

TELPAS TERMISKĀ KOMFORTA APSTĀKĻU DATORMODELĒŠANA

Application of Mathematical Models in Analysis of Heat Losses in the Buildings

S. Gendels

Latvijas Universitāte

Zeļļu 8, Rīga, tālr. 7033783, e-pasts: stasis@modlab.lv, fakss: 7033781

Abstract

Physical model of heat balance for separate living room is discussed, which allows to analyse the distributions of the flow of air and temperature depending on the physical conditions and geometry. The model enables to choose the optimal surface area of building elements and their properties in order to decrease the heat losses and improve the conditions of thermal comfort.

Room with bounding constructions and real dimensions is modelled that helps to understand the peculiarities of heat transfer process in the room as well as distribution of various characteristic quantities and their dependence on the different conditions. Multiple parameters are varied in 2D calculations and their influence on the distributions of temperature and velocity fields is analysed, which characterises the conditions of the thermal comfort.

On the basis of considered model, the quantity of heat has been estimated that inflows or outflows through the bounding constructions. The power of convector is estimated, too, at a given temperature of the surface of convector. It is possible to estimate the heat transfer coefficients of the surfaces of bounding constructions with various properties, what requires considerable effort in real conditions of exploitation. One of the conditions of comfort is the temperature difference between frontal walls of the room – it should be less than some degrees. Essential role is played also by the intensity of air flow mostly because it increases heat transfer. Hence, flows between the room and outside environment are created with significant heat losses (so called convective heat losses). The influence of various geometric parameters on the character of the flow of air is analysed.

The software ANSYS/FLOTRAN 5.5, where the turbulence is described by $k-\varepsilon$ model, has been used for the elaboration of the heat balance model of the room.

Keywords: *mathematical modelling; heat losses of building; heat balance of building; conductive, convective and radiation heat losses; LBN 002-01; apportionment of heat losses and sources in building; HeatMod.*

Ievads

Lai labāk saprastu siltuma pārneses procesu īpatnības telpā, kā arī dažādu raksturlielumu sadalījumu un to atkarību no atšķirīgajiem nosacījumiem, tika modelēta telpa ar norobežojošām konstrukcijām un reālai situācijai atbilstošiem izmēriem. 2D aprēķinā tika variēti vairāki parametri un novērtēta to izmaiņas ietekme uz temperatūras un plūsmas ātrumu sadalījumiem, proti uz klimatiskā komforta apstākļu maiņu. Rezultāti parāda gaisa plūsmas un temperatūru sadalījumus. Tādā veidā var optimizēt dažādus faktorus, kas ietekmē termiskā komforta apstākļus telpā un samazināt telpas un ēkas kopumā siltuma patēriņu. Piemēram, gaisa plūsmas telpā un tās intensitātes ir stipri atkarīgas gan no objektu izvietojuma tajā, gan arī no norobežojošo konstrukciju siltumtehnikajām īpašības (siltuma un gaisa caurlaidības). Noslēgtā telpā gaisa cirkulāciju nosaka galvenokārt virsmu temperatūras, kas savukārt ir atkarīgas no to siltuma caurlaidības. Gadījumā, ja norobežojošās konstrukcijās eksistē atveres, pastāv arī konvektīvie siltuma zudumi, un tādā gadījumā siltuma vajadzība var būtiski pieaugt atkarībā no spiedienu starpības, atveru izmēriem un novietojuma telpā.

Mērķis šādiem pētījumiem ir atrast risinājumus un optimizēt parametrus ēkas un atsevišķu telpu siltuma zudumu samazināšanai un energoefektivitātes palielināšanai, kā arī termoklimatisko apstākļu uzlabošanai. Kā rezultāts visiem šāda veida pasākumiem ir siltuma patēriņa samazināšanās, kas nosaka arī CO₂ emisijas samazināšanos. Telpu termisko komforta

apstākļu uzlabošana arī ir ļoti nozīmīgs faktors pats par sevi, kaut arī ne vienmēr to var precīzi mērīt.

Ar apskatītā modeļa palīdzību tika novērtēts arī siltuma daudzums, kas ieplūst vai izplūst caur norobežojošām konstrukcijām, kā arī novērtēta konvektora jauda pie uzdotas virsmas temperatūras. Par vienu no komforta apstākļiem var uzskatīt temperatūras diferenci starp telpas griestiem un grīdu un gala sienām – tai ir jābūt mazākai par dažiem grādiem.

