

# **Programovanie modelov pre testovanie tepelnej stability miestnosti**

Matej Duháček

---

Bakalárska práca  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Matej Duháček**

Osobní číslo: **A12010**

Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**

Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Programování modelů pro testování tepelné stability místnosti**

Téma anglicky: **Programming Models for Testing the Thermal Stability of Rooms**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii zaměřenou na popis základních mechanismů sdílení tepla ve vytápěných obytných místnostech domů.
2. Zpracujte požadavky dodržení tepelné stability místnosti v zimním období podle české technické normy o tepelné ochraně budov.
3. Seznamte se s prostředím "heat transfer module" programu Comsol Multiphysics.
4. Naprogramujte v prostředí "heat transfer module" vybrané modely pro testování tepelné stability vytápěné obytné místnosti.
5. Otestujte funkčnost naprogramovaných modelů simulací rozložení teploty za požadovaných vstupních podmínek.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. LONG, Chris a Naser SAYMA. Heat Transfer [online]. 2009 [cit. 2015-02-04]. ISBN 978-87-7681-432-8. Dostupné z: <http://nsdl.niscair.res.in/jspui/bitstream/123456789/1090/1/heat-transfer.pdf>
2. PŘÍHODA, Miroslav a Miroslav RÉDR. Sdílení tepla a proudění. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1748-4.
3. KULHÁNEK, František. Stavební fyzika II. Stavební tepelná technika. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 2013. ISBN 978-80-01-04957-0.
4. ČSN 73 0540-2. Tepelná ochrana budov.: Část 2: Požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
5. Introduction to the Heat Transfer Module [online]. 2012 [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: <http://www.comsol.com>.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Hana Charvátová, Ph.D.**

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce:

**6. března 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**22. května 2015**

Ve Zlíně dne 6. března 2015



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.  
*děkan*

L.S.

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*ředitel ústavu*

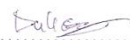
### **Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

  
.....  
podpis diplomanta

## **ABSTRAKT**

Bakalárska práca je zameraná na testovanie tepelnej stability miestností. Práca sa skladá z 6 častí. V prvej časti sú popísané základné mechanizmy zdieľania tepla a ich princíp. V druhej časti je popísané kombinované zdieľanie tepla prestupom. V tretej časti analyzujem podmienky tepelnej stability miestností v zimnom období, ktoré vyplývajú z aktuálnej platnej legislatívy v Českej Republike. V ďalšej časti rozoberám základný popis funkcií programu COMSOL MULTIPHYSICS a jeho prostredí Heat Transfer Module, ktorý využívam v práci na simulovanie rozložení teploty pri vykurovaní a chladnutí jednotlivých analyzovaných modelov. V piatej časti vysvetľujem základy modelovania v programe COMSOL MULTIPHYSICS na konkrétnom príklade miestnosti. V šiestej ukazujem simuláciu vykurovania a chladenia druhej miestnosti. V poslednej časti analyzujem výsledky simulácii.

**Kľúčové slová:** Tepelná stabilita miestností, nestacionárne zdieľanie tepla, Heat Transfer Module, Comsol Multiphysics.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis is focus on testing the thermal stability of rooms. The thesis consists of 6 parts. In the first one there are described the basic mechanisms of heat transfer. The second section describes the principles of combined transfer of heat. The third part gives an analysis of the conditions of heat stability in the rooms during the winter season according to current legislation in the Czech Republic. In the next section there is a basic description of functions of the program COMSOL MULTIPHYSICS as well as its interface Heat Transfer Module, which is used in the work for the simulation of heating and cooling the rooms. In the fifth part there is an explanation of modeling in COMSOL MULTIPHYSICS given the particular example of the room. The sixth part shows a simulation of heating and cooling in the second room. In the last section there is an analysis regarding the results of simulations done.

**Keywords:** Thermal stability of rooms, non-stationary sharing of heat, Heat transfer Module, Comsol Multiphysics

Týmto by som rád poďakoval vedúcej mojej bakalárskej práce, Ing. Haně Charvátové, PhD. za pomoc pri spracovávaní bakalárskej práce v podobe jej odborného vedenia, cenných rád, pripomienok a konzultácií počas spracovania mojej práce.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia bakalárskej práce a verzia elektronická nahraná do IS/STAGE sú totožné.

# OBSAH

ÚVOD.....	9
<b>I TEORETICKÁ ČASŤ.....</b>	<b>10</b>
<b>1 MECHANIZMY ZDIELANIA TEPLA .....</b>	<b>11</b>
1.1 ZDIELANIE TEPLA VEDENÍM.....	12
1.1.1 Fourierov zákon vedenia tepla .....	12
1.1.2 Súčiniteľ tepelnej vodivosti.....	13
1.1.3 Vedenie tepla rovinnou stenou.....	14
1.1.4 Vedenie tepla rovinnou stenou.....	15
1.1.5 Nestacionárne vedenie tepla.....	17
1.1.5.1 Fourier - Kirchhoffova rovnice nestacionárneho vedenia tepla.....	17
1.1.5.2 Okrajové podmienky.....	18
1.2 PRESTUP TEPLA, ZDIELANIE TEPLA KONVEKCIUO .....	18
1.2.1 Newtonov ochladzovací zákon .....	19
1.2.2 Prestup tepla pri nútenom prúdení .....	20
1.2.2.1 Laminárna oblasť prúdenia .....	20
1.2.2.2 Prechodová oblasť prúdenia .....	21
1.2.2.3 Turbulentná oblasť prúdenia.....	21
1.2.3 Prestup tepla pri prirodzenom prúdení.....	22
1.3 ZDIELANIE TEPLA ŽIARENÍM.....	23
1.3.1 Fyzikálne základy pri zdieľaní tepla žiarením .....	23
1.3.2 Základne pojmy.....	24
1.3.3 Radiačné vlastnosti.....	25
1.3.4 Základné zákony .....	27
1.3.4.1 Planckov vyžarovací zákon .....	27
1.3.4.2 Wienov posunovací zákon.....	28
1.3.4.3 Stefanov- Boltzmannov zákon.....	28
1.3.4.4 Lambertov zákon .....	29
1.3.4.5 Kirchhoffov zákon .....	30
<b>2 PROSTUP TEPLA .....</b>	<b>31</b>
2.1 PROSTUP TEPLA ROVINNOU STENOU .....	31
<b>3 TEPELNÁ STABILITA V MIESTNOSTI V ZIMNOM OBDOBÍ .....</b>	<b>33</b>
3.1 VPLYV NA TEPELNÚ STABILITU MIESTNOSTI.....	34
3.1.1 Vplyv činiteľa oslnenia na teplotnú stabilitu miestnosti .....	34
3.1.2 Akumulačné schopnosti konštrukcií .....	34
<b>II PRAKTICKÁ ČASŤ .....</b>	<b>36</b>
<b>4 ZÁKLADNÝ POPIS PROSTREDIA HEAT TRANSFER MODULE PROGRAMU COMSOL MULTIPHYSICS .....</b>	<b>37</b>
<b>5 MODELOVANIE MIESTNOSTI ČÍSLO 1 V PROGRAME COMSOL MULTIPHYSICS .....</b>	<b>39</b>
5.1 VOEBA MODULU.....	39
5.2 VYTVORENIE GEOMETRIE .....	40
5.2.1 Vytvorenie geometrie miestnosti č. 1.....	40

5.3	NADEFINOVANIE MATERIÁLOV.....	44
5.3.1	Nadefinovanie materiálov pre miestnosť číslo 1.....	45
5.4	NADEFINOVANIE POČIATOČNÝCH A OKRAJOVÝCH PODMIENOK .....	47
5.4.1	Nadefinovanie počiatočných a okrajových podmienok pre miestnosť č.1 .....	47
5.5	VYTVORENIE MRIEŽKY .....	51
5.6	NASTAVENIE KROKU A DOBY PROCESU .....	52
5.7	ZÍSKANIE A SPRACOVANIE VÝSLEDKOV SIMULÁCIE – OHREV MIESTNOSTI .....	52
5.8	ZÍSKANIE A SPRACOVANIE VÝSLEDKOV SIMULÁCIE - CHLADNUTIE MIESTNOSTI .....	61
<b>6</b>	<b>SIMULÁCIA MIESTNOSTI ČÍSLO 2 V PROGRAME COMSOL MULTIPHYSICS .....</b>	<b>66</b>
6.1	POUŽITÉ PARAMETRE .....	67
6.2	PODMIENKY TESTOVANIA.....	68
6.3	VÝSLEDKY SIMULÁCIE - OHREV MIESTNOSTI.....	69
6.4	VÝSLEDKY SIMULÁCIE - OCHLADZOVANIE MIESTNOSTI .....	74
<b>7</b>	<b>ZHRNUTIE VÝSLEDKOV SIMULÁCIE OHREVVU A CHLADENIA TESTOVANÝCH MODELOV MIESTNOSTÍ.....</b>	<b>80</b>
	<b>ZÁVER .....</b>	<b>81</b>
	<b>ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....</b>	<b>82</b>
	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....</b>	<b>84</b>
	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>87</b>
	<b>ZOZNAM TABULIEK .....</b>	<b>89</b>

## ÚVOD

V súčasnej dobe pri navrhovaní stavebných konštrukcií je kladený značný dôraz na ich energetickú náročnosť. Potreba znižovania energetickej náročnosti súvisí s vysokými cenami energetických surovín a teda logicky so snahou o efektívne hospodárenie jednak domácností tak aj komerčného sektora. Jedným zo spôsobov ako znížiť náklady na vykurovanie a údržbu budov je práve správne navrhnutie stavebnej konštrukcie.

So znižovaným energetickou náročnosti je však stále za potreby hľadiť na dodržanie podmienok tepelnej stability miestnosti ktoré sú dané podľa českej technickej normy ČSN 73 0540-2. Táto technická norma upravuje povolené teplotné rozmedzie danej miestnosti v určitom časovom priebehu. Toto rozmedzie je definované zvlášť pre zimné obdobie a zvlášť pre letné. Konkrétne tepelnú stabilitu v zimnom období definuje ČSN 73 0540 a to pomocou parametru poklesu teploty, ktorý predstavuje pokles teploty miestnosti pri vykurovacej pauze. Tento pokles nesmie prekročiť hodnotu 3 °C, pri vykurovaní radiátormi ani pri teplovzdušnom vykurovaní. V miestnostiach, kde je použité podlahové kúrenie alebo vykurovacie kachle, je pokles ohraničený 4 °C.

Pre sledovanie tepelnej stability miestnosti a energetickej náročnosti budov, existujú rôzne softwarové prostriedky. Tieto produkty nám vykonávajú fyzikálne výpočty ohľadom zdieľania tepla medzi rôznymi objektmi. Jedným z takýchto programov je práve použitý COMSOL Multiphysics.

Cieľom mojej bakalárskej práce je zoznámiť sa prostredím "Heat transfer module" a následne, v ňom namodelovať vybrané modely miestností, v ktorých budem simulovať vykurovanie a chladenie za zvolených začiatkových a okrajových podmienok ako sú vonkajšia teplota, teplota susedných miestností či rôzne fyzikálne vlastnosti používaných materiálov. Sledovaným týchto dejov a zhromažďovaním výsledkov budem analyzovať tepelnú stabilitu miestnosti vzhľadom na použité materiály pri jej stavbe.

## **I. TEORETICKÁ ČASŤ**

## 1 MECHANIZMY ZDIEĽANIA TEPLA

Teplo je forma energie spôsobená mikroskopickým pohybom častíc. Tejto energií zjednodušenie odpovedá pojem tepelná energia a teda teplo. Merateľnou jednotkou tejto energie je teplota: čím väčšia je intenzita pohybu častíc tým väčšia je teplota. Častice z ktorých sa skladajú všetky druhy látok (plynné, kvapalné, tuhé), môžu mať rôznu kinetickú energiu od ktorej sa následne odvíja intenzita pohybu jednotlivých častíc a tiež odlišná teplota v rôznych miestach skúmaného systému. Pokiaľ dochádza k výmene energie na mikroskopickej úrovni hovoríme o zdieľaní tepla. Sila zdieľania tepla je teda rozdiel energií pri mikroskopickom pohybu častíc v rôznych častiach pozorovaného systému. Keďže energiu tepelného pohybu nie je možné jednoducho zmerať, v praxi nahradzujeme tento rozdiel energií pohybu častíc za rozdiel teplôt. Tepelný tok  $\Phi$  potom môžeme definovať ako teplo  $Q$ , ktoré prejde danou plochou za jednotku času.

$$\Phi = \frac{dQ}{d\tau}. \quad (1)$$

Keďže teplo je istý druh energie, jednotkou tepla bude 1 joule (J), z rovnice teda ďalej vyplýva, že jednotkou tepelného toku  $\Phi$  bude teda  $\text{Js}^{-1}$  alebo tiež watt (W). [1]

Rozlišujeme tri základne mechanizmy zdieľania tepla, a to konkrétne zdieľanie tepla vedením (kondukcia), prúdením (konvekcia) a žiarením (radiácia).

Rozdeľ teplôt je teda základným predpokladom pre uskutočňovanie zdieľanie tepla. Pokiaľ nastane situácia, že máme medzi chladnejším a teplejším telesom konštantný teplotný rozdiel a teda teplota nezávisí na čase, hovoríme o **stacionárnom** zdieľaní tepla. Teplota bude závisieť iba na osových súradniciach  $t = f(x, y, z)$ .

Avšak veľký počet procesov v oblasti zdieľania tepla má **nestacionárny** charakter, čo znamená, že teplotné pole v telese je závislé nie iba na priestorových súradniciach ako tomu bolo pri stacionárnom zdieľaní tepla, ale aj na čase. Všeobecne platí, že riešenie nestacionárnych úloh je zložitejšie ako pri stacionárnych. Je to spôsobené ďalšou premennou, ktorou je čas, tj.  $t = f(x, y, z, \tau)$ . Táto premenná spôsobuje že aj najjednoduchšie procesy jednosmerného nestacionárneho zdieľania tepla sú popísane miesto jednoduchšej obyčajnej diferenciálnej rovnice zložitejšou parciálnou diferenciálnou rovnicou doplnenou príslušnými počiatočnými podmienkami. Ja sa budem zaoberať nestacionárnym zdieľaním tepla keďže teploty v miestnosti sa časom budú meniť.

Zdieľanie tepla **vedením** je prenos energie, ktorý súvisí s tepelným pohybom a vzájomným pôsobením molekúl, atómov iontov a tiež elektrónov. Zdieľanie tepla vedením môžeme uplatniť nie len v tuhých ale aj v kvapalných a plynných telesách, avšak keď rozprávame o tuhých telesách, je jediným mechanizmom zdieľanie tepla.

Zdieľanie tepla **prúdením** (prestup tepla) je zdieľanie tepla, ktoré prebieha v pohybujúcom sa objeme tekutiny najmä v blízkosti steny. Tekutina, ktorá vykonáva pohyb pritom odoberá alebo predáva teplo z povrchu telesa v blízkosti ktorého sa nachádza. Povrch, ktorého zmenu tepla sledujeme, je obvykle povrch tuhého telesa, ale môže ním byť aj plocha dotyku dvoch kvapalín, prípadne tiež plocha dotyku kvapaliny a plynu.

Zdieľanie tepla **žiarením** je uskutočnené za pomoci elektromagnetického vlnenia. Tepelná energia, ktorá vyžaruje z telesa sa šíri v podobe elektromagnetického vlnenia. Toto vlnenie je pohlcované povrchom telies, ktoré sa nachádzajú v okolí zdroja vlnenia. V týchto telesách sa vlnenie spätne premení na tepelnú energiu. Zdieľanie tepla žiarením sa od predchádzajúcich spôsobov odlišuje tým, že nie je viazané na hmotné prostredie, a teda môže prebiehať aj v absolútnom vákuu.

V praxi sa však vo väčšine prípadov uplatňujú kombinácie týchto troch základných mechanizmov zdieľania tepla. [2]

## 1.1 Zdieľanie tepla vedením

Prenos tepelnej energie pri zdieľaní tepla vedením popisuje nižšie uvedený Fourierov zákon.

### 1.1.1 Fourierov zákon vedenia tepla

Nultý zákon termodynamiky znie, že systém je v rovnovážnom stave teda nedochádza k zdieľaniu tepla vtedy, ak má všade konštantnú teplotu. To ako veľmi sa odchyľuje systém od rovnovážneho stavu určuje **gradient teploty**.

Gradient teploty je vektor, ktorého smer udáva v akom smere sa odchyľuje teplota a jeho absolútna veľkosť udáva, ako rýchlo sa teplota mení. Jeho vektorový tvar má podobu [1] :

$$\left( \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Ak sa teplota mení len v smere súradnice osi  $z$ , je podľa Fourierovho zákona vedenia tepla tok tepla  $\Phi$ , ktorý prechádza plochou  $A$  úmerný veľkosti tejto plochy ktorou prechádza a zápornej derivácií teploty podľa súradnice osi  $z$  viac vzťah (3). [1]

$$\Phi = -A * \lambda \frac{dT}{dz} \quad (3)$$

Kde symbolom  $\lambda$  sa označuje konštanta s názvom súčiniteľ tepelnej vodivosti. Podrobnejšie je popísaný v kapitole (1.1.2).

Tok tepla, ktorý je daný na jednotku plochy sa nazýva **intenzita toku tepla**, môže byť daný pre ktorúkoľvek súradnicu s trojrozmerného súradnicového systému  $x, y, z$ . V našom prípade v smere osi  $z$  [1] :

$$q_z = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{dT}{dz} \quad (4)$$

V obecnom prípade je intenzita toku tepla priamo úmerná veľkosti zápornému smeru gradientu teploty, čo vlastne popisuje Fourierov zákon pre vedenie tepla vo vektorovom tvare [1] :

$$q = (q_x, q_y, q_z) = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

### 1.1.2 Súčiniteľ tepelnej vodivosti

Súčiniteľ tepelnej vodivosti je fyzikálnym parametrom látky čo znamená, že je to vlastnosť materiálu. Súčiniteľ tepelnej vodivosti  $\lambda$  závisí na teplote, tlaku a samozrejme na zložení danej látky. Väčšinou sa určuje meraním intenzity toku tepla, gradientom teploty a tiež z nasledujúceho vzťahu[1] :

$$\lambda = - \frac{dT}{gradt * dA * d\tau} \quad (6)$$

Zo vzťahu (6) teda vyplýva, že súčiniteľ tepelnej vodivosti je množstvo tepla, ktoré prejde za jednotkovú plochu, jednotku času, pričom uvažujeme o jednotkovom teplenom vektore gradiente.

Zo zvyšujúcou sa teplotou súčiniteľ tepelnej vodivosti pri plynných látkach rastie. Pri teplotách v okolí 0 °C sa pohybuje v rozmedzí okolo 0,01 až 0,03 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>. Pričom výnimku tvoria látky, ktoré majú menšiu molárnu hmotnosť ako sú napríklad vodík a hélium ktorých súčiniteľ tepelnej vodivosti pri tejto teplote je vyšší.

Pri kvapalinách s rastúcou teplotou hodnota  $\lambda$  väčšinou klesá. Výnimkou je napríklad voda kedy až do teploty 127 °C súčiniteľ tepelnej vodivosti stúpa, avšak ako náhle dosiahne tejto teploty, ďalším zvyšovaním jeho súčiniteľ klesá. Pri zvyšovaní tlaku súčiniteľ len nepatrne klesá.

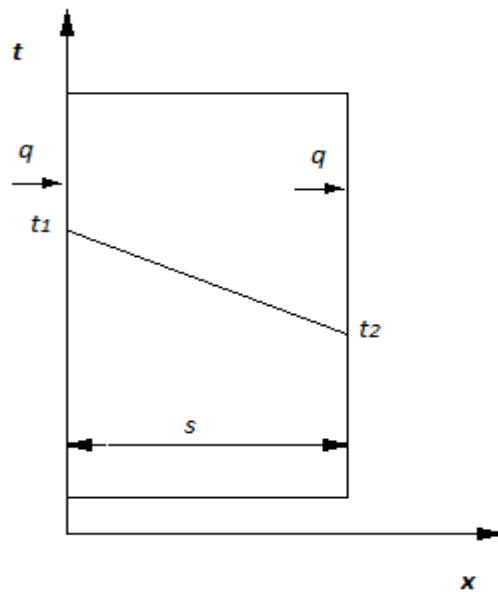
Pri tuhých telesách sa tepelná vodivosť definuje obťažnejšie ako v prechádzajúcich prípadoch a to z toho dôvodu, že závisí na tom či sa jedná o kovy, polovodiče alebo nevodivé telesá. Pri vodivých telesách súčiniteľ tepelnej vodivosti nadobúda vyšších hodnôt. A to z dôvodu početnejšieho výskytu voľných elektrónov, ktoré spôsobujú vedenie tepla. Pri týchto látkach hodnoty  $\lambda$  dosahujú rádovo  $10^1$  až  $10^2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . U väčšiny kovov sa však zvyšovaním teploty súčiniteľ tepelnej vodivosti znižuje, pričom stopy prímеси výrazne znižujú u čistých kovov vedenie tepla.

Pri polovodičových látkach, ktoré majú menší počet voľných elektrónov ako kovy sa na tepelnej vodivosti podieľa tiež pružné kmitanie atómov v mriežke. Polovodiče majú  $\lambda$  nižšiu ako kovy avšak s rastúcou teplotou a s rastúcim počtom cudzích atómov sa zvyšuje počet voľných elektrónov čo má za dôsledok aj zväčšovanie súčiniteľa tepelnej vodivosti.

Elektricky nevodivé látky sa vyznačujú vlastnosťou malého súčiniteľa tepelnej vodivosti, pretože teplo sa v nich prenáša len kmitavým pohybom atómov. [1]

### 1.1.3 Vedenie tepla rovinnou stenou

Pri jednoduchých telesách, ktoré budem popisovať nižšie budem uvažovať prípad kedy teplota závisí iba na jednej súradnici, teleso je bez vnútorných tepelných zdrojov a tiež jeho súčiniteľ tepelnej vodivosti nebude závisieť na teplote. Skúmame teplotu rovinatej steny o šírke  $s$ , na ktorej povrchoch sú zadané teploty  $t_1$  a  $t_2$ , ako je ukázané na obr. 1.



Obr. 1 Vedenie tepla jednovrstvovou rovinnou stenou [1]

Keďže rozmýšľame o systéme kedy je teplota lineárnou funkciou premennej  $x$ , môžeme napísať vzťah pre výpočet intenzity tepelného toku, ktorý vyplýva zo vzťahu (7) alebo (8). [2]

$$q = -\lambda * \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

po dosadení za deriváciou nám vznikne nasledujúci vzťah [2] :

$$q = \frac{\lambda}{s} (t_1 - t_2) \quad (8)$$

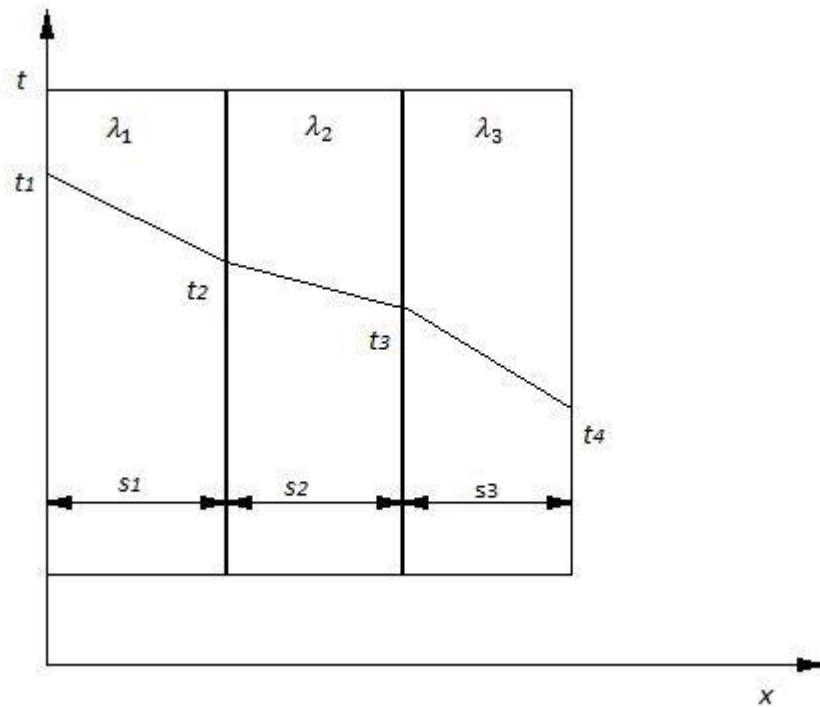
Zo vzťahu (8) vyplýva, že hustota tepelného toku je tým väčšia čím väčší je teplotný rozdiel na povrchu rovinatej steny. Pomer ktorý sa vyskytuje vo vzťahu (8) konkrétne pomer súčiniteľa tepelnej vodivosti a hrúbky steny vyjadruje merný tepelný odpor  $R_\lambda$ . Po dosadení  $R_\lambda$  do tohto vzťahu môžeme teda prepísať vzťah (8) nasledujúcim spôsobom [2] :

$$q = \frac{(t_1 - t_2)}{R_\lambda} \quad (9)$$

#### 1.1.4 Vedenie tepla rovinnou stenou

Zložená stena je taká, ktorá sa skladá z viacerých vrstiev rozdielnych materiálov. V našom prípade budeme uvažovať o prípade kedy povrchové teploty dotýkajúcich sa stien sú zhod-

né, rovinná stena sa bude skladať z troch materiálov, ktorých šírka bude značená ako  $s_1, s_2, s_3$ . Teploty budú značené  $t_1$  až  $t_4$ .



Obr. 2 Vedenie tepla rovinnou stenou [1]

Keďže uvažujeme o stacionárnom režime, platí, že hustota tepelného toku  $q$  v ľubovoľnom mieste steny je konštantná a teda podľa vzťahu (8) môžeme písať [2] :

$$\begin{aligned} q &= \frac{\lambda_1}{s_1} (t_1 - t_2) \\ q &= \frac{\lambda_2}{s_2} (t_2 - t_3) \\ q &= \frac{\lambda_3}{s_3} (t_3 - t_4) \end{aligned} \quad (10)$$

Všeobecne teda môžeme pre rovinnú stenu o  $n$  vrstiev napísať vzťah [2] :

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_{\lambda i}} \quad (11)$$

Pričom  $\sum R_{\lambda i}$  je celkový merný tepelný odpor zloženej steny v jednotkách  $(m^2KW^{-1})$ . [2]

### 1.1.5 Nestacionárne vedenie tepla

Ide o popis, ktorý odpovedá časovo neustálenému zdieľaní tepla, ktoré je vyvolané iným telesom pôsobiacim na toto teleso. Najčastejším prípadom takého zdieľania tepla je pri ohrievaní alebo ochladzovaní telies.

Nestacionárne vedenie tepla je také, pri ktorom teplota není závislá iba na funkcií priestorových súradníc ale je závislá tiež na čase  $t = f(x, y, z, \tau)$  [12]. Pri tomto druhu zdieľaní tepla je nutné si zaviesť podmienky, ktoré toto zdieľanie ovplyvňujú. Tieto podmienky sa rozdeľujú na [12] :

- 1) **Geometrické podmienky**, ktoré charakterizujú tvar a rozmery telesa v ktorom proces prebieha.
- 2) **Fyzikálne podmienky**, charakterizujúce fyzikálne vlastnosti telies napríklad súčiniteľ tepelnej vodivosti, hustota, merná tepelná kapacita, súčiniteľ prestupu tepla atd.
- 3) **Počiatočné podmienky**, ktoré charakterizujú rozloženie teplôt vo vyšetřovanom telese v určitom počiatočnom čase.
- 4) **Okrajové podmienky**, charakterizujú vzájomné pôsobenie telesa ktoré popisujeme a jeho okolia. Tieto podmienky sa teda týkajú toho čo sa deje na povrchu telesa a v jeho okolí.

#### 1.1.5.1 Fourier - Kirchhoffova rovnice nestacionárneho vedenia tepla

Tato rovnice vychádza z predpokladov, že tuhé teleso ktoré vedie teplo je homogénne a izotropné, fyzikálne vlastnosti telesa sú konštantné, vnútorné objemové tepelné zdroje sú rozmiestnené rovnomerne a dej vedenia tepla prebieha za konštantného tlaku. Potom teda môžeme písať [12] :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t \quad (12)$$

Pričom  $a$  je súčiniteľ teplotnej vodivosti. Jeho fyzikálny význam je v tom, že v podstate vyjadruje fyzikálne vlastnosti sústavy a je vyjadrený nasledujúcim vzťahom [12] :

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (13)$$

Pričom  $c_p \rho$  predstavuje tepelnú kapacitu jednotkového objemu látky za stáleho tlaku.

### 1.1.5.2 Okrajové podmienky

Okrajové podmienky môžeme rozdeliť na štyri druhy a to :

#### 1. druhu :

Určujú rozdelenie teploty na povrchu telesa v každom časovom okamihu. [12]

$$t_p = t(x, y, z, \tau) \quad (14)$$

#### 2. druhu :

Určujú podmienky tepelného toku v jednotlivých bodoch povrchu telesa v ľubovoľnom časovom okamihu [12].

$$q_p = q(x, y, z, \tau) \quad (15)$$

#### 3. druhu :

Charakterizujú zákon výmeny tepla medzi povrchom a obklopujúcim prostredím v procese ochladzovania alebo ohrievania telesa [12].

$$\alpha[t(b, \tau) - t_0] = -\lambda \frac{\partial t(b, \tau)}{\partial x} \quad (16)$$

#### 4. druhu :

Charakterizujú podmienky vedenia tepla systémom telies. Za podmienky, že medzi telesami existuje ideálny kontakt. V skúmaných podmienkach bude tepelný tok jednotlivými povrchmi telies konštantný [12].

$$\frac{q_{1A}}{q_{1B}} = \frac{q_{2A}}{q_{2B}} = \text{konšt.} \quad (17)$$

## 1.2 Prestup tepla, zdieľanie tepla konvekciou

V tekutinách s pohybom, teda v prúdiacich tekutinách, sa popri zdieľaní tepla vedením tiež uplatňuje zdieľanie tepla prúdením. A to z dôvodu že prúdiaca tekutina obsahuje elementárne častice ktoré vykonávajú tepelný pohyb. Tekutina obsahuje také množstvo entalpie<sup>1</sup>, ktoré je rovné súčinu hmotnosti tekutiny  $m$  a mernej entalpie<sup>2</sup>  $h$ . Ďalej si zavedieme veličinu tok entalpie prúdením  $\dot{H}$ , ktorý môžeme vyjadriť nasledujúcim vzťahom :

---

<sup>1</sup> Je to veličina, ktorá vyjadruje energiu uloženú v termodynamickom systéme.

$$\dot{H} = \dot{m}h \quad (18)$$

Kde  $\dot{m}$  vyjadruje hmotnostný tok.

