

Studentská tvůrčí činnost 2009

3D modelování vírových struktur v rozváděcí turbínové lopatkové mříži

David Jícha

Vedoucí práce : Prof.Ing.P.Šafařík,CSc. a Ing.D.Šimurda

3D modelování vírových struktur v rozváděcí turbínové lopatkové mříži

David Jícha

Abstrakt

V práci bylo pomocí komerčního programu Fluent numericky vyřešeno proudění v rozváděcí turbínové lopatkové mříži. Ve vyřešeném proudovém poli byly analyzované vírové struktury a vypočten nárůst ztrát, vzniklých v důsledku vírových struktur.

Klíčová slova

Lopatková mříž, vírové struktury, CFD.

1. Úvod

Představa o vírech se zpravidla opírá o pozorování ustáleného proudění v pevné souřadné soustavě. Převážná část proudových polí je více či méně nerovnoměrná, a to jak v místě, tak i v čase. To platí nejen pro vnitřní aerodynamiku, ale též pro proudění v atmosférické mezní vrstvě a při obtékání objektů. V takových proudových polích jsou popis i analytické řešení náročné, proto je řešíme numericky.

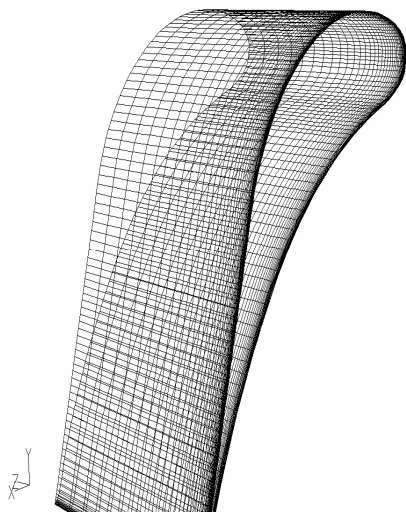
Bohužel, většina vírů, jak v přírodě, tak i v technice, není přímo viditelná, popřípadě zviditelnitelná, což značně ztěžuje jejich identifikaci a interpretaci experimentálních výsledků. Jednotlivé vírové struktury nacházející se v turbínové mříži mají vliv na ztráty mechanické energie.

2. Popis výpočtového modelu

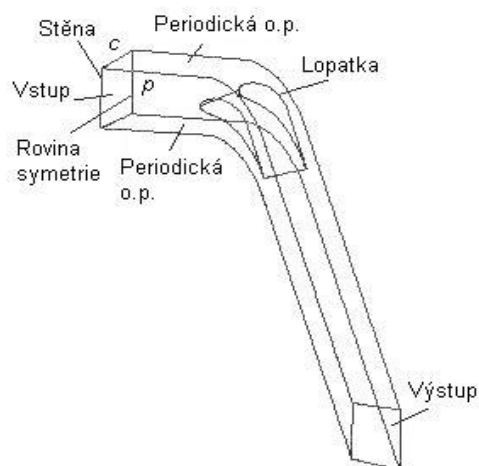
2.1 Návrh geometrie a tvorba sítě

Při tvorbě geometrického modelu lopatkové mříže je využíváno komerčního programu Gambit. Geometrie je určena parametry, kterými jsou vstupní a výstupní úhel mříže, rozteč profilů a tloušťka profilu. Všeobecně je proces tvorby sítě poměrně časově náročný. Díky jednoduchosti geometrie bylo možné použít strukturovanou síť, (Obr. 1). Výpočet provedený na strukturované síti je méně náročný a dosažené výsledky jsou přesnější.

Lopatková mříž je tvořena periodicky se opakujícím mezilopatkovým kanálem tvořeným profilem NT 1050. Nejdříve byl pro mříž vytvořen dvojrozměrný kanál, ze kterého se pomocí posunutí vytvořil kanál trojrozměrný. Délka tělavy byla uvažována 0,08 m, délka kanálů před a za profilem 0,08 m. Šířka kanálu je 0,08 m. Rozteč lopatek turbínové mříže je 0,04885 m [1]. Turbulence byla modelována pomocí Spalartova-Allmarasova modelu, který modeluje turbulentní proudění i při nízkých Re . Proto musí pro správné vyřešení proudového pole v blízkosti stěny první buňka sítě ležet ve vazké podvrstvě tj. $y^+ \leq 3$, kde y^+ označuje bezrozměrnou vzdálenost od stěny. Pro zachycení vlastností proudu u stěny profilu a kanálu, byla síť směrem k těmto stěnám zjemněna. Na výpočtové síti bylo dosaženo hodnoty $y_{\max}^+ = 0.9$ [2].



