Numerické řešení proudění vzduchu v chladicí věži s přirozeným tahem

Marek Böhm

Abstrakt
Cílem této práce je nalézt vhodný numerický model chladicí věže s přirozeným tahem. V tomto duchu je tato práce rozdělena na čtyři základní části. První je koncipována jako seznámení s problematikou chladicích věží s přirozeným tahem. Druhá část popisuje fyzikální děje, které se v chladicí věži odehrávají. Třetí část se zabývá numerickým řešením a čtvrtou částí je rozbor dosažených výsledků.

Klíčová slova
Chladicí věž, bilance hybnosti, hustota, numerické řešení, Fluent

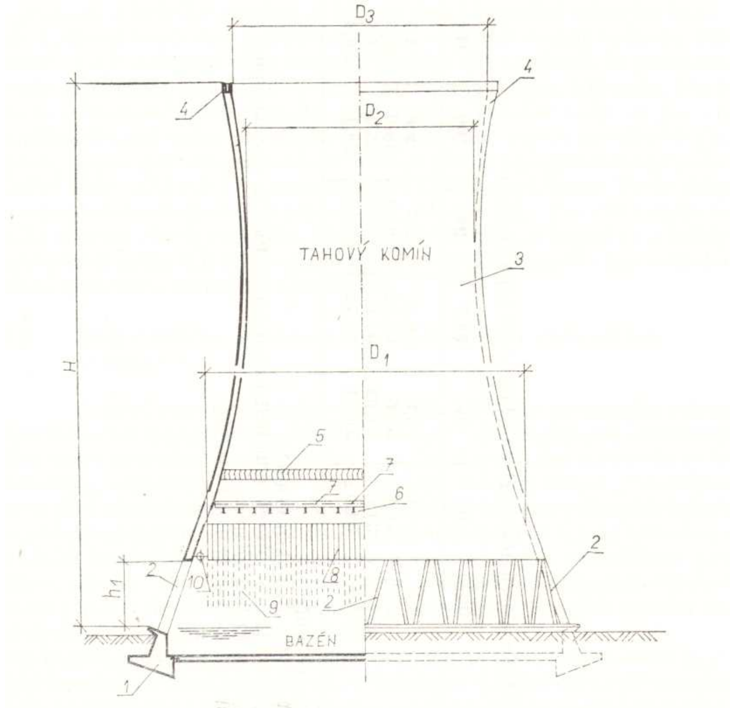
1. **Úvod do problematiky chladicích věží s přirozeným tahem**

Obr.1. *Chladicí věž s přirozeným tahem typu Itterson*

Na rozdíl od ventilátorových chladicích věží kde je tah vyvolán působením ventilátoru, u chladicích věží s přirozeným tahem je tah vyvolán komínovým efektem a to tak, že při předání tepla ochlazované vody chladicímu vzduchu dojde ke zvýšení jeho teploty a tím k poklesu hustoty. To zapříčiní rozdíl hustot vzduchu uvnitř a vně věže a vede ke vzniku tlakového spádu. Při dostatečné výšce tahového komína snaha o vyrovnání tlaků na výstupu z věže zapříčiní proudění vzduchu věží.

Tahový komín je tvořen tenkostěnnou skořepinou proměnlivé tloušťky. Konstrukční řešení tahových komínů odpovídá době, ve které vznikly. První věže byly tvořeny dřevěnou konstrukcí (19.stol.). Do konce padesátých let minulého století se vyráběly věže ocelové konstrukce s opláštěním. Nejmodernější způsob a v současné době téměř výlučně používaný je železobetonový skelet. Tahový komín je řešen jako tenkostěnný rotační útvar posazený na soustavě sloupů, která umožňuje vstup chladicího vzduchu do komína. Současné železobetonové tahové komíny (typ Itterson) mají tvar rotačního hyperboloidu s běžnou stavební výškou 22 až 155 metrů, přičemž nejvyšší chladicí věž na světě v německém Niederaussemu dosahuje výšky 200 m.

Schéma chladicí věže s přirozeným tahem je znázorněno na ***obr.2***. Chladicí voda se po ohřátí čerpadly vytáhne do optimální výšky věže. Ta musí být zároveň co nejmenší, aby čerpadla neměla příliš vysokou spotřebu energie, zároveň dostatečná pro úspěšný chladicí proces. V této části věže je voda rozvedena soustavou kanálů a tryskami rozstříknuta do prostoru věže. Pod tryskami se nachází chladicí výplň, která je zásadní pro přestup tepla z ochlazované vody na vzduch proudící věží. Jedná se o patrovou soustavu desek a mříží, které rozvádí vodu tak, aby co nejlépe předávala teplo vzduchu. Dříve se tyto výplně dělaly z azbestocementových desek, dnes jsou tvořeny převážně z umělých hmot. Pod výplní ochlazená voda již ve formě kapek padá do záchytného bazénu na dně věže, odkud putuje opět zpátky do chladicího oběhu. Chladicí vzduch, který proudí proti směru rozstříknuté vody (dle známé klasifikace je tedy chladicí věž protiproudým směšovacím výměníkem) je nasáván mezerami mezi šikmými sloupy u paty věže. Poté prochází chladicí výplní, kde přijímá teplo od ochlazované vody. Protože chladicí vzduch není pouze směsí vzduchu a vodní páry, ale díky tahu sebou unáší přímo malé kapičky vody, je v prostoru nad tryskami umístěna eliminátorová mříž. Eliminátorová mříž je tvořena zahnutými plastovými listy. Vzduch při průchodu mříží je nucen změnit svůj směr, což vede k tomu, že malé kapičky vody obsažené ve vzduchu se zachytí na stěnách eliminátoru. Na stěnách eliminátoru se kapičky spojí ve větší kapky, které jsou již schopné vlastní vahou překonat tah věže a dopadnout zpět do chladicí výplně. Tvar eliminátorů je ovšem potřeba pečlivě navrhnout, protože při větším zakřivení roste jejich aerodynamický



