

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**UMÍSTĚNÍ OTOPNÉHO TĚLESA VE VYTÁPĚNÉ
MÍSTNOSTI**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. ONDŘEJ PAVELKA

14-TŽP-2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pavelka** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **419782**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Technika životního prostředí**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Umístění otopného tělesa ve vytápěné místnosti

Název diplomové práce anglicky:

Location of the Radiator in a Heated Room

Pokyny pro vypracování:

Na základě matematické simulace (Fluent) zhodnotte vliv umístění otopného tělesa ve vytápěném prostoru. Pro variantní řešení volte rohovou místnost s dvěma výplňovými otvory a jako varianty pak otopné těleso pod jedním a pak druhým oknem a otopná tělesa pod oběma okny. Řešení proveďte pro stejná otopná tělesa avšak s jinými teplotními parametry potřebnými k pokrytí tepelné ztráty. Zhodnocení proveďte s ohledem na obrazy proudění, teplotní pole a tepelný výkon otopného tělesa.

Seznam doporučené literatury:

Bašta, J., Kabele, K.: Otopné soustavy teplovodní sešit projektanta. Třetí přepracované vydání. STP 2008, ISBN 978-80-02-02064-6, 96 s.
Bašta, J.: Otopné plochy otopná tělesa. Praha: Ediční středisko ČVUT, 2016. 204 s. ISBN 978-80-01-05943-2.
Bašta, J.: Umístování otopných těles ve vytápěném prostoru. In: VVI, 2011, roč. 20, č. 4a, s. 53-62. ISSN 1210-1389.
Bašta, J.: Umístování otopných těles ve vytápěném prostoru. 17. 12. 2007. In: <http://www.tzb-info.cz>, internetový časopis oborů vytápění, vzduchotechnika, instalace, úspory energie.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D., ústav techniky prostředí FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **22.06.2018**

Platnost zadání diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

26.4. 2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Jiřímu Baštovi, Ph.D. za pomoc, cenné rady a podklady, které mi pomohly při vypracování této diplomové práce. Dále Ing. Martinu Bartákovi, Ph.D. a Ing. Petru Zelenskému, Ph.D. za vstřícnost a pomoc při řešení výpočetní části této práce v CFD.

Souhrn

Cílem této diplomové práce je zhodnocení vlivu přívodu vzduchu větrací mřížkou a umístění otopných těles ve vytápěné místnosti na rychlostní a teplotní pole pomocí počítačové simulace CFD. V úvodu práce je hodnocen vliv rychlostního a teplotního pole na tepelnou pohodu ve vytápěné místnosti. Následně je stručně popsán princip řešení v simulačním programu. V závěru této práce je provedeno vyhodnocení dopadu umístění otopných těles na tepelnou pohodu na základě obrazů proudění a rozložení teplot v prostoru sledované místnosti.

Summary

The purpose of this diploma thesis is to evaluate the effect of airflow through an ventilation grid and the position of radiators in a heated room on the velocity and temperature field using a CFD simulation of the room. This paper begins by assessing the effect of the velocity and temperature field on the thermal comfort in the room. Then there is briefly described the principle of the solution in the simulation program. Finally, this work will conclude by evaluating the effect of the placement of the radiators on the thermal comfort in the room based on the images of the airflow and temperature distribution in the observed room.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Umístění otopného tělesa ve vytápěné místnosti“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Jiřího Bašty, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 22. 6. 2018

Bc. Ondřej Pavelka

Obsah

| | |
|--|----|
| 1 ÚVOD..... | 10 |
| 2 TEPELNÁ POHODA V MÍSTNOSTI..... | 12 |
| 2.1 Otopné plochy a tepelná pohoda vytápěného prostoru..... | 13 |
| 2.1.1 Vliv proudění na tepelnou pohodu..... | 13 |
| 2.1.2 Vliv teplot na tepelnou pohodu..... | 16 |
| 2.2 Přirozené větrání a tepelná pohoda vytápěného prostoru..... | 20 |
| 3 VĚTRACÍ MŘÍŽKY A KLAPKY | 21 |
| 3.1 Příklady větracích mřížek a klapek..... | 21 |
| 3.1.1 Větrací mřížka s manuálním nastavením průtoku vzduchu..... | 21 |
| 3.1.2 Samoregulovatelná větrací klapka | 22 |
| 3.1.3 Samoregulovatelná větrací klapka s akustickou izolací | 23 |
| 3.1.4 Samoregulovatelná větrací klapka umístěná mezi rám a křídlo okna | 23 |
| 4 ANSYS FLUENT | 24 |
| 4.1 Základní rovnice | 24 |
| 4.1.1 Rovnice kontinuity..... | 25 |
| 4.1.2 Zákon zachování hybnosti | 25 |
| 4.1.3 Rovnice přenosu tepla..... | 26 |
| 4.1.4 Přirozená konvekce..... | 27 |
| 4.2 Numerické sítě | 28 |
| 4.2.1 Druhy sítě..... | 29 |
| 4.2.1 Kvalita sítě | 32 |
| 4.3 Základní metody řešení..... | 34 |
| 4.3.1 Pressure-Based Solver | 34 |
| 4.3.2 Density-Based Solver | 36 |
| 4.4 Modelování turbulentního proudění | 37 |
| 4.4.1 Reynoldsovy rovnice | 38 |
| 4.4.2. Rozšířená Boussinequova hypotéza..... | 38 |
| 4.4.3 Model turbulence $k-\varepsilon$ | 39 |
| 4.5 Modelování radiace (model S2S) | 41 |
| 4.6 Metody interpolace | 41 |
| 4.7 Konvergence | 42 |
| 4.8 Relaxace..... | 42 |
| 4.9 Příklady simulací ve Fluentu | 43 |
| 4.9.1 Simulace různého umístění a návrhu OT ve vytápěné místnosti..... | 43 |
| 4.9.2 Simulace proudění přes nastavitelnou (pohyblivou) klapku..... | 49 |

| | |
|---|----|
| 5 VLIV UMÍSTĚNÍ OT NA RYCHLOSTNÍ A TEPLOTNÍ POLE ŘEŠENÉ MÍSTNOSTI | 51 |
| 5.1 Geometrie řešené místnosti..... | 51 |
| 5.1.1 Tvorba geometrického modelu | 53 |
| 5.1.2 Varianta č. 1 | 53 |
| 5.1.3 Varianta č. 2 | 53 |
| 5.1.4 Varianta č. 3 | 53 |
| 5.2 Tvorba numerické sítě | 54 |
| 5.2.1 Odhad velikost (výšky) první buňky u stěny | 55 |
| 5.2.2 Povrchová síť | 59 |
| 5.2.3 Objemová síť | 62 |
| 5.3 Simulace ve Fluentu..... | 66 |
| 5.3.1 Zvolené modely řešení | 66 |
| 5.3.2 Okrajové podmínky | 67 |
| 5.3.3 Stanovení střední radiační teploty..... | 69 |
| 5.3.4 Konvergence | 69 |
| 5.4 Výsledky simulace | 69 |
| 5.4.1 Varianta č. 1 | 70 |
| 5.4.2 Varianta č. 2 | 77 |
| 5.4.3 Varianta č. 3 | 84 |
| 5.4.4 Střední radiační teplota | 90 |
| 5.5 Poznámky k simulaci | 91 |
| 5.6 Ekonomické hledisko..... | 92 |
| 6 ZÁVĚR | 93 |
| 7 SEZNAM PŘÍLOH..... | 96 |
| 8 POUŽITÁ LITERATURA | 98 |

Soupis použitého značení

| | | |
|-----------------|--|--|
| D | Průměr baňky kulového teploměru | [m] |
| DR | Stupeň obtěžování průvanem | [%] |
| E | Celková měrná energie | [J.kg ⁻¹] |
| F | Vnější objemová síla | [N] |
| Gr | Grashofovo číslo | [-] |
| H_{okn} | Výška okna | [m] |
| I | Intenzita větrání | [h ⁻¹] |
| | Jednotkový tenzor | [-] |
| J_j | Difúzní tok | [kg.m ⁻² .s ⁻¹] |
| Re | Reynoldsovo číslo | [-] |
| S_h | Objemový zdroj tepla | [W.m ⁻³] |
| S_{okn} | Plocha okna | [m ²] |
| T | Termodynamická teplota | [K] |
| T_u | Intenzita turbulence | [-] |
| U | Součinitel prostupu tepla | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| a | Součinitel teplotní vodivosti | [m ² .s ⁻¹] |
| c_f | Koeficient povrchového tření | [-] |
| g | Tíhové zrychlení | [m.s ⁻²] |
| h | Měrná entalpie | [J.kg ⁻¹] |
| k | Kinetická energie turbulence | [J.kg ⁻¹] = [m ² .s ⁻²] |
| p | Statický tlak | [Pa] |
| q | Hustota tepelného toku | [W.m ⁻²] |
| n | Počet časových úseků | [-] |
| \vec{r} | Tenzor Reynoldsových napětí | [Pa] |
| t | Teplota vzduchu | [°C] |
| | Čas | [s] |
| t_g | Výsledná teplota | [°C] |
| t_{okn} | Teplota povrchu okna | [°C] |
| t_r | Střední radiační teplota | [°C] |
| u | Rychlost proudění | [m.s ⁻¹] |
| u_τ | Třecí rychlost | [m.s ⁻¹] |
| u^+ | Bezrozměrná rychlost | [-] |
| w | Rychlost proudění vzduchu | [m.s ⁻¹] |
| y | Vzdálenost od stěny | [m] |
| y^+ | Bezrozměrná vzdálenost od stěny | [-] |
| z | výškový rozměr stěny | [m] |
| Δp | Rozdíl tlaků | [Pa] |
| ΔT | Rozdíl teplot | [K] |
| Θ | Výpočtová teplota | [°C] |
| α | Součinitel přestupu tepla | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| | Podrelaxační faktor | [-] |
| β | Teplotní roztažnost tekutiny | [K ⁻¹] |
| δ | Kroneckerovo delta | [-] |
| ε | Rychlost disipace kinetické energie turbulence | [m ² .s ⁻³] |
| θ | Úhel v buňce | [°] |
| λ | Součinitel tepelné vodivosti | [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] |
| λ_{eff} | Součinitel efektivní vodivosti | [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] |
| λ_t | Součinitel turbulentní tepelné vodivosti | [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] |

| | | |
|-----------|---------------------------|------------------------------------|
| μ | Dynamická viskozita | [Pa.s] |
| μ_t | Turbulentní viskozita | [Pa.s] |
| ν | Kinematická viskozita | [m ² .s ⁻¹] |
| ρ | Hustota | [kg.m ⁻³] |
| τ | Smykové napětí | [Pa] |
| φ | Relativní vlhkost vzduchu | [-] |

indexy

| | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| e | Venkovní Ideální buňka |
| i | Vnitřní |
| j | Složka j |
| kg | Konvekce na povrchu koule |
| max | Maximální |
| min | Minimální |
| new | Nová |
| ok | Okolí |
| okn | Okno |
| st | Stěna |
| w | Na stěně |
| x | Ve směru osy x |
| y | Ve směru osy y |
| z | Ve směru osy z |
| • | Skalární součin |
| X | Veličina X |
| \vec{X} | Vektor |
| $\vec{\nabla}$ | Vektorový operátor |
| \vec{X}^T | Transponovaný vektor |
| $\bar{\bar{X}}$ | Tenzor |
| $\frac{\partial}{\partial X}$ | Parciální derivace podle X |
| \bar{x} | Střední hodnota veličiny x |
| x' | Flukтуаční hodnota veličiny x |

1 ÚVOD

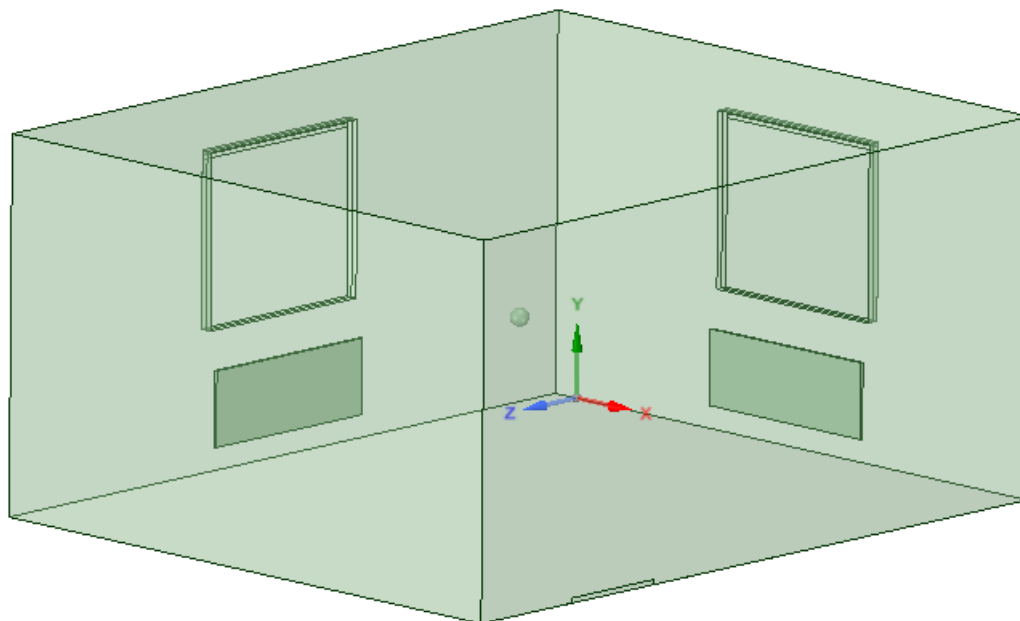
Stav vnitřního prostředí má velký vliv na člověka nacházejícího se v daném prostoru. Ve vytápěném, resp. klimatizovaném prostoru je ovlivněn pracovní výkon pracovníka, psychická pohoda člověka a v neposlední řadě i jeho zdravotní stav. Jakousi spokojenost se stavem a kvalitou vnitřního prostředí vyjadřuje tepelná pohoda člověka. Tepelná pohoda, neboli tepelný komfort, je subjektivní pocit každého z nás a je ovlivněn mnoha parametry ve vytápěném (klimatizovaném) prostoru. Hlavními jsou obrazy proudění v místnosti, rozložení teplot vzduchu v prostoru a vliv povrchových teplot okolních ploch. Dalšími jsou vlhkost vzduchu a také aktivita člověka.

Kvalitu vnitřního prostředí ovlivňuje jak volba systému vytápění, tak i systému přívodu a distribuce vzduchu a další. Díky optimální volbě systémů a jejich konfigurací můžeme zajistit vhodné podmínky pro pobyt osob v daném vnitřním prostoru.

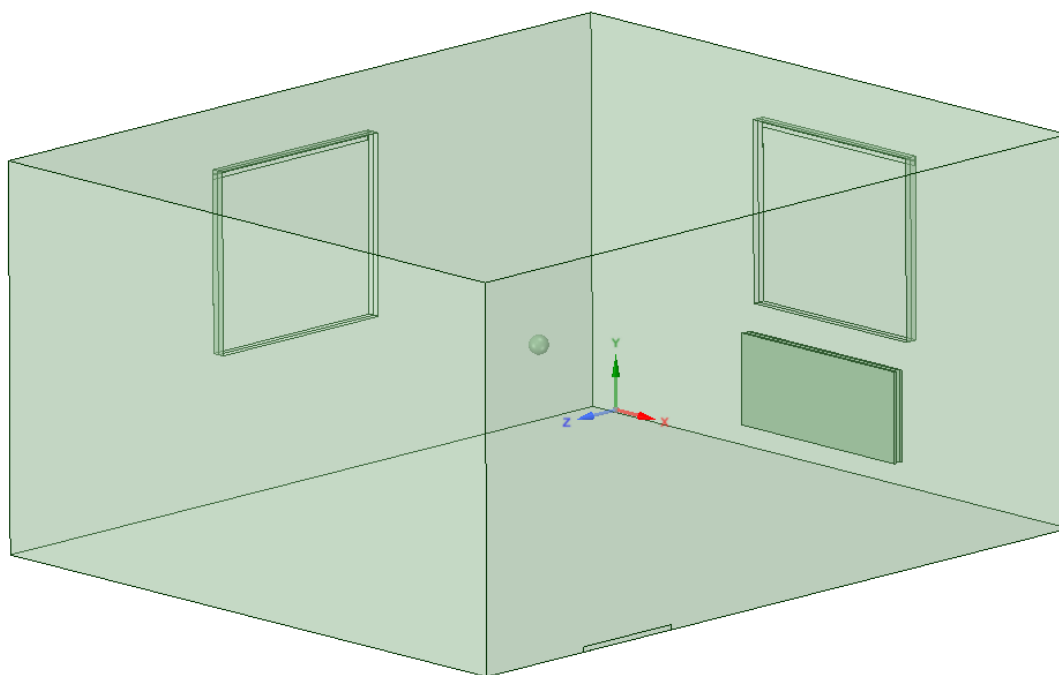
V rámci vytápění můžeme volit z mnoha systémů, od otopných těles, přes podlahové vytápění až po teplovzdušné vytápění. Pomocí otopných těles můžeme dosáhnout téměř ideálních podmínek ve vytápěné místnosti. Otopná tělesa nám oproti teplovzdušnému vytápění zajišťují přítomnost sálavé složky, a při vhodném návrhu a umístění zajišťují vyrovnaný teplotní profil po výšce vytápěné místnosti srovnatelný s podlahovým vytápěním. Z těchto důvodů jsou zvolena otopná tělesa jako systém vytápění ve sledované místnosti.

Dostatečné množství čerstvého vzduchu je zásadní pro pobyt osob ve vnitřním prostoru nejen obytných budov. Pro jeho zajištění ve vytápěném prostoru máme opět mnoho možností. Volba přirozeného větrání pomocí větracích mřížek, či klapek je vhodná především pro nulové prostorové nároky na přírodní vzduchovody a mnohem nižší počáteční investici, oproti systémům nuceného větrání.

Cílem této diplomové práce je stanovení rychlostního a teplotního pole v rohové místnosti pomocí numerické simulace. Řešeny budou tři varianty umístění otopných těles ve vytápěném prostoru a následně bude hodnocen vliv umístění OT na tepelnou pohodu v místnosti.



Obr. 1 Řešená místnost: varianta č. 1



Obr. 2 Řešená místnost: varianta č. 2

2 TEPELNÁ POHODA V MÍSTNOSTI

Tepelná pohoda nám zastupuje subjektivní pocit každého z nás, při kterém se cítíme v prostoru dobře. Podmínkou však je zachování tepelné rovnováhy člověka s okolím při optimálních fyziologických kritériích. Těmi jsou např. teplota povrchu pokožky ve stavu tepelné pohody a tepelné toky odváděné a přiváděné člověku. Tyto tepelné toky musí opět splňovat podmínku tepelné pohody člověka a jejich přípustné hodnoty jsou dány vztahy v odborné literatuře. Např. ve skriptech Technika prostředí. [1]

S tepelnou pohodou člověka v prostředí také souvisí veličiny popisující tepelný stav konkrétního prostředí, ve kterém se člověk nachází. V našem případě se jedná o vytápěnou místnost. Těmito veličinami jsou

| | |
|---------------------------|--|
| teplota vzduchu | t [$^{\circ}\text{C}$], |
| střední radiační teplota | t_r [$^{\circ}\text{C}$], |
| relativní vlhkost vzduchu | φ [-], |
| rychlost proudění vzduchu | w [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] a |
| intenzita turbulence | T_u [-]. [1] |

Tyto veličiny, resp. parametry prostředí, jsou ovlivněny jak volbou a umístěním otopné plochy, tak i distribucí přiváděného vzduchu do místnosti. Výsledkem je ovlivnění směru a rychlosti proudění vzduchu ve sledovaném prostoru, dále teplotního profilu a povrchových teplot všech ploch v místnosti. Vliv teploty okolních ploch nám zastupuje právě výše uvedená střední radiační teplota, dříve označovaná jako účinná teplota okolních ploch. Teplotní profil by měl být po výšce prostoru i do jeho hloubky co nejvíce vyrovnaný, aby byl zajištěn tepelný komfort. Rychlosti proudění vzduchu by měly v pásmu pobytu osob dosahovat optimálních hodnot a neměly by se příliš měnit s časem, což nám vyjadřuje intenzita turbulence. Celkový obraz proudění vzduchu v místnosti nám umožní zhodnotit, jaká budou problematická místa ohledně průměrné rychlosti proudění vzduchu, ale také jaký směr bude proudění mít a kde vznikají místa nedostatečně proplachovaná. Tento problém může být jedním z faktorů tvorby plísní na stavebních konstrukcích v místech se stagnujícím vzduchem. O vlivu vytápění a přívodu vzduchu do místnosti na výše zmíněné parametry vnitřního prostředí budou pojednávat následující kapitoly.

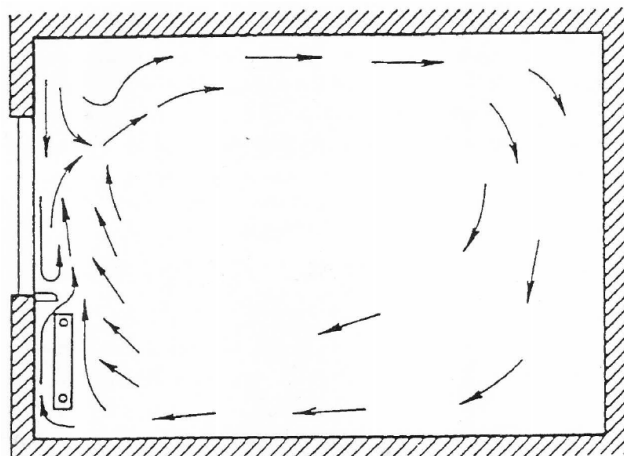
2.1 Otopné plochy a tepelná pohoda vytápěného prostoru

Rozložení teplot a proudění vzduchu ve vytápěné místnosti ovlivňuje hlavně vzájemné rozmístění ochlazovaných a otopných ploch. U otopných ploch rozhoduje také jejich velikost. Jako ochlazované konstrukce rozumíme především stěny obvodových konstrukcí budovy a výplně v otvorech těchto konstrukcí, tedy okna a potažmo i dveře. Na ochlazovaných konstrukcích nám vznikají chladné dolů padající proudy, které padají až k podlaze a mohou se šířit i poměrně hluboko do místnosti vlivem Coandova efektu. Tomu se snažíme zabránit vhodným umístěním otopné plochy, která pak dolů padající chladné proudy kompenzuje pomocí teplých vzhůru stoupajících konvekčních proudů. [2]

Na tepelnou pohodu člověka mají také vliv teplotní profily jak po výšce, tak do hloubky místnosti, které by měly být co nejvyrovnanější. S tím souvisí i teplotní gradient, který nám vyjadřuje o kolik se mění teplota vzduchu v místnosti s výškou. Dalším důležitým prvkem je sálavá složka tepelného toku. Lidské tělo vnímá sálavou složku intenzivněji a je pro něj příjemná. Tepelný tok sáláním závisí na povrchových teplotách a také na poloze člověka, kdy hrají roli poměry osálení od jednotlivých ploch. V následujících kapitolách se bude jednotlivých vlivům věnováno podrobněji.

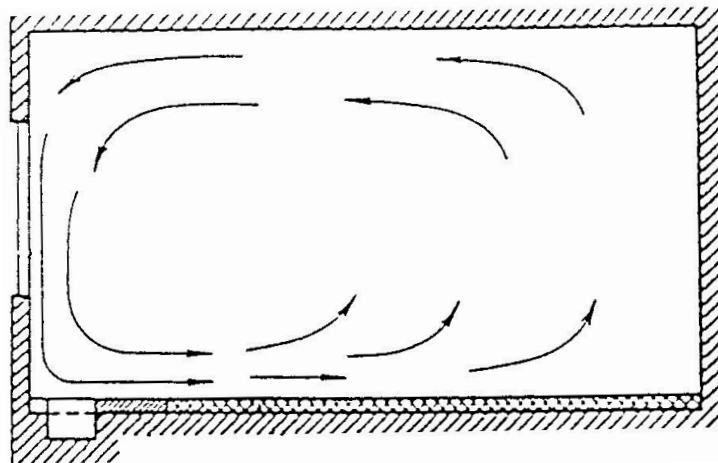
2.1.1 Vliv proudění na tepelnou pohodu

Jak je uvedeno již v předchozí podkapitole, na chladných plochách vznikají vlivem vzlaku dolů padající chladné proudy a naopak u otopných ploch se tvoří teplé stoupající proudy. Pokud budeme mít otopné těleso umístěno pod oknem, bude nám odklánět chladné proudy směrem ke stropu a současně se bude teplý konvekční proud s tím chladným směřovat. To se bude dít pouze po délce otopného tělesa (OT). Mimo OT tato kompenzace neproběhne, ale při současných požadavcích na tepelně technické vlastnosti vnějších stěn, viz ČSN 73 0540, nám tento fakt nevadí. Právě díky dobrým tepelně technickým vlastnostem jsou povrchové teploty obvodových stěn poměrně vysoké a tudíž na nich vznikají pouze slabé dolů padající chladné proudy. Na obrázku 3 můžeme vidět jak OT eliminuje chladné proudy vznikající podél výšky okna. [2]



Obr. 3 Proudění vzduchu ve vytápěné místnosti s umístěním OT pod oknem [2]

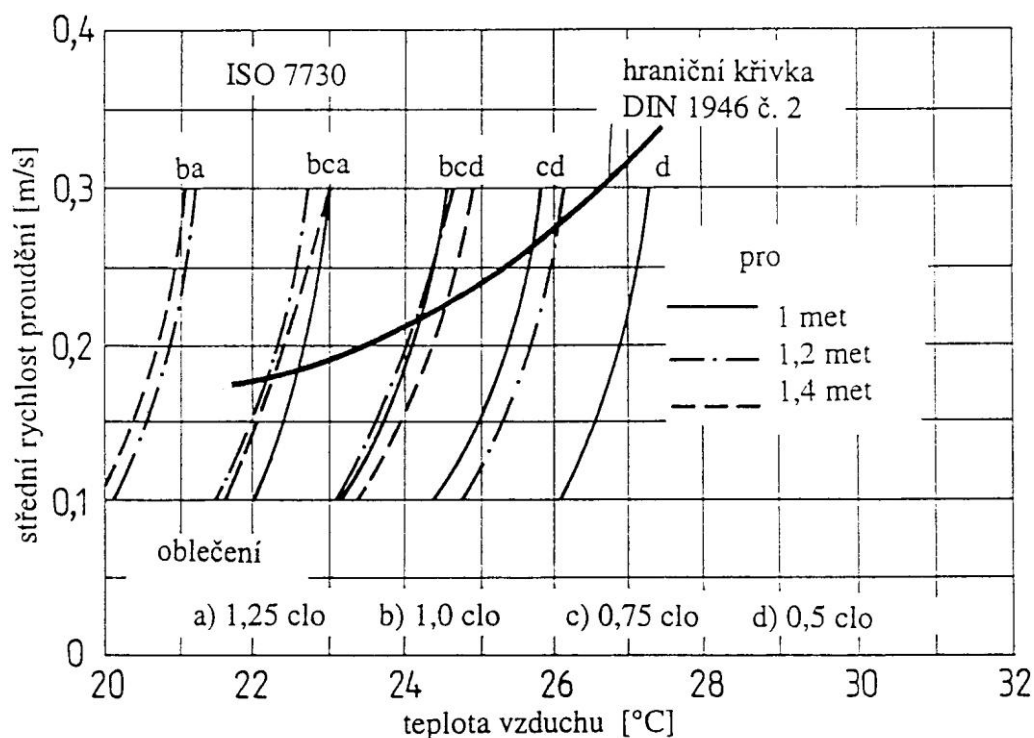
Pro porovnání můžeme uvažovat podlahovou otopnou plochu jako systém vytápění v místnosti. Chladný proud se v tomto případě dostává až k podlaze, kde je postupně ohřívám a odkláněn vzhůru. Nepříjemný dolů padající proud se dostává poměrně hluboko do prostoru, což můžeme vidět na obrázku 4, a může tak působit místní diskomfort. Kompenzaci chladného proudu nám může poskytnout pouze podlahový konvektor s nuceným vybitením tepla, který bude umístěn u ochlazované konstrukce. [2]



Obr. 4 Proudění vzduchu ve vytápěné místnosti s podlahovým vytápěním [2]

Základní charakteristikou proudění je jeho rychlost. Každá osoba vnímá její vliv na tepelnou pohodu individuálně a závisí nejenom na oblečení a aktivitě člověka, ale také na jeho stáří, případně na duševním a fyzickém zdraví. Na základě pozorování a měření byly stanoveny hodnoty středních rychlostí proudění v prostoru. [2]

Obrázek 5 nám ukazuje hodnoty střední rychlosti proudění vzduchu v závislosti na teplotě vzduchu a na činnosti a druhu oblečení osob přítomných v dané místnosti dle ISO 7730. Dále jsou na obrázku zobrazeny hodnoty střední rychlosti proudění v závislosti pouze na teplotě vzduchu dle DIN 1946, část 2.



Obr. 5 Střední rychlost proudění vzduchu v závislosti na teplotě vzduchu a druhu oblečení a aktivity člověka [2]

Další charakteristikou proudění je jeho turbulence, která je pro posouzení tepelného komfortu vyjádřena pomocí intenzity turbulence. Jedná se o poměr velikostí fluktuací rychlosti a střední hodnoty rychlosti proudění [3]. Fluktuace rychlosti mají na pocit tepelného komfortu člověka poměrně velký vliv. Nejcitlivější jsou odkryté části lidského těla, kde můžeme zaznamenat zvýšený pocit chladu. Intenzita turbulence T_u je dána vztahem

$$T_u = \frac{\sqrt{\frac{\sum w'^2}{n-1}}}{\bar{w}}, \quad (1)$$

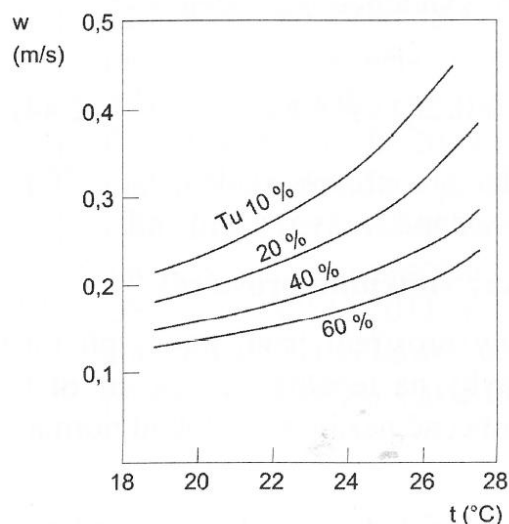
kde w' flukтуаční rychlost [m.s⁻¹],

\bar{w} střední rychlost [m.s⁻¹],

n počet časových okamžiků [-].

Celý čitatel odpovídá standardní směrodatné odchylce s . [2]

Ve větraném či vytápěném prostoru se hodnota intenzity turbulence pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,6 a to v zóně pobytu osob. Následující obrázek ukazuje přípustné hodnoty střední rychlosti proudění v závislosti na teplotě vzduchu a intenzitě turbulence. Obrázek je určen pro stupeň obtěžování průvanem $DR = 20\%$, což znamená 20 % nespokojených osob, a pro relativní vlhkost vzduchu 0,5. Určeno dle ISO 7730. [4]



Obr. 6 Maximální přípustná střední rychlost vzduchu v závislosti na teplotě vzduchu a intenzitě turbulence. Pro $DR = 20\%$, $\phi = 0,5$ [4]

2.1.2 Vliv teplot na tepelnou pohodu

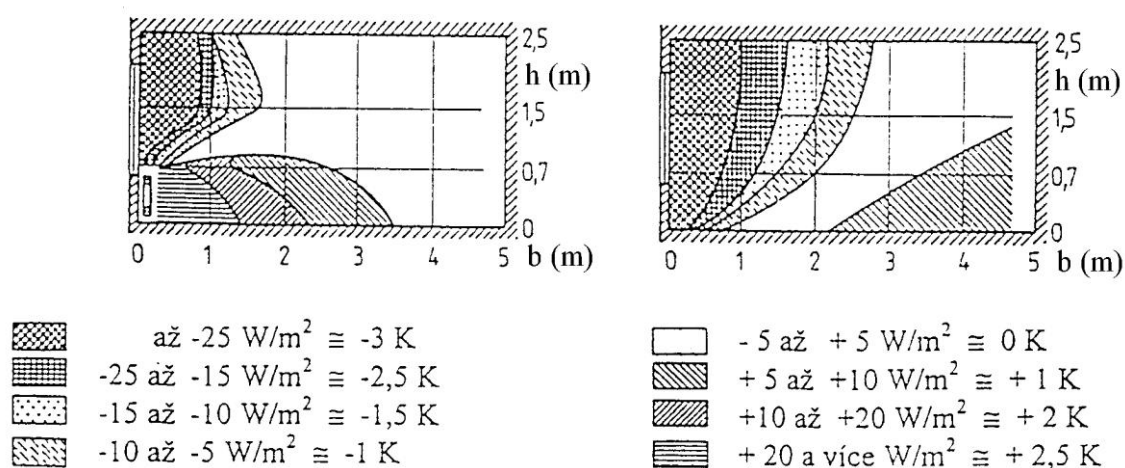
Pokud se budeme zabývat vlivem teplot na tepelný komfort, musíme se věnovat jak teplotě vzduchu, tak i povrchovým teplotám ploch v místnosti. Obě tyto teploty mají podstatný vliv na pohodu člověka. Nelze však hovořit pouze o určité hodnotě teploty vzduchu či střední radiální teploty, jako o parametru zaručujícím optimální vnitřní prostředí. Jak je uvedeno již v úvodu této kapitoly, tepelnou pohodu ovlivňuje mnoho parametrů.