Tok entalpie prúdením na jednotku plochy  $S$  označíme ako intenzitu toku entalpie prúdením [1] :

$$\Phi_H = \frac{\dot{H}}{S} = \frac{\dot{m}h}{S} = \Phi_m h = v\rho h \quad (19)$$

$v$  - rýchlosť prúdenia,

$\rho$  - hustota tekutiny,

$\Phi_m$  - intenzita toku hmotnosti.

Pri popisu zdieľania tepla prúdením potrebujeme poznať rýchlosť v každom mieste tekutiny a v každom čase. Pri obtekaní tekutiny okolo steny a ak má jadro tekutiny rozličnú teplotu oproti stene okolo ktorej obteká, nastáva zdieľanie tepla, ktoré je kombináciou zdieľania tepla vedením a prúdením. Tento popis zdieľania teploty potrebujeme určiť tak, aby pri zdieľaní tepla medzi jadrom tekutiny a povrchom tekutiny bol hybnou silou rozdiel teplôt ktorý medzi nimi nastáva. V praxi sa toto zdieľanie tepla medzi povrchom a jadrom tekutiny nazýva **prostup tepla**.

### 1.2.1 Newtonov ochladzovací zákon

Popisuje aké množstvo tepla sa vymení pri prúdení tekutiny pevnou látkou okolo ktorej sa tekutina pohybuje a teda popisuje prestup tepla a to týmto vzťahom [1]:

$$\phi = \alpha A(T_b - T_w) \quad (20)$$

Pričom  $T_b$  je teplota v jadre tekutiny tiež definovaná ako stredná teplota tekutiny,  $T_w$  teda bude teplota povrchu steny. Rozdiel týchto teplôt  $\Delta T = T_b - T_w$  je teda už vyššou spomínanou hybnou silou zdieľania tepla.  $A$  má vo vzťahu (14) význam veľkosti povrchu steny okolo ktorej prúdi tekutina. Dôležitou veličinou s ktorou sme sa ešte nestretli je  $\alpha$  predstavuje takzvaný súčiniteľ prestupu tepla. Sám o sebe tento zákon nič nerieši, avšak ukazuje nám fakt, že tok tepla rastie priamo úmerne s hybnou silou.

---

<sup>2</sup> Entalpia vzťahujúca sa na jednotku hmotnosť.

### 1.2.2 Prestup tepla pri nútenom prúdení

Pri riešení prenosu tepla konvekciou sa najčastejšie využíva experimentálnych výsledkov a metód teórie podobnosti, keďže u väčšiny praktických úloh by bolo nemožné riešiť prenos tepla analyticky. Dôležitým aspektom pri riešení úloh tohto typu je stanoviť intenzitu výmeny tepla na rozhraní tekutiny a povrchu tuhého telesa (steny). Preto sa v ďalšom texte sústredíme na stanovenie súčiniteľa prestupu tepla konvekciou. Ten získame vypočítaním bezrozmerného Nusseltového kritéria. Uvažujeme o prietochom systéme. Pokiaľ je v takomto systéme prúdenie vynútené napríklad rozdielom tlaku, výšky alebo pôsobením čerpadla hovoríme o takzvanom nútenom prúdení. Charakter toku tekutiny sa mení v závislosti na vlastnostiach tekutiny, rýchlosti prúdenia, vlastnostiach obtekaného telesa a podobne. Určuje sa pomocou Reynoldsova kritéria, ktoré nám vymedzuje tri oblasti s odlišným charakterom toku a to oblasť laminárna : ( $Re < 2300$ ), prechodová ( $2300 < Re < 10\,000$ ) a turbulentná ( $Re > 10\,000$ ). [1]

Reynoldsovo kritérium [1] :

$$Re = \frac{v l}{\nu} \quad (21)$$

$l$  - charakteristická dĺžka,

$v$  - charakteristická rýchlosť prúdenia,

$\nu$  - kinematická viskozita.

#### 1.2.2.1 Laminárna oblasť prúdenia

Experimentálne poznatky dokazujú, že v laminárnej oblasti Nusseltovo kritérium je závislé na Gratzovom kritériu, ktoré má tvar [1] :

$$Gz = Pe \frac{d}{L} = RePr \frac{d}{L} \quad (22)$$

Pričom  $Pe$  je Pécletovo kritérium, ktoré ako je vidieť vo vzťahu (22) môžeme vyrátať pomocou Reynoldsova kritéria a Prandtlovho kritéria vynásobených podielom napr. vnútorného priemeru telesa  $d$  a dĺžky  $L$  látky ktorá týmto telesom prúdi.

Prandtlovo kritérium podobnosti je látkovou vlastnosťou a určuje podobnosť medzi zdieľaním a hybnosťou tepla. [1]

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (23)$$

$\eta$  - dynamická viskozita pri strednej teplote tekutiny

$c_p$  - merná tepelná kapacita

$\lambda$  - tepelná vodivosť

Nusseltovo kritérium môžeme ďalej vypočítať pomocou Hausenovej rovnice pre laminárne prúdenie [1] :

$$Nu = 3,66 + \frac{0,19 Gz^{0,8}}{1 + 0,177 Gz^{0,467}} * \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,14} \quad (24)$$

$\eta_w$  - dynamická viskozita pri teplote steny.

Táto rovnica je vhodná pre  $0,1 < G_z < 10000$ . Pokiaľ je  $G_z > 100$  používa sa takzvaná Siederova - Tateova rovnica pre laminárne prúdenie ktorá má tvar [1] :

$$Nu = 1,86 Gz^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,14} \quad (25)$$

### 1.2.2.2 Prechodová oblasť prúdenia

Pri tomto druhu prúdenia sa používa takzvaná Haussenova rovnica pre prechodové laminárne prúdenie a má tvar [1]:

$$Nu = 0,116 \left(R_e^{\frac{2}{3}} - 125\right) P_r^{\frac{1}{3}} \left[1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,14} \quad (26)$$

Ako som už vyššie spomínal táto oblasť je vhodná pre  $2300 < Re < 10\ 000$ . Pokiaľ by viskozity  $\eta$  a  $\eta_w$  boli takmer zhodné posledný výraz  $\left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,14}$  môžeme vynechať pretože bude rovný približne jednej. [1]

### 1.2.2.3 Turbulentná oblasť prúdenia

V turbulentnej oblasti prúdenia sa využíva Dittusova - Boelterova korelácia, ktorá sa uvádza väčšinou v zjednodušenom tvare [1] :

$$Nu = 0,023 * R_e^{0,8} P_r^{0,4} \quad (27)$$

Pokiaľ je rozdiel tekutiny a steny vysoký a hodnoty viskozít sa výrazne odlišujú využíva sa vzťah [1] :

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} Pr^{0,4} \left( \frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,14} \quad (28)$$

Pomocou vypočítaného Nusseltovho kritéria pre jedno zo zmienených prúdení môžeme ďalej vypočítať požadovaný koeficient prestupu tepla [1] :

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d} \quad (29)$$

### 1.2.3 Prestup tepla pri prirodzenom prúdení

Opakom núteného prestupu tepla je prirodzený prestup tepla. Dochádza k nemu napríklad v uzavretých miestnostiach v ktorých sa nachádza vyhrievacie teleso (radiátor, krb). K prestupu tepla prirodzením prúdením dochádza napríklad tým spôsobom, že sa vzduch v blízkosti vyhrievacieho telesa ohrieva, čím jeho hustota klesá a teplejší vzduch v gravitačnom poli stúpa. Je to dôsledkom chladnejšieho vzduchu, ktorý sa nachádza vo väčšej vzdialenosti od vyhrievacieho telesa. Tento vzduch vytláča teplejší vzduch. Takže k prestupu tepla prirodzením prúdením dochádza všade tam, kde sa nachádzajú látky s rôznymi hustotami.

V zdieľaní tepla ako vieme je rozdiel hustôt daný rozdielom teplôt  $\Delta T$ . Pričom relatívnu zmenu hustoty môžeme vyjadriť pomocou teplotnej objemovej rozťažnosti  $\beta$  čím vo výsledku získame Grashofovo kritérium [1] :

$$Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta T \quad (30)$$

Pričom  $\beta$  teplotnú objemovú rozťažnosť pre plyny vypočítame [1] :

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{T} \quad (31)$$

Grashofovo kritérium vyjadruje vplyv gravitácie a objemovej rozťažnosti na prúdenie a zdieľanie tepla. Čím menšie nám vide Grashofovo kritérium, tým menej významné bude v danom systéme prirodzené prúdenie. Pričom zlomok  $\frac{1}{T}$  nám ukazuje, čo platí pre objemovú rozťažnosť pri ideálnom plyne.

Teplotná objemová rozťažnosť je pre väčšinu tekutín kladná. Dôležitú výnimku tvorí voda, ktorej teplotná objemová rozťažnosť v teplotnom intervale asi 0 °C – 4 °C nadobúda záporných hodnôt. Má to za následok, že chladnejšia voda neobvykle stúpa vyššie.

Pre určenie hodnoty súčiniteľa prestupu tepla pri prirodzenom prúdení je doporučované používať Nusseltovu rovnicu, ktorá má v tomto prípade takýto tvar [1] :

$$Nu = C(GrPr)^m \quad (32)$$

Pričom hodnoty koeficientov  $C$  a  $m$  som uviedol v tabuľke 1.

Tabuľka 1 Doporučené hodnoty pre rovnicu (26). [1]

Typ Plochy	Rozsah hodnôt GrPr	C	m
Zvislá rovina (Charakteristický rozmer : Výška)	$GrPr < 1 \cdot 10^4$	1,36	0,2
	$1 \cdot 10^4 < GrPr < 1 \cdot 10^9$	0,59	0,25
	$1 \cdot 10^9 < GrPr$	0,13	$\frac{1}{3}$
Vnútorý povrch vodorovného valca (Charakteristický rozmer: Vnútorý priemer)	$GrPr < 1 \cdot 10^{-5}$	0,49	0
	$1 \cdot 10^{-3} < GrPr < 1$	1,09	0,1
	$1 \cdot 10^{-5} < GrPr < 1 \cdot 10^{-3}$	0,71	0,04
	$1 < GrPr < 1 \cdot 10^4$	1,09	0,2
	$1 \cdot 10^4 < GrPr < 1 \cdot 10^9$	0,53	0,25
	$1 \cdot 10^9 < GrPr$	0,13	$\frac{1}{3}$

### 1.3 Zdieľanie tepla žiarením

Rozhodujúcim spôsobom sa žiarenie podieľa na vnútornom zdieľaní tepla pri teplotách tepelných zariadení nad 800 °C. Pričom čím väčšia bude teplota povrchu muriva, tým väčší bude za rovnakých podmienok význam radiácie [2]. K dôkladnému pochopeniu zdieľania tepla žiarením je potrebné poznať okrem klasickej fyziky aj kvantovú fyziku, ako uvádzam v ďalšom texte.

#### 1.3.1 Fyzikálne základy pri zdieľaní tepla žiarením

Tepelná energia sa žiarením prenáša pomocou elektromagnetických vln. Tieto vlny sa šíria rýchlosťou svetla ktorá nadobúda vo vákuu hodnotu :  $c = 299\,792\,456 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Elektromagnetické žiarenie je popísané vlnovou a korpuskulárnou (kvantovou) teóriou.

Znamená to, že žiarenie si môžeme predstaviť ako pohyb vln o danej frekvencii  $f$  (Hz) a vlnovej dĺžke  $\lambda$  (m). Pričom platí [2] :

$$c = f * \lambda \quad (33)$$

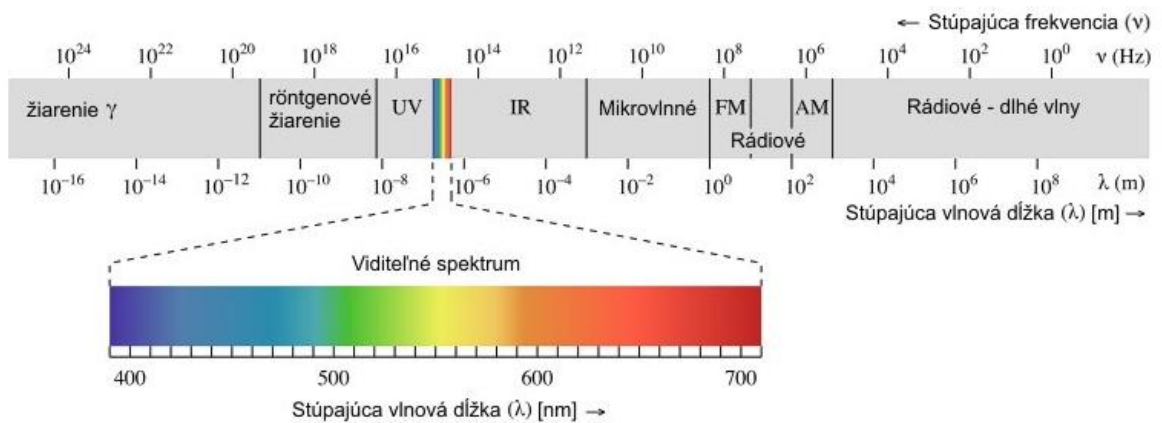
Korpuskulárna teória hovorí o tom, že sa žiarivá energia predáva nespojito a teda v malých množstvách (kvantách), ktorých veľkosť je priamo úmerná frekvencii žiarenia. [2]

$$Q = h * f \quad (34)$$

Pričom  $h$  označuje Planktovu konštantu ktorá nadobúda hodnotu  $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ . Malé kvantá energie, ktoré som už vyššie spomínal, sa nazývajú fotóny. Tieto fotóny sa cho-

vajú ako častice, to znamená, že majú svoju hmotnosť aj hybnosť, pričom ich kludová hmotnosť je nulová.

Tento fotón sa vyžaruje pri prechode elektrónu na inú kvantovú dráhu a to pri prechode na kvantovú dráhu pri ktorej má menšiu energiu. Táto energia je rovná úbytku energie elektrónu. Pri zohriatom telese preskakujú elektróny vo veľkých množstvách na rôzne energetické hladiny. Energia fotónov je rozdelená do širšieho spektra frekvencií. Spektrum elektromagnetického žiarenia popisuje obr. 3.



Obr. 3 Spektrum elektromagnetického žiarenia. [4]

Pri zdieľaní tepla žiarením je podstatné žiarenie v rozsahu vlnových dĺžok od 10<sup>-4</sup>m po 10<sup>-7</sup>m.

Teleso ktoré vyžaruje, pohlcuje na každej vlnovej dĺžke maximálne možné množstvo energie nazývame dokonalo (absolútne) čierne teleso. Dokonalo čierne teleso neexistuje. V praxi sa nahrádza toto čierne teleso napríklad dutou guľou s malým otvorom. Vnútoraná plocha tohto telesa je pritom omnoho menšia ako vonkajšia. Za model čierneho telesa je možné považovať aj pracovný priestor pecí alebo kotlov.

### 1.3.2 Základne pojmy

Energia, ktorá sa vyžiari do priestoru za určitý čas sa nazýva žiarivý tok (P). Žiarivý tok, ktorý sa vysiela povrchom telesa sa nazýva intenzita vyžarovania (E). Je daná [2] :

$$E = \frac{dP}{dS_1} \quad (Wm^{-2}) \quad (35)$$

Po úprave vzťahu (29) dostaneme [2] :

$$P = \int_{S_1} E dS_1 \quad (36)$$

Telesa môžu žiariť rovnomerne a nerovnomerne. Pre nerovnomerné žiarenie sa k určení žiarivého toku najskôr musí nájsť funkčná hodnota  $E = f(S_1)$ . Avšak pri rovnomernom žiarení, kedy je intenzita vyžarovania konštantná, možno použiť jednoduchý vzťah [2] :

$$P = E * S_1 \quad (37)$$

Ďalším významným pojmom je smerová intenzita vyžarovania,  $I$ . Predstavuje množstvo energie, ktorá je vyžiarená v určitom smere z elementárnej plochy  $dS$  v určitom elementárnom uhle  $d\omega$  za jednotku času. Smerová intenzita vyžarovania je daná vzťahom [2] :

$$I_\varphi = \frac{dE_\varphi}{d\omega} \quad (38)$$

Pričom  $E_\varphi$  je intenzita vyžarovania v smere  $dS$ .

Smerová intenzita vyžarovania  $I$  sa vyjadruje ako plošná žiarivosť  $L$ , avšak vzťahuje sa k elementárnej ploche  $dS_s$ , ktorá je priemetom  $dS$  na kolmú rovinu k smeru  $s$  a teda [2] :

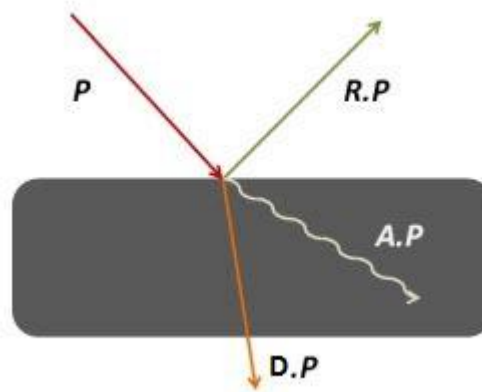
$$L_\varphi = \frac{I_\varphi}{\cos \varphi} \quad (39)$$

### 1.3.3 Radičné vlastnosti

Radiačné vlastnosti určujú ako sa telesá vyžarujú, odrážajú, pohlcujú či prepúšťajú vyžarovaciu energiu. Žiarenie dopadajúce na povrch telesa sa z časti pohlcuje, odráža a prepúšťa. Celková suma dopadajúceho žiarivého toku  $P$  je potom rozdelená do týchto troch zložiek ktoré dohromady musia tvoriť 100%.

$$A + R + D = 1 \quad , \quad P = A \cdot P + R \cdot P + D \cdot P \quad (40)$$

Pričom  $A$  označuje pohltivosť,  $R$  odrazivosť a  $D$  je priepustnosť. Znázornenie týchto zložiek môžeme vidieť na obr. 4.



Obr. 4 Radiačné vlastnosti. [3].

Pri tuhých látkach platí, že tepelné žiarenie neprepúšťajú a teda :  $D = 0 \dots A+R = 1$ . Pri čiernych telesách zasa platí, že všetko dopadajúce žiarenie je pohltené a teda :  $D+R = 0 \dots A = 1$ . A pri ostatných látkach platí, že sú kombináciou jednotlivých radiačných vlastností.

Dôležitá radiačná vlastnosť je emisivita. Označuje sa symbolom  $\varepsilon$ . Je to vlastnosť, ktorá určuje pomer intenzity vyžarovania telesa  $E$  k intenzite vyžarovania čierneho telesa  $E_0$  pri rovnakých teplotách [2].

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{E}{\sigma * T^4} \quad (41)$$

Ako už bolo spomínané, čierne teleso vyžaruje maximálne množstvo energie. Emisivita takéhoto telesa bude rovná jednej. Avšak čierne teleso neexistuje, existujú však šedé telesá ktorých emisivita sa blíži k hodnote jedna. Šedí povrch teda z časti žiarenie pohltí a z časti odrazí. Presná hodnota emisivity takéhoto telesa závisí na typu povrchu telesa. Príkladom takýchto šedých telies môže byť napríklad uhlíkové vlákno s emisivitou 0.95 alebo tiež tehla pálená, červená, šamotová s emisivitami 0.90 , 0.93 , 0.75 a tak ďalej.

Veličiny  $A$ ,  $R$ ,  $D$  sú integrálne veličiny, čo znamená že sa vzťahujú na celú oblasť spektra. Avšak spektrálne veličiny sú také, ktoré sa vzťahujú len na určitú časť spektra čo znamená, že sa týkajú iba určitej vlnovej dĺžky. Sú teda deriváciami integrálnych veličín, a preto majú aj iný fyzikálny rozmer, označujú sa dolným indexom  $\lambda$ . Pre spektrálne veličiny budú platiť obdobné vzťahy ako aj pre integračne a teda [2] :

$$A_\lambda + R_\lambda + D_\lambda = 1 \quad (42)$$

$$\varepsilon = \frac{E_\lambda}{E_{0\lambda}} \quad (43)$$

Vzájomná súvislosť medzi spektrálnou a integrálnou pohltivosťou je daná [2] :

$$A = \frac{\int_0^{\infty} A_{\lambda} * q_{\lambda} * d\lambda}{\int_0^{\infty} q_{\lambda} * d\lambda} \quad (44)$$

kde  $q_{\lambda}$  je hustota spektrálneho žiarivého toku pre určitú vlnovú dĺžku  $\lambda$ . Vzájomná súvislosť medzi integrálnou a spektrálnou emisivitou je [2] :

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} * E_{0\lambda} * d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{0\lambda} * d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} * E_{0\lambda} * d\lambda \quad (45)$$

Posledné dve rovnice naznačujú rozdiel medzi integrálnou emisivitou a pohltivosťou a ten spočíva v tom, že emisivita je závislá na vlastnostiach a teplote daného telesa. Avšak integrálna pohltivosť závisí na vlastnostiach a teplote daného telesa ale tiež aj na teplote okolitých telies, a to preto lebo je funkciou  $q_{\lambda}$ . Pokiaľ by sme porovnávali žiarenie čierneho a šedého telesa na vlnovej dĺžke pri zhodnej teplote oboch telies, zistíme že šedé teleso vyžaruje po celom rozsahu vlnovej dĺžky nižšie žiarenie. Avšak zistili by sme tiež, že pomer spektrálnej intenzity žiarenia šedého telesa  $\varepsilon_{\lambda}$  k spektrálnej intenzity žiarenia čierneho telesa  $\varepsilon_{0\lambda}$  bude na všetkých vlnových dĺžkach zhodný a teda [2]:

$$\frac{E_{\lambda 1}}{E_{0\lambda 1}} = \frac{E_{\lambda 2}}{E_{0\lambda 2}} = \frac{E_{\lambda}}{E_{0\lambda}} = \varepsilon_{\lambda,1} = \varepsilon_{\lambda,2} = \varepsilon_{\lambda} \quad (46)$$

Z čoho vyplýva, že spektrálna emisivita šedého telesa nezávisí na vlnovej dĺžke a je v celom rozsahu vlnových dĺžok konštantná. Znamená to, že u šedého telesa je spektrálna emisivita rovná emisivite integrálnej. A tak isto aj ostatné spektrálne veličiny. Môžeme teda ďalej napísať [2] :

$$\varepsilon = \varepsilon_{\lambda}, A = A_{\lambda}, R = R_{\lambda}, D = D_{\lambda} \quad (47)$$

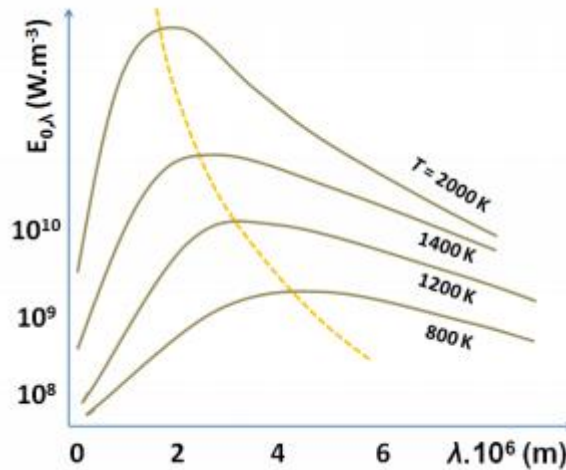
### 1.3.4 Základné zákony

#### 1.3.4.1 Planckov vyžarovací zákon

Planckov vyžarovací zákon hovorí o tom, že intenzita vyžarovania (spektrálneho) čierneho telesa je závislá na vlnovej dĺžke a teplote. Vzťah, ktorý popisuje tento zákon vyzerá nasledovne [3]:

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 * (e^{\frac{c_2}{\lambda * T}} - 1)} ; c_1 = 3.741 * 10^{-16} W m^{-2}, c_2 = 1.438 * 10^{-16} m * K \quad (48)$$

Pričom  $c_1$  a  $c_2$  sú konštanty, ktoré sú funkciami rýchlosti svetla vo vákuu. Z Planckovho zákona tiež plynie, že s rastúcou teplotou hodnota intenzity vyžarovania sa zvyšuje, viac obr. 5.



Obr. 5 Planckov a Wienov zákon. [3]

#### 1.3.4.2 Wienov posunovací zákon

Wienov zákon vychádza z poznatkov Planckova zákona. Hovorí o tom, že pre teplotu  $T$  má funkcia  $E_{0\lambda} = f(\lambda)$  svoje maximum. Ako môžeme vidieť na obr. 5, s rastúcou teplotou sa toto maximum posúva ku kratším vlnovým dĺžkam (žltá čiarkovaná krivka). Matematické vyjadrenie Wienovú zákona znie [3]:

$$\lambda_{max} * T = 2.898 * 10^{-3} (mK) \quad (49)$$

Pričom  $\lambda_{max}$  predstavuje vlnovú dĺžku, pri ktorej má vyžarovanie maximálnu hodnotu. Veľkosť intenzity vyžarovania určíme pomocou nasledujúceho vzťahu [3]:

$$E_{0\lambda} = 1.286 * 10^{-5} * T (Wm^{-3}) \quad (50)$$

#### 1.3.4.3 Stefanov- Boltzmannov zákon

Hovorí o tom, že pokiaľ poznáme emisivitu predmetu, ktorý je zdrojom žiarenia a tiež poznáme jeho teplotu a veľkosť povrchu, môžeme spočítať vyžarovaný výkon vo wattoch. Výpočet sa odvíja od výpočtu vyžarovaného výkonu pre čierne teleso. Integrálna intenzita vyžarovania čierneho telesa je úmerná štvrtéj mocnine termodynamickkej teploty. Matematický výraz je nasledovný [3]:

$$E_0 = \sigma * T^4 \quad (51)$$

pričom  $\sigma$  je Stefanova - Boltzmannova konštanta, ktorú môžeme vypočítať pomocou vzťahu (52) [3].

$$\sigma = \frac{c_1 * \pi^4}{c_2^4 * 15} = \frac{3.7415 * 10^{-16} * \pi^4}{(1.4388 * 10^{-2})^4 * 15} = 5.67 * 10^{-8} (Wm^{-2}K^{-4}) \quad (52)$$

V praxi sa avšak používa upravený vzťah [3]:

$$E_0 = C_0 * \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (53)$$

Pričom  $C_0$  vyjadruje súčiniteľ vyžarovanie dokonalo čierneho telesa a nadobúda hodnotu  $C_0 = 5.67 Wm^{-2}K^{-4}$ . Stefanov - Boltzmannov zákon vyjadruje intenzitu aj pre ostatné telesá (šedé telesá). Pre žiarenie šedých telies platí nasledujúci vzťah [3] :

$$E = \varepsilon * E_0 = \varepsilon * C_0 * \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (54)$$

#### 1.3.4.4 Lambertov zákon

Z Stefanova - Boltzmannova zákonu sa určuje celkové žiarenie povrchu telesa do všetkých smerov polo priestoru. Avšak Lambertov zákon popisuje vyžarovanie energie telesom do jednotlivých smerov, preto sa tento zákon tiež nazýva aj kosínusový zákon. Smerová intenzita vyžarovania čierneho telesa  $I_{0,\varphi}$  je daná súčiniteľom smerovej intenzity v smere normály k povrchu  $I_{0,n}$  a kosínusom uhla  $\varphi$  medzi príslušným smerom a normálou a teda [3] :

$$I_{0,\varphi} = I_{0,n} * \cos \varphi \quad (55)$$

Ak dosadíme smerovú intenzitu  $I_{0,\varphi}$  do vzťahu pre výpočet plošnej žiarivosti pre čierne teleso dostaneme nasledujúci výraz [3] :

$$I_{0,\varphi} = \frac{I_{0,n} * \cos \varphi}{\cos \varphi} = I_{0,n} = L_{0,n} = konst = L_0 \quad (56)$$

Z tohto vzťahu vyplýva, že plošná závislosť v ľubovoľnom smere  $L_\varphi$  je rovná plošnej závislosti v smere normály  $L_n$ .

Lambertov zákon môžeme použiť pre difúzne žiariace telesá a tiež ho môžeme uplatniť pri šedých telesách. [3]

$$I_{0,\varphi} = L_0 * \cos \varphi \quad (57)$$

#### 1.3.4.5 Kirchhoffov zákon

Kirchhoffov zákon popisuje vzájomnú závislosť medzi emisivitou a pohltivosťou telies. A teda pri tepelnej rovnováhe je pohltivosť telesa rovná jeho emisivite. A uplatní sa nasledujúci vzťah [3] :

$$A = \varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{E}{\sigma * T^4} \quad (58)$$

Tento výraz môžeme uplatniť tak ako pre čierne tak aj pre šedé telesá (skutočné).  $A = \varepsilon$  platí taktiež, keď šedé teleso nie je v tepelnej rovnováhe s okolím. Integrálna pohltivosť telesa sa vždy rovná integrálnej emisivite. Pri zmene teploty šedého telesa sa emisivita a pohltivosť môže meniť, stále však bude platiť rovnosť  $A = \varepsilon$ .

## 2 PROSTUP TEPLA

Zdieľanie tepla z jedného pohybujúceho sa prostredia k druhému, cez rozdeľujúcu stenu jednoduchou alebo viacvrstvou ľubovoľného tvaru, nazývame prestup tepla. Prestup tepla v sebe zahŕňa prestup tepla z teplejšej tekutiny na stenu, vedenie tepla v stene ale tiež aj prestup tepla zo steny do chladnejšej tekutiny pohybujúceho sa prostredia.

### 2.1 Prostup tepla rovinnou stenou

Pri prestupe tepla rovinnou stenou budeme predpokladať, že všetky fyzikálne veličiny ako: súčiniteľ tepelnej vodivosti ( $\lambda$ ), súčiniteľ prestupu tepla ( $\alpha$ ) a tiež teploty obklopujúce prostredie ( $t_1, t_2$ ) sú stále. K správne sledovaniu zmeny teplôt tekutín je potrebné zanedbať tiež zdieľanie tepla žiarením. Takto môžeme sledovať zmeny teploty tekutín a steny v smere kolmom na povrch steny.

