



ČESKÉ  
VYSOKÉ  
UČENÍ  
TECHNICKÉ  
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



ÚSTAV  
TECHNIKY  
PROSTŘEDÍ

**NÁZEV**

**ANALÝZA PODLAHOVÉHO OTOPNÉHO TĚLESA**

**ZADÁNÍ**

Analýza tepelně-technického chování inovovaného podlahového otopného tělesa na základě experimentálního měření a matematické simulace se zaměřením na teplotní pole ve vytápěném prostoru a samotného tělesa.

**ČÍSLO**

830-8301672B001 JVTP

**VYPRACOVALI**

Prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.

Ing. Tomáš Legner

**OBJEDNATEL**

Jihočeský vědeckotechnický park, a.s. pro ELVL s.r.o

**ROZSAH**

23 stran

**PŘÍLOHY**

30 na CD

**DATUM  
PŘEDÁNÍ**

15. únor 2017

## Obsah

1. Zadání projektu	.....	3
2. Metody řešení	.....	4
3. Harmonogram plnění projektu	.....	5
4. Experiment	.....	7
5. Bezkontaktní měření teplot	.....	12
6. Matematická simulace	.....	14
7. Závěr	.....	20
8. Seznam příloh	.....	22

## 1. Zadání projektu

Na základě vzniku smlouvy o poskytnutí služby mezi poskytovatelem, tj. Českým vysokým technickým učení v Praze a objednatelem, tj. Jihočeským vědeckotechnickým parkem, a.s. pro ELVL s.r.o., vzniklo plnění zadání sjednané a specifikované jednatelem společnosti ELVL p. Františkem Lapáčkem.

Společnost ELVL vyvíjí a rozšiřuje portfolio svých výrobků o nové řady otopných těles zaměřených na ekonomicky efektivní provoz pro dosažení úsporného vytápění se zajištěním tepelného komfortu ve vytápěném prostoru. Vzhledem k tomu, že firma nedisponuje technickým vybavením ani kvalifikovaným personálním obsazením potřebným pro měření, analýzu a simulaci chování otopných těles ve vytápěném prostoru, rozhodla se tyto odborné služby nakoupit u poskytovatele.

Zadání projektu se tak týká výzkumu v oblasti podlahového otopného tělesa BITHERM Floor 245/1000. Očekávaným výstupem projektu je analýza podlahového otopného tělesa vypracovaná na základě experimentálního měření a matematické simulace. Za cíl si klade objasnění tepelně technických projevů inovovaného otopného tělesa umístěného ve vytápěném prostoru v podlaze před prosklenou stěnou. Analýza je rovněž zaměřena na teplotní a proudové pole ve vytápěném prostoru, zejména na průběh teplotního pole v bezprostřední blízkosti prosklené stěny.

Inovovaným produktem v rámci tohoto projektu je nová řada otopných těles určených k vestavbě do podlahy před prosklené stěny. Výsledek projektu se stane součástí vyhodnocení inovace produktu, která má za cíl řešit následující problematiku ve vytápění.

Do současné doby se nepříznivé tepelné vlastnosti prosklených pláštěů u většiny budov řeší podlahovými konvektory, které využívají při sdílení tepla přirozené nebo nucené konvekce. Vzestupné proudění ohřátého vzduchu z konvektoru bez ventilátoru však uspokojivě nezabrání chladným padajícím proudům, tvořícím se na povrchu chladného okna, dostat se do pobytové zóny vytápěného prostoru. Povrch prosklené stěny zůstává chladný, neboť není dostatečně oslán či ofukován teplým vzduchem. Následkem je nežádoucí snižování střední radiační teploty místnosti a tím dochází ke snižování míry pocitu tepelné pohody. U konvekčního způsobu vytápění je pak nezbytné zvýšit teplotu vzduchu ve vytápěném prostoru, se kterou souvisí i vyšší tepelné ztráty a náklady na vytápění.

U inovovaných podlahových otopných těles je ze strany výrobce předpoklad, že se budou vyznačovat vyšší mírou tepelného záření a při umístění tělesa do podlahy před okno se projeví nejen konvekční, ale i sálavý efekt. Tento předpoklad je nutno ověřit a jeví se tak jako jeden z hlavních úkolů projektu.

## 2. Metody řešení

Poskytnuté služby spočívají v experimentální části, kde se jedná o laboratorní stanovení tepelného výkonu podlahového otopného tělesa, teplotního exponentu, který vyjadřuje změnu součinitele prostupu tepla stěnou tělesa v závislosti na teplotních parametrech a zmapování povrchových teplot termovizní technikou v rámci dynamického chování podlahového otopného tělesa (především náběh otopného tělesa). Poskytnuté služby spočívají rovněž v matematické simulaci děje sdílení tepla do definovaného vytápěného prostoru od definovaného podlahového otopného tělesa.

Vlastní experiment proběhl v halových laboratořích Ústavu techniky prostředí, kde byla postavena zkušební trať pro měření tepelného výkonu podlahového otopného tělesa za podmínek podle ČSN EN 442, avšak na tzv. otevřeném měřicím místě. Součástí experimentu bylo i bezkontaktní měření povrchových teplot podlahového otopného tělesa s cílem získání rozložení teplot jako vstupní údaj pro matematickou simulaci.

Matematická simulace byla provedena v programu Fluent na základě experimentálně získaných a s odběratelem projektu dohodnutých okrajových podmínek. K posouzení chování podlahového otopného tělesa ve vytápěném prostoru byla zvolena platforma Workbench od společnosti ANSYS. V platformě Workbench jsou zahrnuty nástroje pro tvorbu modelu, síť, výpočtu i vyhodnocení. Model byl vytvořen v programu Design Modeler.

### **3. Harmonogram plnění projektu**

#### ***Září 2016***

V září započaly přípravné práce na experimentu. Tyto práce započaly na základě Rozhodnutí o přidělení dotace ze dne 9. 9. 2016 i přesto, že ještě nebyla podepsána smlouva. Výstavba experimentální tratě spočívala v instalaci mobilního zdroje tepla s jemným ultratermostatem, který je schopen držet teplotu přívodní vody s přesností  $\pm 0,1$  °C. Byly osazeny teploměrné jímky a vzájemně oceňován plovákový průtokoměr spolu s ultrazvukovým průtokoměrem pro měření průtoku podlahovým otopným tělesem. Po podepsání smlouvy dne 26. 9. 2016 bylo zahájeno jednání se společností ELVL s.r.o o dodání požadovaného vzorku.

#### ***Říjen 2016***

Dne 12. 10. 2016 byl dodán dohodnutý a oběma stranami schválený vzorek podlahového otopného tělesa v podobě geometrického modulu ( $L = 1$  m) za účelem zkoumání tepelného modulu ( $Q$  ve W/m). Tento vzorek byl neprodleně instalován do měřicí tratě a zahájeno měření.

Vzhledem k tomu, že Ústav techniky prostředí nedisponuje kalorimetrickou komorou podle ČSN EN 442, bylo měření provedeno na tzv. otevřeném měřicím místě. Ostatní podmínky byly dle ČSN EN 442. Splnění podmínek určených ČSN EN 16430-2 pro měření podlahových konvektorů s ochlazovanou instalační stěnou s teplotou 16 °C však naše laboratoř neumožňuje.

Měření probíhalo při šesti stacionárních teplotních stavech. Z nich byl vyhodnocen tepelný výkon, teplotní exponent otopného tělesa, charakteristická rovnice otopného tělesa a podíl tepelného výkonu sdíleného sáláním. Měření bylo realizováno pro případ s instalovanou reflexní fólií pod výměníkem na dně skříně otopného tělesa a bez instalace reflexní fólie.

S prvními zpracovanými výsledky experimentu byl dne 14. 11. 2016 telefonicky seznámen jednatel společnosti ELVL s.r.o. pan František Lapáček.

#### ***Listopad 2016***

Pro stanovení rovnoměrnosti rozložení teplot byla využita termovizní technika (termokamera Flir T460), kdy byly snímány povrchové teploty tělesa při náběhu na jmenovité teplotní parametry a za ustáleného stavu se jmenovitými teplotami vstupní a vratné vody. Vše bylo vyhodnoceno v programu ThermaCAM Researcher.

V listopadu proběhlo dokončení tvorby geometrického modelu vytápěného prostoru s podlahovým otopným tělesem. Bylo provedeno první zasíťování modelu programem Ansys Meshing a konzultováno se specialisty na matematické simulace. Původní úvaha byla, řešit model jako symetrický podle roviny, která prochází středem okna. S ohledem na maximální zpřesnění však uvažujeme model nezjednodušeně, tj. jako celek.

### *Prosinec 2016*

Byla spuštěna první matematická simulace se zadanými okrajovými podmínkami, které byly získány experimentem. Boční stěny, zadní stěna, strop a podlaha jsou definovány jako adiabatické, kde tepelný tok stěnami je roven nule. Okrajové podmínky u venkovní stěny jsou zadány přes přestup tepla na venkovní stěně a venkovní teplotu vzduchu. Podmínky jsou doplněny o tepelně technické vlastnosti okna a venkovní stěny. Vlastnosti stěn jsou voleny tak, aby výsledná teplota ve vytápěném prostoru dosahovala rozpětí 20 až 22 °C a zároveň součinitel prostupu tepla stavebních konstrukcí odpovídal ČSN 73 0540. Tepelně technické parametry okna byly zadány dle požadavku odběratele projektu. Hodnotícím parametrem je střední radiační teplota. Posuzovat budeme rovněž teplotní a proudové pole ve vytápěném prostoru.

Vzhledem k plnému posouzení se ukázalo, že bude nutné realizovat ještě druhou matematickou simulaci pro čistě teplovzdušné vytápění.

### *Leden 2017*

Bylo upraveno zasílávání modelu a povrchová teplota podlahového otopného tělesa. První s ohledem na konvergenci a druhé s ohledem na získání výsledné teploty uprostřed vytápěné místnosti v požadovaných mezích.

Byla spuštěna matematická simulace pro čistě teplovzdušné vytápění, kde přívod teplého vzduchu je ve stejném místě a o stejném půdorysném rozměru, jako je podlahové otopné těleso. Nutnou podmínkou posouzení je dosažení stejné výsledné teploty v definičním místě (střed vytápěné místnosti ve výšce 1,5 m), jako u prvního modelu. Rozhodujícím výsledkem pak bude porovnání středních radiačních teplot u prvního a druhého matematického modelu. Toto porovnání umožní posoudit vliv radiační složky od podlahového otopného tělesa.

### *Únor 2017*

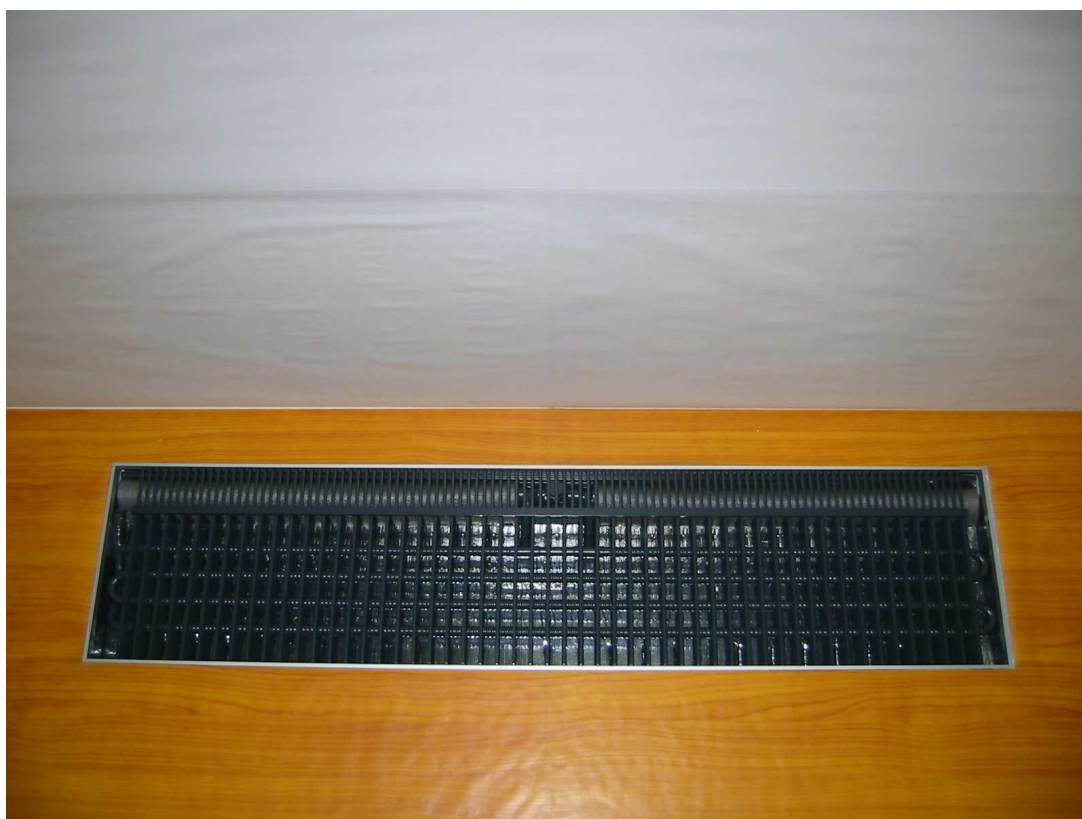
Posouzení a vyhodnocení výsledků matematické simulace. Diskuse výsledků se zaměřením se na přínosy pro praxi, tj. odběratele projektu. Sepsání závěrečné zprávy a její předání odběrateli a objednateli. Projednání závěrečné zprávy s jednatelem společnosti ELVL, její převzetí, předání vzorku podlahového otopného tělesa BITHERM Floor 245/1000 a podepsání předávacích protokolů.

## 4. Experiment

V září započaly přípravné práce na experimentu. Výstavba experimentální tratě spočívala v instalaci mobilního zdroje tepla s jemným ultratermostatem, který je schopen držet teplotu přívodní vody s přesností  $\pm 0,1$  °C. Byly osazeny teploměrné jímky a vzájemně ocejchován plovákový průtokoměr spolu s ultrazvukovým průtokoměrem pro měření průtoku podlahovým otopným tělesem.

Po dodání dohodnutého a oběma stranami schváleného vzorku podlahového otopného tělesa byl vzorek neprodleně instalován do měřicí tratě a zahájeno měření. Otopné těleso bylo v podobě geometrického modulu ( $L = 1$  m) za účelem zkoumání tepelného modulu ( $Q$  ve W/m).

Vzhledem k tomu, že Ústav techniky prostředí nedisponuje kalorimetrickou komorou podle EN 442, bylo měření provedeno na tzv. otevřeném měřicím místě. Ostatní podmínky byly dle ČSN EN 442. Splnění podmínek určených ČSN EN 16430-2 pro měření podlahových konvektorů s ochlazovanou instalační stěnou s teplotou 16 °C však naše laboratoř neumožňuje. V rámci povrchové úpravy měřicího místa byla co nejvíce zohledněna instalační praxe a dbalo se na jednotnou emisivitu roviny uložení podlahového otopného tělesa a instalační stěny (viz obr. 1 až 3).



*Obr. 1 Pohled na instalované podlahové otopné těleso BITHERM Floor 245/1000*

Měření probíhalo při šesti stacionárních teplotních stavech. Z nich byl vyhodnocen tepelný výkon, teplotní exponent otopného tělesa, charakteristická rovnice otopného tělesa a podíl tepelného výkonu sdíleného sáláním. Měření bylo realizováno pro dvě instalační provedení. První případ bylo provedení s instalovanou reflexní fólií pod výměníkem tepla (žebrovkou) na



dně skříně otopného tělesa. Druhé měření bylo provedeno bez instalace reflexní fólie na dně skříně podlahového otopného tělesa pod výměníkem tepla. Schéma měřicí tratě je uvedeno na obr. 4.



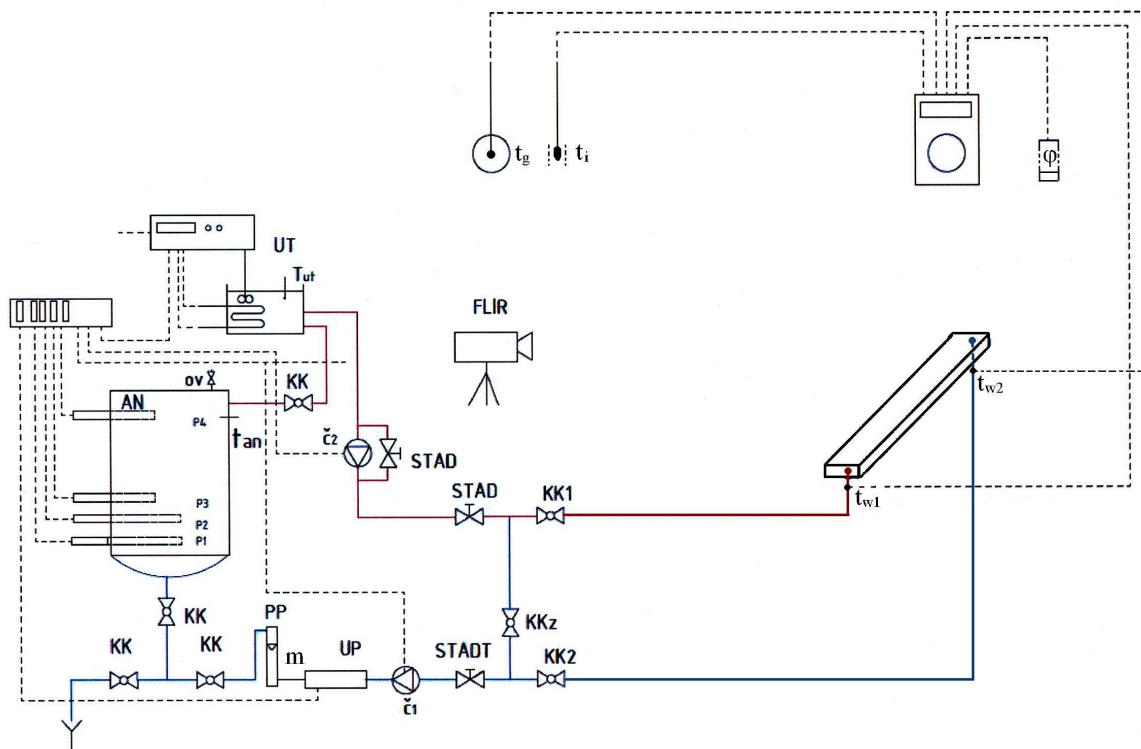
*Obr. 2 Pohled na detail pravé strany instalovaného podlahového otopného tělesa BITHERM Floor 245/1000*



*Obr. 3 Pohled na detail levé strany instalovaného podlahového otopného tělesa BITHERM Floor 245/1000*



S prvními zpracovanými výsledky experimentu byl telefonicky dne 14. 11. 2016 seznámen jednatel společnosti ELVL s.r.o. pan František Lapáček.



Obr. 4 Schéma měřicí tratě

### Měření s reflexní fólií na dně skříně otopného tělesa

Bylo provedeno šest měření pro různé teplotní parametry včetně jmenovitých 75/65/20 °C. Měření tepelného výkonu vykazuje nejistotu měření 3,5 %. Z naměřených a vyhodnocených hodnot byla stanovena charakteristická rovnice podlahového otopného tělesa ve tvaru:

$$Q = 0,9459 \cdot \Delta t^{1,421},$$

kde je  $Q$  tepelný výkon otopného tělesa [W],  
 $\Delta t$  teplotní rozdíl mezi střední teplotou vody a teplotou vzduchu [W],  
 0,9459 konstanta měřeného vzorku  $K_M$ ,  
 1,421 teplotní exponent měřeného otopného tělesa  $n$ .

Výsledky zkoušky obsahovaly šest sad měření proměnných veličin. Tak jsme mohli vyjádřit každou rovnici jako součet  $N$  identických rovnic, z nichž do každé byla zahrnuta jedna sada měření. Využili jsme metodu nejmenších čtverců a teplotní exponent  $n$  byl stanoven ze získaných tepelných výkonů při šesti teplotních stacionárních stavech z následujícího vztahu:

$$n = \frac{N \cdot \sum [(\log \Delta t \cdot \log \dot{Q})] - \sum (\log \Delta t) \cdot \sum (\log \dot{Q})}{N \cdot \sum [(\log \Delta t)^2] - (\sum \log \Delta t)^2}.$$

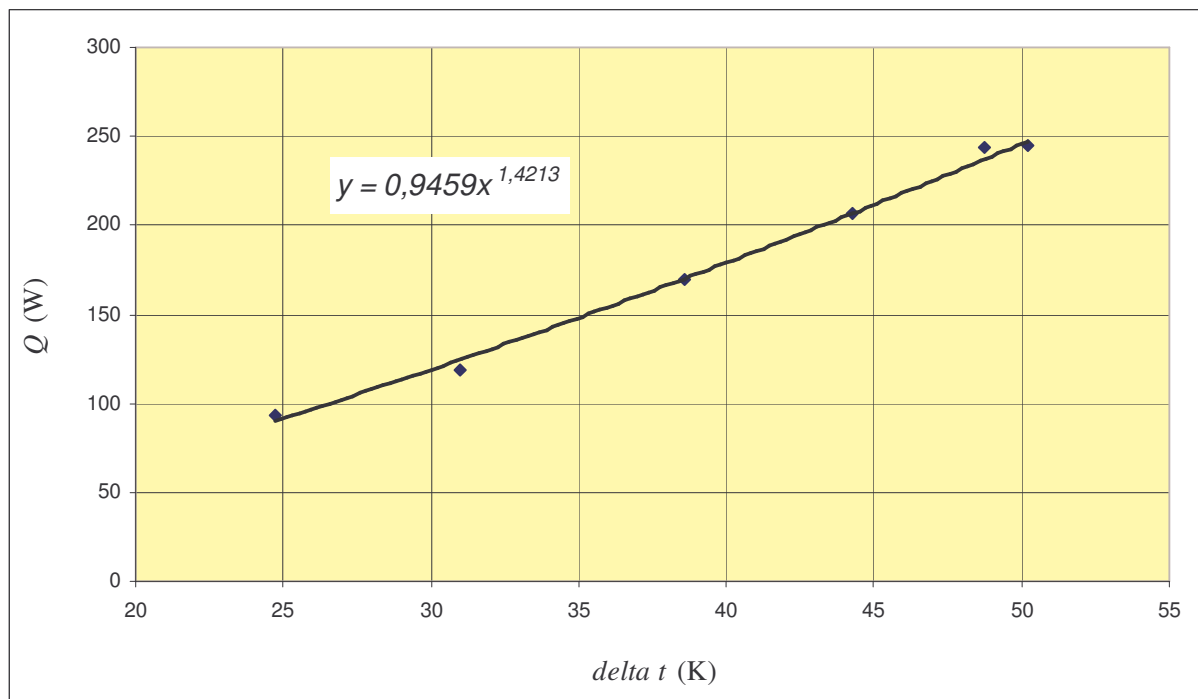
Teplotní exponent otopného tělesa s reflexní fólií je  $n = 1,421$ .

