekteerimisel juhindutakse käesoleval ajal peamiselt tehnilistest normidest ja eeskirjadest, kusjuures majanduslikele teguritele, mis avaldavad mõju nii hoonete ehitamisel kui ka eksploateerimisel, pööratakse vähe tähelepanu. Sama tuleb öelda ka hoonete soojavarustuse, s. o. keskküttekattlamajade ja soojatrasside projekteerimise kohta. Seetõttu ei ole ehitiste projektlahendused enamasti majanduslikult optimaalsed: hoonete soojakulu on suur, soojatootmine ja -transportimine kallis. See põhjustab suuri eksploatatsioonikulusid. On selge, et majanduslikke kaalutlusi arvestamata pole võimalik saada majanduslikult optimaalseid tehnilisi lahendusi.

Hoone välispiirete majanduslikult optimaalse soojapidavuse määramiseks analüütilisel meetodil on juba välja töötatud mitmed seisukohad ja vastavad valemid. Seejuures on hoone soojakulu ja välispiirete soojapidavuse vahelist seost uuritud piirete viisi isoleeritult. Analüütilise meetodi järgi määratakse hoone iga üksiku piirde optimaalne soojapidavus sõltumata hoone kui terviku üldisest soojustusolukorrast. Nii näiteks ei võta niisugune valem välisseinte optimaalse soojapidavuse määramisel arvesse ei seinte pinna suurst ega teiste piirete soojustusolukorda. See on kõigi analüütilisel meetodil tuletatud välispiirete optimaalse soojapidavuse arvutamise valemite iseloomulikuks puuduseks.

Piirdekonstruktsioonide optimaalse soojapidavuse tegelikul hindamisel on oluline teada, milline sõltuvus valitseb eksploatatsioonis olevate hoonete soojakulu ja seda mõjutavate tegurite vahel, milledest olulisemad on välispiirete soojapidavus, piirdepindade suurus ja hoonete köetav kubatuur. Viimati nimetatud sõltuvust on võimalik leida tegelikkusest kogutud statistiliste andmete läbitöötamise teel, kasutades seejuures korrelatsioonanalüüsi.

Matemaatilise statistika meetoditele tuginedes on käesolevas artiklis püütud leida valemid hoone välispiirete optimaalse soojapidavuse ja keskküttekattlamajade optimaalse võimsuse määramiseks.

\*

Statistilisel meetodil tuletatud hoone välispiirete optimaalse soojapidavuse määramise valemi peamine eelis on selles, et iga üksiku välispiirde optimaalset soojapidavust on võimalik määrata sõltuvalt teiste piirete soojustusolukorrast ja piirete osatähtsusest hoone üldises soojakulus. Meetodi puuduseks võiks pidada seda, et eksploatatsioonis olevate hoonete tegeliku soojakulu ja välispiirete tegeliku soojapidavuse vaheline korrelatsioon, mis on välispiirete optimaalse soojapidavuse määramise aluseks, peegeldab ka välispiirete soojustamisel tehtud ehitusvigu, s. o. hoone välispiirete soojustuse mittevastavust projektile, mida tegelikkuses veel kaunis tihti esineb. See puudus on aga kõrvaldatav, kui hoone välispiirete soojustustööde kvaliteedile pöörata senisest suuremat tähelepanu.



Hoone välispiirete soojapidavuse ja kõetava kubatuuri suurendamisel hoone soojakulu teatavasti väheneb. Seega on meil tegemist pöördvõrdelise ehk hüperboolse sõltuvusega, mida väljendame kujul

$$Q_x = x_0 + x_1 \frac{F_s}{R_{0s}} + x_2 \frac{F_l}{R_{0l}} + x_3 \frac{F_p}{R_{0p}} + x_4 \frac{F_n}{R_{0n}} + x_5 \frac{F_a}{R_{0a}} + x_6 \frac{1}{V} = x_0 + \sum_{i=1}^5 x_i \frac{F_i}{R_{0i}} + x_6 \frac{1}{V} \text{ kcal/h } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

kus  $Q_x$  — hoone tegelik soojakulu, kcal/h  $^\circ\text{C}$ ;

$R_{0s}$  — välisseite soojapidavus (olenevalt ka ehitusvigadest),  $\text{m}^2\text{h } ^\circ\text{C/kcal}$ ;

$R_{0l}$  — pööningu vahelae (katuslae) soojapidavus;

$R_{0p}$  — keldri vahelae soojapidavus;

$R_{0n}$  — radiaatoritaguste seinte soojapidavus;