Hustota tepelného toku z teplejšej tekutiny na stenu je určená vzťahom (59).

$$q = \alpha_1(t_1 - t_{s1}) \quad (59)$$

Hustota tepelného toku, ktorá prejde stenou je daná :

$$q = \frac{\lambda}{s} (t_{s1} - t_{s2}) \quad (60)$$

Pričom  $s$  predstavuje hrúbku rovinnej steny.

Tento tepelný tok sa prevedie z vnútorného povrchu steny chladnejšej tekutiny prestupom tepla a teda platí :

$$q = \alpha_2(t_{s2} - t_2) \quad (61)$$

Po sčítaní a upravený rovníc (59, 60, 61) dostaneme výraz pre výpočet hustoty tepelného toku rovinnou stenou, ktorý je daný vzťahom (62):

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (62)$$

Ak si označíme menovateľa zo vzťahu (62) písmenom  $k$  dostaneme sa ku nasledujúcemu vzťahu :

$$q = k(t_1 - t_2) \quad (63)$$

Veličina  $k$  sa nazýva súčiniteľ prostupu tepla. Charakterizuje intenzitu prostupu tepla z jednej tekutiny do druhej cez stenu, ktorá ich rozdeľuje. Číselne je táto veličina rovná množstvu tepla, ktorá prestúpi jednotkou povrchu steny za jednotku času pri teplotnom spáde  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Prevrátená hodnota súčiniteľa prostupu tepla sa nazýva celkový tepelný odpor prostupu tepla ( $R$ ).

V dôsledku toho, že tepelný odpor sa obecnne skladá z jednotlivých tepelných odporov, je zrejmé že, v prípade viacvrstvovej steny je potrebné uvažovať o tepelnom odpore každej jednotlivkej vrstvy. Celkový tepelný odpor prostupu tepla cez viacvrstvovú stenu je potom daný :

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (63)$$

Odtiaľ potom :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (64)$$

Hustota tepelného toku pri prostupu tepla cez rovinnú stenu skladajúcu sa z  $n$  vrstiev potom bude daná :

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = k(t_1 - t_2) \quad (65)$$

Z rozboru rovnice (65) vyplýva, že prostup tepla viacvrstvovou stenou pri okrajových podmienkach prvého rádu je len čiastkovým prípadom obecnjšieho prípadu prostupu tepla pri okrajových podmienkach tretieho rádu. Na základe toho bude teplota na hraniciach ľubovoľných dvoch vrstiev pri okrajových podmienkach tretieho rádu určená rovnicou (66).

$$t_{s(i+1)} = t_1 - q \left( \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{s_i}{\lambda_i} \right) \quad (66)$$

### 3 TEPELNÁ STABILITA V MIESTNOSTI V ZIMNOM OBDOBÍ

Pri stavbe nových budov je kladený veľký nárok na ich energetickú náročnosť. Spotreba energie budov závisí na kritériách vnútorného prostredia (teplota, vetranie, osvetlenie) a návrhu prevádzkovania budovy. Vnútorné prostredie tiež ovplyvňuje zdravie, produktivitu a pohodu. Existujú národné i medzinárodné normy a technické správy, ktoré stanovujú kritéria tepelného komfortu a kvality vnútorného vzduchu [13].

Kritérium tepelnej stability v miestnosti v zimnom období sa zaviedlo na základe požiadavky, aby aj v najviac ochladzovanej miestnosti budovy, v takzvanej kritickej miestnosti, bol počas doby kedy sa miestnosť nevyhrieva dodržaný teplotný komfort. Ale tiež hovorí o tom, aby na jednotlivých konštrukciách nedochádzalo ku kondenzácií vodných par a tým teda k vzniku plesní (hygienické kritéria) [5].

Tepelnú stabilitu v zimnou období v kritickej miestnosti určuje ČSN 73 0540. Stabilitu určuje pomocou parametru poklesu výslednej teploty  $\Delta\theta_{r,N}(T)$  [6]. Tento parameter predstavuje pokles výslednej teploty v miestnosti na konci doby chladnutia. Pre hodnotenie sa vyberá miestnosť s najväčšou tepelnou stratou a teda s najväčším celkovým súčiniteľom prestupu tepla - kritická miestnosť. Maximálny pokles výslednej teploty doby chladnutia v kritickej miestnosti  $\Delta\theta_{r,N}(T)$  musí byť menší, ako je požadovaná hodnota  $\Delta\theta_{r,N}(T)$  ktorú určuje už spomínaná ČSN 73 0540 [5]. V kritických miestnostiach s pobytom ľudí, po prerušení vykurovania, za použitia vykurovacích telies ako radiátor, sálavé panely nemá parameter poklesu výslednej teploty  $\Delta\theta_{r,N}(T)$  poklesnúť o viac ako 3 °C a v miestnostiach pri vykurovaní kachľami alebo pomocou podlahového vykurovania viac ako o 4 °C, viac tabuľka 2 [6].

Tabuľka 2 Požadované hodnoty poklesu výslednej teploty v zimnom období. [7]

Druh priestoru	$\Delta\theta(r,N) (T) [^{\circ}C]$
<b>S pobytom ľudí po prerušení vykurovania :</b>	
Vykurovanie radiátormi, vykurovacími panelmi a teplovzdušne	3
Vykurovanie kachľami a podlahovým vykurovaním	4
<b>Bez pobytu ľudí po prerušení vykurovania :</b>	
Veľká (masívna) budova	6
Menšia (ľahká) budova	8
Pri predpísanej najnižšej výslednej teplote $\theta_{(v,min)}$	$\theta_i - \theta_{min}$
Pri skladovaní potravín	$\theta_i - 8$
Pri nebezpeční zamrznutia vody	$\theta_i - 1$
Nádrže s vodou (teplota vody)	$\theta_i - 1$

### 3.1 Vplyv na tepelnú stabilitu miestnosti

Aby bol teplotný stav v danom časovom rozmedzí v súlade s podmienkami tepelnej stability, ktoré už boli spomínané vyššie, je nutné zohľadňovať určité aspekty ktoré majú na tepelnú stabilitu významný dôsledok. Medzi tieto aspekty patrí napríklad lokálna charakteristika územia, geometria budovy, orientácia k svetovým stranám, akumulčná schopnosť konštrukcií teda materiálov, spôsob a intenzita vetrania ale predovšetkým treba zohľadniť veľkosť a vlastnosti transparentných plôch a s tým spojené ich tienenie [8].

#### 3.1.1 Vplyv činiteľa oslnenia na teplotnú stabilitu miestnosti

V dnešnej dobe sa kladie veľký dôraz na energeticky úsporné výstavby. Aby bolo dosiahnuto značnej úspory energie, využívajú sa solárne zisky. To sa prejavuje využitím veľkých sklenených plôch, ktoré pokiaľ je to možné sú orientované čo najviac na juh [8]. Toto so sebou nesie riziko ako prehrievania, tak aj ochladzovania miestnosti a teda ovplyvňuje tepelnú stabilitu miestnosti. Jedným z najefektívnejších spôsobov ako zabrániť takémuto značnému ovplyvňovaniu tepelnej stability miestnosti je zatienenie, prípadne zaclonenie transparentných obvodových konštrukcií. Miera zatienenia týmito stavebnými konštrukciami sa udáva takzvaným súčiniteľom oslnenia  $f_s$ . Súčiniteľ oslnenia predstavuje pomer oslnenej plochy a celkovej plochy transparentnými konštrukciami [8].

#### 3.1.2 Akumulačné schopnosti konštrukcií

Akumulácia tepla je schopnosť materiálu, ktorá spočíva v tom, že materiál si dokáže udržať tepelnú energiu ktorú nadobudne v čase, keď je k dispozícii dostatok tepelnej energie do obdobia relatívneho nedostatku tepelnej energie. Táto schopnosť spočíva predovšetkým na voľbe materiálu miestnosti. V dôsledku toho je v súčasnosti trendom použitie ľahších stavebných materiálov ako pre vnútornú tak aj vonkajšiu konštrukciu. Miestnosti, ktoré sú konštrukčne navrhnuté z ľahších stavebných materiálov nemusia teda ďalej spĺňať tepelnú stabilitu keďže zvýšenie tepelne akumulčných schopností stavebných materiálov má veľký vplyv na tepelnú stabilitu vnútorného prostredia. Poznáme tri druhy ako dosiahnuť

akumuláciu tepla a to : **akumulácia citeľného<sup>3</sup> tepla, akumulácia skupenského tepla, termochemická akumulácia tepla**. Rozdiel v akumulácií tepla spočíva množstve tepla, ktoré je naakumulované na jednotku hmotnosti alebo objemu akumuláčného média [9].

---

<sup>3</sup> Teplo spôsobujúce zmenu teploty objektu

## **II. PRAKTICKÁ ČASŤ**

## 4 ZÁKLADNÝ POPIS PROSTREDIA HEAT TRANSFER MODULE PROGRAMU COMSOL MULTIPHYSICS

Praktická časť bakalárskej práce sa bude odvíjať od programovacieho prostredia ktoré poskytuje program COMSOL MULTIPHYSICS. Pracovať budem s prostredím Heat Transfer Module. Tento modul je určený konkrétne pre prenos tepla. Modul poskytuje veľké množstvo funkcií ktoré sú navrhnuté pre modelovanie stacionárneho a nestacionárneho zdieľania tepla. Tieto funkcie môžeme využiť pre testovanie tepelnej stability miestností ktoré si taktiež môžeme v tomto programe namodelovať. Výpočty v programe sa uskutočňujú numericky, metódou konečných prvkov. Model samozrejme disponuje funkciami pre všetky druhy zdieľaní tepla ktoré boli spomínané v teoretickej časti a teda : zdieľanie tepla vedením, prúdením a radiačne.

Prenos tepla uskutočňujúci sa v pevných látkach je v programe COMSOL MULTIPHYSICS určený nasledujúcou bilančnou rovnicou [10] :

$$\rho * c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} - \nabla(\lambda \nabla T) = Q \quad (67)$$

Pričom :

$\rho$  - hustota, [kg . m<sup>-3</sup>],

$c_p$  - merná tepelná kapacita, [J . kg<sup>-1</sup> . K<sup>-1</sup>],

$T$  - teplota, [K],

$\tau$  - čas, [s],

$\lambda$  - súčiniteľ tepelnej vodivosti, [W . m<sup>-1</sup> . K<sup>-1</sup>],

$Q$  - zdroj (straty) tepla, [W . m<sup>-3</sup>].

Prenos tepla v programe COMSOL MULTIPHYSICS je daný rovnicou (68) [10].

$$\rho * c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho * c_p * \vec{u} \nabla T = \nabla(\lambda \nabla T) + Q \quad (68)$$

Kde  $\vec{u}$  predstavuje rýchlostné pole tekutiny [m . s<sup>-1</sup>].

Prestup tepla medzi povrchom tuhého telesa a okolitej tekutiny je pritom daný [10] :

$$q = \alpha(T - T_o) \quad (69)$$

Pričom :

$q$  - hustota tepelného toku, [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],

$\alpha$  - súčiniteľ prestupu tepla, [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ],

$T$  - teplota povrchu, [K],

$T_o$  - teplota okolia, [K].

Intenzita vyžarovania tepelnej energie z povrchu telesa môžeme vyjadriť [10] :

$$q = \varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (70)$$

Pričom :

$q$  - intenzita vyžarovania tepelnej energie, [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],

$\varepsilon$  - relatívne žiarenie povrchu, [1]

$\sigma$  - Stephan - Boltzmanova konštanta, ( $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ).

Výmena tepla žiarením medzi dvoma šedými povrchmi v dokonalom priepustnom prostredí pod vzájomne zvierajúce určitý uhol [10] :

$$q = \varphi \varepsilon_{1-2}\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (71)$$

Pričom :

$\varphi$  - uhlový súčiniteľ, [1],

$T_1, T_2$  - teploty povrchov, [K],

$\varepsilon_{1-2}$  - súhrnná emisivita ktorú môžeme vyjadriť pomocou vzťahu (72). [10]

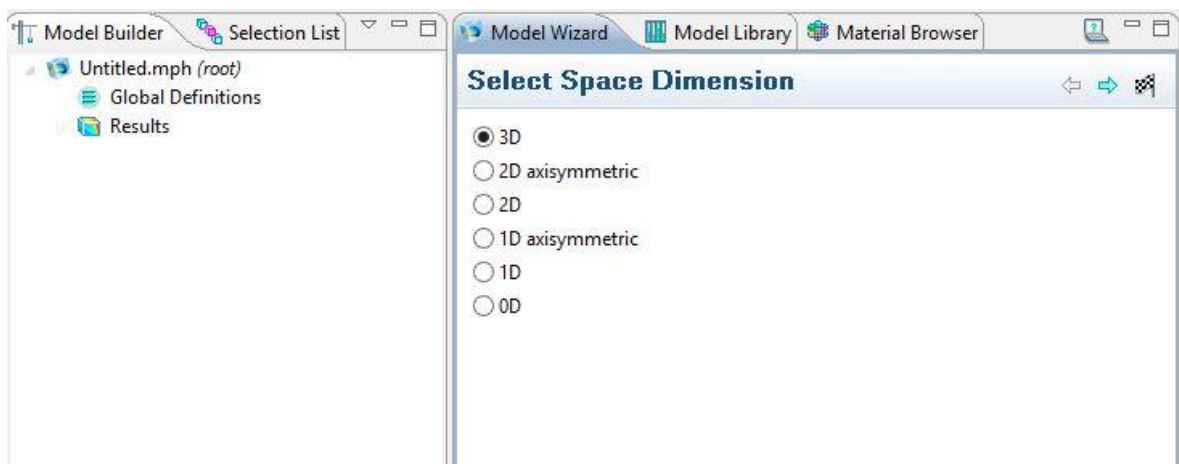
$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (72)$$

Kde  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  predstavujú emisivity povrchov daných telies.

## 5 MODELOVANIE MIESTNOSTI ČÍSLO 1 V PROGRAME COMSOL MULTIPHYSICS

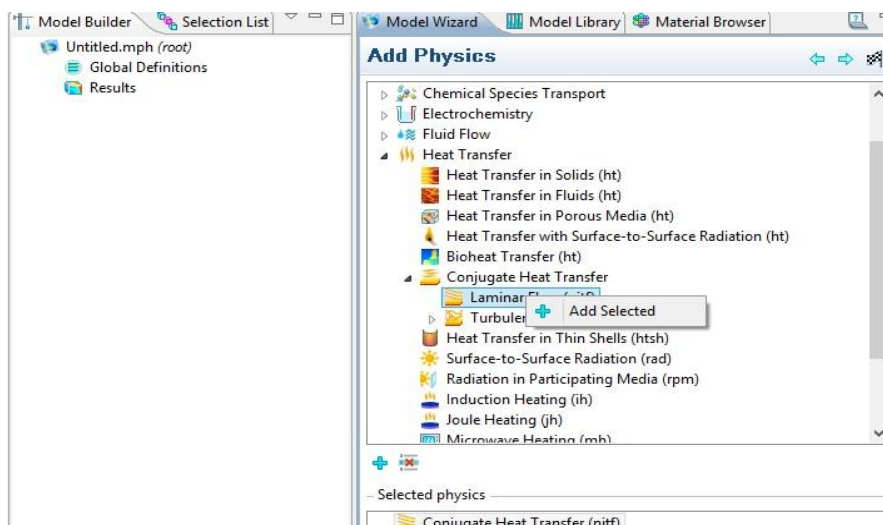
### 5.1 Voľba modulu

Ako prvé som si vytvoril nový projekt. Nasledujúci krok spočíval vo voľbe rozmerového systému. Program COMSOL MULTIPHYSICS nám ponúka širokú škálu rozmerových systémov ako sú 0D, 1D, 2D, 3D. Pri modelovaní reálnej miestnosti som použil 3D rozmerový systém. Voľbu prezentuje obr. 6.



Obr. 6 Voľba rozmerového systému v programe COMSOL MULTIPHYSICS

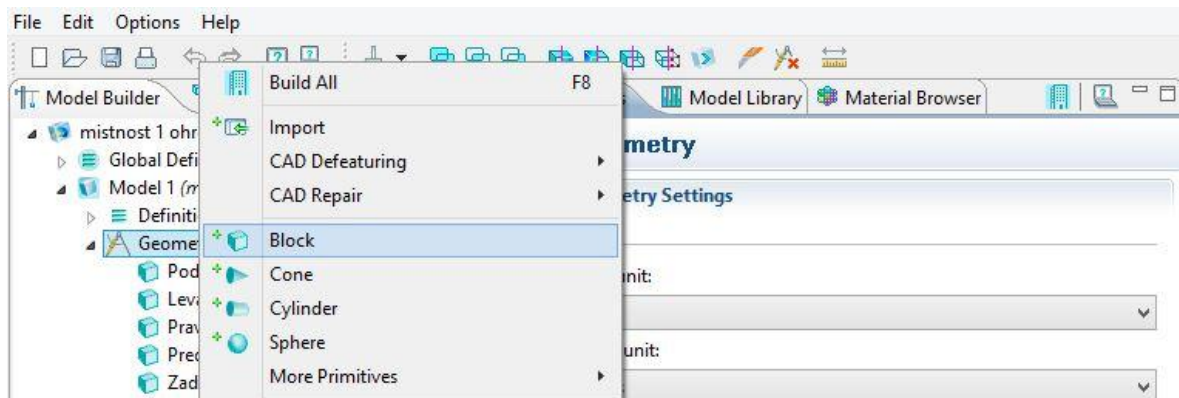
Ďalší krok spočíval vo voľbe konkrétneho modulu a to v mojom prípade bol "Conjugate Heat Transfer" s laminárnym prúdením tepla, teda závislým na čase, viac obr. 7.



Obr. 7 Voľba modulu v programe COMSOL MULTIPHYSICS

## 5.2 Vytvorenie Geometrie

Po vytvorení nového projektu a nakonfigurovaní potrebného modulu je potreba vytvoriť geometriu miestnosti v ktorej budeme sledovať teplotné deje. Geometria sama o sebe sa vytvorí už pri vytvorení nového projektu. Tá sa nachádza v menu pri otvorení nášho projektu. Moja úloha pri tvorbe geometrie spočíva v postupnom pridaní jednotlivých prvkov miestnosti pomocou funkcie programu "Block", viac obr. 8.



Obr. 8 Ukážka vytvárania nových objektov geometrie

### 5.2.1 Vytvorenie geometrie miestnosti č. 1

Po pridaní konkrétnych objektov je potrebné ďalej nadefinovať jednotlivé rozmery objektov tak, aby vytvárali požadovaný tvar, ale tiež je potrebné nadefinovať ich umiestnenie v trojrozmernom priestore. K nadefinovaniu jednotlivých rozmerov slúžia parametre, ktoré majú rovnakú funkciu ako premenné v iných programovacích prostrediach a teda uchovávajú určitú informáciu. Na obr. 9 je vidieť, akým spôsobom som si definoval parametre pre miestnosť č.1. Pričom tabuľka 3 zobrazuje kompletný zoznam parametrov potrebných na vytvorenie geometrie pre miestnosť č.1 .

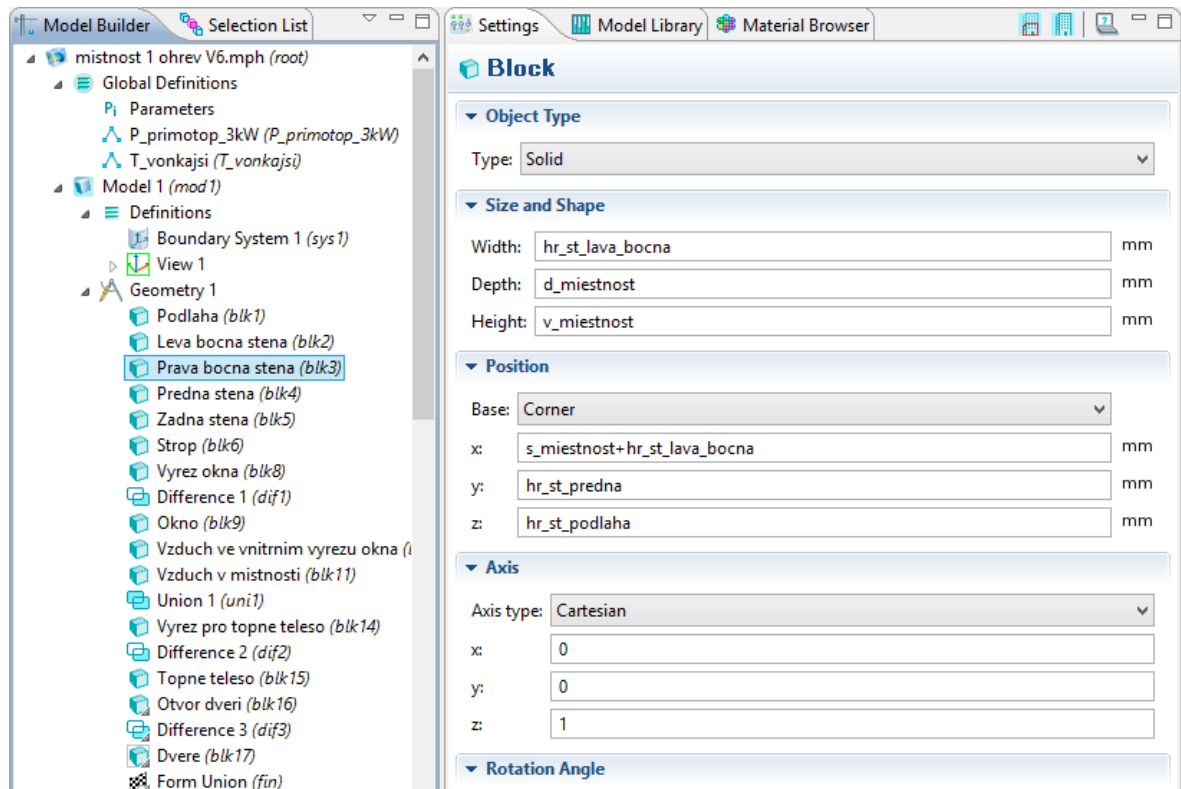


Obr. 9 Ukážka parametrov miestnosť č.1

Tabulka 3 Zoznam parametrov pre tvorbu geometrie miestnosť č.1.

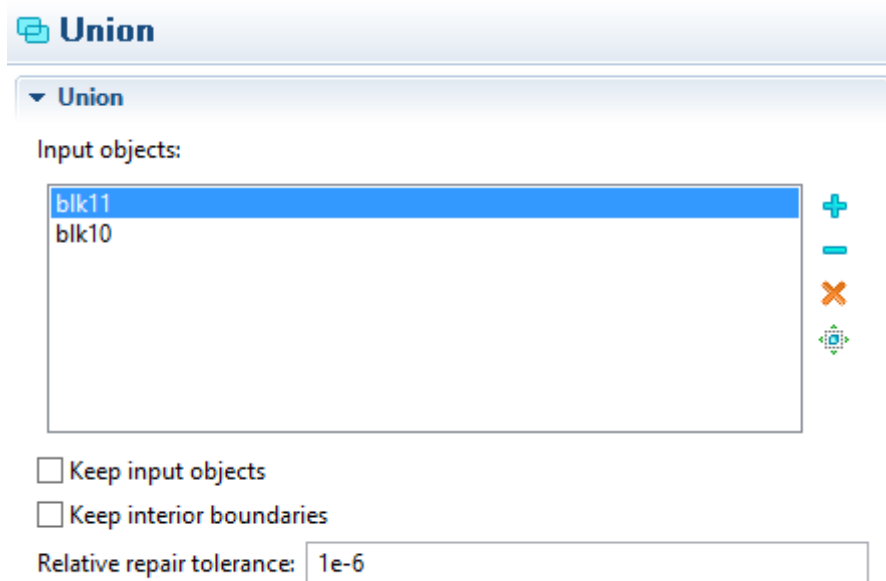
Názov premennej	Hodnota [m]	Popis premennej
s_miestnost	4	šírka miestnosti
d_miestnost	5	dĺžka miestnosti
hr_st_podlaha	0,3	hrúbka steny podlahy
hr_st_lava_bocna	0,3	hrúbka ľavej bočnej steny
hr_st_prava_bocna	0,3	hrúbka pravej bočnej steny
hr_st_predna	0,3	hrúbka prednej steny
hr_st_zadna	0,3	hrúbka zadnej steny
v_miestnost	2,8	výška miestnosti
hr_st_strop	0,3	šírka steny stropu
dol_presah_zad_st	0	dolný presah zadnej steny
hor_presah_zad_st	0	horný presah zadnej steny
s_okno	2	šírka okna
v_okno	1,5	výška okna
hr_okno	0,015	hrúbka okna
v_okno_od_podl	1,2	vzdialenosť okna od podlahy
vzdal_okno_od_leva_st	1,25	vzdialenosť okna od ľavej steny
lavy_presah_zad_st	0	ľavý presah zadnej steny
pravy_presah_zad_st	0	pravý presah zadnej steny
vzdiaľ_okol_vzduch	2	vzdialenosť miesta s defin. Vnútorou teplotou od vnútornej steny
s_vyt_teleso	2	šírka vytápacieho telesa
v_vyt_teleso	0,7	výška vytápacieho telesa
hr_vyt_teleso	0,15	hrúbka vytápacieho telesa
vzdiaľ_vyt_tel_od_leva_st	1	vzdialenosť vytápacieho telesa od ľavej steny
vzdiaľ_vyt_tel_od_zad_st	0,3	vzdialenosť vytápacieho telesa od zadnej steny
vzdiaľ_vyt_tel_od_podl	0,2	vzdialenosť vytápacieho telesa od podlahy
xotvordvere	1	šírka otvoru pre dvere
yotvordvere	0,3	hrúbka otvoru pre dvere od ľavej steny
zotvordvere	2	výška otvoru pre dvere
xdvere	1	šírka dverí
ydvere	0,05	hrúbka dverí
zdvere	2	výška dverí
xvzdaľotvordvere	2	vzdialenosť dverí od ľavej steny

Na obr. 10 je vidieť spôsob priradovania parametrov pre jeden z objektov miestnosti, pričom pri ďalších objektoch, ktoré sú tiež zobrazené na obr. 10 je spôsob priradzovania parametrov rovnaký.

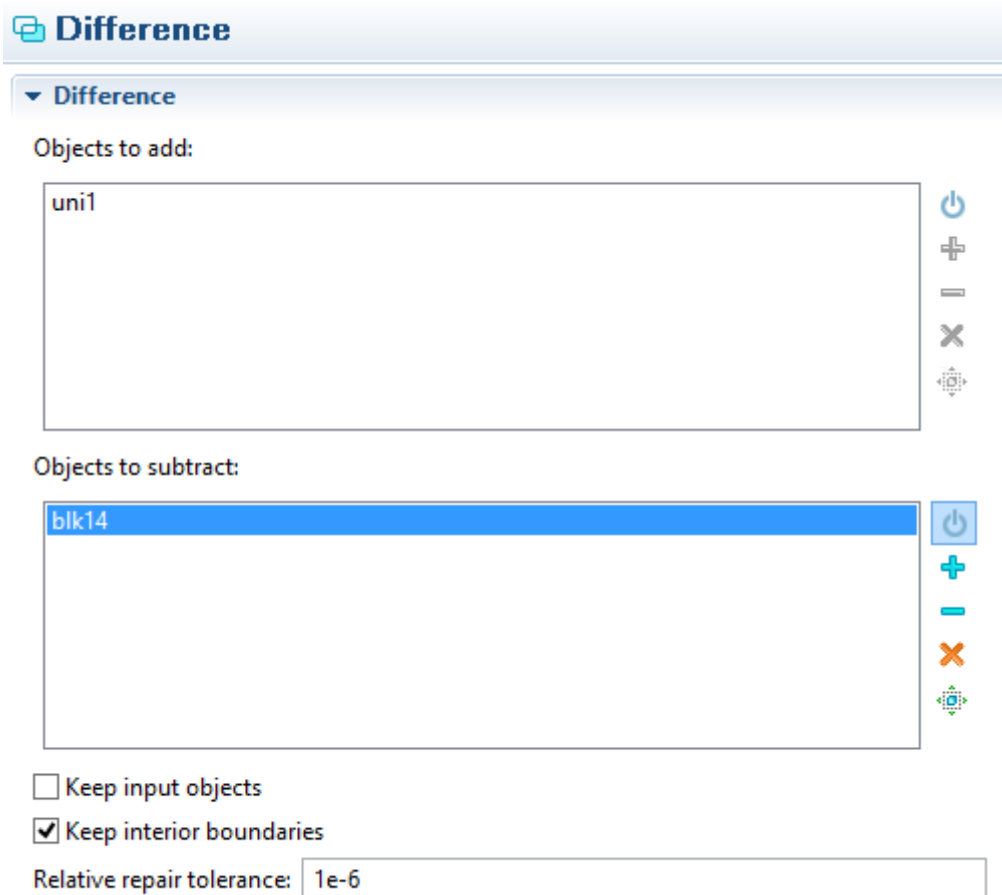


Obr. 10 Priradzovanie parametrov objektom.

Na obr. 10 sú znázornené objekty, ktoré sa líšia od ostatných a sú to objekty "Difference 1", "Union 1", "Diference 2", "Diference 3". Objekty "Difference" predstavujú výsledok logickej operácie rozdiel. Preto aby som mohol do steny umiestniť dvere či okno, bolo najskôr potrebné vytvoriť výrez do steny či v prípade vykurovacieho telesa do vzduchu. A následne tento priestor vyplniť už daným požadovaným objektom. Objekt "Union", predstavuje logickú operáciu zjednotenia. Táto operácia bola potrebná pre zjednotenie vzduchových častí miestnosti. Konkrétne pre vzduch, ktorý naplňa miestnosť teda objem miestnosti, v ktorom sa však nezapočítava už objem ktorý tvorí vykurovacie teleso. Na obr. 11 a 12 sú zobrazené tieto logické operácie.