Telpas modeļa izveidē un aprēķinos tika izmantota programmatūras pakete ANSYS/FLOTRAN, turbulences aprakstam izmantots k-ε modelis.

Modeļa formulējums

Apskatīsim telpu ar realitātei maksimāli tuvinātiem nosacījumiem, kur visi uzdotie parametri ir vai nu eksperimentāli noteikti:

- siltuma caurlaidības koeficienti U ($W/(m^2 \cdot K)$);
- gaisa temperatūras ārpus telpas T (K);

vai arī ir standartizēti:

- siltuma atdeves koeficients α ($W/(m^2 \cdot K)$).

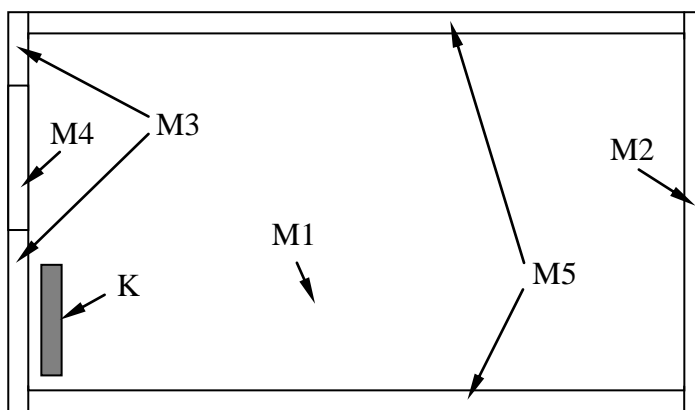
Tiek pieņemts, ka telpas šķērsvirzienā fizikālie parametri nemainās, kas ļauj lietot divdimensionālo (2D) modeli un tādējādi radikāli samazināt galīgo elementu metodes (GEM) režģa mezglu punktu skaitu. Telpas iekšpusē ir gaiss ar tam raksturīgajiem parametriem, kura konvekcija notiek gravitācijas laukā. Gāze tiek modelēta kā nesaspiežama, un tās blīvums ir atkarīgs no temperatūras, kas arī izraisa gaisa masu pārvietošanos. Šādā nostādņē formulētam modelim iegūstam gaisa kustības ātrumu un temperatūras sadalījumus telpā.

Aprēķinam Ņūtona šķidrumā (mūsu gadījumā - gaisam) tiek izmantota ANSYS/FLOTRAN programmatūras pakete [2]. Gaisa plūsmas problēma tiek risināta, lietojot masas saglabāšanās, kustības daudzuma saglabāšanas jeb Navjē-Stoksa un enerģijas saglabāšanas likumus [1, 2]. Šie likumi ātrumam, spiedienam un temperatūrai tiek formulēti parciālo diferenciālvienādojumu veidā, kas tiek diskretizēti, izmantojot GEM un veicot apskatāma apgabala triangulāciju ar 2D elementiem.

Aprēķinu variantos novērtētais Reynoldska skaitlis Re ($Re = \frac{V L}{\nu}$, kur V – vidējais ātrums, L – garums, ν - kinemātiskā viskozitāte) ir ar kārtu $1 \cdot 10^4$, un tas nozīmē, ka šķidrums kustība ir turbulenta, tāpēc tiek izmantots k-ε turbulences modelis [3]. Norobežojošām konstrukcijām tiek pielietoti siltuma vadīšanas vienādojumi, uz to ārējām virsmām konvekcijas nosacījumi. Uz norobežojošo konstrukciju ārējām virsmām tiek uzdoti atbilstošie konvekcijas robežnosacījumi [4]. Radiācijas ceļā pārnests siltuma daudzums mūsu modelī neapskatīsim, jo tas ir mazāks nekā citu veidu siltuma pārnese. Uz visām cietā materiāla virsmām tiek uzdoti tā saucamie pielipšanas nosacījumi, t.i. $V_{tan} = 0$.