Obr.2.[1] *Schéma chladicí věže s přirozeným tahem typ Itterson: 1-základy skořepiny, 2-šikmé stojky, 3- železobetonová skořepina tahového komína, 4-koruna chladicí věže, 5-eliminátory, 6-trysky, 7-rozvod vody, 8-chladicí systém, 9-kapková část, H-celková výška tahového komína,* h_1*-výška vstupních oken*

odpor a snižují tah věže. Důvody proč je nežádoucí, aby kapičky vody opouštěly věž, jsou v podstatě dva. První je ten, že kapičky vyletující z věže dopadají v okolí věže, což může zejména v elektrárenských provozech vést k havárii či zničení zařízení, přičemž v zimě kapky zamrzají a na zařízeních, například drátech vysokého napětí se tvoří ledová krusta, což je velice nebezpečné. Druhým důvodem je, že odletující kapky zvyšují množství vody, která opustí věž a nevrátí se zpátky do chladicího cyklu. V současné době u moderních chladicích věží je množství vody, která opouští věž asi 2 až 3 procenta celkového průtoku věží. I když je toto číslo relativně malé u velkých věží to může být i několik m^3/s. To způsobuje zaprvé ekonomické ztráty, protože voda, která je určena pro chladicí systém je pracně čištěna a je žádoucí ji v chladicím okruhu udržet co nejdéle. Zadruhé spotřeba vody věží je natolik velká, že věže musí být umístěny u poměrně velkého vodního toku, což není vždy možné. Například Vltava, která napájí Temelínskou jadernou elektrárnu má v její blízkosti průměrný průtok 30 m^3/s, přičemž v horkých letních měsících se může průtok několikanásobně snížit. Temelínská elektrárna odebírá v průměru necelé $2 m^3/s$ a v případě dostavby elektrárny by se odebírané množství vody ještě zdvojnásobilo. To už má zásadní vliv na vodní hospodářství i takového toku jakým je Vltava.

---

[1] Viz Mikyška, Šebek s. 93

2. Fyzikální popis dějů v chladicí věži s přirozeným tahem

2.1 Rovnice bilance hybnosti chladicí věže

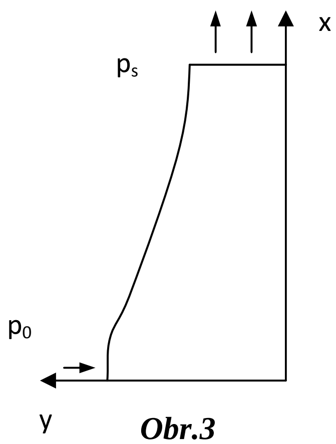
Při fyzikálním popisu průtoku vzduchu chladicí věží vycházíme ze dvou základních rovnic mechaniky tekutin a to z rovnice kontinuity

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2.1.1}$$

a Navier- stokesovy rovnice pro dvourozměrné proudění

$$\frac{\rho \partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho v_i v_j\right)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\eta \frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right] + \rho f_i \tag{2.1.2}$$

Přestože to není zvykem, je nutné volit osu x jako svislou a to z toho důvodu, že program Fluent neumožňuje označit rotačně symetrickou osu jinak než x (*viz* ***obr.4***). Takto tedy můžeme definovat funkci f_i v gravitačním poli Země



$$f_y = 0$$

$$f_x = -g$$

Obr.3

Z hydrostatiky získáme vztah pro změnu tlaku vzduchu podle nadmořské výšky

$$\frac{\partial p_\infty}{\partial x} = -\rho_\infty(x) g \tag{2.1.3}$$

Zavedeme celkový tlak ve věži

$$p = p_\infty + p' \tag{2.1.4}$$

kde p_∞ je tlak vzduchu vně věže měnící se s nadmořskou výškou a p' je tlak vyvolaný fyzikálními pochody ve věži. Nyní můžeme z (2.1.3) a (2.1.4) dosadit do (2.1.2) a získáme rovnici bilance hybnosti chladicí věže

$$\begin{aligned} &\frac{\partial\left(\rho_\infty(x_o) v_y\right)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho_\infty(x_0) v_x v_y\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\rho_\infty(x_0) v_y^2\right)}{\partial y} \\ &\quad = \frac{\partial}{\partial x}\left[\eta \frac{\partial v_y}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\eta \frac{\partial v_y}{\partial y}\right] - \frac{\partial p'}{\partial x} + \left(\rho_\infty(x) - \rho(x)\right) g \end{aligned} \tag{2.1.5}$$

Člen $\big(\rho_\infty(x) - \rho(x)\big)g$, kde $\rho_\infty(x)$ představuje hustotu vzduchu vně věže a $\rho(x)$ hustotu vzduchu uvnitř věže, představuje zdroj hybnosti. Pokud bude hustota vzduchu vně věže stejná jako uvnitř, nevznikne rozdíl hustot, který by inicioval tah věže, a věž zůstane nečinná. Zdrojový člen bude v tomto případě roven nule. Pokud vlivem ohřátí vzduchu uvnitř věže klesne jeho hustota, rozdíl hustot začne nabývat kladných hodnot a v praxi se to projeví vznikem tahu věže. Zdrojový člen pak nabývá kladných hodnot.

2.2 Výpočet $\boldsymbol{\rho_\infty(x)}$ pro suchý vzduch

Výpočet hustoty vzduchu v atmosféře v závislosti na nadmořské výšce je velmi dobře popsán v [3][2] :

Přestože atmosférický vzduch se ve skutečnosti skládá z mnoha plynů (kyslík, dusík, vodní pára, oxid uhličitý, vodík, helium, vzácné plyny atd.), základní vlastnosti těchto plynů se ovšem s nadmořskou výškou mění tak málo, že mohu vzduch považovat za homogenní plyn.

Uvažujme elementární objem vzduchu, který se může pohybovat nahoru a dolů v atmosférickém tlakovém poli. Pokud je tento proces adiabatický, tzn. žádné teplo není odebráno nebo přivedeno do elementárního objemu vedením nebo zářením, můžeme vyjádřit změnu teploty elementu v závislosti na změně tlaku.