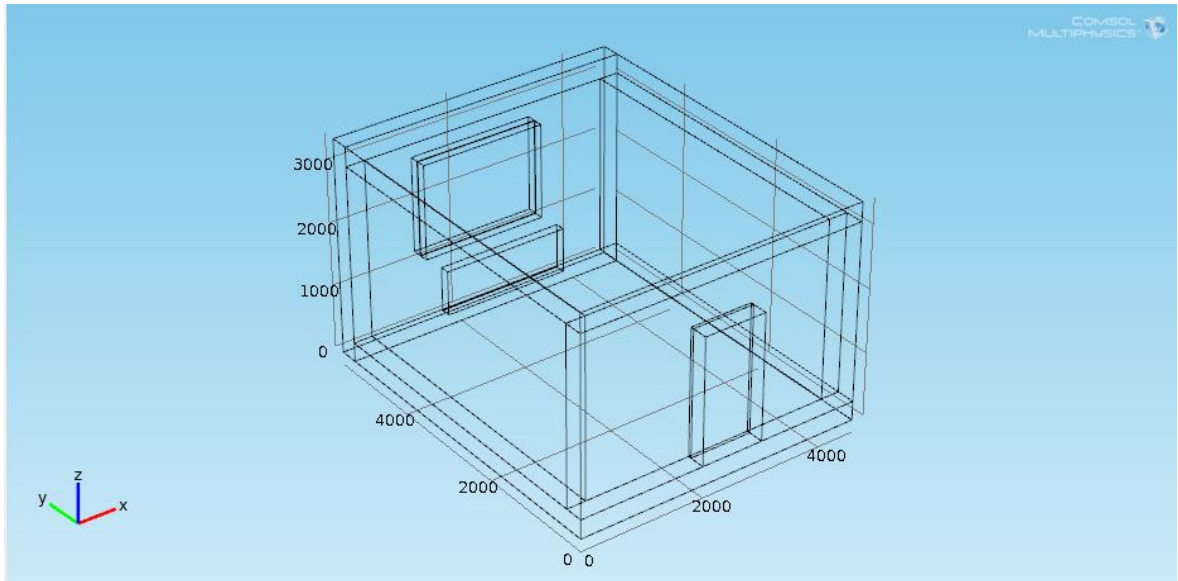


Obr. 11 Ukážka logickej operácie súčtu v programe COMSOL MULTIPHYSICS



Obr. 12 Ukážka logickej operácie rozdielu v programe COMSOL MULTIPHYSICS

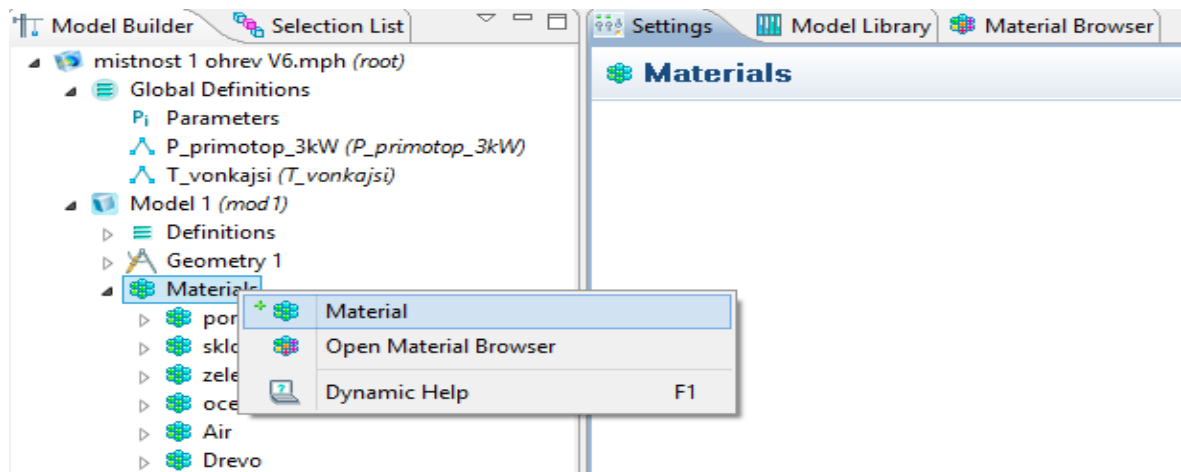
Pomocou vyššie opísaných postupov som teda mohol vytvoriť kompletnú geometriu miestnosti č.1, ktorá je zobrazená na obr. 13.



Obr. 13 Geometrický náčrt miestnosti č.1.

### 5.3 Nadefinovanie materiálov

Nadefinovanie materiálov spočívalo v určení druhu materiálu pre každé geometrické teleso, ktoré som si vytvoril. Rôzne druhy materiálov sa líšia od seba svojimi vlastnosťami ako sú v mojom prípade: súčiniteľ tepelnej vodivosti, merná tepelná kapacita pri konštantnom tlaku a hustota materiálu. Materiály si môžeme pridať priamo z databáze materiálov, ktorú nám ponúka program COMSOL alebo si pomocou nadefinovania vlastností vytvoriť vlastné materiály. Pri tvorbe vlastného materiálu je možný výber z rôznych druhov vlastností materiálov, ktoré nám ponúka program COMSOL a tieto vlastnosti si už sami nastavíme. Na obr. 14 je znázornené, akým spôsobom si môžeme pridať vlastný materiál ("Material") alebo si otvoriť knižnicu predvolených materiálov ("Open Materials Browser").



Obr. 14 Pridávanie materiálu.

### 5.3.1 Nadefinovanie materiálov pre miestnosť číslo 1

Konkrétne pre našu miestnosť som použil šesť druhov materiálov a to:

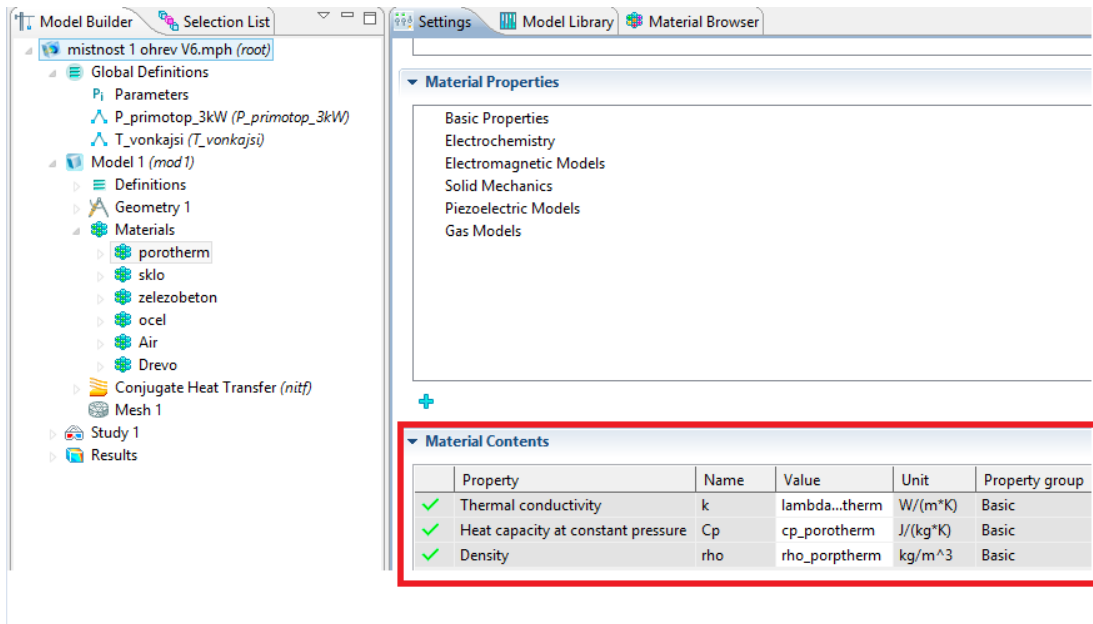
Porotherm – bočné steny, predná a zadná stena, sklo – okno, železobetón – strop a podlaha, oceľ – vykurovacie teleso, vzduch – vnútro miestnosti a drevo – vstupné dvere.

Pričom jedine materiál vzduch bol pridaný s knižnice programu COMSOL a vlastnosti ostatných materiálov som si nadefinoval. Pri každom vytvorenom materiáli boli definované vlastnosti materiálu: súčiniteľ tepelnej vodivosti, merná tepelná kapacita pri konštantnom tlaku a hustota materiálu. Tak ako aj pri tvorbe geometrie boli zadefinované parametre pre tieto vlastnosti. Kompletný zoznam parametrov potrebných pre nadefinovanie materiálov pre miestnosť č.1 zobrazuje tabuľka 4.

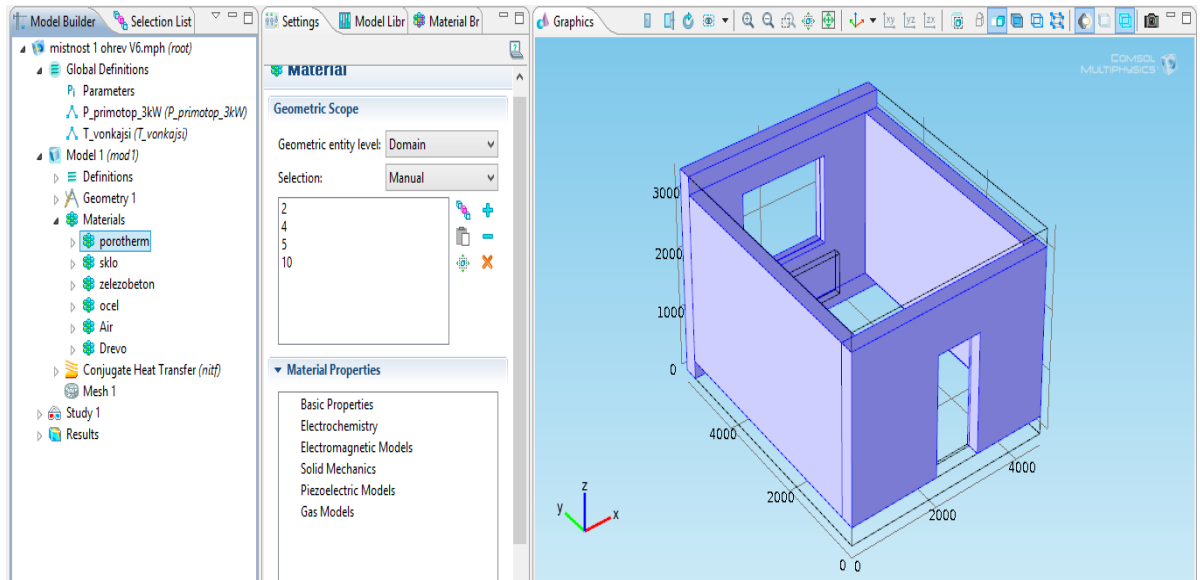
Tabuľka 4 Definovanie vlastností materiálov.

Názov parametra	Hodnota Parametra	Popis parametra
cp_porotherm	960[J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	merná tepelná kapacita porothermu
lambda_porotherm	0,27[W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	tepelná vodivosť porothermu
rho_porotherm	900[kg . m <sup>-3</sup> ]	hustota porothermu
lambda_zelezobeton	1,43[W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	tepelná vodivosť železobetónu
rho_zelezobeton	2300[kg . m <sup>-3</sup> ]	hustota železobetónu
cp_zelezobeton	1020[J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	merná tepelná kapacita železobetónu
cp_sklo	840[J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	merná tepelná kapacita skla
lambda_sklo	0,76[W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	tepelná vodivosť skla
rho_sklo	2600[kg . m <sup>-3</sup> ]	hustota skla
rho_ocel	7850[kg . m <sup>-3</sup> ]	hustota oceli
cp_ocel	440[J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	merná tepelná kapacita oceli
lambda_ocel	58[W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	tepelná vodivosť oceli

Tak ako aj pri geometrií miestností, kde som parametre definujúce rozmery objektov prirad'oval k daným objektom, je ešte potrebné nadefinované parametre vlastností materiálov k týmto materiálom priradiť. Príklad priradenia vlastností k jednotlivým materiálom je vyznačený na obr. 15. Následne som priradil jednotlivé materiály k daným objektom, ktoré som si už vytvoril, viac obr. 16.



Obr. 15 Priradenie vlastností materiálu k danému materiálu



Obr. 16 Priradenie materiálov k objektom miestnosti

## 5.4 Nadefinovanie počiatkových a okrajových podmienok

Tieto podmienky sú veľmi podstatné pre fungovanie simulácie keďže tieto podmienky predstavujú vstupné veličiny pre numerické simulácie.

Ako som uviedol v teoretickej časti, počiatkové podmienky charakterizujú rozloženie teploty v telese na počiatku deja v nulovom čase.

Povrchové podmienky sa týkajú toho čo sa deje na povrchu telesa respektíve v jeho okolí [11].

Okrajové podmienky sú dané na v mojom prípade na základe vzťahu (22). Určujú nám teda intenzitu prestupu tepla medzi povrchom telesa a jeho okolím. V programe COMSOL nájdeme počiatkové a okrajové podmienky v sekcii "Conjugate Heat Transfer" .

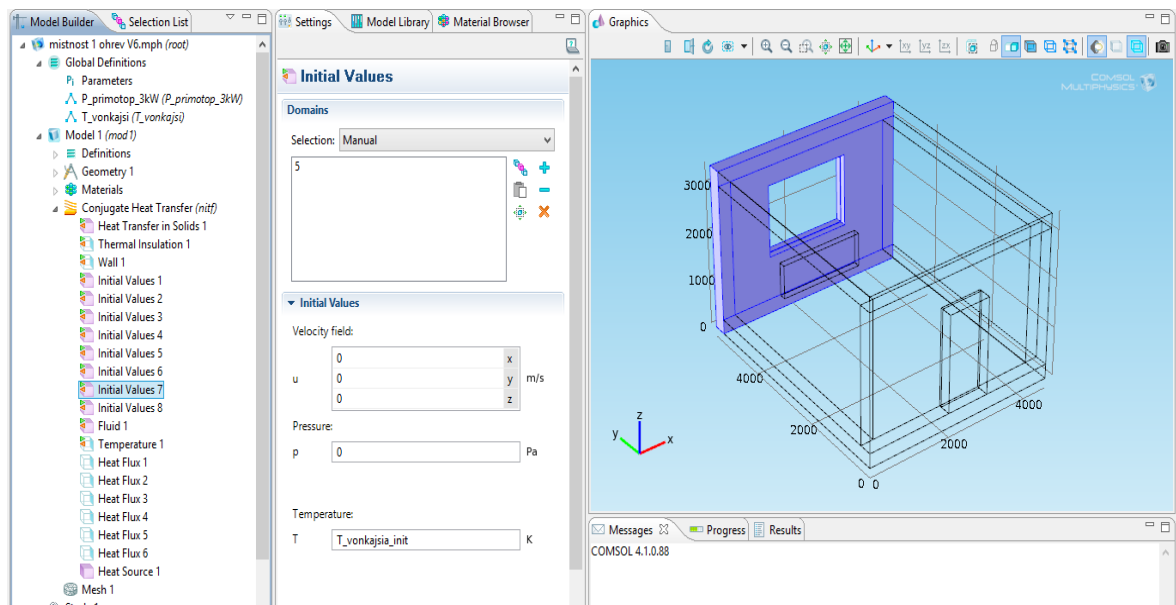
### 5.4.1 Nadefinovanie počiatkových a okrajových podmienok pre miestnosť č.1

Pre nadefinovanie počiatkových podmienok ("Initial Values") som si znova vytvoril ďalšie parametre ktoré nesú hodnotu teploty daného telesa. Zoznam parametrov počiatkových teplôt je uvedený v tabuľke 5.

Tieto parametre sú priradené k jednotlivým objektom miestnosti a tým sú teda definované ich počiatkové podmienky. Ukážka priradenia je zobrazená na obr. 17.

Tabuľka 5 Zoznam parametrov počiatkových podmienok.

Názov parametru	Hodnota parametra[°C]	Popis parametra
Tpodlaha	19	teplota miestnosti pod podlahou
Tvnutorna_init	10	počiatková teplota vzduchu v miestnosti
T_porotherm_init	17	počiatková teplota porothermových stien
T_vonkajsia_init	4	počiatková teplota vonkajšieho vzduchu

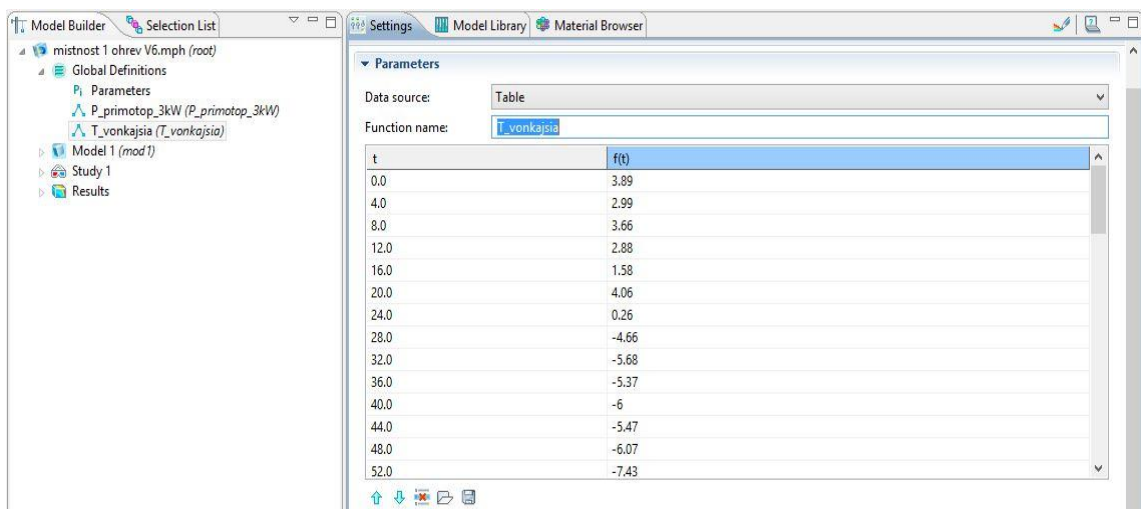


Obr. 17 Ukážka priradenia parametru počiatkovej teploty a priradenia počiatkovej teploty k objektu

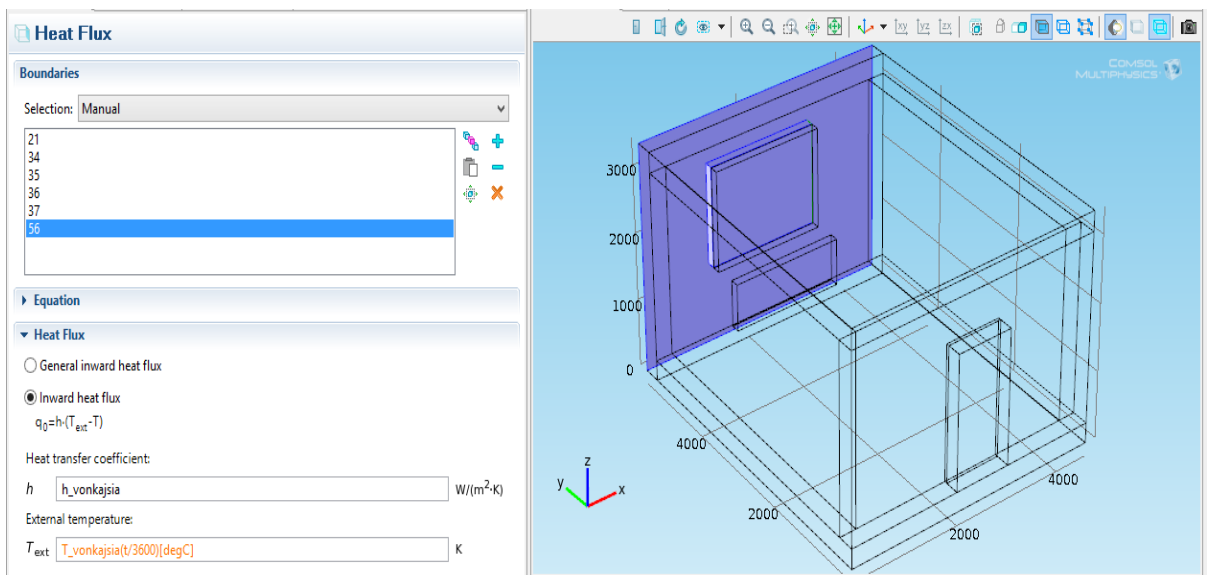
Pri nadeľovaní okrajových podmienok ("Heat Flux") som znova použil tak ako v predchádzajúcich prípadoch mnou nadeľované parametre. Avšak zo vzťahu (55) pre výpočet hustoty tepelného toku ktorý pri okrajových podmienkach využívam, vyplýva, že je potrebných viac parametrov a to  $\alpha$  - súčiniteľ prestupu tepla, ktorý si tiež definujeme v parametroch, viac tabuľka 6. Keďže pri okrajových podmienkach už nepracujem s počiatkovou teplotou ale s teplotou ktorá sa mení v závislosti na čase, je potrebné si tiež definovať funkciu ktorá zadefinuje teplotu, ktorá sa bude meniť v závislosti na čase. Túto funkciu ("T\_vonkajšia") som si definoval v sekcii "Global Definitions" a bude typu "Interpolation". Funkcia je definovaná pre určitý časový priebeh v ktorom má definovanú presnú teplotu, viac obr. 18. Funkcia predstavuje meniacu sa teplotu priestoru mimo miestnosť v otvorenom priestore. Priradenie tejto funkcie ako parametru pre výpočet okrajových podmienok je zobrazený na obr. 19.

Tabulka 6 Zoznam parametrov pre okrajové podmienky miestnosti č.1

Názov parametra	Hodnota parametra	Popis Parametra
h_vonkajsia	23 [W . m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup> ]	súčiniteľ prestupu tepla vonkajšej steny
h_vnutorna	8 [W . m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup> ]	súčiniteľ prestupu tepla vnútornej steny
h_podlaha	8[W . m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup> ]	súčiniteľ prestupu tepla podlahy
Tls	20 [°C]	teplota miestnosti pri ľavej stene
Tps	20 [°C]	teplota miestnosti pri pravej stene
Tds	20 [°C]	teplota miestnosti za stenou s dverami



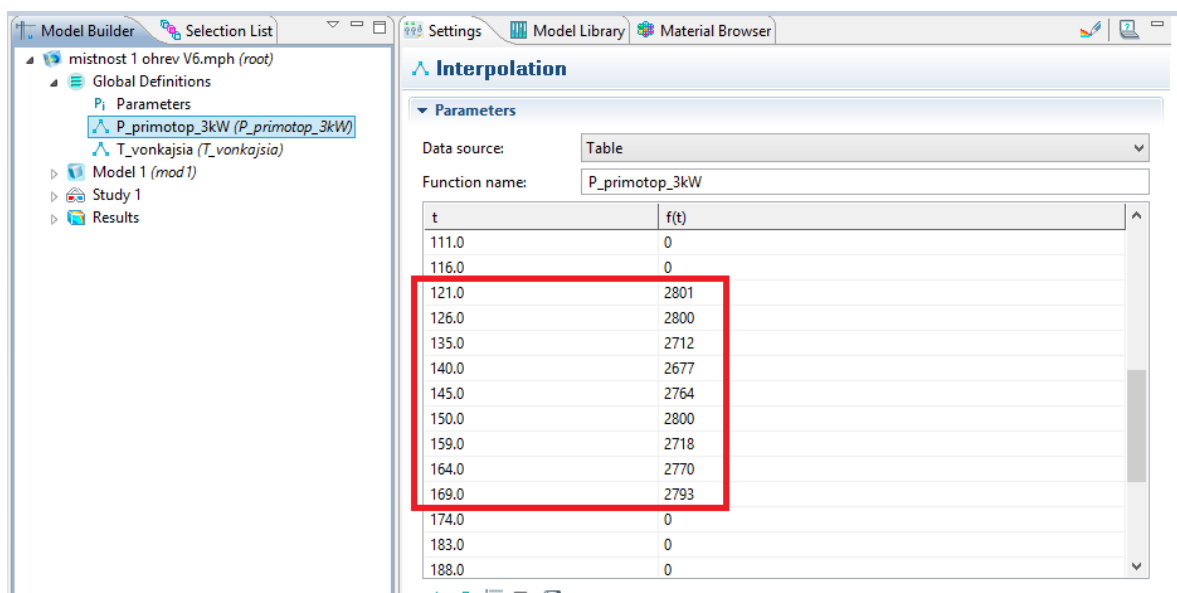
Obr. 18 Ukážka funkcie "T\_vonkajsia".



Obr. 19 Ukážka priradenia funkcie k okrajovej podmienke.

Na obr. 19 je vidieť, že funkcia "T\_vonkajšia" je priradená k okrajovej podmienke, ktorá odpovedá zadnej stene. Táto stena a tiež aj strop sú v kontakte s okolitým prostredím mimo budovy, v ktorom sa prirodzene teplota mení v závislosti na čase. Na rozdiel od ostatných, ktoré sú v kontakte s inými miestnosťami, kde som predpokladal, že je teplota stála, nemenná s časom, takže postačuje statický parameter (nezávislý na čase).

Na obr. 20 je nadefinovaná ešte jedna funkcia. Táto funkcia (P\_primotop\_3kW) je určená pre dej, ktorý sa nazýva "Temperature 1". Jedná sa o dej, ktorý nám dodáva teplo do miestnosti. Z toho vyplýva, že funkcia je priradená na okraje vykurovacieho telesa odkiaľ bude teplo vyžarovať. Topné teleso bude vykurovať iba v určitom časovom intervale a intenzitou približne 3 kW/m<sup>3</sup>. Viac obr. 20.



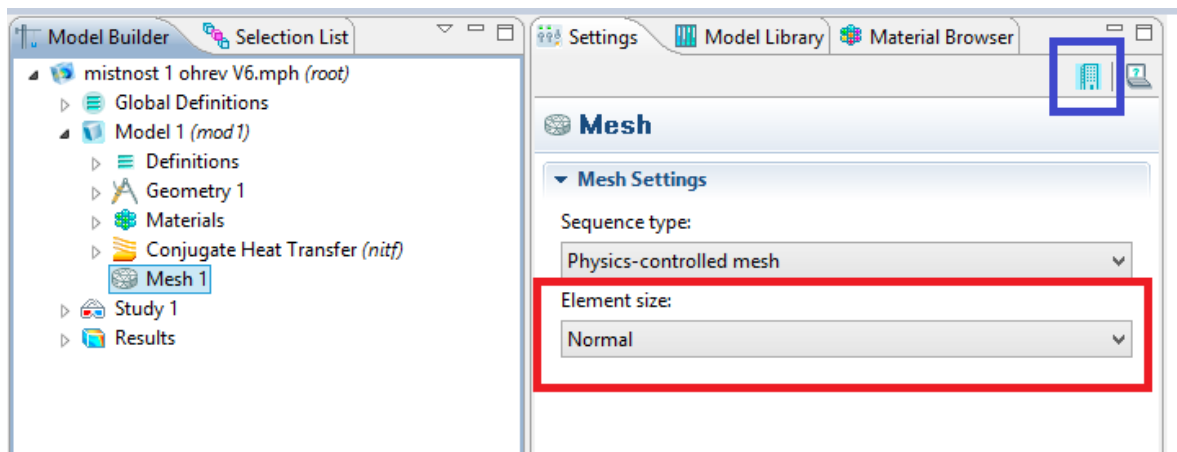
t	f(t)
111.0	0
116.0	0
121.0	2801
126.0	2800
135.0	2712
140.0	2677
145.0	2764
150.0	2800
159.0	2718
164.0	2770
169.0	2793
174.0	0
183.0	0
188.0	0

Obr. 20 Funkcia vykurovania miestnosti.

Na obr. 20 je vidieť časový úsek 121 – 169 hodín, kedy bude vykurovacie teleso dodávať tepelnú energiu pre ohrev miestnosti.

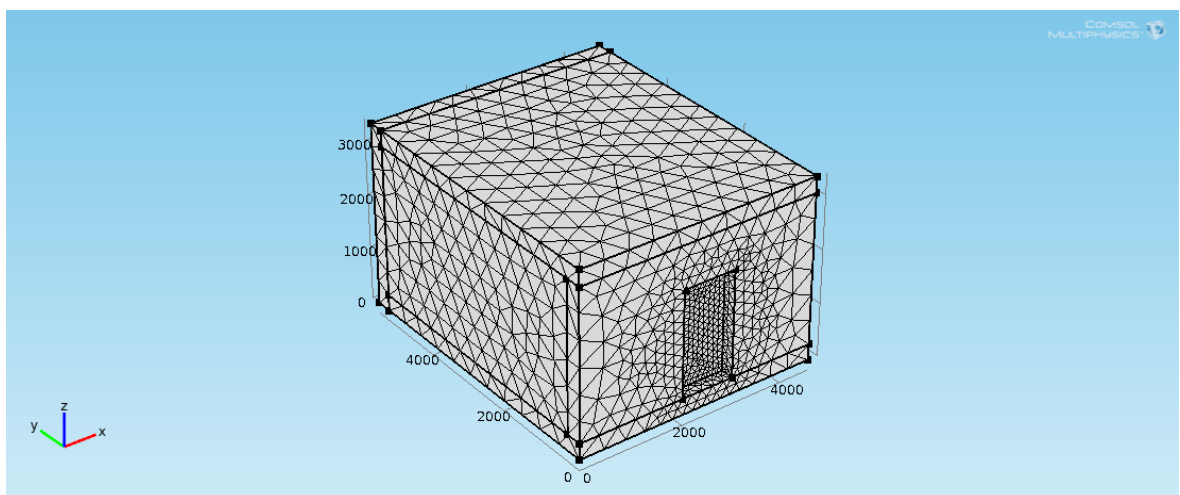
## 5.5 Vytvorenie mriežky

Mriežka ("Mash"), nám slúži pre určenie hustoty uzlových bodov, kde všade sa v module uskutočnia výpočty. Čím teda zvolíme detailnejšiu mriežku tým viac výpočtov a teda aj tým väčšia náročnosť a doba výpočtu. Vytvorenie novej mriežky v programe COMSOL spočíva v nastavení typu mriežky (hustoty). Viac obr. 21.



Obr. 21 Vytvorenie mriežky s uzlovými bodmi, v ktorých bude prebiehať výpočet.