Modelējamās telpas skice ar raksturīgiem izmēriem parādīta 1. attēlā. Atkarībā no aprēķinu varianta dažu materiālu siltuma caurlaidība tiek mainīta. Materiālu apzīmējumi:

- M1 – gaiss,
- M2, M5 – sienas uz citām telpām,
- M3, M4 – siena un logs uz āru,
- K – telpas konvektors.

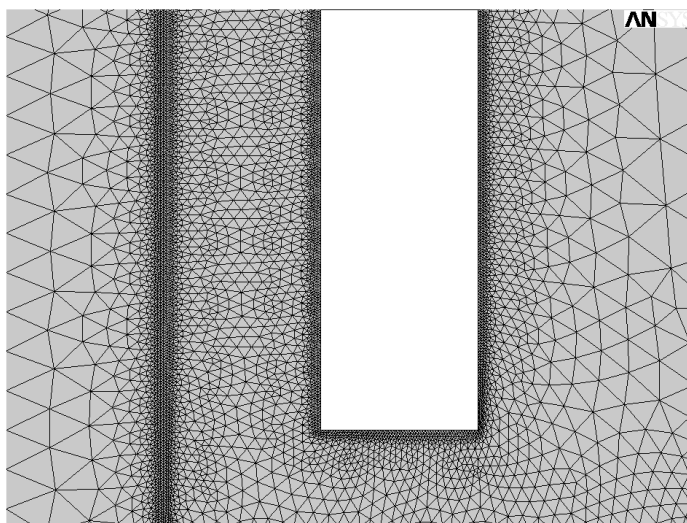


1. attēls. Modelējamās telpas skice

Uz telpu norobežojošo konstrukciju ārējām virsām tiek uzdoti atbilstoši robežnosacījumi. Uz konvektora virsmas tiek uzdoti vai nu temperatūra vai siltuma plūsmas blīvums.

Skaitliskam risinājumam apskatāmā telpa tika triangulēta, robežvirsmas triangulācija konvektora un sienas tuvumā parādīta 2. attēlā. Elementu skaits apgabalā atkarībā no apskatāmā aprēķinu varianta sasniedz 125000 līdz 175000.

Apskatīsim izvēlēta fizikālā modeļa dažādas realizācijas atkarībā no ģeometrijas īpatnībām un robežnosacījumu izvēles, piem., gadījumā, ja virs konvektora tiek novietota palodze vai arī kad telpa nav noslēgta un tai ir atveres uz blakus telpām, kas liek mainīt robežnosacījumu tipu.