$R_{0a}$  — akende soojapidavus;

$F_s, F_l, F_p, F_n, F_a$  — vastavate välispiirete pinnad,  $\text{m}^2$ ;

$V$  — hoone kõetav kubatuur,  $\text{m}^3$ ;

$\sum_{i=1}^5 x_i \frac{F_i}{R_{0i}}$  — hoone välispiirete kaudu tekkiv soojakulu kokku, kcal/h  $^\circ\text{C}$ ;

$x_i$  ja  $x_6$  — võrrandi parameetrid, mis väljendavad üksikute piirdeliikide ja hoone kõetava kubatuuri mõju hoone tegelikule soojakulule ning leitakse empiiriliselt, kasutades vähimruutude meetodit;

$x_0$  — võrrandi vabaliige.

Korrelatsioon (1) võimaldab kindlaks määrata

1) eksploatatsioonis olevate hoonete tegeliku soojakulu tunnis, kui ruumide sise- ja välisõhu temperatuuride erinevus on  $1^\circ\text{C}$ ;

2) millisel määral piirdekonstruktsioonide soojapidavus ning piirdepindade ja kõetava kubatuuri suurus avaldab mõju hoonete tegelikule soojakulule;

3) kui suur on iga üksiku piirdeliigi osatähtsus hoone üldises soojakulus.

Need andmed annavad meile täieliku ülevaate hoonete tegelikust soojustusolukorrast välispiirete liikide viisi ning on suureks abiks piirete optimaalse soojapidavuse hindamisel.

Korrelatsioon (1) on arvutatud elektronarvutil «Minsk-2» 65 eksploatatsioonis oleva Tallinna elamu<sup>1</sup> kohta, leides parameetrite  $x_0$ ,  $x_i$  ja  $x_6$  arvulised väärtused:

$$Q_x = -1137,42 + 2,05 \frac{F_s}{R_{0s}} + 1,51 \frac{F_l}{R_{0l}} + 0,26 \frac{F_p}{R_{0p}} + 2,27 \frac{F_n}{R_{0n}} + 1,32 \frac{F_a}{R_{0a}} + 2,56 \cdot 10^6 \frac{1}{V} \text{ kcal/h } ^\circ\text{C}. \quad (2)$$

<sup>1</sup> Eksploatatsioonis olevate elamute välispiirete soojapidavus, mis tehti kindlaks kohapealsete vaatluste teel, on arvutatud piirdekonstruktsioonide tegeliku soojustamise järgi, kuna piirete tegelikku soojapidavust polnud võimalik kõigis elamutes mõõta. Taolised arvutused tehti 1961. a. Eesti NSV projekterimisinstituudis «Kommunaalprojekt» ca 100 elamu kohta.

Elamute tegelik soojakulu on arvutatud katlamajades mõõdetud katelde kasutegurite, kulutatud kütusekoguste, mõõdetud sise- ja välisõhu temperatuuride ning kütteperioodi tegeliku kestuse alusel. Elamute tegeliku soojakulu suurust uuriti 1960/61. ja 1961/62. a. kütteperioodidel seoses ENSV TA Termofüüsika ja Elektrofüüsika Instituudi ning Majanduse Instituudi ja ENSV Ehituskomitee Ehituse Teadusliku Uurimise Instituudi ühise uurimistööga «Elamute küttekulud ja optimaalne soojapidavus».



Korrelatsiooni (2) parameetrid  $x_i$  ja korrelatsioonikordajad  $r_i$ , mis iseloomustavad sõltuvuse  $Q_x$  suurust ja eri tegurite sõltuvuse tugevust elamu välispiiretest, on esitatud tabelis 1. Korrelatsiooni loetakse rahuldavaks kui korrelatsioonikordaja  $r \geq 0,5$ .

Tabel 1  
Parameetri  $x_i$  ja korrelatsioonikordaja  $r_i$  väärtused

Elamu välispiirded	Parameeter $x_i$	Korrelatsioonikordaja $r_i$
Välisseinad	2,05	0,93
Pööningu vahelagi (katuslagi)	1,51	0,90
Keldri vahelagi	0,26	0,62
Radiaatoritagused seinad	2,27	0,91
Aknad	1,32	0,87

Tabelis 1 esitatud parameetrid ( $x_i$ ) võimaldavadi hinnata iga üksiku välispiirde osatähtsust hoone üldises soojakulus.

Hoonete soojakulu sõltuvus välispiirete soojapidavusest ja hoone kätava kubatuuri suurusest on antud avaldisega (1).