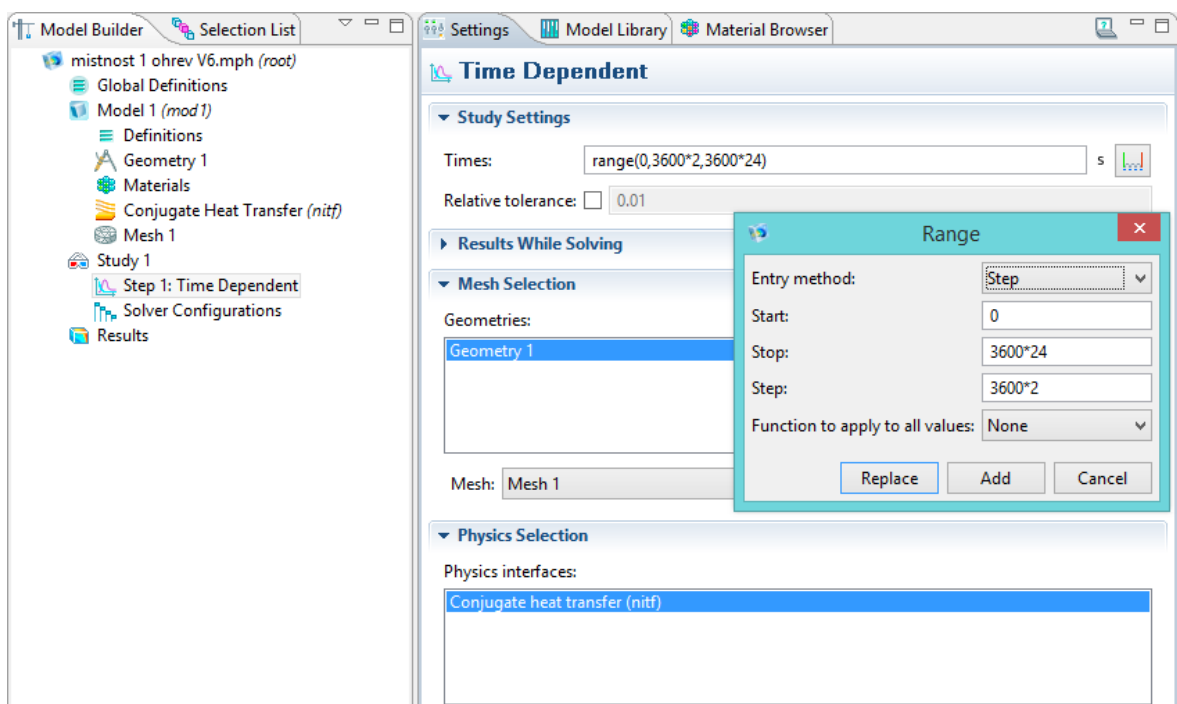
Na obr. 21 v červene vyznačenom úseku je možnosť voľby hustoty mriežky. V mojom prípade som zvolil normálnu hustotu z dôvodu náročnosti výpočtu. V modro vyznačenom úseku je tlačítko s ktorým sa pustia výpočty. Na obr. 22 je znázornené mriežkovanie pre miestnosť č.1 .



Obr. 22 Výsledok mriežkovania pre miestnosť č. 1.

## 5.6 Nastavenie kroku a doby procesu

Nastavenie kroku určuje, pre aký dlhý časový úsek sa simulácia bude vykonávať a tiež v akom časovom kroku sa budú vykonávať dané výpočty a zaznamenávať do výsledných grafov. Nastavenie prebieha v sekcii "Study", "Step 1: Time dependent", kde som si nastavil geometriu (miestnosť), s ktorou budem pracovať a tiež fyzikálne rozhranie s ktorým chcem pracovať v našom prípade "Conjugate heat transfer". A samozrejme, v neposlednom rade, nastavím už spomínaný časový rozsah simulácie a krok, teda ako často sa budú zaznamenávať výsledky. Nastavenie znázorňuje obr. 23.



Obr. 23 Nastavenie kroku a doby procesu.

Z obr. 23 teda vyplýva, že nastavenie doby procesu je 86400 sekúnd, teda 24 hodín. Krok je:  $3600 * 2 = 7200$  sekúnd, čo sú 2 hodiny.

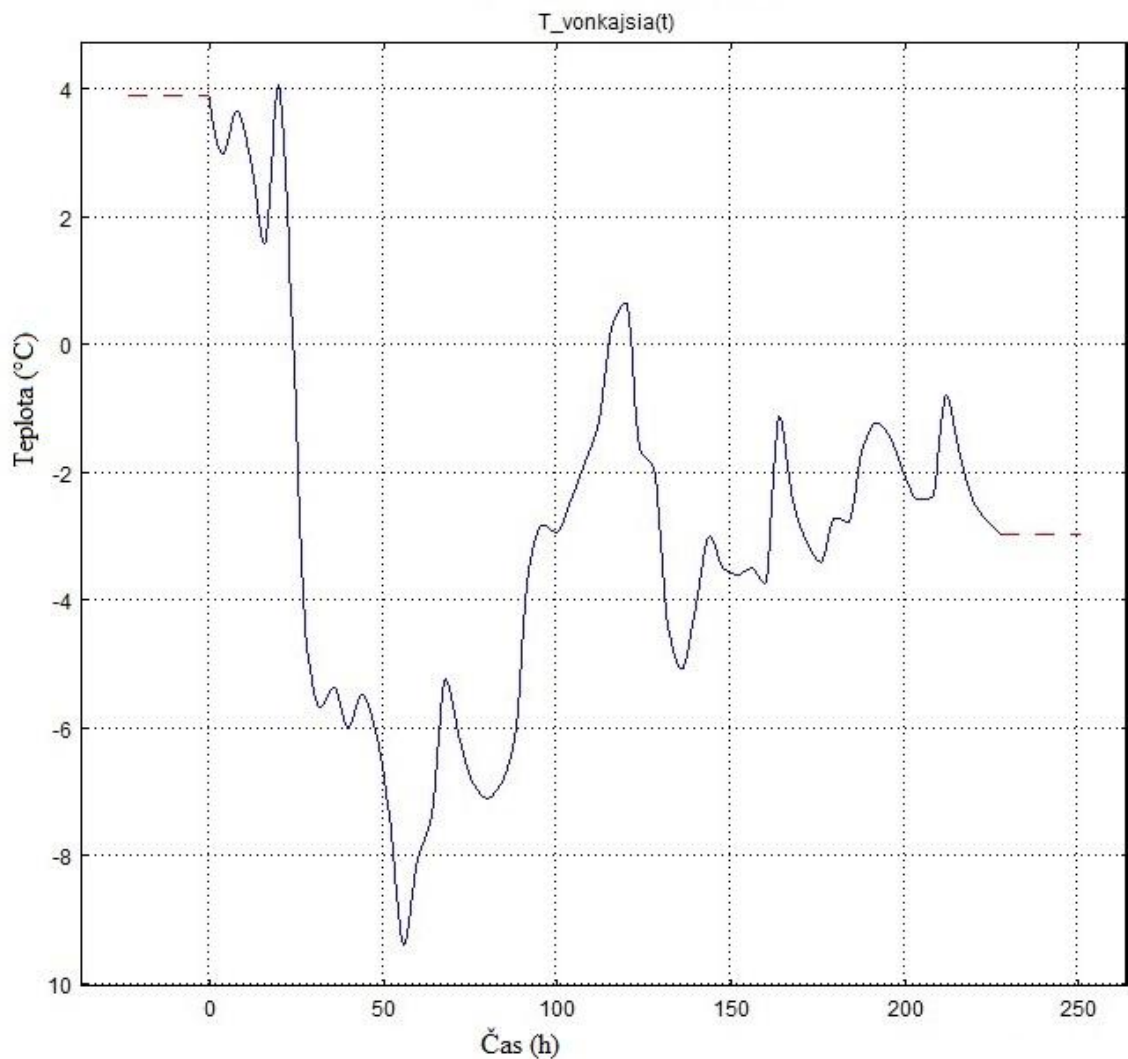
## 5.7 Získanie a spracovanie výsledkov simulácie – ohrev miestnosti

Spustenie simulácie sa vykonáva pomocou tlačítka "Build All" ktoré je znázornené v modrom obdĺžniku na obr. 21.

V naprogramovaných moduloch uskutočňujem simulácie rozloženia teploty pri nestacionárnom zdieľaní tepla a tiež posúdenie ďalších parametrov ako sú napríklad: prúdenie vzduchu a tepelný tok jednotlivých prvkov miestností. Príklad použitia naprogramovaného

modulu sa uskutočňuje pri simulácii priebehu vykurovania a chladnutia miestnosti, ktorej konštrukciu si môžeme pozrieť na obr. 13. Testovanie priebehu vykurovania miestnosti bolo prevedené za týchto podmienok :

Z tabuľky 3 môžeme odvodiť že rozmery miestnosti budú : 4 x 5 x 2,8 m . Pričom hrúbka stien je : 0,3 m . Rozmery okna : 2 x 1,5 m rozmery dverí : 1 x 2 m s hrúbkou : 0,05 m a rozmery vykurovacieho telesa sú : 2 x 0,15 m s hrúbkou : 0,15 m. Príkon vykurovacieho telesa tvorí hodnota približne 3 kW/m<sup>3</sup>. Presný príkon je zobrazený na obr. 20. Strop miestnosti a jedna stena miestnosti je v kontakte s vonkajším prostredím. Pričom teplota vonkajšieho vzduchu sa po dobu vytápanie pohybuje v intervale od : -9,39 ° C až po teplotu : 4,06 ° C. Priebeh vonkajšej teploty je podrobnejšie zobrazený na obr. 24. Súčiniteľ prestupu tepla medzi stenou a vonkajším prostredím nadobúda hodnotu 23 W . m<sup>-2</sup> . K<sup>-1</sup>. Bočné steny a tiež predná stena (stena s dverami) sa stýkajú s miestnosťami ktorých teplota nadobúda hodnotu 20 ° C. Miestnosť ktorá sa nachádza pod podlahou má teplotu 19 ° C. Súčiniteľ prestupu tepla medzi bočnými stenami a miestnosťami za nimi ale aj podlahy je 23 W . m<sup>-2</sup> . K<sup>-1</sup>. Tieto hodnoty aj s názvami a popismi premenných, ktoré k nim patria sú uvedené v tabuľke 6. V tabuľke 7 uvádzam fyzikálne vlastnosti materiálov, ktoré sa v miestnosti vyskytujú ich rozloženie je nasledovné : Strop a podlaha – železobetón, bočné steny, predná a zadná stena – porotherm, vykurovacie teleso – oceľ, vstupné dvere – drevo a okno je vyrobené zo skla.



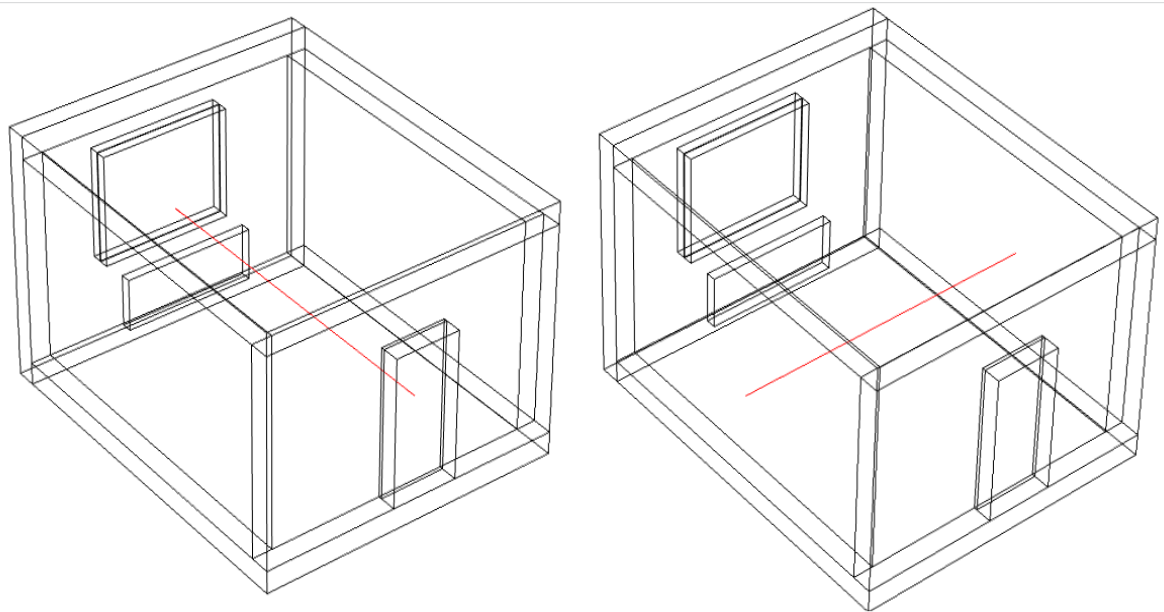
Obr. 24 Priebek teploty vo vonkajšom prostredí.

Tabuľka 7 Vlastností materiálov miestnosť č. 1.

Materiál	Súčiniteľ tepelnej vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Merná tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
Protherm	0,27	900	960
Železobetón	1,43	2300	1020
Oceľ	58	7850	440
Drevo	0,11	800	1500
Sklo	0,76	2600	840

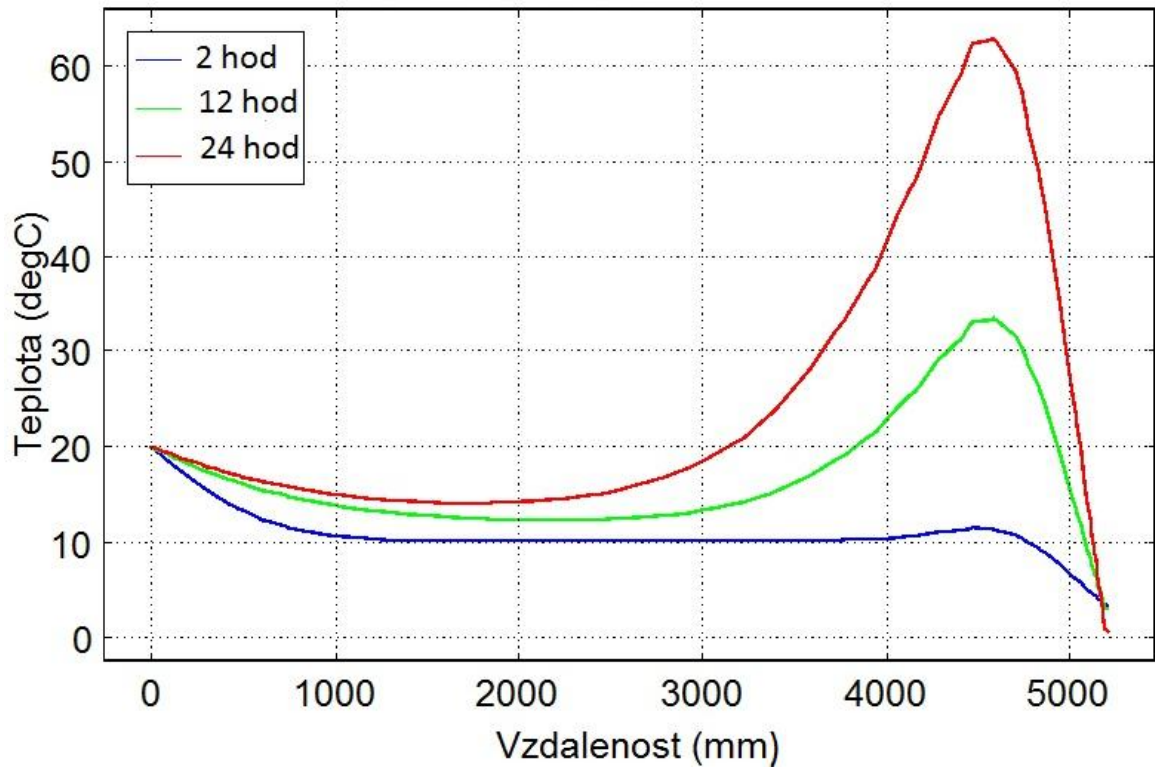
Výsledky simulácie sa spracovávajú v sekcii "results". Pre zobrazenie 2D teplotných polí je najskôr však potrebné definovať miesta v miestnosti v ktorých sa bude ohrev sledovať,

tieto miesta sú vyznačené červenou krivkou na obr. 25. Tieto nastavenia sa uskutočňujú v sekcii "Data sets".

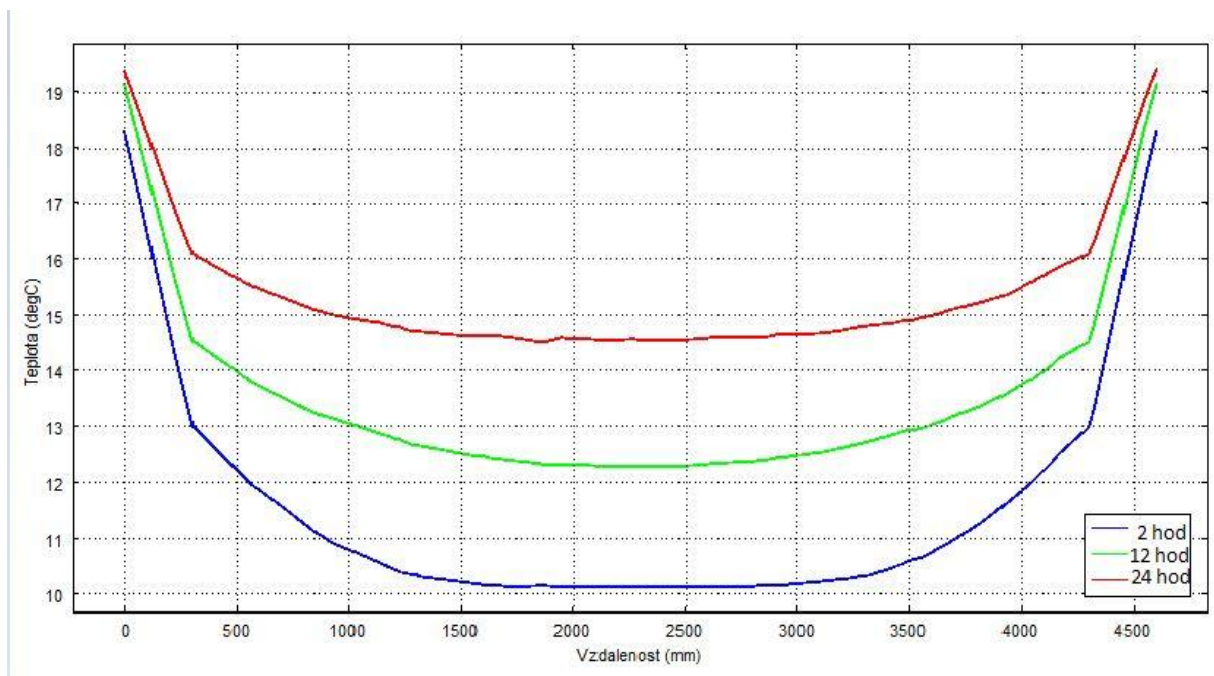


Obr. 25 Nadefinovanie miest pre zobrazenie 2D teplotných polí pri ohreve miestnosti č. 1.

Ako som už uviedol, výsledky simulácie je pre prehľadnosť potrebné uviesť v grafoch. Tie som si vytvoril v sekcii "results" pravým kliknutím a potom vybraním jednotlivého grafu. Pre moje účely som si vytvoril dva 2D grafy (obr. 26, 27), pričom prvý má sledované teplotné pole odpovedajúce vzdialenosti od dverí k oknu miestnosti a druhý odpovedá vzdialenosti od ľavej steny k pravej, viac obr. 25. Ďalej som vytvoril tri 3D grafy (obr. 28, 29, 30), ktoré znázorňujú rôzne prierezy miestností. Na obrázkoch sú znázornené vypočítané priebehy teplôt v dobe 2 hodiny, 12hodín a 24 hodín pri ohreve miestnosti po dobu 24 hod.

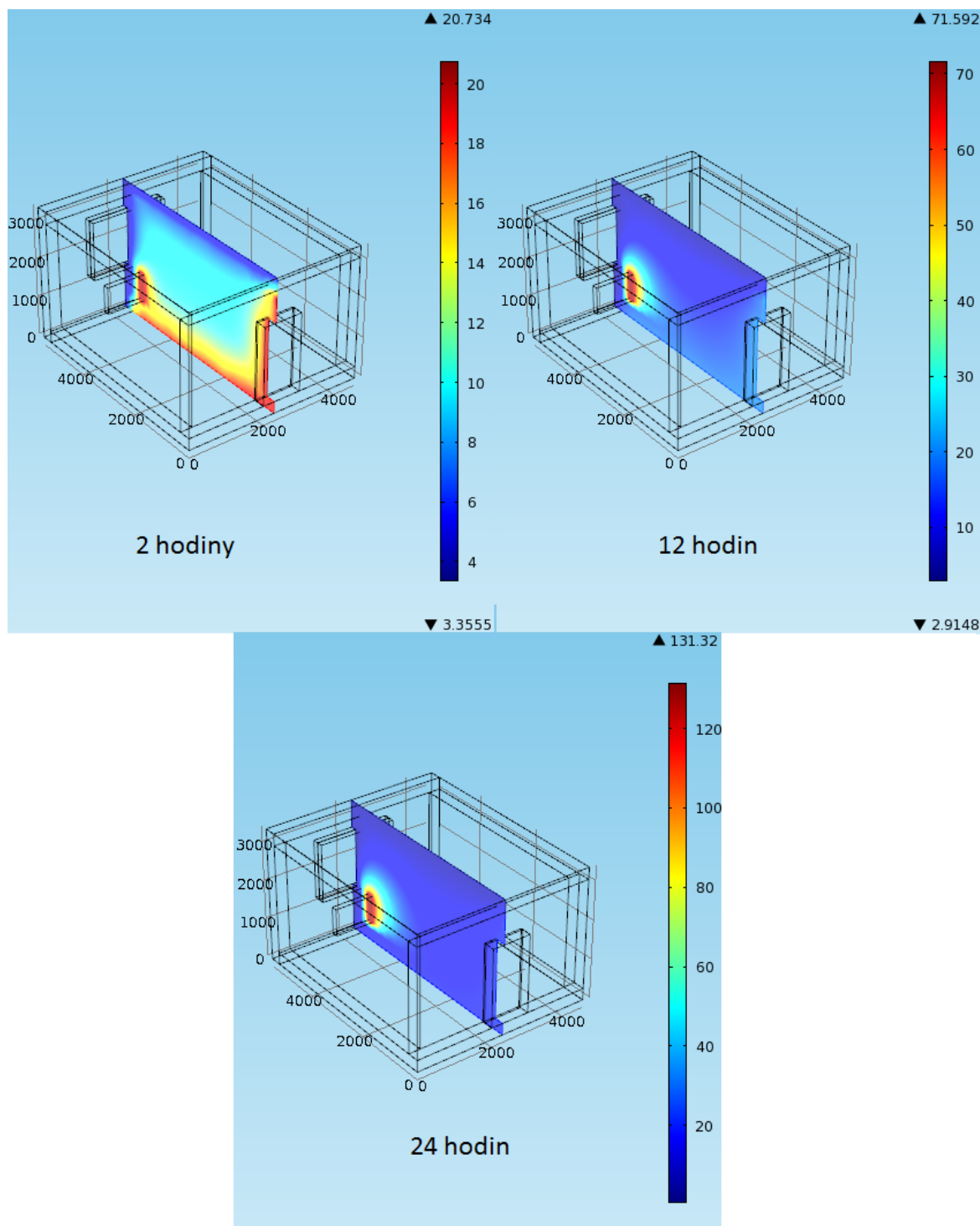


Obr. 26 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 1 od dverí k oknu pri ohreve

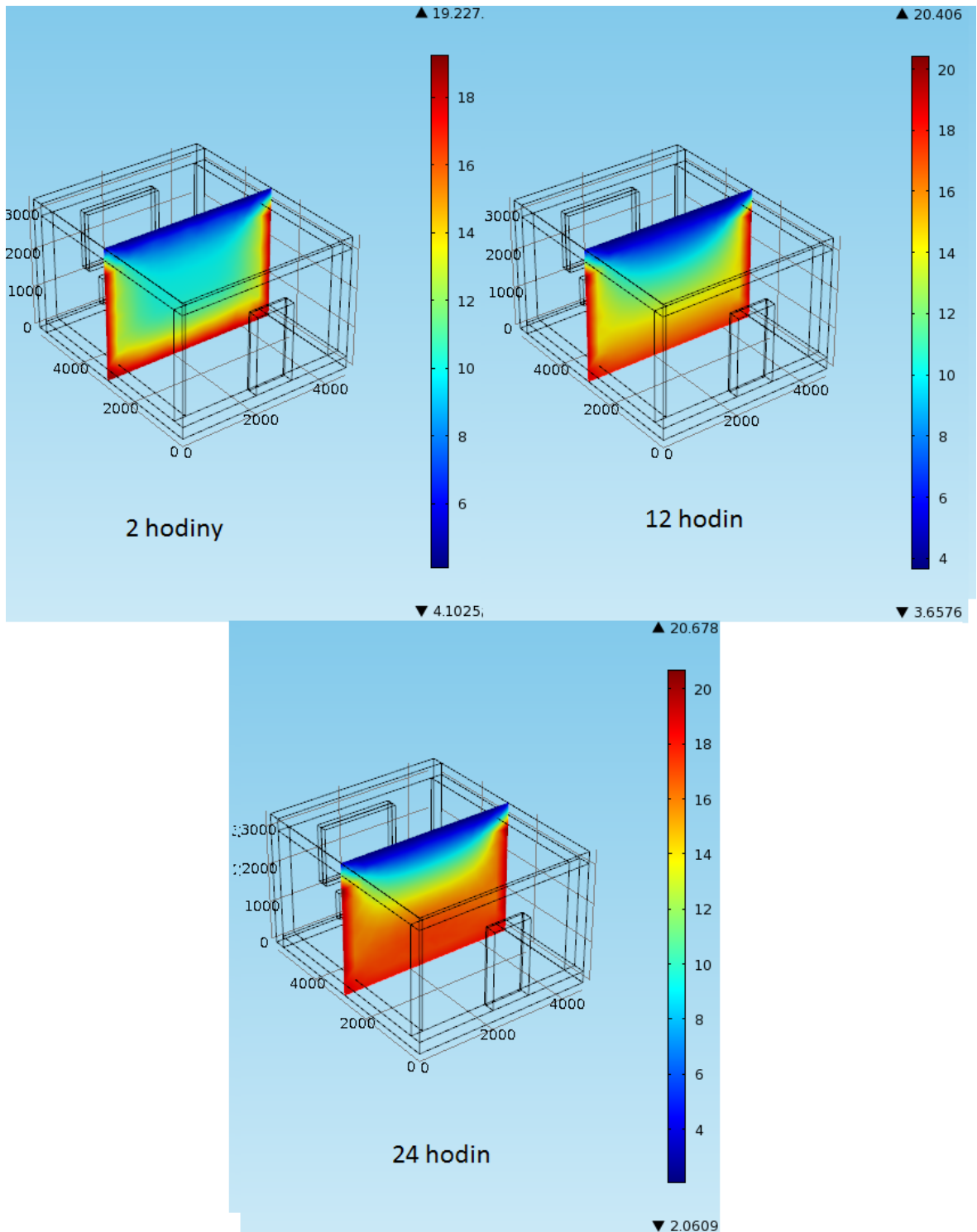


Obr. 27 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 1 od ľavej steny k pravej pri ohreve

Z obr. 26 môžeme vidieť, že teplota pri dverách miestnosti sa v každom časovom úseku začína na hodnote 20 °C. Je to spôsobené prostupem tepla z miestnosti za dverami, v ktorej je udržiavaná konštantná teplota vzduchu 20 °C. Čím je vzdialenosť od dverí väčšia tým sa teplota znižuje. Avšak v určitej vzdialenosti sa teplota začne znova zvyšovať. Je to spôsobené vykurovacím telesom ktoré je umiestnené pod oknom a ktoré vyžaruje veľkú tepelnú energiu. To sa nám aj značne prejavilo na grafe kde vidíme, že v čase 24 hodín, kedy už je vykurovacie teleso značne zahriate, teplota v jeho blízkosti vystúpila až na hodnotu viac ako 60 °C. Ďalším zvýšením vzdialenosti teplota začne značne klesať, čo je spôsobené umiestneným okna ktoré nasleduje hneď za vykurovacím telesom. Na obr. 28 ako som už spomínal je znázornený úsek od ľavej bočnej stene k pravej. Môžeme si všimnúť že teplota po celý úsek sa časom zvyšuje. Je to spôsobené vykurovacím telesom ktoré vyhrieva miestnosť. Tiež si môžeme všimnúť že pri stenách ako pravej tak aj ľavej sa teplota blíži k hodnote 20 °C. Je to spôsobené konštantnou teplotou vzduchu vedľajších miestností a prostupem tepla medzi týmito miestnosťami a nami pozorovanou miestnosťou. Pre lepšiu predstavu rozloženia tepla v miestnosti v daných časových úsekoch (2, 12, 24 hodín) si ukážeme 3 rezy miestnosťou, kde je znázornené, ako sa menila teplota v miestnosti v daných časových úsekoch viac obr. 28, 29, 30.