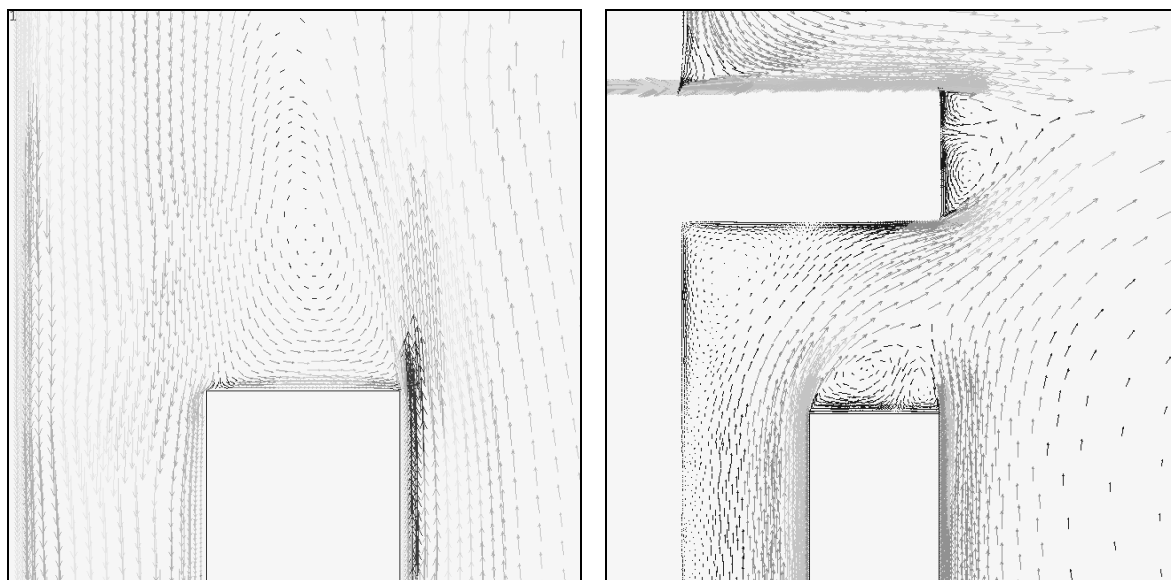


2. attēls. Modelējamās telpas diskretizācija

Aprēķinu varianti un rezultātu analīze

Tika veikti aprēķini ar dažādām norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības vērtībām un robežnosacījumiem. Turpmāk apskatīsim raksturīgos variantus ar izteikti atšķirīgiem nosacījumiem un rezultātiem. Analīzei izvēlēsimies 3 variantus telpas modeļiem:

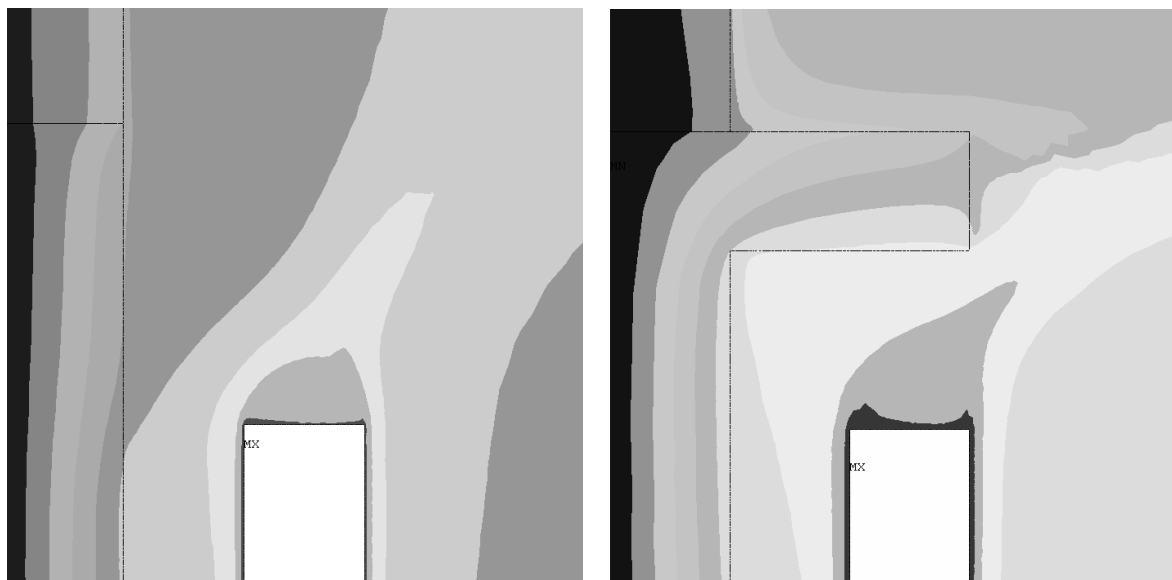
1. telpa bez palodzes;
2. telpa ar palodzi līdz konvektora malai;
3. telpa ar palodzi līdz konvektora malai un atverēm gaisa apmaiņai pie loga un pretējā sienā (spiedienu starpība 0/2 Pa).



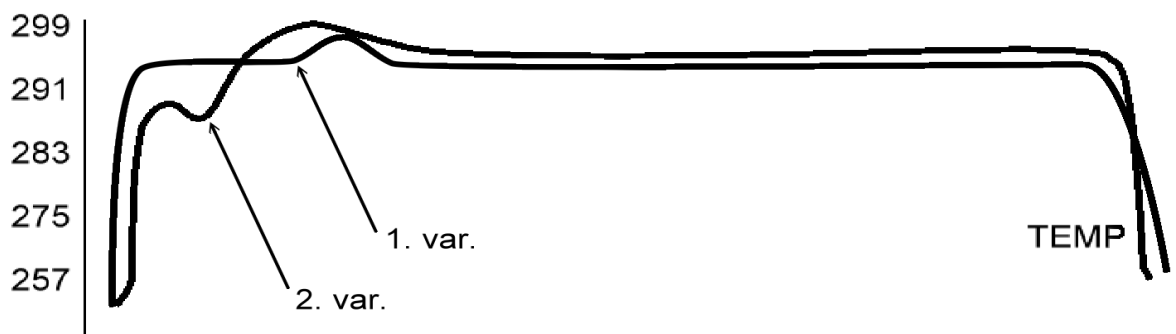
3. attēls. Gaisa plūsmas intensitātes un virziena maiņa dažādos apstākļos konvektora tuvumā