Obr.1: Výpočtová síť turbinové mříže



Obr.2: Geometrie kanálu turbinové mříže

2.2 Okrajové podmínky a vlastní výpočet

Pro řešení soustavy rovnic je třeba zadat okrajové podmínky (Obr. 2) [3]. Vstupní okrajovou podmínku „pressure inlet“ tvoří:

celkový tlak	97328 Pa
teplota	280 K

Na výstupu je okrajová podmínka „pressure outlet“, kterou tvoří:

statický tlak	78631 Pa.
---------------	-----------

Hodnoty tlaků na vstupu a výstupu byly získány z experimentálního výzkumu Ústavu termomechaniky Akademie věd ČR. Geometrické podmínky „symmetry“ a „periodicity“ byly zvoleny za účelem minimalizace velikosti výpočtové oblasti. Při symetrické podmínce se předpokládá nulový tok všech veličin a nulová normálová rychlost. To znamená, že normálové složky rychlosti na rovinu symetrie jsou nulové a také normálové gradienty proudových veličin jsou nulové. Proudícím médiem byl vzduch jako ideální plyn, jehož vlastnosti jsou charakterizovány dynamickou viskozitou $\eta = 1,7894 \cdot 10^{-5}$ Pa.s a měrnou tepelnou kapacitou $C_p = 1006,43$ J/kg.K. Okrajové podmínky týkající se turbulence byly zadány skrze hydraulický průměr $d_h = 0.06$ m a intenzitu turbulence $Tu = 2\%$.

3. Metody identifikace vírových struktur

3.1 Vlastností tensoru deformace elementu vírové struktury.

3.1.1 Q – kritérium

V případě Q-kritéria je vírová struktura definována jako místo, kde platí že druhý invariant tenzoru rychlosti deformace [4]. Je definované jako

$$Q = \frac{1}{2} (P^2 - \Omega_{ij} \Omega_{ij} - S_{ij} S_{ij}) \quad (3.1)$$

je větší než jakákoliv kladná prahová hodnota.

$$Q \geq Q_{th} \quad (3.2)$$

Pro takové prahové hodnoty totiž v těchto místech převládá rotace nad deformací.

Ω_{ij} - tenzor vířivosti (antisymetrická část $\nabla \vec{u}$)

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} [\nabla \vec{u} - (\nabla \vec{u})^T] \quad (3.3)$$

S_{ij} - tenzor rychlosti deformace (symetrická část $\nabla \vec{u}$)

$$S_{ij} = \frac{1}{2} [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T] \quad (3.4)$$

P - stopa tenzoru.

3.2 Geometrických vlastností jádru víru

3.2.1 Charakter proudnic

Strukturu nazýváme vírem, pokud průměty proudnic do roviny kolmé k vírovému jádru vykazují kruhový nebo spirálový charakter. Tento způsob identifikace je dobře použitelný v počítačové mechanice tekutin, kde není problém tyto průměty získat. Jedinou nevýhodou je ona podmínka kolmosti k vírovému jádru, jehož směr nemusí být vždy znám.

3.2.2 Normalizovaná helicity

Jelikož je v jádře víru úhel mezi vektorem vířivosti a rychlosti minimální, lze jej identifikovat pomocí tzv. normalizované helicity [4]. Ta je definována jako

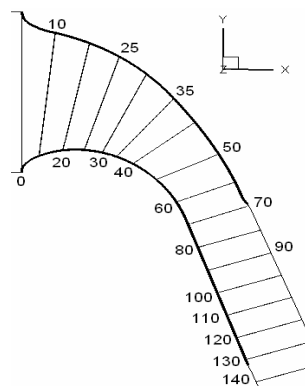
$$H_n = \frac{\vec{w}_i \cdot \vec{\omega}_i}{|\vec{w}_i| \cdot |\vec{\omega}_i|} \quad (3.7)$$

Jedná se vlastně o kosinus úhlu, který mezi sebou zmíněné vektory svírají. Pro minimum úhlu tedy platí

$$|H_n| = 1. \quad (3.8)$$

4. Vírové struktury ve vypočteném proudovém poli

Pro realizaci byla výpočtová oblast mezilopatkového kanálu rozřezaná rovinami kolnými k ose kanálu, (Obr.3) [5].

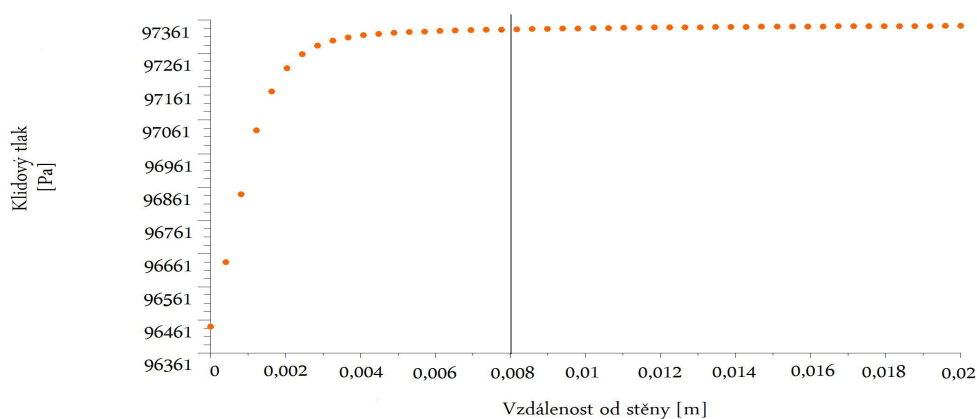


Obr. 3: Roviny řezu v turbinové mříži.