Přes měření výsledné teploty cejchovaným kulovým teploměrem o průměru 150 mm jsme výpočtem vyhodnotili střední radiační teplotu, na základě které byl stanoven podíl tepelného výkonu sdíleného do vytápěného prostoru sáláním. Toto měření je zatíženo nejistotou měření cca 4,5 %. Tepelný výkon sdílený do vytápěného prostoru sáláním a konvekcí je dán vztahem

$$Q = Q_s + Q_k,$$

kde  $Q_k$  je podíl tepelného výkonu sdílený do vytápěného prostoru konvekcí a  $Q_s$  je podíl tepelného výkonu sdílený do vytápěného prostoru sáláním. Ten je pro námi zkoumané těleso menší jak 1 %.

Jmenovitý tepelný výkon při teplotních parametrech 75/65/20 °C je 246 W.



Obr. 5 Vyhodnocení měření pro stanovení rovnice otopného tělesa s reflexní fólií

### **Měření bez reflexní fólie na dně skříně otopného tělesa**

Opět bylo provedeno šest měření pro různé teplotní parametry včetně jmenovitých 75/65/20 °C. Toto měření je rovněž zatíženo nejistotou měření 3,5 %. Z naměřených a vyhodnocených hodnot byla stanovena charakteristická rovnice otopného tělesa ve tvaru:

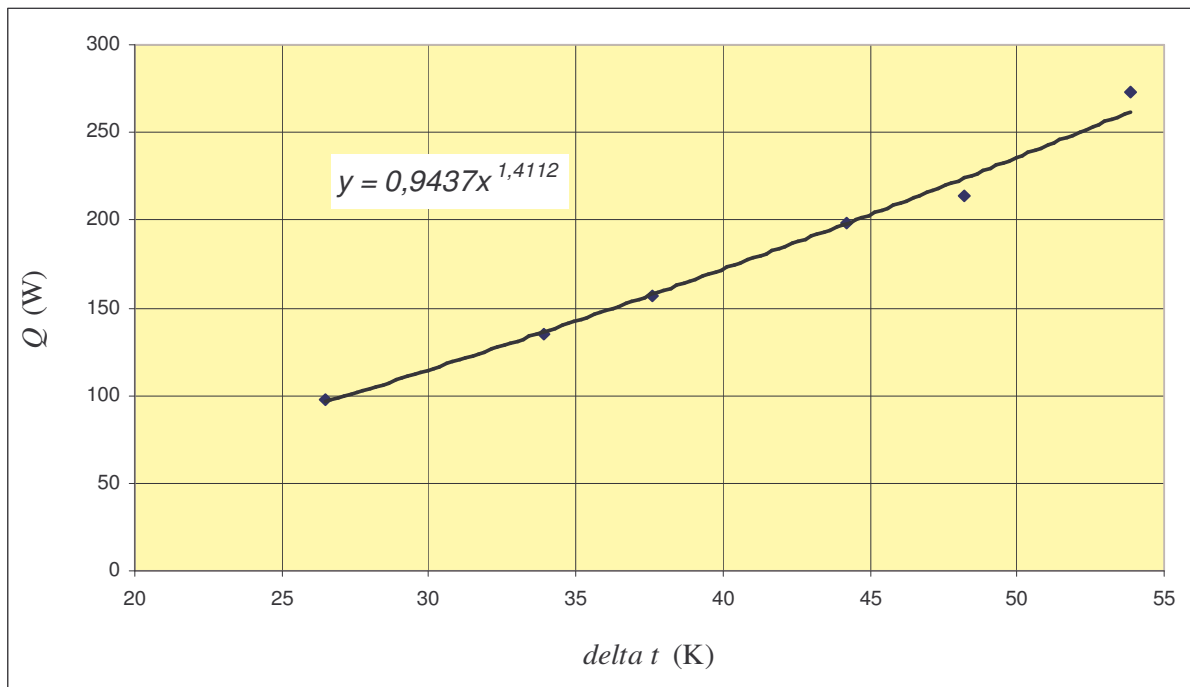
$$Q = 0,9437 \cdot \Delta t^{1,411},$$

kde je  $Q$  tepelný výkon otopného tělesa [W],  
 $\Delta t$  teplotní rozdíl mezi střední teplotou vody a teplotou vzduchu [W].

Teplotní exponent otopného tělesa bez reflexní fólie byl stanoven na  $n = 1,411$ .

Přes měření výsledné teploty cejchovaným kulovým teploměrem o průměru 150 mm jsme opět výpočtem vyhodnotili střední radiační teplotu, na základě které byl stanoven podíl tepelného výkonu sdíleného do vytápěného prostoru sáláním. Toto měření je rovněž zatíženo nejistotou měření cca 4,5 %. Podíl tepelného výkonu sdílený sáláním je pro námi zkoumané těleso opět menší jak 1 %.

Jmenovitý tepelný výkon při teplotních parametrech 75/65/20 °C je 236 W.



Obr. 6 Vyhodnocení měření pro stanovení rovnice otopného tělesa bez reflexní fólie

S ohledem na skutečnost, že se v obou případech stanovení tepelného výkonu jedná o tepelný modul  $Q_M$  [W/m] může být výkon otopných těles o jiné délce stanoven ze vztahu

$$Q = Q_M \cdot L, \quad [\text{W}]$$

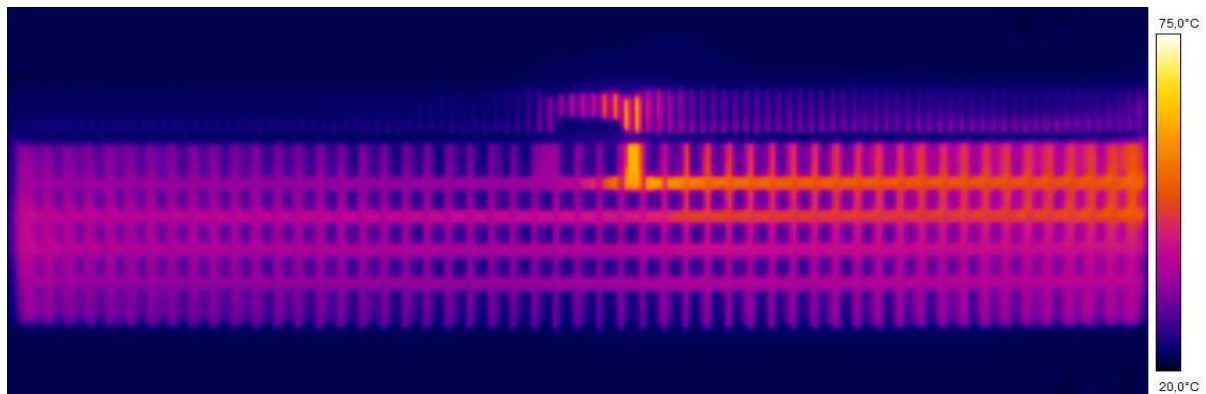
kde  $L$  je délka žebrované části otopného tělesa.

V obou případech se nepodařilo prokázat předpoklad výrobce o výrazném navýšení sálavé složky unikátním návrhem rozšířené přestupní plochy (lamel). Tento prozatímní závěr může být výrazně ovlivněn metodikou měření podlahového otopného tělesa podle ČSN EN 442 a nikoli podle ČSN EN 16430-2. Rozhodující z hlediska zastoupení sálavé složky výkonu tak budou závěry z matematické simulace. Zde bude rozhodující, zda ze při stejné výsledné teplotě změní střední radiační teplota ve vytápěném prostoru oproti čistě teplovzdušnému vytápění.

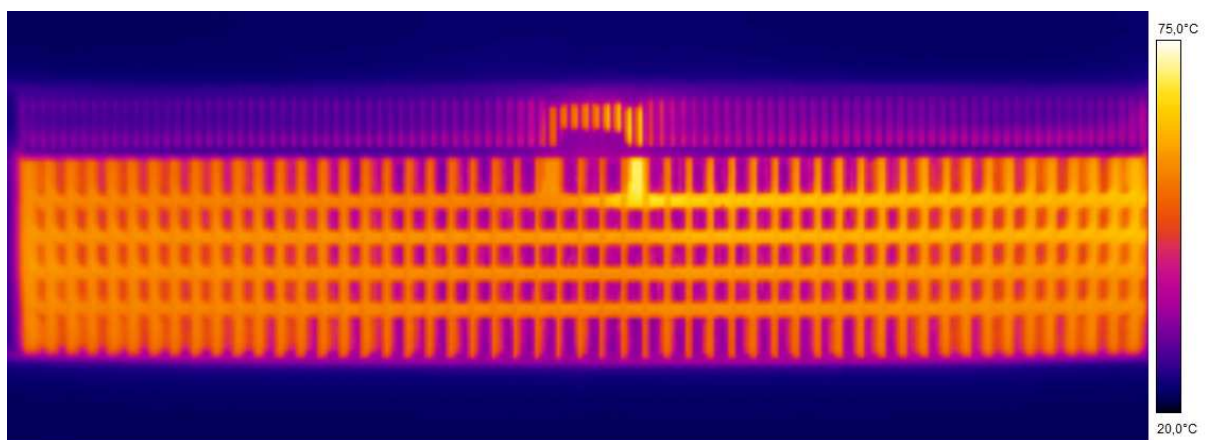
## 5. Bezkontaktní měření teplot

### *Stanovení rovnoměrnosti rozložení teplot pro matematickou simulaci*

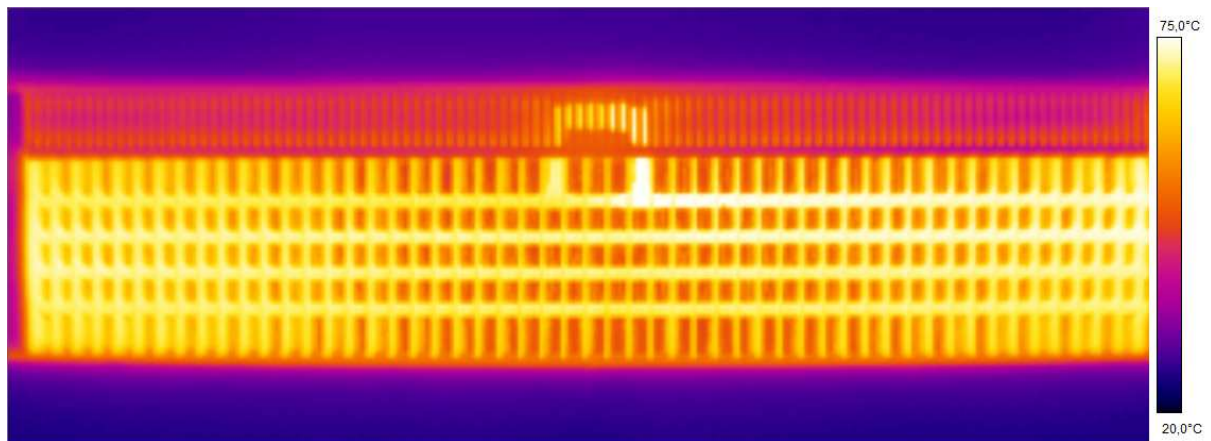
S ohledem na zpřesnění okrajových podmínek matematické simulace bylo potřebné rozhodnout o zadávání povrchové teploty otopného tělesa, resp. povrchové teploty jednotlivých lamel. Tj. vyhodnotit, zda je možné po celé délce a hloubce otopného tělesa zadávat stejnou teplotu, nebo zda se s délkou výrazně mění. K tomuto účelu byla využita termovizní technika (termokamera Flir T460), kdy byly snímány povrchové teploty tělesa při náběhu na jmenovité teplotní parametry a za ustáleného stavu se jmenovitými teplotami vstupní a vratné vody. Po vyhodnocení v programu ThermaCAM Researcher bylo zjištěno, že se po délce otopného tělesa střední teplota lamel mění pouze v rozsahu desetin °C s maximálním rozdílem 1 °C. Tato část experimentu prokázala, že je možné do matematické simulace zadávat jednotnou povrchovou teplotu otopného tělesa po celé jeho délce v rámci jeho kvazistacionárního stavu.



*Obr. 7 Termogram snímání náběhu podlahového otopného tělesa v normále při jmenovité teplotě přívodní vody 75 °C, teplotě vzduchu 20 °C a jmenovitém hmotnostním průtoku v čase 6 min od počátku náběhu*



*Obr. 8 Termogram snímání náběhu podlahového otopného tělesa v normále při jmenovité teplotě přívodní vody 75 °C, teplotě vzduchu 20 °C a jmenovitém hmotnostním průtoku v čase 15 min od počátku náběhu*

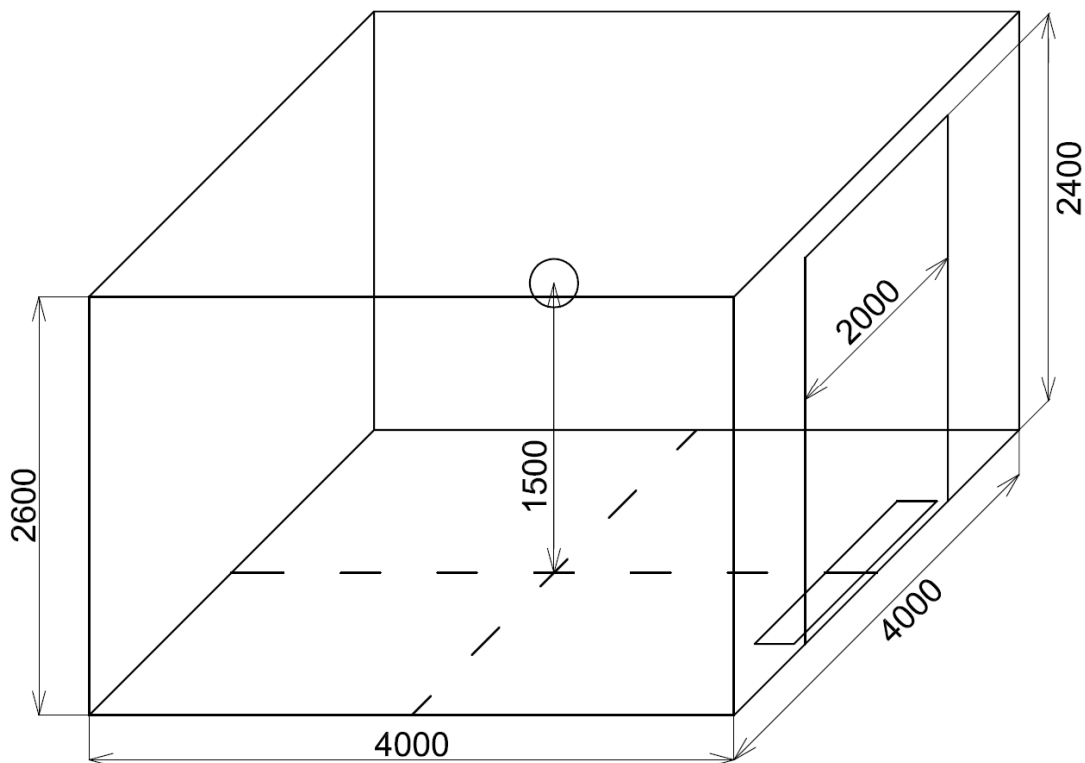


*Obr. 9 Termogram snímání podlahového otopného tělesa v normále za jmenovitých podmínek 75/65/20 °C a ustáleného stavu*

Zdánlivá nerovnoměrnost teplotního pole u podlahového otopného tělesa při stacionárním, resp. kvazistacionárním stavu na obr. 9 je způsobena zkreslením objektivu díky vzdálenosti snímání otopného tělesa.

## 6. Matematická simulace

Po poměrně náročné tvorbě geometrického modelu, kdy jsme chtěli postihnout unikátní provedení rozšířené přestupní plochy (lamel), bylo provedeno první zasíťování modelu a konzultováno se specialisty na matematické simulace. Model představuje místnost o rozměrech 4 x 4 x 2,6 m s oknem o rozměrech 2 x 2,4 m a sledované otopné těleso je umístěno v podlaze ve vzdálenosti 70 mm od prosklené stěny (vše stanoveno po dohodě s jednatelem společnosti ELVL s.r.o). Původní úvaha byla, řešit model jako symetrický podle roviny, která prochází středem okna a podlahového otopného tělesa. Od této úvahy jsme vzhledem k maximálnímu zpřesnění modelu ustoupili, a přesto, že bude model značně časově náročný v rámci vlastní výpočetní práce a příslušného hardware, uvažujeme model nezjednodušeně jako celek.

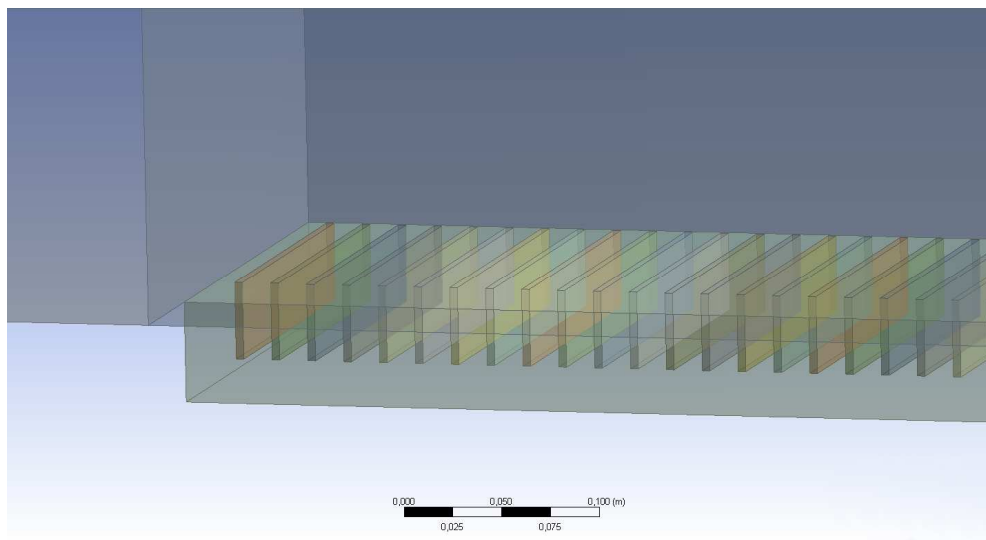


Obr. 10 Náčrt řešené místnosti s podlahovým otopným tělesem

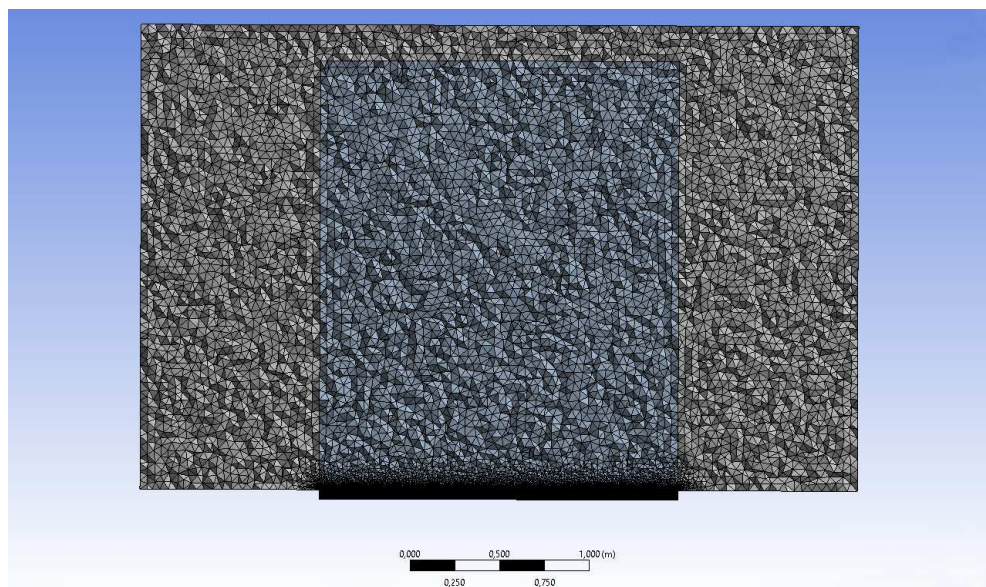
Podlahové otopné těleso je o rozměru 2000 x 245 mm, tedy o šířce stejné jako u měřeného experimentu. Dále je v modelu místnosti uvažováno umístění kulového teploměru půdorysně do středu místnosti ve výšce 1,5 m nad podlahou. Místnost je modelována v celém rozsahu a není zde žádné zjednodušení modelu pomocí rovin symetrie, aby bylo možné modelovat proudění ve všech směrech v blízkosti okna. Jsou tím ovšem kladeny mnohem větší nároky na výpočetní techniku a na čas výpočtu matematické simulace.

Geometrický model je vytvořen v prostředí ANSYS DesignModeler. Podlahové otopné těleso je modelováno velice detailně. Je vytvořen model skříně (vany) a v ní jsou umístěny jednotlivé lamely přesně tak, jak je tomu dáno u reálného tělesa. U tělesa délky 2000 mm se jedná o počet 105 lamel. Kulový teploměr tvoří dutý povrch o průměru 100 mm. Dále je vymodelován celý objem místnosti s rozdělenou jednou stěnou na ochlazovanou stěnu obvodové konstrukce a ochlazované okno. K ploše ochlazovaného okna je přiřazena i část objemu místnosti pro jemnější zasíťování.