Tlakový gradient v gravitačním poli Země je dán vztahem (2.1.3)
Pro isoentropický proces platí

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = konst. \qquad (2.2.1)$$

Hustotu vzduchu můžeme vyjádřit pomocí stavové rovnice ideálního plynu

$$\rho = \frac{p}{RT} \qquad (2.2.2)$$

Dosadíme rovnici (2.2.2) do rovnice (2.2.1) a výsledný výraz derivujeme podle nadmořské výšky

$$\frac{(1-\gamma)}{\gamma p}\frac{dp}{dx} + \frac{1}{T}\frac{dT}{dx} = 0 \qquad (2.2.3)$$

Kombinací rovnic (2.1.3), (2.2.2) a (2.2.3) můžeme vyjádřit teplotní gradient takto

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{g(\gamma-1)}{\gamma R} \qquad (2.2.4)$$

Gravitační zrychlení není konstantou, ale je funkcí jak zeměpisné šířky (Země není dokonale kulatá) tak nadmořské výšky (slábnoucí gravitační pole Země). Ovšem pro potřeby výpočtu chladicí věže jsou tyto změny natolik nepatrné, že můžeme s gravitačním zrychlením počítat jako s konstantou.
Pro suchý vzduch dosadíme li do (2.2.4) $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1{,}4;\ R = 287{,}08\frac{J}{kgK};\ g = 9{,}8\frac{m}{s^2}$

---

[2] Viz Kröger Vol.1 s. 246-248

získáme teplotní gradient

$$\frac{dT}{dx} = -\,0{,}00975\,\frac{K}{m} \tag{2.2.5}$$

Tento teplotní gradient je znám jako DALR (dry adiabatic lapse rate) a není jediným, který existuje. Například standardní atmosféra je definovaná teplotním gradientem $\frac{dT}{dx} = -\,0{,}0065\,\frac{K}{m}$

Po integraci rovnice (2.2.4) získáme vztah

$$T = T_1 - g(\gamma - 1)\,\frac{x}{\gamma R} \tag{2.2.6}$$

kde T_1 je teplota pro $x = 0$

Pro suchý vzduch se rovnice (2.2.6) zredukuje na

$$T = T_1 - 0{,}00975x \tag{2.2.7}$$

Z rovnic (2.1.3) a (2.2.2) můžeme získat diferenciální rovnici

$$\frac{dp}{p} = -\frac{gdx}{RT} \tag{2.2.8}$$

Po dosazení (2.2.6) do (2.2.8) a integraci podle nadmořské výšky získáme vztah pro tlak

$$p = p_1\left[1 - g(\gamma - 1)\,\frac{x}{\gamma R T_1}\right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \tag{2.2.9}$$

Dosadíme li konstanty pro suchý vzduch, získáme vztah pro tlak v závislosti na nadmořské výšce

$$p = p_1\left(1 - 0{,}00975\,\frac{x}{T_1}\right)^{3{,}5} \tag{2.2.10}$$

Nyní dosadíme li do (2.2.2) vztahy (2.2.7) a (2.2.10) získáme požadovanou závislost hustoty vzduchu na nadmořské výšce

$$\rho_\infty(x) = \frac{p_1\left(1 - 0{,}00975\,\frac{x}{T_1}\right)^{3{,}5}}{R(T_1 - 0{,}00975x)} \tag{2.2.11}$$

3. Numerický výpočet proudění v chladicí věži

3.1 Tvorba geometrie chladicí věže a sítě

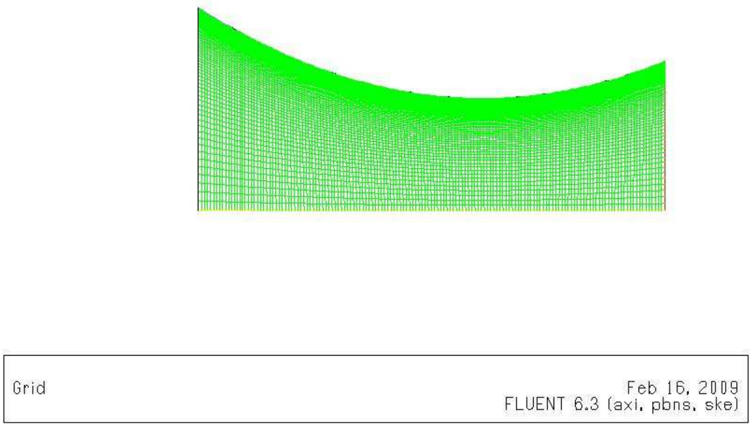
Geometrii a síť pro numerické řešení jsem vytvořil v programu gambit 24. Co se geometrie týče je chladicí věž velmi jednoduchá. Tvarově se jedná o rotační hyperboloid. Takže známe li rovnici hyperboly hlavního meridiánu, není problém do ní dosadit dostatečně hustě body a ty poté propojit spline křivkou. Tím dostaneme dostatečně přesný geometrický obrys. Pro potřeby této práce mi byla zadána věž s těmito parametry:

Rovnice popisující průměr věže v závislosti na výšce

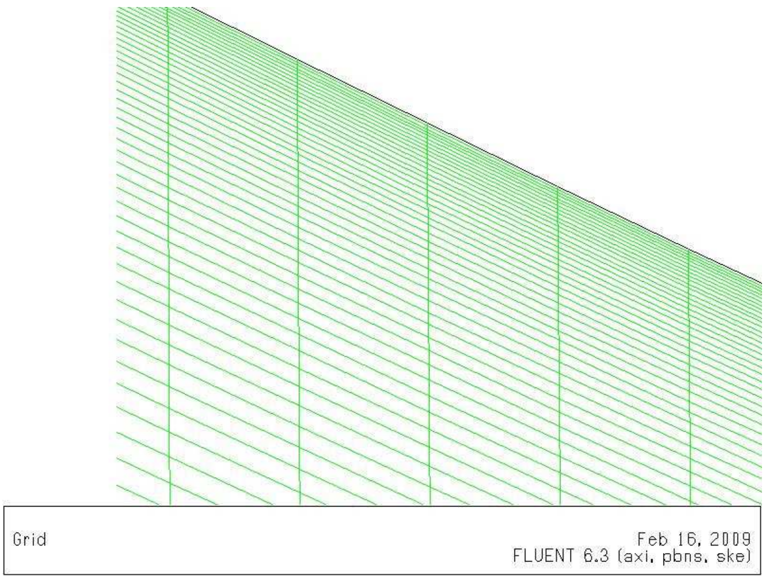
$$d(x) = 0{,}006977x^2 - 1{,}2764x + 130{,}61 \qquad (3.1.1)$$