Čísla na obrázku označují v procentech polohu rovin na ose kanálu. Nejlepší představu o vírech v lopatkové mříži získáme pomocí Q - kriteria. Na (Obr. 6) vidíme plochu konstantní hodnoty Q , která je pokryta konturami normalizované helicity. Na tomto obrázku je vidět, že se jedná o čelní vír před překážkou umístěnou na stěně a o kanálový vír. Je vidět, že čelní vír se skládá ze dvou větví. Větev na podtlakové straně profilu neboli horní kopíruje profil a postupně splývá s vírem kanálovým. Větev na straně přetlakové neboli dolní je v důsledku tlakového gradientu směřujícího od podtlakové strany k přetlakové tlačena k podtlakové straně profilu a nakonec splývá s vírem kanálovým.

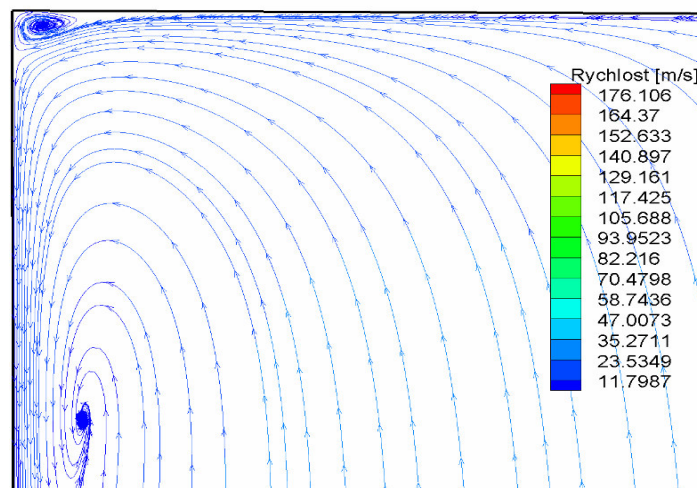
Čelní vír

U náběžné hrany vzniká čelní vír. Pro vznik tohoto víru je podmínkou existence mezní vrstvy na stěně před náběžnou hranou. Její tloušťka je $\delta_{T,K} = 0.008$ m a lze ji odečíst z průběhů klidového tlaku u stěny kanálu (Obr. 4).



Obr. 4: Průběh klidového tlaku v mezní vrstvě před náběžnou hranou

Z proudnic promítnutých do roviny, která prochází náběžnou hranou a je rovnoběžná se směrem hlavního proudu, je patrné, že rychleji se pohybující částice dále od stěny jsou důsledkem tlakového gradientu vzniklého interakcí mezní vrstvy a náběžné hrany tlačené ke stěně, obtékají částice pomalejší (Obr. 5) a dochází ke vzniku víru. V turbinové mříži je v rovinách řezů 15, 20 a 25% patrna dolní větev čelního víru. Od roviny řezu ve 40% tato větev koexistuje s vírem kanálovým.



Obr. 5: Průřez proudnic do roviny procházející náběžnou hranou a kolmo ke stěně

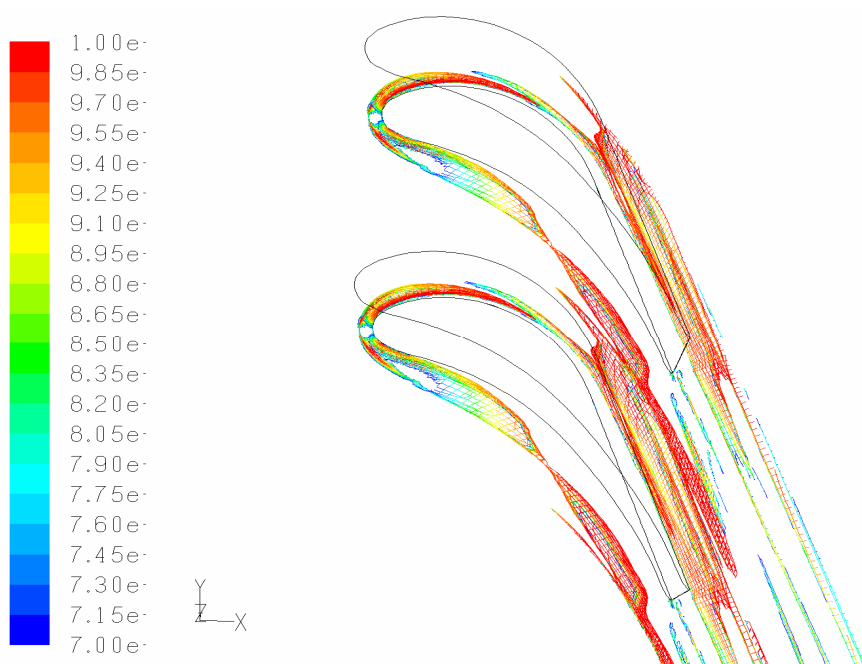
Kanálový vír

Ve střední části mezilopátkového prostoru jsou dva velké kanálové víry vzniklé působením odstředivé síly důsledkem zakřivení kanálu. Tento vír nelze odstranit, ale je možné ho omezit díky skutečnosti, že nevzniká hned na náběžné hraně a také závisí na konečné vzdálenosti dvou sousedních lopatek. Kanálový vír je patrný až od roviny 40%, kde se začíná formovat. Do 60% je vír vidět pod horní větví víru čelního, dále nabývá na intenzitě a stává se dominantní strukturou.