*Obr. 11 Detail geometrického modelu lamel*



*Obr. 12 Zasíťování modelu – řez podélnou rovinou středu podlahového otopné těleso*

Geometrický model o uvedených rozměrech je dále nutné zasíťovat, neboli rozdělit na velké množství malých konečných objemů, aby mohl být proveden výpočet. Toto rozdělení musí být provedeno s ohledem na kvalitu a přesnost výpočtu tak, aby geometrie buněk dodržovala určité poměry velikostí stran.

Geometrický model byl exportován do prostředí ANSYS Meshing. Oblasti podlahového otopného tělesa a ochlazované plochy okna jsou zasíťovány jemněji větším počtem buněk, protože zde bude docházet ke střetu proudů - teplého konvektivního proudu od otopného tělesa a chladného konvektivního proudu od studeného povrchu okna. Dále je uveden pohled na zasíťování v rovině podélné osy podlahového otopného tělesa. Maximální velikost buněk v modelu je 50 mm. Při jemnějším zasíťování již zmíněných oblastí je velikost buněk v řádu jednotek milimetrů. Celkový počet buněk dosáhl hodnoty téměř 8 500 000.

## **6.1 Nastavení simulace**

Zasíťovaný model byl exportován do prostředí ANSYS Fluent. Nejdříve jsou definovány materiály, které budou uvažovány v modelu a to vlastnosti vzduchu, hliníku (lamely podlahového otopného tělesa jsou hliníkové) a také veškeré zdivo. Součinitelé prostupu tepla stavebních konstrukcí odpovídaly ČSN 73 0540. Tepelně technické parametry okna byly zadány dle požadavku odběratele projektu. Hodnotícím parametrem je střední radiační teplota. Posuzováno bylo rovněž teplotní a proudové pole ve vytápěném prostoru.

Na základě doporučených tepelně technických vlastností a rozdílu teplot je určen měrný tepelný tok oknem a ochlazovanou stěnou v hodnotách  $38,4 \text{ W/m}^2$  a  $8 \text{ W/m}^2$ . Tyto hodnoty jsou nastaveny jako okrajové podmínky pro zmíněné povrchy. Z výsledků experimentu uvažujeme jednotnou povrchovou teplotu na všech lamelách. Povrchová teplota (tepelný výkon tělesa) musí zajistit pokrytí tepelných ztrát v prostoru přes ochlazovanou stěnu a okno, ostatní povrchy jsou uvažovány jako adiabatické s nulovým tepelným tokem. Povrchová teplota otopné plochy byla pomocí matematické simulace určena na střední hodnotu  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Dále byl nastaven model turbulence  $k-\varepsilon$  s modelováním proudění u stěny pomocí funkce Enhanced Wall Treatment. Model sálání je nastaven S2S a do výpočtu sálání jsou zahrnuty všechny povrchy v prostoru.

Pro porovnání vlivu sálavé složky tepelného výkonu podlahového otopného tělesa je vytvořena také simulace s teplovzdušným vytápěním se stejným nastavením, jako bylo uvedeno pro model s podlahovým otopným tělesem. Pouze místo podlahového otopného tělesa je ze stejného půdorysného průřezu přiváděn teplý vzduch o výstupní rychlosti  $0,5 \text{ m/s}$  o takové teplotě, aby výsledná teplota kulového teploměru byla stejná jako u simulace s podlahovým otopným tělesem

Nutnou podmínkou posouzení je dosažení stejné výsledné teploty v definičním místě (střed vytápěné místnosti ve výšce  $1,5 \text{ m}$ ), přičemž rozhodujícím výsledkem bude porovnání středních radiačních teplot u prvního a druhého matematického modelu.

## **6.2 Výsledky první matematické simulace – model s podlahovým otopným tělesem**

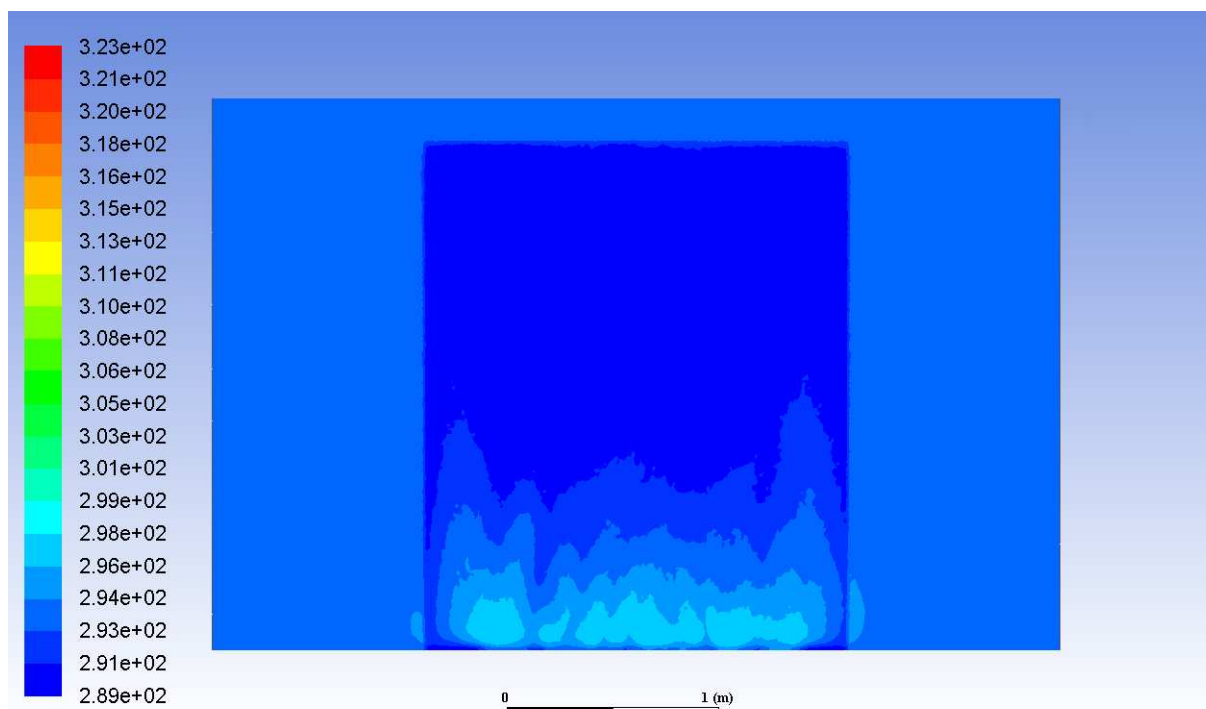
Matematická simulace byla provedena pro počet  $12\,000$  iterací, aby veškeré proudění a teploty byly ustálené. V první řadě byla zjištěna výsledná teplota kulového teploměru v hodnotě  $21,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Této hodnoty s maximální odchylkou  $0,1 \text{ K}$  (lépe  $0,05 \text{ K}$ ) je potřeba dosáhnout i u druhé simulace, aby bylo možné porovnat střední radiační teplotu prostoru, a tím určit vliv sálavé složky tepelného výkonu podlahového otopného tělesa.

Byla vyhodnocena střední radiační teplota všech povrchů (tj. i otopného tělesa) na hodnotu  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tato hodnota bude později porovnána se střední radiační teplotou u druhého modelu. Pro porovnání je také důležitá hodnota průměrné povrchové teploty u ochlazovaného okna, která má v případě matematické simulace s podlahovým otopným tělesem hodnotu  $18,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tab. 1 Výsledky vybraných teplot z první simulace

Výsledná teplota kulového teploměru	21,7 °C
Střední radiační teplota v místnosti	21,0 °C
Povrchová teplota ochlazovaného okna	18,2 °C

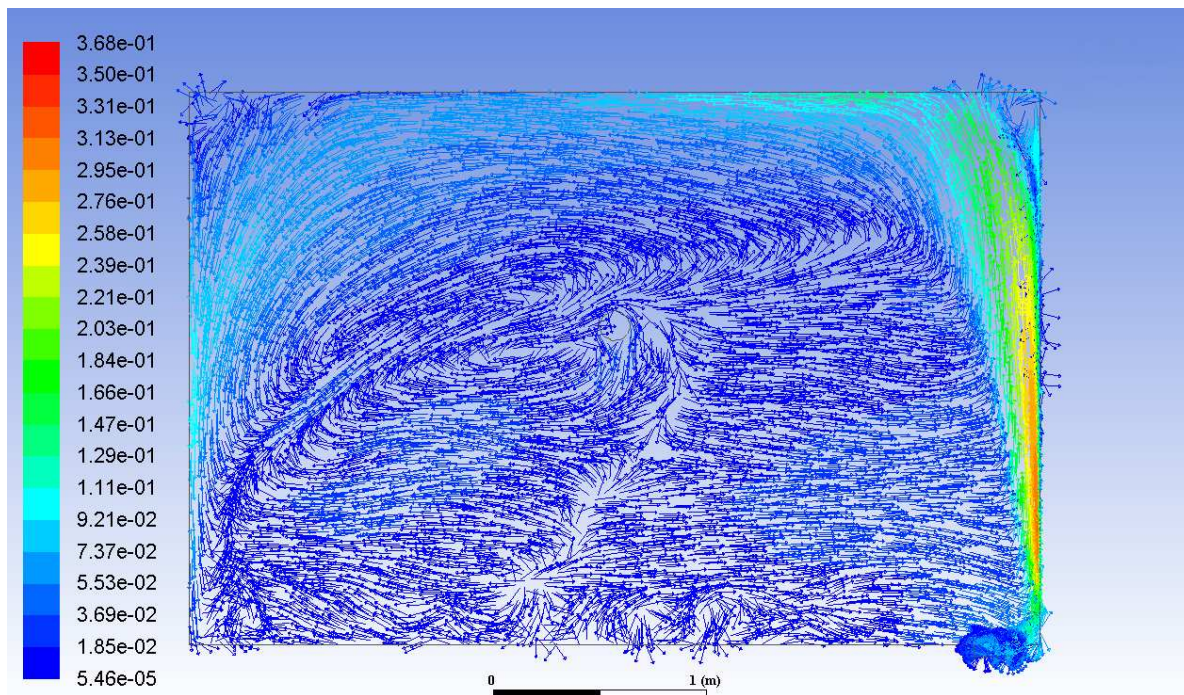
Na obr. 13 je uvedeno teplotní pole na povrchu ochlazovaného okna a ochlazované stěny. Ve spodní části okna je patrné zvýšení povrchové teploty od podlahového otopného tělesa a směrem vzhůru po okně tato teplota mírně klesá. Hodnoty teplot ve všech obrázcích teplotního pole jsou v Kelvinech a hodnoty rychlostí jsou v m/s.



Obr. 13 Teplotní pole na povrchu ochlazovaného okna a stěny

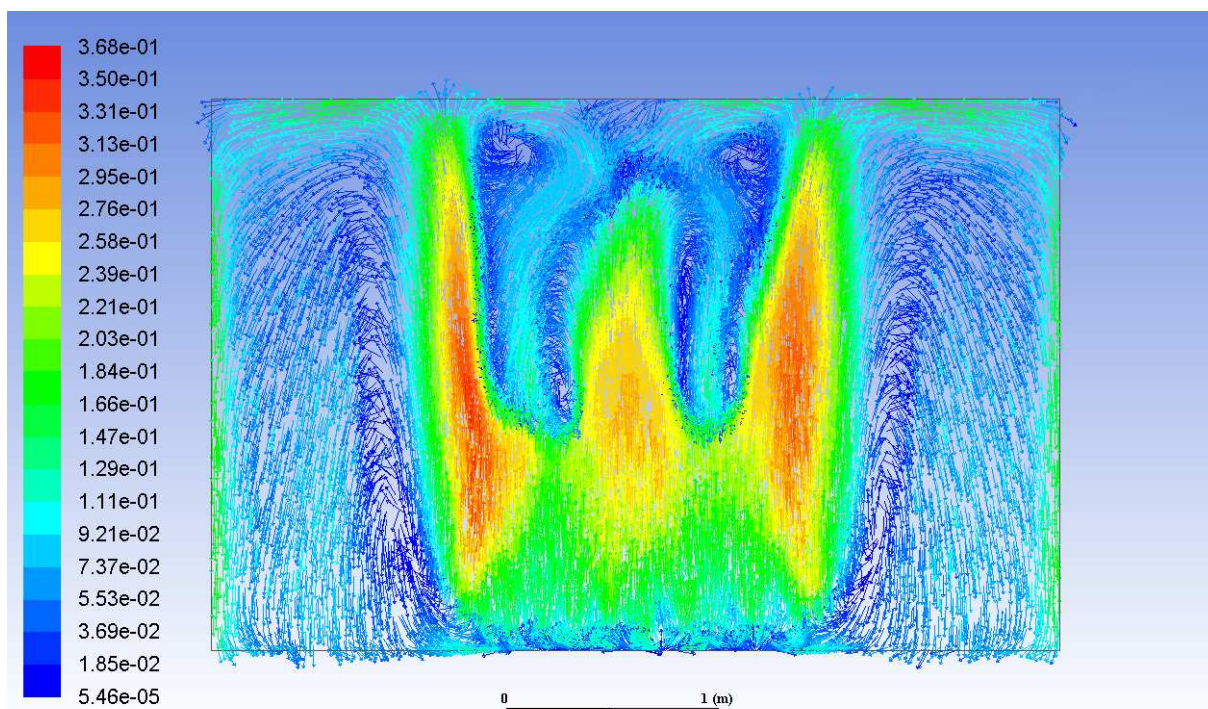
Na obr. 14 je uveden řez osou místnosti kolmo na okno a v něm zobrazené rychlostní vektorové pole. Z obrázku je patrné, že podlahové otopné těleso nejenom zvyšuje povrchovou teplotu okna, ale také eliminuje studené konvektivní proudy od okna a vytváří stoupající teplé proudění v blízkosti povrchu okna a po celé jeho délce (šířce). Velice zajímavý úkaz lze pozorovat u vertikálních řezů vedených v délce tělesa kolmo na prosklenou stěnu (viz příloha 1.01 a 1.02). Zde se zdá, že směr teplých konvekčních proudů od podlahového otopného tělesa a jejich intenzita dokáží ve spodní části okna dokonce odtrhnout mezní vrstvu chladných proudů a zvýšit povrchovou teplotu okna spolu s velmi mírným podílem sálavé složky tepelného výkonu. V tomto ideálním modelu bez jakýchkoli překážek, dochází díky přirozenému proudění v celém objemu místnosti k dokonalému proplachování vytápěné místnosti, kdy nevznikají místa, kde by se v reálném případě mohla tvořit vlhkost a plíseň na povrchu ochlazovaných stěn.





*Obr. 14 Rychlostní pole ve vertikálním řezu rovinou kolmou na okno v polovině délky podlahového otopného tělesa*

Na obr. 15 je uvedeno rychlostní pole ve vertikálním řezu rovinou rovnoběžnou s oknem ve vzdálenosti 50 mm od povrchu okna. Na tomto obrázku je potvrzeno, že podlahové otopné těleso eliminuje chladné konvektivní proudy po celé délce otopného tělesa a zde i okna. V příloze této zprávy jsou uvedena další zobrazení teplotních a rychlostních polí v různých rovinách řezu místností.



*Obr. 15 Rychlostní pole ve vertikálním řezu rovinou rovnoběžnou s oknem ve vzdálenosti 50 mm od povrchu okna*

### 6.3 Výsledky druhé matematické simulace – model s teplotovzdušným vytápěním

Druhá matematická simulace byla také provedena pro více než 12 000 iterací. U této simulace bylo důležité správné nastavení teploty přírodního vzduchu, aby bylo dosaženo stejné výsledné teploty na kulovém teploměru jako v první simulaci. Shodná výsledná teplota kulového teploměru vyšla pro hodnotu přírodního vzduchu 21,7 °C.

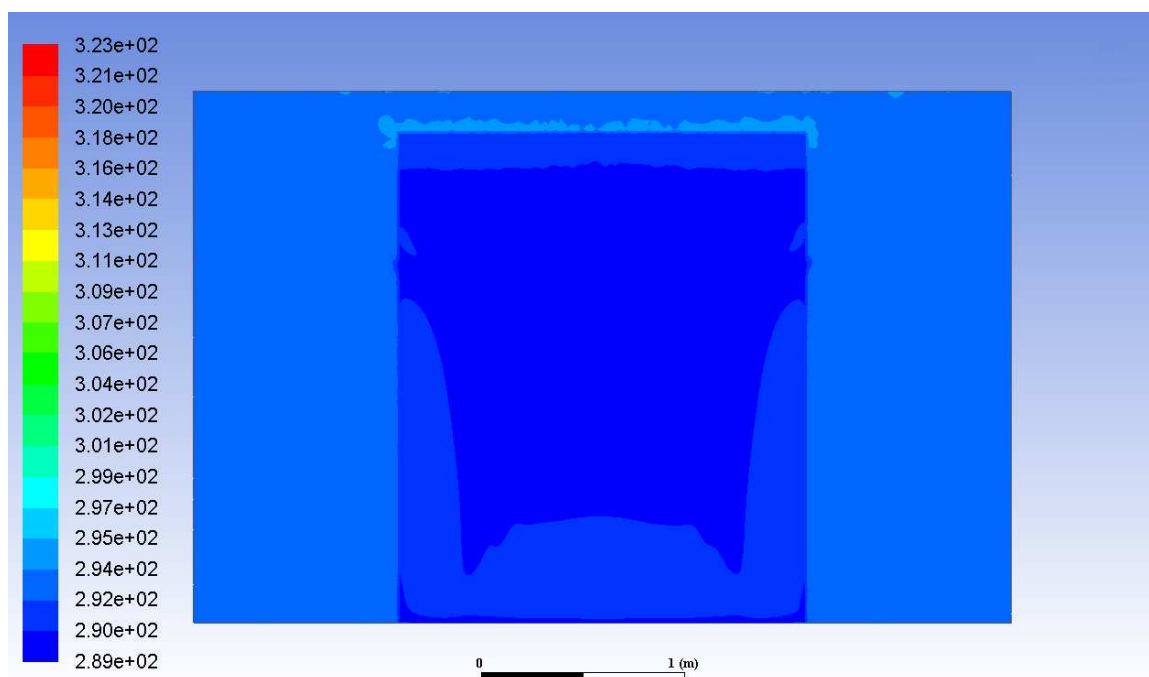
V tabulce 2 jsou pro porovnání uvedeny ještě hodnoty povrchové teploty okna a střední radiační teploty v místnosti. Obě tyto teploty vychází nižší, než u modelu s podlahovým otopným tělesem a potvrzují vliv mírné sálavé složky tepelného výkonu podlahového otopného tělesa. Přímo kvantifikaci podílu sálavé složky v procentech však nelze ze simulace stanovit. Co však jednoznačně je, že oproti teplotovzdušnému vytápění je ve vytápěné místnosti podlahovým otopným tělesem přítomen nejen konvekční, ale i sálavý tepelný výkon.

Tab. 2 Výsledky vybraných teplot z druhé simulace

Výsledná teplota kulového teploměru	21,7 °C
Střední radiační teplota v místnosti	20,3 °C
Povrchová teplota ochlazovaného okna	16,9 °C

Pro porovnání povrchových teplot ochlazovaného okna je na obr. 16 uvedeno i teplotní pole na povrchu okna pro druhou matematickou simulaci. Dochází zde k menšímu ohřívání povrchu okna, a to především v jeho spodní části, což má vliv na celkově nižší povrchovou teplotu. Zdá se, nikoli však prokazatelně, že na nižší povrchové teplotě okna má vliv i úplná absence sálavého tepelného toku, ale hlavně vyšší teplota teplých konvekčních proudů pro model s otopným tělesem oproti modelu s teplotovzdušným vytápěním.

V příloze 1.16 a 2.14 jsou uvedena teplotní pole ochlazovaného okna s upravenou stupnicí teplot pro lepší posouzení.



Obr. 16 Teplotní pole povrchu ochlazovaného okna a stěny pro simulaci teplotovzdušného vytápění



## 7. Závěr

Z hlediska požadavku na hygienu bydlení a životní prostředí se stávají podlahové konvektory úložištěm prachu a nečistot i mikrobiálního původu. V praxi běžně dochází k zanedbávání údržby a očisty podlahových konvektorů z důvodu náročného zpřístupnění vnitřních částí podlahových konvektorů. Akumulace prachových částic se stává živnou půdou pro růst a množení mikroorganismů. Zejména u nízkoteplotních soustav s provozní teplotou teplosměnných ploch do 50 °C nedochází k termické desinfekci, ale naopak k podstatně vyšší mikrobiologické zátěži.

Při posuzování funkčních a provozních vlastností podlahových konvektorů lze spatřovat značný inovační prostor zaměřený na odstranění uvedených nedostatků, zejména pak v oblasti hygieny prostředí, efektivity provozu a tepelného působení na člověka. K dosažení cíle se nabízí např. nové řešení, se zcela novým přístupem řešení podlahového otopného tělesa, společnosti ELVL.

U inovovaných podlahových otopných těles byl ze strany výrobce stanoven předpoklad, že se vyznačují vyšší mírou tepelného sálavého výkonu a při umístění tělesa do podlahy před okno se projeví nejen konvekční, ale i sálavý efekt. Tento předpoklad byl ověřován jak experimentální cestou, tak matematickou simulací.

### 7.1 Experiment

Vzhledem k tomu, že Ústav techniky prostředí nedisponuje kalorimetrickou komorou podle EN 442, bylo měření – experimentální část - provedeno na tzv. otevřeném měřicím místě. Ostatní podmínky byly dle ČSN EN 442. Splnění podmínek určených ČSN EN 16430-2 pro měření podlahových konvektorů s ochlazenou instalační stěnou s teplotou 16 °C však naše laboratoř neumožňuje.

