

# CFD pro tepelnou techniku I

## přednáška

### Základní rovnice Diskretizace Řešiče Konvergence Relaxace

Pavel Zácha

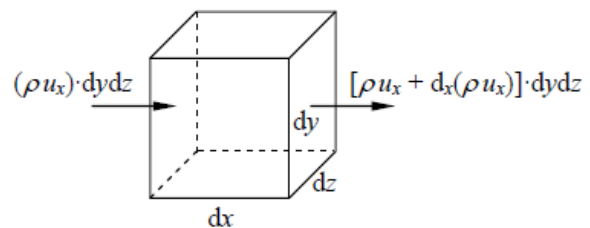
zdroj: [Vodička, 2011], [Bakker, 2008], [Runchal, 2008]

### Základní rovnice

- popis proudění kapalin je definován fyzikálními **zákony zachování hmotnosti, hybnosti, tepla** a případně dalších skalárních veličin
- existují řady tvarů a zápisů
- v případě nestacionárního proudění lze v diferenciálním tvaru zapsat:
  - rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

časová akumulace      vtok-výtok



gradient obecného skaláru  $\Phi$  je vektor:

$$\text{grad } \Phi = \nabla \Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial x} i + \frac{\partial \Phi}{\partial y} j + \frac{\partial \Phi}{\partial z} k$$

zde:  $\Phi = \rho u$

$$\text{grad}(\rho u) = \nabla(\rho u) = \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} i + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} j + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} k$$

## Základní rovnice

### - Navier-Stokesova pohybová rovnice

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \cdot \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

zrychlení tekutiny (akumulace hybnosti) →  $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \mathbf{v})$   
 konvektivní zrychlení (vtok-výtok) →  $\nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{v})$   
 gradient tlaku (zrychlení tlakovým spádem) →  $-\nabla p$   
 smykové napětí (viskozita) →  $\nabla \cdot (\bar{\tau})$   
 vnější objemové síly →  $\rho \cdot \mathbf{g} + \mathbf{F}$   
 gravitační síly →  $\rho \cdot \mathbf{g}$

$p$  – statický tlak;

$\tau$  – tenzor smykových napětí, který se určí z:

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left[ (\nabla v_j + \nabla v_i) - \frac{2}{3} \cdot \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{I}) \right]$$

$\mu$  – dynamická viskozita;

$\mathbf{I}$  – jednotkový tenzor.

vliv objemové roztlačnosti →  $\nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{I})$

## Základní rovnice

### - rovnice pro přenos tepla

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot E) + \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot (\rho \cdot E + p)) = \nabla \cdot \left( \lambda_{eff} \cdot \nabla T - \sum_i h_i \cdot \mathbf{J}_i + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \mathbf{v}) \right) + S_h$$

akumulace energie →  $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot E)$   
 složka vodivosti →  $\lambda_{eff}$   
 difúze energie →  $\sum_i h_i \cdot \mathbf{J}_i$   
 tření →  $(\bar{\tau}_{eff} \cdot \mathbf{v})$   
 vydatnost objemového zdroje →  $S_h$   
 vtok-výtok →  $\nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot (\rho \cdot E + p))$

$\lambda_{eff}$  – součinitel efektivní vodivosti ( $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_v$ , tj. souč. tepelné vodivosti + souč. turbulentní tepelné vodivosti);

$h_i$  – měrná entalpie složky  $i$ ;

$J_i$  – difúzní tok složky  $i$ ;

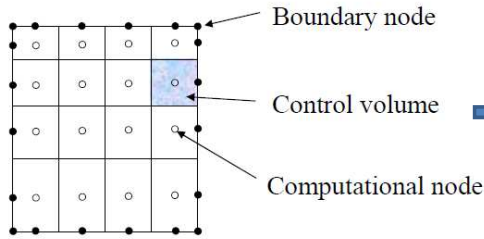
$\tau_{eff}$  – tenzor efektivního tření;

$T$  – termodynamická teplota;

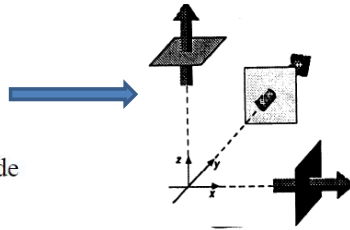
Celkovou energii  $E$  lze určit z:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$

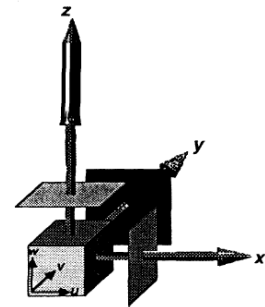
## Základní rovnice



dělení řešené oblasti na buňky



tok skalární veličiny  
(stěnami krychle)



tok hybnosti  
(3 složky toku stěnou krychle)

Definujeme obecnou proměnnou  $\Phi$  – v jednotlivých rovnicích: hmotnost (M), hybnost (H), teplo (Q), složky směsi, vlhkost apod.