Apskatīsim gaisa plūsmas izmaiņas dažādos variantos (3. attēls). Kā redzams, palodze novirza siltā gaisa plūsmu no loga, savukārt atvere virs palodzes un uzdoša spiedienu starpība starp pretējām sienām rada aukstā gaisa ieplūdi telpā, kas veicina temperatūras pazemināšanos un apkurei vajadzīgās jaudas pieaugumu. Tipiski temperatūras sadalījumi telpā bez palodzes

un ar palodzi, bet bez atverēm parādīts 4. attēlā. Raksturīgs temperatūras sadalījums pa telpas dziļumu augstumā 1,5 m minētajos modelēšanas variantos parādīts 5. attēlā (līkne ar daudz vienmērīgāku sadalījumu, bet nedaudz zemāku temperatūru atbilst telpai bez palodzes). Kā redzams, temperatūras diference pa telpas vidusdaļu, neievērojot loga tuvumā esošo plūsmu izraisītās temperatūras svārstības, nepārsniedz dažus grādus, taču gadījumā, ja pastāv lielākas gaisa plūsmas, piem., ievērojot konvekcijas siltuma zudumus uz āru, šī diference pieaug un atsevišķos gadījumos var sasniegt 5-6 grādus, kas pasliktina komforta apstākļus telpā.



4. attēls. Raksturīgs temperatūras sadalījums konvektora tuvumā



5. attēls. Raksturīgie temperatūras sadalījumi ($^{\circ}\text{K}$) pa telpas dziļumu augstumā 1,5 m

Izmainoties telpas iekšējo sienu virsmas temperatūrām un līdz ar to arī izmainoties gaisa plūsmu raksturam un intensitātei, izmainās siltuma zudumi no telpas, kas nosaka apkures jaudu. Tie pieaug, ja modelī tiek iekļauti konvektīvie siltuma zudumi caur atverēm (3. variants). Siltuma zudumi no telpas katrā no aprēķinu variantiem, kā arī telpas vidējā temperatūra un gaisa plūsmu raksturīgie ātrumi apkopoti 1. tabulā. 3. aprēķinu variantā vērā ņemti arī konvektīvie siltuma zudumi, kas tika noteikti no gaisa plūsmu ātrumiem un temperatūrām atverēs.

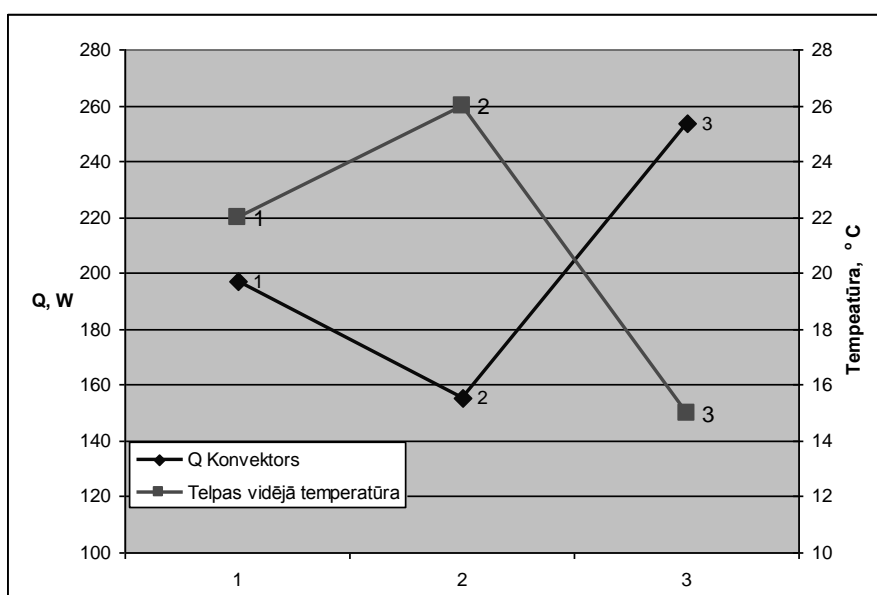
Kā redzams no tabulā apkopotiem rezultātiem, konstruktīvie elementi (piem., palodze) izmaina gaisa plūsmu virzienu un līdz ar to ietekmē arī siltuma zudumu daudzumu – tas samazinās. Novirzītās siltā gaisa plūsmas izraisa telpas vidējās temperatūras pieaugumu telpā un tās gradienta samazināšanos par telpas garumu, kas ir būtisks faktors komforta apstākļu uzlabošanai.