Měření bylo realizováno pro dvě instalační provedení. První případ bylo provedení s instalovanou reflexní fólií pod výměníkem tepla (žebrovkou) na dně skříně otopného tělesa. Druhé měření bylo provedeno bez instalace reflexní fólie na dně skříně podlahového otopného tělesa pod výměníkem tepla.

V obou případech se nepodařilo prokázat předpoklad výrobce o výrazném navýšení sálavé složky unikátním návrhem rozšířené přestupní plochy (lamel). Podíl tepelného výkonu sdílený do vytápěného prostoru sáláním pro zkoumané těleso byl v obou případech menší jak 1 %. Tento závěr je ovlivněn metodikou měření podlahového otopného tělesa podle ČSN EN 442 a nikoli podle ČSN EN 16430-2. Rozhodující z hlediska prokázání zastoupení sálavé složky výkonu je tak matematická simulace.

S ohledem na zpřesnění okrajových podmínek matematické simulace bylo potřebné rozhodnout o zadávání povrchové teploty otopného tělesa, resp. povrchové teploty jednotlivých lamel. K tomuto účelu byly snímány povrchové teploty otopného tělesa při náběhu na jmenovité teplotní parametry a za ustáleného stavu se jmenovitými teplotami vstupní a vratné vody. Tato část experimentu prokázala, že je možné do matematické simulace zadávat jednotnou povrchovou teplotu otopného tělesa po celé jeho délce.



## 7.2 Matematická simulace

Původní úvaha byla, řešit model jako symetrický podle roviny, která prochází středem okna a podlahového otopného tělesa. Od této úvahy jsme vzhledem k maximálnímu zpřesnění modelu ustoupili a uvažovali model nezjednodušeně jako celek.

Pro porovnání vlivu sálavé složky tepelného výkonu podlahového otopného tělesa bylo nutno vytvořit dvě simulace. První pro vytápěný prostor s precizně definovaným podlahovým otopným tělesem a druhou pro vytápěný prostor s teplovzdušným vytápěním se stejnou oblastí přívodu teplého vzduchu.

Nutnou podmínkou posouzení je dosažení stejné výsledné teploty v definičním místě (střed vytápěné místnosti ve výšce 1,5 m), přičemž rozhodujícím výsledkem je porovnání středních radiačních teplot u prvního a druhého matematického modelu. Pokud jsou střední radiační teploty pro oba modely stejné, podlahové otopné těleso sdílí tepelný výkon do vytápěného prostoru pouze konvekcí.

Matematická simulace prokazuje, že směr teplých konvekčních proudů od podlahového otopného tělesa a jejich intenzita dokáží ve spodní části okna dokonce odtrhnout mezní vrstvu chladných proudů u okna a zvýšit povrchovou teplotu okna, a to spolu s velmi mírným podílem sálavé složky tepelného výkonu.

V tabulce 3 jsou porovnány hodnoty povrchové teploty okna a střední radiační teploty v místnosti pro obě simulace. Obě tyto teploty vychází nižší u modelu teplovzdušného vytápění, než u modelu s podlahovým otopným tělesem a potvrzují vliv mírné sálavé složky tepelného výkonu podlahového otopného tělesa. Přímou kvantifikaci podílu sálavé složky v procentech však nelze ze simulace stanovit. Co však jednoznačné je, že oproti teplovzdušnému vytápění je ve vytápěné místnosti podlahovým otopným tělesem přítomen nejen konvekční, ale i sálavý tepelný výkon.

Tab. 3 Teploty získané matematickou simulací

Parametr	Teplovzdušné vytápění	Podlahové OT
Výsledná teplota kulového teploměru	21,7 °C	21,7 °C
Střední radiační teplota v místnosti	20,3 °C	21,0 °C
Povrchová teplota ochlazovaného okna	16,9 °C	18,2 °C

U inovovaných podlahových otopných těles společnosti ELVL se potvrdil předpoklad výrobce, že se podlahová otopná tělesa s unikátní konstrukcí vyznačují vyšší mírou podílu tepelného výkonu sdíleného sáláním, než je tomu u klasických podlahových konvektorů. Sálavý efekt, resp. procentuální podíl tepelného výkonu sdílený do vytápěného prostoru sáláním, však nelze bez měření podle ČSN EN 16430-2 kvantifikovat. Za jednoznačně prokázané máme schopnost tělesa zvýšit střední radiační teplotu (povrchovou teplotu okolních ploch) oproti čistě konvekčnímu vytápění. Zvýšení povrchové teploty okna však přisuzujeme především vhodnému obrazu proudění teplého vzduchu od otopného tělesa a schopnosti teplých proudů eliminovat ve spodní části okna mezní vrstvu chladného proudu vzduchu. Tento závěr vychází z menší možnosti zvýšení povrchové teploty skla sáláním vzhledem k jeho vlastnostem (pohltivost, odrazivost a propustnost – na zahřátí skla se podílí pouze pohltivost).

## 8. Seznam příloh (viz příložené CD)

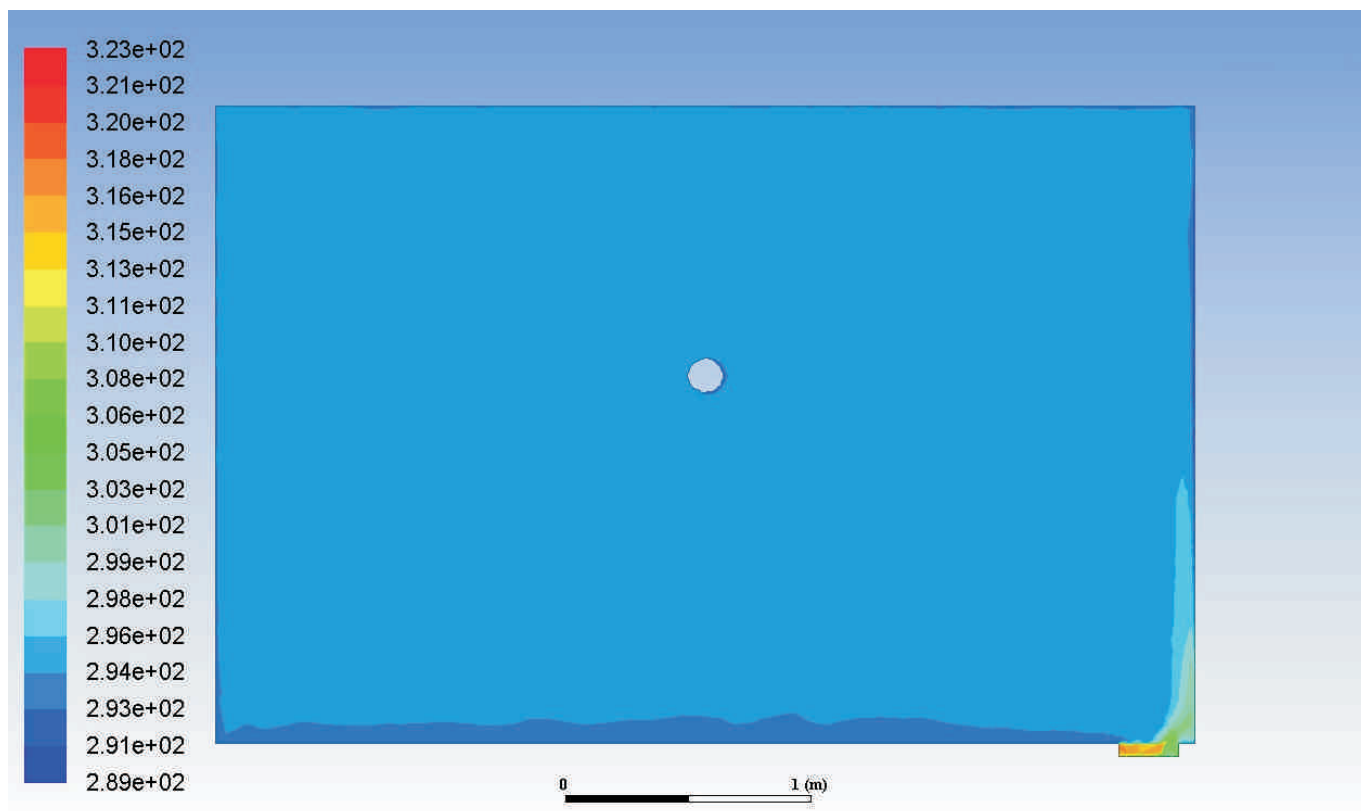
### *Simulace vytápěného prostoru s instalovaným podlahovým otopným tělesem*

- 1.01 Teplotní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené polovinou délky podlahového otopného tělesa
- 1.02 Teplotní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené čtvrtinou délky podlahového otopného tělesa
- 1.03 Teplotní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené na samém okraji konce podlahového otopného tělesa
- 1.04 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem vedené středem podlahového otopného tělesa
- 1.05 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 100 mm od okna
- 1.06 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 50 mm od okna
- 1.07 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem přímo na povrchu okna
- 1.08 Rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené polovinou délky podlahového otopného tělesa
- 1.09 Rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené čtvrtinou délky podlahového otopného tělesa
- 1.10 Rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené na samém okraji konce podlahového otopného tělesa
- 1.11 Detail rychlostního pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené polovinou délky podlahového otopného tělesa
- 1.12 Detail rychlostního pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené polovinou délky podlahového otopného tělesa
- 1.13 Rychlostní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem vedené středem podlahového otopného tělesa
- 1.14 Rychlostní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 100 mm od okna
- 1.15 Rychlostní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 50 mm od okna
- 1.16 Teplotní pole na povrchu okna se změněnou stupnicí teplot

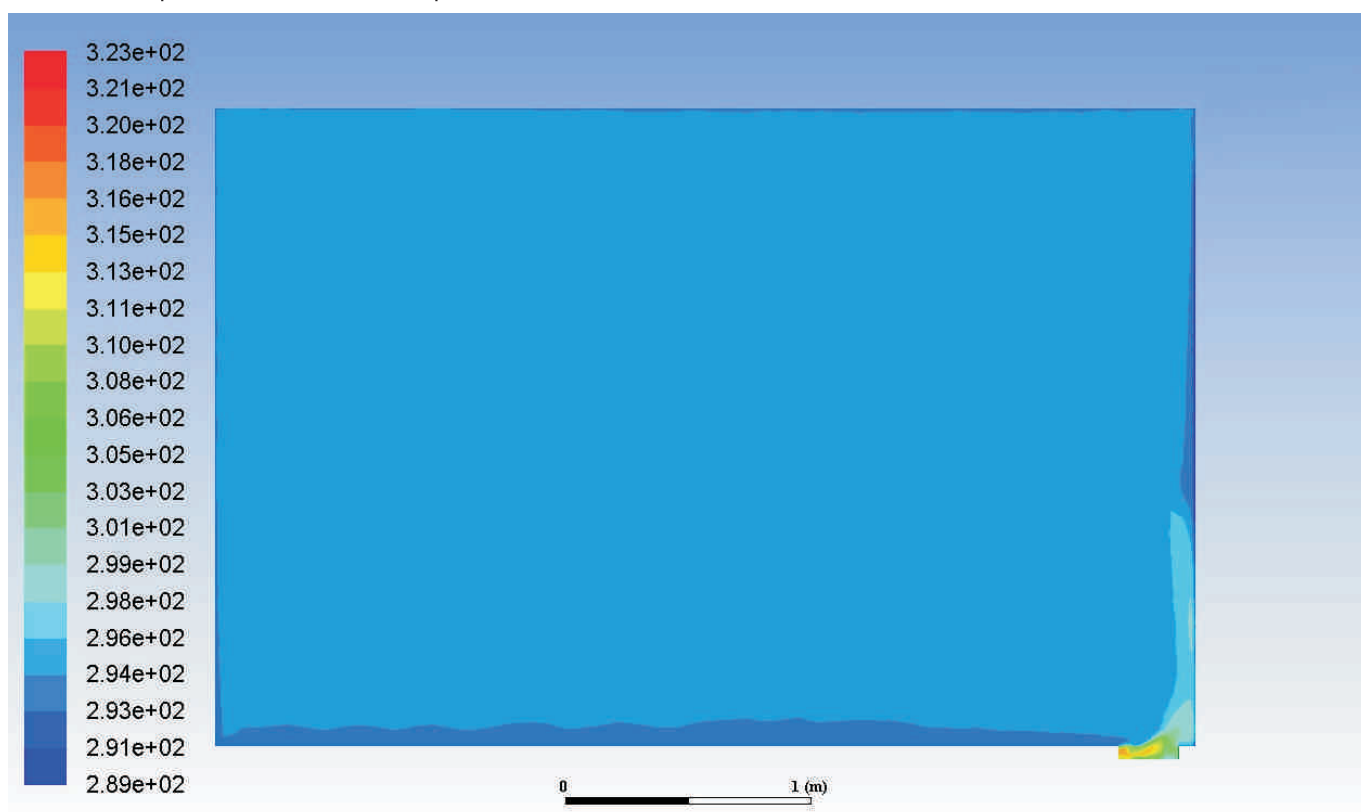
### *Simulace vytápěného prostoru s teplotně vzdušným vytápěním*

- 2.01 Teplotní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené polovinou délky podlahového otopného tělesa
- 2.02 Teplotní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené čtvrtinou délky podlahového otopného tělesa
- 2.03 Teplotní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené na samém okraji konce podlahového otopného tělesa
- 2.04 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem vedené středem podlahového otopného tělesa
- 2.05 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 100 mm od okna
- 2.06 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 50 mm od okna
- 2.07 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem přímo na povrchu okna
- 2.08 Rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené polovinou délky podlahového otopného tělesa
- 2.09 Rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené čtvrtinou délky podlahového otopného tělesa
- 2.10 Rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené na samém okraji konce podlahového otopného tělesa
- 2.11 Rychlostní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem vedené středem podlahového otopného tělesa
- 2.12 Rychlostní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 100 mm od okna
- 2.13 Rychlostní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 50 mm od okna
- 2.14 Teplotní pole na povrchu okna se změněnou stupnicí teplot

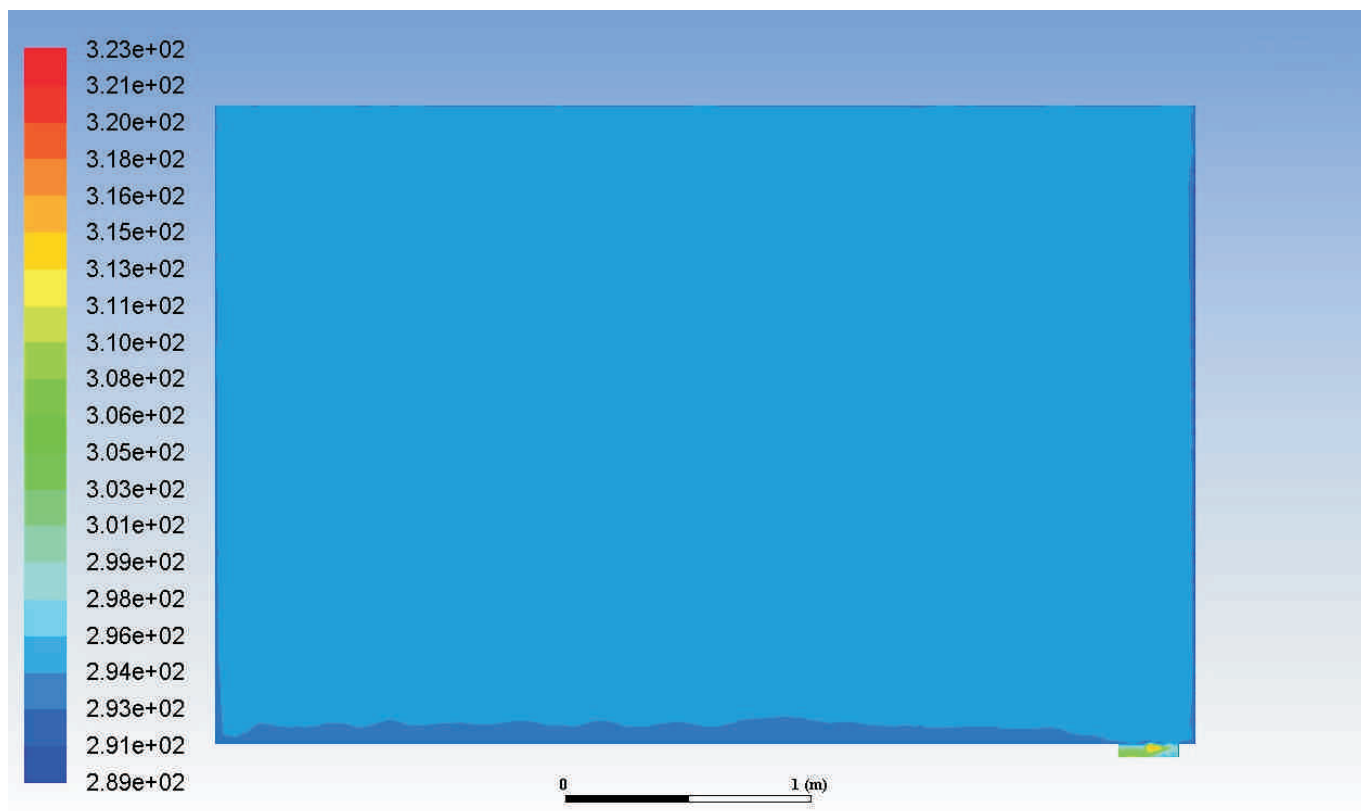
1.01 Teplotní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené polovinou délky podlahového otopného tělesa



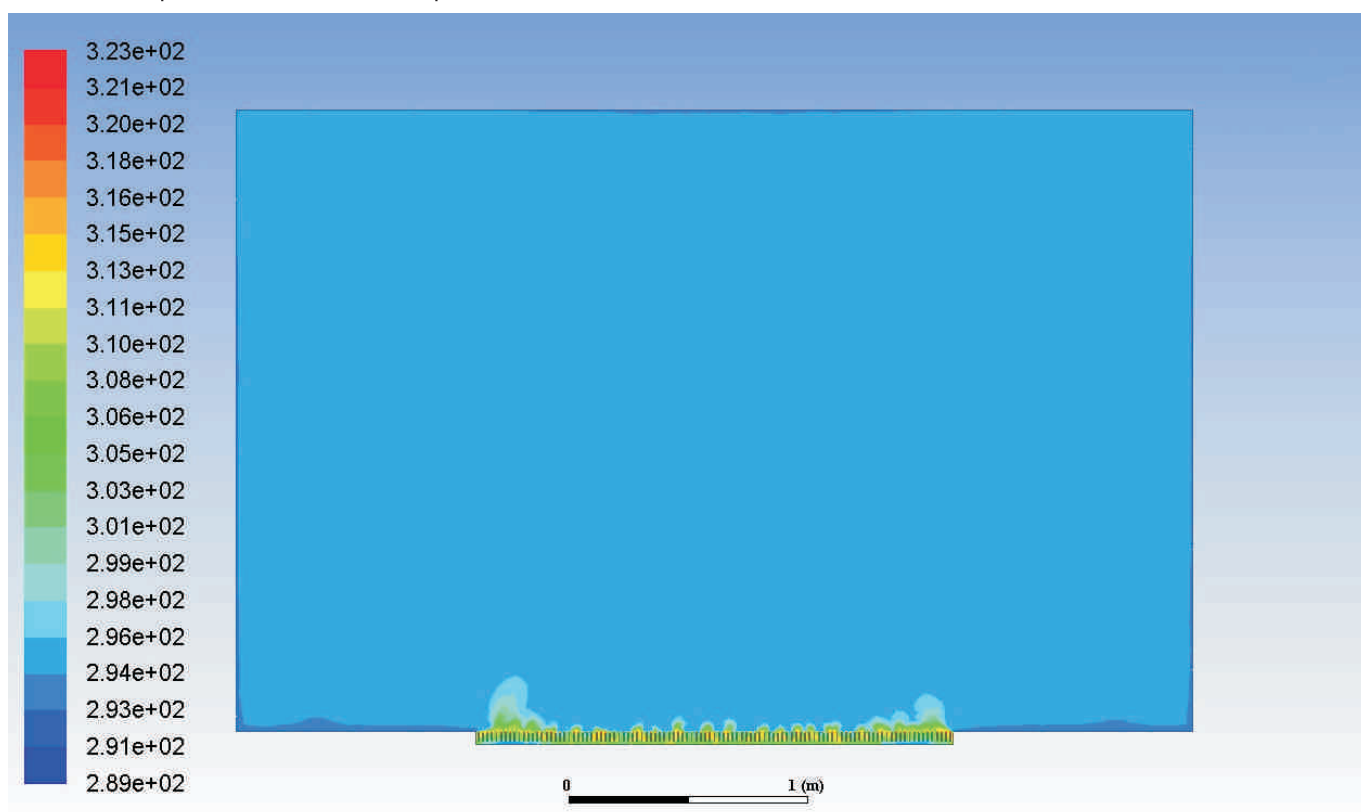
1.02 Teplotní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené čtvrtinou délky podlahového otopného tělesa