Teplota vzduchu

Za optimální hodnotu teploty vzduchu se dnes považuje pro normálně oblečeného, sedícího člověka, který nevykonává příliš fyzicky náročnou práci, hodnota $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro místnosti převážně využívané ženami se za optimální teplotu považuje $23\text{ až }24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při zvyšující se fyzické činnosti osob se teplota vzduchu ve vytápěné místnosti adekvátně snižuje. [2]

Teplota okolních ploch

Na tepelnou pohodu člověka v místnosti mají teploty okolních ploch značný význam, protože neoddělitelně souvisí se sálavým tepelným tokem, který probíhá právě mezi člověkem a okolními plochami. Sálavá složka tepelného toku má na člověka značný vliv, protože jí vnímá velmi intenzivně. Na obrázku 8 jsou znázorněny oblasti s různou intenzitou sálání ve vytápěném prostoru, jak pro systém s otopným tělesem, tak pro podlahové vytápění. Můžeme vidět, že u varianty s otopným tělesem je oblast se zápornou hodnotou intenzity sálání mnohem menší, než je tomu u varianty s podlahovým vytápěním. Tedy, že je dříve vykompenzován vliv chladného povrchu okna. [2]



Obr. 8 Oblasti různé intenzity sálání ve vytápěném prostoru [5]

Teploty okolních ploch nám v technice prostředí zastupuje střední radiační teplota, což je myšlená teplota okolních ploch, při které by byl stejný tepelný tok sáláním mezi člověkem a okolními plochami jako ve skutečnosti. Střední radiační teplota v podstatě nahrazuje všechny povrchové teploty okolních ploch jednou jedinou hodnotou. Střední radiační teplota se stanovuje výpočtem poměrně složitě, proto se v praxi určuje na základě měření výsledné teploty t_g kulovým teploměrem a teploty vzduchu měřené stíněným teploměrem. Střední radiační teplota je pak dána vztahem

$$t_r = \sqrt[4]{(t_g + 273,15)^4 + 1,855 \cdot 10^7 \alpha_{kg} (t_g - t)} - 273,15, \quad (2)$$

kde t teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$],

α_{kg} součinitel přestupu tepla konvekcí na povrchu koule [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

Vztahy pro součinitel přestupu tepla na povrchu koule jsou dány dle normy ČSN EN ISO 7726. Norma stanovuje vztah pro klidný vzduch a pro vzduch s rychlostí proudění větším než $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [4]

Vztah pro klidný vzduch

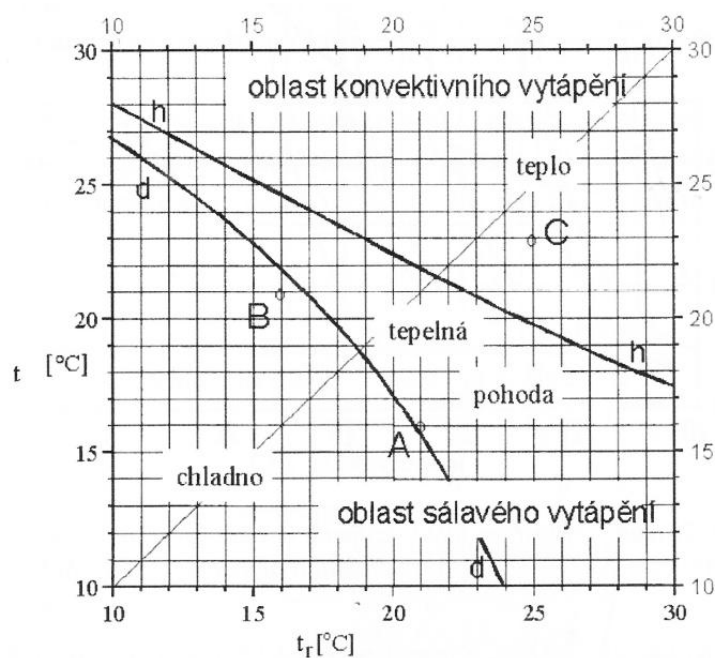
$$\alpha_{kg} = 1,4 \left[\frac{|t - t_g|}{D} \right]^{0,25}, \quad (3)$$

kde D průměr baňky kulového teploměru [m].

Vztah pro vzduch s rychlostí proudění $w > 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

$$\alpha_{kg} = 6,3 \frac{w^{0,6}}{D}, \quad (4)$$

Pokud se podíváme společně na teplotu vzduchu a na střední radiační teplotu jako na dva parametry, které ovlivňují tepelnou pohodu osob ve vytápěném prostoru, zjistíme, že neoptimálnější je stav, kdy je jejich rozdíl minimální. Optimálním se ještě považuje rozdíl do 3 K. Díky současným tepelně technickým vlastnostem obvodových konstrukcí se zvyšují povrchové teploty konstrukcí a tím se zvyšuje i hodnota střední radiační teploty, což směřuje právě ke zmenšování rozdílu mezi teplotou vzduchu a střední radiační teplotou u systému vytápění pomocí otopných těles. Na obrázku 9 je zobrazena oblast tepelné pohody podle Ralčuka závisící právě na teplotě vzduchu a střední radiační teplotě. [2]



Obr. 9 Oblast tepelného pohody dle Ralčuka [6]

2.2 Přírozené větrání a tepelná pohoda vytápěného prostoru

U tohoto způsobu větrání je přívod čerstvého venkovního vzduchu ovlivněn tlakovými poměry mezi vnitřním a venkovním prostředím. Množství přiváděného venkovního vzduchu bude mít vliv na tepelnou pohodu ve vytápěném prostoru. Hlavní vliv bude mít rychlost a teplota vzduchu a s tím související dosah tohoto chladného proudu. Při vysokých rychlostech může nastat stav, kdy proud chladného větracího vzduchu bude zasahovat až do oblasti pobytu osob a tím vytvářet místní diskomfort. Z tohoto důvodu jsou dnes větrací klapky a mřížky vybaveny konstrukčními řešeními, která při zvyšujících se rychlostech nabíhajícího vzduchu uzavírají větrací otvor potažmo ho celý uzavřou.

Souvislost s komfortem člověka v jakémkoli prostoru má i problematika stáří vzduchu. Stáří vzduchu je závislé nejen na množství přiváděného čerstvého vzduchu, ale také na jeho distribuci. Pokud nebude čerstvý vzduchu daný prostor dostatečně proplachovat, mohou vznikat místa, která jím budou špatně zásobována. V takových místech je zvýšená koncentrace oxidu uhličitého a vodní páry. Tato místa v kombinaci s nízkou povrchovou teplotou mohou představovat problém z hlediska tvorby plísní. Pokud se nedostatečně proplachovaný prostor vyskytne v pásmu pobytu osob, je pro člověka pobyt v něm velmi nepříjemný až škodlivý.

Větrací klapky a mřížky se většinou umísťují do rámu okna, díky tomu mohou podporovat dolů padající chladné proudy, které vznikají u okna. To nastane v případě, když bude rychlost větracího vzduchu vystupujícího z větracího otvoru dost malá na to, aby větrací vzduch nepostupoval do místnosti a padal dolů podél okna. Pokud bude výsledný chladný dolů padající proud dostatečně silný, může překovat stoupající konvekční proudy od otopného tělesa a dostat se až k podlaze.

Konkrétní příklady větracích mřížek a klapek viz kapitola 3.1.

3 VĚTRACÍ MŘÍŽKY A KLAPKY

Důležitost větrání spočívá především v odvodu škodlivin z vnitřního prostoru staveb. V obytných prostorách se jedná hlavně o oxid uhličitý a o vodní páru. Velké množství vodní páry může v případech, kdy povrchová teplota některé z konstrukcí dosáhne hodnoty teploty rosného bodu vlhkého vzduchu v místnosti, způsobovat tvorbu plísní na těchto konstrukcích. Pokud se dostaneme do stádia, že plísně začnou uvolňovat výtrusy v podobě spór, je to stav pro naše zdraví obzvláště nebezpečný.

Výhodou přívodu vzduchu infiltrací je nulová energetická náročnost provozu větrání, oproti nucenému přívodu čerstvého vzduchu. Při realizaci větrání pomocí větracích mřížek v kombinaci s odtahovými ventilátory v koupelně a na toaletě můžeme dosáhnout kvalitního provětrání celého objektu za minimálních nákladů na provoz ventilátorů. Nespornou výhodou je nezávislost systému na obsluze. Nevýhodou tohoto řešení je přívod chladného vzduchu během otopného období, který musíme ohřívat. To je nutné uvažovat při návrhu otopné soustavy.

Větrací mřížky a klapky mohou sloužit nejen pro zajištění přívodu čerstvého vzduchu pro osoby, které pobývají ve větraném prostoru, ale mohou být použity pro přívod spalovacího vzduchu pro plynové spotřebiče a pro kotle na pevná paliva. V následující kapitole jsou uvedena některá konstrukční řešení větracích mřížek a klapek.

3.1 Příklady větracích mřížek a klapek.

V následující části práce jsou zmíněny pouze některé typy větracích mřížek a klapek. Ostatní typy jsou svou konstrukcí v podstatě podobné, mají pouze rozličné tvary.

3.1.1 Větrací mřížka s manuálním nastavením průtoku vzduchu

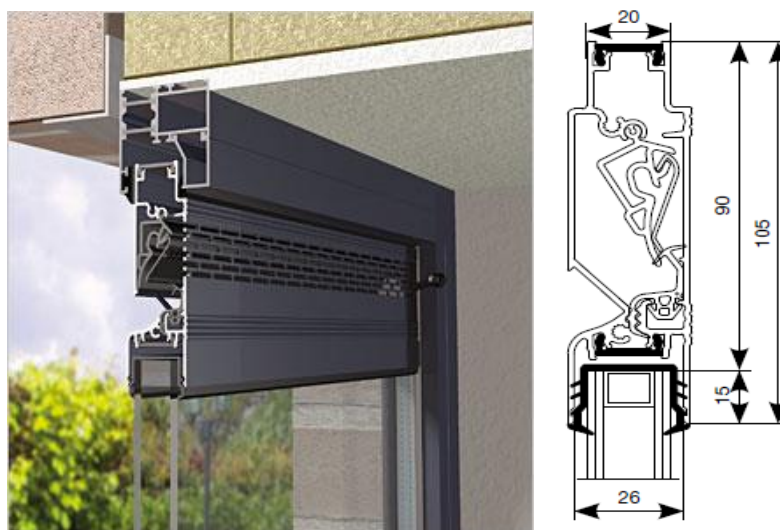
U tohoto typu se množství větracího vzduchu nastaví pomocí posunutí dvou perforovaných kulis. Nastavení je závislé na uživateli, což znamená, že se nejedná o samoregulovatelný systém. Mřížka je usazena mezi rámem okna a skleněnou výplní okna. Pro omezení účinku větru je na vnější straně opatřena dolů zahnutým hliníkovým plechem. Mřížka může být umístěna jak horizontálně, tak vertikálně. Horizontální umístění mřížky je zobrazeno na obrázku 10.



Obr. 10 Větrací mřížka s manuálním nastavením [7]

3.1.2 Samoregulovatelná větrací klapka

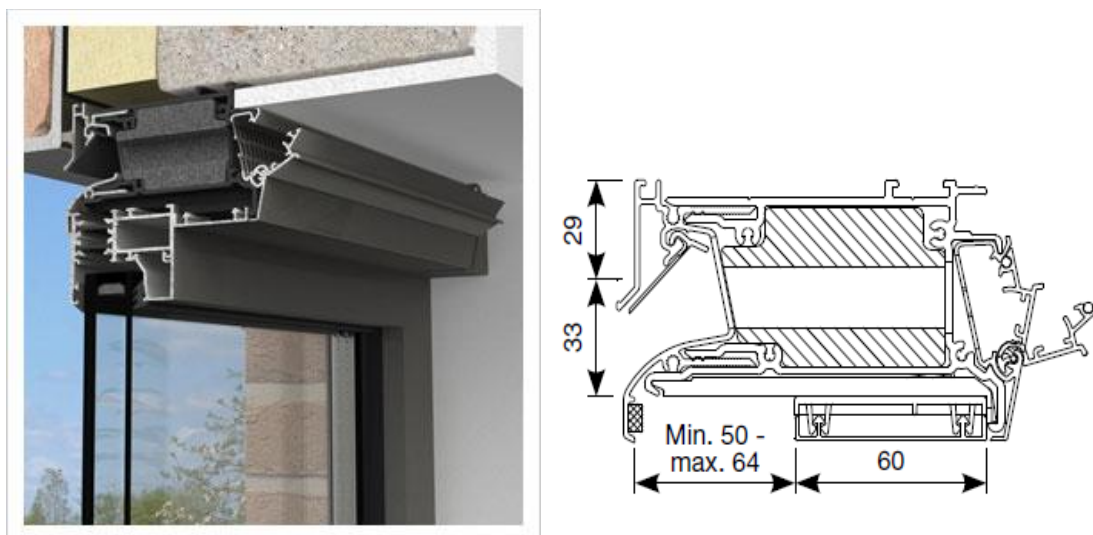
Tento typ větrací klapky se uzavírá v závislosti na rychlosti větru, jedná se tedy o samoregulovatelnou větrací klapku. Celá konstrukce klapky se může instalovat do mnoha typů oken a je nasazena v horní části okna na sklo, viz obrázek 11. Klapka je tedy umístěna mezi sklo a rám okna. Je možná instalace i do dolní části okna.



Obr. 11 Samoregulovatelná větrací klapka [7]

3.1.3 Samoregulovatelná větrací klapka s akustickou izolací

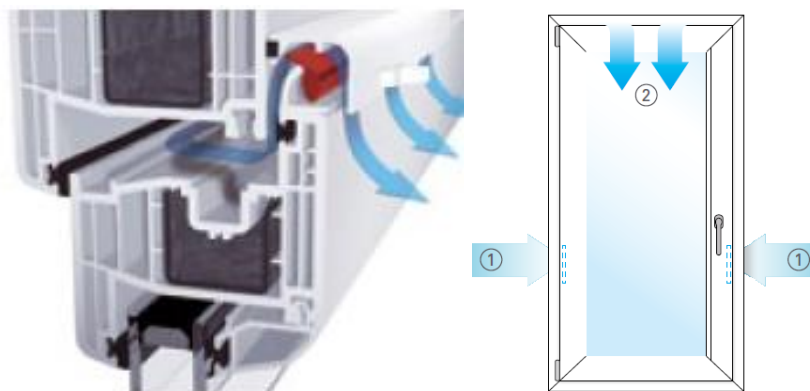
Tato větrací klapka je navíc opatřena integrovanou akustickou pěnou, která snižuje nepříjemné účinky venkovního hluku. Klapka, podobně jako výše uvedená, reaguje na povětrnostní podmínky a sama uzavírá větrací otvor. Klapka je umístěna v horní části okna, mezi rámem okna a otvorem v obvodové konstrukci. Umístění klapky a její konstrukce je zobrazena na obrázku 12.



Obr. 12 Samoregulovatelná větrací klapka s akustickou izolací [7]

3.1.4 Samoregulovatelná větrací klapka umístěná mezi rám a křídlo okna

U této klapky není nutný dodatečný zásah do konstrukce okna. Klapka se instaluje mezi rám a křídlo okna. Lze ji instalovat i do stávajících oken. Klapka se instaluje v horní části okna, vzduch z venkovního prostředí se do prostoru mezi rám a křídlo okna dostává pomocí odstranění těsnění právě mezi rámem a křídlem okna.

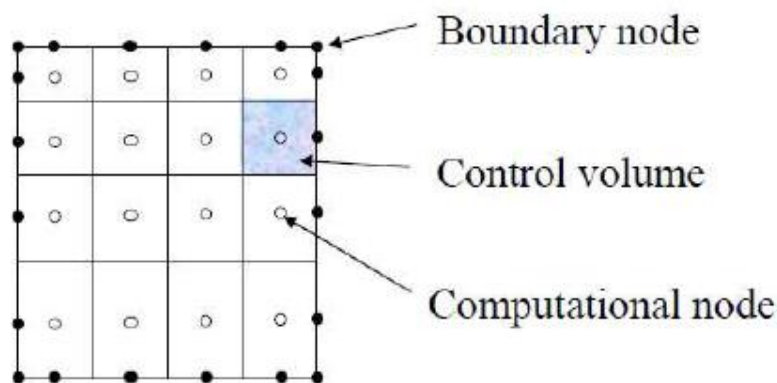


Obr. 13 Samoregulovatelná větrací klapka mezi rám a křídlo okna [8]

4 ANSYS FLUENT

Fluent je simulační program sloužící k matematickému modelování proudění tekutin. Výpočet je založen na metodě konečných objemů, kdy je řešená spojitá oblast rozdělena na menší části konečného počtu a v těchto částech jsou počítány veličiny charakterizující proudění. Tomuto postupu se říká diskretizace a menší části celkového objemu nazýváme numerická síť.

Základní informace o numerické síti, modelech řešení a průběhu výpočtu budou uvedeny v následujících podkapitolách.



Obr. 14 Názorný příklad sítě ve 2D [9]

4.1 Základní rovnice

Ve Fluentu lze modelovat mnoho případů proudění, ať už jde o laminární proudění nestlačitelné kapaliny, nebo o vícefázové proudění, či o proudění přes porézní vrstvy. Pro všechny případy, které se dají v programu řešit, jsou k dispozici modely pro řešení daného případu s příslušnými rovnicemi. Vždy jsou však uvažovány zákony zachování a to především zákon zachování hmotnosti a hybnosti, případně energie (přenos tepla). Tyto tři základní zákony můžeme popsat níže uvedenými rovnicemi.

4.1.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity vyjadřuje zákon zachování hmotnosti. Při jejím odvození se vychází z toku hmotnosti, respektive z hustoty hmotnostního toku, viz obrázek 15. Rovnice kontinuity je zapsána v diferenciálním tvaru

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (5)$$

kde \vec{u} vektor rychlosti proudění [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

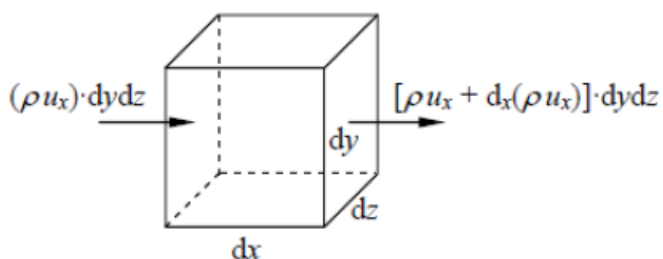
ρ hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

$\frac{\partial}{\partial t}$ parciální derivace podle času,

$\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ vektorový operátor.

První člen rovnice vyjadřuje časovou akumulaci hmotnosti v kontrolním objemu a druhý člen vyjadřuje rozdíl mezi přítokem a odtokem kontrolního objemu.

Při vyjádření rovnice kontinuity v manuálu programu Fluent se na pravé straně místo nuly vyskytuje člen S_m . Tento člen vyjadřuje hmotu dodanou do jedné spojité fáze druhou v ní rozptýlenou fází, např. odpařování kapiček kapaliny. [10]



Obr. 15 Průtok tekutiny pevným kontrolním objemem [3]

4.1.2 Zákon zachování hybnosti

Zachování hybnosti v inerciální vztažné soustavě lze popsat vztahem [11]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (6)$$

kde p statický tlak [Pa],

\vec{g} vektor tíhového zrychlení $(0, 0, g)$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],

$\vec{\tau}$ tenzor smykových napětí (tenzor 3x3) [Pa],

\vec{F} vektor vnějších objemových sil [N].

První člen na levé straně rovnice vyjadřuje zrychlení tekutiny, akumulaci hybnosti, a druhý člen konvektivní zrychlení. První člen na pravé straně odpovídá gradientu tlaku, druhý člen smykovému napětí, třetí člen zastupuje tíhovou sílu a poslední člen vnější objemové síly, které působí na tekutinu.

Tenzor smykového napětí získáme ze vztahu [10]

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\vec{\nabla} \vec{u} + \vec{\nabla} \vec{u}^T) - \frac{2}{3} \vec{\nabla} \cdot \vec{u} I \right], \quad (7)$$

kde I jednotkový tenzor [-],

\vec{u}^T transponovaný vektor rychlosti proudění [m.s^{-1}],

μ dynamická viskozita [Pa.s].

4.1.3 Rovnice přenosu tepla

K výpočtům přenosu tepla využívá ANSYS Fluent rovnici zachování energie v následujícím tvaru [10]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [\vec{u} (\rho E + p)] = \nabla \cdot \left[\lambda_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{u}) \right] + S_h, \quad (8)$$

kde E celková měrná energie [J.kg^{-1}],

T termodynamická teplota [K],

J_j difúzní tok složky j [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$],

S_h objemový zdroj tepla [W.m^{-3}],

h_j měrná entalpie složky j [J.kg^{-1}],

λ_{eff} součinitel efektivní vodivosti [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$].

Levá strana rovnice opět představuje akumulaci, kterou vyjadřuje první člen a jde o akumulaci energie, a rozdíl energií na přítoku a odtoku do kontrolního objemu, ten je reprezentován druhým členem. Pravá strana vyjadřuje vedení tepla, difúzi energie, přeměnu tření na teplo, tedy disipaci energie, a poslední člen S_h zastupuje vnitřní objemový zdroj. [10]

Součinitel efektivní vodivosti λ_{eff} je roven součtu součinitele tepelné vodivosti λ a součinitele turbulentní tepelné vodivosti λ_t . [9]

Celková měrná energie E je v rovnici (8) dána vztahem [10]

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}, \quad (9)$$

kde h měrná entalpie [J.kg^{-1}],

u rychlost proudění tekutiny [m.s^{-1}].

Entalpie je následně určena na základě zvoleného modelu tekutiny a proudění.

4.1.4 Přirozená konvekce

Konvekce je mechanismus, kterým se v tekutinách přenáší teplo. Základním předpokladem je přítomnost proudění a teplotního gradientu v tekutině. Přirozená konvekce vzniká na základně vztlakových sil, které působí na částice tekutiny o různých teplotách, resp. hustotách. Z toho vyplývá, že hustota tekutiny musí záviset a závisí na teplotě.

Dalším druhem konvekce je nucená konvekce a je způsobena prouděním tekutiny, které je dáno vnějším zdrojem, např. ventilátorem. V tekutině mohou současně existovat oba druhy konvekce. Pro hodnocení, který mechanismus je dominantní nám slouží Archimédovo číslo. Archimédovo číslo vyjadřuje poměr vztlakových a setrvačných sil a je dáno poměrem Grashofova a Reynoldsova čísla. [3]

$$Ar = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{g\beta\Delta TL}{u^2}, \quad (10)$$

kde L charakteristický rozměr [m],

g tíhové zrychlení [m.s^{-2}],

β teplotní roztažnost tekutiny [K^{-1}],

ΔT rozdíl teploty stěny a teploty tekutiny [K].

Pokud je hodnota Archimédova čísla rovna přibližně jedna, jedná se o smíšenou konvekci, tzn. vztlakové a setrvačné síly mají rovnocenný význam při přenosu tepla konvekcí. Při vysokých hodnotách Ar převládají vztlakové síly a tudíž je přenos tepla zprostředkován přirozenou konvekcí. [3]

To v jakém režimu proudění konvekce probíhá, tedy zda se jedná o laminární či turbulentní proudění, posuzuje hodnota Rayleighova čísla. Rayleighovo číslo je součin Grashofova a Prandtlova čísla a je dáno vztahem

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu a}, \quad (11)$$

kde ν kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

a součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

Hodnoty Ra pod 10^8 odpovídají laminárnímu režimu proudění, pokud se hodnoty Rayleighova čísla pohybují od 10^8 do 10^{10} , jedná se o přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním.

Změnu hustoty tekutiny v závislosti na teplotě vyjadřuje výše uvedená teplotní roztažnost tekutiny β . Ta je dána vztahem

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, \quad (12)$$

p v dolním indexu znamená, že se jedná o izobarickou změnu.

4.2 Numerické síť

Numerická síť slouží k rozdělení objemu geometrie na konečný počet elementů, ve kterých jsou prováděny výpočty během simulace. Na kvalitě numerické sítě závisí výsledky, které simulací získáme. Pokud budeme buňky numerické sítě zmenšovat, můžeme očekávat přesnější řešení. Během postupného zmenšování buněk, tedy zahušťování sítě, dospějeme do takového body, kdy už další zahuštění nepřinese přesnější výsledek. Při zahuštění sítě naroste počet buněk a díky tomu se zvýší nároky na hardware a na výpočetní čas. U tvorby sítě tak musíme pečlivě vybírat, jaké oblasti geometrie nás při řešení zajímají a které jsou méně významné. Na základě důležitosti oblasti pro řešení a výsledky pak volíme potřebnou velikost buněk sítě.

Výpočetní síť můžeme vytvořit pomocí několika nástrojů, od společnosti ANSYS to jsou ANSYS MESHING, FLUENT MESHING a ICEM CFD. Rozdělení typů numerických sítí je uvedeno v následující podkapitole.

4.2.1 Druhy sítě

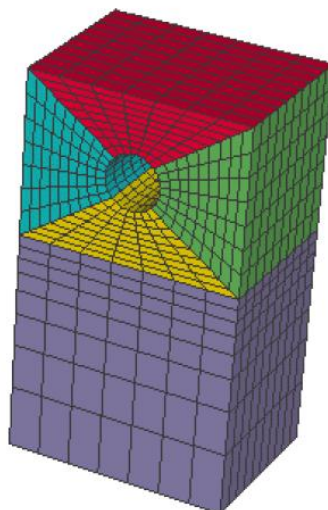
Numerické sítě můžeme rozdělit na strukturované, nestrukturované, hybridní a adaptivní. Jejich použití se odvíjí od složitosti geometrie a také od řešeného proudění.

Strukturovaná síť

Tento typ sítě se využívá u méně komplikovaných geometrií, u složitých a tvarově náročných geometrií je obtížné a téměř nemožné tento typ sítě vytvořit. Buňky sítě jsou tvořeny buď čtyřúhelníky, pokud řešíme 2D úlohu, nebo šestistěny (3D). Pro lokaci sousedních buněk jsou využity indexy i , j a k . Celá geometrie je rozdělena pomocí jedné či více mřížek, které na sebe navazují. [12]

U složitějších geometrií se využívá rozdělení na bloky, ve kterých je síť tvořena na základě místní geometrie, ale sousední bloky na sebe navazují. Toho využívá např. ICEM CFD. Tvorba takových sítí je mnohem náročnější na čas než využití nestrukturovaných, nebo hybridních sítí. Naopak dostaneme lepší výsledky ze simulace, než pro nestrukturovanou síť.

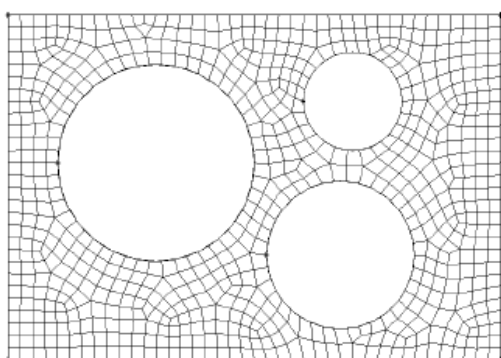
Na obrázku 16 je příklad strukturované sítě při využití více bloků.



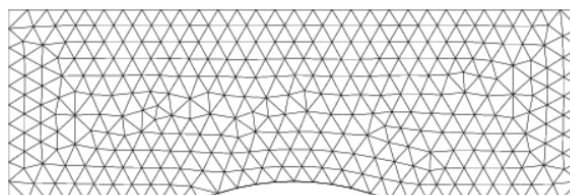
Obr. 16 Příklad strukturované numerické sítě [12]

Nestrukturovaná síť

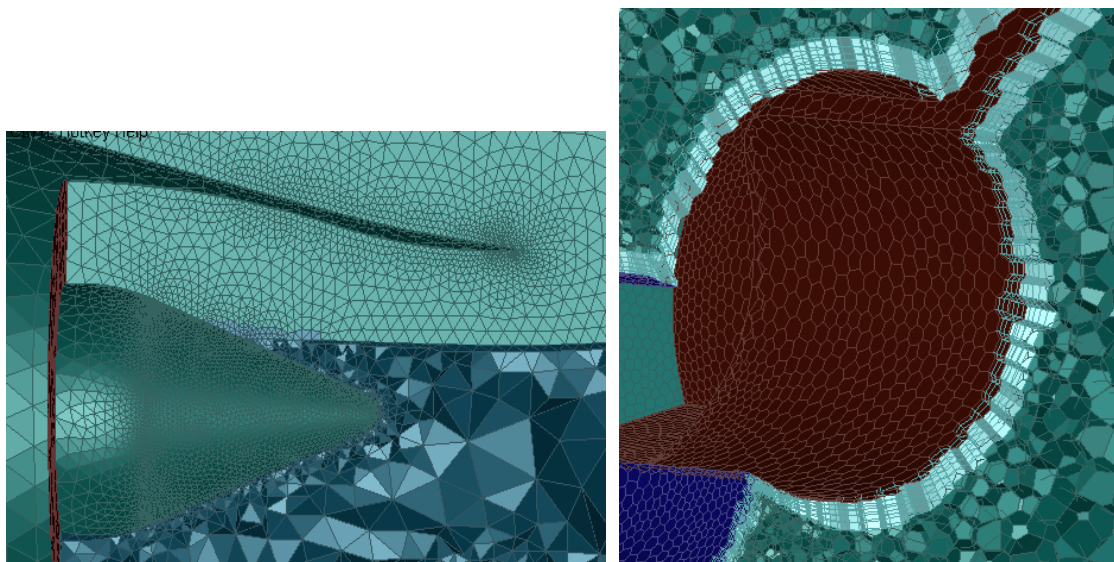
Tento typ sítě je tvořen buňkami ve tvaru trojúhelníku, či čtyřúhelníku (2D), nebo čtyřstěnu či mnohostěnu (3D úloha). Pomocí tohoto typu sítě je možné vytvořit numerickou síť prakticky na jakékoliv geometrii, problémem je pak její kvalita. U buněk tvořených čtyřstěny (Tetrahedral) vznikají nepřesnosti v řešení díky interpolaci výsledku ze středu buňky ke společné stěně sousedních buněk. Tento problém je dán různou orientací normály stěny buňky a směru proudění tekutiny. Problém částečně řeší použití sítě tvořené mnohostěny (Polyhedral). Na následujících obrázcích jsou uvedeny příklady nestrukturovaných sítí.



Obr. 17 Čtyřúhelníková síť [12]



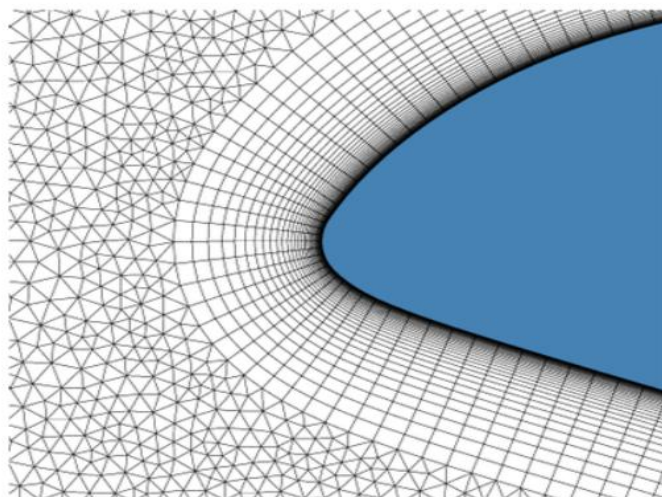
Obr. 18 Trojúhelníková síť [13]



Obr. 19 Příklad tetrahedrální a polyhedrální numerické sítě [14]

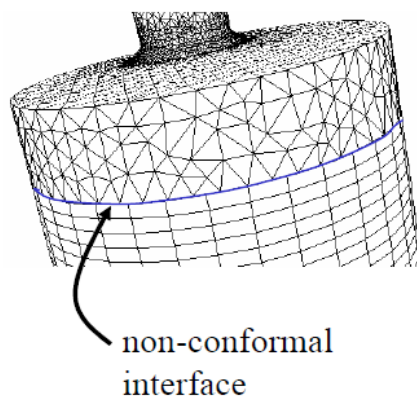
Hybridní síť

Tato numerická síť je kombinací strukturované a nestrukturované sítě. Je využívána například při tvorbě sítě u stěn, kdy chceme výpočtem postihnout mezní vrstvu proudění. Podstatou tohoto přístupu je tvorba plochých buněk u obtékaného povrchu s postupným nárůstem výšky buněk do okolního objemu. [13]



Obr. 20 Síť v okolí náběžné hrany lopatky [13]

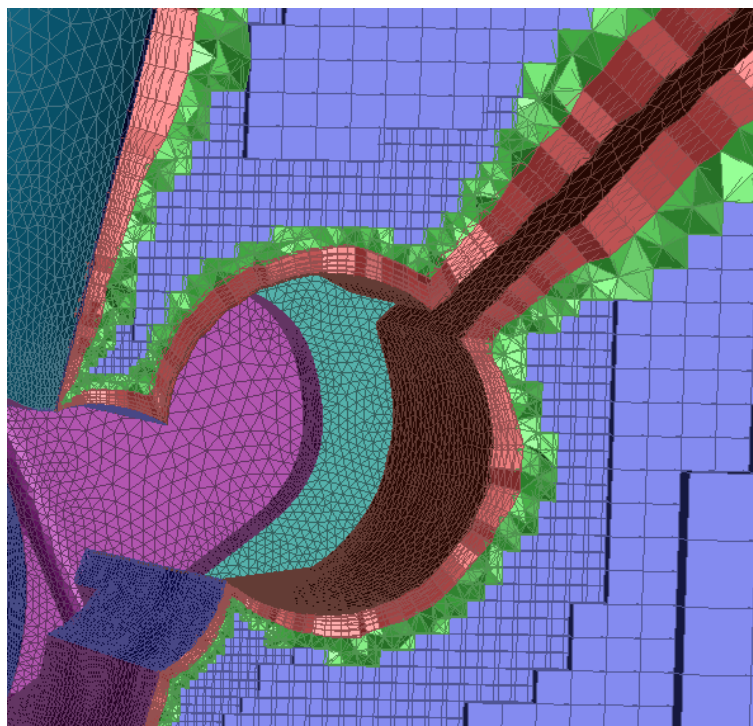
Hybridní síť vznikne i během napojení oblastí se strukturovanou a nestrukturovanou sítí, viz obr. 21. Na rozhraní takto vytvořené sítě může vzniknout nekonformní přechod, tzn. že uzly obou sítí na sebe nenasazují. [12]



Obr. 21 Nekonformní přechod v hybridní síti [12]

Další možností vzniku hybridní numerické sítě je vytvoření nestrukturované sítě v okolí povrchů geometrie a ve zbytku objemu je už síť strukturovaná. Takovou síť vytváří např. Fluent Meshing pomocí metody Hexcore. Síť vytvořená v Hexcore je zobrazena na následujícím obrázku. Povrchová síť je tvořena trojúhelníky, z nichž jsou "vysunuty"

buňky mezní vrstvy, na ty navazují tetragonální buňky a zbytek objemu tvoří pravidelné hexagonální buňky.