Indukované víry

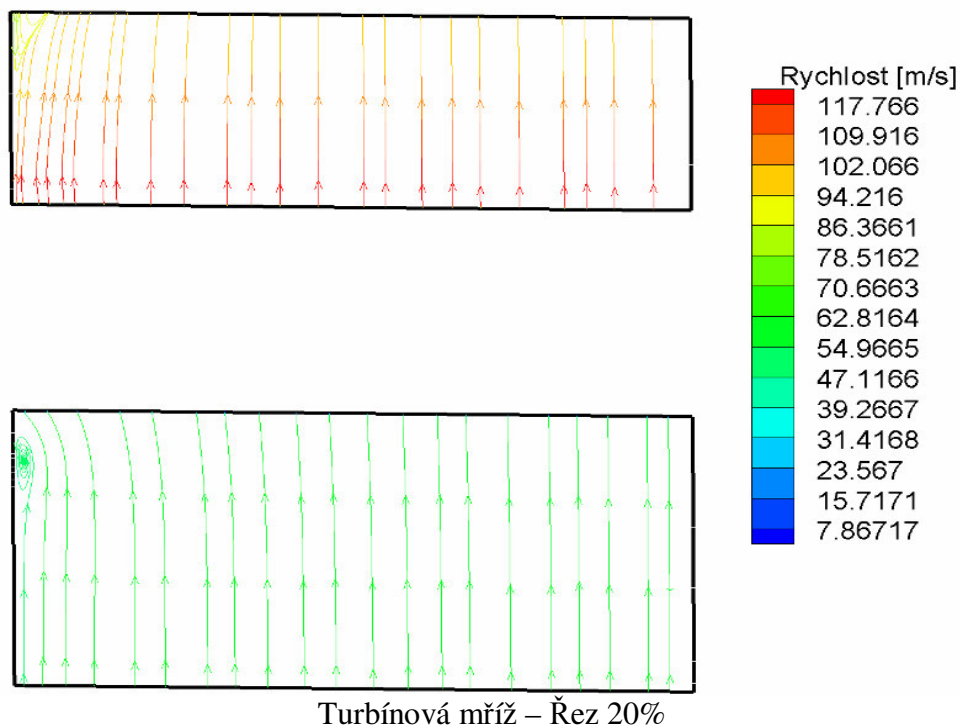
Tyto struktury vznikají v oblastech, kde tekutina nemůže z určitých důvodů cirkulovat ve stejném smyslu jak indukovaný vír. Jedná se o víry vzniklé v důsledku existence jiných vírů, např. čelního nebo kanálového. V případě lopátkové mříže je oblastí existence např. roh mezi lopátkou a stěnou.