1. tabula

Integrālie vadīšanas siltuma daudzumi dažādos modelēšanas variantos

Aprēķinu variants	1	2	3
Siltumvadīšanas un konvektīvie siltuma zudumi (W)	176	154	301
Raksturīgs vidējais ātrums telpas vidusdaļā (m/s)	0.5	0.3	0.5
Telpas raksturīgā vidējā temperatūra (°C)	22	26	15

Gadījumā, kad ir ievērojami siltuma zudumi konvekcijas ceļā, neskatoties uz to, ka no konvektora izdalītais siltuma daudzums pie uzdotas tā virsmas temperatūras ir ievērojami lielāks, temperatūra telpā ir būtiski samazinājusies (6. attēls).



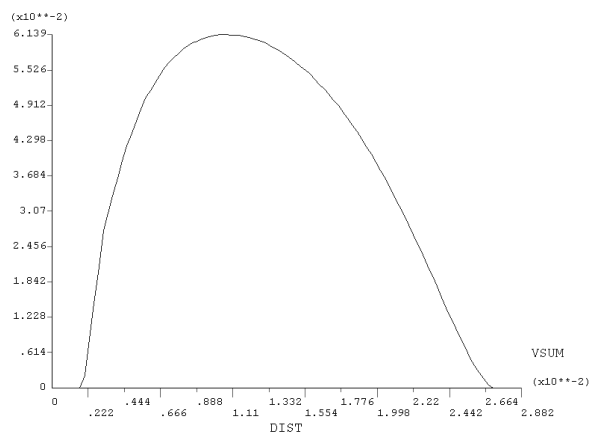
6. attēls. Telpas raksturīgās temperatūras un atbilstošais konvektora siltuma daudzums

Bez apskatītajiem telpas modeļiem tika izveidoti arī citiem apstākļiem atbilstošie modeļi, piem., tika novērtēta norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības izmaiņas ietekme uz temperatūras lauka sadalījumu telpā, kas ietekmē arī kopējo siltuma bilanci. Tika apskatīta arī ģeometrisku faktoru ietekme uz gaisa plūsmu raksturu, piem., palodzes izvietojums un garums tieši ietekmē siltā gaisa plūsmas kustības virzienu no konvektora uz telpas vidusdaļu. Modelējot telpu ar atverēm uz citām telpām un āru bez spiedienu stiprības, neliela plūsma atverēs tomēr radās temperatūras starpības dēļ (7. attēls), taču pie uzdotās spiedienu starpības 2 Pa plūsmas intensitāte radikāli pieaug (8. attēls). Šajos attēlos redzams, ka ātruma absolūtās vērtības atverēs pieauga no 6 cm/s līdz 0,6 m/s gadījumos bez spiedienu starpības un ar tādu. Reāli dabā spiedienu starpības mēdz būt lielākas, kas, savukārt, nozīmē, ka siltuma zudumi gaisa apmaiņas dēļ vēl pieaug. Jāatzīmē, ka lielu ātrumu gadījumā plūsma spraugās ir turbulenta, kā rezultātā ātrumu profils vairs nav parabolisks (8. attēls).