Obr. 22 Numerická síť vytvořená pomocí metody Hexcore [14]

Adaptivní síť

Podstatou tohoto typu sítě je zjemnění sítě, tedy zmenšení buněk, na základě výsledků získaných během simulace. Zjemnění buněk je provedeno jen v problémových oblastech, kde by mohly vzniknout chyby výpočtu, nikoliv v celém objemu, či celé geometrii. Buňky mohou být zjemňovány na základě gradientů vypočítávaných neznámých, v definovaných oblastech sítě, u stěn na základě hodnot y^+ (viz níže), v oblastech izočar některé z veličin či na základě uživatelem definovaných proměnných. Proces adaptace provádí Fluent během samotného výpočtu. [12, 13]

4.2.1 Kvalita sítě

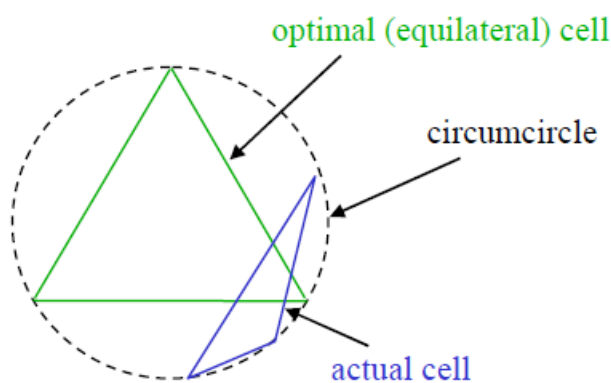
Na kvalitě numerické sítě závisí přesnost řešení. Při stejném počtu buněk bude dávat hexagonální síť lepší výsledky a to hlavně v případě pokud budou buňky sítě orientovány ve směru proudění. Jemnost sítě by měla být taková, aby byly zachyceny všechny podstatné údaje o proudění. Zjemnění by mělo být i v oblasti mezní vrstvy proudění u obtékaných stěn. [12]

Pro hodnocení kvality numerické sítě můžeme využít několika měřítek kvality, jsou to skewness, smoothness, aspect ratio a další. [12]

Skewness

Skewness, neboli zborcení, zkosení buňky, je odchylka skutečného tvaru buňky od toho ideálního. Ideálním tvarem jsou rovnostranný trojúhelník, čtverec, rovnostěnný čtyřhran a krychle. Skewness nabývá hodnot od 0 do 1, kdy 0 odpovídá ideálnímu tvaru a 1 náleží buňce s nepřijatelnou mírou zborcení, tedy i velmi špatnou kvalitou. [15]

Jedna z metod stanovení skewness je založena na rozdílu objemu (obsahu), který zaujímá buňka v opsané kouli (kružnici) od objemu (obsahu), který by zaujímala ideální buňka. Tato metoda se využívá u tetrahedrálních a trojúhelníkových buněk. [12]



Obr. 23 Ukázka stanovení zkosení buňky [12]

U ostatních buněk se využívá metody rozdílu úhlu, který svírají sousední stěny buňky, od úhlů v ideální buňce. Skewness je pak dáno maximem z [12]

$$\max \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right], \quad (13)$$

kde θ_e úhel v ideální buňce [°],
 θ_{\max} maximální úhel v buňce [°],
 θ_{\min} minimální úhel v buňce [°].

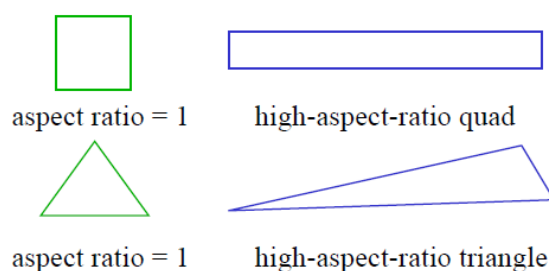
Smoothness

Tento parametr reflektuje změnu velikosti sousedících buněk, kdy za optimální se považuje pomalý nárůst velikosti. [12] Pozvolného zvětšování velikosti sousedních buněk se docílí volbou růstového faktoru při tvorbě numerické sítě. Za ještě optimální

se považuje hodnota růstového faktoru 1,2 což znamená, že velikost následující buňky je 1,2 násobkem velikosti předešlé buňky.

Aspect ratio

Aspect ratio vyjadřuje poměr velikosti nejdelší hrany buňky k hraně nejkratší. Optimální hodnotou je 1 a získáme jí pro buňky o ideálním tvaru, viz výše.



Obr. 24 Aspect ratio [12]

Orthoskewness

Jedná se o rozdíl úhlu vektoru, který spojuje střed buňky se středem stěny buňky, s normálou stěny buňky.

4.3 Základní metody řešení

Fluent umožňuje řešit úlohu pomocí dvou řešičů, a to buď pomocí Pressure-Based Solver, nebo Density-Based Solver. To, který pro řešení daného proudění využijeme, volíme v záložce General. Původně byl Pressure-Based řešič vyvinut pro nízkorychlostní nestlačitelná proudění a naopak Density-Based řešič pro vysokorychlostní stlačitelná proudění. V dnešní době jsou obě metody značně rozšířeny a lze s jejich pomocí řešit i proudění s rozdílnými vlastnostmi od těch, pro které byly řešiče vyvinuty a používány. [10]

Níže bude stručně popsán princip obou metod řešení.

4.3.1 Pressure-Based Solver

Při této metodě je rychlostní pole stanoveno na základě tlakové rovnice. Jelikož je tlaková rovnice (rovnice korekce tlaku) odvozena od rovnice kontinuity a rovnic hybnosti, je nejprve určeno rychlostní pole z rovnic zachování hybnosti bez uvažování

tlaku. Následně se pomocí rovnice korekce tlaku stanoví tlakové pole a na jeho základě je upraveno pole rychlostní, dokud rychlostní pole nevyhovuje rovnici kontinuity. Po stanovení tlakového a rychlostního pole jsou řešeny ostatní rovnice, jako rovnice přenosu tepla, turbulence a další transportní rovnice. Díky nelinearitě a propojení rovnic probíhá řešení iteračně s cílem získání konvergujícího numerického řešení. [9], [10]

K dispozici jsou dva algoritmy pro řešič založený na tlaku, a to buď segregovaný, nebo sdružený (propojený).

Segregovaný algoritmus

V tomto algoritmu jsou hlavní rovnice a tedy jednotlivé proměnné řešeny postupně jedna po druhé a každá z rovnic je během řešení od ostatních rovnic oddělena. Nejprve se aktualizují všechny vlastnosti tekutiny, které vycházejí z předešlého řešení, nebo z inicializace (nastavení počátečních hodnot všech proměnných do všech buněk numerické sítě) na začátku výpočtu. Po aktualizaci dat jsou vyřešeny rovnice hybnosti (pro jednotlivé složky rychlosti) na základě předešlých hodnot tlaku a hmotnostního toku, který je na stěně buňky. Na základě nově získaného rychlostního pole je přes rovnici korekce tlaku vypočítán tlak, z něj jsou přepočítány hodnoty rychlostí a hmotnostní tok. Následně jsou řešeny rovnice skalárních veličin jako jsou turbulentní veličiny a energie. Proběhne kontrola konvergence a pokud nejsou splněna kritéria konvergence je celý postup opakován. [10]

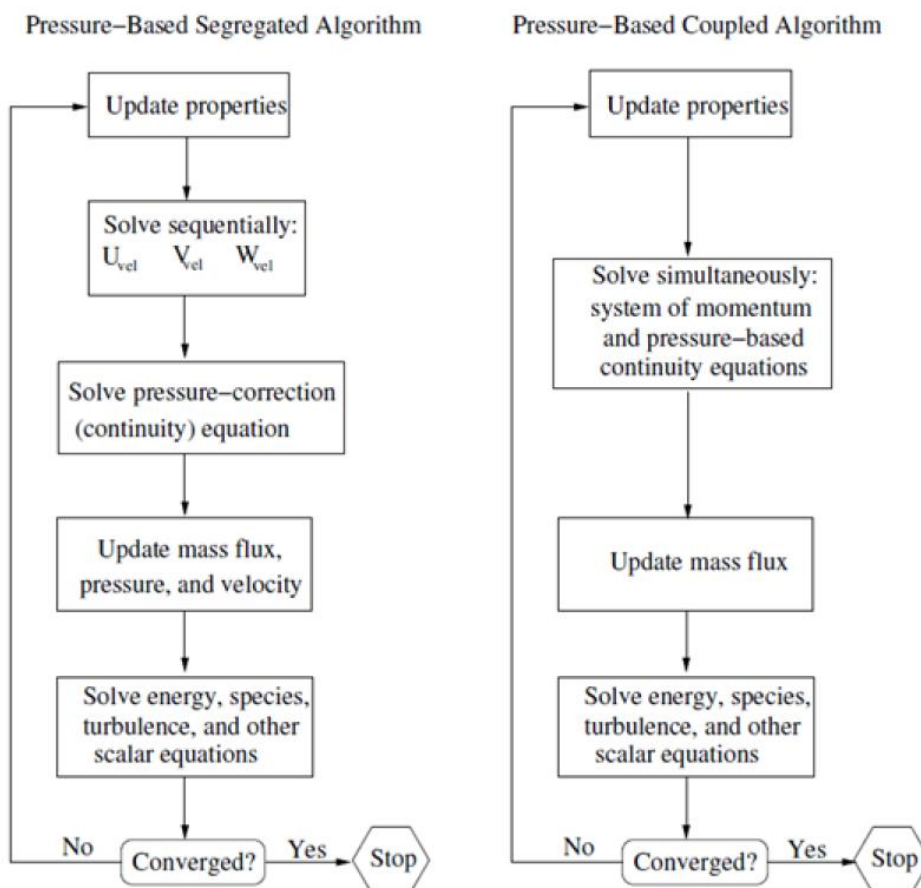
Segregovaný algoritmus není tolik náročný na výpočetní paměť, ale díky tomu, že jsou rovnice řešeny odděleně, pomaleji konverguje .

Sdružený algoritmus

Propojený (Sdružený/Coupled) algoritmus řeší soustavu rovnic hybnosti a kontinuity. To znamená, že oproti segregovanému algoritmu jsou dva kroky spojeny v jeden. Ostatní rovnice jsou už počítány opět odděleně. [10]

Díky spojení řešení rovnic pro přenos hybnosti a rovnice kontinuity je konvergence řešení značně zlepšena oproti oddělenému algoritmu. Vzhledem k propojení rovnic hybnosti a kontinuity do jedné soustavy roste požadavek na paměť až dvojnásobně, protože v ní musí být tato soustava během výpočtu uložena. [10]

Na následujícím obrázku je zobrazeno schéma postupu výpočtu jak pomocí segregovaného, tak sdruženého algoritmu.



Obr. 25 Schéma postupu výpočtu pomocí segregovaného a sdruženého algoritmu [10]

4.3.2 Density-Based Solver

Tento řešič řeší rovnice hybnosti, kontinuity, energie a rovnice pro mísení látek současně. Zbylé transportní rovnice skalárních veličin jsou počítány postupně a odděleny jedna od druhé. [10]

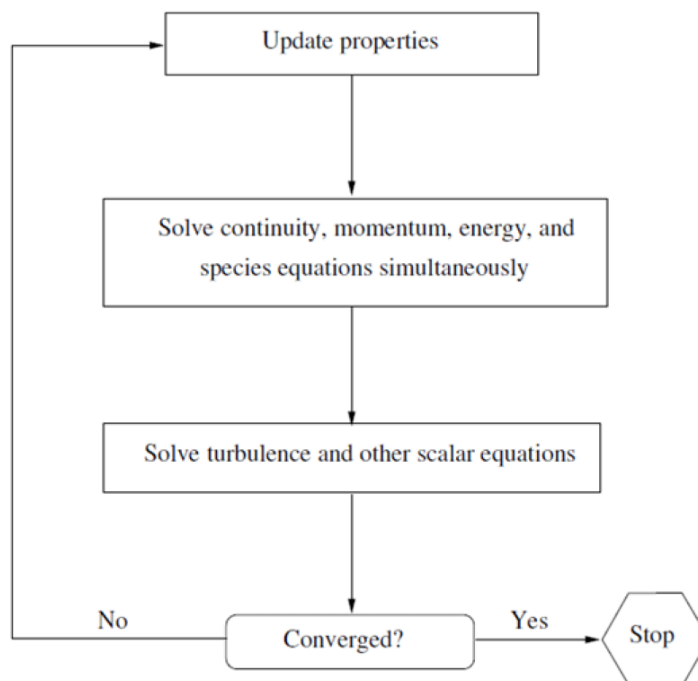
Jelikož jsou transportní rovnice nelineární je nutná linearizace pro vytvoření soustavy rovnic závislých proměnných v každé buňce numerické sítě. Linearizace může být buď implicitní, nebo explicitní. [10]

Implicitní řešení vypočítává neznámou hodnotu proměnné ze známých i neznámých hodnot, které jsou pro danou buňku brány ze sousedních buněk. Díky tomu se neznámé hodnoty objevují ve více než v jedné rovnici v soustavě. Rovnice se řeší současně a díky tomu jsou náročnější na paměť, ale výsledek je přesnější. [9], [10]

Explicitní řešení počítá neznámé hodnoty veličiny v buňce na základě již známých hodnot. Vzhledem k tomu, že se neznámá objevuje pouze v jedné rovnici soustavy, mohou být jednotlivé rovnice počítány postupně a nikoli současně. To

zrychluje výpočet, ale jeho přesnost je nižší než při použití implicitního výpočtu neznámých. [9], [10]

Obrázek 26 zobrazuje schéma iteračního numerického výpočtu pomocí metody řešení založeném na hustotě (Density-Based Solver).



Obr. 26 Schéma postupu výpočtu Density-Based Solveru [10]

4.4 Modelování turbulentního proudění

Turbulentní proudění má nahodilý charakter, ale je statisticky stabilní. Proto se při numerickém řešení turbulentního proudění využívá časového průměrování. Každou veličinu proměnnou v čase můžeme rozdělit na součet střední a flukтуаční hodnoty. Tedy

$$x(t) = \bar{x} + x', \quad (14)$$

kde $x(t)$ okamžitá hodnota veličiny x ,
 \bar{x} střední hodnota veličiny x ,
 x' flukтуаční hodnota veličiny x . [9]

Tohoto využívají Reynoldsovy rovnice, které navíc uvažují, že primární vliv má střední pohyb a fluktuace mají až sekundární vliv. Pro vyjádření rovnice kontinuity a rovnice pro zachování hybnosti (pro nestlačitelnou tekutinu zastoupeno Navierovou-Stokesovou rovnicí) je využito Reynoldsova rozkladu a průměrován. Reynoldskovo

průměrování platí pouze pro nestlačitelné tekutiny. Za nestlačitelné proudění můžeme považovat i proudění vzduchu při přirozené konvekci.

4.4.1 Reynoldsovy rovnice

RANS rovnice (Reynolds Average Navier-Stokes equation) vznikne rozkladem a průměrováním Navierovy-Stokesovy rovnice. Formálně se obě rovnice podobají, jen v RANS jsou místo okamžitých hodnot hodnoty průměrné a navíc je zde člen označovaný jako Reynoldsova napětí. Jedná se o tenzor, který je symetrický podle hlavní diagonály a obsahuje 6 neznámých. [16]

RANS pro Newtonskou tekutinu můžeme zapsat ve tvaru

$$\frac{\partial \bar{\vec{u}}}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot [\bar{\vec{u}}\bar{\vec{u}}] = \bar{\vec{g}} - \frac{1}{\rho} \bar{\nabla} \bar{p} + \nu \nabla^2 \bar{\vec{u}} - \bar{\nabla} \cdot [\overline{\vec{u}'\vec{u}'}], \quad (15)$$

kde poslední člen obsahuje tenzor Reynoldsových napětí, který získáme takto

$$-\bar{\nabla} \cdot [\overline{\vec{u}'\vec{u}'}] \Rightarrow +\frac{1}{\rho} \bar{\nabla} \cdot \bar{\vec{r}}, \quad (16)$$

kde $\bar{\vec{r}}$ tenzor Reynoldsových napětí [Pa].

Tenzor Reynoldsových napětí pak vyjádříme jako

$$\bar{\vec{r}} = \begin{bmatrix} -\rho \overline{u'_x u'_x} & -\rho \overline{u'_x u'_y} & -\rho \overline{u'_x u'_z} \\ -\rho \overline{u'_y u'_x} & -\rho \overline{u'_y u'_y} & -\rho \overline{u'_y u'_z} \\ -\rho \overline{u'_z u'_x} & -\rho \overline{u'_z u'_y} & -\rho \overline{u'_z u'_z} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Při využití Reynoldsových rovnic a rovnice kontinuity, která je upravena rozkladem a průměrováním (formálně stejná jako rovnice kontinuity pro okamžité hodnoty) dostaneme celkem 4 rovnice pro 10 neznámých. Je tedy nutná další úprava a tou je Boussinequova hypotéza, resp. její rozšíření. [16]

4.4.2. Rozšířená Boussinequova hypotéza

Boussinequova hypotéza vychází z analogie mezi závislostí napětí na gradientu rychlosti v laminárním a turbulentním proudění. Tuto analogii vyjadřuje následující vztah pro 3D případ

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \rightarrow \tau_{T,ij} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) = r_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (18)$$

kde μ_t turbulentní viskozita [Pa.s].

Turbulentní viskozita je vlastností proudění a nikoliv proudící tekutiny. Díky Boussinesquově hypotéze je redukováno 6 neznámých pouze na jednu a tou je právě turbulentní viskozita, díky tomu ztrácíme informace o anizotropičnosti turbulence.

Rozšířenu Boussinesquovou hypotézou rozumíme rozšíření rovnice (18) o jeden člen

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k, \quad (19)$$

kde k kinetická energie turbulence [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

δ Kroneckerovo delta [-].

Díky tomuto rozšíření dochází k rovnosti levé a pravé strany rovnice, resp. sladení kinetické energie turbulence a rovnice kontinuity.

Kinetickou energii turbulence (respektive měrnou energii turbulence) můžeme určit pomocí vztahu

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u_x'^2} + \overline{u_y'^2} + \overline{u_z'^2} \right), \quad (20)$$

kde $u'_{x,y,z}$ Flukтуаční rychlost tekutiny ve směru osy x, y, z [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

4.4.3 Model turbulence $k-\varepsilon$

Z předchozí podkapitoly vyplývá, že máme stále 5 neznámých a pouze 4 rovnice (3 x RANS a rovnici kontinuity), neznámými jsou střední hodnoty složek rychlosti, střední hodnota tlaku a velikost turbulentní viskozity. Dalším cílem je tedy určení turbulentní viskozity. K tomu jsou využita měřítka turbulence a v případě modelu $k-\varepsilon$ je pro určení turbulentní viskozity použito rychlostní a délkové měřítka turbulence.

Model turbulence $k-\varepsilon$ využívá pro určení rychlostního a délkového měřítka, respektive turbulentní viskozity, kinetické energie turbulence k a rychlosti disipace kinetické energie turbulence ε . Rychlost disipace kinetické energie turbulence rozměrově odpovídá rychlosti úbytku kinetické energie turbulence [17]

$$[\varepsilon] = \left[\frac{dk}{dt} \right] = [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}] \quad (21)$$

Turbulentní viskozita je pak úměrná

$$\mu_t \sim \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (22)$$

Přesné vyjádření závisí na konkrétní verzi modelu turbulence. V modelu Realizable k - ε vypadá vztah pro turbulentní viskozitu takto

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (23)$$

Člen C_μ je vypočítáván na základě parametrů proudění a konstant daných modelem. Konkrétní vztahy jsou uvedeny v [10].

Určení kinetické energie turbulence a její rychlosti disipace probíhá na základě dvou transportních rovnic, které mají obecný tvar [17]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (k \vec{u}) = \text{difúzní transport}(k) + \text{produkce}(k) - \text{destrukce}(k) \quad (24)$$

a

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\varepsilon \vec{u}) = \text{difúzní transport}(\varepsilon) + \text{produkce}(\varepsilon) - \text{destrukce}(\varepsilon). \quad (25)$$

Vyjádření pravé strany rovnic závisí na konkrétním modelu turbulence. Pro model turbulence Realizable k - ε vypadají transportní rovnice takto [10]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (26)$$

a

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon \bar{u}_j) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon. \end{aligned} \quad (27)$$

Člen G_k zastupuje produkci kinetické energie turbulence díky gradientům rychlosti. G_b zohledňuje produkci kinetické energie turbulence díky vztlaku. Y_M zastupuje vlivy stlačitelnosti na fluktuační. C_1 je vypočítávaný parametr viz [10]. C_2 a $C_{1\varepsilon}$ jsou konstanty dané modelem. $C_{3\varepsilon}$ je parametr určený na základě kinematické viskozity a rychlosti proudění. σ_k a σ_ε jsou turbulentní Prandtlova čísla pro kinetickou energii turbulence resp. její disipaci a jsou konstantní. S je modul tenzoru střední rychlosti deformace a S_k a S_ε jsou uživatelem definované zdroje. [10]

Pro přirozenou konvekci je důležité v modelu viskozity zohlednit vztlak, a to pomocí možnosti "Full Buoyancy Effects", dále zvolit možnost "Thermal Effects" při výpočtu přes mezní vrstvu až ke stěně (podrobně viz kapitola č. 5.2.1).

4.5 Modelování radiace (model S2S)

Pro modelování radiace v simulaci z kapitoly č. 5 je použit model S2S (Surface-to-Surface). Model zohledňuje pouze záření z povrchu na povrch šedého difúzního tělesa a například nezohledňuje absorpci záření prostředím. Výpočet radiace probírá odděleně od ostatních výpočtů a frekvence výpočtu je definovaná uživatelem, např. 1 x za 10 iterací. [10]

K výpočtu sálání jsou potřebné úhlové součinitele osálání ("view factors"), či poměry osálání, jednotlivých povrchů. Ty jsou vypočítány na základě geometrie úlohy pro každou buňku numerické sítě, nebo pro oblast buněk, tzv. Clustery. To je skupina sousedních buněk, které vystupují jako jedna větší buňka o daných vlastnostech a úhlový součinitel osálání je určen pro daný cluster. Pro polyhedrální povrchovou síť nelze clustery použít a view factory jsou spočítány pro každou buňku. Soubor s úhlovými součiniteli osálání je uložen zvlášť a lze ho využít pro rozdílné nastavení modelů simulace při zachování geometrie úlohy. [10]

4.6 Metody interpolace

V programu ANSYS Fluent probíhá řešení na základě převodu transportních diferenciálních rovnic do soustavy algebraických rovnic. Výpočet této soustavy je pak prováděn v uzlech, které jsou uloženy ve středu buněk numerické sítě. Jelikož je celý výpočet založen na postupném šíření okrajových podmínek, je nutné znát hodnoty veličin na stěnách buněk a důležitý je také gradient konkrétní veličiny přes jednotlivé buňky. K tomu slouží schémata, která se nastavují v záložce Solution Methods – Spatial Discretization. [9]

Schéματα typu „upwind“ odvozují hodnotu na stěně (hranici) buňky od hodnoty ve středu buňky, jež leží proti směru proudu. To znamená, že hodnota ze středu buňky je interpolována ve směru proudění. Tato schémata slouží pro veličiny spojené s konvekcí a volí se na základě typu a orientace numerické sítě a charakteru proudění. U přirozené konvekce se používá schéma s druhým řádem přesnosti a to Second Order Upwind. [9]

Schéματα pro tlakové pole se volí dle parametrů proudění a vlastností proudící tekutiny. Pro přirozenou konvekci je vhodné buď schéma PRESTO! a nebo Body Force Weighted.

Pro gradienty jednotlivých proměnných lze volit z Green-Gauss Cell Based, Green-Gauss Node-Based a Least-Squares Cell-Based. Poslední z uvedených metod je přednastavená pro řešení gradientů proměnných a předpokládá lineární změny veličiny mezi středem jedné buňky a buněk sousedních podél směrových vektorů, které propojují střed buňky se sousedními středy. [10]

4.7 Konvergence

Konvergence je jedním z důležitých parametrů, kterého se snažíme při výpočtech dosáhnout. Ve Fluentu je konvergence zastoupena tzv. residui, resp. residua jsou mírou konvergence řešení. Zjednodušeně lze říci, že residua jsou odchylky jednotlivých počítaných veličin od hodnot, které by splňovaly zákony zachování přesně. Vyhodnocování probíhá v každém kroku výpočtu, tedy v každé iteraci, pro všechny počítané veličiny a ve všech buňkách numerické sítě. Nejvyšší odchylka se uvádí ve výpisu residuí po každé iteraci. Doporučené maximální hodnoty jsou pro všechny řešené rovnice 10^{-3} , kromě rovnice energie, pro kterou je doporučená maximální hodnota stanovena na 10^{-6} . Kromě residuí je vhodné sledovat i chování fyzikálních parametrů. [9]

4.8 Relaxace

Užitím relaxace redukuje změny jednotlivých proměnných během iterací. S její pomocí lze dosáhnout konvergence a případně jí urychlit. Podstatou je určení nové hodnoty počítané proměnné v dané buňce, která bude využita při výpočtu v další iteraci, jako kombinaci hodnoty veličiny z předešlé iterace a hodnoty nově vypočítané v dané iteraci. Míra podílu jednotlivých hodnot tvořících hodnotu proměnné pro další iteraci je dána pomocí tzv. podrelaxačního faktoru α . Ten může nabývat hodnot od 0 do 1. Nová hodnota proměnné veličiny v buňce, která bude uvažována do další iterace je dána vztahem

$$X_{n+1} = \alpha X_{new} + (1 - \alpha) X_n, \quad (28)$$

kde X_{n+1} nová hodnota veličiny využitá do další iterace,
 X_{new} hodnota veličiny vypočítaná v současné iteraci,
 X_n hodnota veličiny z předešlé iterace. [9]

4.9 Příklady simulací ve Fluentu

Následující podkapitoly jsou věnovány některým výsledkům numerických simulací pomocí simulačního nástroje Fluent. Jedna práce řeší vliv umístění a návrhu otopného tělesa, ve vytápěné místnosti s jednou ochlazovanou stěnou, na teplotní a rychlostní pole v prostoru. Druhá se zabývá porovnáním hodnot výtokového součinitele nastavitelné větrací klapky z měření a ze simulace. Jedním z výstupů je i závislost objemového průtoku klapkou na tlakové diferenci před a za klapkou.

4.9.1 Simulace různého umístění a návrhu OT ve vytápěné místnosti

Práce se zaměřuje na problematiku umístění otopného tělesa ve vytápěném prostoru. Kromě umístění těles se článek zaměřuje i na jeho samotný návrh, kdy porovnává výsledky simulace jak pro těleso navržené klasickou metodou, tak pro bilanční návrh OT. Výsledkem simulace jsou proudová a teplotní pole pro různé varianty řešení, dále pak teplotní profily uprostřed místnosti pro tato řešení. Simulace byla provedena v programu Fluent 6.2.

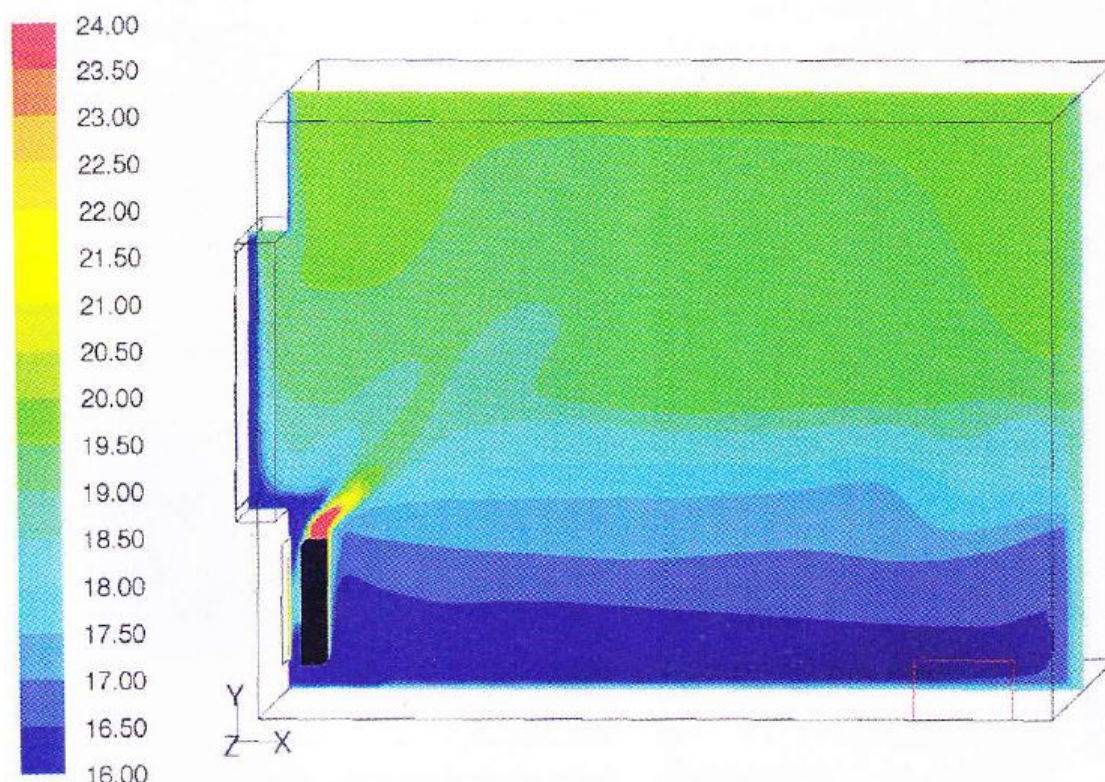
Jako model vytápěné místnosti je uvažován prostor o rozměrech 4 x 4 x 3 m s jednou ochlazovanou konstrukcí, ve které je umístěno okno o rozměrech 1,4 x 1,6 m. Všechny ostatní stěny jsou uvažovány jako neochlazované. Pro klasický návrh tělesa je stanoveno OT o rozměrech 600 x 900 mm s teplotními parametry 75/65 °C. Pro toto otopné těleso jsou řešeny tři varianty umístění a to pod oknem, naproti oknu a vedle okna. Bilančním návrhem stanovené těleso má rozměry 600 x 1600 a teplotní parametry 45/35 °C. Numerický výpočet pro toto těleso je proveden pouze pro umístění pod oknem. Pro přívod vzduchu je uvažováno odsazené okno tzv. "mikroventilace" s intenzitou větrání 0,5 h⁻¹. Obě navržená tělesa jsou typu 20. Venkovní výpočtová teplota je stanovena na -12 °C. Ochlazovaná stěna je definována součinitelem prostupu tepla, jehož hodnota je 0,38 W.m⁻².K⁻¹. [18]

Numerická síť je vytvořena v programu Gambit 2.2 s maximálním rozměrem buněk 40 mm. Síť v okolí oken je tvořena čtyřstěny a ve zbylém objemu šestistěny. Celkový počet buněk se pohybuje u všech variant okolo 1 mil. V simulaci není uvažována radiace, z tohoto důvodu je simulováno osálení stěny za OT pomocí povrchové teploty této oblasti. Neochlazované stěny jsou definovány přes povrchovou teplotu, protože při nastavení nulového sdílené tepla se neprojevovalo snížení teploty

u těchto povrchů. Výkon otopných těles je dán na základě okrajové podmínky hustoty tepelného toku. Jako model turbulence je zvolen model $k-\varepsilon$. [18]

Těleso pod oknem - klasický návrh

Navržené otopné těleso je kratší než okno a díky tomu se dostávají chladné dolů padající proudy od okna až k podlaze, protože jsou na stranách tělesa pouze odchýleny do strany, nikoliv obráceny vzhůru. V oblasti po délce otopného tělesa je chladný dolů padající proud odkláněn teplým stoupajícím proudem. Tyto dva proudy se mísí, stoupají ke stropu a na protější stěně výsledný proud padá k podlaze. Díky chladným proudům, které se dostaly až k podlaze, vzniká u podlahy proud poměrně chladného vzduchu jehož rychlost dosahuje až $0,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Toto chladné proudění v oblasti podlahy má na tepelnou pohodu osob nepříznivý vliv. Na obrázku 27 je znázorněno teplotní pole v řezu středem místnosti. Stupnice je v rozmezí $16 - 24 \text{ }^\circ\text{C}$, čili teploty nižší a vyšší mají stejnou barvu jako mezní hodnoty stupnice. Jak je patrné z obrázku, nízké teploty se vyskytují poměrně do značné výšky od podlahy v celé délce místnosti. [18]

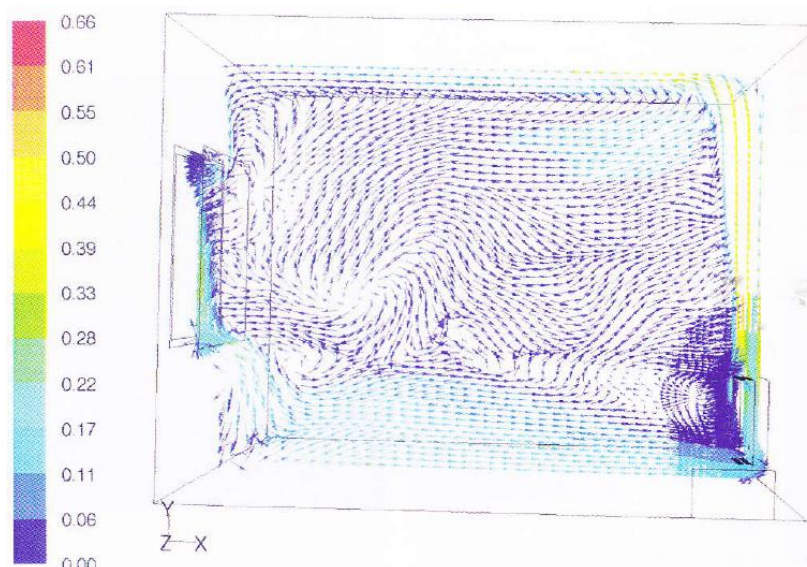


Obr. 27 Teplotní pole v řezu středem místnosti [19]

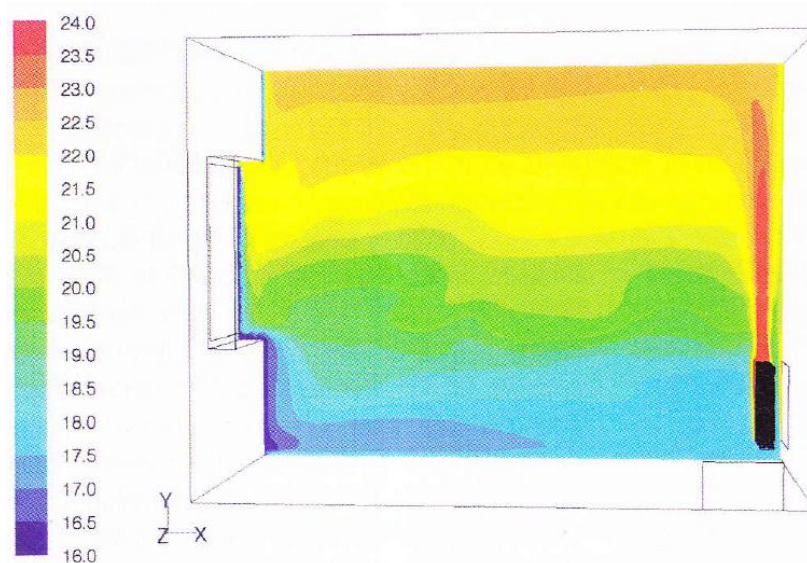
Těleso naproti oknu - klasický návrh

V tomto případě padají chladné proudy bez překážky až k podlaze a postupují do místnosti. Vzduch je unášen až pod těleso, která ho nasává a ohřívá. Výsledný teplý konvekční proud stoupá ke stropu a strhává vzduch z celého prostoru. Rychlost proudění u podlahy dosahuje až $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [18]

Rozvrstvení teplot v místnosti je z pohledu tepelné pohody velice nepříznivé. U podlahy je opět poměrně vysoká oblast se vzduchem o teplotě blízké $16 \text{ }^\circ\text{C}$, naopak v oblasti hlavy se teplota pohybuje mezi $21 - 22 \text{ }^\circ\text{C}$ a u stropu dosahuje až $24 \text{ }^\circ\text{C}$. Rychlostní a teplotní pole je zobrazeno na obrázku 28, resp. 29. Oba obrázky zobrazují pole ve vertikálním řezu středem místnosti. [18]