Hoone soojakulu aastas ( $Q_a$ ) leiame kujul

$$Q_a = Q_x \cdot z \cdot \Delta t = \left( x_0 + \sum_{i=1}^5 x_i \frac{F_i}{R_{0i}} + x_6 \frac{1}{V} \right) \cdot D \text{ kcal/aastas,} \quad (3)$$

kus  $z \cdot \Delta t = D$  — kraadtundide arv kütteperioodil, h°C/aastas;

$z$  — kütteperioodi pikkus tundides, h/aastas;

$\Delta t$  — sise- ja välistemperatuuride vahe, °C.

Hoone taandatud küttekulud aastas ( $S'$ ) avaldame kujul:

$$S' = Q_a \cdot S_R \text{ rbl/aastas,} \quad (4)$$

kus  $S_R$  — ruumisoojauhiku taandatud kulud, rbl/10<sup>6</sup> kcal.

Piirdekonstruksioonide 1 m<sup>2</sup> soojustuse täielike kapitaalvahutuste ja soojapidavuse vahelise seose väljendamine lineaarse sõltuvusena<sup>2</sup>

$$K_p = a + bR_0, \quad (5)$$

kus  $K_p$  — täielikud kapitaalvahutused piirdekonstruksioonide 1 m<sup>2</sup> soojustamiseks, rbl/m<sup>2</sup>;

$a$  — lineaarvõrrandi vabaliige ehk tinglikult püsivad kulud piirde soojustamisel, rbl/m<sup>2</sup>;

$R_0$  — piirde soojapidavus, m<sup>2</sup>h°C/kcal;

$b$  — soojapidavusühiku hind, kui  $1,0 \leq R_0 \leq 3,0$ , rbl/m<sup>2</sup> · kcal/m<sup>2</sup>h°C.

Seos (5) kehtib elamute puhul piirides  $1,0 \leq R_0 \leq 3,0$ , mis on ehituspraktikas põhiliselt kasutatavaks soojapidavuse intervalliks.

Hoone välispiirete soojustamise täielikud kapitaalvahutused väljendame analüütiliselt

$$\sum_{i=1}^5 K_{pi} F_i = \sum_{i=1}^5 (a_i + b_i R_{0i}) F_i \text{ rbl.,} \quad (6)$$

kus  $F_i$  — välispiirete pind, m<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Vt. E. Veski, Elamupiirete optimaalne soojapidavus. Ehitus ja arhitektuur, nr. 1. Tallinn, 1964, lk. 14.



Optimeerimise põhikriteeriumiks on hoone ehitamise ja eksploateerimise taandatud kulude summa ( $S$ ) minimeerimine, seega:

$$S = \left( x_0 + \sum_{i=1}^5 x_i \frac{F_i}{R_{0i}} + x_6 \frac{1}{V} \right) \cdot D \cdot S_R + (a_m + E_H) \cdot \sum_{i=1}^5 (a_i + b_i R_{0i}) F_i \quad \text{rbl/aastas}, \quad (7)$$

kus  $a_m$  — piirdekonstruktsioonide amortisatsioonimäär aastas,<sup>3</sup>

$E_H$  — kapitaalmahutuste efektiivsuse normatiivne koefitsient.

Diferentseerimise seose (7) mingi kindla piirdeliigi  $R_{0i}$  järgi (osatuletisena) ja võrutame tulemuse nulliga:

$$\frac{\partial S}{\partial R_{0i}} = -D \cdot S_R \cdot x_i \frac{F_i}{R_{0i}^2} + (a_m + E_H) F_i b_i = 0. \quad (8)$$

Avaldades ükskõik millise piirde  $R_{0i}$ , saame hoone välispiirete majanduslikult optimaalse soojapidavuse määramise valemi kujul

$$R_{0i}^{\text{opt}} = \sqrt{\frac{x_i \cdot A}{b_i (a_m + E_H)}}, \quad (9)$$

kus  $A = D \cdot S_R$  — sooja aastane erimaksumus (kütteperioodi jooksul läbi piirde 1 m<sup>2</sup> läinud sooja maksumus, kui  $R_{0i} = 1,0 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$ ), rbl/m<sup>2</sup> aastas · m<sup>2</sup>h<sup>o</sup>C/kcal.

Tegurid  $x_i$  ja  $b_i$  on valemis (9) muutuvad suurused, mis olenevad välispiirete liigist. Peale selle oleneb  $b_i$  veel kasutatavast soojustist. Ülejäänud suurused on konstantsed hoone kõigi piirete puhul.