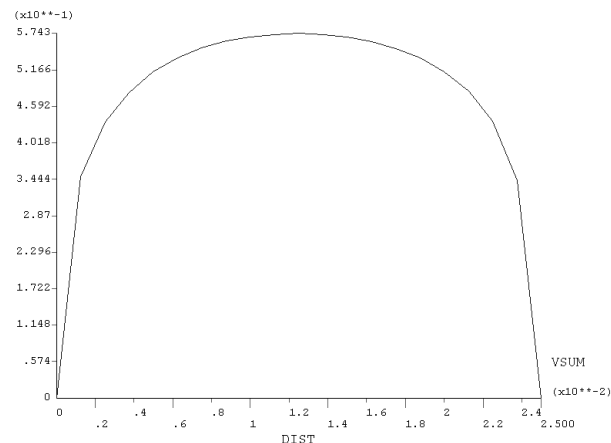
Visos apskatītajos variantos tika pētīta siltuma vadīšanas un konvekcijas siltuma pārneses procesu ietekme uz dažādu fizikālu lielumu sadalījumu telpā un netika ievēroti starojuma siltuma avoti un zudumi. Siltuma zudumi caur dažādiem elementiem tika salīdzināti savā starpā, lai noteiktu šajā ziņā kritiskākus elementus. Caur caurspīdīgām virsmām starojums pārnese ir daudz lielāka, nekā caur necaurspīdīgām (tās tiek tikai sasildītas). Taču siltuma enerģija nokļūst telpā ar Saules radiācijas palīdzību, gan arī izkļūst no tās siltuma starojuma veidā no siltajiem ķermeņiem (elektriskās ierīces, sildķermeņi,

cilvēki u.c.). Arī starojums no konvektora pie lielām tā virsmas temperatūrām var būt nozīmīgs, taču apskatītajos modeļos tas nav apskatīts.

Vairāk par dažādiem telpas modeļiem dažādās situācijās (norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības izmaiņas, konvektora virsmas temperatūras izmaiņas u.c.) iespējams iepazīties darbā [5].



7. attēls. Ātruma profils ventilācijas atverē (0 Pa)



8. attēls. Ātruma profils ventilācijas atverē (2 Pa)

Secinājumi

Atsevišķu telpu gaisa plūsmu un temperatūru sadalījumu 2D aprēķini, lietojot programmatūru ANSYS/FLOTRAN, parāda konstruktīvo elementu izvietojuma būtisku ietekmi uz gaisa plūsmas raksturu un virzieniem telpā, kas ietekmē arī temperatūras lauka sadalījumu, jo tiek izmainīti siltuma apmaiņas nosacījumi pie norobežojošām konstrukcijām. Būtiski zudumu daudzumu un to sadalījumu ietekmē arī būvkonstrukciju siltumtehniko parametru (siltuma caurlaidības koeficienta) maiņa, kas izmaina siltumvadīšanas procesu intensitāti un līdz ar to arī citu fizikālu parametru sadalījumu telpā. Atveres telpas sienās rada konvektīvos siltuma zudumus un aprēķini parāda, ka tie var būt pat būtiski lielāki nekā siltuma vadīšanas zudumi. Šādu siltuma zudumu veidu sadalījumu telpām apstiprina arī mērījumi reālajos objektos.

Šādi modelēšanas lietojumi ļauj, projektējot energoefektīvu ēku celtniecību un renovāciju, mērķtiecīgi izvēlēties ēkas un tās atsevišķu telpu būvkonstrukciju siltumtehniko parametru vērtības, telpas konstruktīvo elementu izvietojumu un analizēt siltuma zudumus un to sadalījumu, t.i. veikt optimizāciju. Atsevišķas telpas modeļi parāda dažāda veida faktoru ietekmi uz rezultējošo siltumfizikālo parametru sadalījumu tajā, kas ir tiešā veidā saistīts gan ar termiskā komforta apstākļiem telpā, gan ar un siltuma vajadzības samazināšanu. Tas savukārt parāda enerģijas ražošanas un arī piesārņojuma samazināšanas iespējas.

Literatūra

1. ANSYS 5.5. Theory Reference. http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/60/Help_C_CH1.html
2. Самойлович, Г. С. *Гидрогазодинамика*. Москва, 1990.
3. Под редакцией Фроста, У., Моулдена, Т. *Турбулентность. Принципы и применения*. Москва, 1980.
4. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М.. *Теоретическая физика – VI. Гидродинамика*. Москва, 1986.
5. Jakovičs, A., Gendels, S., Trümmann, H. *Modelling of Air Fluxes and Temperature Distribution in Heated Rooms*. International Scientific Colloquium “Modelling of Saving Resources”, Rīga, Latvija, 17.-18. maijs, 2001.