Věž je vysoká 150 m a z rovnice (3.1.1) plyne, že šířka věže u paty činí 130,61m. Chladicí výplň se nachází mezi výškami 10,7 a 12,5 m. Rozvod vody je pak ve výšce 14m a eliminátory ve výšce 17m

Díky rotační symetričnosti věže stačí síť vytvořit pouze ve 2D a to pouze v polovičním průřezu (***Obr.4.***), tedy řešit 2D úlohu a následně ji rotovat okolo osy symetrie. Síť má kvadratickou strukturu a je zahuštěná při okrajích a směrem do středu hrubne (***Obr.5***.). Pro počáteční výpočty nepotřebuji příliš jemnou síť. Síť, kterou jsem zvolil má 15 100 buněk, což zajišťuje relativně krátký čas výpočtu.



Obr.4. *Síť vytvořená na polovičním 2d průřezu věže*



Obr.5. *Detailní výřez části sítě*

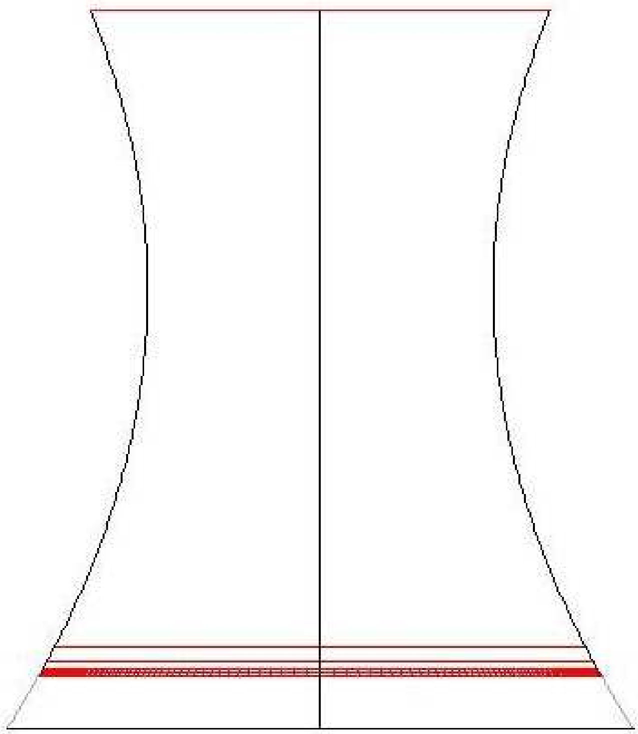
3.2 Základní myšlenka numerického řešení

Numerické řešení proudění v chladicí věži v sobě skrývá jednu ošemetnost. Základní vlastnost, která umožňuje funkci chl. věže je stlačitelnost tekutiny. V programu Fluent sice lze řešit proudění stlačitelné tekutiny, ovšem s rozumným výsledkem můžeme počítat pouze u proudění za vysokých rychlostí, kdy je stlačitelnost tekutiny značně vysoká. Při proudění za nižších rychlostí je teoreticky možné také hledat řešení, ovšem řešič pro to není uzpůsoben a musely by se hledat různé matematické metody např. předpodmínění matic apod. jak se dostat k rozumnému řešení. Vzhledem k tomu, že velikost stlačitelnosti tekutiny v chladicí věži je zcela zanedbatelná je zřejmé, že vydání se touto cestou by vedlo na velice složité řešení, které by těžko vedlo k přijatelnému výsledku. Pokusme se tedy zvolit jinou cestu a to řešit úlohu jako proudění nestlačitelné tekutiny. Problém se změnou hustoty je možné obejít tak, že nebudeme do numerického řešení dosazovat příčinu tedy změnu hustoty, ale již důsledek změny hustoty a to zdroj hybnosti. Aby proudění ve věži odpovídalo realitě, je nutné zdroj hybnosti naprogramovat jako UDF (uživatelsky definovano funkci), která bude na základě vstupních dat (tlak ovzduší apod.) počítat rozdíl hustot v daném místě věže(viz kapitola 3) a na základě toho se v daném místě projeví jako zdroj hybnosti. Na to že je možné takto postupovat ukazuje i následující jednoduchá kontrola fyzikálních jednotek :

V rovnici (2.1.5) popisující bilanci hybnosti chladicí věže je vznik proudění ve věži dán zdrojovým členem $\big(\rho_\infty(x) - \rho(x)\big)g$, kde rozměr tohoto členu je $\frac{kg}{m^2 s^2}$.

Zdroj hybnosti je ve Fluentu definován jakožto objemová síla, tedy síla působící na jednotku objemu s rozměrem $\frac{N}{m^3} = \frac{kgm}{m^3 s^2} = \frac{kg}{m^2 s^2}$ což jednotkově odpovídá zdrojovému členu z rovnice (2.1.5)

Celkové řešení by tedy mělo vypadat tak, že geometrie chladicí věže bude rozdělena na jednotlivé zóny(*viz* ***Obr.6.***), které budou představovat jednotlivé části věže(např. eliminátory, chladicí výplň apod.). Těmto zónám se tedy podle jejich funkce přiřadí buď zdroj hybnosti dochází li zde k poklesu hustoty nebo odporový koeficient pokud tato část věže proudění naopak brzdí.



Obr.6. *Rozdělení chladicí věže na jednotlivé zóny*

3.3 Vlastní numerický výpočet

Byly provedeny dva zkušební výpočty, které mají ověřit reálnost takovéto struktury modelu.