Valemi (9) kasutamise näide.

Määrame mullbetoonist paneelseinte (mahukaal 800 kg/m<sup>3</sup>) majanduslikult optimaalse soojapidavuse Tallinna tingimustes, kui  $x_{\text{sein}} = 2,05$ ;  $A = 1,11$  (eluruumide sisetemperatuuri +20°C juures);  $b_s = 6,20$ ;  $a_m = 0,03$  ja  $E_H = 0,1$

$$R_{0\text{sein}}^{\text{opt}} = \sqrt{\frac{2,05 \cdot 1,11}{6,20(0,03 + 0,1)}} = 1,68,$$

millele vastab paneeli paksus 41 sm. Ehituspraktikas kasutatava paneeli paksus on aga 30 sm, mille puhul mullbetoonist paneelide mahukaal peaks olema 600 kg/m<sup>3</sup>.

Elamupiirete optimaalsed soojapidavuse määrad Tallinnas valemi (9) järgi on esitatud tabelis 2 ning nad võimaldavad teha järgmised järeldused.

1) Elamute välisseinte optimaalne soojapidavus peaks olema kõigi kasutatavate konstruktsioonitüüpide puhul keskmiselt 60% suurem kui käesoleval ajal projekteeritakse. Järelikult ei ole elamute välisseinte praegune soojapidavus majanduslikult piisav ning välisseinte konstruktsiooni tuleks muuta vastavalt tabelis 2 esitatud näitajatele.

2) Elamu pööningu vahelagede majanduslikult optimaalne soojapidavus peaks olema keskmiselt 2,6 korda suurem kui projekteeritud soojapidavus ( $R_{0\text{teg}} = 1,04$ ).

Tegelikus ehituspraktikas kaetakse pööningu vahelaed 10–15 sm paksuse põlevkivi-tuha kihiga, mille tõttu nad on nõrgemini soojustatud kui elamu teised välispiirded

<sup>3</sup> Metoodiliselt oleks õigem amortisatsioonikulu arvutada piirete 1 m<sup>2</sup>-le kulutatud otseste kapitaalmahutuste pealt, arvestamata piirnevaid kapitaalmahutusi. Kuna piirdekonstruktsioonide soojustuskulu sõltuvus (5) piirete soojapidavusest on esitatud koos piirnevate kapitaalmahutustega (viimaste osatähtsus otsestest kapitaalmahutustest on alla 10%), on selles osas arvutust lihtsustatud ning amortisatsioonikulu arvatud piirete täielikest kapitaalmahutustest, mille puhul tehtud viga on alla 0,5%.



Elamupiirete optimaalne soojapidavus Tallinnas

Tabel 2

Päärde liik ja konstruktsioon	Soojusti mahu- kaal (kg/m <sup>3</sup> )	Piirete projekteeritud keskmine soojapidavus $R_0$	Soojapidavus- ühiku hind $b_i$	Majanduslikult optimaalne	
				sooja- pidavus $R_0$ (m <sup>2</sup> h°C/kcal)	soojustus- kihi paksus $d$ (sm)
<b>Välissein</b>					
Silikaatkividest täissein	1900	1,06	12,61	1,18	63
Silikaatkividest sein, soojustatud mineraalvatist mattidega	200	1,90 (1,51)	1,33	3,63	16
Kolmekihiline raudbetoonpaneel, soojustatud mineraalvatist mattidega	300	1,56	3,23	2,33	15
Sama, soojustatud TEP-plaadiga	320	1,08	5,95	1,72	19
Mullbetoonist plokksein	1200	1,20	8,54	1,43	48
Sama	800	1,25	5,33	1,81	45
Mullbetoonist paneelsein	800	1,25	6,20	1,68	41
Eterniidist paneel, soojustatud mineraalvatist mattidega	300	2,27	3,23	2,33	10
<b>Pööningu vahelagi (katuslagi)</b>					
Põlevkivituhk	930	1,04	0,64	4,31	84
Mineraalvatist matid	200	1,04	1,44	2,99	15
TEP-plaadid	320	1,04	3,51	1,92	17
Põlevkivituhk-gaasbetoonist isolatsiooniplaadid	600	ei kasu-	4,08	1,78	23
Mullbetoonist paneelid (katuslagi)	800	„	5,89	1,48	27
<b>Keldri vahelagi</b>					
Põlevkivituhk	930	1,12	0,89	1,58	27
Mineraalvatist matid	200	1,35	1,50	1,22	5
<b>Radiaatoriniis</b>					
Mineraalvatist matt + kuivkrohvplaat	200	1,20	1,27	5,50	30
TEP-plaat + krohv	320	1,20	3,19	3,46	35
Alfooliga soojustamine	—	ei kasu- tata	1,60	4,90	1 õhuvähe + alfooliga ek- raniseeritud kuivkrohv- plaat

(välja arvatud aknad). Tabelis 2 esitatud optimaalse soojustuskihi kasutamine pööningu vahelael on igati mõeldav ja tehniliselt läbiviidav (välja arvatud põlevkivituhk).