Obr. 28 Rychlostní pole v řezu středem místnosti [19]

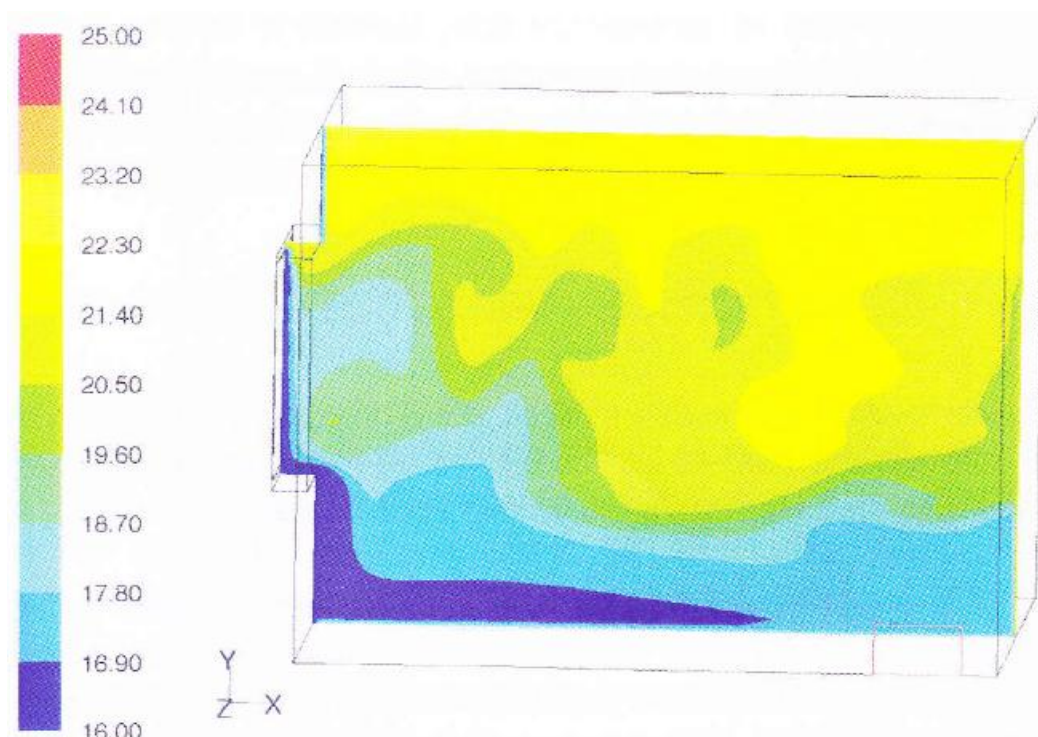


Obr. 29 Teplotní pole v řezu středem místnosti [19]

Těleso na boční stěně - klasický návrh

Stejně jako ve variantě s otopným tělesem na stěně proti oknu, tak i zde se dostane chladný dolů padající proud k podlaze a postupuje dále do místnosti. Na rozdíl od předešlého řešení není proud nad podlahou urychlován tělesem a dosahuje tak rychlosti kolem $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Teplý proud od tělesa se u stropu rozděluje na dvě části, kde jedna směřuje k chladnému oknu a druhá pokračuje se snižující se rychlostí k protější stěně. [18]

Teplotní pole je mnohem neuspořádanější, než v minulém případě, což je způsobeno dvěma prouděními, která jsou navzájem kolmá. V okolí otopného tělesa se vytvořila oblast s výrazně vyšší teplotou než je tomu ve zbytku místnosti. Teplotní pole v řezu středem místnosti je vidět na obrázku 30. [18]



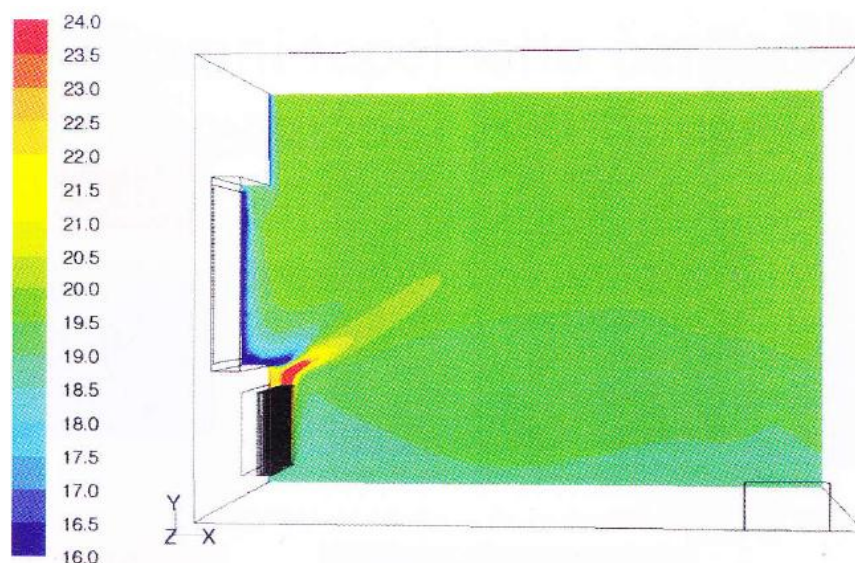
Obr. 30 Teplotní pole v řezu středem místnosti [19]

Těleso pod oknem - bilanční návrh

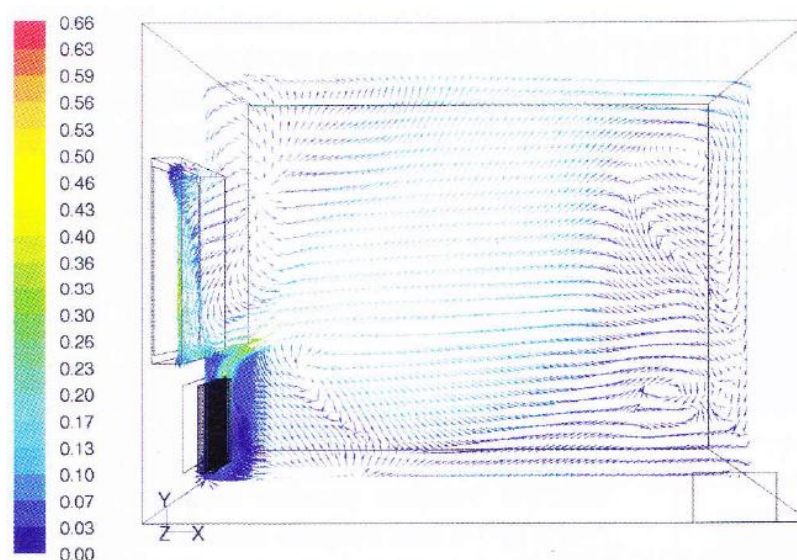
Jak bylo uvedeno již v úvodu podkapitoly, těleso navrženo touto metodou je umístěno v celé délce okna, díky tomu nepronikají chladné dolů padající proudy až k podlaze a jsou odkloněny. Kvůli tomu není v oblasti u podlahy tak nízká teplota vzduchu, jako je tomu v předešlých variantách. V celém objemu dochází k mnohem příznivějšímu rozložení teplot a teplotní gradient je tak poměrně vyrovnaný. U podlahy se teplota

vzduchu pohybuje okolo $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ a ve výšce 1,5 m od 19 do $19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotní pole v řezu středem místnosti je zobrazeno na obrázku 31. [18]

Hlavní směr proudění v místnosti je od tělesa směrem k protější stěně. Kvůli nižší povrchové teplotě tělesa mají konvekční proudy nižší rychlost, a tak chladné proudy od okna ovlivňují směr výsledného proudu nad tělesem mnohem více do středu místnosti, což je vidět na obrázku 32. Společný proud vzduchu postupně zpomaluje a stoupá až ke stropu. [18]



Obr. 31 Teplotní pole v řezu středem místnosti [19]

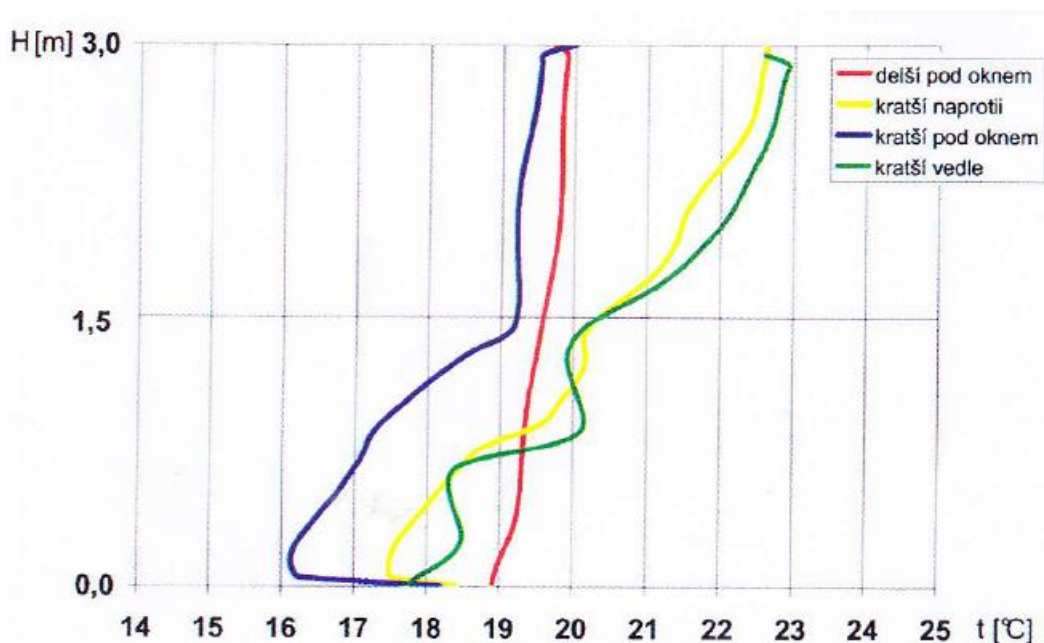


Obr. 32 Rychlostní pole v řezu středem místnosti [19]

Závěr simulace s variantním umístěním a návrhem těles

Z výše uvedených poznatků vyplývá, že nejvhodnější je umístit těleso v celé délce okna, aby nedocházelo k pronikání chladných dolů padajících proudů až k podlaze. Dalším závěrem je, že i otopné těleso s nízkou střední povrchovou teplotou 40 °C dokáže odklonit chladné padající proudy podpořené infiltrací. Výsledný vertikální profil ve středu místnosti je vyrovnaný a dosahuje teplotního gradientu po celé výšce místnosti do 1 K . [18]

Z pohledu proudění v oblasti kotníků je nejméně vhodná varianta s otopným tělesem naproti oknu, kdy rychlosti proudění dosahují až $0,25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. U varianty s otopným tělesem na boční stěně můžeme pozorovat problém s velkou nevyrovnaností teplotního profilu, kdy nastávají poměrně velké změny na relativně krátkém výškovém rozdíl. Ve variantách s otopným tělesem na boční stěně a tělesem naproti oknu dosahuje vertikální teplotní gradient až k 5 K na celou výšku místnosti, tedy 3 m , a ve spodní části místnosti se blíží až k hraniční hodnotě $3\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$. Porovnání vertikálních teplotních profilů středem místnosti pro všechny varianty umístění a návrhu otopných těles zobrazuje obrázek 33. [18]



Obr. 33 Vertikální teplotní profily ve středu místnosti [19]

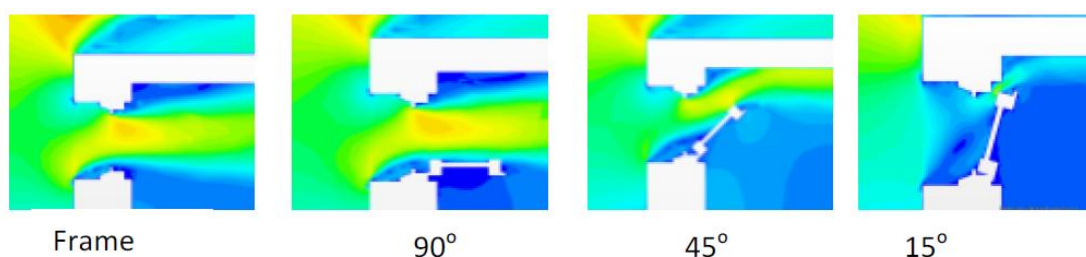
4.9.2 Simulace proudění přes nastavitelnou (pohyblivou) klapku

Simulace byla provedena na Aalborg University v Dánsku. Práce se zabývá stanovením výtokového součinitele pro nastavitelnou větrací klapku pomocí počítačové simulace a porovnáním nasimulovaných hodnot s naměřenými daty. Na základě výtokového součinitele je určena velikost objemového průtoku vzduchu klapkou, při různém úhlu natočení klapky.

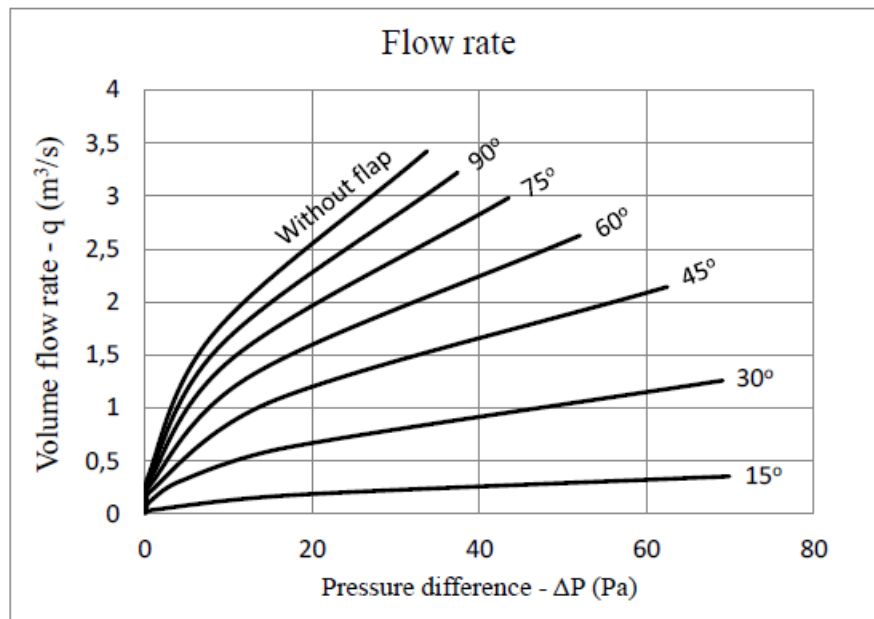
Geometrie úlohy je rozdělena na dvě oblasti, kde jednu část tvoří místnost s větrací mřížkou a druhá část je tvořena větrným tunelem, který je kolem místnosti. Geometrie větrací klapky odpovídá geometrii klapky, která byla využita při experimentálních měřeních. Numerickou síť tvoří polyhedrální buňky, tzv. přípustné skewness (zborcení buňky) je 0,85 a růstový faktor 1,2. Pro stanovení objemového průtoku je zvolen jako model turbulence "Two layer realizable $k-\varepsilon$ ". Pro proudění a energii je nastaveno diskretizační schéma druhého řádu přesnosti a relaxační faktory jsou pro hybnost 0,7, pro tlak 0,3 a pro energii 0,9. Jako pracovní tekutina pro simulaci je uvažován nestlačitelný ideální plyn. [20]

Výsledky simulace ukazují, že pro nízké tlakové rozdíly, přibližně do $\Delta p = 0,5$ Pa, se hodnoty výtokového součinitele liší od naměřených dat. [20]

Závěrem práce je konstatování, že model turbulence $k-\varepsilon$ je vhodný pro proudění otvorem při tlakovém rozdílu větším jak 0,5 Pa. Dalším závěrem je, že pro pohyblivou větrací klapku nelze uvažovat konstantní výtokový součinitel. [20]



Obr. 34 Nastavení větrací klapky [20]



Obr. 35 Graf závislosti objemového průtoku na rozdílu tlaků [20]

5 VLIV UMÍSTĚNÍ OT NA RYCHLOSTNÍ A TEPLOTNÍ POLE ŘEŠENÉ MÍSTNOSTI

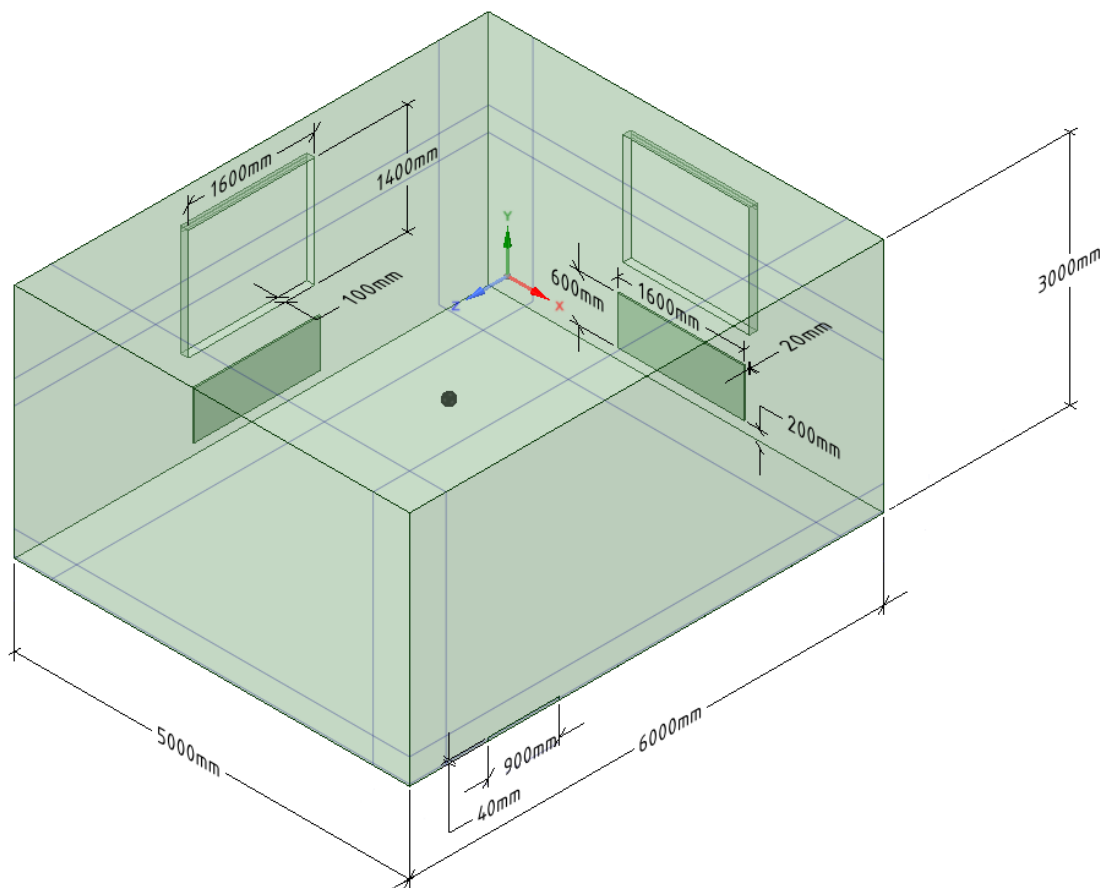
Zhodnocení vlivu umístění otopných těles na rychlostní a teplotní pole v místnosti, potažmo zhodnocení vlivu na tepelnou pohodu člověka v prostoru, bude provedeno na základě výsledků počítačové simulace v programu Fluent 19.0. Nejprve bude popsán model místnosti, následně tvorba numerické sítě, nastavení parametrů pro výpočet a na závěr proběhne vyhodnocení výsledků simulací všech řešených variant.

5.1 Geometrie řešené místnosti

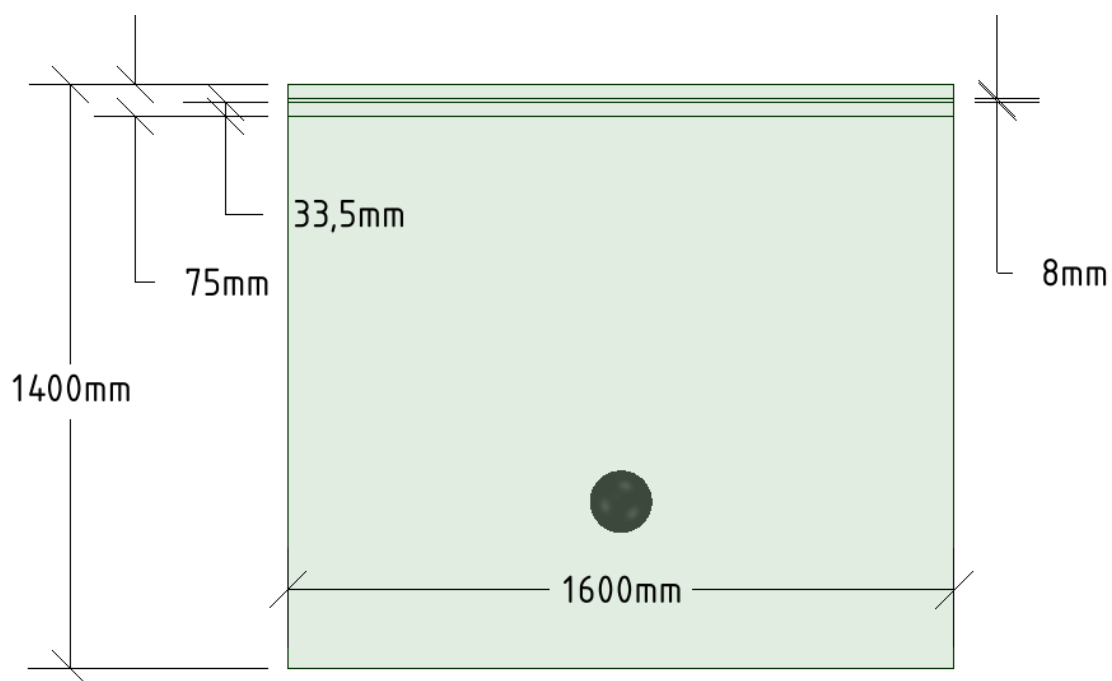
Model představuje vytápěnou rohovou místnost, která je součástí většího objektu. Celý objekt se nachází v oblasti s výpočtovou venkovní teplotou $\Theta_e = -12$ °C. Pod místností se nachází větraný sklep, který je částečně nad terénem. Pro sklep je uvažovaná teplota v nevytápěné místnosti 0 °C. Dále má místnost dvě ochlazované stěnové konstrukce. Zbylé stěnové konstrukce a strop jsou neochlazované, čili oddělují řešenou místnost od místností vytápěných na stejnou vnitřní výpočtovou teplotu Θ_i . Požadavek na vnitřní výpočtovou teplotu je 20 °C.

Ochlazované obvodové stěny jsou orientovány na jih a na východ. Rozměr místnosti podél východní stěny je 6 m, rozměr podél jižní stěny 5 m a výška místnosti je 3 m. V obou stěnách se nachází okno o délce 1,6 m a výšce 1,4 m. Okna jsou umístěna v podélném směru uprostřed příslušné stěny a ve výšce 1,1 m nad podlahou. Hloubka uložení oken od vnitřní strany stěnové konstrukce je 100 mm. V geometrickém středu místnosti je umístěn model kulového teploměru pro stanovení výsledné teploty t_g při simulaci v CFD. Kulový teploměr má průměr 150 mm.

Přívod vzduchu je zajištěn větracími mřížkami, které jsou umístěny v horním okraji každého z oken. Mřížka zasahuje do celé délky okna a je vysoká 75 mm. Účinná plocha, kterou může vstupovat venkovní vzduch do místnosti je v modelu nahrazena šterbinou o rozměrech 1600 x 8 mm. Výška 8 mm vychází z požadavku na velikost intenzity větrání $0,3 \text{ h}^{-1}$ a z požadavku maximální rychlosti vstupujícího vzduchu $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Odvod vzduchu z místnosti zajišťuje otvor v západní neochlazované stěně. Odvod představuje volný prostor pod dveřmi o rozměrech 900 x 40 mm.



Obr. 36 Řešená místnost: rozměry



Obr. 37 Detail okna s rozměry

5.1.1 Tvorba geometrického modelu

Model je vytvořen v modelovacím nástroji SpaceClaim 18.0. Tento program je určen pro tvorbu 3D geometrie k počítačové simulaci. Kromě tvorby geometrie je vhodný k úpravě již vytvořené geometrie v jiných 3D modelovacích programech, např. Autodesk Inventor, Catia atd.

Jelikož uvažujeme stacionární řešení, je celá obálka místnosti tvořena pouze plochami a otopná tělesa společně s modelem kulového teploměru jako tělesa. Plochy výklenků oken jsou rozděleny v polovině na dvě části, což znamená plochy široké 50 mm. Toto rozdělení je provedeno pro potřeby tvorby numerické sítě a je popsáno níže v kapitole o numerické síti.

5.1.2 Varianta č. 1

Ve variantě č. 1 jsou umístěna otopná tělesa pod každým z oken, tedy dvě tělesa ve vytápěné místnosti. Tělesa jsou umístěna ve výšce 200 mm nad podlahou a 50 mm od stěn. Tělesa jsou modelována jako kvádr o rozměrech 1600 x 600 x 20 mm (v x š x h) a reprezentují reálná desková otopná tělesa typ 10. Volba modelu tělesa typ 10 vychází z výpočtu tepelných ztrát místnosti dle ČSN EN 12831 a z teplotních parametrů na tělese 55/45 °C. Umístění modelů těles viz obrázek 1.

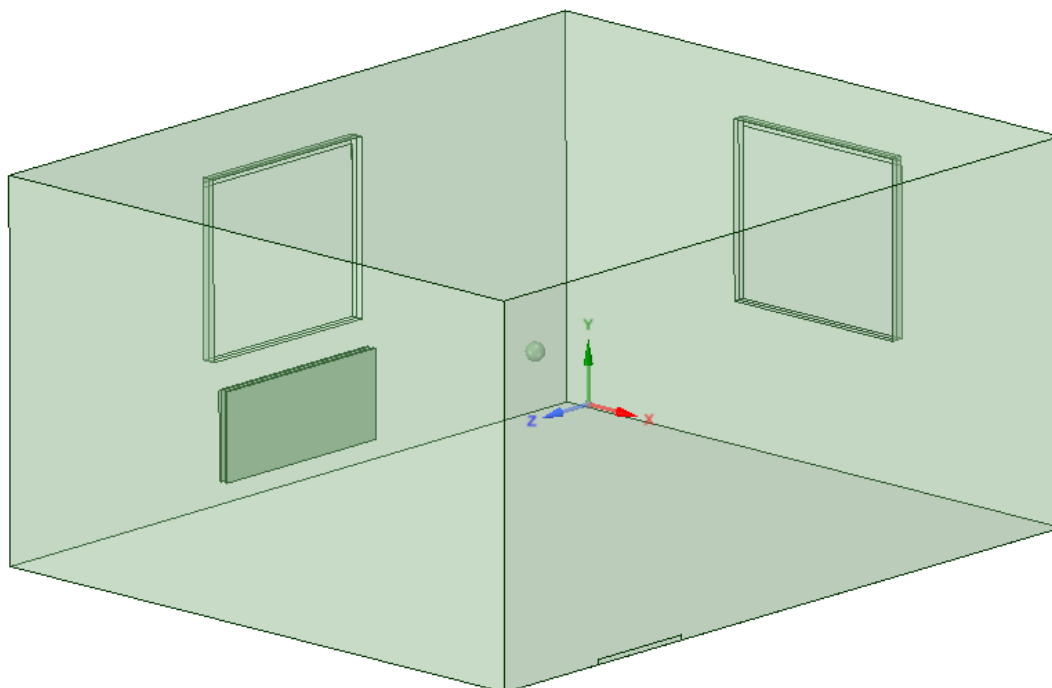
5.1.3 Varianta č. 2

V této variantě je uvažováno pouze jedno otopné těleso, které je umístěno pod oknem orientovaným na jih. Pro pokrytí tepelné ztráty a stejné teplotní parametry 55/45 °C vychází těleso typ 20 - 700 x 1600. Typ 20 je zvolen záměrně, protože u tělesa s konvekčním plechem by nastal problém při tvorbě modelu a během tvorby numerické sítě. Těleso je zastoupeno dvěma deskami o rozměrech 1600 x 700 x 20 mm (v x š x h). Vzdálenost mezi oběma deskami je 40 mm. Model tělesa je umístěn opět ve výšce 200 mm nad podlahou a 50 mm od ochlazované stěny. Varianta číslo 2 je zobrazena na obrázku č. 2.

5.1.4 Varianta č. 3

V tomto řešení je opět pouze jedno otopné těleso, které je umístěno pod oknem orientovaným na východ. Jde tedy o delší z obou ochlazovaných konstrukcí. Těleso je

stejného typu jako ve variantě č. 2 a je opět nahrazeno modelem dvou desek. Rozměry a poloha umístění jsou obdobné jako v předchozím řešení.



Obr. 38 Řešená místnost: varianta č. 3

5.2 Tvorba numerické sítě

Nejprve byl pro tvorbu numerické sítě využit program ICEM CFD, kde bylo cílem vytvoření hexagonální sítě pomocí bloků. Během generace sítě nastal problém s tvorbou buněk mezi zadní stranou OT a stěnou místnosti, tak aby se výška buněk k oběma stěnám postupně zmenšovala a buňky zároveň navazovaly na okolní elementy sítě. Proto byl následně využit jiný nástroj na tvorbu numerické sítě od společnosti ANSYS.

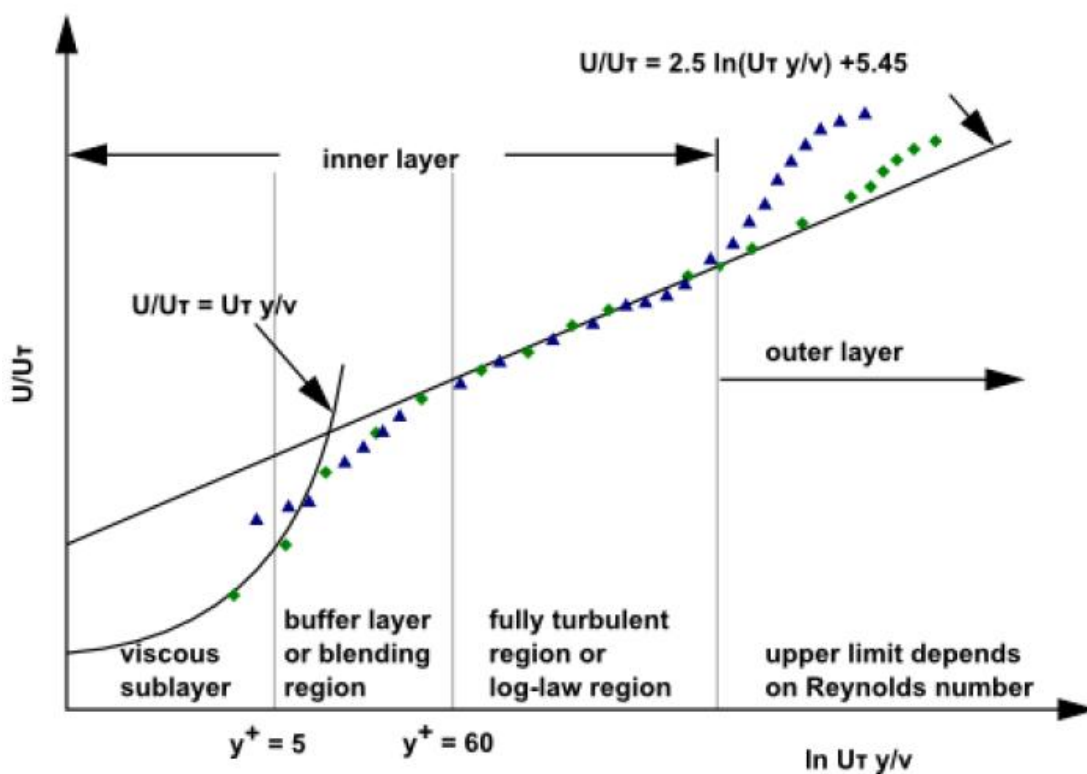
Síť je vytvořena pomocí síťovacího nástroje programu Fluent 19.0, tedy pomocí Fluent Meshing. Síť je kombinací polyhedrálních a hexagonálních buněk. Kolem všech povrchů je vytvořena vrstva prizmatických buněk, které mají za úkol zachytit chování tekutiny, v našem případě vzduchu v mezní vrstvě. Prizmatickou vrstvou rozumějme zahuštění buněk u povrchu.

Nástroj pro tvorbu numerické sítě je označen jako poly-hexcore a ve Fluentu (meshing módu) 19.0 je prozatím v beta verzi.

5.2.1 Odhad velikost (výšky) první buňky u stěny

Nejprve je nutné určit, zda budou v blízkosti stěny ve výpočtu využity stěnové funkce, nebo výpočet přes celou mezní vrstvu až ke stěně. Parametrem, který o tom rozhoduje, je hodnota bezrozměrné vzdálenosti od stěny y^+ . Pro hodnoty y^+ do 5 se pohybujeme ve vazké podvrstvě a od hodnot kolem 60 jsme v oblasti turbulentní mezní vrstvy, a v oblasti platnosti logaritmického zákona.

Při výpočtu přes celou mezní vrstvu by měla výška první buňky odpovídat hodnotám y^+ maximálně 5, ideální je velikost bezrozměrné vzdálenosti od stěny rovna 1. Pro použití stěnových funkcí se doporučuje pohybovat se s výškou první buňky v oblasti $y^+ \approx 50$. Zobrazení jednotlivých oblastí mezní vrstvy a hraničních hodnot y^+ je na následujícím obrázku.



Obr. 39 Závislost bezrozměrné rychlosti na bezrozměrné vzdálenosti od stěny [10]

Bezrozměrná vzdálenost od stěny je určena pomocí vztahu

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu}, \quad (29)$$

kde u_τ třecí rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 y vzdálenost od stěny [m],
 ν kinematická viskozita [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$].

Třecí rychlost neodpovídá žádné skutečné rychlosti, název rychlost získala díky svému fyzikálnímu rozměru a je dána vztahem

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (30)$$

kde τ_w smykové napětí na stěně [Pa],
 ρ hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

Pro stanovení smykového napětí na stěně je využito vztahu pro koeficient tření na stěně

$$c_f = \frac{2\tau_w}{\rho u^2}, \quad (31)$$

kde u rychlosti proudění [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. [21]

Z předchozího vztahu lze vyjádřit pro smykové napětí na stěně τ_w

$$\tau_w = \frac{c_f \rho u^2}{2}, \quad (32)$$

Vypočtené smykové napětí je využito pro stanovení třecí rychlosti dle vztahu (30) a ta je následně využita pro stanovení výšky první buňky u stěny. K tomu je použita rovnice (29), ze které je vyjádřena vzdálenost od stěny y a za y^+ je dosazena hodnota dle volby modelu chování v blízkosti u stěny, tedy podle toho zda jsou použity stěnové funkce a nebo výpočet přes celou mezní vrstvu až ke stěně.