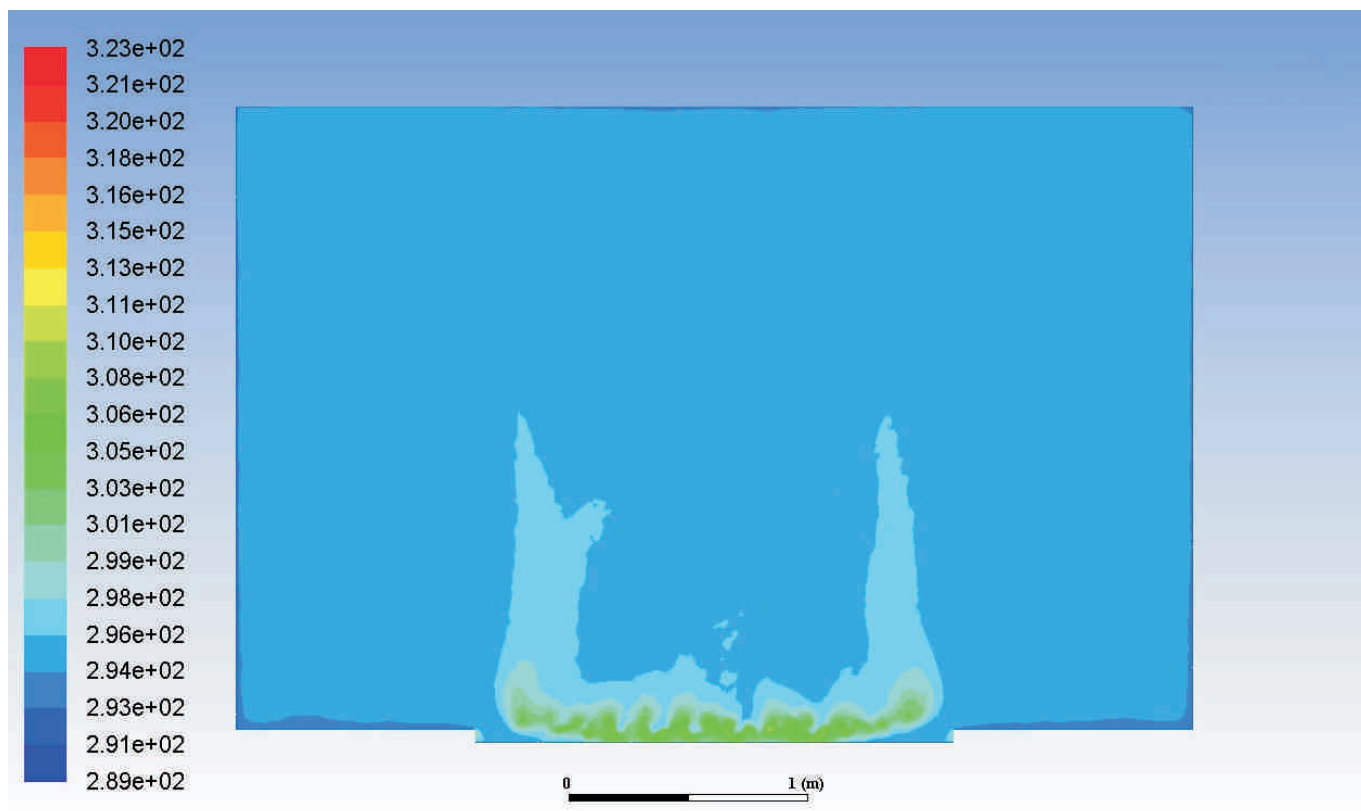
1.03 Teplotní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené na samém okraji konce podlahového otopného tělesa



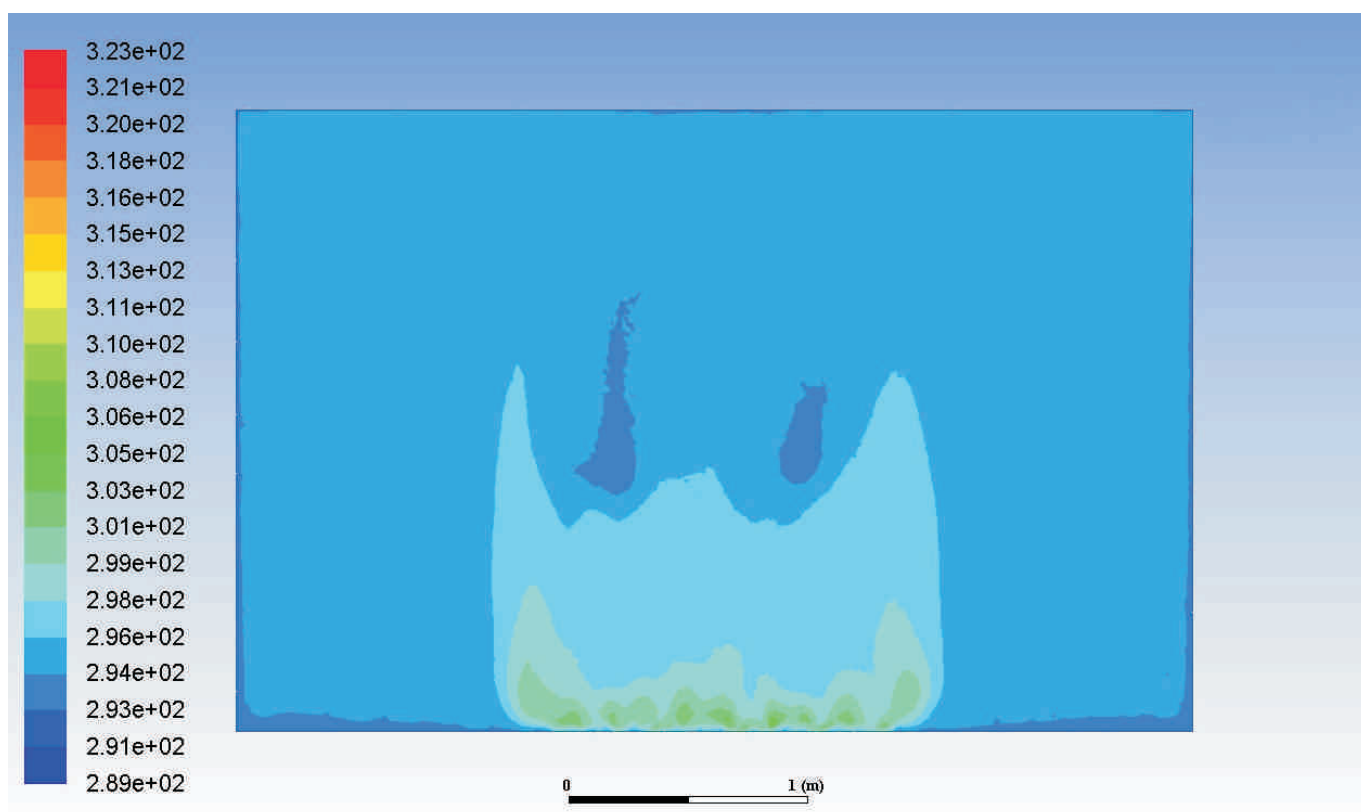
1.04 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem vedené středem podlahového otopného tělesa



1.05 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 100 mm od okna

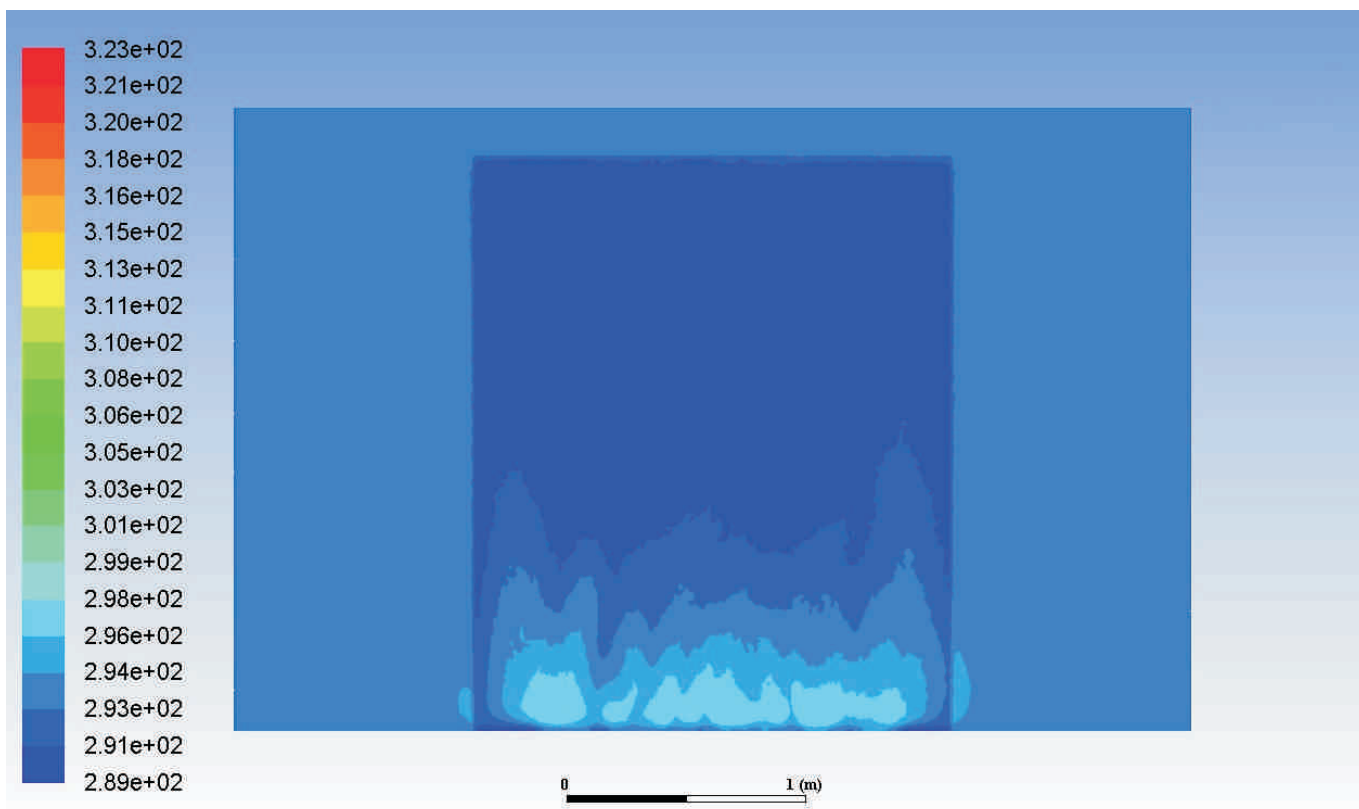


1.06 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 50 mm od okna

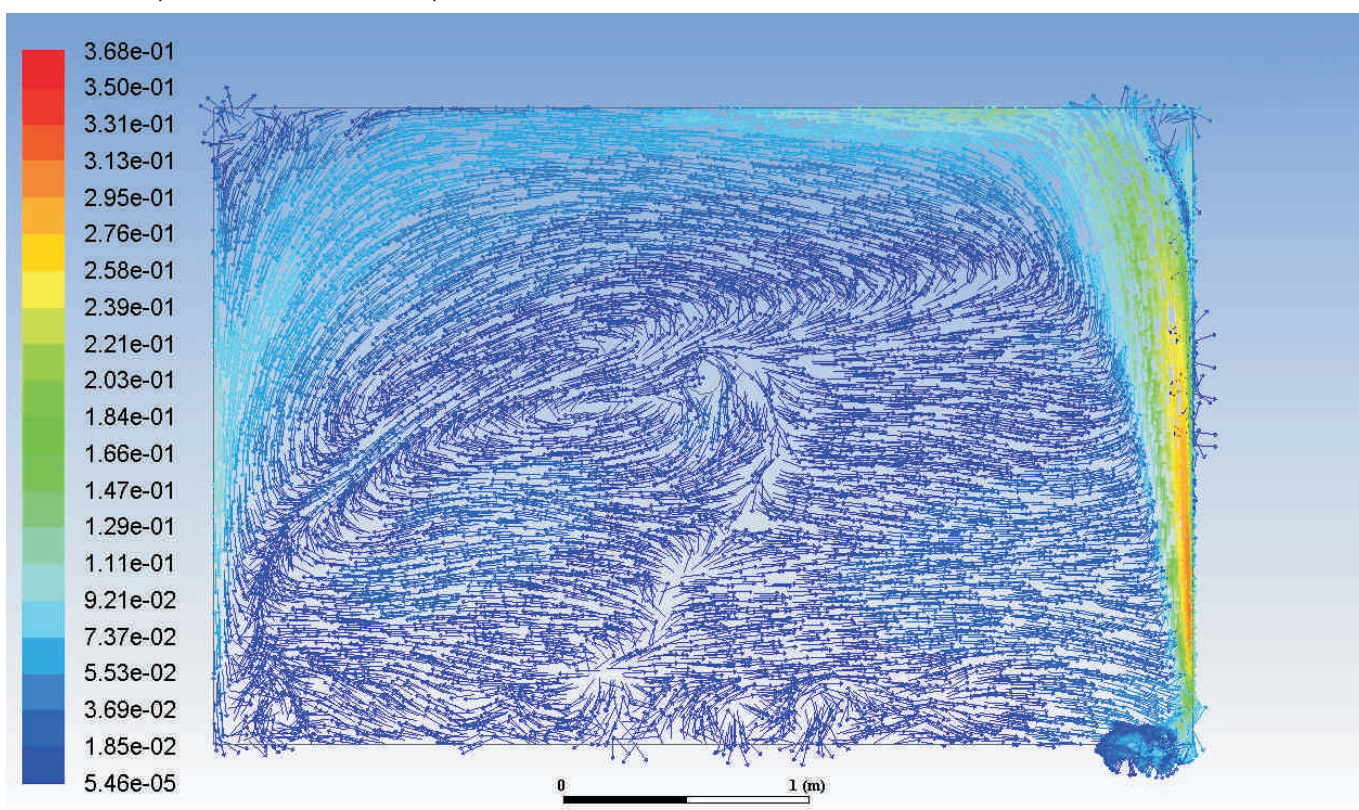




1.07 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem přímo na povrchu okna