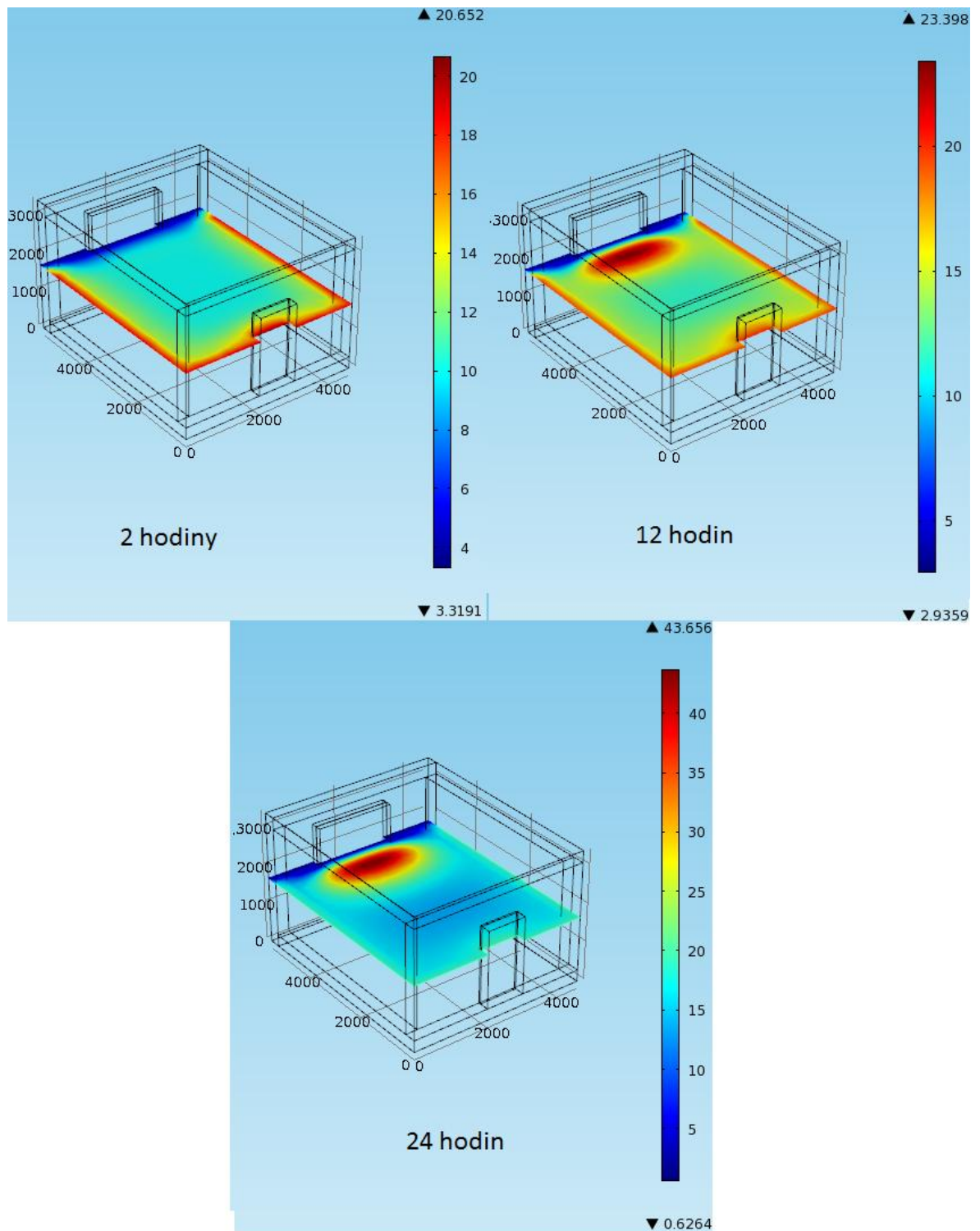
Obr. 28 Rozloženie teploty v reze č. 1 miestnosti č. 1 pri jej ohreve.



Obr. 29 Rozloženie teploty v reze č. 2 miestnosti č. 1 pri jej ohreve.

Z obr. 28 a 29 si môžeme všimnúť, že teplo sa šíri z vykurovacieho telesa od podlahy smerom hore a naopak, chladnejší vzduch z okna sa šíri od stropu smerom dole. Je to spôsobené rôznymi hustotami vzduchu, keďže teplejší vzduch má menšiu hustotu oproti chladnej-

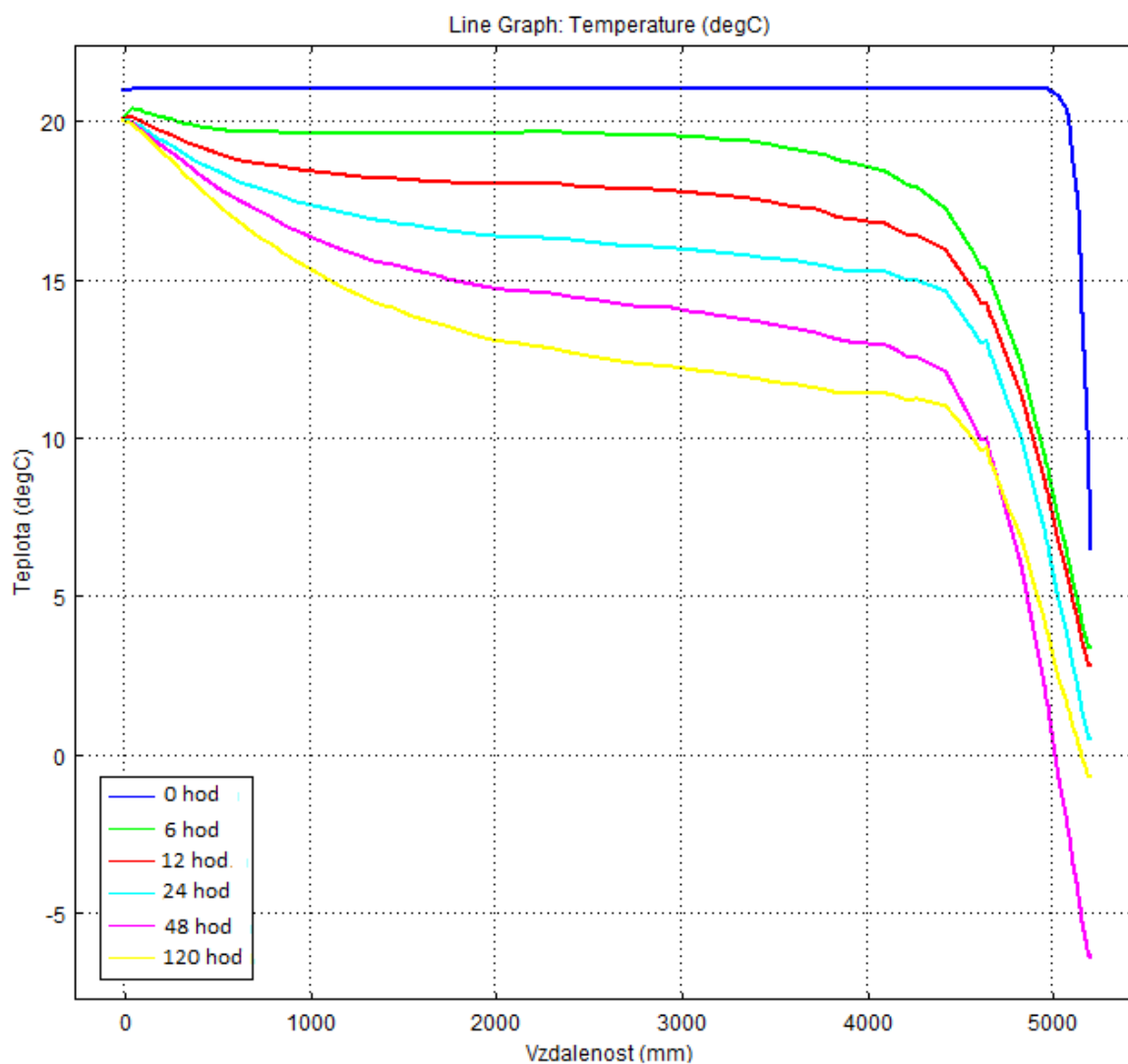
šiemu. Pod okná sa teda umiestňujú vykurovacie telesá preto, aby bolo dosiahnuté rovnomerné vyhrievanie miestnosti.



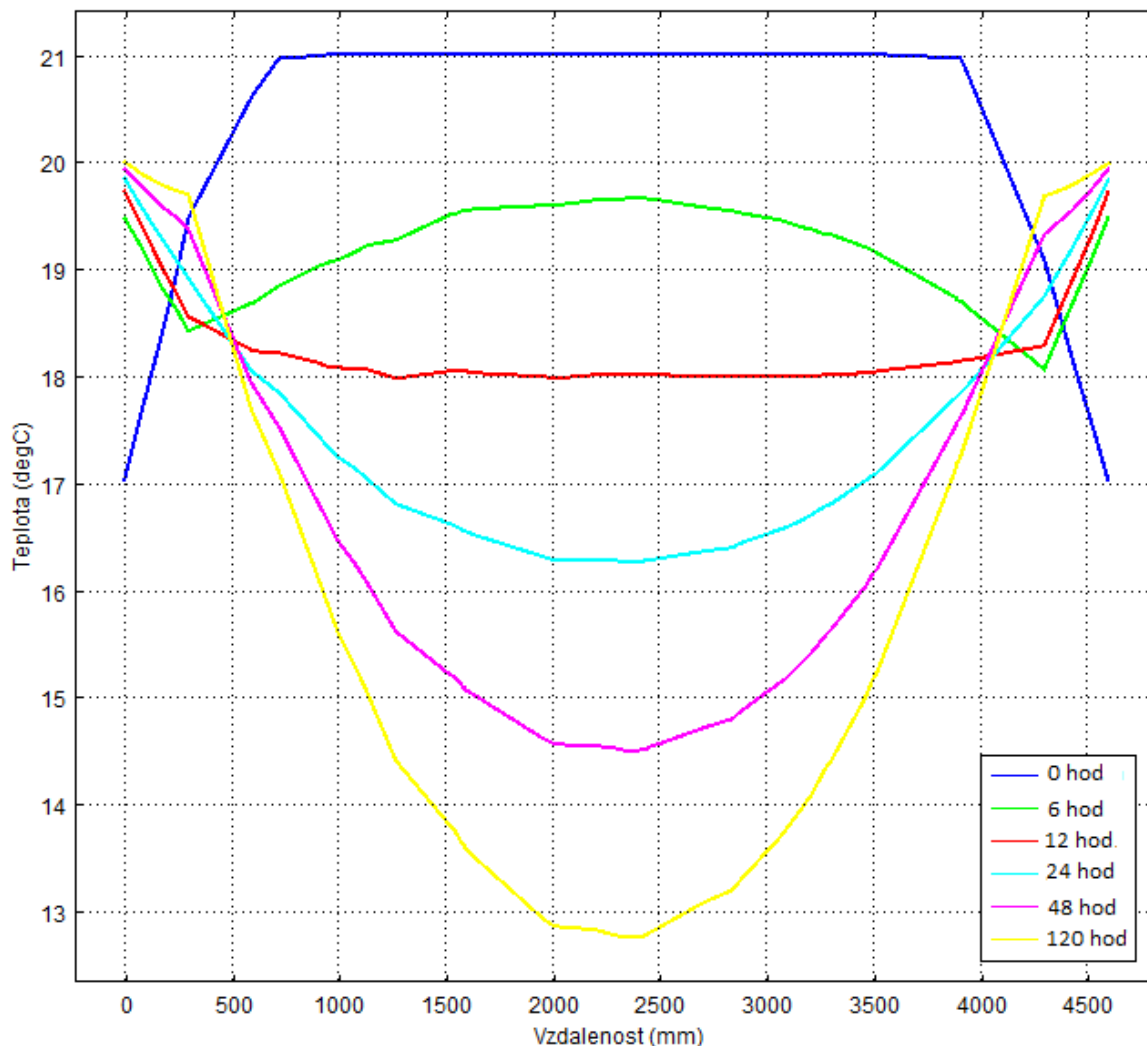
Obr. 30 Rozloženie teploty v reze č. 3 miestnosti č. 1 pri jej ohreve.

## 5.8 Získanie a spracovanie výsledkov simulácie - chladnutie miestnosti

Pri simulácii chladenia miestnosti č.1 som použil rovnaké podmienky ako tomu bolo pri ohreve. Proces chladenia začne pri počiatočnej teplote miestnosti 21 °C. Proces je však o niečo zdĺhavejší ako proces ohrevu. Aby som dostal potrebné výsledky zvýšil som proces doby výpočtov s pôvodných 24 hodín na 120 hodín. Obr. 31, 32 znázorňujú sledovanie procesu chladenia miestnosti odpovedajúce teplotnému poľu vzdialenosti od dverí k oknu miestnosti a druhý odpovedá vzdialenosti od ľavej steny k pravej, tak ako tomu bolo pri ohreve miestnosti. Na obrázku sú znázornené vypočítané priebehy teplôt v dobe 0, 6, 12, 24, 48 a 120 hodín. Na obr. 33, 34, 35 je znázornený proces chladnutia pri miestnosť č.1 v rôznych prierezoch miestnosti pre dobu chladenia 2, 24, 60 a 120 hodín.

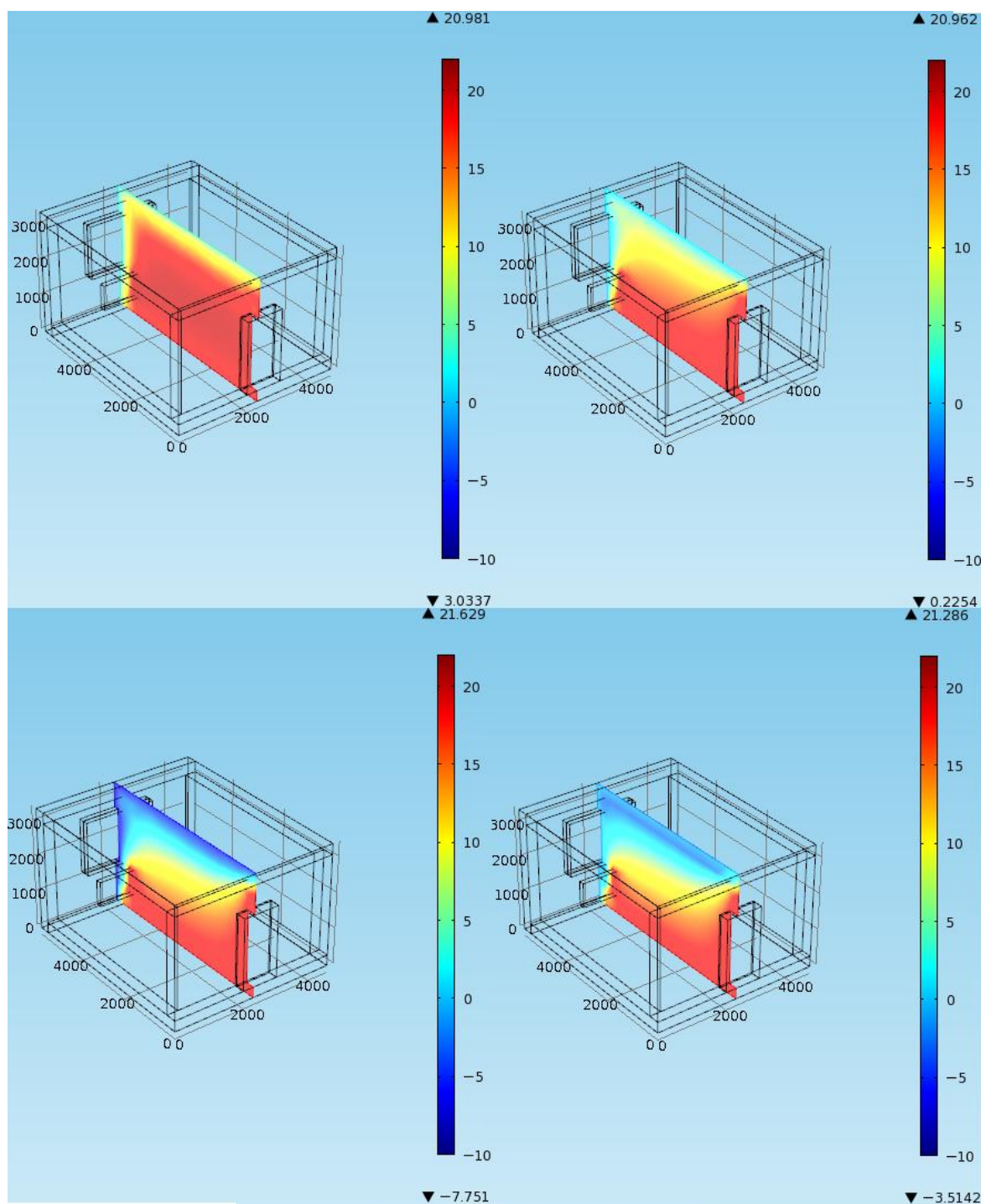


Obr. 31 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č.1 od dverí k oknu pri chladnutí.

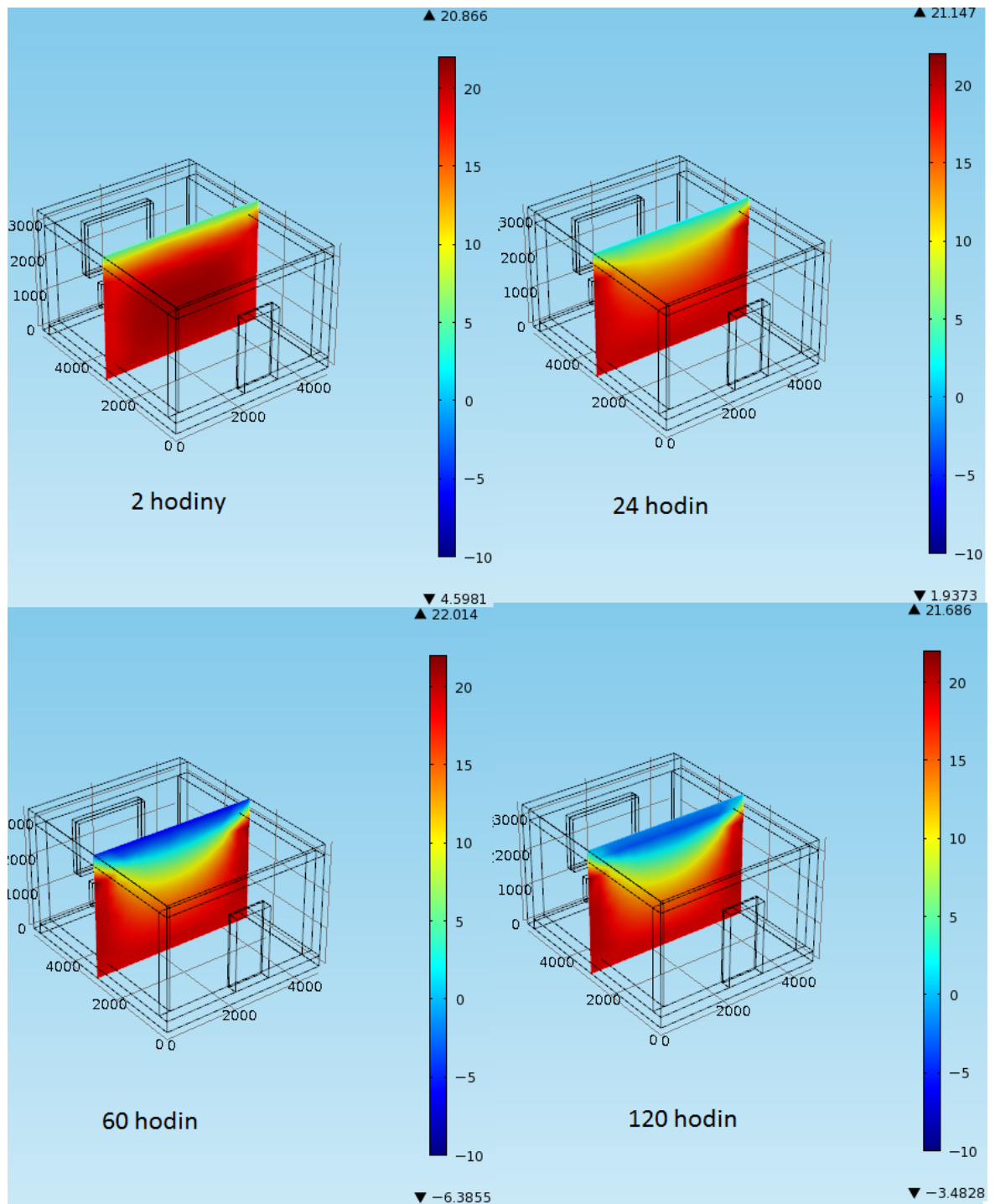


Obr. 32 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 1 od ľavej steny k pravej pri chladnutí.

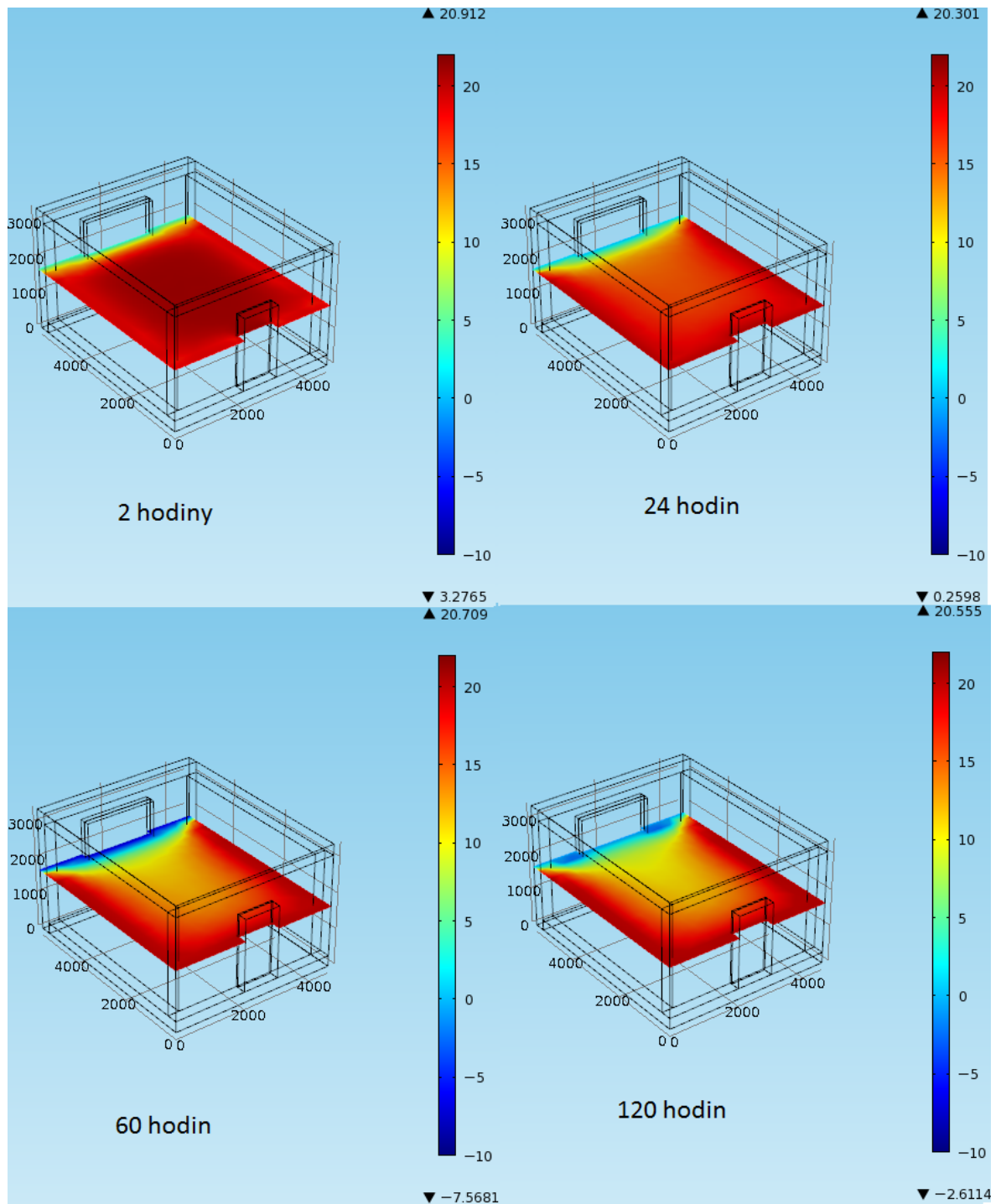
Na obr. 31 je vidieť, že teplota v miestnosti je blízko dverí najväčšia. Je to spôsobené prestupom tepla, ktorý nastáva z vyhriatej miestnosti ktorá je za stenou a tiež tým že okno, ktorým prúdi chladný vzduch je v pomerne veľkej vzdialenosti od prednej steny. Dôkazom toho je priebeh kriviek na obr. 31, ktorý so zväčšovaním vzdialenosti klesá a to znamená, že sa teplota miestnosti znižuje. Na obr. 31 a 32 vidíme, že teplota v celej miestnosti sa výrazne znížila, po piatich dňoch je rozdiel teplot až 7 °C. Avšak pri bočných stenách a pri prednej stene sa teplota drží pri počiatočnej teplote 20 °C čo je spôsobené, ako som už spomínal, prostupom tepla zo susedných miestnosti. Pre lepší pohľad na ochladzovanie miestnosti č.1 slúžia obr. 33, 34, 35.



Obr. 33 Rozloženie teploty v reze č. 1 miestnosti č. 1 pri jej chladení.



Obr. 34 Rozloženie teploty v reze č. 2 miestnosti č. 1 pri jej chladení.

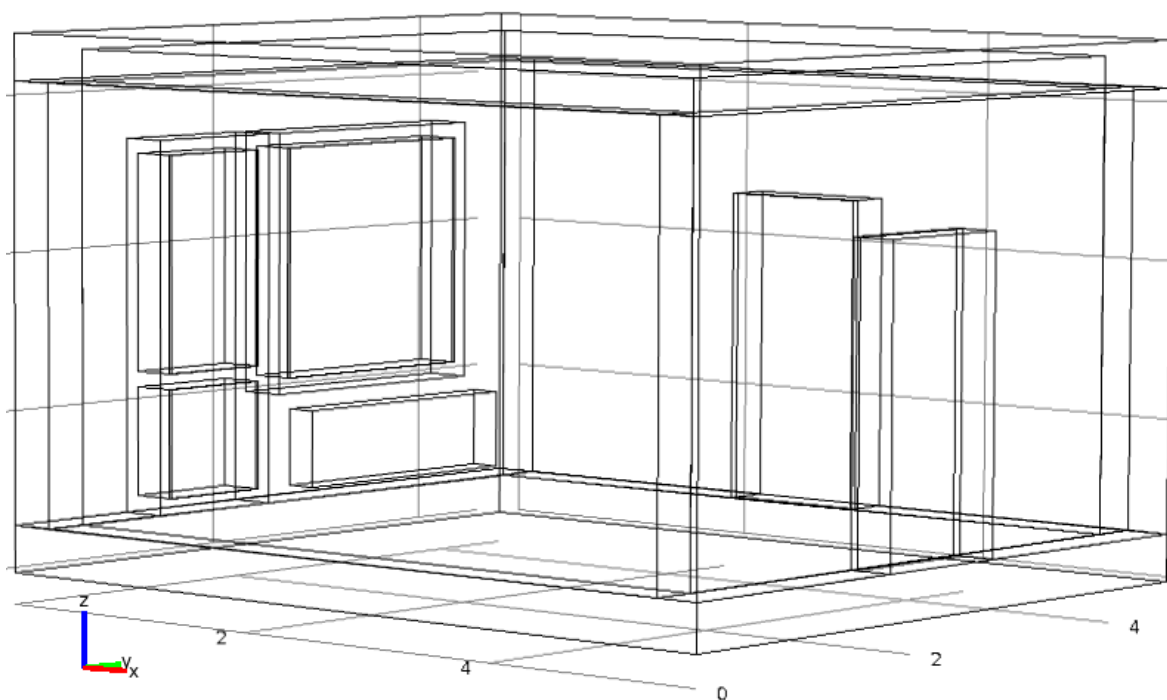


Obr. 35 Rozloženie teploty v reze č. 3 miestnosti č. 1 pri jej chladení.

Na obr. 33, 34 vidíme, že chladný vzduch sa začína šíriť od stropu miestnosti. Potvrďuje to poznatok, ktorý som spomínal pri ohreve miestnosti a to, že teplejší vzduch má menšiu hustotu ako chladnejší čo je dôvod prečo sa drží v spodných častiach miestnosti a prečo chladnejší vzduch sa drží pri strope miestnosti. Z obr. 34 vyplýva že miestnosť sa časom naozaj ochladí a neudrží si svoju teplotu ani pri vzdialenejších miestach od okna.

## 6 SIMULÁCIA MIESTNOSTI ČÍSLO 2 V PROGRAME COMSOL MULTIPHYSICS

Pri modelovaní ohrevu a chladenia miestnosti č. 2, som postupoval obdobne ako pri miestnosti č. 1. To znamená, že som si vytvoril nový projekt, nakonfiguroval potrebný model, vytvoril geometriu miestnosti, nadefinoval materiály, nadefinoval počiatočné a okrajové podmienky, vytvoril mriežku, nastavil krok a dobu procesu a nakoniec som spracoval výsledky výpočtov simulácie. Oproti miestnosti č. 1 sa značne zmenila geometria miestnosti, viac obr. 36.



Obr. 36 Geometrický náčrt miestnosti číslo 2.

Na obr. 36 na miestnosti č. 2 pribudli prvky ako balkónové dvere, balkónové okno a tiež pribudli dvere do bočnej miestnosti. Z čoho vyplýva, že zoznam parametrov sa bude tiež líšiť od zoznamu parametrov pre model miestnosti č. 1. Viac tabuľka 8.

## 6.1 Použité parametre

Tabulka 8 Zoznam parametrov pre miestnosť č. 2.