V řešení této úlohy je využit výpočet přes celou mezní vrstvu až ke stěně, a to z důvodu výpočtů přenosu tepla, proto $y^+ = 1$ a tedy

$$y = \frac{\nu}{u_\tau}. \quad (33)$$

Dalším krokem pro výpočet výšky první buňky u stěny je stanovení c_f . Ke stanovení koeficientu tření na stěně je potřeba určit v jakém režimu je okolní proudění. K tomu je využito Reynoldsova čísla.

Tab. 1 Hodnoty Re pro stanovení výšky první buňky u stěny

| | OT (výška = 0,6 m) | OT (výška = 0,7 m) | Okno (výška = 1,4 m) | Stěna (délka = 6 m) |
|----------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| $Re [-]$ | 14 075 | 17 737 | 26 974 | 118 421 |

Výpočet hodnot Re vychází z odhadu velikosti rychlosti proudění mimo mezní vrstvu. Odhad této rychlosti je uveden níže.

Horní hranicí laminárního režimu proudění je pro obtékání desky $Re = 5 \cdot 10^5$, to splňují všechny případy vyskytující se ve výše uvedené tabulce. Proto je využit vztah pro určení c_f při laminárním proudění [21]

$$c_f = \frac{0,664}{\sqrt{Re}}. \quad (34)$$

Výsledné hodnoty výšky první buňky u stěny jsou uvedeny v následující tabulce. V tabulce jsou uvedeny rovněž hodnoty použité při tvorbě numerické sítě. Výšky první buňky u stěny použité při tvorbě sítě jsou zmenšeny s ohledem na zvýšení bezpečnosti, že na konci simulace budou hodnoty y^+ na všech površích rovny maximálně hodnotě 1.

Tab. 2 Odhadnuté a použité výšky první buňky u stěny

| | OT (výška = 0,6 m) | OT (výška = 0,7 m) | Okno (výška = 1,4 m) | Stěna (délka = 6 m) |
|------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| y [mm] | 0,688 | 0,729 | 1,097 | 1,631 |
| y_p [mm] | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 1,1 |

Pro výšku první buňky u povrchu kulového teploměru je zvolena hodnota 0,5 mm.

Odhad rychlosti proudění mimo mezní vrstvu**Otopné těleso**

Pro stanovení rychlosti u otopného tělesa je využit vztah podle L. Prandtl pro maximální rychlosti proudícího vzduchu okolo stěny s rozdílem teploty stěny a okolí

$$w_{\max} = 0,55 \sqrt{gz \frac{(T_{st} - T_{ok})}{T_{ok}}}, \quad (35)$$

- kde T_{ok} termodynamická teplota okolí [K],
 T_{st} termodynamická teplota stěny [K],
 g tíhové zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],
 z výškový rozměr stěny [m]. [2]

Při uvažování střední povrchové teploty na otopném tělese 50 °C a teploty okolí 20 °C, vychází hodnoty maximální rychlosti proudícího vzduchu okolo stěny OT okolo 0,45 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Přesné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 3 Maximální rychlosti proudění okolo stěny OT

| | OT (výška = 0,6 m) | OT (výška = 0,7 m) |
|---|--------------------|--------------------|
| w_{\max} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | 0,427 | 0,461 |

Okno

Při stanovení maximální rychlosti u okna je použita rovnice dle Rydbergera

$$w_{\max} = 0,11 \sqrt{(t - t_{okn}) H_{okn}}, \quad (36)$$

- kde t teplota vzduchu [°C],
 t_{okn} povrchová teplota okna [°C],
 H_{okn} výška okna [m]. [2]

Povrchovou teplotu okna je určena z rovnováhy tepelných toků přes plochu okna

$$U_{okn} S_{okn} (t - \Theta_e) = \alpha S_{okn} (t - t_{okn}), \quad (37)$$

- kde S_{okn} plocha okna [m^2],
 U_{okn} součinitel prostupu tepla oknem [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],
 Θ_e výpočtová venkovní teplota [°C],
 α součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],

$$t_{okn} = \frac{\alpha \Theta_i - U_{okn} (\Theta_i - \Theta_e)}{\alpha}. \quad (38)$$

Tab. 4 Stanovení maximální rychlosti u okna

| t | Θ_e | U_{okn} | α | t_{okn} | H_{okn} | w_{max} |
|------|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|----------------------|
| [°C] | [°C] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] | [°C] | [m] | [m.s ⁻¹] |
| 20 | -12 | 1,2 | 8 | 15,2 | 1,4 | 0,285 |

Stěna

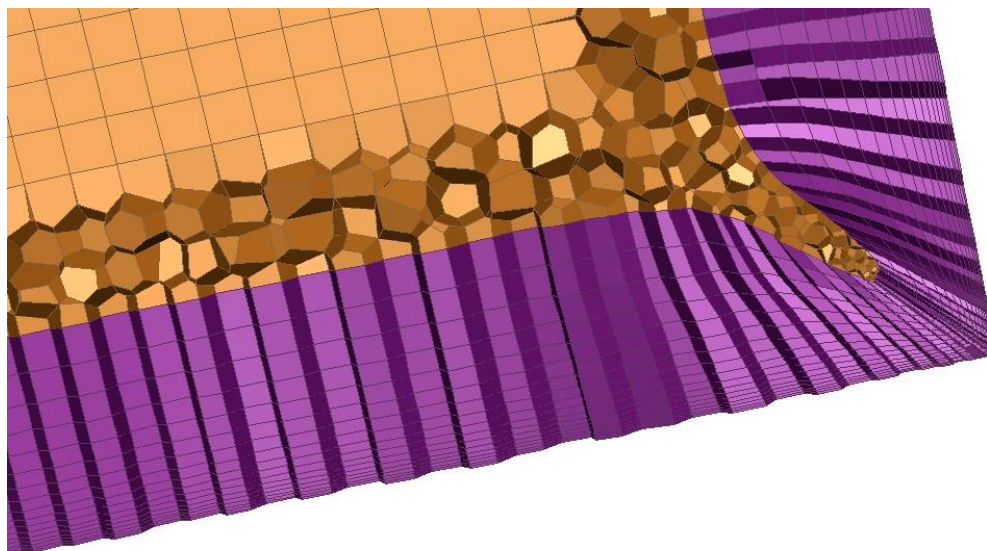
V okolí stěn je maximální rychlost stanovena na 0,3 m.s⁻¹. Tato rychlost je o něco vyšší než hraniční rychlost přípustná v oblasti kotníků, pro zajištění tepelné pohody. Za hraniční rychlost se považuje 0,25 m.s⁻¹ [19]. Na základě výsledků simulací v podkapitole č. 4.9.1 neočekávám vyšší rychlosti v okolí stěn.

5.2.2 Povrchová síť

Ve Fluent Meshingu je většina typů objemové sítě tvořena na základě sítě povrchové. Proto je tato kapitola věnována tvorbě a především kvalitě povrchové sítě, která je použita i všech tří variant geometrického uspořádání modelu.

Buňky povrchové sítě jsou tvořeny trojúhelníky, jedná se tedy o tetrahedrální povrchovou síť. Až při následné generaci objemové sítě v podobě kombinace polyhedrálních a hexagonálních buněk je vytvořena nová povrchová síť v podobě šestiúhelníků.

Velikost buněk povrchové sítě je uvedena v následující tabulce. Rozdělení výklenků pro okna je provedeno z důvodu tvorby prizmatických buněk pro simulaci proudění v mezní vrstvě. Je tak vyřešen problém s tvorbou těchto buněk ve vnitřních rozích geometrie, kdy bylo pro vyšší kvalitu sítě nutné zjemnit (zmenšit) buňky povrchové sítě na okně z 10 mm na 5 mm. Problém je zobrazen na obrázku 40. Rozdělení výklenků tak slouží k pozvolnějšímu přechodu velikosti buněk z oken na stěny a současně napomáhá ke zvýšení kvality numerické sítě v mezní vrstvě.



Obr. 40 Zcela nevhodné řešení vnitřního rohu v oblasti prizmatických buněk

Tab. 5 Maximální velikost buněk povrchové sítě jednotlivých povrchů

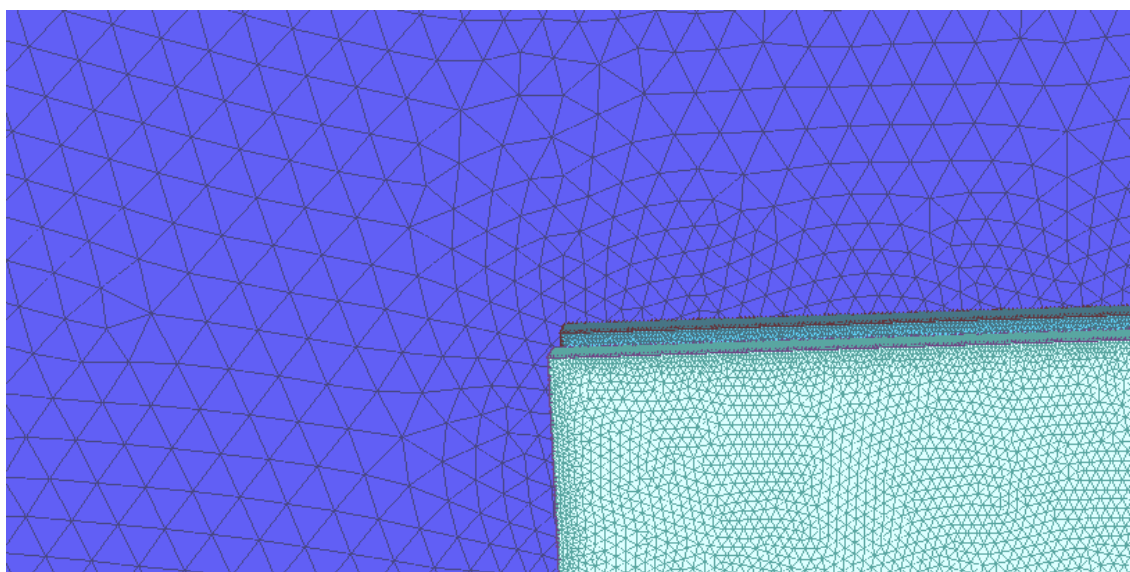
| Povrch | Max. velikost buňky |
|--------------------------|---------------------|
| | [mm] |
| OT | 5 |
| Okna | 5 |
| Výklenek blíže oknu | 5 |
| Výklenek dále od okna | 10 |
| Kulový teploměr | 5 |
| Stěny | 25 |
| Mřížka | 5 |
| Štěrbina | 1,6 |
| Odvod | 13,33 |

Hlavním parametrem kvality povrchové sítě je zborcení jednotlivých buněk, odchylka oproti ideálnímu tvaru buňky, tzv. skewness. Skewness dosahuje hodnot od 0 do 1, kdy jedna je nejhorší stav, jak bylo již uvedeno v podkapitole výše o numerických sítích. Povrchová síť je ve Fluentu vytvořena na základě geometrie a parametrů, které jsou na jednotlivé části geometrie nastaveny. Síť je pak vytvořena s určitou kvalitou, pro zlepšení kvality je nutné využít nástrojů, které jsou k dispozici. Při tvorbě všech povrchových sítí bylo využito nástroje General Improve. Hodnota skewness nejde zmenšovat až na ideální nulu, protože při úpravě jedné buňky se poškodí kvalita buňky sousední. Hodnoty skewness do 0,8 se považují za vyhovující a hodnoty kolem 0,5 za dobré až velmi dobré. V tabulce 6 jsou vypsány hodnoty zborcení buněk pro jednotlivé

varianty. Na obrázku pod tabulkou je zobrazena vytvořená povrchová síť varianty č. 2 v okolí otopného tělesa. Je zde vidět zjemnění sítě kolem hran OT, to je z důvodu snahy o přesnější numerické řešení proudění v okolí těchto hran. Dále je patrné zmenšení buněk povrchové sítě na stěně za otopných tělesem. To je dáno blízkostí obou povrchů a Fluent Meshing to takto dělá automaticky. Lze to udělat i ručně, ale oblast stěny za OT by se musela vyjmout z povrchu celé stěny a při tvorbě povrchové sítě by bylo nutné nastavit menší velikost buněk pro tuto vyjmutou oblast.

Tab. 6 Maximální zborcení buněk (skewness) v jednotlivých variantách

| | Max. zborcení buňky |
|---------------|---------------------|
| | [-] |
| Varianta č. 1 | 0,51 |
| Varianta č. 2 | 0,51 |
| Varianta č. 3 | 0,51 |



Obr. 41 Povrchová síť OT a na stěně za OT

Na obrázku 41 je vidět i postupné zvětšování velikosti sousedních buněk až na maximální velikost. Nárůst velikosti je dán růstovým faktorem (growth rate), který je nastaven na hodnotu 1,2.

5.2.3 Objemová síť

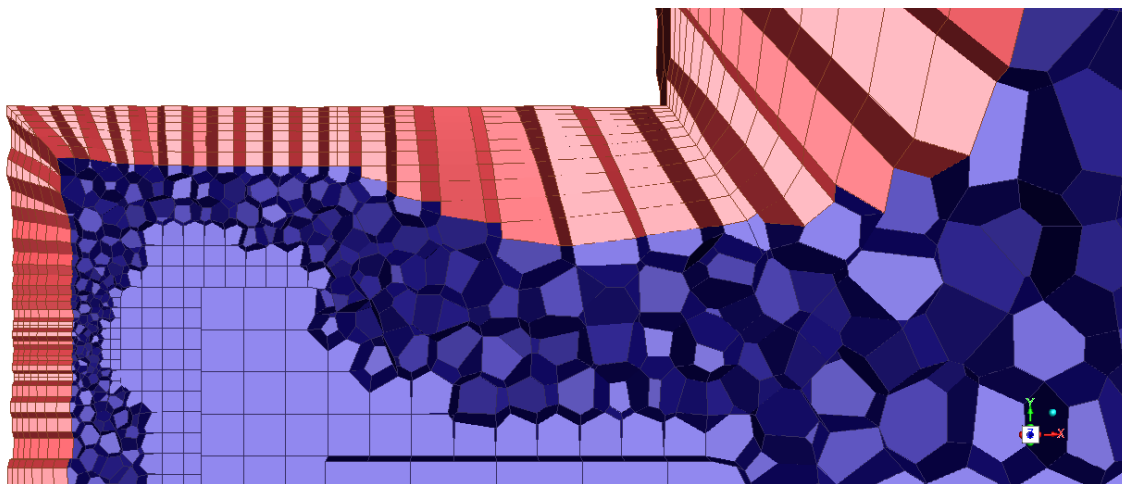
Jak je uvedeno již výše, objemová numerická síť je tvořena kombinací polyhedrálních a hexagonálních buněk. Kolem všech povrchů je vytvořeno několik vrstev prizmatických buněk, pro výpočet proudění v blízkosti stěny.

Počet prizmatických vrstev u jednotlivých povrchů je uveden v následující tabulce. Růstový faktor mezi jednotlivými vrstvami je nastaven opět na hodnotu 1,2. Počet prizmatických vrstev je dán výškou první vrstvy polyhedrálních buněk nad poslední prizmatickou vrstvou, kdy poměr jejich výšek opět přibližně odpovídá hodnotě 1,2. Volba počtu vrstev u povrchu výklenků dále od oken je dána snahou a postupný přechod mezi 7 vrstvami okna a 14 vrstvami u stěn. Tento přechod je patrný na obrázku 42, kde je vidět postupný nárůst prizmatických vrstev pomocí tzv. Stair stepping.

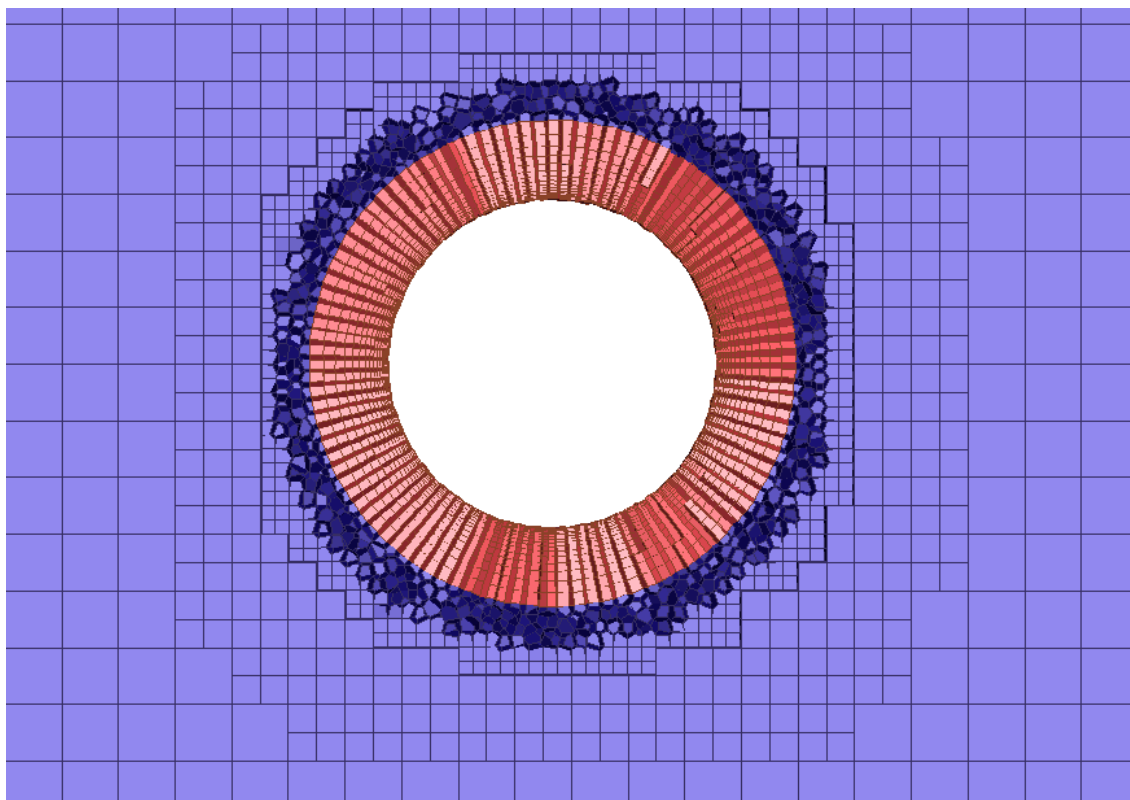
Tab. 7 Počet prizmatických vrstev u jednotlivých povrchů

| Povrch | Počet vrstev |
|-----------------------|--------------|
| OT | 14 |
| Okna | 7 |
| Výklenek blíže oknu | 7 |
| Výklenek dále od okna | 11 |
| Kulový teploměr | 15 |
| Stěny | 14 |
| Mřížka | 7 |
| Štěrba | 7 |
| Odvod | 14 |

Množství polyhedrálních buněk v okolí povrchů, resp. nad prizmatickými vrstvami je dáno nastavením počtu přechodových vrstev (Peel Layers). Ve všech třech variantách jsou použity 4 vrstvy. Dalším parametrem objemové sítě v poly-hexcore je počet vyrovnávacích vrstev (Buffer Layers). Jde o to, aby velikost hexagonálních buněk byla postupně zvětšena až na maximální velikost. Respektive aby přechod mezi velikostmi polyhedrálních a hexagonálních buněk nebyl tak markantní. V numerické síti jsou nastaveny 3 vyrovnávací vrstvy. Jejich aplikace je zjevná na obrázku 43, kde je zobrazen detail sítě v okolí modelu kulového teploměru.

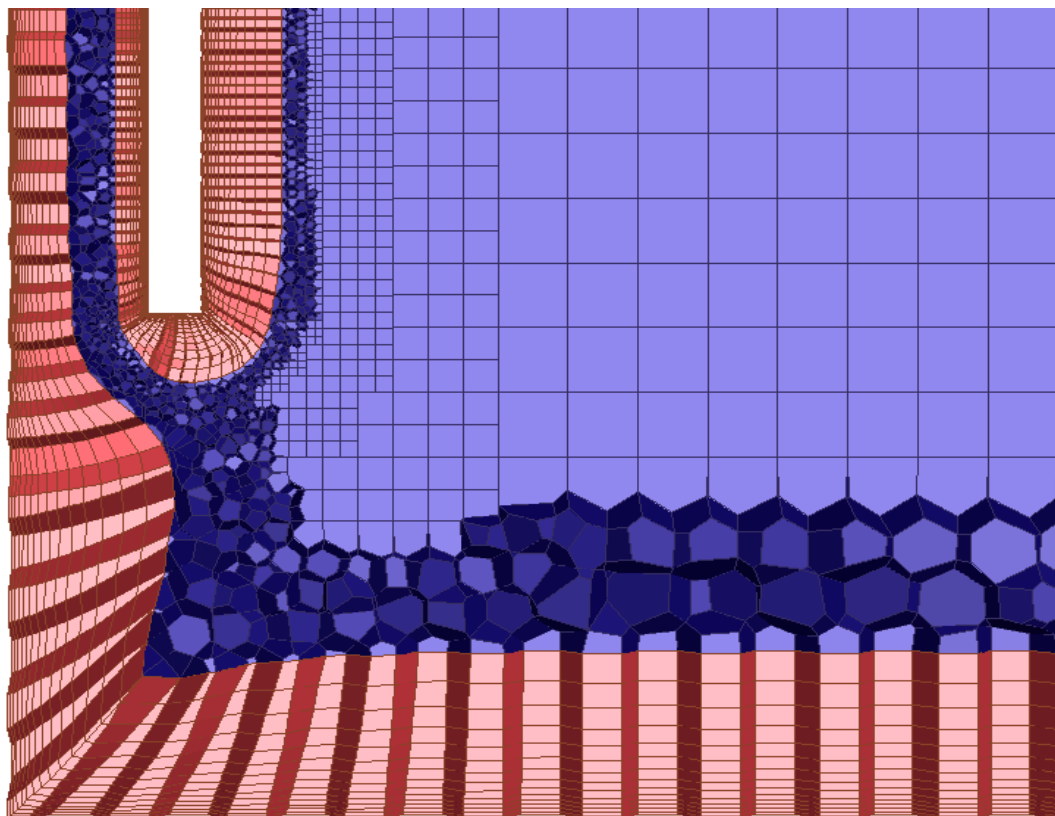


Obr. 42 Detail objemové sítě ve výklenku okna

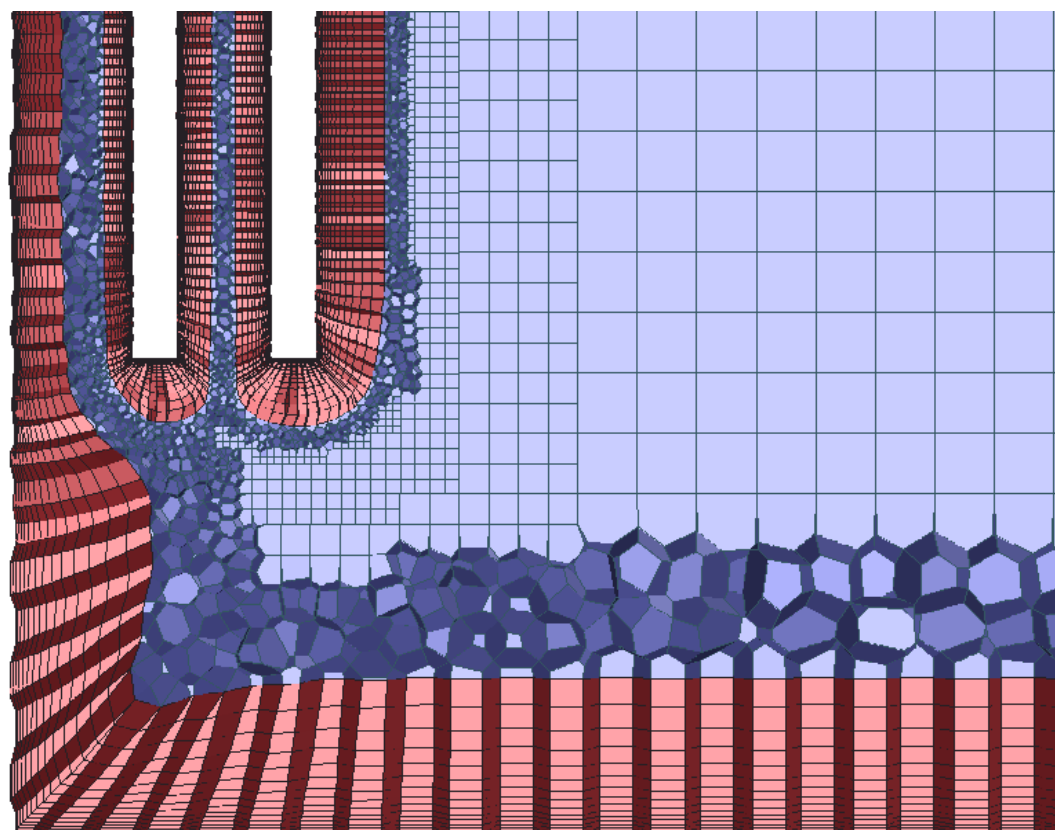


Obr. 43 Detail objemové sítě v okolí kulového teploměru

Na následujících obrázcích je zobrazeno porovnání sítě v okolí modelu otopného tělesa ve variantě č. 1 a ve zbylých variantách, ve kterých je pouze jedno OT. Na obou obrázcích je patrné snížení prizmatických vrstev na ochlazované stěně a na povrchu otopného tělesa. To je způsobeno malým prostorem mezi oběma povrchy. Na prvním obrázku je model OT typu 10, tedy pouze jedna deska a druhý obrázek ukazuje síť v okolí OT typu 20, tedy dvě desky.



Obr. 44 Detail objemové sítě v okolí OT typ 10



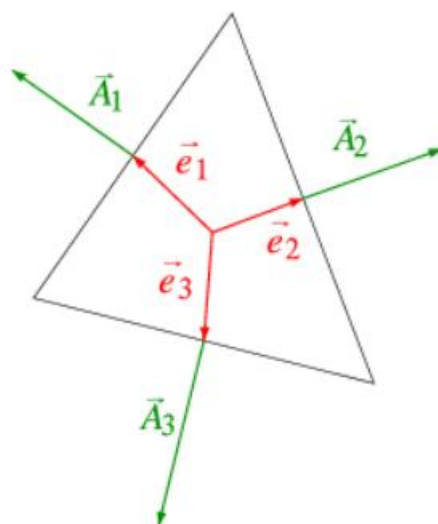
Obr. 45 Detail objemové sítě v okolí OT typ 20

Podobně jako u sítě povrchové, je kvalita objemové sítě hodnocena na základě zborcení. Pro elementy objemové sítě je dosaženo hodnot skewness od 0,64 do 0,69. Menší hodnota odpovídá variantě č. 2 a vyšší variantě č. 1, u varianty č. 3 je dosaženo hodnoty 0,67. Zlepšení kvality objemové sítě je ve Fluent Meshing docíleno pomocí nástroje Auto Node Move.

V samotném Fluentu (solution mode) je kvalita sítě hodnocena na základě dvou parametrů a těmi jsou Aspect Ratio a Orthoskewness. Oba parametry jsou popsány výše. Pro Aspect Ratio se považuje jako hraniční hodnota 100. Orthoskewness nabývá stejně jako ostatní typy zborcení hodnot od 0 do 1, kdy nula odpovídá ideálnímu stavu a jedna je nejhorší stav. Hodnoty obou parametrů pro jednotlivé varianty numerické sítě jsou uvedeny v následující tabulce. Pro názornost jsou na obrázku 46 pod tabulkou zobrazeny vektory v buňce numerické sítě, ze kterých je vypočítáváno Orthoskewness.

Tab. 8 Hodnoty parametrů Aspect Ratio a Orthoskewness pro jednotlivé varianty

| | Aspect Ratio | Orthoskewness |
|---------------|--------------|---------------|
| | [-] | [-] |
| Varianta č. 1 | 61,3 | 0,31 |
| Varianta č. 2 | 62,5 | 0,36 |
| Varianta č. 3 | 58,4 | 0,33 |



Obr. 46 Zobrazení trojúhelníkové buňky s vektory pro stanovení Orthoskewness [22]

S ohledem na náročnost výpočtu je důležitý i počet buněk numerické sítě. Od počtu buněk se odvíjí potřebný výpočetní výkon hardwaru (procesoru) potažmo výpočetní čas. Vzhledem k počtům buněk v jednotlivých variantách, které jsou uvedeny v tabulce 9, byl výpočet prováděn na 10ti jádrech procesorů fakultních serverů.

Tab. 9 Počty buněk numerické sítě u jednotlivých variant

| | Počet buněk |
|---------------|-------------|
| Varianta č. 1 | 17 439 470 |
| Varianta č. 2 | 17 333 215 |
| Varianta č. 3 | 17 325 175 |

5.3 Simulace ve Fluentu

Volba řešičů a nastavení okrajových podmínek je pro všechny tři variantní řešení obdobná. Jediný větší rozdíl se vyskytuje u okrajové podmínky pro otopná tělesa, což je způsobeno rozdílnou výškou těles ve variantě č. 1 oproti zbylým dvěma variantám. Jednotlivým nastavením budou věnovány následující podkapitoly.

5.3.1 Zvolené modely řešení

Numerický výpočet všech tří variant je založen na totožném nastavení jednotlivých modelů. Základem je volba řešiče, ve všech třech případech je použit Pressure-Based Solver. Dále je zvolen segregovaný algoritmus pro výpočet rychlostního a tlakového pole. Schémata interpolace jsou zvolena druhého řádu přesnosti s výjimkou schémat pro tlak, zde je zvoleno schéma PRESTO!, a pro gradienty jednotlivých proměnných je zvoleno schéma Least-Squares Cell-Based. Při simulování přirozená konvekce je nutné zohlednit působení gravitačních sil, což znamená nastavit velikost a směr působení tíhového zrychlení. Ve všech variantách působí tíhové zrychlení proti kladnému směru osy y a jeho hodnota je $9,8137 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (hodnota pro Prahu).

Jako model turbulence je zvolen model $k-\varepsilon$ Realizable bez využití stěnových funkcí a tedy s výpočtem přes mezní vrstvu až ke stěně, tzn. nastavení Enhanced Wall Treatment. Dále je v této variantě chování modelu $k-\varepsilon$ u stěny zvolena možnost Thermal Effects, která zohledňuje tepelné účinky. Důležité je uvažovat také účinky vztlaku, z tohoto důvodu je zvolena možnost Full Buoyancy Effects.

Pro výpočet účinků radiace je využit model S2S, jeho podrobnější popis je uveden výše v textu.

Tekutinou, jejíž proudění je simulováno, je vzduch. Aby mohla být simulována přirozená konvekce je nutné, aby se hustota tekutiny (vzduchu) měnila s teplotou. Za tímto účelem je změna hustoty vzduchu určena jako u ideálního nestlačitelného plynu (incompressible ideal-gas), tzn. že je hodnota hustoty vzduchu stanovena na základě stavové rovnice pro ideální plyn.

Samozřejmostí je i zahrnutí rovnice energie do numerického výpočtu.

5.3.2 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky jsou pro numerickou simulaci zásadní, jelikož výpočet probíhá na jejich základě. V podstatě se jedná o postupné šíření okrajových podmínek, kdy se v jednotlivých iteracích rozšiřuje oblast (počet) buněk, ve kterých se vliv okrajových podmínek projeví. Patrné je to po velmi malém počtu iterací, kdy například teplotní pole v celém objemu, či ploše, je odlišné od inicializovaných hodnot jen v okolí oblastí, které jsou definované jako okrajové podmínky. Inicializace znamená načtení hodnot proměnných do všech buněk na počátku výpočtu. Pro zahájení výpočtu musí být v každé buňce nějaká počáteční hodnota i kdyby byla nulová, tento krok je při iteračním postupu nutný.

Během simulace umístění otopného tělesa ve vytápěném prostoru jsou využity tři typy okrajových podmínek a to stěna (wall), hmotnostní tok na vstupu (mass-flow inlet) a výtok (outflow). Podrobnější definování jednotlivých okrajových podmínek je popsáno v následujících odstavcích.

Vstup

Okrajová podmínka vstupu je zadaná hmotnostním průtokem a je přiřazena štěrbinám, které se nacházejí v horní části oken. Štěrbinou slouží k přívodu venkovního vzduchu do místnosti. Hmotnostní průtok venkovního vzduchu je $0,005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, tato hodnota odpovídá intenzitě větrání $0,3 \text{ h}^{-1}$. Doprovodnými parametry pro vstup jsou intenzita turbulence a hydraulický průměr štěrbin. Hodnota intenzity turbulence ve vstupu je 5 % a velikost hydraulického průměru je 0,016 m, tato hodnota vychází z rozměrů štěrbin 1,6 x 0,008 m.

Výstup

Odvod vzduchu zajišťuje otvor v západní neochlazované konstrukci, představující volný prostor pode dveřmi. Typ okrajové podmínky je nastavený jako výtok a jediným parametrem definujícím tuto okrajovou podmínku je podíl z celkového odváděného množství, v tomto případě je hodnota tohoto parametru 1, jedná se tedy o rovnotlaké větrání.

Povrchy

Všechny ochlazované konstrukce jsou definované součinitelem prostupu tepla, jehož hodnoty odpovídají doporučeným hodnotám součinitele prostupu tepla dle ČSN 73 0540-2, pouze pro větrací mřížku je uvažována hodnota dle výrobce mřížky $3,8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Ostatní hodnoty součinitele prostupu tepla jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 10 Hodnoty součinitele prostupu tepla jednotlivých konstrukcí

| | Stěna | Okno | Podlaha |
|-------------------------------------|-------|------|---------|
| $U [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$ | 0,2 | 1,2 | 0,4 |

Teplota okolního prostředí ochlazovaných stěn a oken odpovídá venkovní výpočtové teplotě $-12 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro prostor pod podlahou je uvažována teplota nevytápěné místnosti (sklepu) $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Povrch desek, které zastupují otopné těleso, je definován hustotou tepelného toku, která vychází z tepelné ztráty místnosti. Tepelná ztráta je stanovena na základě normy ČSN EN 12 831. Ve výpočtu jsou uvažovány tepelné mosty uvažovány zjednodušenou metodou a hodnota tepelné ztráty je 900 W . Jelikož norma při tepelné ztrátě větráním uvažuje hodnotu hustoty a měrné tepelné kapacity pro vzduch o vnitřní výpočtové teplotě a v simulaci ve Fluentu vstupuje do místnosti vzduch o teplotě $-12 \text{ }^\circ\text{C}$, je výsledná hustota tepelného toku na deskách navýšena z důvodu dosažení požadované výsledné teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$ na kulovém teploměru. Hodnoty hustoty tepelného toku pro jednotlivé modely OT jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 11 Hodnoty hustoty tepelného toku na povrchu desek OT

| | OT (výška = 0,6 m) | OT (výška = 0,7 m) |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| $q [\text{W.m}^{-2}]$ | 230,33 | 198,3 |

Důležitým parametrem při výpočtu tepelného toku sdíleného sáláním mezi jednotlivými povrchy v prostoru je emisivita. Pro všechny stěny, strop a podlahu je nastavena hodnota emisivity 0,93, pro plochy otopných těles 0,94, pro okna je zvolena hodnota emisivity skla 0,87 a pro povrch kulového teploměru je nastavena hodnota emisivity na 0,99.