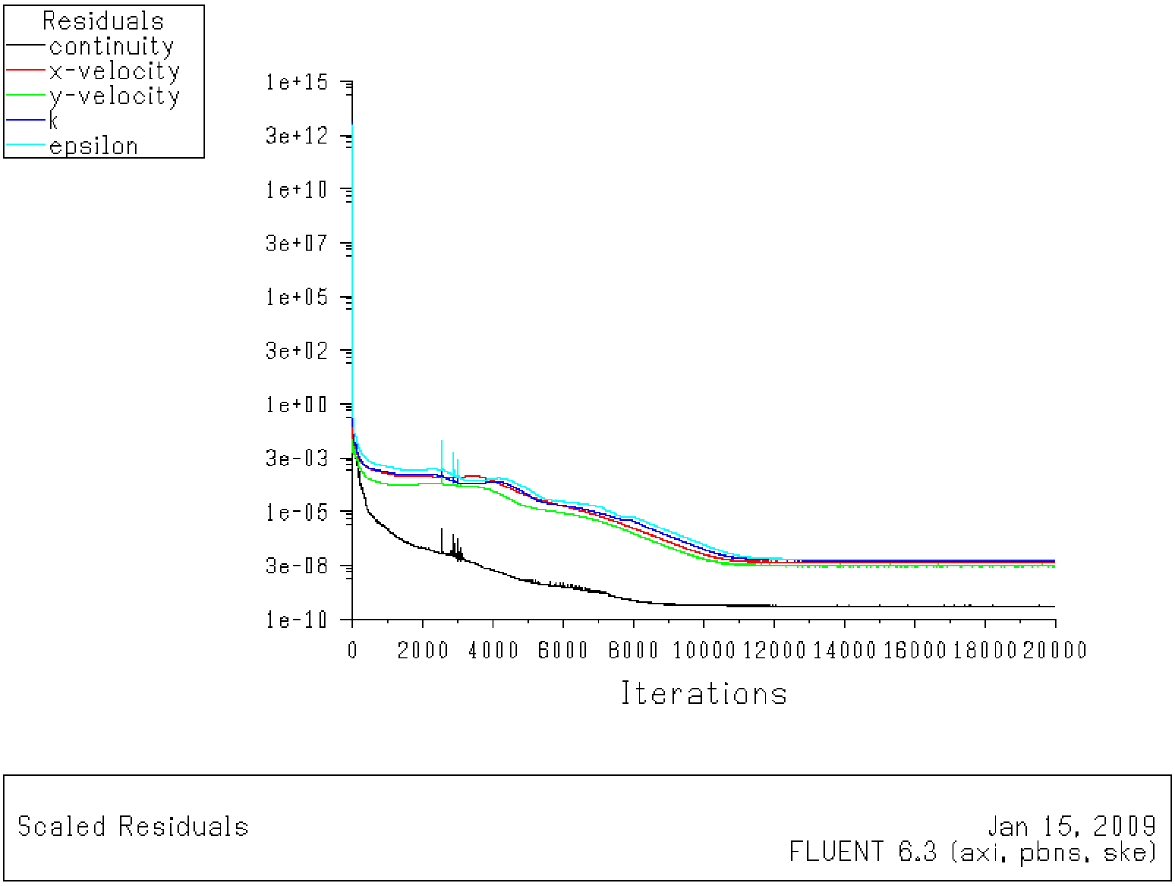
V obou případech uvažujme stacionární nestlačitelnou tekutinu. Řešení je prováděno ve 2d, ovšem osově symetricky, tzn. že výsledky jsou ve 3d. Proudění uvažujme turbulentní a pro řešení zvolme standardní k-ε model turbulence s intenzitou 5% a délkovým měřítkem 10,7m, což odpovídá výšce vstupu vzduchu do věže. Jako aproximační schéma je použit Upwind 1. řádu.

Vnitřek věže je rozdělen na jednotlivé části podle jejich funkce tak, aby v nich bylo možné měnit okrajové podmínky. Tlak v okolí věže je pro tyto výpočty stanoven jako konstantní s hodnotou 84 600 Pa. Věží proudí suchý vzduch o hustotě $1{,}225\frac{kg}{m^3}$.

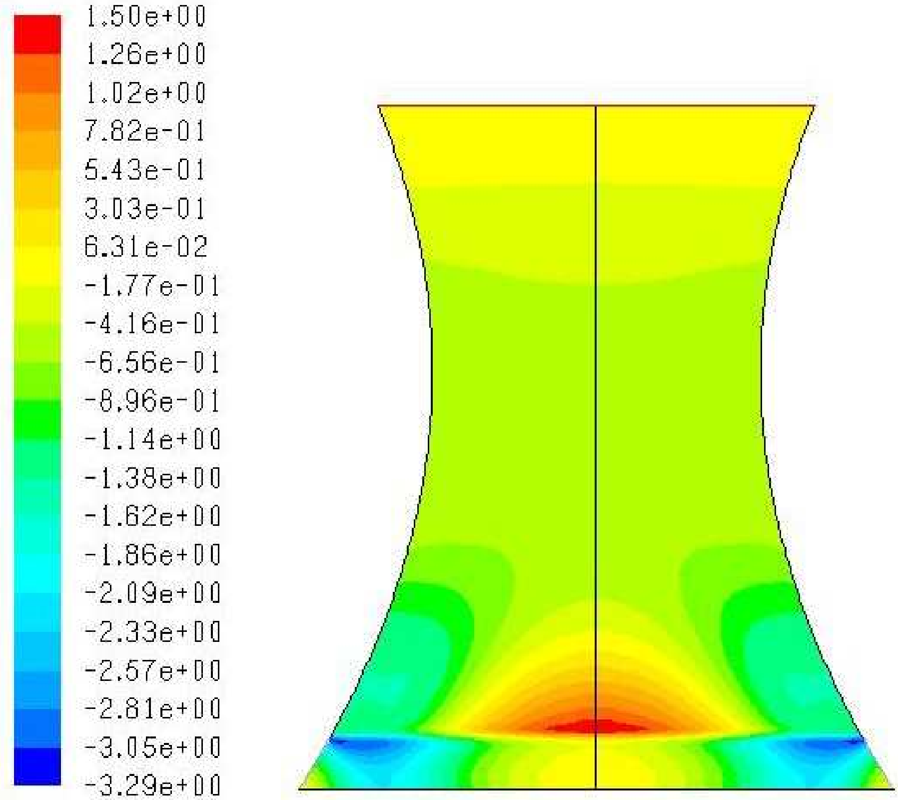
3.4 Výpočet proudění ve věži se zdrojem hybnosti