Katuslagede puhul on tegelik olukord parem,  $R_{0 \text{ teg}} = 1,82$  (6 sm paksune mineraalvatist matt + 5 sm paksune TEP-plaat). Mineraalvatist mattide kihi optimaalne paksus katuslael peaks aga olema 13 sm.

3) Keldri vahelae projekteeritakse praktikas õige soojapidavusega, kusjuures nende optimaalne soojapidavuse määr on pööningu vahelagedest väiksem, kuna

- a) keldri vahelae välispinna soojatakistus on pööningu vahelae vastavast takistusest suurem;
- b) arvutuslik soojakulu läbi keldri vahelae on keskmiselt 30% väiksem kui läbi pööningu vahelae;
- c) elamute tegeliku soojakulu ja välispiirete soojapidavuse korrelatsiooni (2) uurimisel selgus, et teiste piirete soojapidavusega võrreldes avaldab keldri vahelae soojapidavus elamu soojakulule kõige väiksemat mõju.

4) Kuna välispiirete soojapidavust pole praktiliselt mõtet tõsta üle 3,0, peaks radiaatoritaguste seinte soojustamisel mineraalvatist mattide paksus olema mitte 30, vaid 15 sm, TEP-plaatide puhul aga 23 sm. Neid soojustuskihte on mõeldav asetada radiaato-



rite taha ainult silikaatseinte ja plokkseinte puhul. Paneelseinte radiaatoritaguseid osi on otstarbekohane isoleerida alfooliga.

\*

Hoonete kütmiseks kasutatava sooja, s.o. ruumisooja taandatud kulude minimeerimisel on oluline, et oleks majanduslikult õigesti lahendatud nii soojatootmise kui ka -transpordiga seotud probleemid. Selles osas on peamiseks lahendust vajavaks küsimuseks keskküttekatlamaade optimaalse võimsuse määramine, kusjuures optimaalsuse kriteeriumiks on soojatootmise ( $S_K$ ) ja soojatranspordi ( $S_T$ ) taandatud kulude summa ( $S_0$ ) minimeerimise nõue, s.o.

$$S_0 = S_K + S_T \rightarrow \min. \quad (10)$$

Katlamajade optimaalse võimsuse määramiseks kasutasime korrelatsiooniteooriat, mille põhjal töötasime välja vastavad valemid.

Oma loomult kujutab katlamajade optimaalse võimsuse leidmine endast ekstreemumülesannet, kus on vaja määrata selline katlamaja võimsus ( $P$ ), mille puhul kehtiks seos (10).

Soojatootmise kulude ja katlamaja võimsuse vahelist sõltuvust väljendab kahanev funktsioon:

$$S_K = f_1(P). \quad (11)$$

Soojatranspordi kulude sõltuvus katlamaja võimsusest on seevastu kasvav funktsioon:

$$S_T = f_2(P). \quad (12)$$

Eeldame, et seosed (11) ja (12) on avaldatavad järgmiselt:

1. Soojatootmise taandatud kulude korrelatsioon

$$S_K = \begin{cases} a_0 + \frac{a_1}{P}, & \text{kui } P > 0 \\ 0, & \text{kui } P = 0, \end{cases} \quad (13)$$

kus  $S_K$  — 1 Gcal tootmise taandatud kulud, rbl/Gcal;

$P$  — katlamaja võimsus aastas, Gcal;

$a_0, a_1$  — hüperboolse võrrandi parameetrid, mis on konstantsed ning määratakse vähimruutude meetodil;

$a_0$  — proportsionaalselt katlamaja võimsusega tinglikult muutuvad kulud (toodanguühiku kohta tinglikult püsivad kulud) soojatootmisel, rbl/Gcal;

$a_1$  — katlamaja võimsusest sõltumatud ehk tinglikult püsivad kulud (tooteühiku kohta tinglikult muutuvad kulud) soojatootmisel, rbl.