5.3.3 Stanovení střední radiační teploty

Střední radiační teplota je stanovena novou simulací na základě hodnot získaných při původní simulaci, kdy je počítáno jak proděním, tak i sáláním. Pro stanovení střední radiační teploty jsou jako okrajové podmínky povrchů nastaveny již vypočtená teplotní pole na těchto površích. Kromě jiných okrajových podmínek je uvažován pouze výpočet rovnice energie a sálání. Tepelná kapacita vzduchu je nastavena na minimum (řádově 10^{-5}) a na povrchu modelu kulového teploměru je zvýšena emisivita na hodnotu 1. Díky těmto úpravám bude povrchová teplota kulového teploměru odpovídat střední radiační teplotě v původní simulaci.

5.3.4 Konvergence

Konvergence řešení je sledována na základě hodnoty residuí, bližší popis problematiky konvergence je uveden výše. Pro všechna residua, kromě residua kontinuity, je na konci výpočtu dosaženo doporučených hodnot a z průběhu residuí je patrná stabilita řešení. U simulací přirozené konvekce je obvyklý problém s dosažením nízkých hodnot residuí pro rovnici kontinuity. Tento fakt bývá způsoben tím, že žádný z konvekčních proudů není natolik dominantní, aby zcela převládl a proudy se tak mírně mění v čase.

5.4 Výsledky simulace

Tato kapitola je věnována výsledkům simulací jednotlivých variant umístění otopného tělesa v místnosti. Nejprve je popsáno teplotní pole, včetně vertikálního teplotního profilu, a následně i rychlostní pole v každé z variant. Vertikální teplotní profil je uveden téměř pro střed místnosti, oproti středu je posunut o 0,2 m za modelem kulového teploměru ve směru na sever, tedy směrem od okna na jižní ochlazované stěně. Posun je způsoben právě přítomností kulového teploměru v místnosti, a tedy i absencí hodnot teploty vzduchu v místnosti uvnitř kulového teploměru.

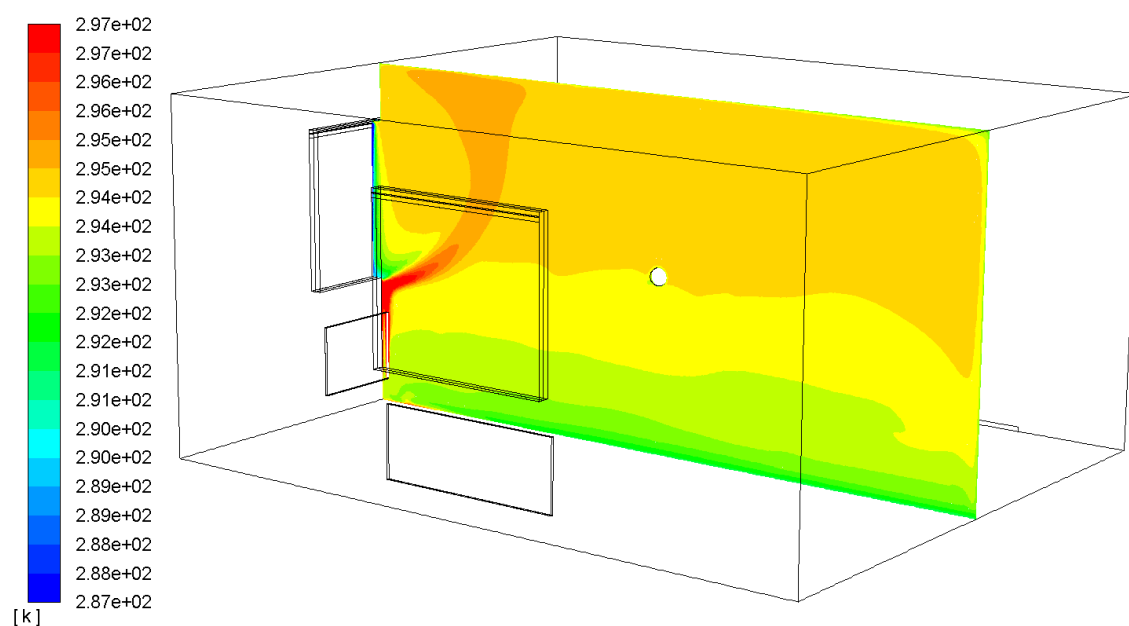
5.4.1 Varianta č. 1

Ve variantě č. 1 jsou umístěna otopná tělesa typu 10 pod oběma okny. Výsledná teplota na kulovém teploměru t_g je 19,9 °C.

Teplotní pole

Teplotní pole je hodnoceno ve dvou řezech vedených vždy středem příslušné ochlazované stěny a zároveň středem obou OT. Obě stupnice jsou uvedeny v absolutních teplotách a v rozmezí 285 - 297 K. Všechny oblasti s teplotami pod, nebo nad uvedeným rozmezím, přebírají barvu příslušné nejbližší zobrazené hodnoty.

Řez, který je orientovaný ve směru jih-sever, je na obrázku 47. Na obrázku jsou patrné oba proudy, jak teplý proud stoupající od tělesa, tak dolů padající chladný proud od okna, který je ještě podpořen chladným vzduchem vstupujícím do místnosti větrací mřížkou. Teplý proud v tomto vertikálním řezu mírně převažuje a po odklonění a ochlazení, díky částečnému smísení se s chladným dolů padajícím proudem, stoupá až ke stropu. Pod tělesem na podlaze je pozorovatelná oblast s vyšší teplotou, což je způsobeno osáláním této oblasti, tento fakt je patrný u všech variant. Teploty po výšce místnosti jsou poměrně vyrovnané kromě oblasti nad podlahou. To je způsobeno tím, že je podlaha ochlazovaná konstrukcí díky nevytápěnému podsklepení.

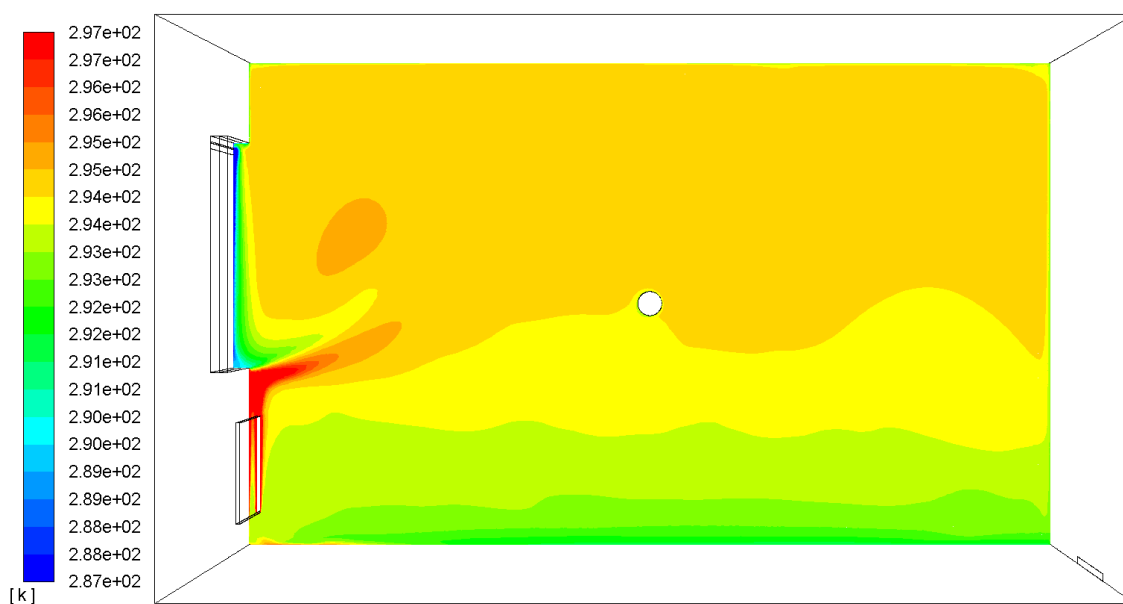


Obr. 47 Teplotní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazované stěny

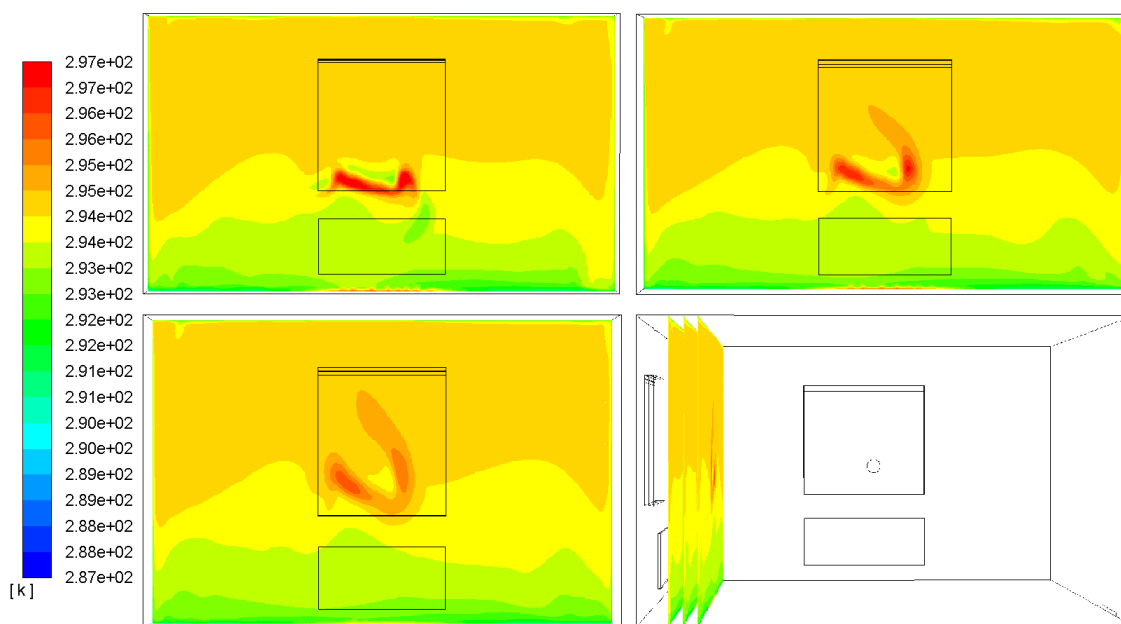
Druhý řez místností s orientací východ - západ je zobrazen na obrázku 48. Z obrázku je patrné téměř totožné rozložení teplot jako v předešlém vertikálním řezu. Chladný a teplý proud se částečně mísí a společně zasahují přibližně do jedné pětiny hloubky místnosti. Tento rozdíl, oproti řezu orientovanému ve směru jih - sever, je způsoben prouděním v celém objemu místnosti, právě díky oběma výsledným proudům. Proudění v místnosti je patrné v horizontálních řezech na následujících obrázcích, hlavně pak v horizontálním řezu vedeném ve výšce 1,5 m nad podlahou.

Nad oběma proudy můžeme pozorovat oblast teplejšího vzduchu. To je způsobeno opět prouděním vzduchu v místnosti, kdy se část teplého proudu od tělesa dostává z boku nad oblast mísících se proudů. Tento fakt je patrný na obrázku 49, kde jsou zobrazeny vertikální řeky v různých vzdálenostech od čela desky otopného tělesa.

Druhé otopné těleso je společně s oknem za zobrazovaným teplotním polem.



Obr. 48 Teplotní pole ve vertikálním řezu středem východní ochlazované stěny



Obr. 49 Teplotní pole ve vertikálních řezech v různých vzdálenostech od OT

Následující obrázek zobrazuje vertikální teplotní profil u středu místnosti, v místě definovaném v úvodu této podkapitoly. Teplotní gradient je přibližně 3 K na celou výšku místnosti. Do výšky jednoho metru je gradient nejvyšší a to přibližně $2,5 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$. Je to způsobeno ochlazovanou podlahovou konstrukcí. Ještě není překročena doporučená maximální hodnota teplotního výškového gradientu $3 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$. Po zbytek výšky místnosti je teplotní profil téměř vyrovnaný a teplota s výškou jen mírně narůstá.



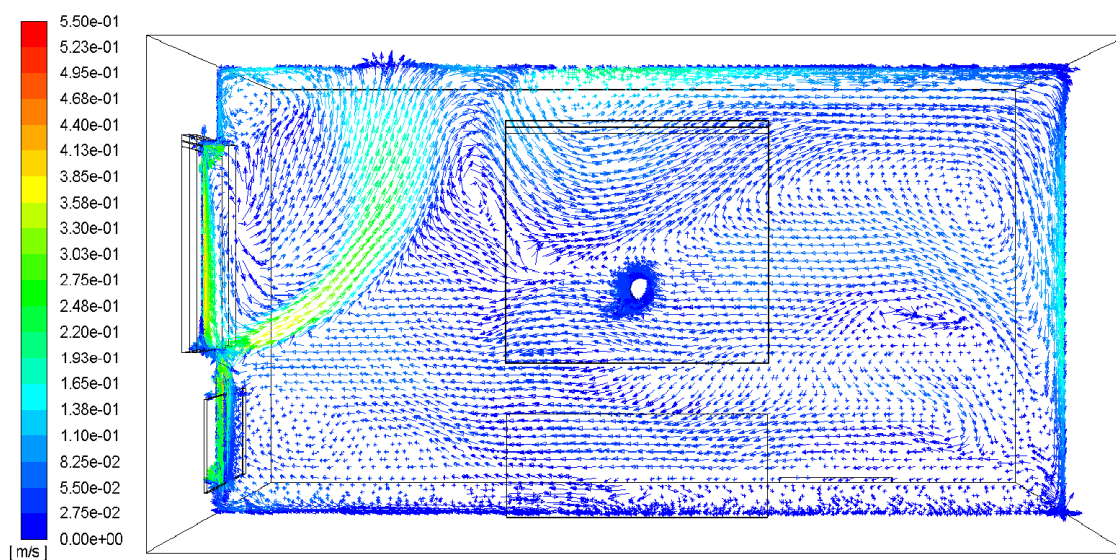
Obr. 50 Vertikální teplotní profil u středu místnosti

Rychlostní pole

Rychlostní pole je hodnoceno ve dvou vertikálních řezech, které jsou stejné jako pro pole teplotní, a ve třech horizontálních řezech v různých výškách nad podlahou. Horizontální řezy jsou vedeny v 0,1 m, 0,75 m a 1,5 m nad podlahou. Všechny horizontální řezy jsou orientovány horním okrajem na východ a to z důvodu lepšího využití místa obrázků. Výška 0,1 m sleduje oblast kotníků člověka. Prostor 0,75 m nad podlahou odpovídá přibližně hrudníku sedícího člověka a výška 1,5 m hrudníku stojícího člověka. Hodnoty odpovídají spíše rozměrům průměrného muže.

Ve všech řezech mají vektory rychlosti stejnou velikost a jejich zbarvení odpovídá velikosti rychlosti.

První vertikální řez je orientován ve směru jih - sever, stejně jako řez na obrázku 47. Rychlostní pole nad otopným tělesem v podstatě kopíruje pole teplotní, tedy teplý stoupající proud od tělesa je vychylován dolů padajícím chladným proudem, který je ještě podpořen větracím vzduchem. Výsledný smíšený proud stoupá s rychlostí $0,3$ až $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až ke stropu, kde jedna jeho část postupuje pod stropem dále do hloubky místnosti. Druhá část proudu se vrací k ochlazené konstrukci, kde se ochlazuje a padá dolů.



Obr. 51 Rychlostní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazené stěny

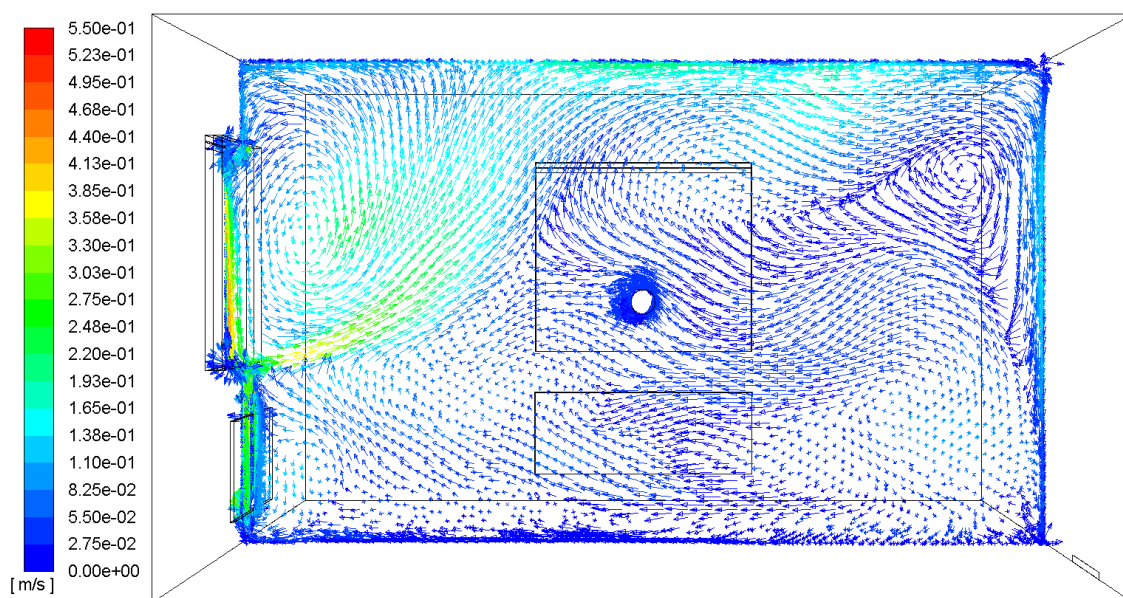
Uprostřed řezu můžeme pod stropem pozorovat oblast s vyšší rychlostí. Tato oblast zobrazuje část výsledného proudu od druhého tělesa, které je umístěno před zobrazovaným vertikálním řezem.

V horní části místnosti pod stropem směřují vektory rychlosti od okna k protější stěně, kde padají dolů. Ve zbylých dvou třetinách výšky prostoru můžeme pozorovat opačný směr proudění, tedy od vnitřní neochlazované stěny k otopnému tělesu. Celý prostor je tak neustále proplachován.

V těsné blízkosti nad podlahou mají vektory rychlosti různý směr, což odpovídá charakteru přirozené konvence.

Druhý vertikální řez je veden ve směru východ - západ. Oproti předešlému vertikálnímu řezu můžeme pozorovat, že výsledný smíšený proud zasahuje hlouběji do prostoru a převážná část směřuje pod stropem dále do hloubky místnosti. Tento fakt je způsoben vzájemným ovlivňováním obou proudů, které je patrné v horizontálním řezu vedeném ve výšce 1,5 m nad podlahou.

Opět můžeme pozorovat proudění pod stropem ve směru od otopného tělesa k protější neochlazované vnitřní stěně, podél které padá dolů a ve zbytku výšky místnosti směřuje zpět k otopnému tělesu.

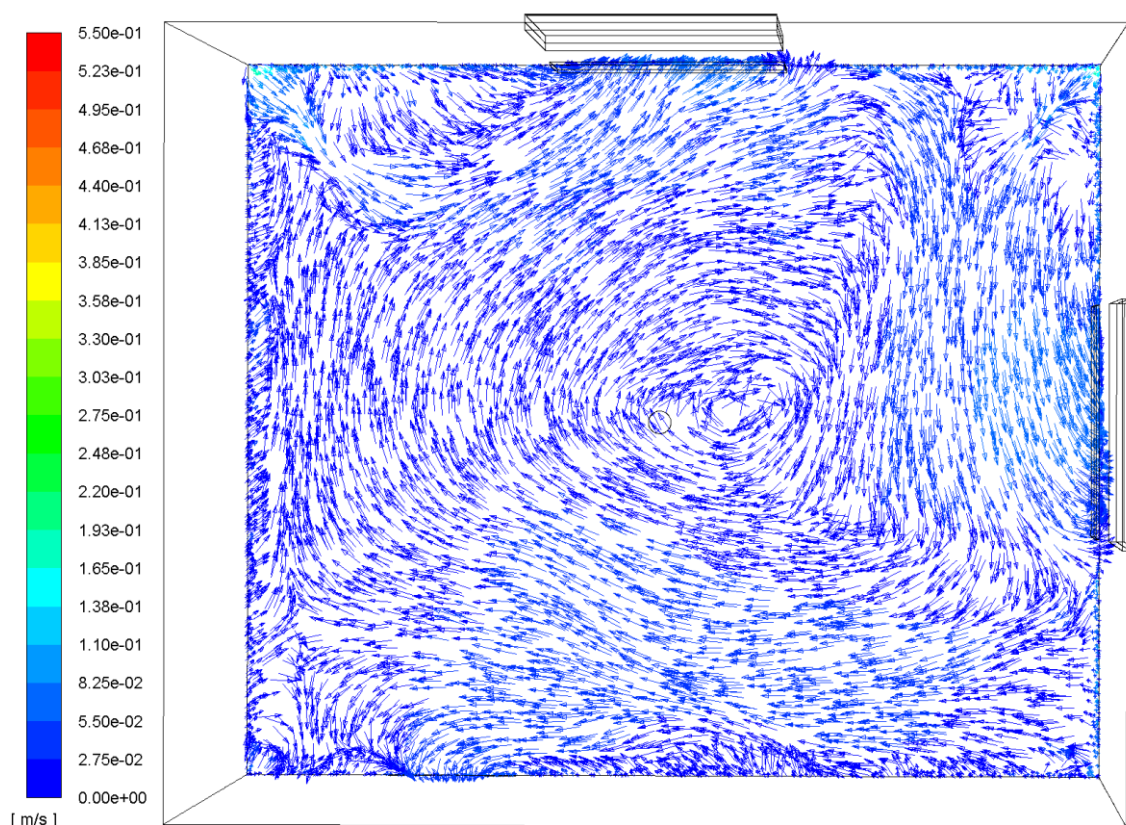


Obr. 52 Rychlostní pole ve vertikálním řezu středem východní ochlazované stěny

Velikosti rychlostí proudění jsou v obou vertikálních řezech srovnatelné a v oblasti nad podlahou dosahují velmi malých hodnot, což je z hlediska tepelného komfortu ideální stav. Ani v horizontálním řezu vedeném ve výšce 0,1 m nad podlahou, který je zobrazen na obrázku 53, nedosahují velikosti rychlosti vysokých hodnot. Od limitní hodnoty pro pásmo trvalého pobytu sedících osob $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ jsme bezpečně vzdáleni.

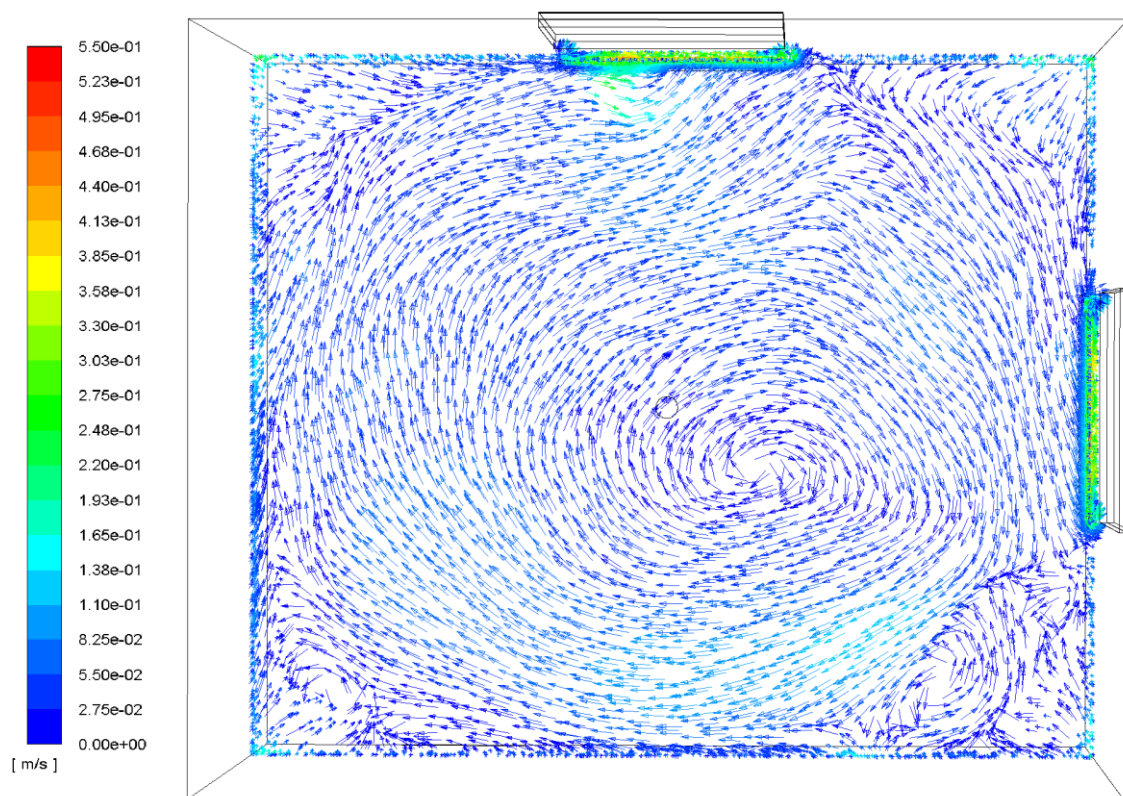
Na témže obrázku horizontálního řezu můžeme pozorovat cirkulační smysl proudění v místnosti. To je způsobeno nasáváním vzduchu v dolní části desek. Tím, že jsou v prostoru dvě desky, je vzduch roztáčen prakticky po celém průřezu místnosti. Cirkulace je patrná i na obrázku horizontálního řezu vedeném ve výšce 0,75 m nad podlahou a částečně i v řezu vedeném ve výšce 1,5 m.

Ve všech řezech můžeme pozorovat poměrně kvalitní proplachování celého prostoru s minimem míst stagnujícího vzduchu.



Obr. 53 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,1 m nad podlahou

Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,75 m nad podlahou, které je zobrazeno na obrázku níže, je téměř totožné s tím ve výšce 0,1 m. Rozdíl můžeme pozorovat v maximální velikosti rychlosti v dolní části obrázku, která je přibližně $0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato hodnota je opět přijatelná z pohledu tepelného komfortu.

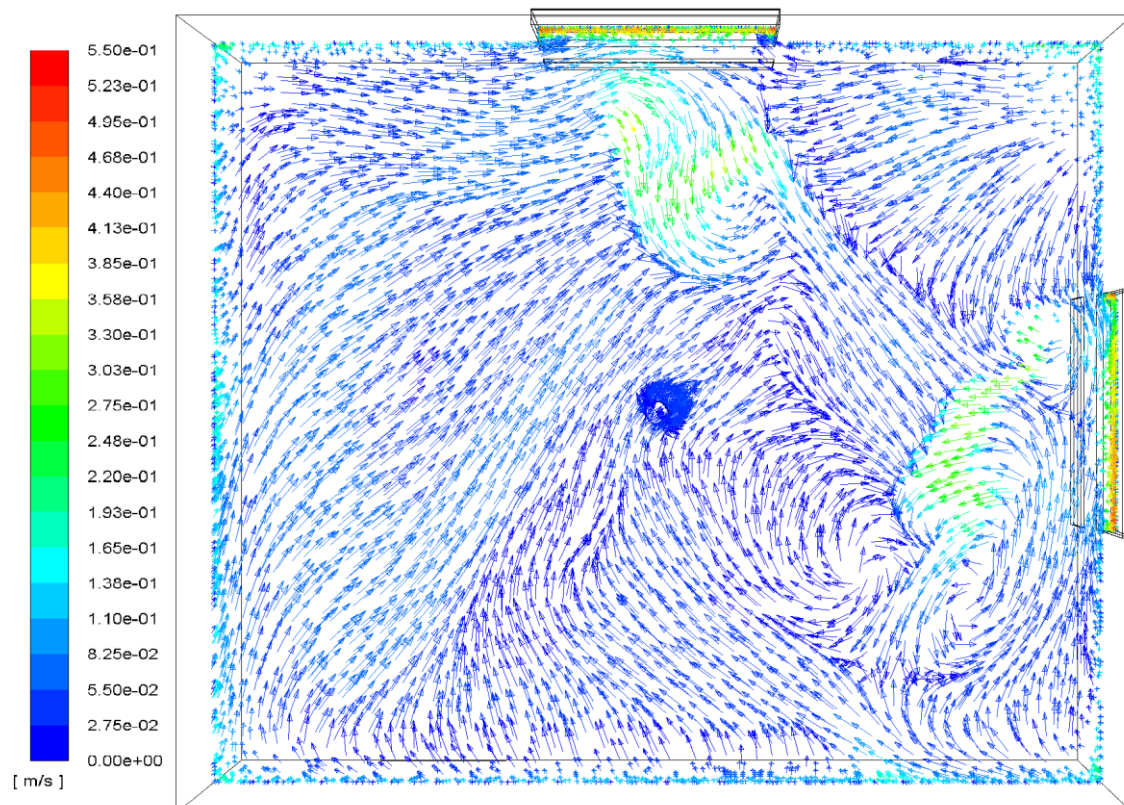


Obr. 54 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,75 m nad podlahou

Na obrázku 55 je zobrazen poslední horizontální řez, tentokrát vedený uprostřed výšky místnosti, tedy ve výšce 1,5 m. V těsné blízkosti oken jsou patné dolů padající chladné proudy, jejichž rychlost v této výšce okna dosahuje i mezní hodnoty stupnice, tedy $0,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respektive jejich rychlost může být i vyšší. Na obrázku je patné strhávání okolního vzduchu oběma výslednými proudy. Díky tomu je proudění ve zbytku místnosti orientováno právě směrem k těmto dvěma proudům, jejichž rychlost dosahuje hodnoty přibližně $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dále můžeme pozorovat vzájemné ovlivňování obou smíšených proudů v podobě prostorové deformace těchto proudů.

Rychlost v oblasti obou smíšených proudů je poměrně vysoká a zasahuje relativně hluboko do místnosti, ale jelikož má smíšený proud dostatečně vysokou teplotu a jeho podstatnou část tvoří i čerstvý venkovní vzduch, můžeme velikost rychlosti považovat za přijatelnou. Nejvyšší velikost rychlosti je také pouze u středu výsledného proudu a směrem od středu velikost rychlosti klesá.

Uprostřed místnosti je patné obtékání kulového teploměru. Detailněji pozorovatelné po přiblížení daného obrázku v přílohách.



Obr. 55 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 1,5 m nad podlahou

5.4.2 Varianta č. 2

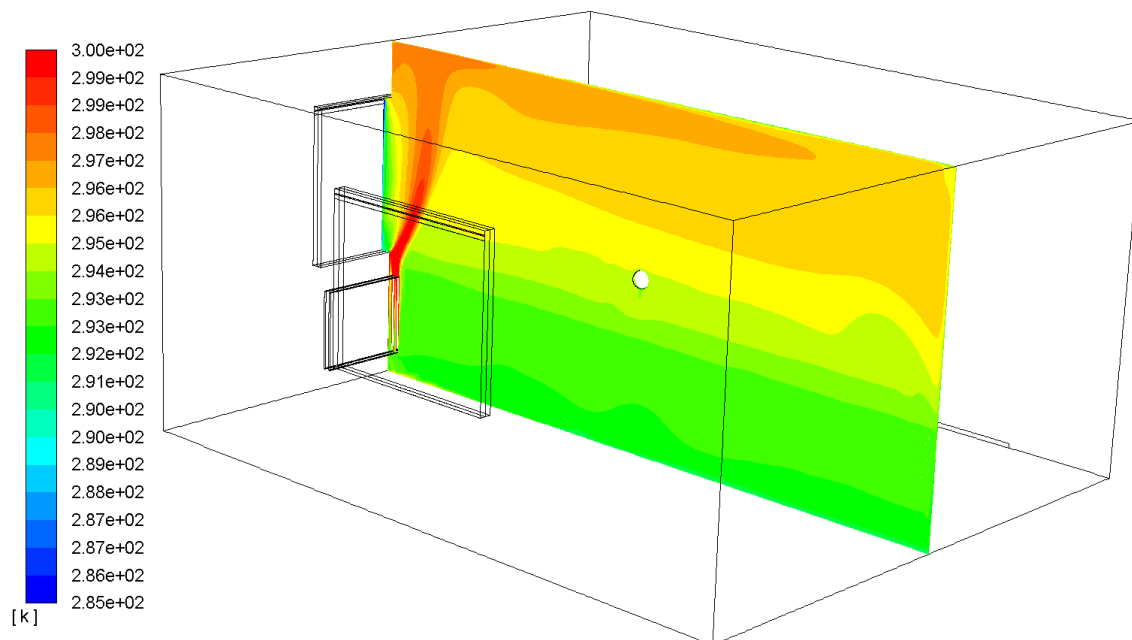
Varianta č. 2 uvažuje otopné těleso umístěné na jižní ochlazované stěně. Jedná se o kratší z obou ochlazovaných stěn. Simulací získaná výsledná teplota modelu kolového teploměru je 20,1 °C.

Teplotní pole

Podobně jako ve variantě č. 1 je teplotní pole vyhodnocováno ve dvou vertikálních řezech vedených vždy středem ochlazované místnosti, respektive středem okna a případně i otopného tělesa. Stupnice odpovídající jednotlivých hodnotám teploty je podobně jako v předešlé variantě v absolutních hodnotách, ale změnilo se rozmezí z 287 - 297 K na 285 - 300 K. Hodnotám teplot, které překračují rozmezí stupnice jsou opět přiřazeny barvy odpovídající nejbližší hodnotě.

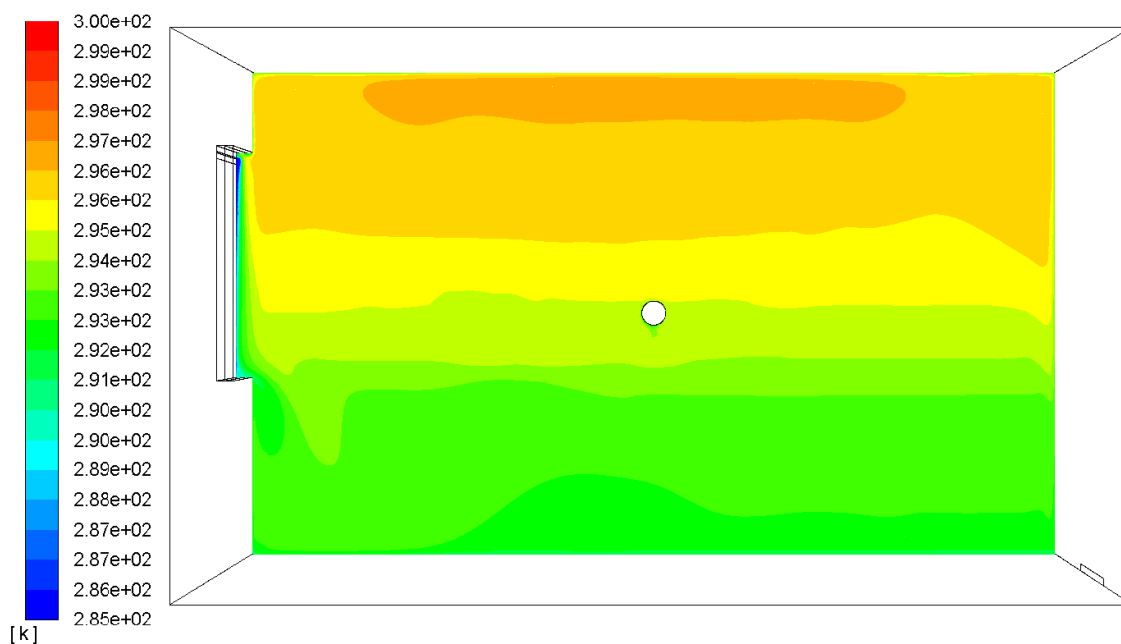
Na obrázku 56 je vidět řez vedený středem jižní stěny, na které je umístěn i model otopného tělesa. Můžeme vidět, že teplý proud stoupající nad těleso je mírně vychylován dolů padajícími chladnými proudy od okna. Dolů padající chladné proudy jsou navíc podporovány chladným větracím vzduchem, kterému odpovídá modrá barva

v horní části okna. Teplý vzduch od tělesa stoupá až pod strop a dále se rozlévá po celé ploše stropu do zbytku prostoru. V dolní části místnosti je patrný vliv ochlazované podlahy. Mnohem více je tento fakt zřejmý z výškového teplotního profilu, viz níže.