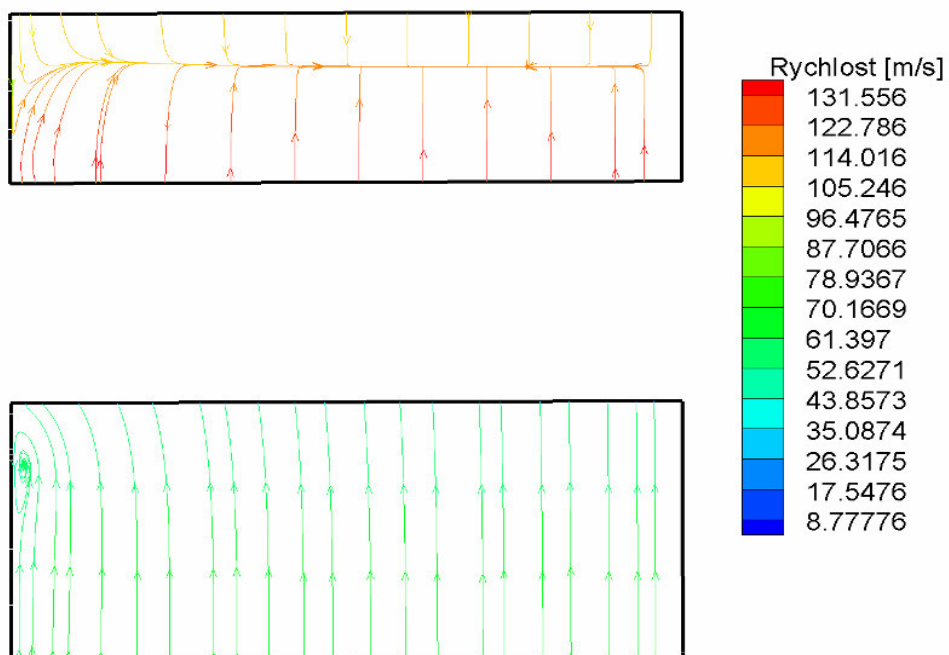
Normalizovaná helicity



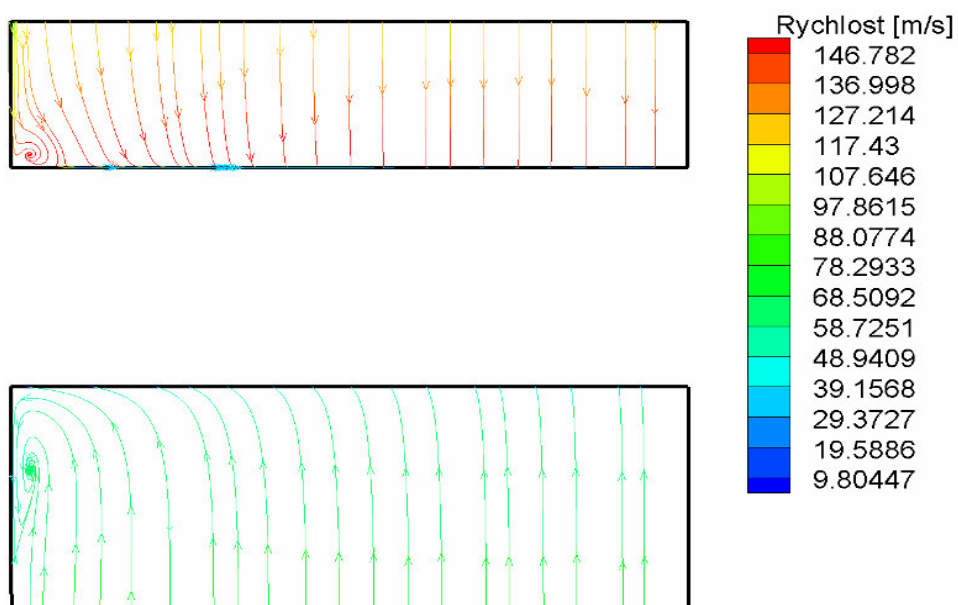
Obr.6: Detail - Plocha $Q=50000$ pokrytá konturami normalizované helicity H_n .

Průmět proudnic do rovin řezu – Turbinová mříž:

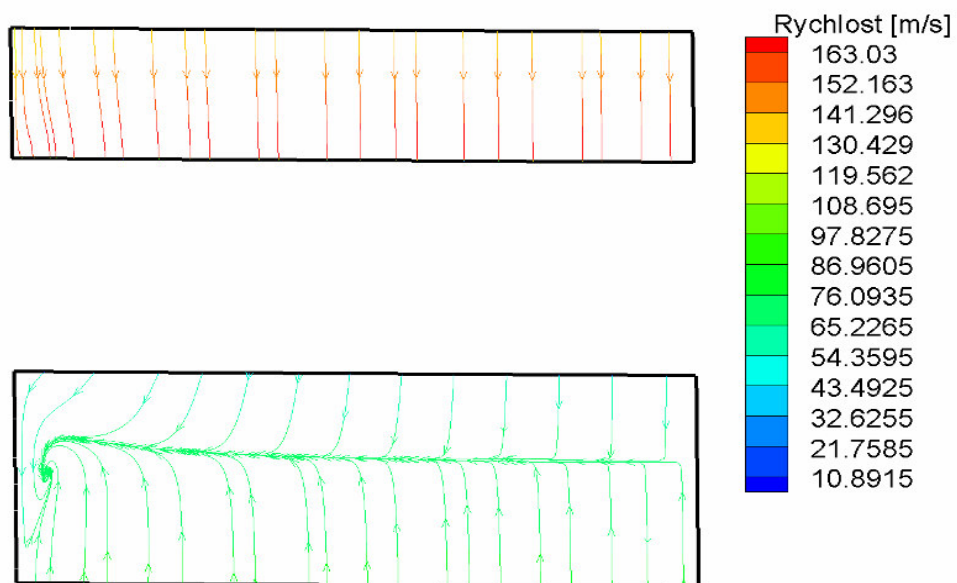




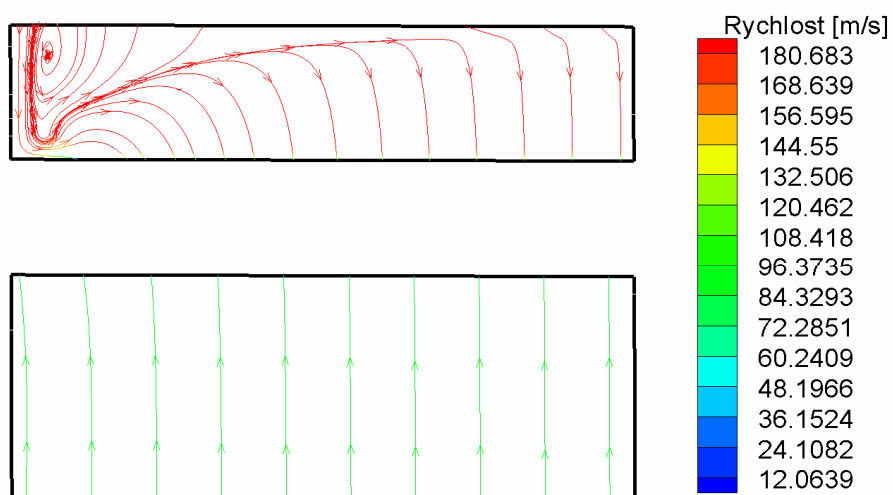
Turbínová mříž – Řez 30%



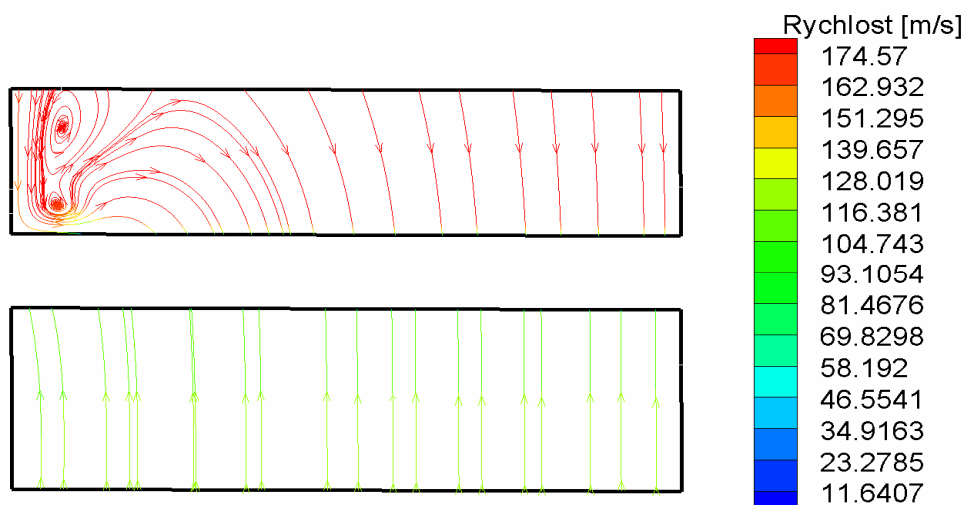
Turbínová mříž – Řez 40%



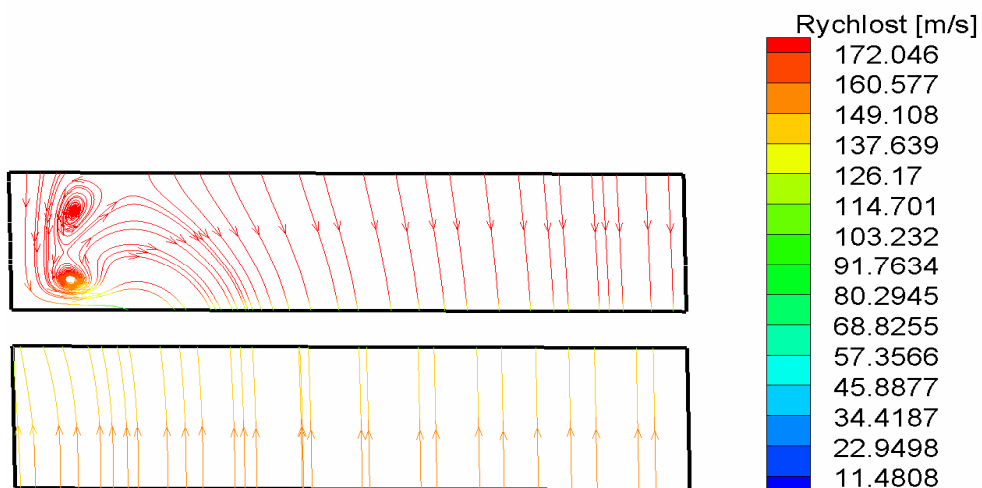
Turbínová mříž – Řez 50%



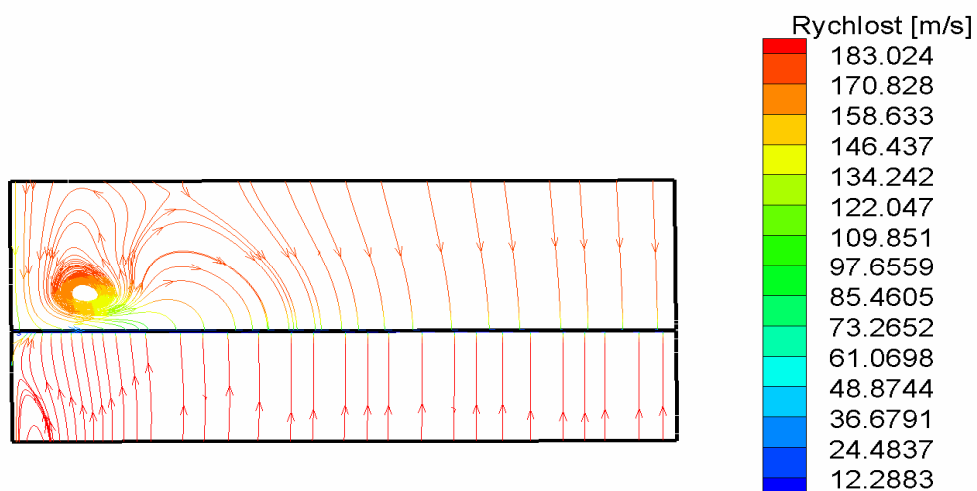
Turbínová mříž Řez 60%



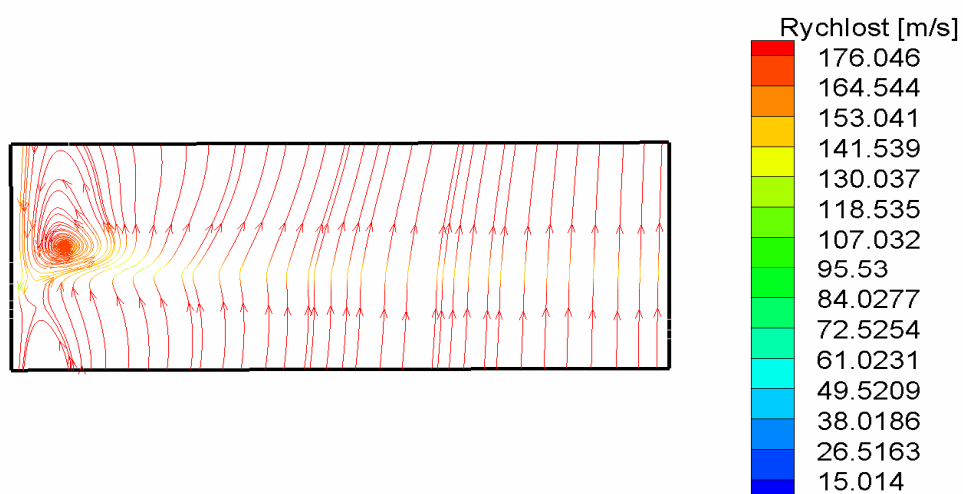
Turbínová mříž – Řez 70%



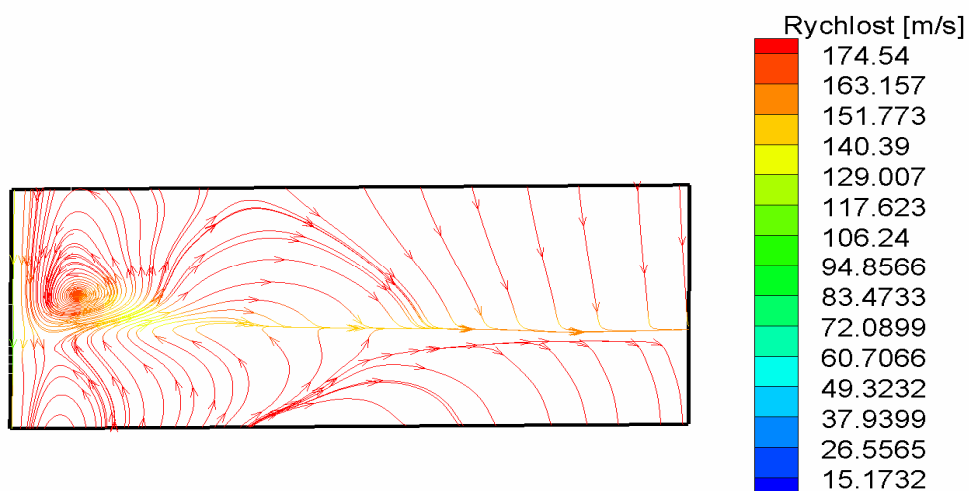
Turbínová mříž – Řez 80%



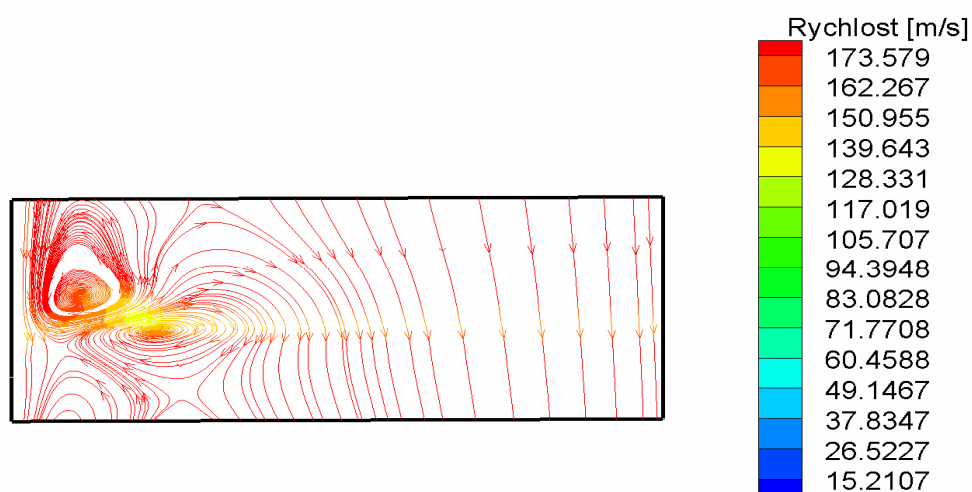
Turbínová mříž – Řez 90%



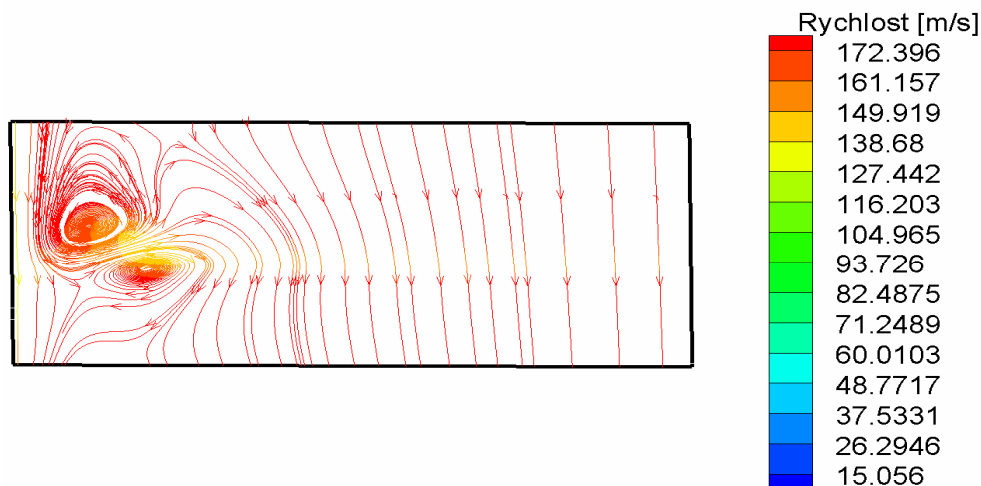
Turbínová mříž – Řez 100%



Turbínová mříž – Řez 110%



Turbínová mříž – Řez 120%



Turbínová mříž – Řez 130%

5. Ztrátový součinitel

Ztrátový součinitel jsme získali pomocí metody redukce dat, která je založená na bilanci toku hmotnosti, na bilanci toku hybnosti ve směru x, y, z , na energetické rovnici a stavové