2. Soojatranspordi taandatud kulude korrelatsioon

$$S_T = \begin{cases} u_0 + u_1 P, & \text{kui } P > 0 \\ 0, & \text{kui } P = 0, \end{cases} \quad (14)$$

kus  $S_T$  — 1 Gcal transpordi taandatud kulud, rbl/Gcal;

$u_0, u_1$  — lineaarvõrrandi parameetrid, mis on konstantsed ning määratakse vähimruutude meetodil;

$u_0$  — katlamaja võimsusest sõltuvad ehk toodangu ühiku kohta tinglikult püsivad kulud sooja transportimisel, rbl/Gcal;

$u_1$  — parameeter, mis näitab 1 Gcal transpordi muutuvate kulude kasvu, kui katlamaja võimsus ( $P$ ) suureneb ühiku võrra, rbl/Gcal<sup>2</sup>.

Kesküttekatalamajade optimaalse võimsuse määramisel on lähtunud optimaalsuse kriteeriumist (10):

$$S_0 = S_K + S_T = a_0 + \frac{a_1}{P} + u_0 + u_1 P = \min. \quad (15)$$

Diferentseerides seose (15) katlamaja võimsuse ( $P$ ) järgi ja võrrutades tulemuse nulliga, saame:

$$\frac{dS_0}{dP} = -\frac{a_1}{P^2} + u_1 = 0.$$

Siit avaldub katlamaja optimaalne võimsus kujul

$$P_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{a_1}{u_1}}. \quad (16)$$

Eesti NSV tingimustes kujunesid keskküttekatalamajade optimaalse võimsuse korrelatsioonid (13) ja (14) arvuliselt järgmisteks:

$$S_K = a_0 + \frac{a_1}{P} = 7,33 + \frac{2396,1}{P}, \text{ rbl/Gcal}$$

ja

$$S_T = u_0 + u_1 P = 1,41 + 0,000108P, \text{ rbl/Gcal.}$$

Sõltuvuste leidmise aluseks oli seitse eksploatatsioonis olevat põlevkiviõliga köetavat grupikatlamaja, kus vaatluste toimumise ajaks olid tehnilis-ökonomilised näitajad lõplikult välja kujunenud.

Valemit (16) kasutades leiame, et keskküttekatalamajade optimaalne võimsus Eesti NSV-s peaks olema

$$P_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{a_1}{u_1}} = \sqrt{\frac{2396,1}{0,000108}} \approx 4700 \text{ Gcal/aastas,}$$

kusjuures soojaühiku tootmise ( $S_K$ ) ja transpordi ( $S_T$ ) taandatud kulude summa on 9,75 rubla.

Kuna vaatluste arv oli liiga väike selleks, et saadud tulemust lugeda täielikult usaldatavaks, võib neid esialgu pidada ainult arvutusnäiteiks. Suurema vaatluste arvu puhul aga annab selle meetodi kasutamine grupikatlamajade optimaalse võimsuse määramisel küllalt usaldusväärseid tulemusi, millele oleks soovitatav tugineda ka katlamajade projekteerimisel.

Ekspluatatsioonis olevad kivisõega ja põlevkiviõliga köetavad grupikataruumid ja -majad on väga mitmesuguse võimsusega (690–9575 Gcal/aastas), kusjuures ruumisoojaühiku taandatud kuludes esineb kahekordseid ja suuremaidki kõikumisi (8,30–18,20 rbl/Gcal).

Suurem osa eksploatatsioonis olevaist grupikataruumidest ja -majadest on väiksema võimsusega kui eespool soovitatud katlamajade optimaalne võimsus, mistõttu ruumisooja omahind neis on kõrge.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia  
Majanduse Instituut

Saabus toimetusse  
10. IX 1965

Э. ВЕСКИ

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ В ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОХОЗЯЙСТВА ЗДАНИЙ

Резюме

В статье изыскиваются способы разрешения проблемы оптимизации теплохозяйства зданий путем использования методов математической статистики — теории корреляции. Рассмотрены вопросы определения оптимального сопротивления наружных от-



раждений здания теплопередаче и оптимальной мощности котельных установок центрального отопления.