První zkušební výpočet, který byl proveden, má za úkol zjistit jak bude reagovat věž na zdroj hybnosti. Za tímto účelem byl tedy v prostoru, který charakterizuje chladicí výplň, aktivován zdroj hybnosti a to v první fázi ne jako UDF, ale pouze jako konstanta o hodnotě $1\frac{N}{m^3}$. Na **O*br.7.*** vidíme průběh residua, které nám ukazuje, že výpočet konverguje. Na **O*br.8***. vidíme průběh statického tlaku, kde je zřejmý tlakový spád. ***Obr. 9.,10.*** ukazují rychlost vzduchu při průtoku věží. Dalším důležitým výsledkem je níže uvedené množství vzduchu, které vstupuje do věže a množství vzduchu které z ní vystupuje.

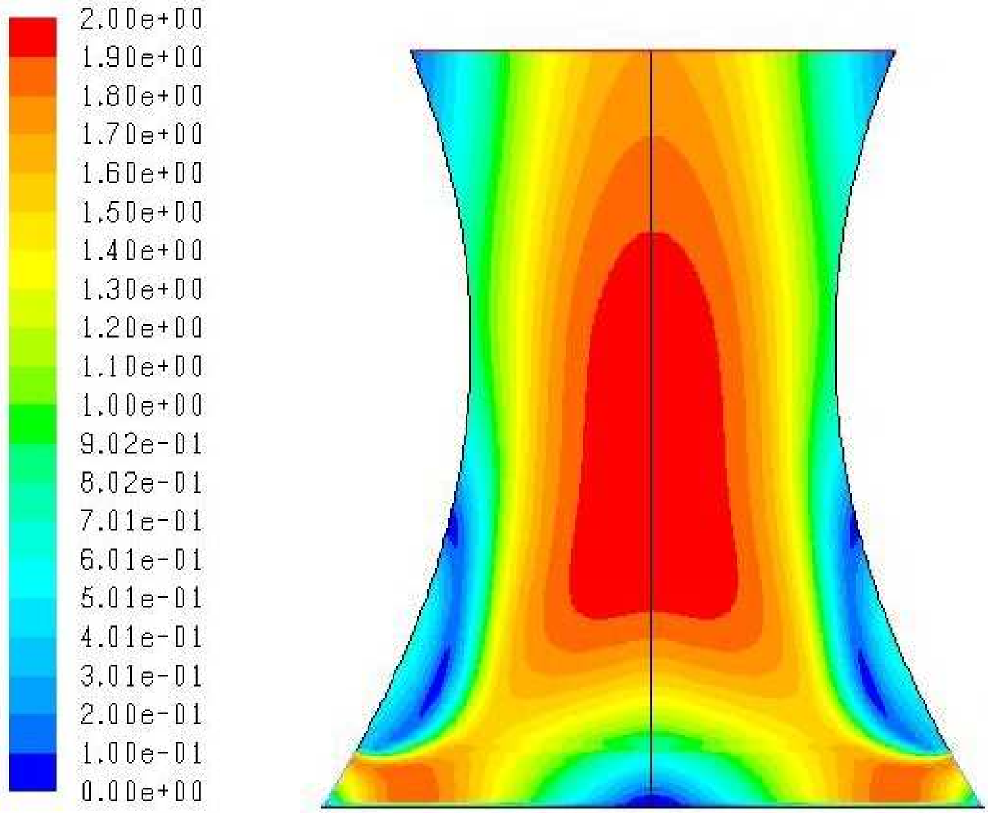
Mass Flow Rate	(kg/s)
air_inlet	7153.8599
vystup	-7153.8608
Net	-0.0009765625