**Tok  $\Phi$**  – časová derivace  $\Phi$  :

$$\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt}$$

**Tok  $\Phi$  plochou** (hustota toku  $\phi$ ):

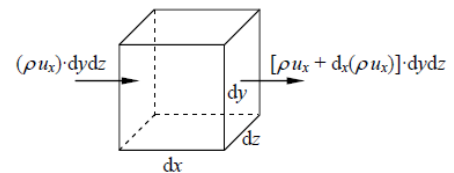
$$\phi = \frac{\dot{\Phi}}{S_n}$$

$S_n$  – normálová plocha, přes kterou se veličina přenáší

## Základní rovnice

- **tok skaláru  $\Phi$  plochou** (M, H, ...) – v kartézském souřadném systému rozdělen do 3 složek (x, y, z)
  - např. hmotnostní tok plochou (hustota hmotnostního toku):

$$\dot{\Phi} \equiv \rho \dot{V} = \frac{M \dot{V}}{S} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$$



průtok tekutiny buňkou ve směru osy x

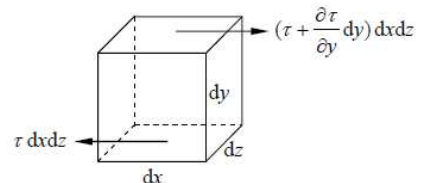
- **tok vektoru  $\Phi$  plochou** –  $\dot{\Phi} \equiv H = M \cdot v$  [ $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

⇒ tok hybnosti je tedy násobením 2 vektorů

⇒ je přidán další rozměr, tj. pro každý souřadnicový směr je tok rozložen do směrů x, y, z

⇒ 9 komponent toku hybnosti => **tenzor**

- např. pro viskózní napětí:



působení třecích sil na částici tekutiny

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \text{div} \mathbf{u} & \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}\mu \text{div} \mathbf{u} & \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3}\mu \text{div} \mathbf{u} \end{pmatrix}$$

## Diskretizace

- řešené proměnné jsou uloženy ve středu buněk/kontrolních objemů
- **základní (transportní) rovnice** zachování hmoty, hybnosti, energie, složky směsi apod. jsou řešeny pro tento soubor buněk
- obecná forma transportních rovnic v **integrálním tvaru**:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Unsteady}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Convection}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Generation}}$$

Rate of increase of  $\phi$  of fluid element
+ Net rate of flow of  $\phi$  out of fluid element (convection)
= Rate of increase of  $\phi$  due to diffusion
Rate of increase of  $\phi$  due to sources

Equation	Variable
Continuity	1
X momentum	$u$
Y momentum	$v$
Z momentum	$w$
Energy	$h$

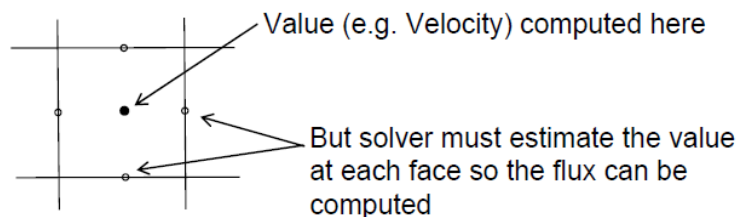
- obecná forma transportních rovnic v **diferenciálním tvaru**:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) + S_\phi$$

- **parciální diferenciální rovnice** jsou diskretizovány do soustavy algebraických rovnic
- všechny **algebraické rovnice** jsou poté stanoveny numericky pro každou buňku řešené oblasti
- závislé proměnné jsou v celém kontrolním objemu (buňce) považovány za **konstantní** a jsou dány hodnotou v příslušném výpočtovém uzlu  
 ⇒ **záleží na velikosti buněk**

## Diskretizace

- výpočetní uzly leží:
  - ve středu buněk (vrcholově středěná mřížka, např. ANSYS-FLUENT)
  - v uzlech sítě (buněčně středěná mřížka, např. ANSYS-CFX)
- pro implementaci rovnic je nutno znát:
  - hodnoty veličiny  $\phi$  na stěnách buněk
  - gradient  $\phi$  pro danou buňku
- pole proměnných – složek rychlostí a skalárních veličin (uložených ve středu buněk) musí být interpolován na hranici buněk