Связь между сопротивлением наружных ограждений теплопередаче, размером отапливаемой кубатуры и расходом тепла выражается корреляционной зависимостью.

$$Q_x = x_0 + \sum_{i=1}^5 x_i \frac{F_i}{R_{0i}} + x_6 \frac{1}{V}, \quad (1)$$

где  $Q_x$  — фактический расход тепла здания,  $\text{ккал/}h^{\circ}\text{C}$ ;

$R_{0i}$  — сопротивление теплопередаче наружных ограждений (стены, чердачное перекрытие, подвальное перекрытие, радиаторные участки стен, окна),  $\text{м}^2 h^{\circ}\text{C/ккал}$ ;

$F_i$  — площади соответствующих наружных ограждений,  $\text{м}^2$ ;

$\sum_{i=1}^5 x_i \frac{F_i}{R_{0i}}$  — сумма расхода тепла, уходящего через наружные ограждения,  $\text{ккал/}h^{\circ}\text{C}$ ;

$V$  — отапливаемая кубатура здания,  $\text{м}^3$ ;

$x_i, x_6$  — параметры уравнения, выражающие влияние отдельных видов ограждений и отапливаемой кубатуры здания на фактический расход тепла; определяются эмпирически, используя метод наименьших квадратов;

$x_0$  — свободный член уравнения.

Корреляционная зависимость (1) определена при помощи электронно-вычислительной машины «Минск-2» по 65 зданиям, находящимся в эксплуатации.

Опираясь на зависимость (1), выведена следующая формула экономически оптимального сопротивления наружных ограждений здания теплопередаче:

$$R_{0i}^{\text{опт}} = \sqrt{\frac{x_i A}{b_i (a_m + E_H)}} \text{ м}^2 h^{\circ}\text{C/ккал}, \quad (2)$$

где  $A$  — удельная годовая стоимость тепла при  $R_{0i} = 1,0$  в течение отопительного периода;

$b_i$  — стоимость единицы сопротивления теплопередаче;

$a_m$  — норма амортизации конструкций ограждения;

$E_H$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Значения  $x_i$  даны в табл. 1.

Преимущество формулы (2), выведенной статистическим методом (в отличие от формулы, полученной аналитически), заключается в том, что она дает возможность определить для каждого наружного ограждения зданий оптимальное сопротивление теплопередаче в зависимости от теплоустойчивости других ограждений и от относительного значения ограждений в общем расходе тепла зданий.

Оптимальные величины  $R_{0i}$  приводятся в табл. 2.

Для того, чтобы приведенные затраты тепла в помещении были наименьшими, важно экономически правильно решить как проблему производства тепла, так и его транспортировки.

Главным вопросом здесь является определение оптимальной мощности котельных установок центрального отопления, которая выражается формулой

$$P_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{a_1}{u_1}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{опт}}$  — оптимальная мощность котельных,  $\text{Гкал/год}$ ;

$a_1$  — параметр гиперболического уравнения или расходы на производство тепла, не зависящие от мощности котельной (условно-переменные расходы на единицу тепла);

$u_1$  — параметр линейного уравнения или коэффициент, показывающий рост переменных расходов на транспортировку 1  $\text{Гкал}$  при увеличении мощности котельной ( $P$ ) на единицу.

Расчеты показывают, что в Эстонской ССР экономически обоснованной мощностью котельных установок центрального отопления является 4700  $\text{Гкал/год}$ . При этом приведенные затраты тепла 1  $\text{Гкал}$  составят 9,75  $\text{руб}$ .



E. VESKI

## ANWENDUNG DER METHODEN MATHEMATISCHER STATISTIK BEI DER OPTIMISIERUNG DER WÄRMEWIRTSCHAFT DER GEBÄUDE

### Zusammenfassung

Im Artikel wird das Problem der Optimierung der Wärmewirtschaft der Gebäude durch die Anwendung mathematisch-statistischer Methoden — der Korrelationstheorie — untersucht. Dabei wird die Bestimmung der optimalen Wärmedichte der Aussenkonstruktionen des Gebäudes und der optimalen Leistung der Kesselräume der Zentralheizung berücksichtigt.

Das Verhältnis zwischen der Wärmedichte der Aussenkonstruktionen des Gebäudes, der Grösse der beheizten Kubatur und dem Wärmeverbrauch wird durch ein korrelatives Verhältnis zum Ausdruck gebracht.