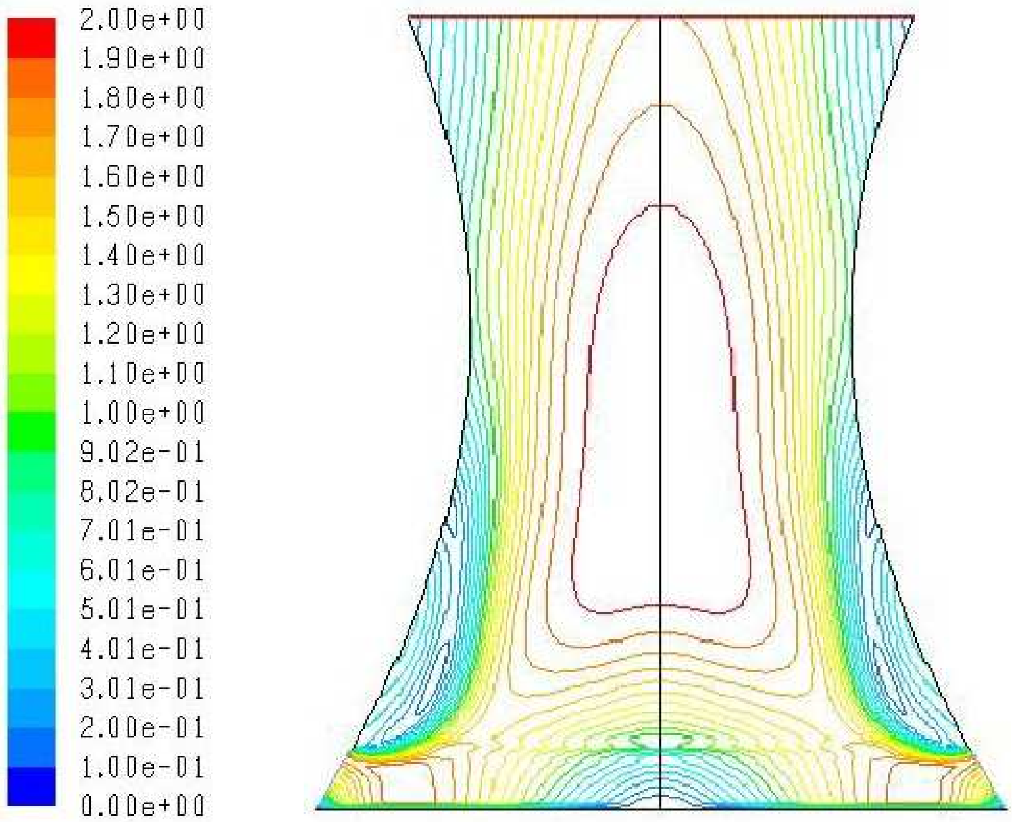
Obr.7. *Průběh residua při konvergenci*



Obr. 8. *Průběh statického tlaku.*



Obr.9. *Průběh rychlostí*

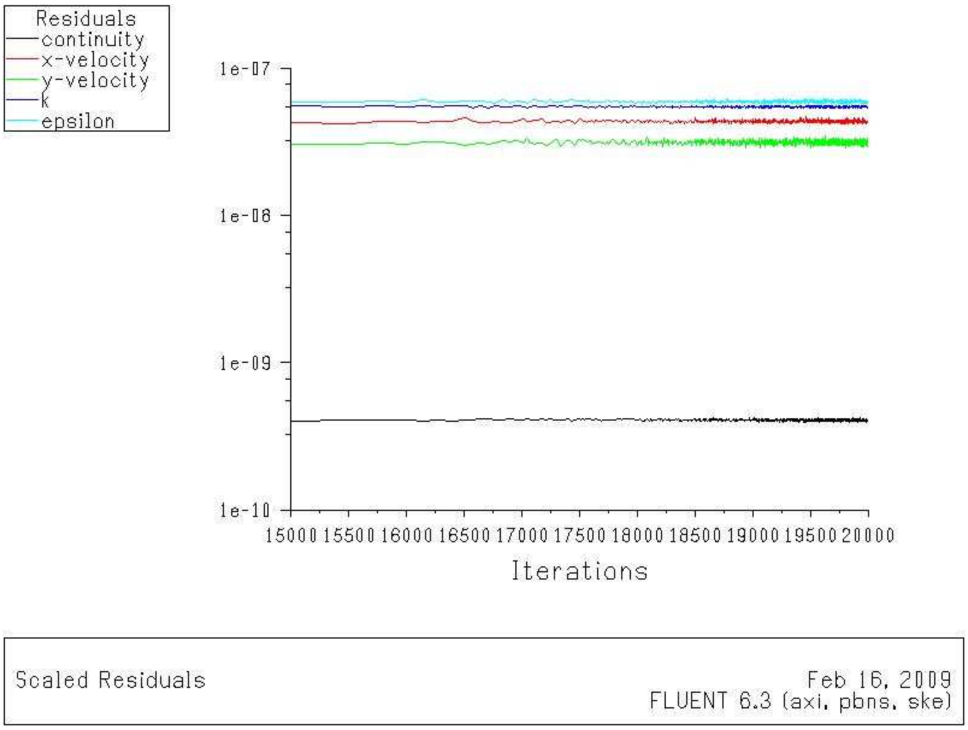


Obr.10. *Průběh rychlostí znázorněn izočarami*

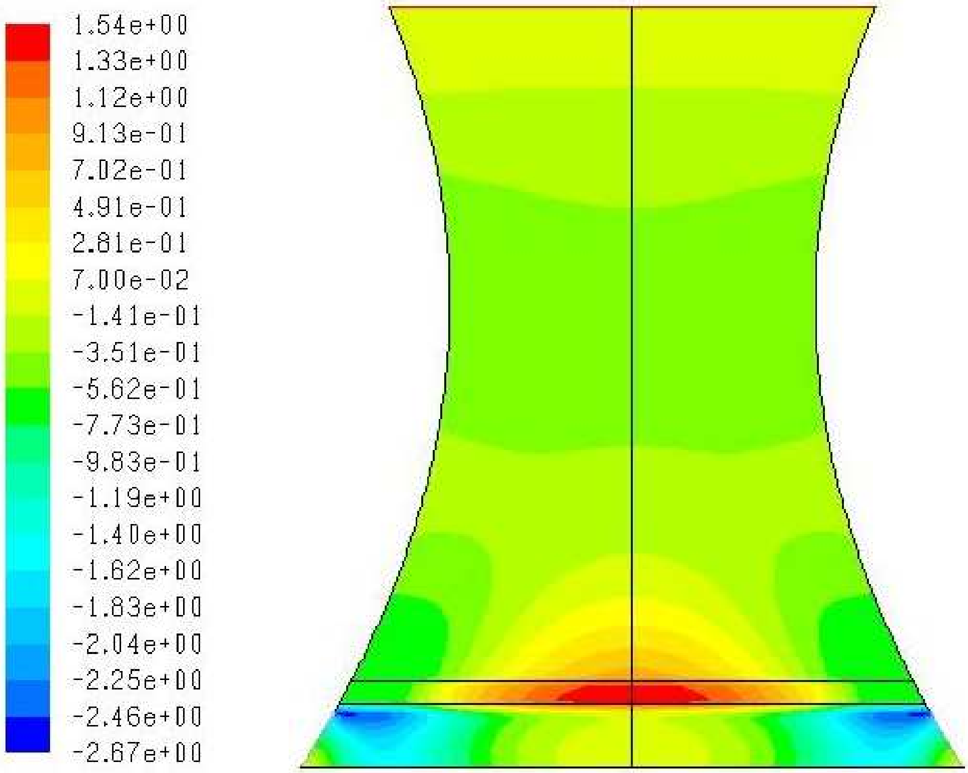
3.4 Výpočet proudění ve věži se zdrojem hybnosti a s přidanými odpory

Druhý z výpočtů má oproti prvnímu ještě přidané odporové koeficienty. Plocha charakterizující eliminátory má konstantní odporový koeficient 1 a horní hrana výplně 0,1. Na **O*br. 12.,13.*** vidíme, že při zavedení odporů se snížil tlakový spád ve věži a proudění věží se viditelně zpomalilo. To dokládá i níže uvedený výpis průtokového množství, které oproti prvnímu příkladu znatelně pokleslo.