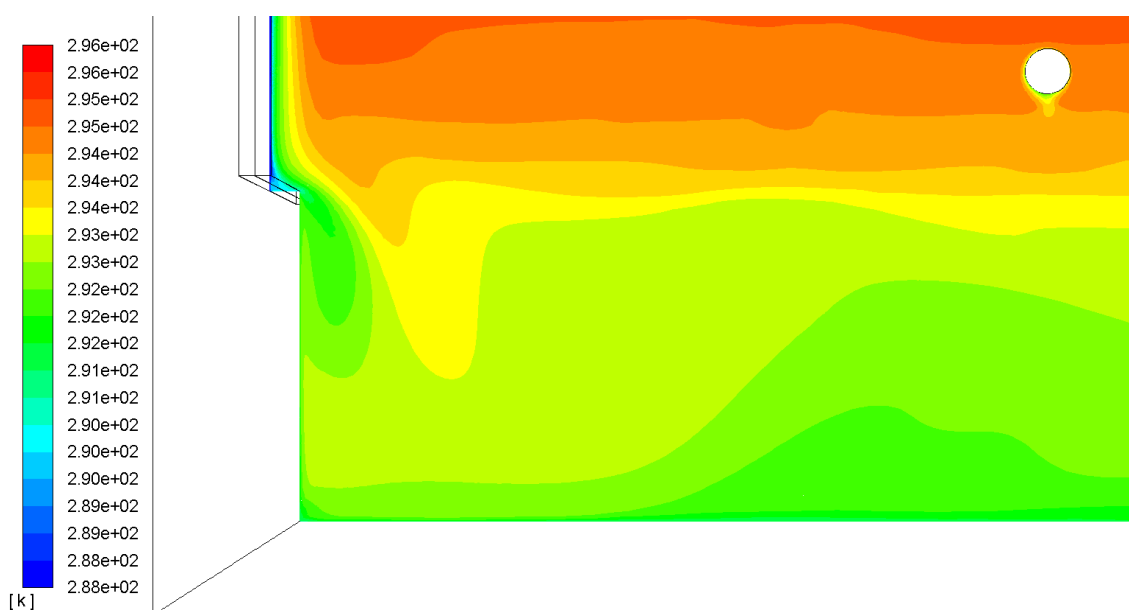


Obr. 56 Teplotní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazované stěny

Druhý vertikální řez, který je veden kolmo k tomu předešlému, je zobrazen na následujícím obrázku. V tomto řezu je pouze okno orientované na východ, resp. umístěno v delší z obou ochlazovaných stěn. Můžeme pozorovat, že chladné dolů padající proudy postupují bez překážky přes okenní výklenek, strhávají okolní teplejší vzduch a společně postupují až k podlaze. Zřetelněji je to patrné na obrázku vektorů rychlosti níže. Detailnější pohled na teplotní pole v okolí výklenku a podlahy ukazuje obrázek 58. Rozmezí stupnice v tomto obrázku je upraveno na 288 - 296 K.



Obr. 57 Teplotní pole ve vertikálním řezu středem východní ochlazované stěny



Obr. 58 Detail teplotního pole pod oknem na východní ochlazované stěně

Kromě detailu teplotního pole pod oknem nám obrázek 58 ukazuje chladnější vrstvu vzduchu v okolí modelu kulového teploměru ve směru k podlaze a oknu bez otopného tělesa. Můžeme tak zřetelně pozorovat vliv osálení od chladnějších povrchů v prostoru.

Posledním obrázkem souvisejícím s teplotním polem je obrázek zobrazující vertikální teplotní profil. Můžeme vidět, že teplota se s výškou mění téměř lineárně, pokud zanedbáme oblast v těsné blízkosti ochlazované podlahy. Výškový teplotní

gradient se pohybuje v dolní části místnosti okolo hodnoty 2 K.m^{-1} . Mezi výškami jeden a dva metry se blíží výškový teplotní gradient k hodnotě $2,5 \text{ K.m}^{-1}$. V horní části místnosti je to pak přibližně 1 K.m^{-1} . Ani v jedné části není překročena maximální doporučená hodnota 3 K.m^{-1} . Pokud se podíváme na teplotní gradient po celé výšce místnosti dostaneme se na hodnotu přibližně 5 K .

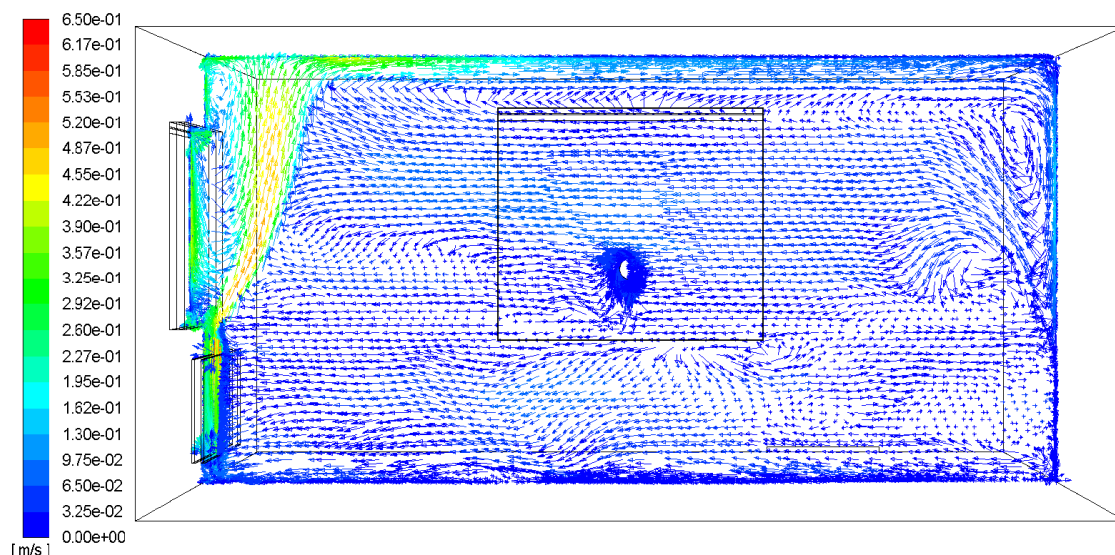


Obr. 59 Vertikální teplotní profil u středu místnosti pro variantu č. 2

Rychlostní pole

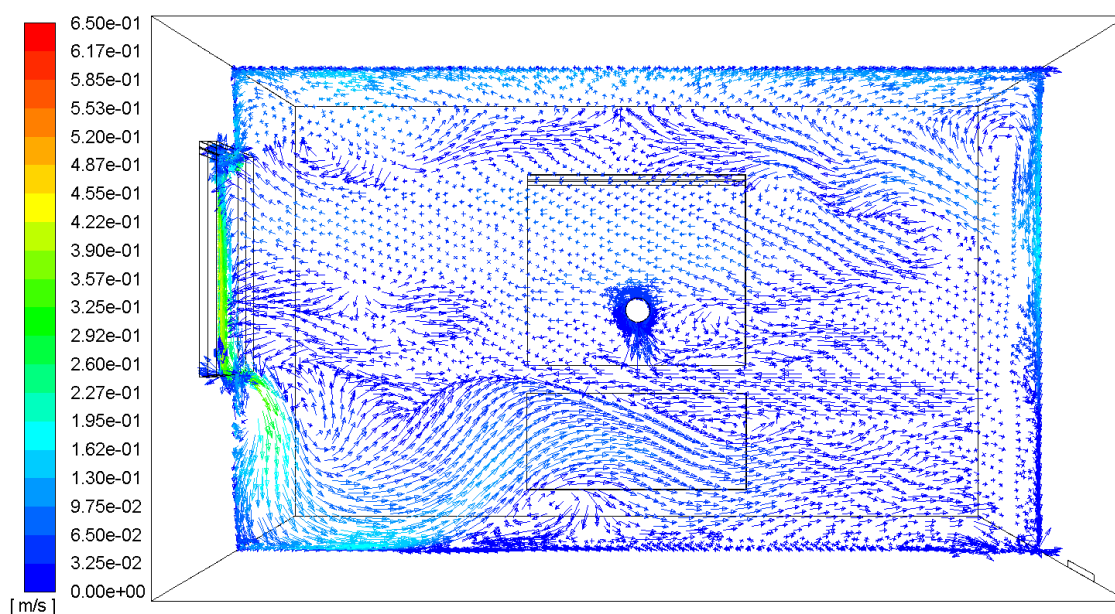
Rychlostní pole je opět hodnoceno v pěti řezech, jedná se o dva vertikální a tři horizontální řezy. Pro horizontální řezy platí znovu orientace horního okraje obrázku na východ.

Na obrázku 60 je zobrazeno rychlostní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazované stěny. Vychýlení teplého stoupajícího proudu odpovídá obrázku teplotního pole v témže řezu. Teplý vzduch stoupá vzhůru nad těleso s rychlostí přibližně $0,5 \text{ m.s}^{-1}$, s malým vychýlením od chladného proudu se dostává ke stropu a pokračuje směrem k protější stěně. U protější stěny padá dolů a přibližně v polovině výšky místnosti se dostává do oblasti se vzduchem o nižší teplotě. Díky tomu, že má padající vzduch stále vyšší teplotu opět stoupá a vrací se zpět k teplému stoupajícímu proudu od tělesa. V řezu převládá směr proudění k OT a k teplému stoupajícímu proudu.



Obr. 60 Rychlostní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazované stěny

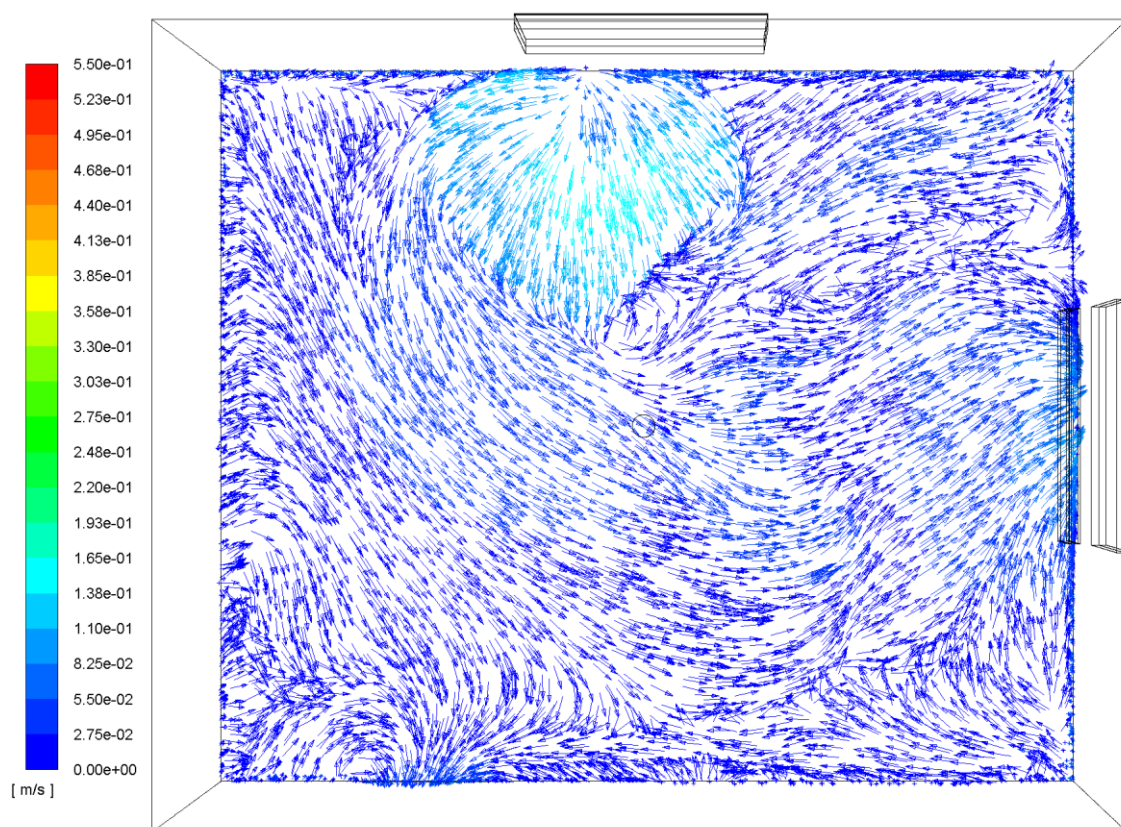
Následující obrázek ukazuje rychlostní pole ve vertikálním řezu okna pod nímž není otopné těleso. Na obrázku je patrný chladný dolů padající proud, který za hranou výklenku strhává okolní teplejší vzduch a směšuje se s ním. Proud postupuje dolů k podlaze, kde postupně ztrácí svou hybnost a opět mírně stoupá. Proud stoupá díky tomu, že má vyšší teplotu než vzduch v těsné blízkosti podlahy, a postupuje dále k protější stěně. Rychlost proudění u podlahy může dosahovat maximálně hodnoty $0,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pod stropem můžeme pozorovat vektory rychlosti teplého proudu od tělesa, které je umístěno za zobrazovaným řezem. Je patrné, že se teplý proud postupně rozlévá na všechny strany.



Obr. 61 Rychlostní pole ve vertikálním řezu středem východní ochlazované stěny

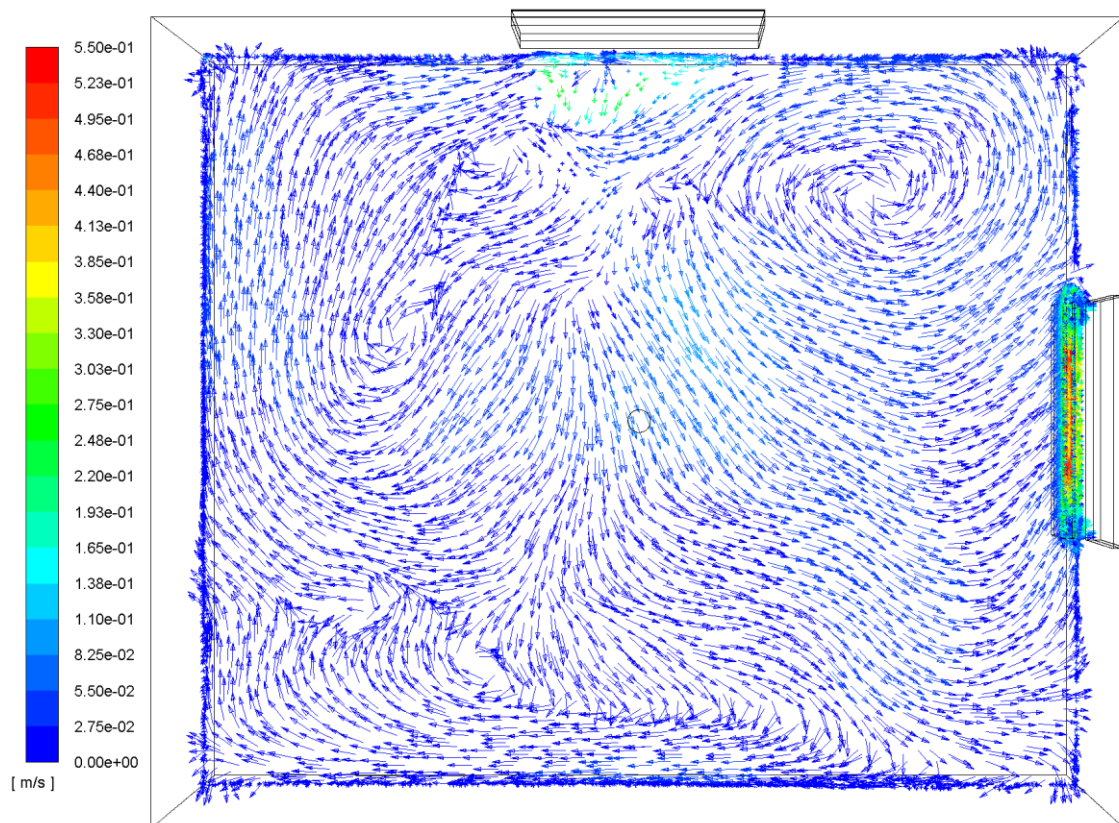
Na obrázku horizontálního řezu ve výšce 0,1 m nad podlahou lze pozorovat zřetelnou oblast do které zasahuje proud viditelný na předchozím vertikálním řezu. Dle škály stupnice tohoto řezu je patrné, že maximální rychlost v oblasti v okolí kotníků je přibližně $0,17 - 0,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pozorovatelné je také proudění vzduchu směřující k deskám otopného tělesa. Patrné je i unášení okolního vzduchu původně padajícím proudem od okna. Díky tomu, že původně padající proud opět mírně stoupá, vzniká horizontálně se křížící proudění, což je pozorovatelné při porovnání obrázků 62 a 63.

Na obrázku 63 je zobrazen horizontální řez ve výšce 0,75 m.

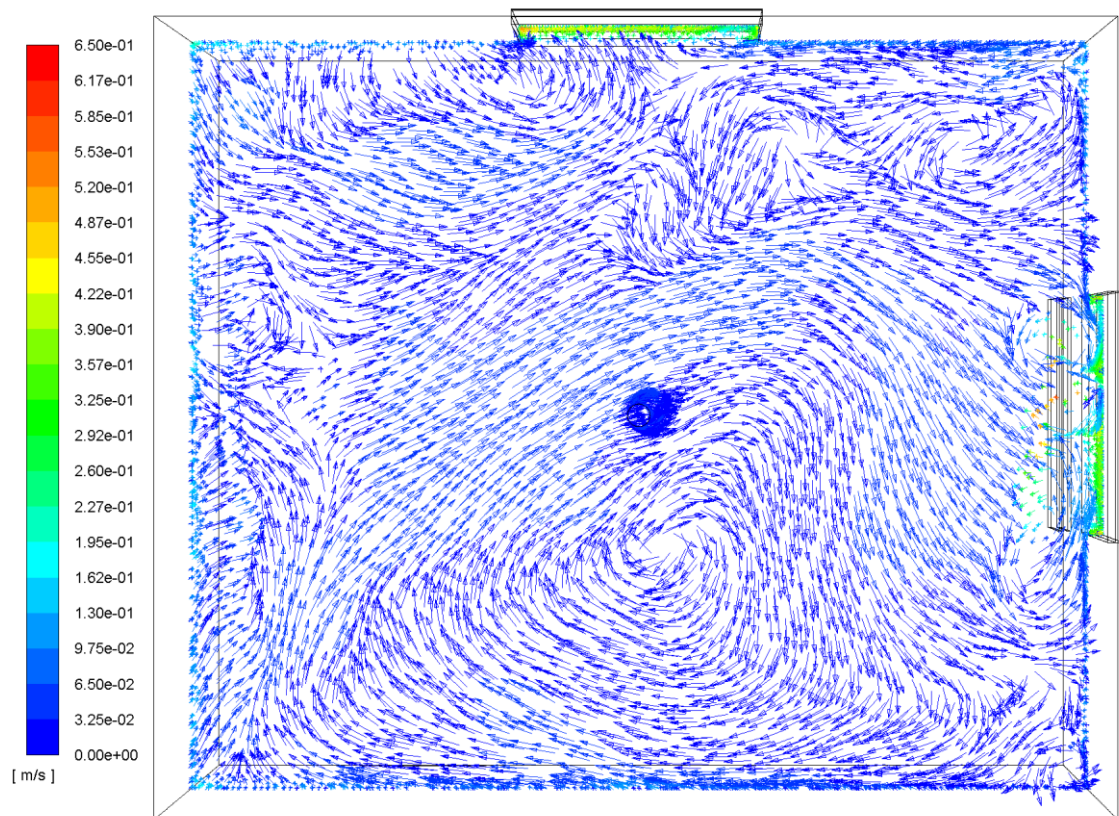


Obr. 62 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,1 m nad podlahou

Řez ve výšce 0,75 m nad podlahou ukazuje dolů padající proud v horní části pod oknem. Zhruba uprostřed místnosti je pozorovatelný proud, který opět stoupá a je to pozorovatelné i ve vertikálním řezu na obrázku 61. Část tohoto proudu směřuje k tělesu a druhá část směřuje na druhou stranu a vrací zpět pod okno, kde je okolní vzduch strháván padajícím proudem.



Obr. 63 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,75 m nad podlahou



Obr. 64 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 1,5 m nad podlahou

Poslední horizontální řez zobrazuje vektory rychlosti ve středu místnosti a odpovídá mu obrázek 64. Hlavní směr proudění je k tělesu, respektive ke stoupajícímu teplému proudu. V tomto řezu dosahují rychlosti v teplém stoupajícím proudu hodnot až $0,65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zřetelněji opět na daném obrázku v přílohách.

U okna orientovaného na východ je patrné strhávání okolního vzduchu z prostoru chladnými dolů padajícími proudy.

Objem místnosti je opět celý proplachován, výjimkou jsou oblasti v horní části místnosti, které můžeme pozorovat v obou vertikálních řezech u vnitřních neochlazovaných stěn.

5.4.3 Varianta č. 3

V tomto variantním řešení je otopné těleso typu 20 umístěno pod východním oknem. Výsledná teplota na kulovém teploměru t_g je v tomto případě $20,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

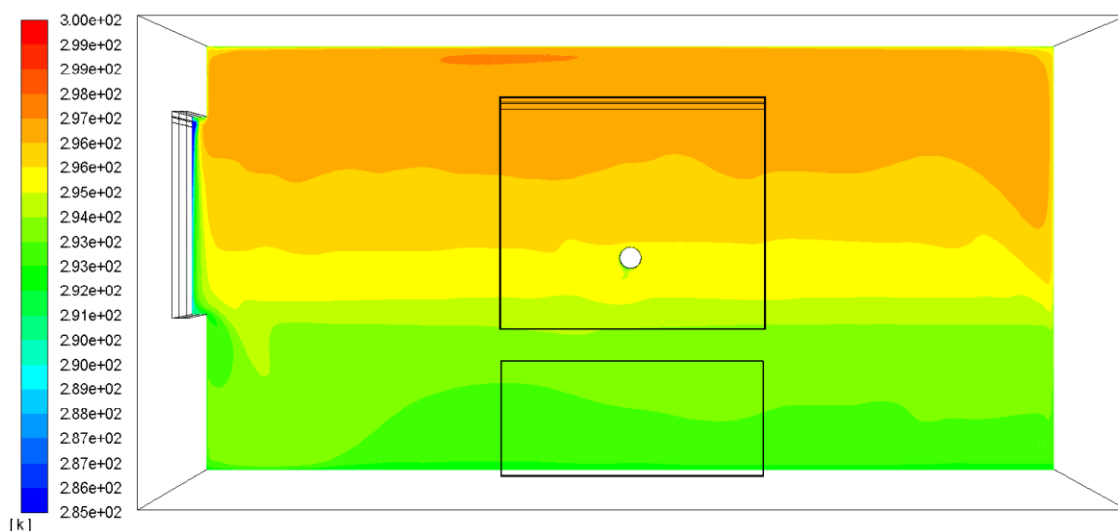
Teplotní pole

Stejně jako u předchozích variant je teplotní pole vyhodnocováno ve dvou vertikálních řezech. Stupnice u jednotlivých obrázků je opět v absolutních teplotách a ve stejném rozmezí jako u varianty č. 2, tedy 285 - 300 K. Stejně jako ve výše uvedených dvou variantách připadají oblastem s vyšší, či nižší teplotou barvy jim nejbližší dle barevné škály stupnice.

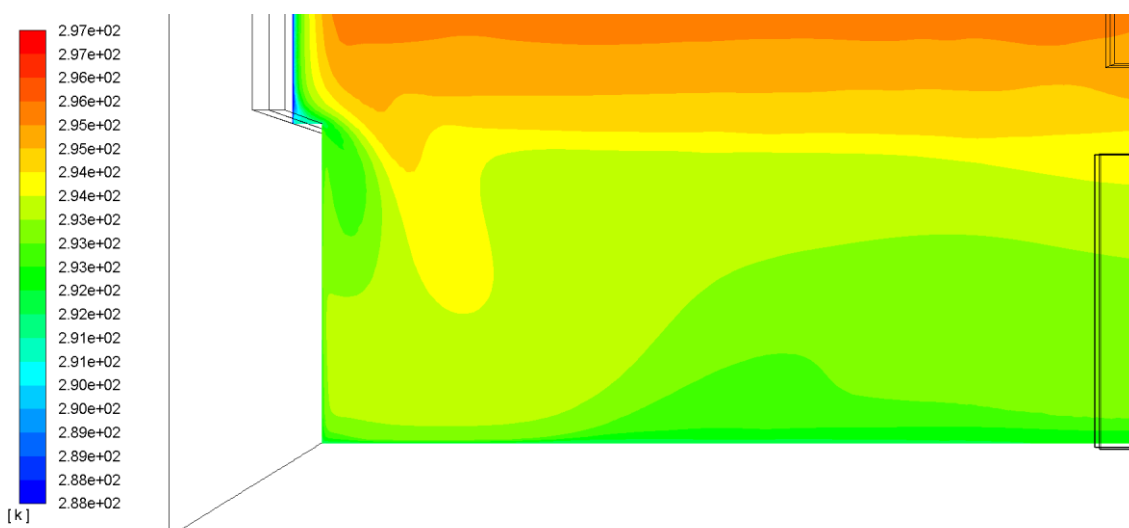
První řez, zobrazený na následujícím obrázku, je veden středem jižní ochlazované konstrukce. Jedná se o stěnu na které není umístěno OT. Na obrázku můžeme pozorovat podobnou stratifikaci teplot jako u předešlé varianty, čemuž odpovídá i výškový teplotní profil, viz níže. Pod oknem je patrný dolů padající chladný proud, který se částečně směšuje s okolním teplejším vzduchem. Detailní pohled na tuto oblast je na obrázku 66, jehož stupnice je v rozsahu 288 - 297 K.

V horní části okna můžeme opět pozorovat chladný venkovní vzduch vstupující do místnosti větrací mřížkou. Jako v obou předešlých variantách ihned padá dolů a podporuje dolů padající chladné proudy u okna.

Těleso je umístěno na obrázku 65 před zobrazovaným řezem, vertikální řez jeho středem na obrázku 67.



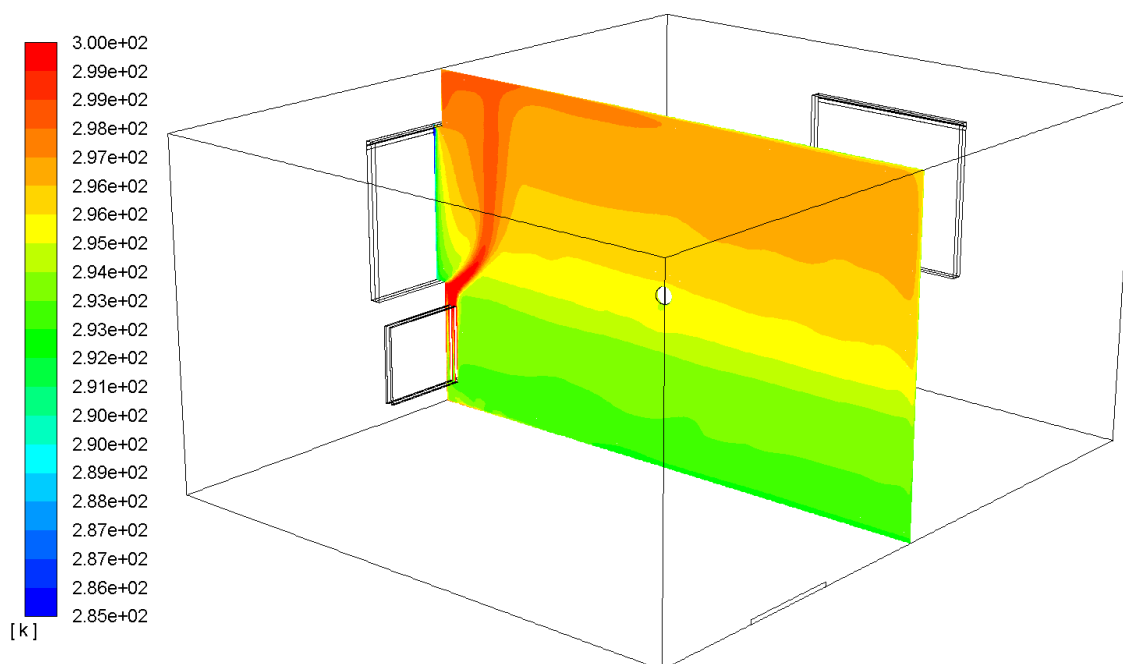
Obr. 65 Teplotní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazované stěny



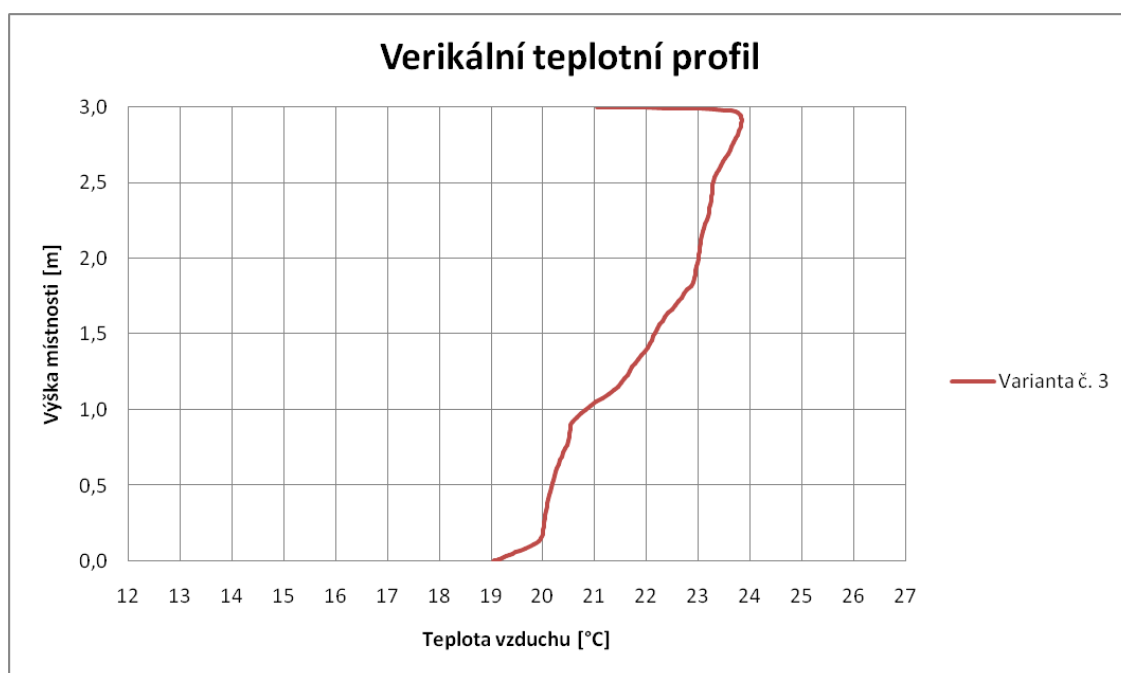
Obr. 66 Detail teplotního pole pod oknem na jižní ochlazované stěně

Druhý řez, vedený znovu středem východní stěny, zobrazuje opět částečné vychýlení stoupajícího teplého proudu chladným proudem od okna. Podobně jako ve variantě č. 2 stoupá teplý proud až ke stropu, pod nímž se rozlévá do celého prostoru. Stratifikace teplot je obdobná jako v předešlém vertikálním řezu na obrázku 65.

Vertikální teplotní profil ukazuje obrázek 68. Průběh je prakticky totožný s průběhem výškového teplotního profilu z předešlé varianty, tedy varianty č. 2. Teplotní gradient příslušející celé výšce místnosti je necelých 5 K. Do výšky dvou metrů se výškový teplotní gradient pohybuje okolo hodnoty $2 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$. Ve zbytku výšky hodnota výškového teplotního gradientu klesá pod hodnotu $1 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$.



Obr. 67 Teplotní pole ve vertikálním řezu středem východní ochlazované stěny



Obr. 68 Vertikální teplotní profil u středu místnosti

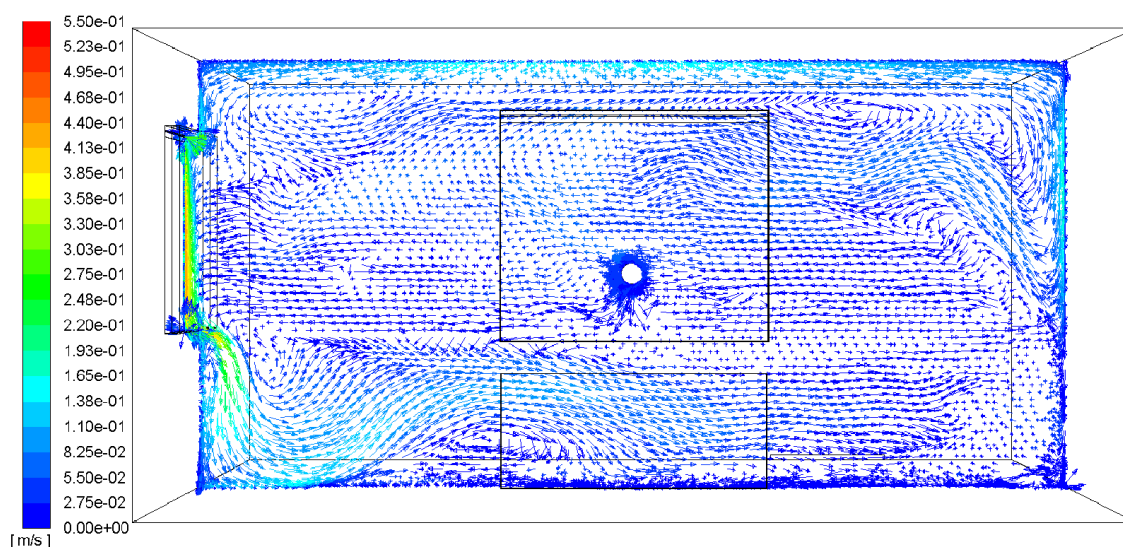
Rychlostní pole

Řezů pro vyhodnocení rychlostního pole je opět pět, dva vertikální řezy jsou vedeny stejně jako řezy pro vyhodnocení teplotního pole. Zbylé tři řezy jsou znovu horizontální a jsou vedeny ve stejných výškách, jako v předešlých variantách.