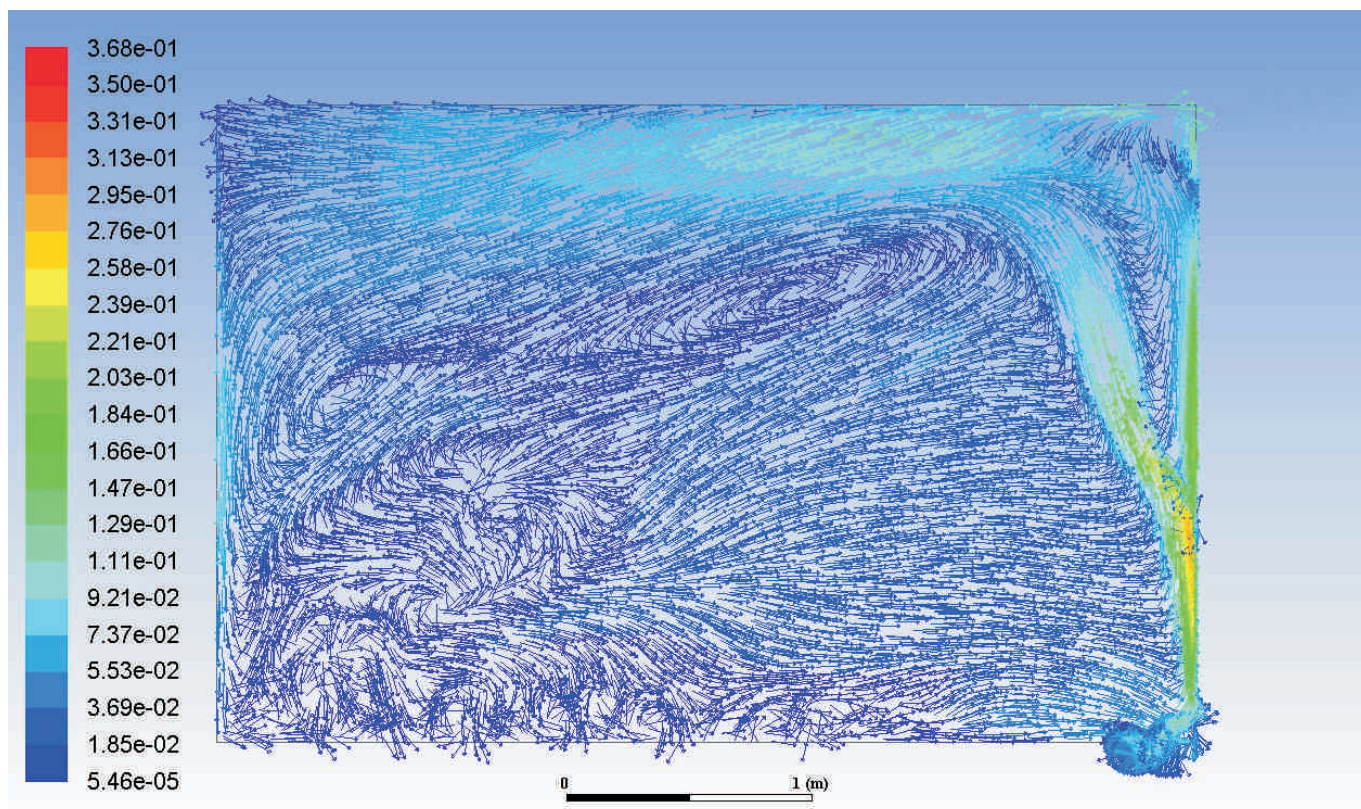


1.08 Rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené polovinou délky podlahového otopného tělesa

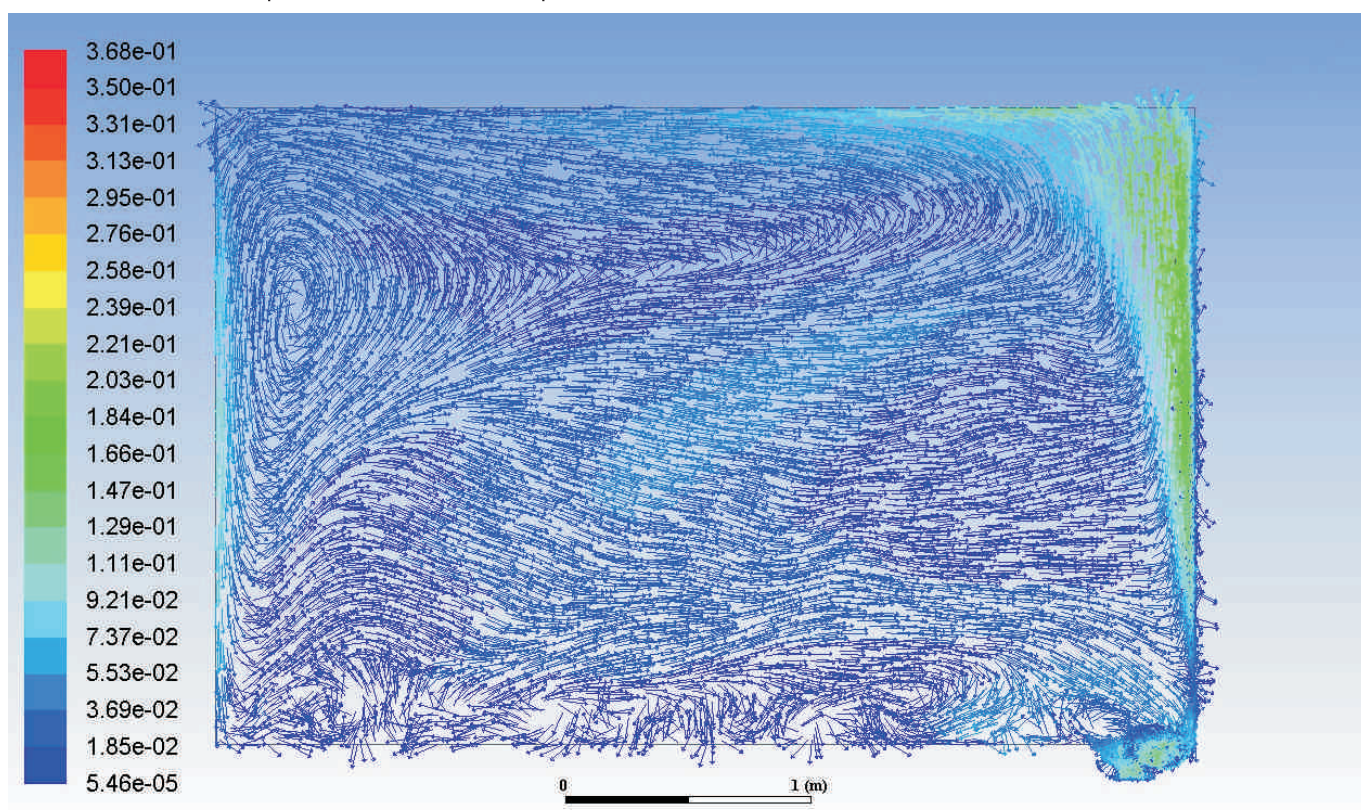




1.09 Rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené čtvrtinou délky podlahového otopného tělesa

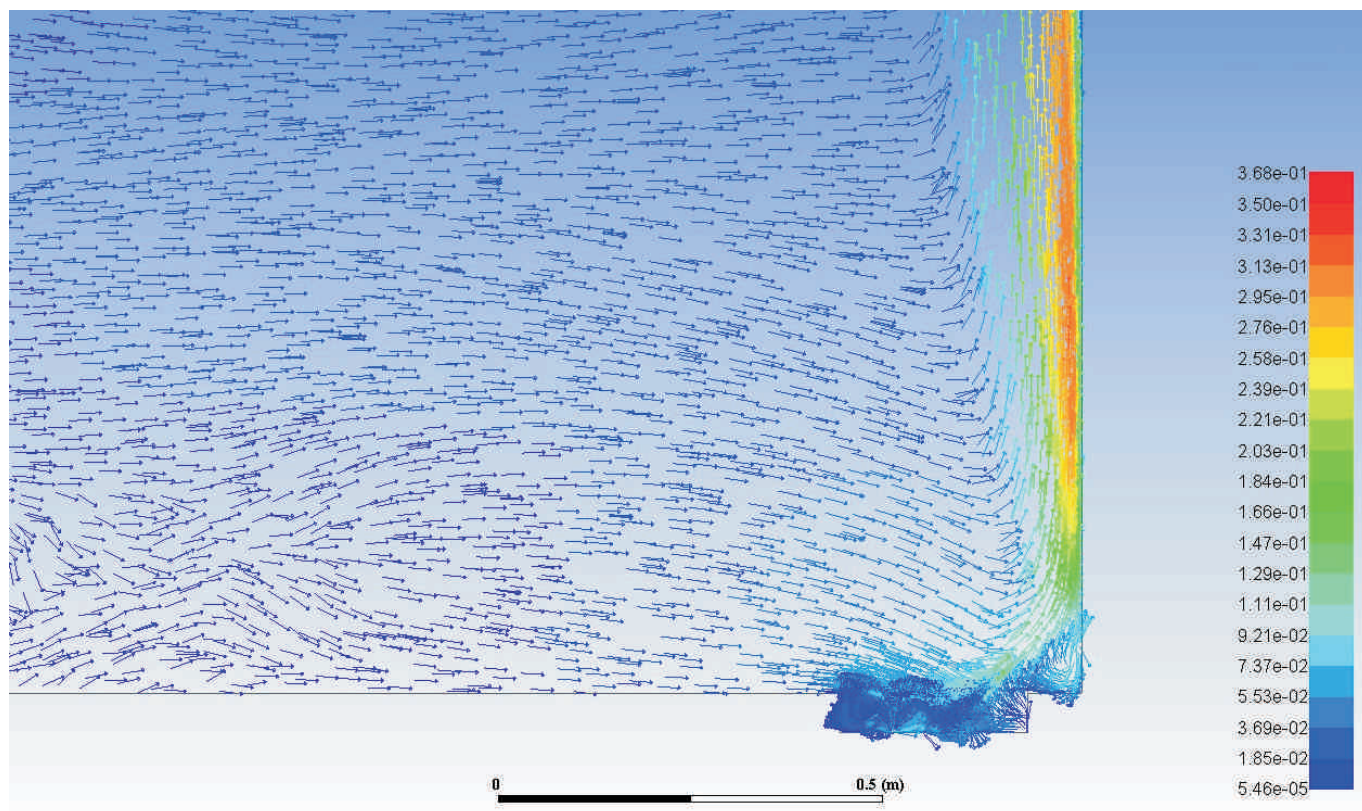


1.10 Rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené na samém okraji konce podlahového otopného tělesa

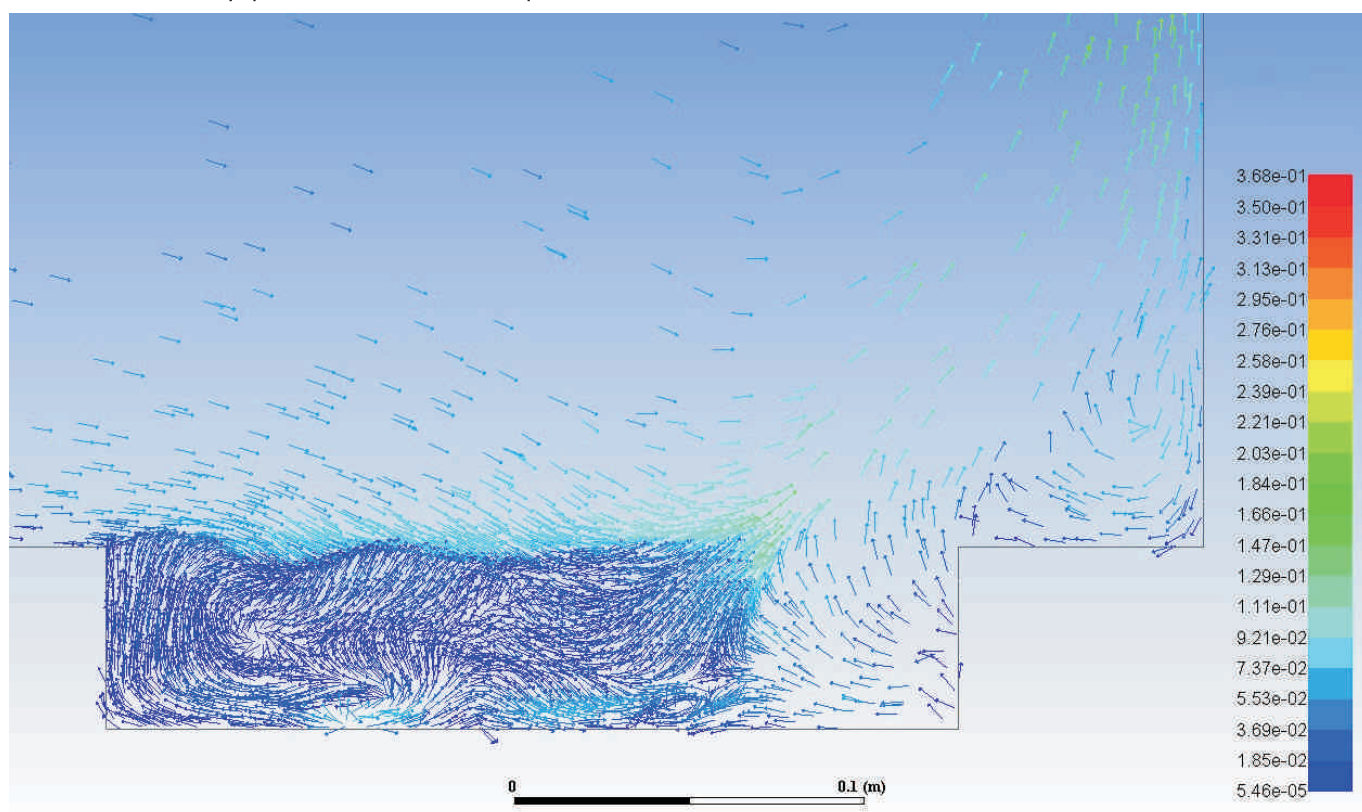




1.11 Detail rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené polovinou délky podlahového otopného tělesa

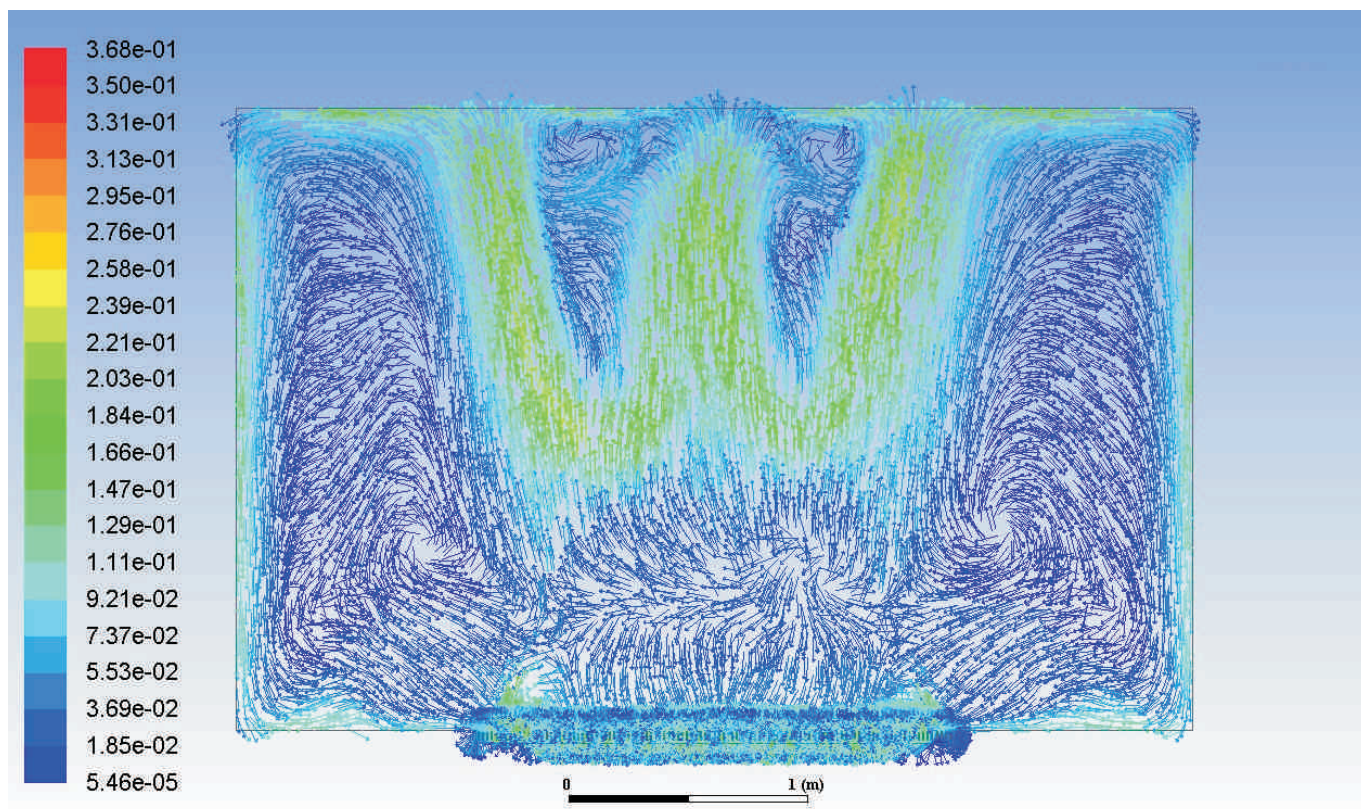


1.12 Detail rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené polovinou délky podlahového otopného tělesa

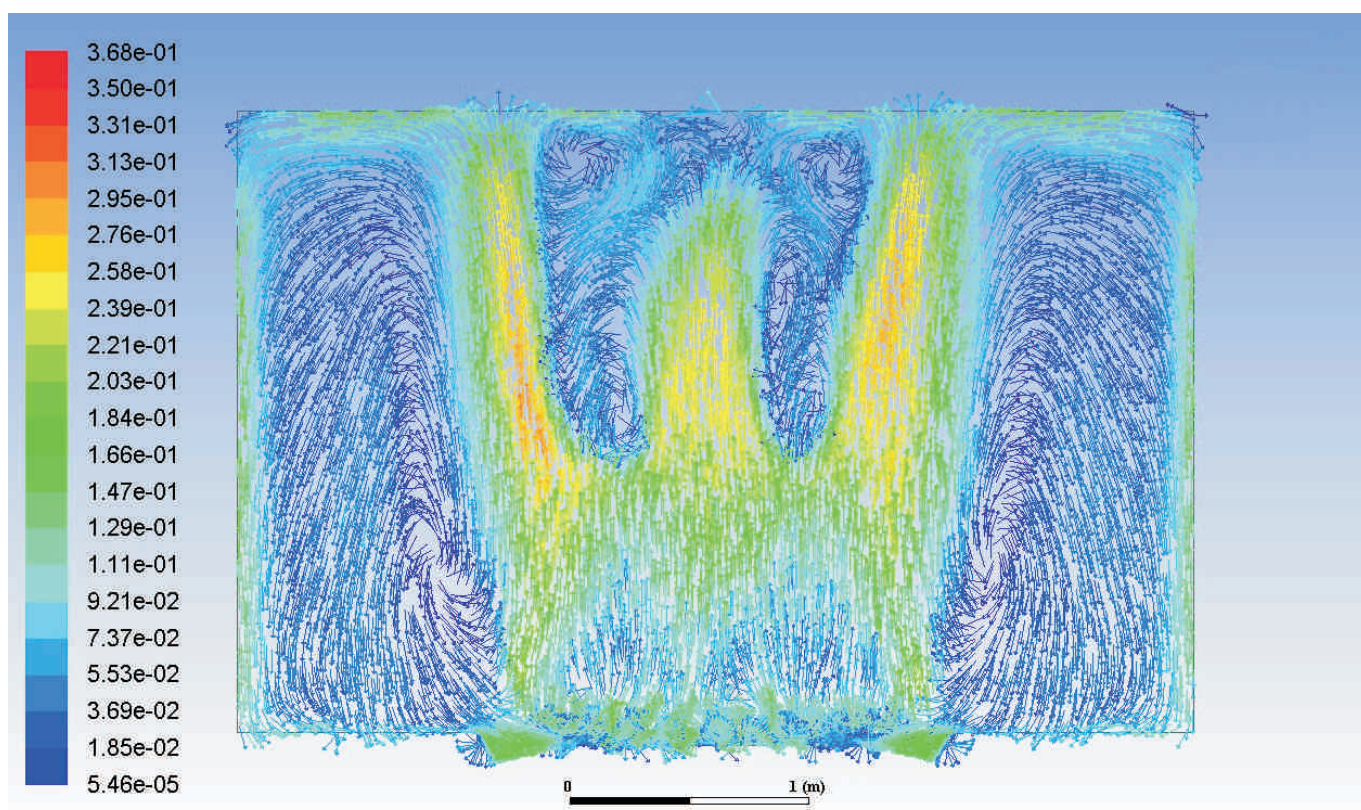




1.13 Rychlostní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem vedené středem podlahového otopného tělesa

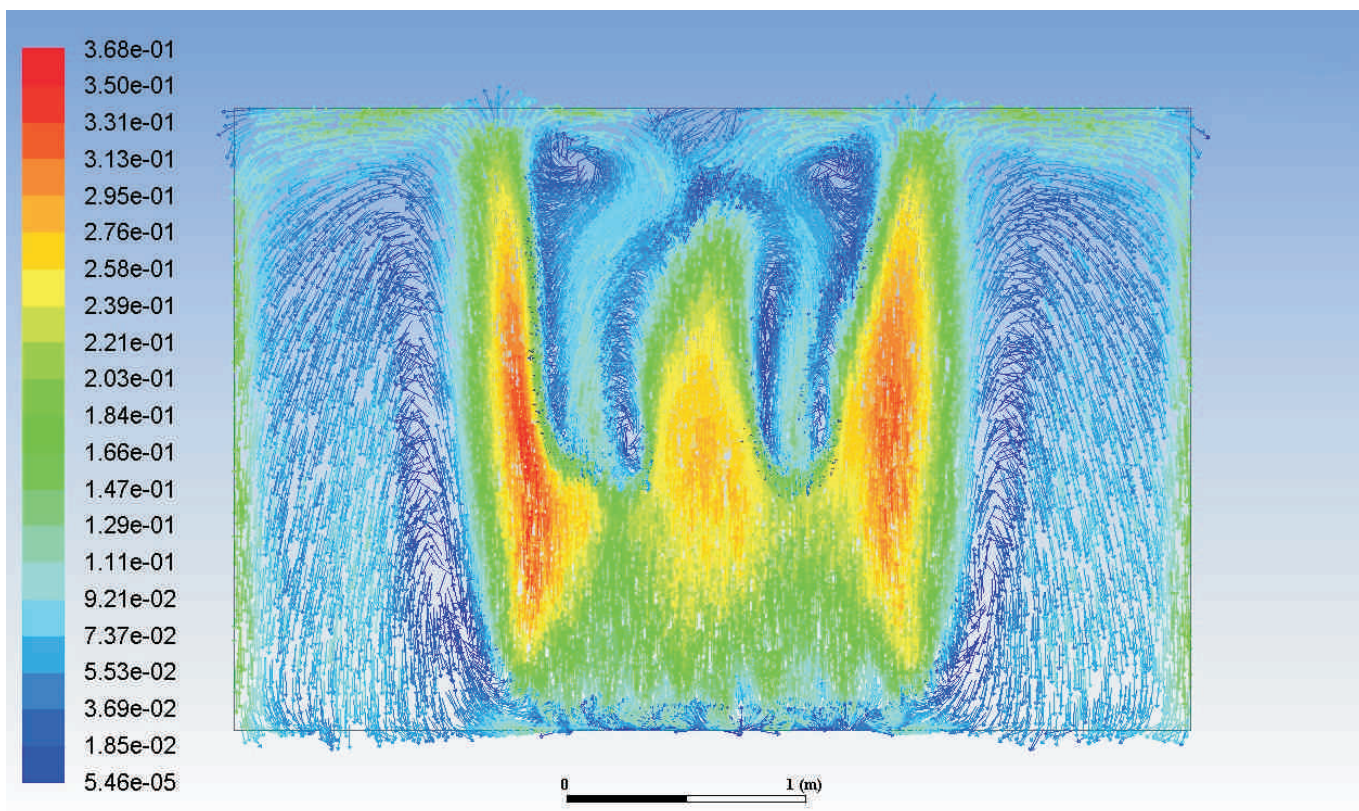


1.14 Rychlostní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 100 mm od okna