rovnici. U výpočtu jsme použili plochu, kterou jsme dostali řezem kolmým do roviny 2 cm od odtokové hrany. Ztrátový součinitel v tomto místě je $\xi = 0,03556$.

6. Závěr

Na základě rozboru struktury výpočetních trojrozměrných proudových polí v lopatkových mřížích z pracovaných dostupnými způsoby vizualizace, bylo při plnění druhého bodu zadání prokázáno:

Čelní vír vzniká na náběžné hraně a je dále unášen proudem a dělí se na dvě větve. Horní větev přibližně kopíruje povrch lopatky na jej podtlakové straně. Dolní větev je v důsledku existence tlakového gradientu v mezilopatkovém kanále tlačena od přetlakové strany kanálu k podtlakové. Obě větve se nakonec spojují s vírem kanálovým.

V důsledku odstředivých sil působících na tekutinu v zakřivením kanále vzniká kanálový vír.

Seznam symbolů

c	délka tětiny lopatek	[m]
D_h	hydraulický průměr	[m]
l_1	délka kanálu před profilem	[m]
l_2	délka kanálu za profilem	[m]
p	statický tlak	[Pa]
p_0	klidový tlak	[Pa]
Q	druhý invariant tenzoru rychlosti deformace	[s ⁻²]
S_{ij}	symetrická složka rychlosti deformace	[s ⁻¹]
Ω_{ij}	antisymetrická část tenzoru rychlosti deformace	[s ⁻¹]
S_{ii}	stopa tenzoru	[s ⁻¹]
T	termodynamická teplota	[K]
t	rozteč lopatek mříž	[m]
T_u	intenzita turbulence	[%]
V	kontrolní objem	[m ³]
ω_i	vektor vířivosti	[-]
C_p	tepelná kapacita	[J/Kg.K]
H	dynamická viskozita	[Pa.s]
ζ	ztrátový součinitel	[-]

7. Literatura

Seznam odborné literatury:

- 1) Materiály o profilu rozváděcí turbínové lopatkové mříže
- 2) R.Dvořák, K.Kozel : Matematické modelování v aerodynamice, Nakladatelství ČVUT, Praha, 1996
- 3) Manuály pro užití komerčních programů
- 4) R.Dvořák : Vnitřní aerodynamika, Nakladatelství ČVUT, Praha, 1987
- 5) D.Šimurda : Vírové struktury v lopatkových mřížích, Diplomová práce, ČVUT, Praha, 2005