Následující řez zobrazuje stěnu bez otopného tělesa. Můžeme pozorovat jak chladný dolů padající proud strhává vzduch z prostoru před oknem a postupně nabírá na rychlosti. Po překonání výklenku okna dále strhává okolní teplejší vzduch, se kterým se částečně směšuje a ohřívá se tak. Proud si stále zachovává svou hybnost a postupuje až k podlaze, kde začíná zpomalovat a díky vyšší teplotě než je teplota vzduchu u podlahy mírně stoupá. Dále směřuje k protější neochlazované stěně, podobně jako v předešlé variantě. Tento fakt lze připisovat dobrým tepelně technickým vlastnostem oken, které zajišťují vyšší povrchové teploty okenních konstrukcí, respektive i vyšší teploty vzduchu v těsné blízkosti okna. Rozložení teplot v blízkosti oken je patrné na většině obrázků teplotních polí. Svou roli hrají také tepelně technické vlastnosti ochlazovaných stěn.

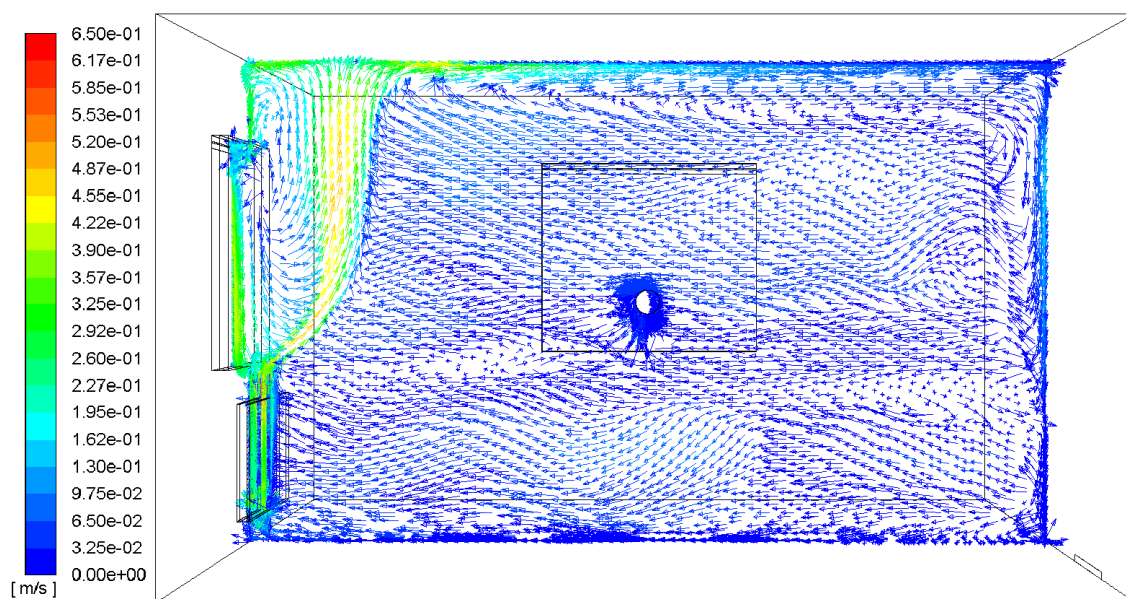
Pod stropem můžeme pozorovat oblast s vyšší rychlostí. Ta odpovídá rozlévajícímu se teplému proudu od otopného tělesa, které je umístěn na stěně před zobrazovaným řezem. Na pravé straně obrázku 69 lze pozorovat stejný charakter proudění jako na obrázku 60, či 61 z předešlého variantního řešení. Kdy teplejší vzduch začíná po ztrátě hybnosti opět mírně stoupat a směřovat zpět do prostoru.

Proudění v oblasti podlahy dosahuje rychlosti přibližně $0.17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 69 Rychlostní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazované stěny

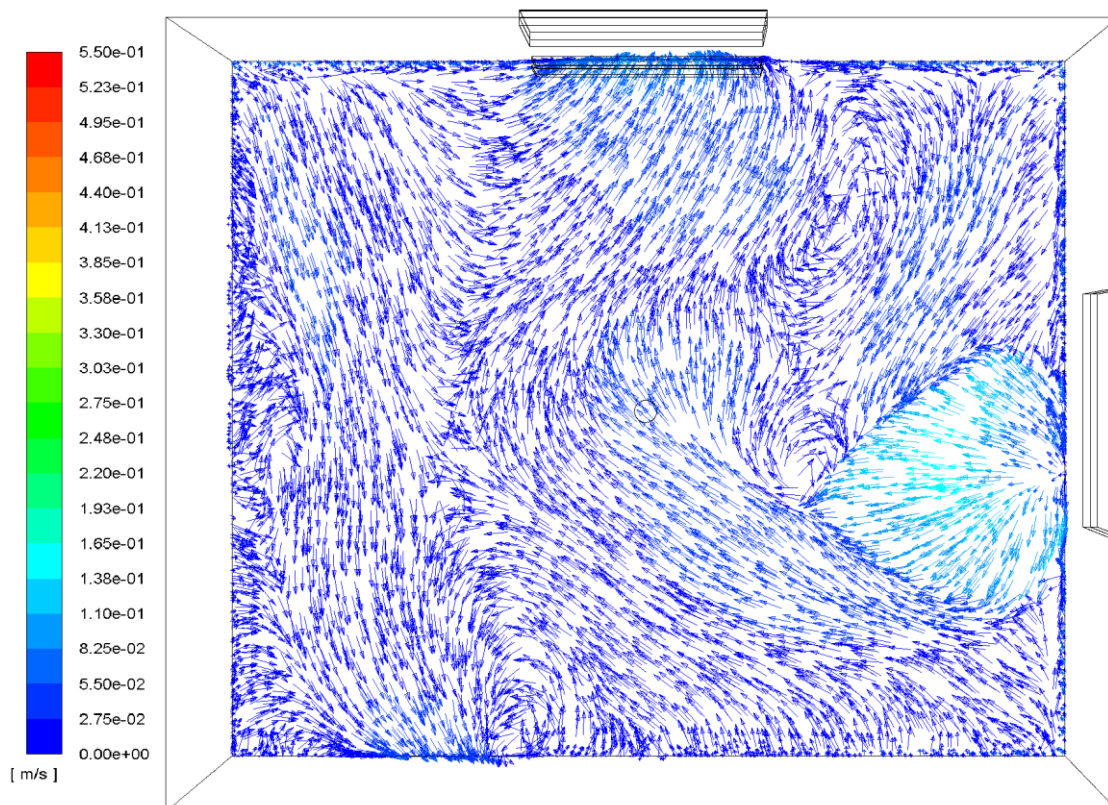
Na druhém vertikálním řezu můžeme vidět mírně vychýlený teplý stoupající proud od otopného tělesa. Dominantní je proudění směřující k otopnému tělesu a stoupajícímu teplému proudu. Jedinou výjimkou je proudění v blízkosti stropu, kdy teplý proud směřuje od okna k protější neochlazované vnitřní stěně. Část teplého proudu směřuje k ochlazované stěně, resp. k oknu kde pokračuje směrem dolů k okennímu výklenku podobně jako v předešlé variantě. V tomto řezu dosahuje teplý proud rychlosti 0,5 až 0,55 m.s⁻¹.



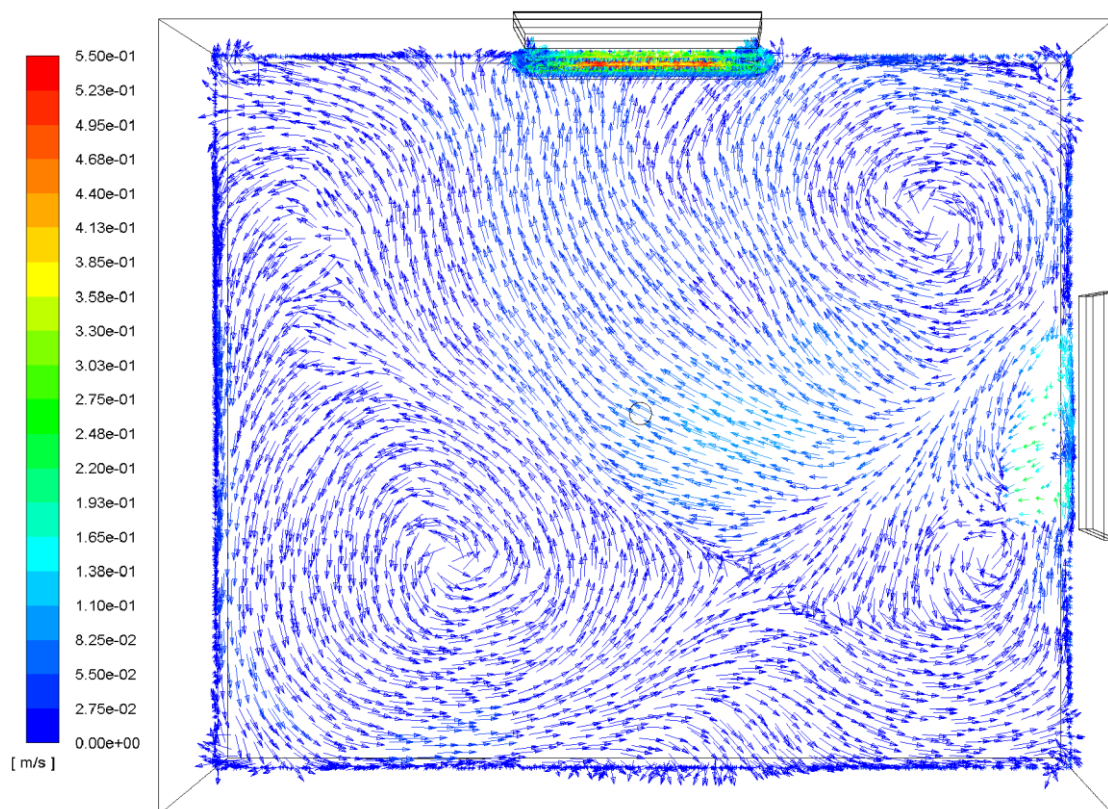
Obr. 70 Rychlostní pole ve vertikálním řezu středem východní ochlazované stěny

V horizontálních řezech vypadají obrazy proudění obdobně jako v předešlé variantě č. 2 s jedním OT. Horizontální řez ve výšce 0,1 m je prakticky totožný. Opět můžeme vidět proud od okna, který se dostal až k podlaze, a dále proudění směřující k otopnému tělesu.

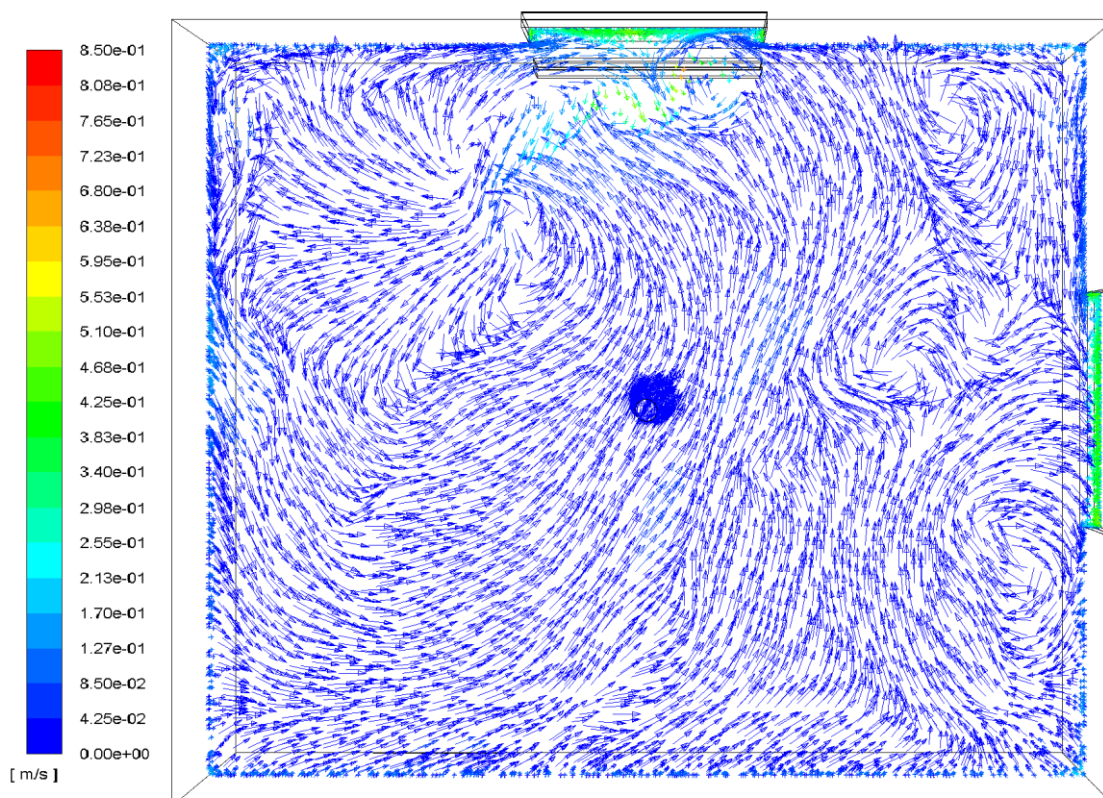
Oproti předešlé variantě lze pozorovat dvě výraznější oblasti s cirkulujícím vzduchem v řezu vedeném ve výšce 0,75 m nad podlahou, který je zobrazen na obrázku 72. Tato místa by mohla představovat problém z hlediska stagnujícího vzduchu. Pro přesné hodnocení by musela být provedena simulace stanovující stáří vzduchu v jednotlivých bodech prostoru.



Obr. 71 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,1 m nad podlahou



Obr. 72 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,75 m nad podlahou



Obr. 73 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 1,5 m nad podlahou

Ve výšce 1,5 m převládá proudění směřující k teplému stoupajícímu proudu. Vzduch z oblasti před oknem, pod kterým není umístěno těleso, je strháván dolů padajícím proudem. Při detailnějším pohledu na obrázek 73 v přílohách, zjistíme, že teplý proud zde dosahuje rychlosti přibližně $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

5.4.4 Střední radiační teplota

Střední radiační teplota je vyhodnocena na základě výše popsaného postupu. Její hodnoty pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 12 Hodnoty střední radiační teploty v jednotlivých variantách

| | t_r |
|---------------|-------|
| | [°C] |
| Varianta č. 1 | 19,4 |
| Varianta č. 2 | 19,4 |
| Varianta č. 3 | 20,3 |

Jelikož jednotlivé výsledné teploty nejsou totožné (především kvůli odlišnosti ve variantě č. 3), nemůžeme porovnávat jednotlivé hodnoty střední radiální teploty. Pro objektivnější porovnání je proto lepší vyhodnotit rozdíl výsledné teploty t_g a střední radiální teploty t_r . Hodnoty rozdílu obsahuje tabulka 13.

Tab. 13 Hodnoty rozdílu t_g a t_r

| | $t_g - t_r$ |
|---------------|-------------|
| | [K] |
| Varianta č. 1 | 0,43 |
| Varianta č. 2 | 0,66 |
| Varianta č. 3 | 0,54 |

Na základě předešlé tabulky můžeme říci, že nejlepší variantou z pohledu sálavé tepelné složky je varianta č.1 a za nejhorší lze považovat variantu č. 2. Rozdíl mezi variantou č. 2 a variantou č. 3 je ve vzdálenosti umístění OT od modelu kulového teploměru. Kdy ve variantě č. 3 je těleso umístěno o 1 metr blíže. Samozřejmě záleží na bodu, ve kterém budeme obě teploty měřit a vyhodnocovat. Otázkou je zda můžeme rozdíl 23 setin u rozdílu t_g a t_r pro varianty č. 1 a č. 2 považovat za nějak zásadní s ohledem na tepelný komfort člověka v místnosti.

Tento fakt je dán především současnými tepelně technickými vlastnostmi používaných stavebních konstrukcí.

Při porovnání teploty vzduchu ve výšce 1,5 m u výškových teplotních profilů s výslednou teplotu můžeme pozorovat rozdíl okolo 1 K, maximálně však 1,5 K.

5.5 Poznámky k simulaci

V této kapitole si nejprve dovolím vysvětlit proč je výsledná teplota u varianty č. 3 rozdílná oproti zbylým dvěma variantám. Vyšší teplota u varianty č. 3 je způsobena větším počtem iterací při výpočtu, kdy byl sledován případný vývoj proudění v místnosti a eventuálně rozdílné rozložení teplot, oproti řešení s menším počtem iterací. Jediný pozorovatelný rozdíl je v narůstající teplotě prostoru místnosti. Charakter proudění a rozložení teplot v místnosti však zůstal stejný. A jelikož jsou si varianty č. 2 a č. 3 co do charakteru proudění a rozložení teplot podobné, je varianta č. 3 prezentována po větším počtu iterací, s tím, že i při mírně vyšších absolutních teplotách v místnosti zůstávají charakter proudění a rozložení teplot téměř stejné.

Dále je korektní říci, že se jedná pouze o výsledky simulace založené na matematických modelech, které jsou pro potřeby numerického výpočtu mnohdy zjednodušeny oproti přesnému popisu reálné situace. Z tohoto důvodu je nutné brát výsledky numerické simulace s určitou rezervou a k potvrzení, či případné korekci, by bylo vhodné provést experiment v odpovídajícím rozsahu.

5.6 Ekonomické hledisko

Tato kapitola je věnována pouze porovnání cen jednotlivých použitých typů otopných těles ve dvou výrobních provedeních. Jde o typ 10 o rozměrech 600 x 1600 mm a typ 20 o rozměrech 700 x 1600 mm, v provedení tělesa s klasickým připojením a provedení ventil kompaktní. Níže uvedené ceny jsou bez DPH a odpovídají pouze pořizovacím nákladům jednotlivých těles a jsou brány z ceníku českého výrobce otopných těles. Porovnání cen je obsaženo v následující tabulce.

Tab. 14 Pořizovací ceny otopných těles [23]

| | 10 - 600 x 1600 | 20 - 700 x 1600 |
|--------|-----------------|-----------------|
| | cena bez DPH | cena bez DPH |
| klasik | 2 591,- | 5 596,- |
| VK | 4 119,- | 6 615,- |

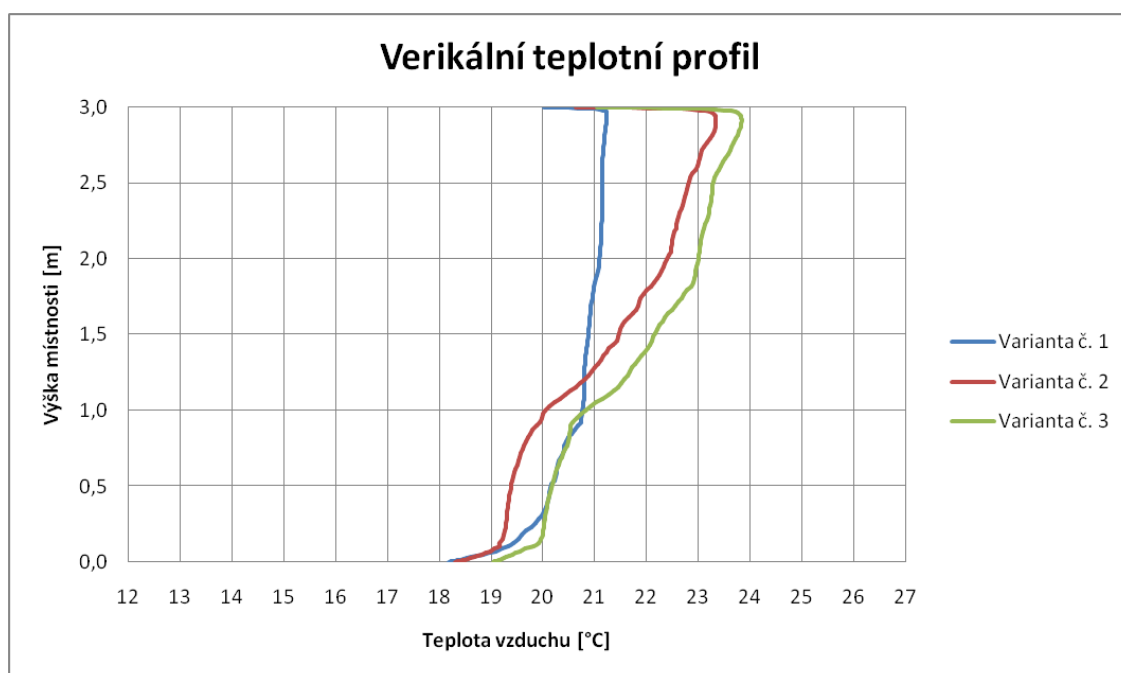
U provedení VK je očividně přijatelnější pořízení jednoho tělesa 20 - 700 x 1600, než dvou těles typu 10. Při instalaci těles v provedení klasik musíme ještě uvažovat cenu termostatického ventilu, přičemž bude jedno těleso vycházet o něco laciněji než tělesa dvě. Ale rozdíl bude téměř minimální.

Kromě samotné pořizovací ceny bychom mohli zohlednit i cenu připojovacího potrubí, která bude při instalaci dvou těles také vyšší.

6 ZÁVĚR

Závěrem práce je celkové zhodnocení výsledků numerické simulace v CFD. Hodnoceny jsou tři varianty umístění otopného tělesa. Varianta č. 1 reprezentuje umístění otopného tělesa pod oběma okny. Další dvě varianty uvažují otopné těleso vždy pouze pod jedním oknem. Ve všech variantách jsou otopná tělesa vždy stejné délky jako je délka okna a jsou provozovány se stejnými teplotními parametry.

Z hlediska výškového teplotního gradientu po celé výšce místnosti, sledovaném u středu místnosti, můžeme jako nejlepší považovat variantu č. 1, ve které tento parametr dosahuje hodnoty 3 K. Zatímco ve zbylých dvou variantách je jeho hodnota přibližně 5 K. Ale pokud se zaměříme na výšku do jednoho metru zjistíme, že varianta č. 1 již není s výškovým teplotním gradientem okolo $2,5 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$ tou nejlepší, oproti zbylým dvěma variantám, kde se výškový teplotní gradient pohybuje lehce pod hodnotou $2 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$. Tento fakt je způsoben ochlazováním podlahové konstrukce. Zbytek výškového teplotního profilu je již ve variantě č. 1 značně vyrovnaný. Ve zbývajících dvou variantách dotujeme sousední místnost nad stropem, díky vyšším teplotám právě v oblasti pod stropem. Porovnání vertikálních teplotních profilů všech tří variant je na obrázku 74.



Obr. 74 Vertikální teplotní profil u středu místnosti

Při posuzování vlivu proudění vzduchu ve vytápěném prostoru na tepelný komfort sledujeme velikosti rychlosti a také teploty proudícího vzduchu. Zaměřme se na oblast ve výšce kotníků. Zde je z hlediska velikosti rychlosti proudění nejvhodnějším řešením varianta č. 1, kdy proudění dosahuje rychlostí do $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a maxima se vyskytují v blízkosti otopných těles, kde je vzduch, díky teplotě těles, nasáván. Ve variantách č. 2 a č. 3 se u podlahy objevuje proudění s velikostí rychlosti až $0,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jedná se o oblast zasaženou původně dolů padajícím proudem od okna, pod kterým není umístěno OT. Díky současným tepelně technickým požadavkům, v simulaci byly uvažovány doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla dle normy ČSN 73 0540-2, má toto proudění v oblasti podlahy již dostatečně vysokou teplotu a tudíž nepředstavuje z hlediska tepelného komfortu větší problém. Proudění v těchto oblastech zároveň nedosahuje hraniční hodnoty rychlosti proudění $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro oblast trvalého pobytu sedících osob. Lze tedy konstatovat, že chladné dolů padající proudy, podpořené chladným větracím vzduchem v horní části okna o intenzitě větrání $0,3 \text{ h}^{-1}$, nepředstavují při současných tepelně technických vlastnostech konstrukcí zásadní problémy ve vytápěném prostoru. Samozřejmě za předpokladu změny směru chladného proudu díky výklenku, potažmo parapetu, díky čemuž se chladný proud může mísit s okolním teplejším vzduchem. Tzn., nelze tyto závěry simulace vztahovat na prosklené konstrukce typu francouzské okno apod.

S ohledem na distribuci čerstvého vzduchu do prostoru je ideální varianta č. 1, jelikož se čerstvý vzduch mísí s teplým proudem od tělesa a společně pak směřují do prostoru, nikoliv ihned ke stropu, jako je tomu u variant s jedním otopným tělesem. V těchto variantách se ani dolů padající a následně mírně odkloněný proud od podlahy nedostává nad polovinu výšky místnosti.

Z pohledu proplachování celého prostoru jsou jednotlivé varianty srovnatelné a nelze jednoznačně říci, která z variant je z toho hlediska nejpříjemnější.

Pokud se podíváme na střední radiační teplotu, respektive na rozdíl výsledné a střední radiační teploty, je opět nejvhodnější variantou ta se dvěma otopnými tělesy. Varianty č. 2 a č. 3 však nevykazují o tolik horší výsledky, což je opět dáno dobrými tepelně technickými vlastnostmi konstrukcí, které se v současné době instalují. Pokud budeme uvažovat referenční bod ve středu místnosti, je vhodnější umístit těleso na stěnu blíže tomuto bodu, při instalaci pouze jednoho tělesa.

Posledním hodnotícím parametrem jsou pořizovací náklady na otopná tělesa. S ohledem na tepelný komfort by neměl hrát tento parametr žádnou roli, avšak pro investora je to parametr velmi důležitý a lze říci, že mnohdy i jediný a rozhodující. Z tohoto pohledu je pak příznivější varianta pouze s jedním otopným tělesem.

Na základě výše uvedených hodnotících parametrů a na základě výsledků numerické simulace, lze konstatovat, že z pohledu co nejlepších parametrů tepelného komfortu ve vytápěném prostoru je nejvhodnější variantou varianta č. 1. Snad jediná její nevýhoda, kromě vyšších pořizovacích nákladů, spočívá v rozložení teplot v dolní části místnosti, kde výškový teplotní gradient dosahuje hodnoty $2,5 \text{ K.m}^{-1}$, což znamená, že se ze všech tří variant nejvíce přibližujeme hraniční hodnotě 3 K.m^{-1} . Snížení výškového teplotního gradientu by mohlo nastat při zlepšení tepelně technických vlastností podlahy, tedy snížení součinitele prostupu tepla oproti doporučené hodnotě $0,4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Pokud by se jednalo o rohovou místnost bez ochlazované podlahy, můžeme očekávat vyrovnaný výškový teplotní profil po celé výšce místnosti a nejmenší teplotní gradient.

S ohledem na investiční náklady a vzhledem k tomu, že i zbývající dvě varianty s jedním OT splňují posuzované parametry (rychlost proudění v oblasti kotníků pod $0,25 \text{ m.s}^{-1}$; teplotní výškový gradient v oblasti pobytu sedících osob menší jak 3 K.m^{-1}), lze na základě numerické simulace pro projekční praxi při projektování otopných těles v rohových místnostech se dvěma okny doporučit projektování pouze jednoho OT. Samozřejmě musí budova splňovat požadavky na doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla podle ČSN 73 0540-2. Jedno otopné těleso je pak vhodnější umístit na stěnu pod okno blíže středu místnosti, jak je již uvedeno výše.

7 SEZNAM PŘÍLOH

Všechny přílohy jsou na přiloženém CD

- Obr. 47 Teplotní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazované stěny varianta č. 1*
- Obr. 48 Teplotní pole ve vertikálním řezu středem východní ochlazované stěny varianta č.1*
- Obr. 49 Teplotní pole ve vertikálních řezech v různých vzdálenostech od OT*
- Obr. 51 Rychlostní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazované stěny varianta č. 1*
- Obr. 52 Rychlostní pole ve vertikálním řezu středem východní ochlazované stěny varianta č. 1*
- Obr. 53 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,1 m nad podlahou varianta č. 1*
- Obr. 54 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,75 m nad podlahou varianta č. 1*
- Obr. 55 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 1,5 m nad podlahou varianta č. 1*
- Obr. 56 Teplotní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazované stěny varianta č. 2*
- Obr. 57 Teplotní pole ve vertikálním řezu středem východní ochlazované stěny varianta č. 2*
- Obr. 58 Detail teplotního pole pod oknem na východní ochlazované stěně*
- Obr. 60 Rychlostní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazované stěny varianta č. 2*
- Obr. 61 Rychlostní pole ve vertikálním řezu středem východní ochlazované stěny varianta č. 2*
- Obr. 62 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,1 m nad podlahou varianta č. 2*
- Obr. 63 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,75 m nad podlahou varianta č. 2*

- Obr. 64 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 1,5 m nad podlahou
varianta č. 2*
- Obr. 65 Teplotní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazované stěny
varianta č. 3*
- Obr. 66 Detail teplotního pole pod oknem na jižní ochlazované stěně*
- Obr. 67 Teplotní pole ve vertikálním řezu středem východní ochlazované stěny
varianta č. 3*
- Obr. 69 Rychlostní pole ve vertikálním řezu středem jižní ochlazované stěny
varianta č. 3*
- Obr. 70 Rychlostní pole ve vertikálním řezu středem východní ochlazované stěny
varianta č. 3*
- Obr. 71 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,1 m nad podlahou
varianta č. 3*
- Obr. 72 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 0,75 m nad podlahou
varianta č. 3*
- Obr. 73 Rychlostní pole v horizontálním řezu ve výšce 1,5 m nad podlahou
varianta č. 3*

Soubor Excel: Vypocty_teplotni_profily.xlsx

8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] NOVÝ, Richard a kolektiv. *Technika prostředí*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2. přep. vyd., 2006. 267 s. ISBN 80-01-03492-5.
- [2] BAŠTA, Jiří. *Otopné plochy - otopná tělesa*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2. přep. vyd., 2016. 206 s. ISBN 978-80-01-05943-2.
- [3] BARTÁK, Martin. *Úvod do přenosových jevů pro inteligentní budovy*. ČVUT Praha, 2010. 107 s.
- [4] DRKAL, František, ZMRHAL, Vladimír. *Větrání*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 1. vydání, 2015. 157s.
- [5] BEROUNSKÝ, V. *Vyšetření vlivu otopných těles na tepelnou pohodu ve vytápěném prostředí*. Praha: SVÚTT, 1963. ISBN 06-13-63
- [6] RALČUK, N, T. *Panelnoje otoplenije zdaniy*. Budibelnik - Kijev, 1964.
- [7] Renson, *Start, Downloads, Documentation* [online]. [cit. 13. 4. 2018], dostupné z: http://dam.renson.eu/Sites/A/Public_Publications/106?encoding=UTF-8
- [8] Oknamontplast, *Geniální klapka Gecco* [online]. [cit. 13. 4. 2018], dostupné z: http://www.oknamontplast.cz/public/default/userfiles/file/7_2-Vetraci-klapky-GECCO.pdf
- [9] ZÁCHA, Pavel. *Fluent přednáška 2* [online]. [cit. 21. 4. 2018], dostupné z: [http://energetika.cvut.cz/files/FLUENT%20-%20prednaska%20%20Zacha%20\(LS%202014\).pdf](http://energetika.cvut.cz/files/FLUENT%20-%20prednaska%20%20Zacha%20(LS%202014).pdf)
- [10] ANSYS, *Fluent Theory Guide*. Release 19.0, Inc. and ANSYS Europe, January 2018. 848 s.
- [11] BATCHELOR, G, K. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1967. 615 s. ISBN 0521663962
- [12] BAKKER, André. *Applied computational fluid dynamics, Lecture 7 - Meshing* [online]. [cit. 1. 5. 2018], dostupné z: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/07-mesh.pdf>
- [13] FÜRST, Jiří. *Počítačová mechanika tekutin, Kap. 4 - Tvorba sítí* [online]. [cit. 1. 5. 2018], dostupné z: <http://marian.fsik.cvut.cz/~furst/PMT/pmtch4.xml#x6-180004>
- [14] ANSYS, *Introduction to ANSYS Fluent Meshing*. Release 17.0, Inc. ANSYS June 2016.

- [15] ZÁCHA, Pavel. *Fluent přednáška 1c* [online]. [cit. 1. 5. 2018], dostupné z: [http://energetika.cvut.cz/files/FLUENT%20-%20prednaska%201c%20Zacha%20\(LS%202014\).pdf](http://energetika.cvut.cz/files/FLUENT%20-%20prednaska%201c%20Zacha%20(LS%202014).pdf)
- [16] BARTÁK, Martin. *Reynoldsův popis turbulence* [online]. [cit. 7. 5. 2018], dostupné z: https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12116/2161083/Reynoldsuv_popis_turbulence_v2.pdf
- [17] BARTÁK, Martin. *Charakteristiky turbulence* [online]. [cit. 11. 5. 2018], dostupné z: https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12116/2161083/Charakteristiky_turbulence_v2.pdf
- [18] BAŠTA, Jiří, POSPÍŠILOVÁ, Vendula, SCHWARZER, Jan. *Vytápěný prostor a varianty návrhu otopných těles*. VVI, 2009, ročník 18, č. 3, s. 109-114. ISSN 1210-1389
- [19] POSPÍŠILOVÁ, Vendula. *Vliv umístění otopných těles ve vytápěném prostoru na teplotní a proudové pole*. Praha, ČVUT, 2008. DP, 64 s.
- [20] IQBAL, Ahsan, NIELSEN, Peter V., AFSHARI, Alireza, HEISELBERG, Peter. *Numerical predictions of the discharge coefficient of a window with moveable flap*. Researgate. [online]. 20. 5. 2014. [cit. 26. 8. 2018], dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/229175945_Numerical_predictions_of_the_discharge_coefficient_of_a_window_with_moveable_flap
- [21] WHITE, Frank, M. *Fluid Mechanics*. Boston, 4th edition, Mass.: WCB/McGraw-Hill, 1999. 826 s. ISBN 978-007069-7164.
- [22] Sharcnet, *Software, ANSYS, 17.0, Quality Measure* [online]. [cit. 21. 5. 2018], dostupné z: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/tgd_usr/tgd_user_report_qualitymeasure.html
- [23] KORADO, *Ke stažení, Ceník - desková otopná tělesa RADIK včetně příslušenství* [online]. [cit. 6. 6. 2018], dostupné z: <https://www.korado.cz/common/downloads/cenik-deskova-otopna-telesa-radik-vcetne-prislusenstvi-1520421817.pdf>

ČSN EN ISO 7726. *Ergonomie tepelného prostředí - Přístroje pro měření fyzikálních veličin*. Praha: Český normalizační institut, 2002.

ČSN EN ISO 7730. *Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PNV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*. Praha: Český normalizační institut, 2006.

ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov, Část 2: Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.