$$Q_x = x_0 + \sum_{i=1}^5 x_i \frac{F_i}{R_{0i}} + x_6 \frac{1}{V}, \quad (1)$$

- wo  $Q_x$  — der tatsächliche Wärmeverbrauch des Gebäudes, kcal/h°C;  
 $R_{0i}$  — die Wärmedichte der Aussenkonstruktionen des Gebäudes (Wände, Scheide-  
 decke des Bodens, Scheidecke des Kellers, Hinterwände der Radiatoren,  
 Fenster), m<sup>2</sup>h°C/kcal;  
 $F_i$  — Flächen der entsprechenden Aussenkonstruktionen, m<sup>2</sup>;  
 $\sum_{i=1}^5 x_i \frac{F_i}{R_{0i}}$  — Summe des Wärmeverbrauchs durch die Aussenkonstruktionen des Gebäu-  
 des, kcal/h°C;  
 $V$  — Kubatur des geheizten Gebäudes, m<sup>3</sup>;  
 $x_i, x_6$  — die Parameter der Gleichung, die den Einfluss der einzelnen Aussen-  
 konstruktionenarten und der Kubatur des geheizten Gebäudes auf den  
 tatsächlichen Wärmeverbrauch zum Ausdruck bringen. Die Parameter wer-  
 den empirisch ermittelt, indem man die Methode der kleinsten Quadrate  
 anwendet,  
 $x_0$  — das Freiglied der Gleichung.

Das korrelative Verhältnis (1) ist auf der Elektronenrechenmaschine «Minsk 2» für 65 in Exploitation gewesene Wohnräume gelöst worden.

Das Verhältnis (1) in Betracht ziehend, wird die Formel der Berechnung der öko-  
 nomisch optimalen Wärmedichte der Aussenkonstruktionen des Gebäudes gefunden:

$$R_{0i}^{\text{opt}} = \sqrt{\frac{x_i A}{b_i (a_m + E_H)}}, \quad (2)$$

- wo  $A$  — die jährlichen spezifischen Kosten der Wärme (die Kosten der im Laufe der  
 Heizperiode durch 1 qm Aussenkonstruktion entwichenen Wärme, wenn  
 $R_{0i} = 1,0$  m<sup>2</sup>h°C/kcal), Rbl/m<sup>2</sup> jährlich · m<sup>2</sup>h°C/kcal;  
 $b_i$  — die Kosten einer Wärmedichteinheit, Rbl/m<sup>2</sup> · kcal/m<sup>2</sup>h°C;  
 $a_m$  — die jährliche Amortisationsrate der Aussenkonstruktionen,  
 $E_H$  — der Normativkoeffizient der Effektivität der Kapitalanlagen.

Die Werte von  $x_i$  sind in Tabelle 1 angegeben. Der Vorzug der mit Hilfe der sta-  
 tistischen Methode abgeleiteten Formel (2) (im Vergleich zur Formel, die mit Hilfe der  
 analytischen Methode abgeleitet ist) besteht darin, dass sie die Möglichkeit gibt, die  
 optimale Wärmedichte jeder einzelnen Aussenkonstruktion zu bestimmen, unabhängig von  
 der Wärmedichte und der Bedeutung der anderen Aussenkonstruktionen im allgemeinen  
 Wärmeverbrauch des Gebäudes.

Der optimale Wert von  $R_{0i}$  ist aus Tabelle 2 ersichtlich. Um den Wärmeverbrauch  
 bei der Heizung der Gebäude auf ein Minimum zu reduzieren, ist es wichtig, sowohl die  
 mit der Produktion der Wärme als auch mit ihrem Transport verbundenen Probleme  
 ökonomisch richtig zu lösen.



Das Hauptproblem, das auf diesem Gebiet einer Lösung bedarf, ist die Bestimmung der optimalen Leistung der Kesselräume der Zentralheizung. Die Formel wird folgendermaßen ausgedrückt:

$$P_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{a_1}{u_1}}, \quad (3)$$

wo  $P_{\text{opt}}$  — die optimale Leistung des Kesselraumes, Gcal/jährlich;

$a_1$  — Parameter der hyperbolischen Gleichung oder die von der Leistung des Kesselraumes unabhängigen Kosten (die sich für eine Wärmeeinheit bedingt verändern), Rbl.;

$u_1$  — Parameter der linearen Gleichung oder Koeffizient, der die Zunahme der Transportkosten angibt, wenn sich die Leistung ( $P$ ) des Kesselraumes um eine Einheit vergrößert, Rbl./Gcal<sup>2</sup>.

Die Berechnungen zeigen, dass in den Verhältnissen Sowjetestlands die ökonomisch begründete Leistung der Kesselräume der Zentralheizung 4700 Gcal jährlich wäre, wobei die Summe der reduzierten Kosten der Produktion einer Wärmeeinheit und die des Transports 9,75 Rbl. ausmacht.

*Institut für Ökonomie  
der Akademie der Wissenschaften der Estnischen SSR*

Eingegangen  
am 10. Sept. 1965