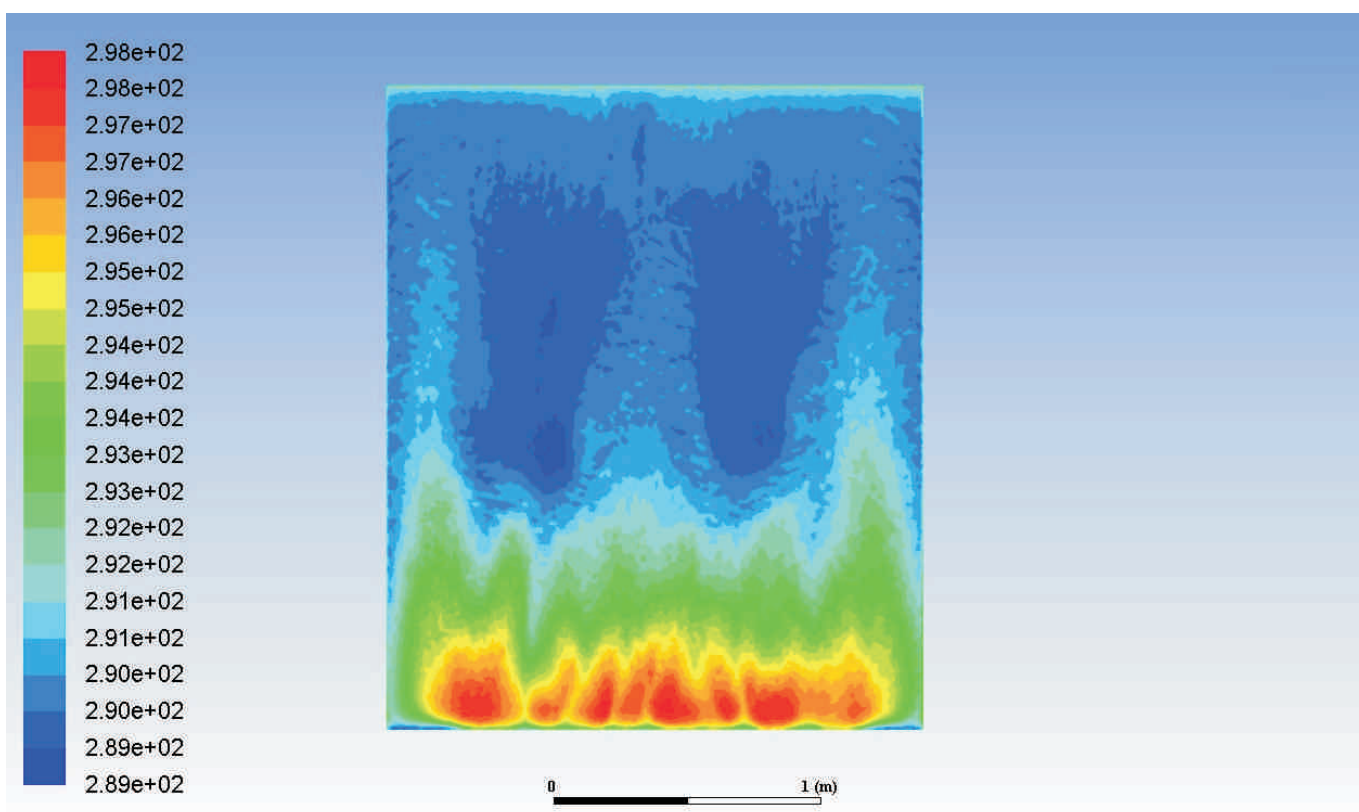




1.15 Rychlostní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 50 mm od okna

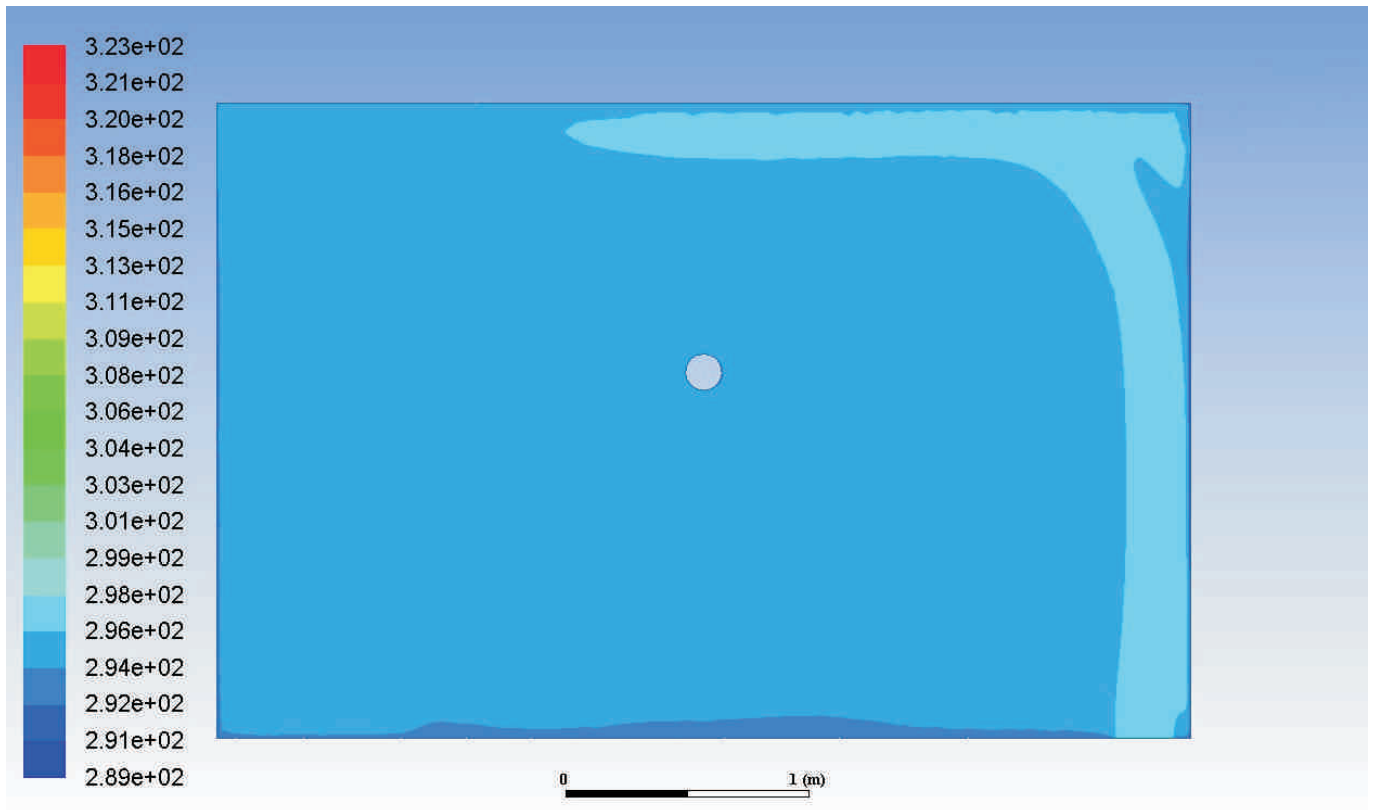


1.16 Teplotní pole na povrchu okna se změnou stupnicí teplot

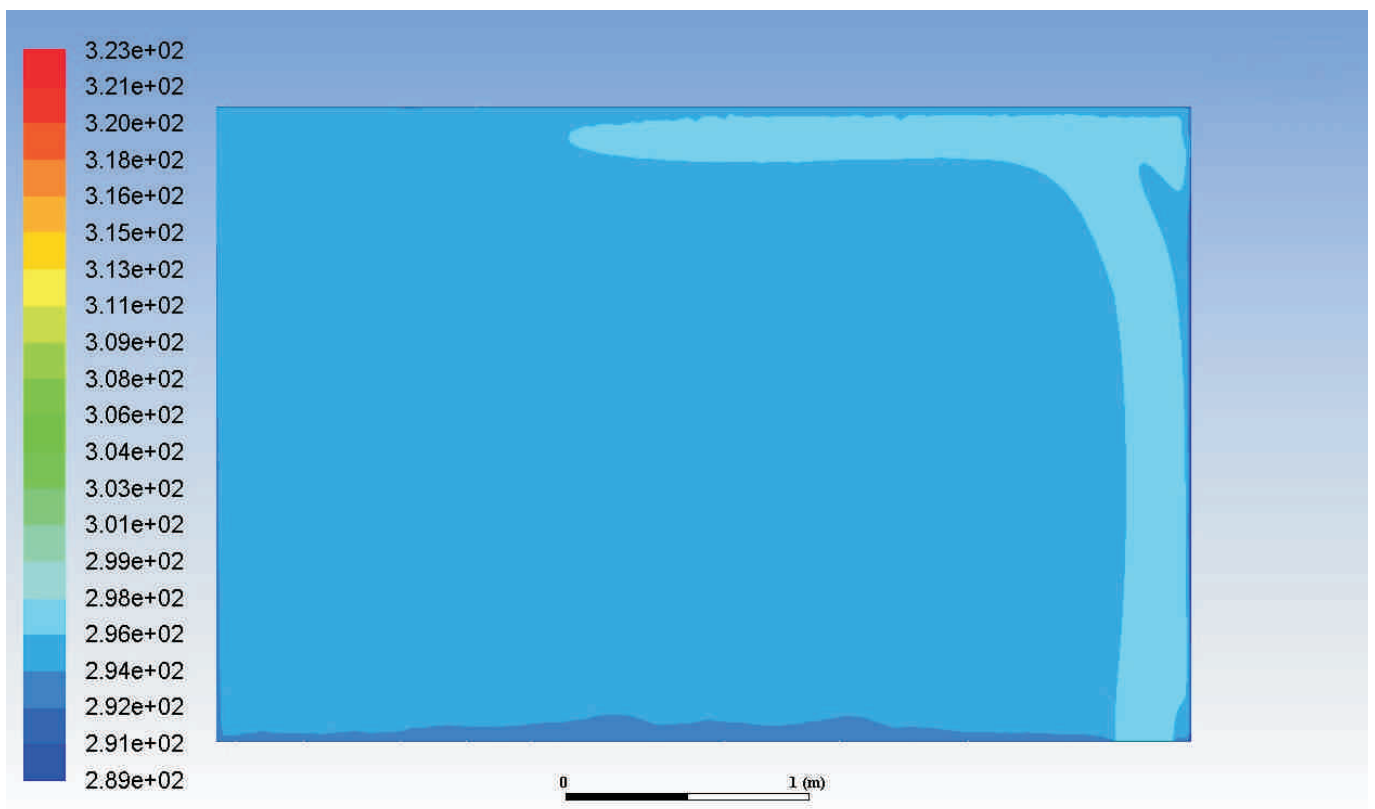




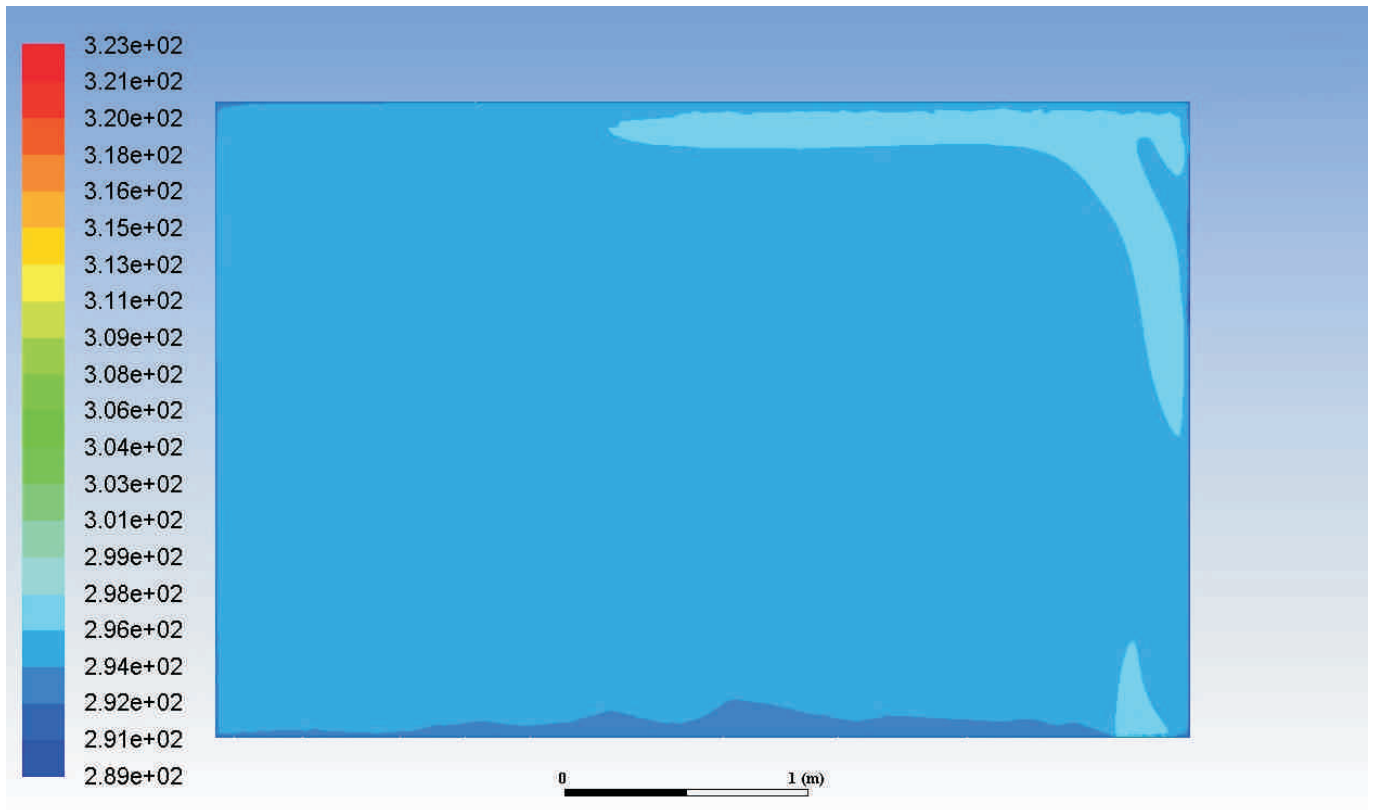
2.01 Teplotní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené polovinou délky podlahového otopného tělesa



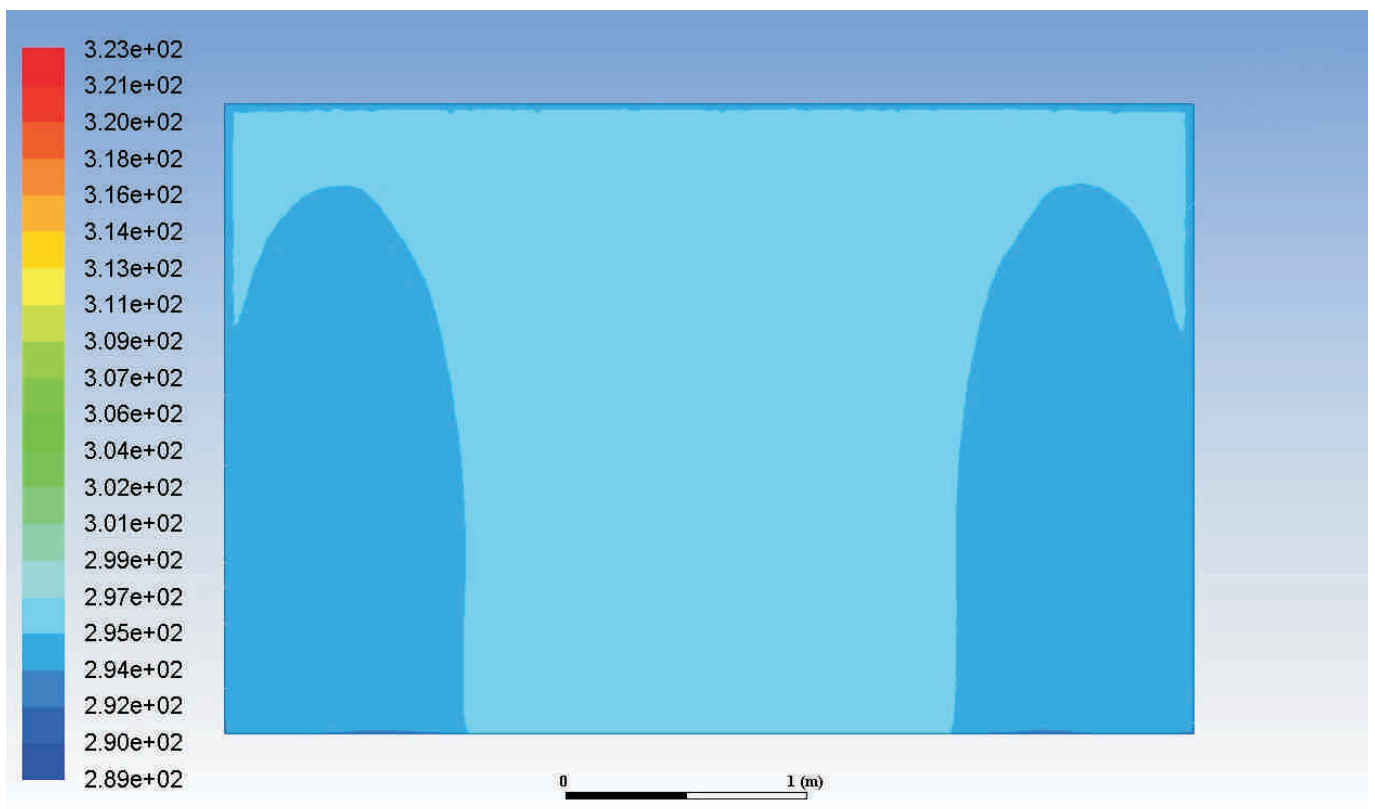
2.02 Teplotní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené čtvrtinou délky podlahového otopného tělesa



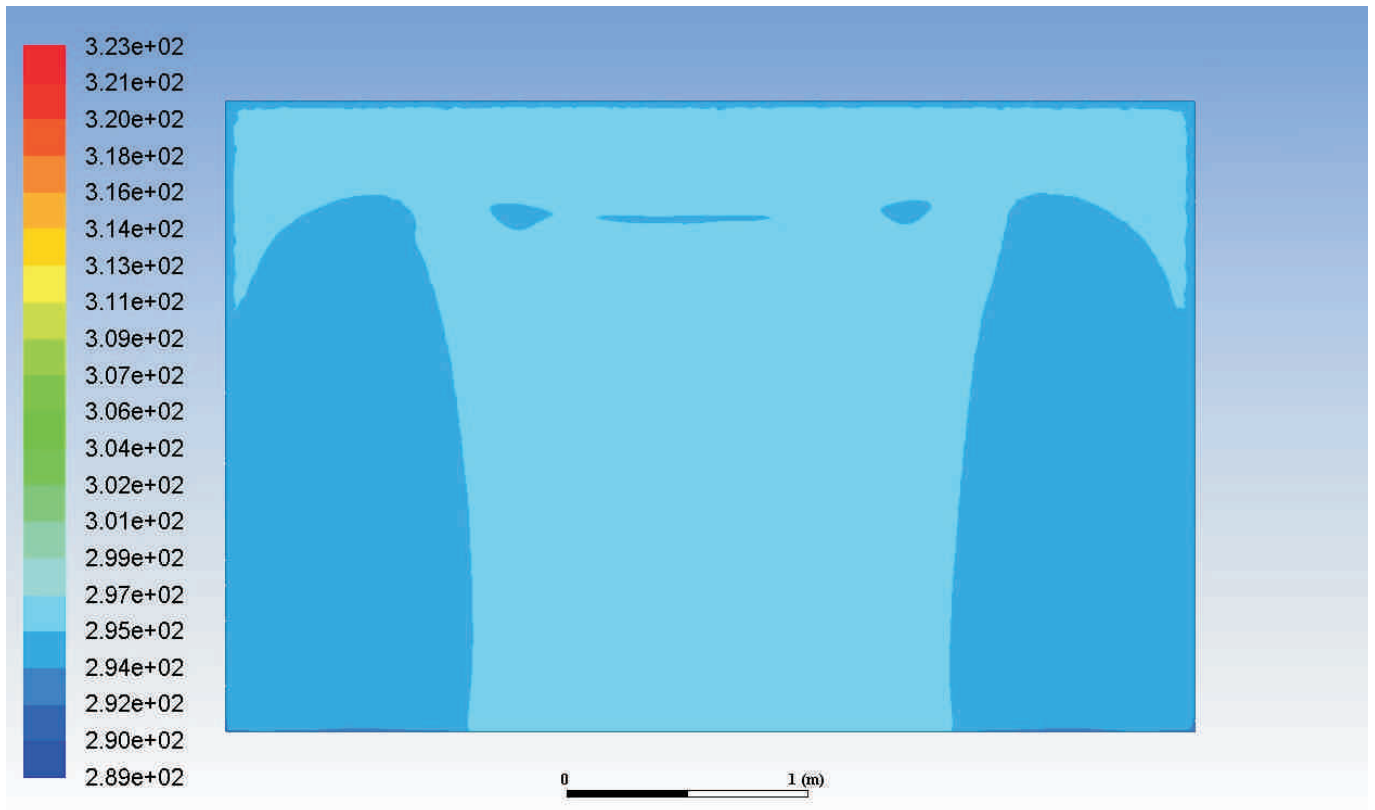
2.03 Teplotní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené na samém okraji konce podlahového otopného tělesa



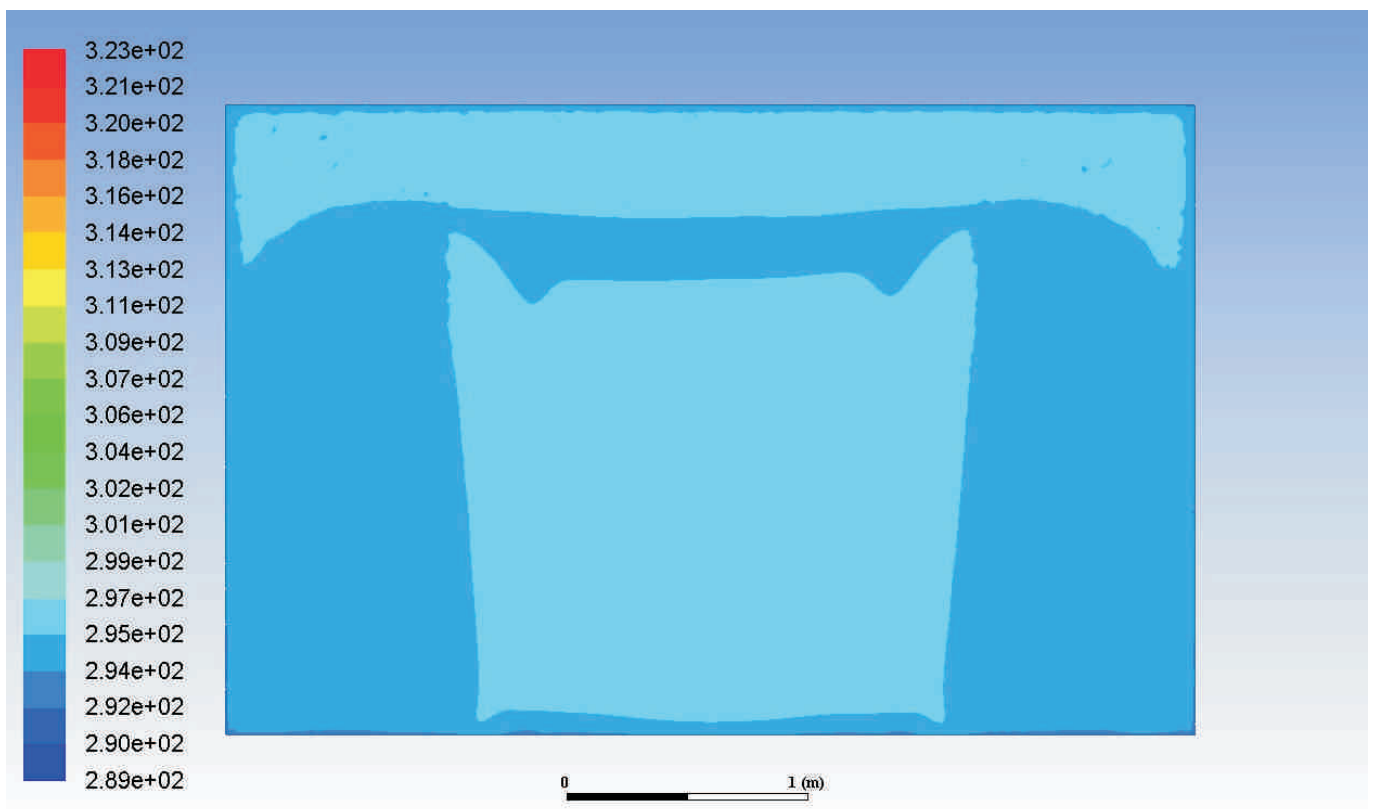
2.04 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem vedené středem podlahového otopného tělesa



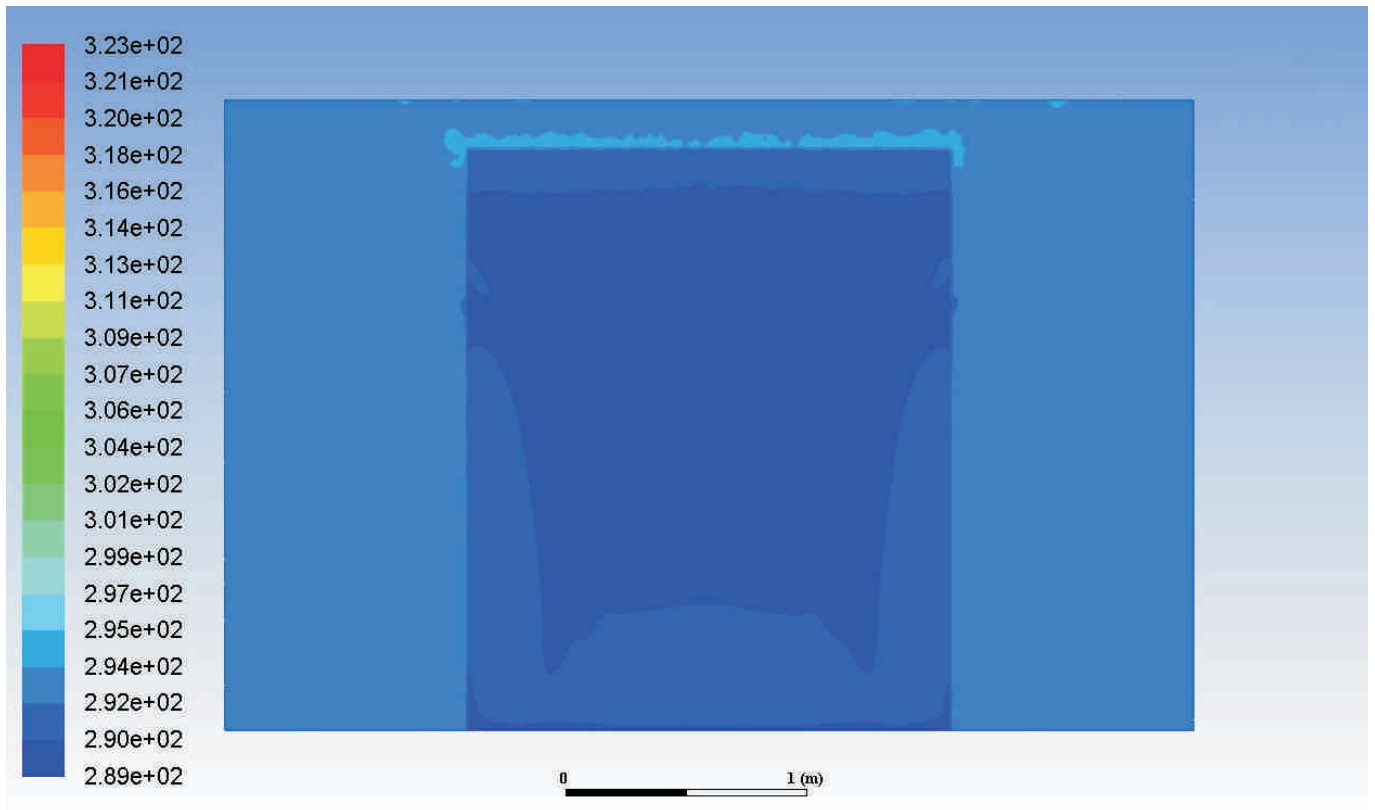
2.05 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 100 mm od okna