Názov parametra	Hodnota parametra	Popis parametra
lambda_tehla	0,6[W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	tepelná vodivosť tehly
rho_tehla	2000[kg . m <sup>-3</sup> ]	hustota tehly
cp_tehla	920[J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	merná tepelná kapacita tehly
lambda_sklo	0,76[W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	tepelná vodivosť skla
rho_sklo	2600[kg . m <sup>-3</sup> ]	hustota skla
cp_sklo	840[J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	merná tepelná kapacita skla
lambda_plast	0,2[W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	tepelná vodivosť plastu
rho_plast	1380[kg . m <sup>-3</sup> ]	hustota plastu
cp_plast	1100[J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	merná tepelná kapacita plastu
lambda_drevo	0,11[W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	tepelná vodivosť dreva
rho_drevo	800[kg . m <sup>-3</sup> ]	hustota dreva
cp_drevo	1500[J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	merná tepelná kapacita dreva
lambda_ocel	50[W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	tepelná vodivosť oceli
rho_ocel	7700[kg . m <sup>-3</sup> ]	hustota oceli
cp_ocel	470[J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	merná tepelná kapacita oceli
alpha_in	8[W . m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup> ]	súčiniteľ prestupu tepla vnútorných stien budovy
alpha_ex	23[W . m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup> ]	súčiniteľ prestupu tepla vonkajšej steny budovy
Tp	10 [°C]	počiatočná teplota vzduchu v miestnosti
TpLS	20 [°C]	počiatočná teplota vzduchu pri ľavej stene
TpPS	20 [°C]	počiatočná teplota miestnosti pri pravej stene
TpZS	20 [°C]	počiatočná teplota miestnosti pri zadnej stene
TpVS	5 [°C]	počiatočná teplota vonkajšieho vzduchu
P	3500 [W]	príkonný výkon vykurovacieho telesa
TLS	20 [°C]	teplota v miestnosti pri ľavej stene
TPS	20 [°C]	teplota v miestnosti pri pravej stene
TZS	19 [°C]	teplota v miestnosti pri zadnej stene
TPStrop	19 [°C]	počiatočná teplota miestnosti nad stropom
Tstrop	19 [°C]	teplota v miestnosti nad stropom
TPPodlaha	19 [°C]	počiatočná teplota miestnosti pod podlahou
TPodlaha	19 [°C]	teplota miestnosti pod podlahou

## 6.2 Podmienky testovania

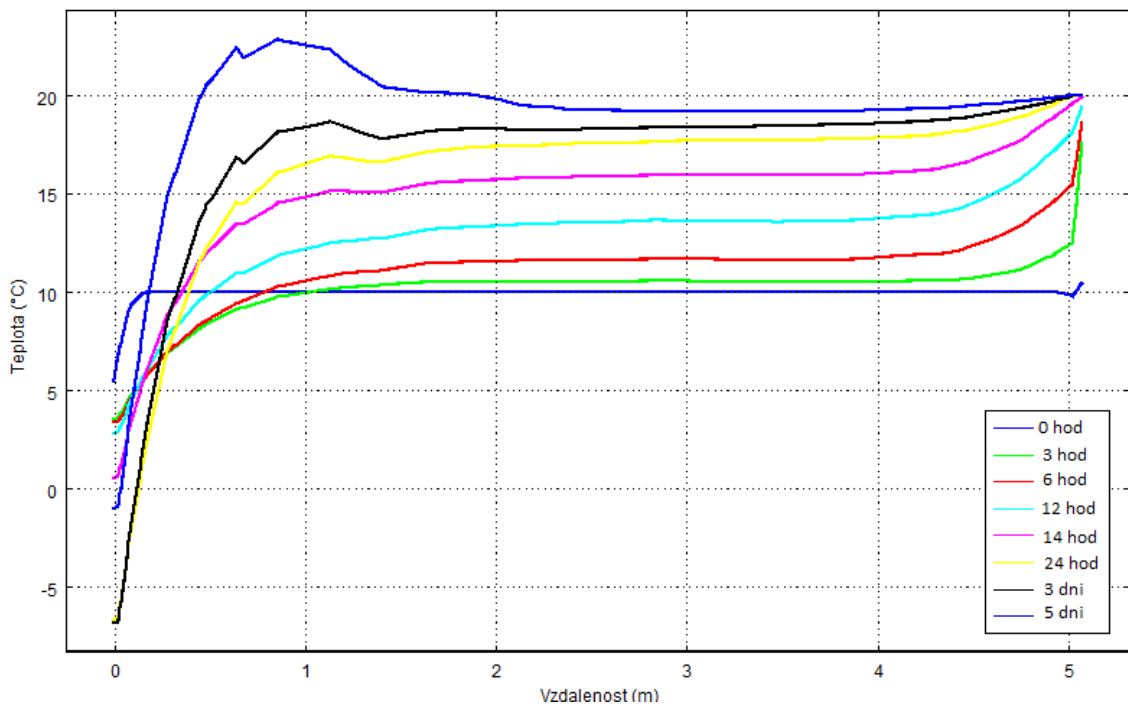
Testovanie priebehu vykurovania miestnosti som uskutočnil za nasledujúcich podmienok: Rozmery miestnosti sú : 4 x 5 x 2,8 m. Hrúbka každej steny je 0,3 m. Rozmery balkónového okna sú : 1,8 x 1,7 m. Pričom sklenená časť balkónového okna má rozmery : 1,6 x 1,5 m. Balkónové dvere : 1 x 2,4 m. Balkónové dvere sa skladajú z dvoch sklenených častí, vrchná sklenená časť má rozmery : 0,8 x 1,4 m a spodná : 0,8 x 0,7 m. Miestnosť č. 2 sa ďalej skladá z dvoch dverí ktoré vedú do susedných miestností. Dvere majú zhodné rozmery a to : 1 x 2 m. Rozmery vykurovacieho telesa sú : 1,8 x 0,5 m s hrúbkou : 0,2 m. Príkon vykurovacieho telesa je nastavený na hodnotu 3500 W/m<sup>3</sup>. V kontakte z okolitým prostredím je len stena na ktorej sa nachádzajú balkónové dvere a balkónové okno. Teplota vonkajšieho vzduchu sa pohybuje v rozpätí od : -9,39 ° C po 4,06 ° C. Súčiniteľ prestupu tepla medzi stenou a vonkajším prostredím má hodnotu : 23 W . m<sup>-2</sup> . K<sup>-1</sup>. Bočné steny a tiež zadná stena sa stýkajú s miestnosťami ktoré majú počiatočnú teplotu 20 °C. Vedľajšie miestnosti ktoré sa stýkajú s podlahou a stropom miestnosti majú počiatočnú teplotu 19 °C. Súčiniteľ prestupu tepla medzi týmito miestnosťami a stenami našej miestnosti nadobúda hodnotu : 8 W . m<sup>-2</sup> . K<sup>-1</sup>. V tabuľke 9 sú uvedené fyzikálne vlastnosti materiálov použitých pre simulovanie miestnosti č. 2. Priradenie materiálov k jednotlivým objektom miestnosti je nasledovné : Sklo – Výplň balkónového okna, obidve sklenené časti balkónových dverí. Oceľ – vykurovacie teleso. Tehla – Strop, podlaha, zadná stena, predná stena a bočné steny. Plast – Okraje balkónových dverí a balkónového okna. Drevo – Dvere umiestené na ľavej bočnej stene a zadnej stene.

Tabuľka 9 Fyzikálne vlastnosti materiálov použitých v miestnosti č.2.

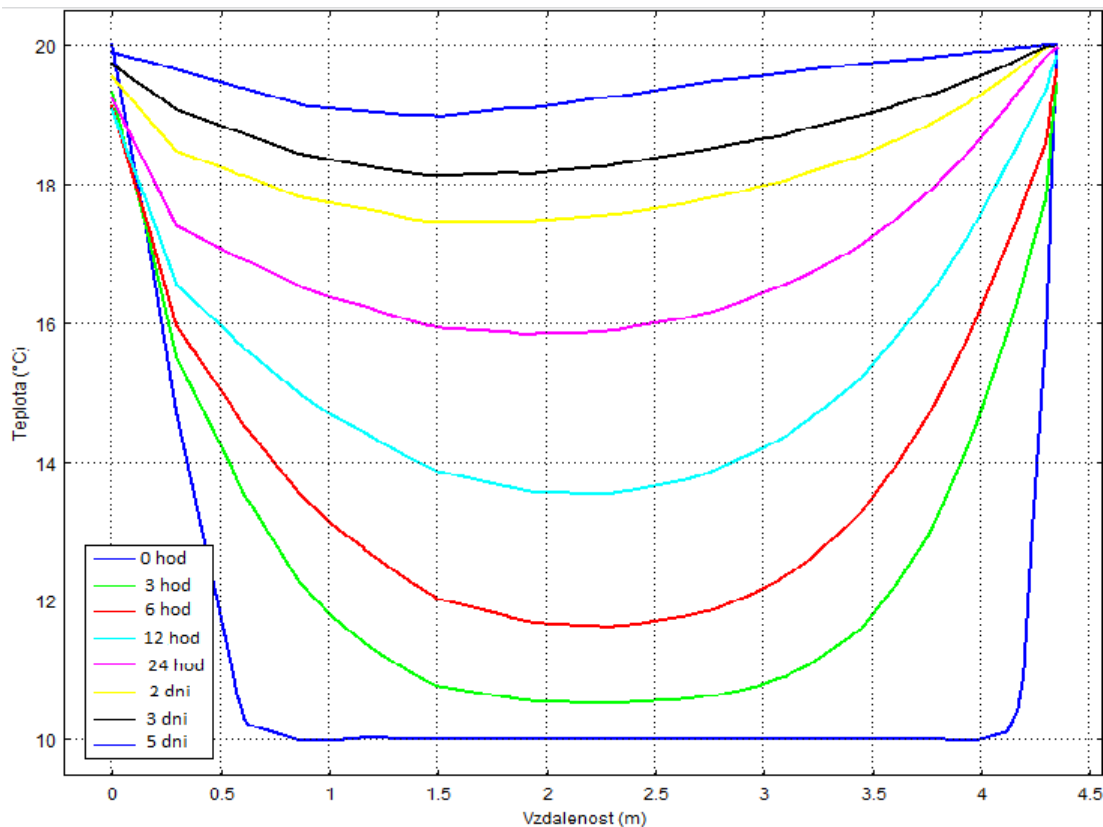
Materiál	Súčiniteľ tepelnej vodivosti [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Hustota [kg . m <sup>-3</sup> ]	Merná tepelná kapacita [J.kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]
Plast	0,2	1380	1100
Tehla	0,6	2000	920
Oceľ	50	7700	470
Drevo	0,11	800	1500
Sklo	0,76	2600	840

### 6.3 Výsledky simulácie - ohrev miestnosti

Podobne ako pri miestnosti č. 1, výsledky sú zobrazené v dvoch 2D grafoch ktoré zobrazujú priebeh teploty v rôznych časových úsekoch odpovedajúcim jednotlivým priamkam prechádzajúcimi miestnosťou č. 2, ktoré sú volené rovnako ako v miestnosti č. 1. Sú zobrazené na obr. 25. 3D grafy sú tiež zobrazené tak ako tomu bolo v miestnosti č. 1, teda s rôznymi rezmi miestnosti v rôznych časových úsekoch, viac obr. 37 - 40 nižšie.



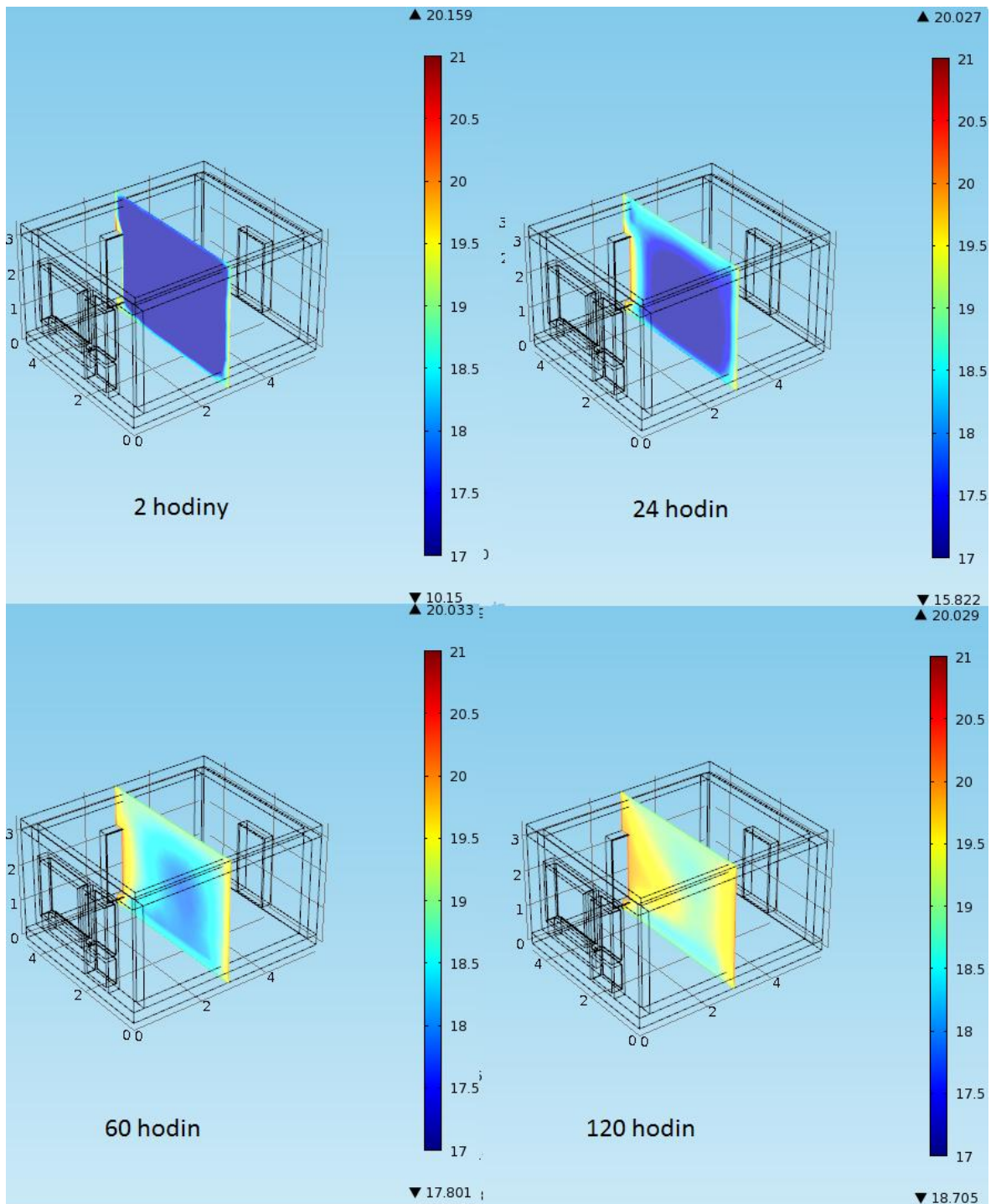
Obr. 37 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 2 od okna k dverám pri ohrevu.



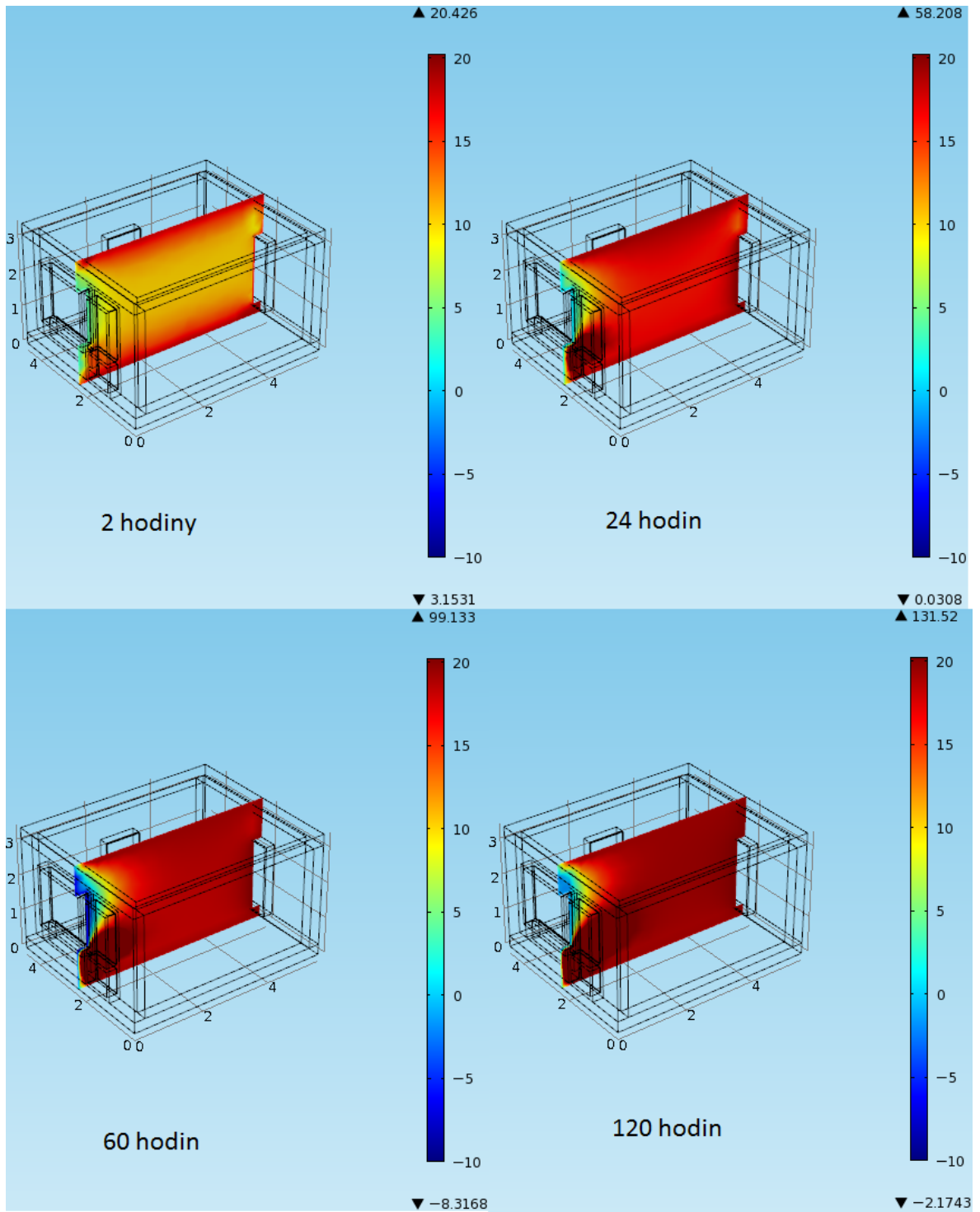
Obr. 38 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 2 od ľavej steny k pravej pri ohreve.

Pri simulácii ohrevu miestnosti č. 2 je použitý väčší časový interval sledovania, ako tomu bolo pri miestnosti č.1. Časový interval je nastavený až do piatich dní. Avšak s rovnakým krokom ako v predchádzajúcom prípade. Z obr. 37 je zrejmé, že teplota pri okne je veľmi malá (závisí na teplote vonkajšieho prostredia). Avšak za oknom sa nachádza vykurovacie teleso, čo sa prejaví aj na grafe veľkým teplotným skokom. Ďalším zvyšovaním vzdialenosti sa teplota natoľko už nevychyľuje. Pri zadnej stene miestnosti je vidieť v čase, keď miestnosť ešte nebola priveľmi vyhriata, nárast teploty. Je to spôsobené prostupom tepla zo susednej miestnosti, v ktorej je teplota vzduchu vyššia ako teplota v sledovanej miestnosti. Postupom času kedy sa miestnosť už vplyvom vykurovacieho telesa dostatočne zahriala je vidieť, že tento nárast teploty už nenastáva v takej veľkej miere keďže teploty v simulovanej miestnosti a v susednej miestnosti sú takmer rovnaké. Na obr. 38 je zobrazená závislosť teploty miestnosti na polohe a to konkrétne vzdialenosť od ľavej bočnej steny k pravej. V čase až po približne 24 hodín je rozdiel teplôt na krajoch miestnosti výrazne väčší, čo je ako v predchádzajúcom prípade spôsobené prestupom tepla zo susedných miestností. Po piatich dňoch, kedy už vykurovacie teleso v značnej miere vyhrialo miestnosť je vi-

dieť, že krivka ktorá zobrazuje závislosť teploty na polohe v dobe piatich dní, je takmer rovná, čo znamená že miestnosť je takmer rovnomerne vyhriata a došlo už takmer k ustálení zdieľaniu tepla. Pre lepšiu predstavu ako sa postupne miestnosť časom v rôznych rezo-  
 zoch miestnosti vyhrievala slúžia obr. 39, 40, 41.

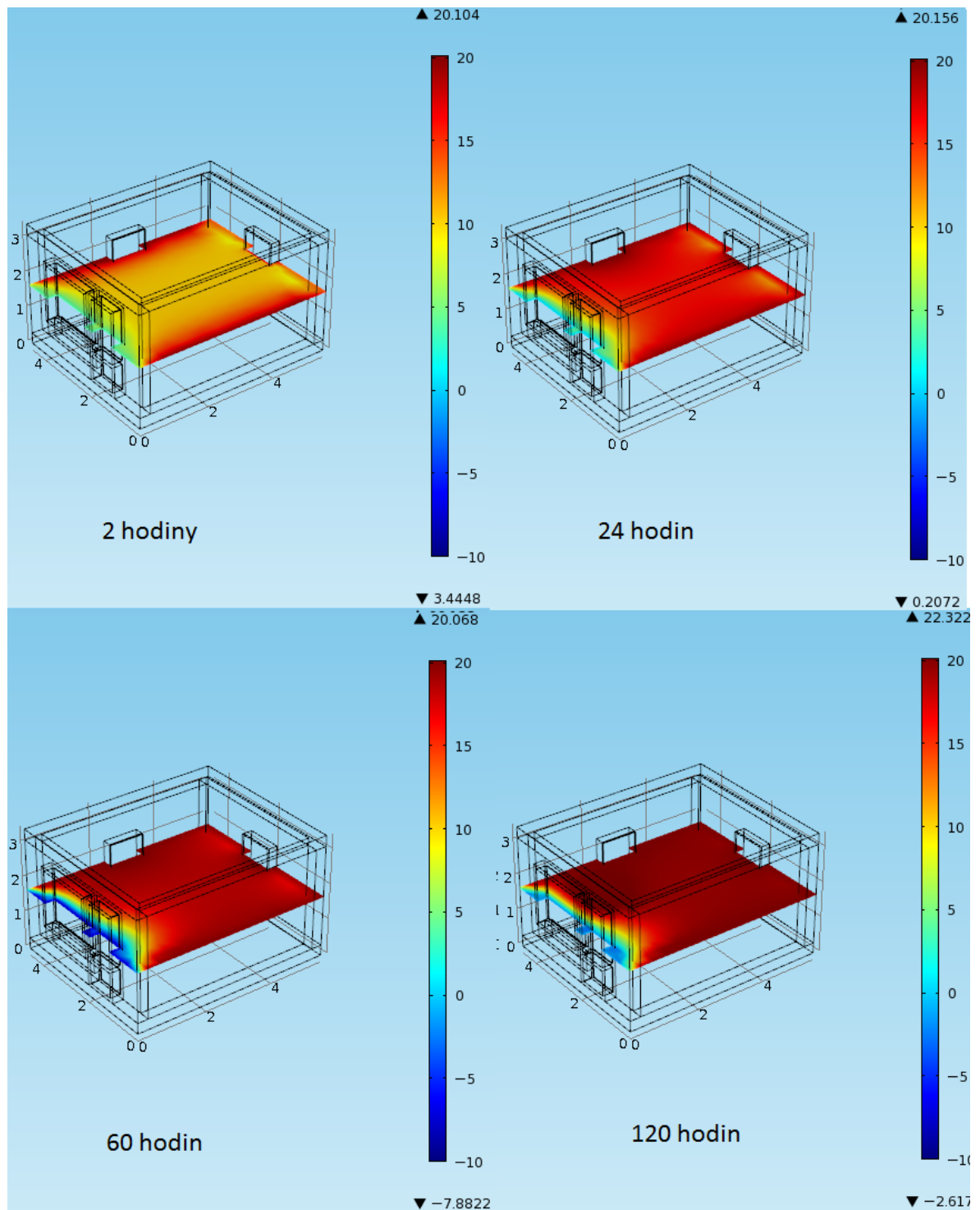


Obr. 39 Ohrev miestnosti č. 2 v reze č. 1.



Obr. 40 Rez č. 2 miestnosti č. 2 ohrev.

Na obr. 40 si môžeme všimnúť, že v čase 2 hodín sledovania miestnosti je teplota najväčšia pri strope a podlahe. Ako som už spomínal, je to spôsobené prostupom tepla zo susedných miestností. Postupne s narastajúcim časom sa teplota v miestnosti rovnomerne rozšíri, je to vidieť pri obr. 40 v čase piatich dní.

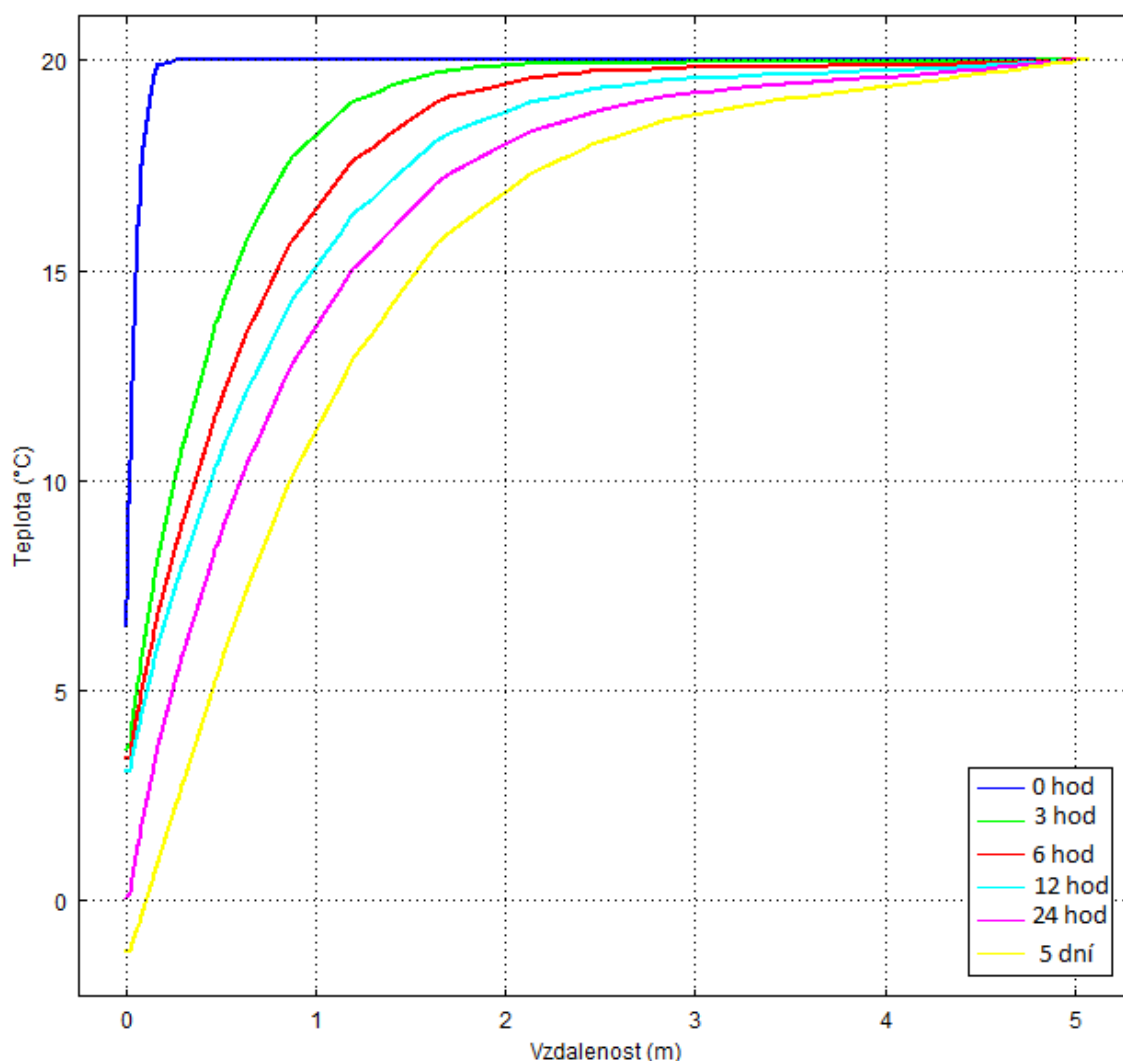


Obr. 41 Ohrev miestnosti č. 2 v reze č. 3.

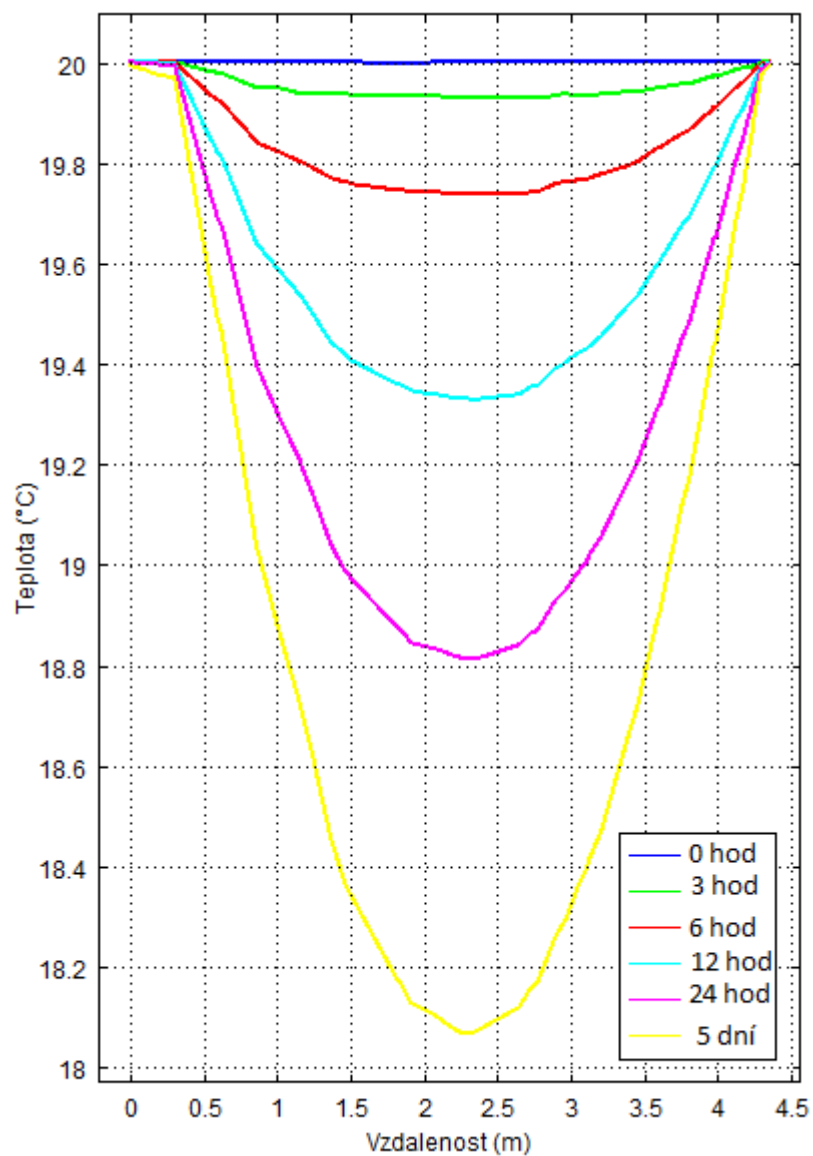
Z obr. 41 vyplýva, že z počiatku je najväčšia teplota pri bočných stenách, keďže tieto steny ohrievajú vedľajšie miestnosti ktoré majú väčšiu teplotu vzduchu. Avšak tak ako to bolo aj v predchádzajúcom prípade, teplota sa postupom času rovnomerne rozloží po miestnosti a dôjde k vyhriati vzduchu v celej miestnosti.