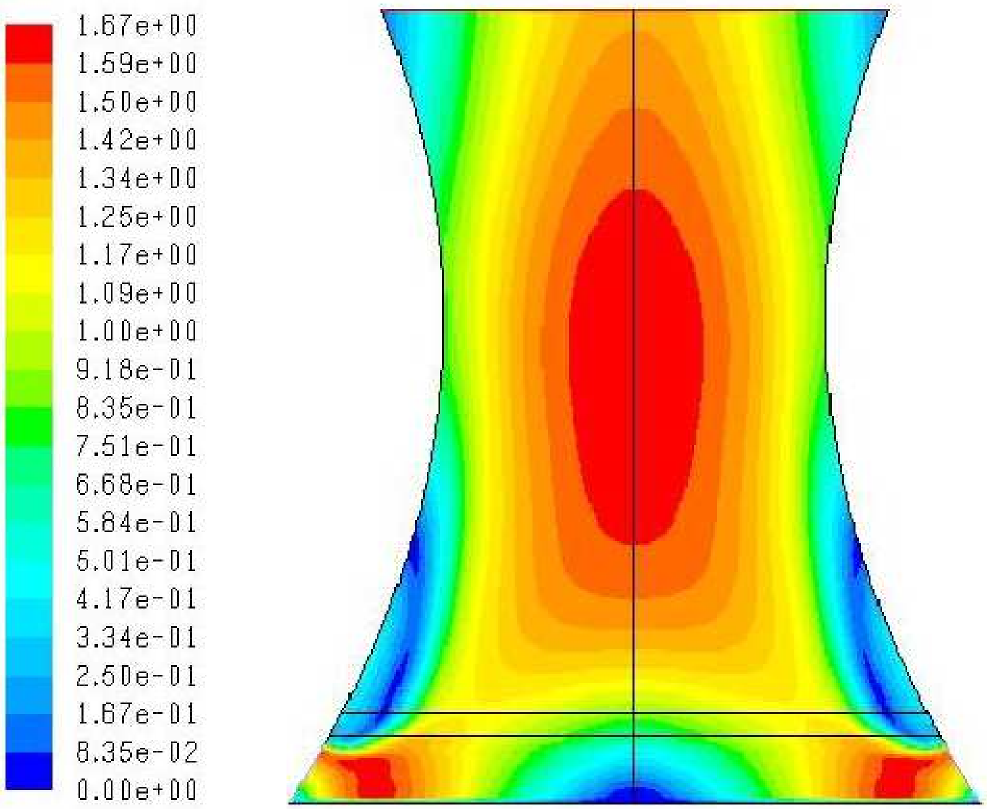
```
              Mass Flow Rate            (kg/s)
-------------------------------- --------------------
                   air_inlet         6378.4873
                      vystup        -6378.4868
            ---------------- --------------------
                         Net      0.00048828125
```



Obr.11. *Průběh residua při konvergenci př.2*



Obr.12. *Průběh statického tlaku př.2*



Obr.13. *Průběh rychlostí př.2*

4. Rozbor dosažených výsledků

Podle očekávání se podařilo ukázat, že při aktivaci zdroje hybnosti vznikne tlakový spád a ve věži vznikne tah, což dokládají (***Obr. 8.,9.)***. Dalším důležitým poznatkem, který ukazuje na reálné chování modelu je, že při zařazení ztrátových koeficientů do věže se sníží tlakový spád, sníží se rychlost proudění věží a sníží se také celkový průtok vzduchu věží. Rovněž je podstatné, že se téměř rovná množství vzduchu, které do věže vstupuje a vystupuje. Nepřesnost se zde objevuje až na 4. desetinném místě, což je zanedbatelné. Je to nepřesnost v řádu desetin gramu při průtoku věží v řádu jednotek tun za sekundu. Všechny výše uvedené závěry tedy ukazují na to, že by výše uvedený systém mohl být použit pro modelování proudění vzduchu v chladicích věžích.

Seznam použitých symbolů

- c $(Jkg^{-1}K^{-1})$ měrná tepelná kapacita
- d (m) průměr
- f funkce
- g (ms^{-2}) tíhové zrychlení
- p (Pa) tlak
- R $(Jkmol^{-1}K^{-1})$ univerzální plynová konstanta
- t (s) čas
- T (K) termodynamická teplota
- v (ms^{-1}) rychlost proudění
- x, y (m, m) kartézské souřadnice
- γ (1) Poissonův poměr
- η (Pas) dynamická viskozita
- ρ (kgm^{-3}) hustota

Indexy

- i, j výčtové indexy
- 0 v základní hladině
- s statický
- ∞ atmosférický
- p při stálém tlaku
- v při stálém objemu

Seznam použité literatury

[1] Dvořák R., Kozel K.: *Matematické modelování v aerodynamice*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996
[2] Nožička J.: *Mechanika tekutin*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004
[3] Kröger D.G.: *Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers*, Vol. 1 a 2, PenWell Corporation, Tulsa, 2004
[4] Hill G. B., Pring E. J., Osborn P. D.: *Cooling Towers Principles and Practice*, Butterworth-Heinemann, London, 1990
[5] Zemánek J.: *Heat and Mass Tansfer in Cooling Tower Packings*, SNTL, Praha, 1989
[6] Mikyška L., Šebek J.:*Chladicí věže provoz a údržba*, SNTL, Praha, 1989
[7] Manuály pro užití komerčního programu Fluent