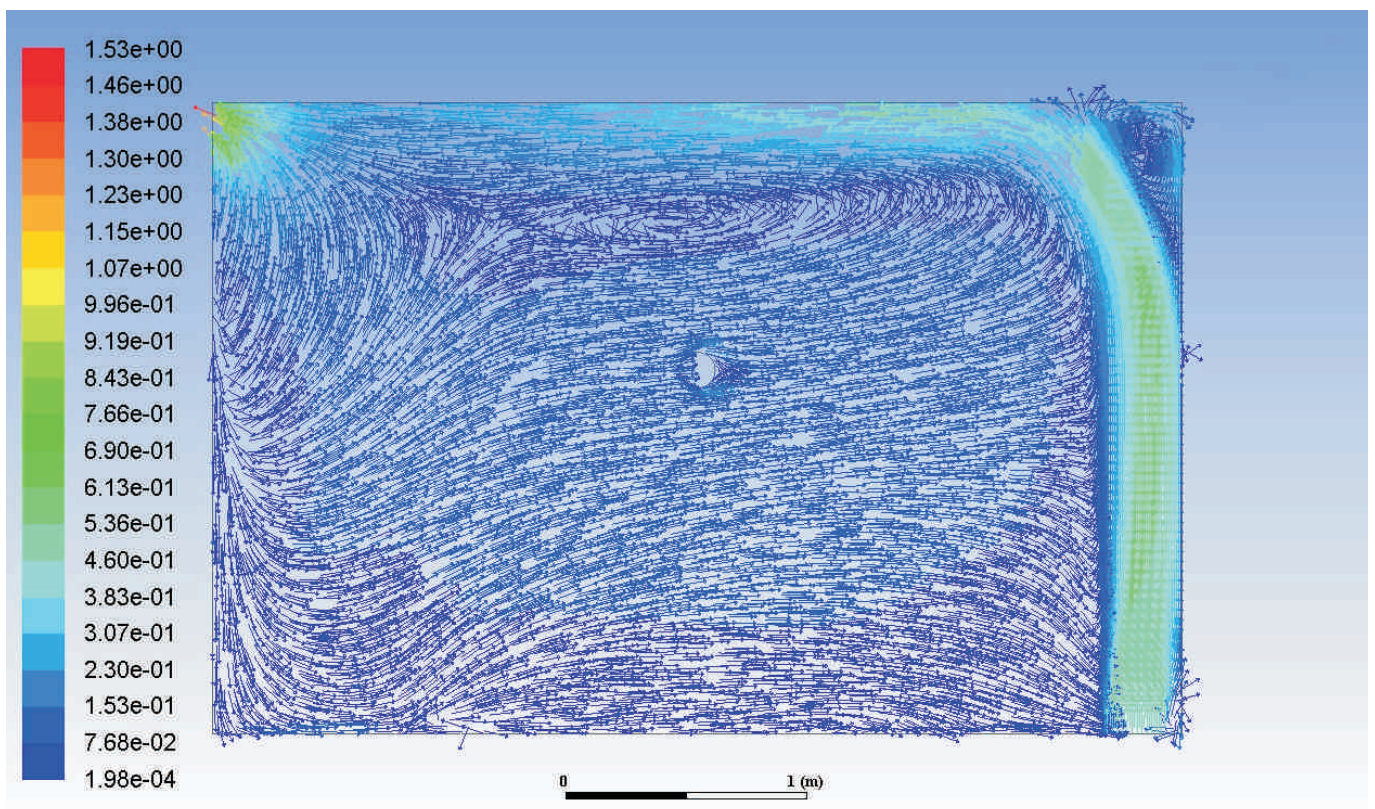
2.06 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 50 mm od okna



2.07 Teplotní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem přímo na povrchu okna

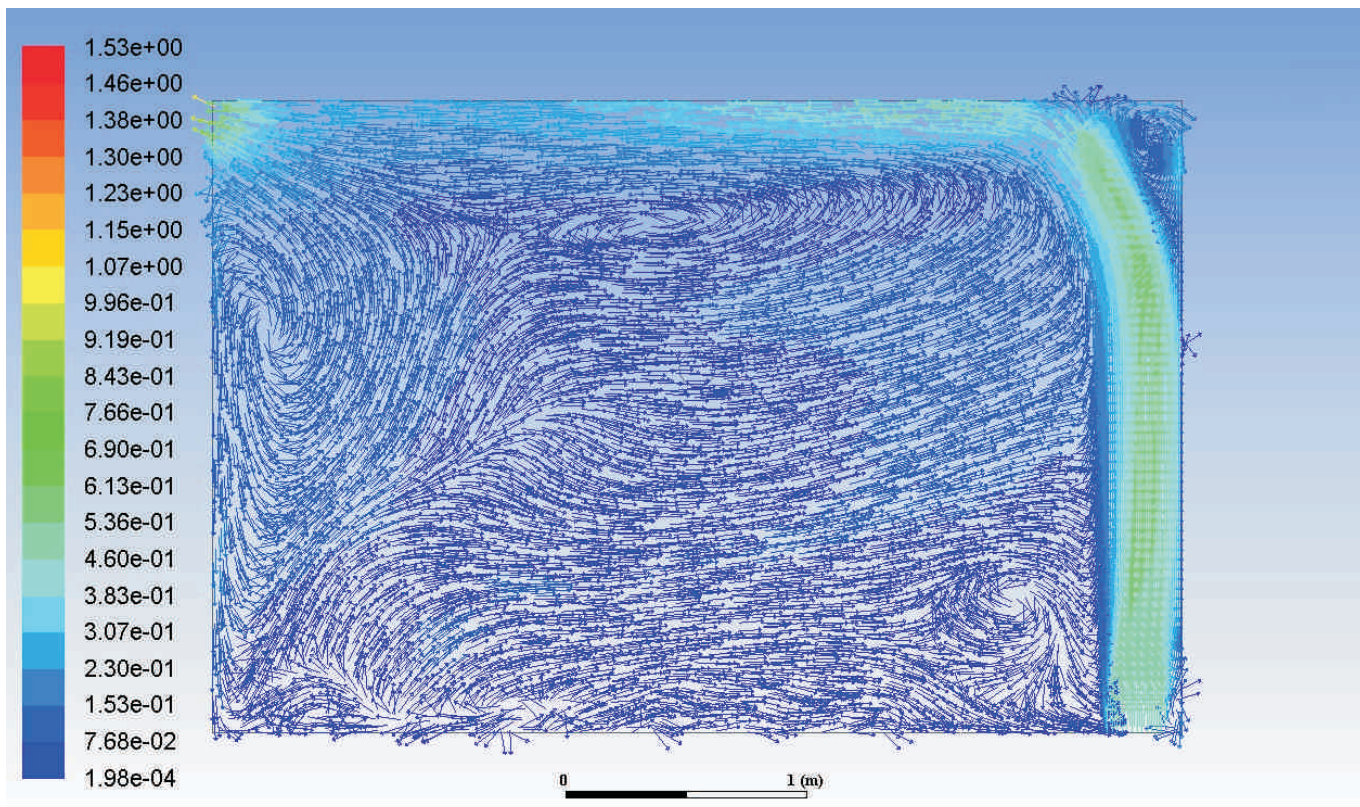


2.08 Rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené polovinou délky podlahového otopného tělesa

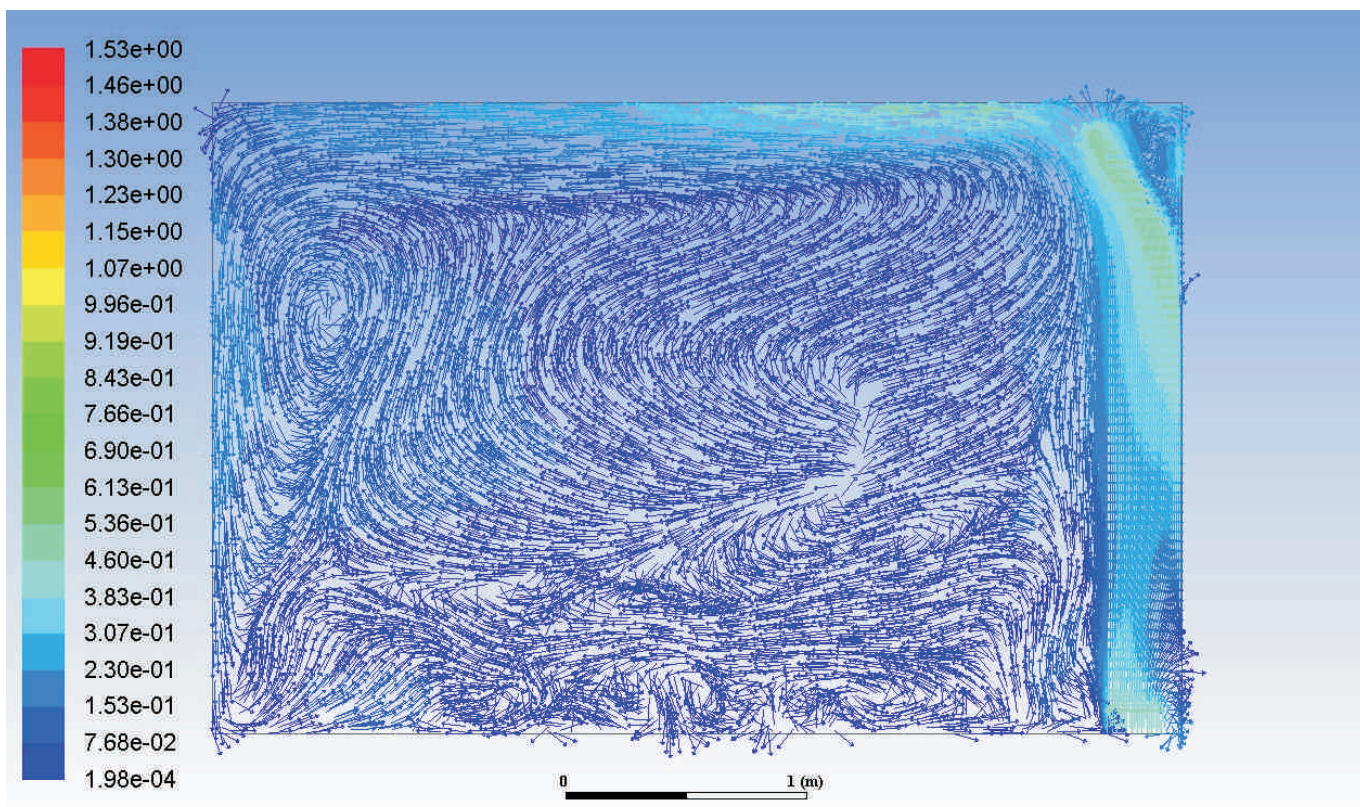




2.09 Rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené čtvrtinou délky podlahového otopného tělesa

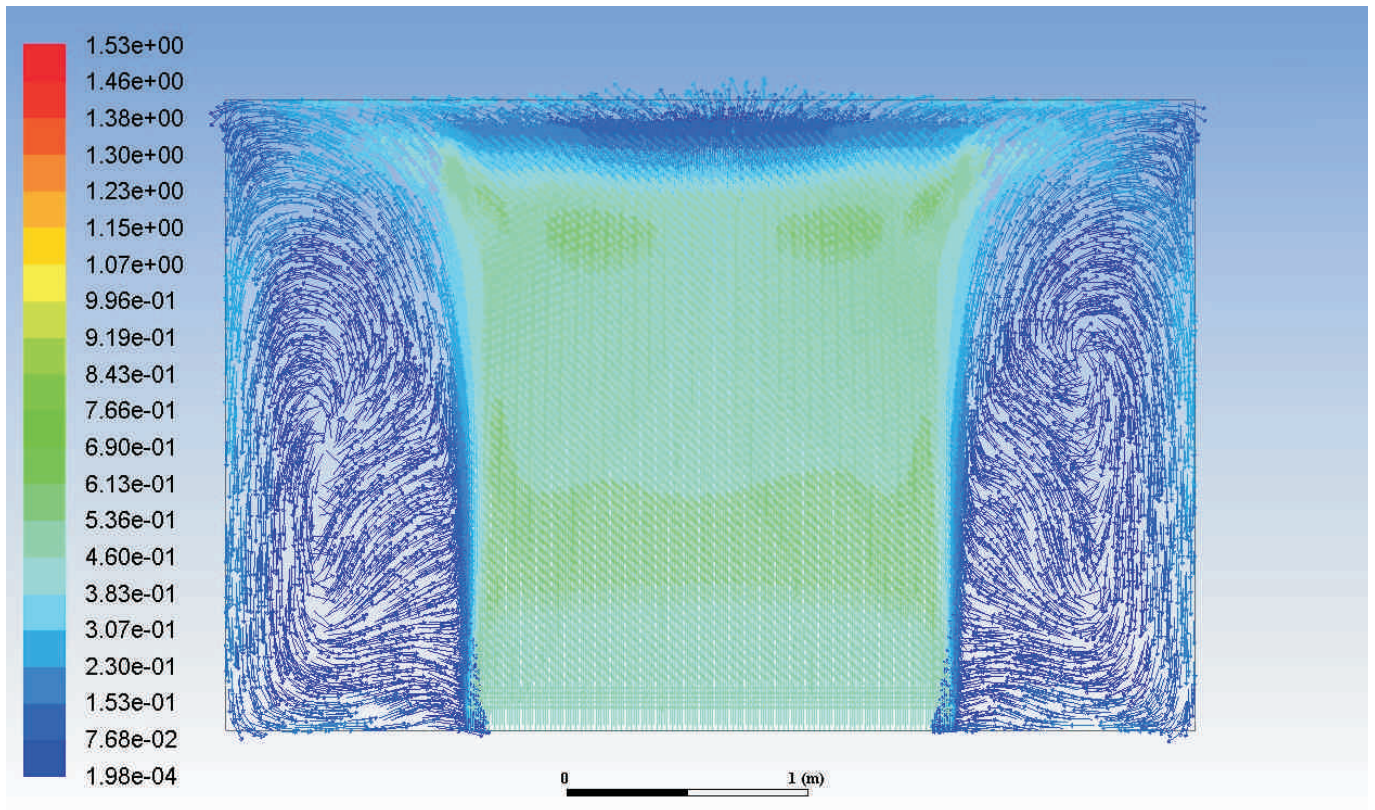


2.10 Rychlostní pole ve vertikální rovině kolmé na okno vedené na samém okraji konce podlahového otopného tělesa

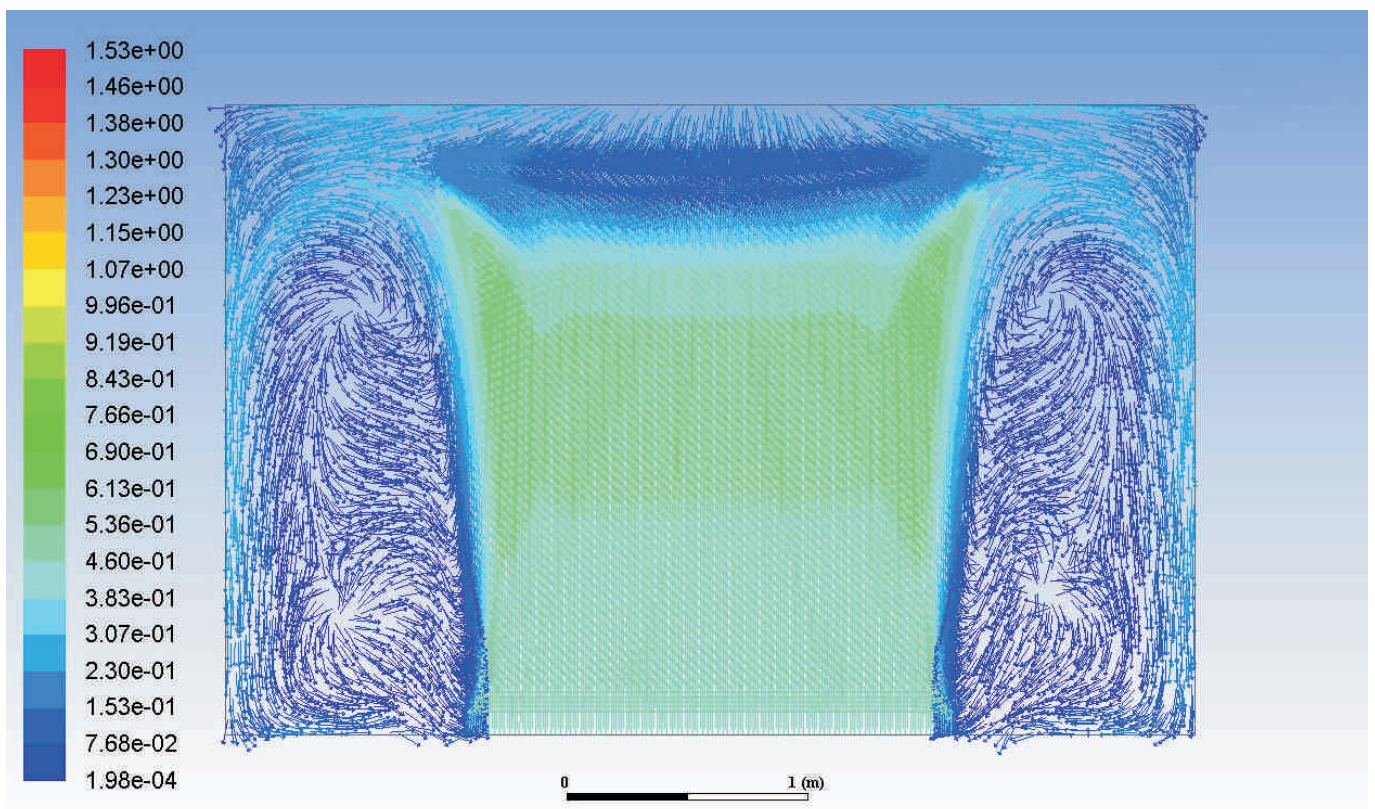




2.11 Rychlostní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem vedené středem podlahového otopného tělesa

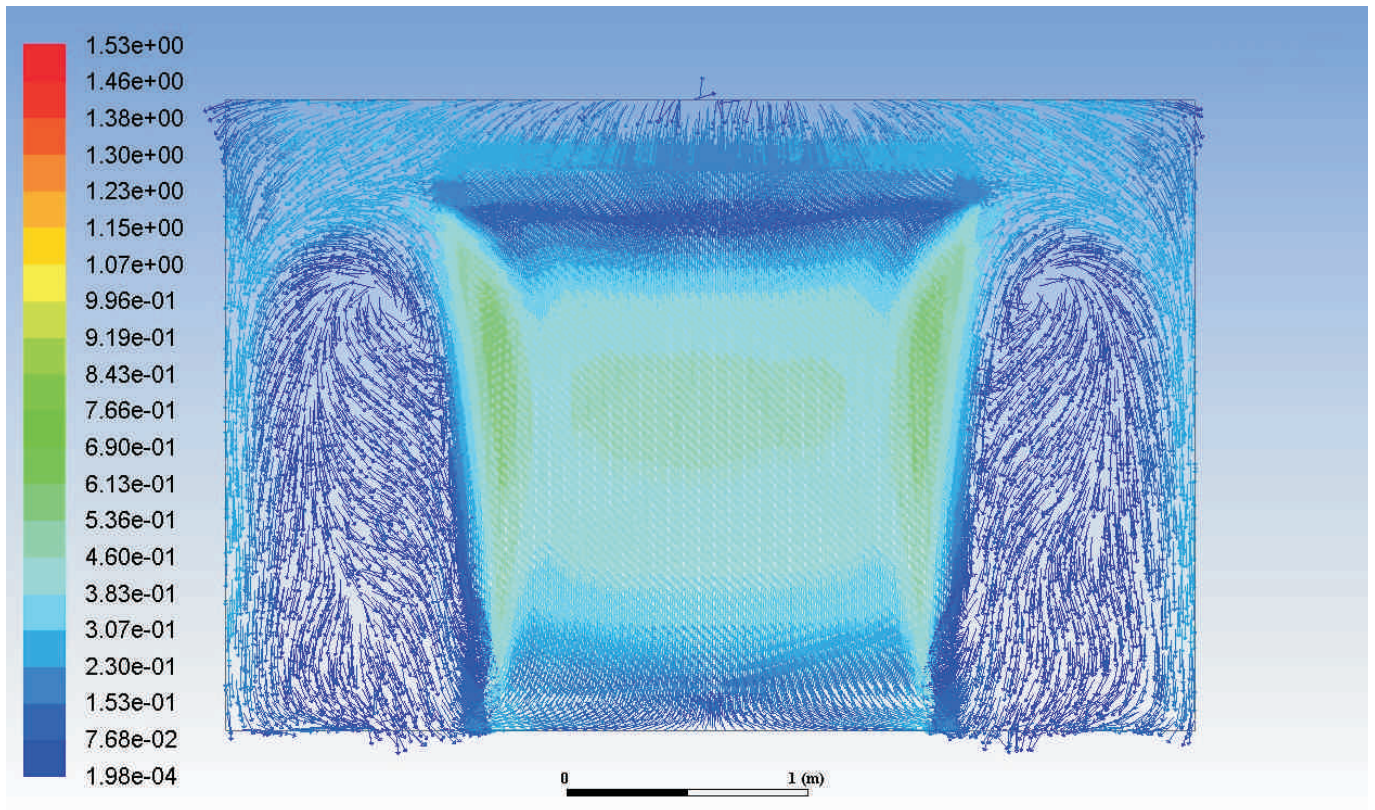


2.12 Rychlostní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 100 mm od okna





2.13 Rychlostní pole ve vertikální rovině rovnoběžné s oknem ve vzdálenosti 50 mm od okna



2.14 Teplotní pole na povrchu okna se změnou stupnicí teplot