## 6.4 Výsledky simulácie - ochladzovanie miestnosti

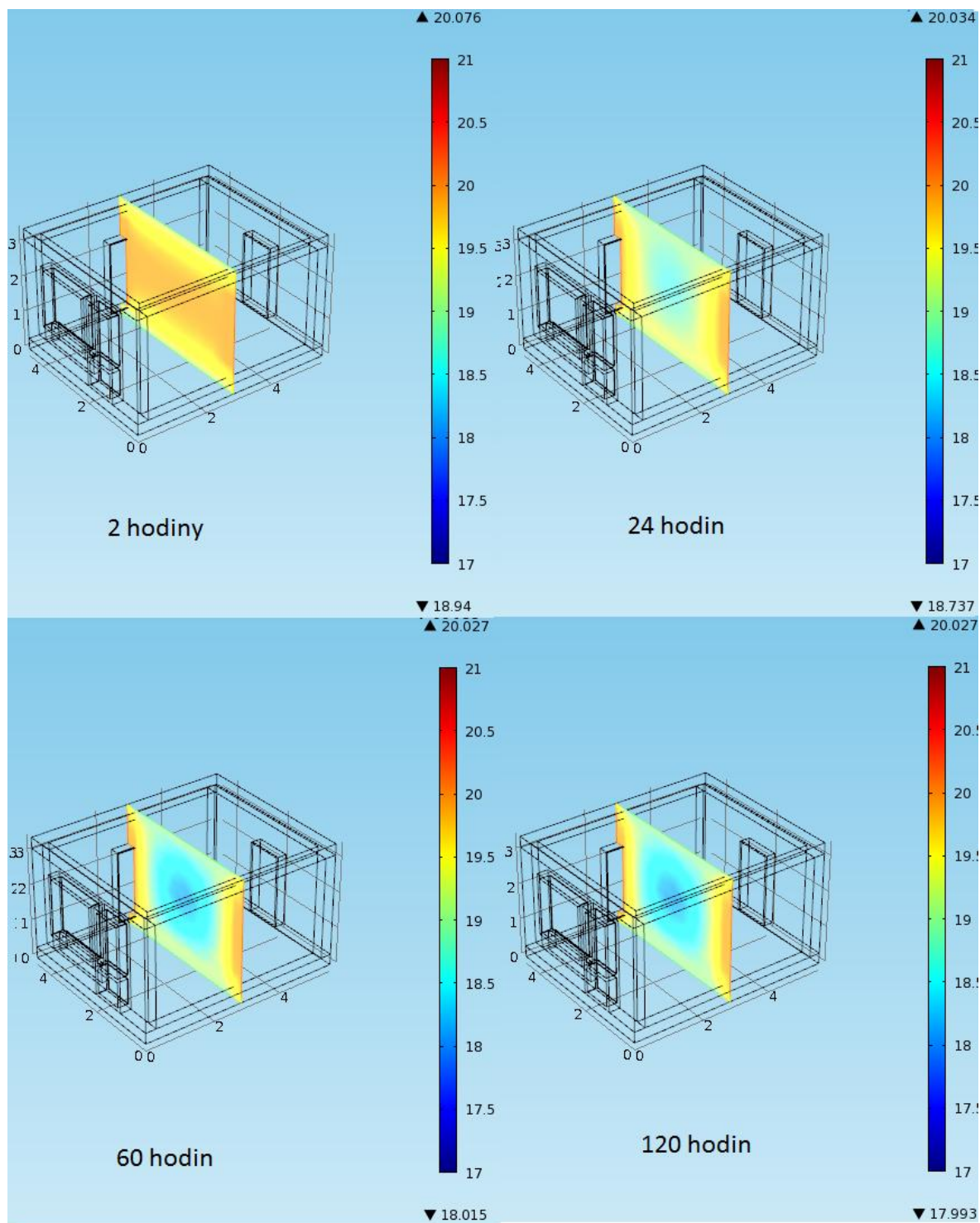
Na obr. 42 a 43 sú znázornené vypočítané priebehy teploty vzduchu pri chladnutí miestnosti po dobu piatich dní. Na obrázkoch je znázornená závislosť teploty na polohe pre zvolené doby chladenia. Obr. 42 zobrazuje výpočet teploty vzduchu od okna smerom k dverám a obr. 43 zasa znázorňuje výpočet teploty vzduchu od ľavej bočnej stene k pravej. Testovanie bolo prevádzané pri nasledujúcich podmienkach: Počiatočná teplota vzduchu v miestnosti je 20 °C. Teplota vzduchu v susedných miestnostiach je 20 °C. Ostatné parametre ako fyzikálne vlastnosti materiálov atd. sú zhodné ako pri ohreve miestnosti.



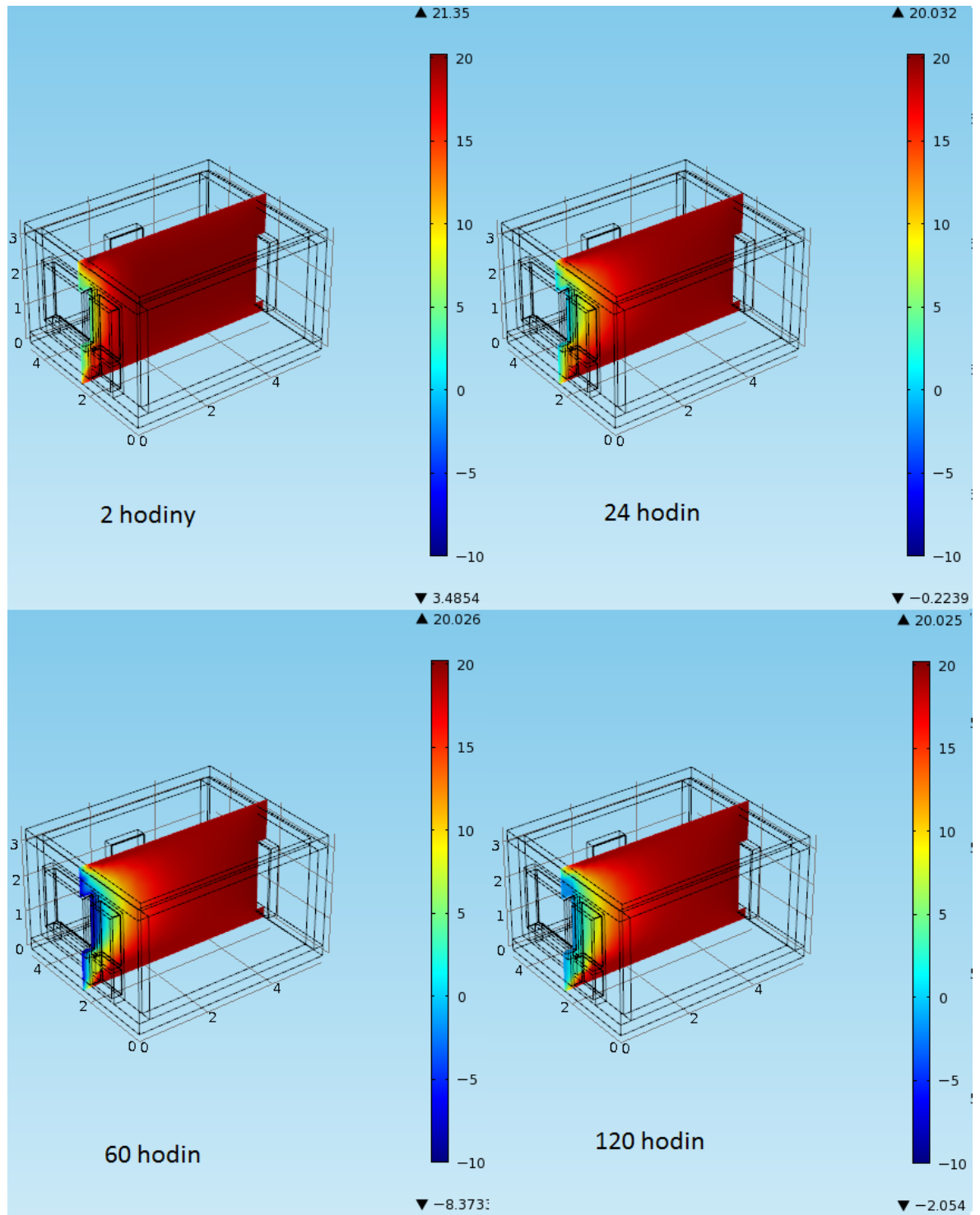
Obr. 42 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 2 od okna k dverám pri chladení.



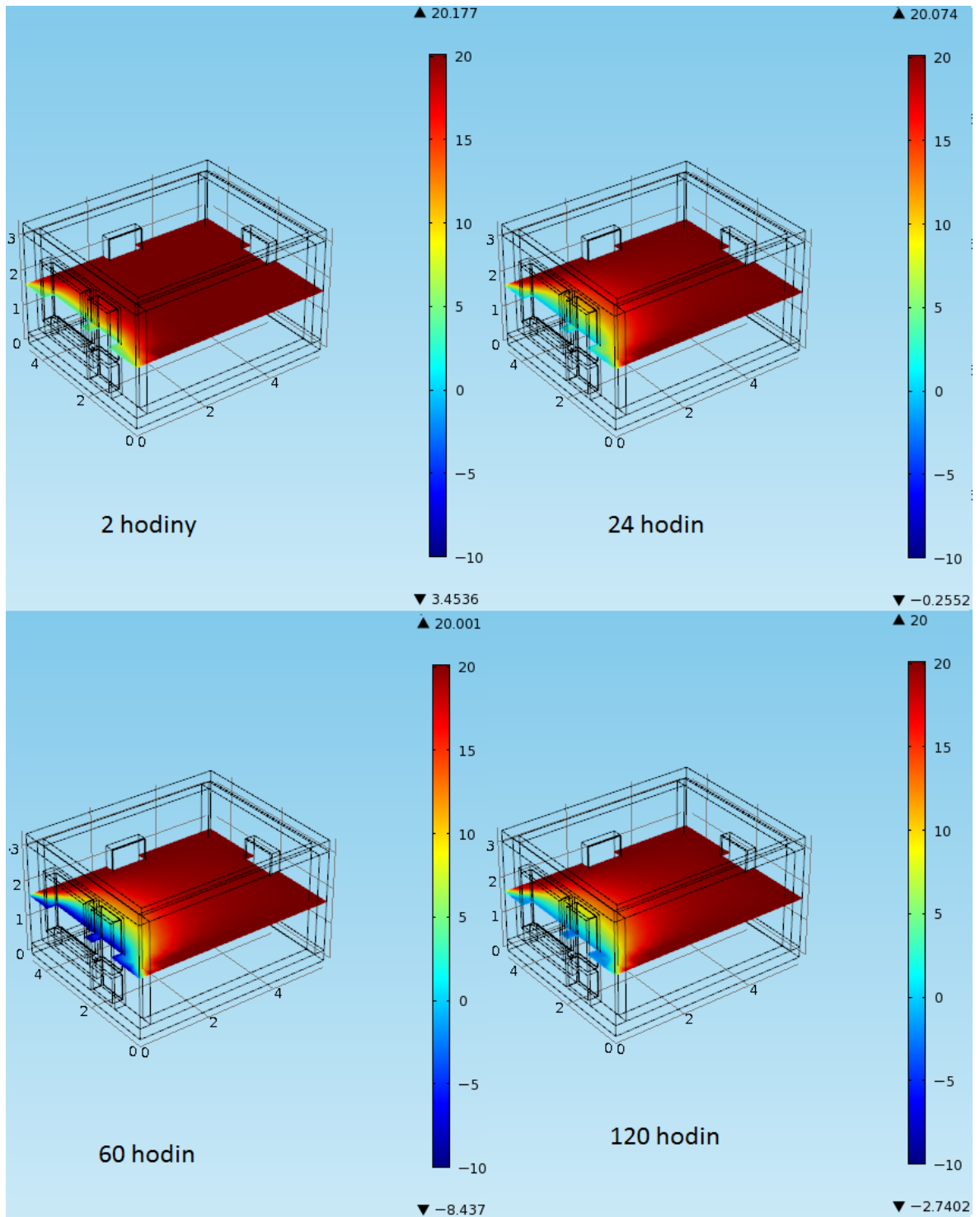
Obr. 43 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 2 od ľavej steny k pravej pri chladení.



Obr. 44 Chladnutie miestnosti č. 2 v reze č. 1.



Obr. 45 Chladnutie miestnosti č. 2 v rezu č. 2



Obr. 46 Chladnutie miestnosti č. 2 v rezu č. 1.

Na obr. 42 si môžeme všimnúť že v čase  $\tau = 0$ , je v miestnosti konštantná teplota  $20^{\circ}\text{C}$ . Postupom času však od balkónových dverí a okna prúdi chladnejší vzduch a tým miestnosť ochladzuje. Čím ďalej od okna sa prevádzajú výpočty tým teplota je bližšia k pôvodnej hodnote  $20^{\circ}\text{C}$ . Na obr. 44, 45 a 46 si môžeme všimnúť, že sice teplota v miestnosti postupom času klesá a to najviac pri balkónových dverách a okne, ale vo väčšine miestnosti je

teplota udržiavaná pri hodnote blízkej 20 °C. To nám hovorí, že si miestnosť dobre dokáže udržať svoju teplotu čo je z energetického hľadiska určite veľká výhoda.

## 7 ZHRNUTIE VÝSLEDKOV SIMULÁCIE OHREVVU A CHLADENIA TESTOVANÝCH MODELOV MIESTNOSTÍ

Miestnosť č. 1 pozostáva z jedného vykurovacieho telesa umiestneného pod oknom a z jedných dverí. Miestnosť je obklopená susednými miestnosťami, ktoré každá majú konštantnú teplotu vzduchu 20 °C. Z výsledkov, ktoré som získal pri simulovaní vykurovania miestnosti je zrejmé, že umiestnenie objektov má na vykurovanie miestnosti veľký vplyv.

Výsledky simulácie potvrdil, že studený vzduch ktorý prúdi od okna má tendenciu stúpať k stromu a naopak teplý klesať k podlahe. Z tohto dôvodu je vhodné umiestniť vykurovacie teleso pod zdroj prúdenia chladného vzduchu tak, aby bolo zabezpečené rovnomerné prúdenie chladného a teplého vzduchu. Pri chladení miestnosti teplota po šiestich hodinách klesla z počiatočných 20 °C na 19,5 °C. Po dvanástich hodinách teplota v strede miestnosti nadobúdala hodnotu 18 °C a po uplynutí piatich dní teplotný rozdiel predstavuje až 16,2 °C.

Simuláciou miestnosti č. 2 pri vykurovaní nastáva podobný efekt prúdenia teplého a studeného vzduchu ako pri miestnosti č. 1. Pri chladení miestnosti č. 2 po dobu 6 hodín klesne teplota v strede miestnosti z počiatočných 20 °C na 19,68 °C, po dvanástich hodinách teplota klesla na hodnotu 19,35 °C a po uplynutí piatich dní sa teplota dostala na hodnotu 18,24 °C. Teplotný rozdiel je teda len 1,76 °C.

Kritéria stability ktoré určuje ČSN 73 0540 hovoria o tom, že parameter poklesu teploty  $\Delta\theta_{r,N}(T)$  pri vykurovaní radiátormi, vykurovacími panelmi a teplovzdušnom vykurovaní nesmie prekročiť hodnotu 3 °C. Parameter poklesu teploty pre miestnosť č. 1 tvorí hodnotu 16,2°C a pre miestnosť č. 2 presne 1,76 °C. Z toho vyplýva že miestnosť č. 1 nespĺňa kritéria tepelnej stability miestnosti pre zimné obdobie. Naopak miestnosť č. 2 tieto kritéria spĺňa. Je to spôsobené jednak lepším rozmiestnením objektov v miestnosti, tak aj lepšími fyzikálnymi vlastnosťami použitých materiálov. Tieto materiály si udržali teplotu tak, že dokázali v dobe chladenia miestnosti dostatočne zahrievať miestnosť aby teplota príveľmi neklesla.

## ZÁVER

V bakalárskej práci som sa zaoberal programovaním modelov pre testovanie tepelnej stability miestnosti v programovom prostredí Comsol Multiphysics. V prostredí „Heat transfer module“ som vytvoril dva modely miestností, v ktorých som následne simuloval vykurovanie a chladenie. Vytvorenie modelov miestnosti spočívalo v navrhnutí geometrie, materiálov jednotlivých objektov miestností, nadefinovaním okrajových a počiatkových podmienok, nastavenia času simulovania, kroku a vytvorenia mriežky.

Geometriu miestnosti č. 1 som vyhotovil podľa vlastného úsudku, či už sa jednalo o rozmery miestnosti alebo druhu materiálov. Naopak pri miestnosti č. 2 som sa inšpiroval klasickou bytovou jednotkou v panelovom dome, ktorý tradične disponuje jedným balkónom a dvoma prechodmi do susedných miestností. Okrajové a počiatkové podmienky som nastavil na základe znalostí z teoretickej časti, kde sú popísané.

Pri chladení miestnosti č. 1 som zistil, že miestnosť nespĺňa kritéria stability, ktoré stanovuje česká technická norma. Naopak druhá miestnosť v dôsledku nízkeho poklesu teploty v dobe chladenia tieto podmienky spĺňa. Z výsledkov práce vyplýva, že tak ako geometria miestnosti, tak aj materiály, z ktorých je miestnosť zhotovená, majú veľký vplyv na tepelnú stabilitu v miestnostiach. Tepelnú stabilitu je možné zabezpečiť rôznymi spôsobmi, avšak pomocou programového prostredia COMSOL Multiphysics si dokážeme túto tepelnú stabilitu overiť a navrhnuť rôzne varianty na jej dosiahnutie.

Pomocou vypočítaných výsledkov vieme, že navrhnutím správneho pomeru veľkostí miestnosti, výkonu vykurovacieho telesa a tiež použitím materiálov s dobrými fyzikálnymi vlastnosťami, môžeme tepelnú stabilitu miestnosti zabezpečiť.

**ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY**

- [1] HASLA, P. – SCHREIBER, I. – ŠNITA, D. A kol. *Chemické inženýrství I*. VŠCHT v Praze [online]. 2007 [cit. 2015-05-18]. ISBN 980-87080-002-7. Dostupné z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_isbn-978-80-7080-002-7/pages-img/001.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-978-80-7080-002-7/pages-img/001.html)
- [2] PŘÍHODA, Miroslav a Miroslav RĚDR. *Sdílení tepla a proudění 2*. přepracované vydání. Ostrava: VŠB TU Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1748-4.
- [3] MACHÁČKOVÁ Adéla a Radim KOCICH. *Sdílení tepla a proudění*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP\\_FINAL\\_LAST.pdf](http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP_FINAL_LAST.pdf)
- [4] WIKIPEDIA. *Electromagnetic spectrum*. [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 - [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9e/EM\\_spectrum\\_SK.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9e/EM_spectrum_SK.jpg)
- [5] VAVERKA, Jiří a Vladan PANOVEC. *Tepelná Stabilita místnosti* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.topin.cz/download.php?idx=84614&di=7>
- [6] *Pasivní domy a tepelná stabilita v zimním období*. Fakulta architektury, Ústav stavitelství, VUT v Brně [online]. 2006 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3627-pasivni-domy-a-tepelna-stabilita-v-zimnim-obdobi>
- [7] ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [8] ŠTEFFEK, Libor a Milan OSTRÝ. *Prostup tepla stavební konstrukcí* [online]. 2013 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/10294-vliv-cinitele-osluneni-na-tepelnou-stabilitu-mistnosti-a-jeho-zrceni>
- [9] OSTRÝ, Milan. *Akumulace tepla pro snížení spotřeby energie v nízkoenergetických budovách* [online]. 2008 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4643-akumulace-tepla-pro-snizeni-spotreby-energie-v-nizkoenergetickych-budovach>

- [10] *Introduction to Heat Transfer Module* [online], Comsol, 2013. [cit. 2015-05-16]  
Dostupné z: <http://www.comsol.com/model/download/1713021/Introduction/ToHeatHeatTransferModule.pdf>
- [11] LONG, Chris a Naser SAYMA. *Heat Transfer* [online]. 2009 [cit. 2015-02-04].  
ISBN 978-87-7681-432-8. Dostupné z:  
<http://nsdl.niscair.res.in/jspui/bitstream/123456789/1090/1/heat-transfer.pdf>
- [12] JANÁČOVÁ Dagmar a Hana CHARVÁTOVÁ. *Nestacionární sdílení tepla vedením v tuhých látkách* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z :  
[www.utb.cz/file/42317\\_1\\_1/](http://www.utb.cz/file/42317_1_1/)
- [13] ČSN EN 15251. *Vstupní parametry vnitřního prostředí pro návrh a posouzení energetické náročnosti budov s ohledem na kvalitu vnitřního vzduchu, tepelného prostředí, osvětlení a akustiky*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha, 2011.
- [14] KULHÁNEK, František. *Stavební fyzika II. Stavební tepelná technika*. 1. Vyd. Praha: ČVUT Praha, 2013. ISBN 978-80-01-04957-0.

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

$A$	Veľkosť povrchu steny (m)
$b, C, m$	Konštanty Nusseltovho kritéria (1)
$c$	Rýchlosť svetla vo vákuu (299 792 456 m.s <sup>-1</sup> )
$c_1$	Konštanta ( $3.741 - 10^{-16} Wm^{-2}$ )
$c_2$	Konštanta ( $1.438 * 10^{-16} m * K$ )
$C_0$	Súčiniteľ vyžarovanie dokonale čierneho telesa ( $5.67 Wm^{-2}K^{-4}$ )
$f$	Frekvencia (Hz)
$f_s$	Súčiniteľ oslnenia, (1)
$\Phi_H$	Intenzita toku entalpie
$\vec{u}$	Rýchlostné pole tekutiny (m . s <sup>-1</sup> )
$A$	Pohltivosť(1)
$c_p$	Merná tepelná kapacita (J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )
$D$	Priepustnosť(1)
$E$	Intenzita vyžarovania ( $Wm^{-2}$ )
$E_\varphi$	Intenzita vyžarovania v smere $ds$ ( $Wm^{-2}$ )
$E_{0\lambda}$	Intenzita vyžarovania ( $Wm^{-2}$ )
$E_0$	Integrálna intenzita vyžarovania ( $Wm^{-2}$ )
$g$	Gravitačné zrýchlenie (m/s <sup>-2</sup> )
$Gr$	Grashofovo kritérium (1)
$Gz$	Greatzovo kritérium(1)
$h$	Planckova konštanta ( $6,6256*10^{-34} J*s$ )
$\dot{H}$	Tok entalpie prúdením (kJ . kg <sup>-1</sup> )
$I_\varphi$	Smerová intenzita vyžarovania ( $W.m^{-2}$ )
$I_{0,\varphi}$	Smerová intenzita vyžarovania čierneho telesa ( $W.m^{-2}$ )
$I_{0,n}$	Smerová intenzita vyžarovania v smere normál k povrchu ( $W.m^{-2}$ )
$l$	Charakteristická dĺžka (m)
$k$	Súčiniteľ prostupu tepla ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )
$L$	Plošná žiarivosť ( $W.s.r^{-1}$ )
$\dot{m}$	Hmotnostný tok (kg . s <sup>-1</sup> )
$Nu$	Nusseltovo kritérium (1)

$P$	Žiarivý tok (W)
$Pe$	Pécletovo kritérium (1)
$Pr$	Prandtlovo kritérium (1)
$q$	Hustota tepelného toku ( $W \cdot m^{-2}$ )
$q_z$	Hustota tepelného tok v smere osi z ( $W \cdot m^{-2}$ )
$q_p$	Hustota tepelného toku v ľubovoľnom časovom okamihu ( $W \cdot m^{-2}$ )
$Q$	Teplo (J)
$Q$	Energia žiarenia (J)
$R$	Celkový tepelný odpor prostupu tepla ( $m \cdot K \cdot W^{-1}$ )
$R_\lambda$	Merný tepelný odpor ( $m \cdot K \cdot W^{-1}$ )
$R$	Obrazivosť (1)
$s$	Hrúbka steny (m)
$Re$	Reynoldsovo kritérium (1)
$T$	Teplota (K)
$t$	Teplota ( $^{\circ}C$ )
$T_b$	Stredná teplota tekutiny (K)
$T_w$	Teplota povrchu steny (K)
$t_p$	Počiatočná teplota ( $^{\circ}C$ )
$v$	Rýchlosť prúdenia ( $m \cdot s^{-1}$ )
$\alpha$	Súčiniteľ prestupu tepla ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
$\beta$	Teplotná objemová rozťažnosť ( $10^{-3} \cdot K^{-1}$ )
$\eta$	Dynamická viskozita pri strednej teplote tekutiny (Pa .s)
$\eta_w$	Dynamická viskozita pri teplote steny (Pa .s)
$\lambda$	Súčiniteľ tepelnej vodivosti ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$\lambda$	Vlnová dĺžka (m)
$\nu$	Kinematická viskozita ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
$\rho$	Hustota tekutiny ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$\sigma$	Stefanova - Boltzmannova konštanta ( $5,669 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ )
$\tau$	Čas (s)
$u$	Charakteristická rýchlosť prúdenia (m/s)
$\nabla$	Gradient teploty (K/m)
$\varphi$	Uhlový súčiniteľ (1)
$\Phi$	Tepelný tok (W)

---

$\Phi_m$	Intenzita toku hmotnosti(kg. s <sup>-1</sup> )
$\Delta\theta_{r,N}$	Parameter poklesu teploty (°C)
$a$	Súčiniteľ teplotnej vodivosti (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$q$	Intenzita toku tepla (W . m <sup>-2</sup> )
$\varepsilon$	Emisivita (1)
ČSN	Česká technická norma

**ZOZNAM OBRÁZKOV**

Obr. 1 Vedenie tepla jednovrstvovou rovinnou stenou [1].....	15
Obr. 2 Vedenie tepla rovinnou stenou [1].....	16
Obr. 3 Spektrum elektromagnetického žiarenia. [4].....	24
Obr. 4 Radiačné vlastnosti. [3]. .....	26
Obr. 5 Planckov a Wienov zákon. [3].....	28
Obr. 6 Voľba rozmerového systému v programe COMSOL MULTIPHYSICS .....	39
Obr. 7 Voľba modulu v programe COMSOL MULTIPHYSICS.....	39
Obr. 8 Ukážka vytvárania nových objektov geometrie .....	40
Obr. 9 Ukážka parametrov miestnosť č.1 .....	40
Obr. 10 Priradzovanie parametrov objektom.....	42
Obr. 11 Ukážka logickej operácie súčtu v programe COMSOL MULTIPHYSICS .....	43
Obr. 12 Ukážka logickej operácie rozdielu v programe COMSOL MULTIPHYSICS .....	43
Obr. 13 Geometrický náčrt miestnosti č.1.....	44
Obr. 14 Pridávanie materiálu. ....	45
Obr. 15 Priradenie vlastností materiálu k danému materiálu.....	46
Obr. 16 Priradenie materiálov k objektom miestnosti .....	46
Obr. 17 Ukážka priradenia parametru počiatočnej teploty a priradenia počiatočnej teploty k objektu .....	48
Obr. 18 Ukážka funkcie "T_vonkajšia". .....	49
Obr. 19 Ukážka priradenia funkcie k okrajovej podmienke. ....	49
Obr. 20 Funkcia vykurovania miestnosti. ....	50
Obr. 21 Vytvorenie mriežky s uzlovými bodmi, v ktorých bude prebiehať výpočet. ....	51
Obr. 22 Výsledok mriežkovania pre miestnosť č. 1. ....	51
Obr. 23 Nastavenie kroku a doby procesu. ....	52
Obr. 24 Priebeh teploty vo vonkajšom prostredí. ....	54
Obr. 25 Nadefinovanie miest pre zobrazenie 2D teplotných polí pri ohreve miestnosti č. 1. ....	55
Obr. 26 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 1 od dverí k oknu pri ohreve.....	56
Obr. 27 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 1 od ľavej steny k pravej pri ohreve .....	56
Obr. 28 Rozloženie teploty v reze č. 1 miestnosti č. 1 pri jej ohreve. ....	58

Obr. 29 Rozloženie teploty v reze č. 2 miestnosti č. 1 pri jej ohreve. ....	59
Obr. 30 Rozloženie teploty v reze č. 3 miestnosti č. 1 pri jej ohreve. ....	60
Obr. 31 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č.1 od dverí k oknu pri chladnutí.....	61
Obr. 32 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 1 od ľavej steny k pravej pri chladnutí. ....	62
Obr. 33 Rozloženie teploty v reze č. 1 miestnosti č. 1 pri jej chladení. ....	63
Obr. 34 Rozloženie teploty v reze č. 2 miestnosti č. 1 pri jej chladení. ....	64
Obr. 35 Rozloženie teploty v reze č. 3 miestnosti č. 1 pri jej chladení. ....	65
Obr. 36 Geometrický náčrt miestnosti číslo 2.....	66
Obr. 37 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 2 od okna k dverám pri ohreve. ....	69
Obr. 38 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 2 od ľavej steny k pravej pri ohreve. ....	70
Obr. 39 Ohrev miestnosti č. 2 v reze č. 1.....	71
Obr. 40 Rez č. 2 miestnosti č. 2 ohrev.....	72
Obr. 41 Ohrev miestnosti č. 2 v reze č. 3.....	73
Obr. 42 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 2 od okna k dverám pri chladení. ....	74
Obr. 43 Priebehy teplotných polí na krivke prechádzajúcej miestnosťou č. 2 od ľavej steny k pravej pri chladení.....	75
Obr. 44 Chladnutie miestnosti č. 2 v reze č. 1.....	76
Obr. 45 Chladnutie miestnosti č. 2 v reze č. 2.....	77
Obr. 46 Chladnutie miestnosti č. 2 v reze č. 1.....	78

**ZOZNAM TABULIEK**

Tabulka 1 Doporučené hodnoty pre rovnicu (26). [1] .....	23
Tabulka 2 Požadované hodnoty poklesu výslednej teploty v zimnom období. [7] .....	33
Tabulka 3 Zoznam parametrov pre tvorbu geometrie miestnosť č.1 .....	41
Tabulka 4 Definovanie vlastností materiálov. ....	45
Tabulka 5 Zoznam parametrov počiatočných podmienok.....	47
Tabulka 6 Zoznam parametrov pre okrajové podmienky miestnosti č.1 .....	49
Tabulka 7 Vlastností materiálov miestnosť č. 1. ....	54
Tabulka 8 Zoznam parametrov pre miestnosť č. 2. ....	67
Tabulka 9 Fyzikálne vlastnosti materiálov použitých v miestnosti č.2. ....	68