- existují různé možnosti této interpolace  
 v ANSYS-FLUENT pod názvem Solution Methods

## Diskretizace

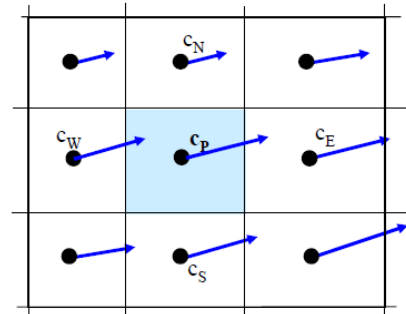
**Schéma „upwind“** (směrem ke straně vystavené větru)

Bilance buňky:

$$A_e u_e c_e - A_w u_w c_w + A_n v_n c_n - A_s v_s c_s = \mathbf{D}A_e \left. \frac{dc}{dx} \right|_e - \mathbf{D}A_w \left. \frac{dc}{dx} \right|_w + \mathbf{D}A_n \left. \frac{dc}{dy} \right|_n - \mathbf{D}A_s \left. \frac{dc}{dy} \right|_s + S_p$$

levá strana obsahuje toky pozorované veličiny danou plochou, tj. její koncentraci (c) proudící rychlostí kolmo na stěnu (u; v) stěnami buňky o obsahu (A)

pravá strana zahrnuje difúzi (D- difúzní koeficient) a zdrojový člen v buňce ( $S_p$ )



vizualizace diskretizace

## Diskretizace

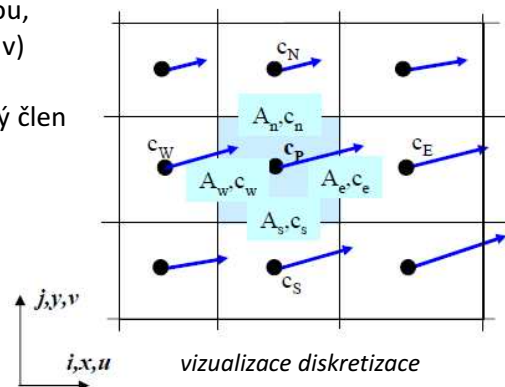
**Schéma „upwind“** (směrem ke straně vystavené větru)

Bilance buňky:

$$A_e u_e c_e - A_w u_w c_w + A_n v_n c_n - A_s v_s c_s = \mathbf{D}A_e \left. \frac{dc}{dx} \right|_e - \mathbf{D}A_w \left. \frac{dc}{dx} \right|_w + \mathbf{D}A_n \left. \frac{dc}{dy} \right|_n - \mathbf{D}A_s \left. \frac{dc}{dy} \right|_s + S_p$$

levá strana obsahuje toky pozorované veličiny danou plochou, tj. její koncentraci (c) proudící rychlostí kolmo na stěnu (u; v) stěnami buňky o obsahu (A)

pravá strana zahrnuje difúzi (D- difúzní koeficient) a zdrojový člen v buňce ( $S_p$ )



vizualizace diskretizace

# Diskretizace

**Schéma „upwind“** (směrem ke straně vystavené větru)

Bilance buňky:

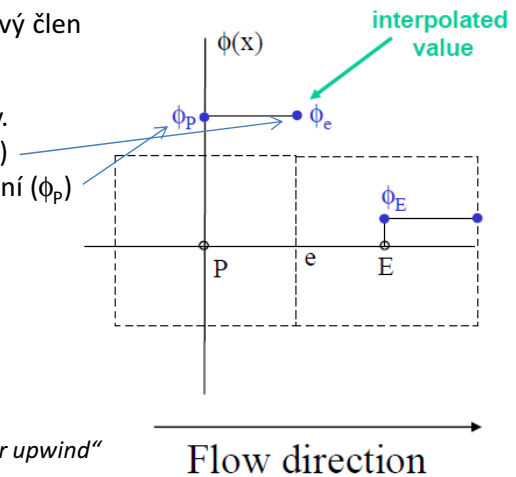
$$A_e u_e c_e - A_w u_w c_w + A_n v_n c_n - A_s v_s c_s = \mathbf{D}A_e \left. \frac{dc}{dx} \right|_e - \mathbf{D}A_w \left. \frac{dc}{dx} \right|_w + \mathbf{D}A_n \left. \frac{dc}{dy} \right|_n - \mathbf{D}A_s \left. \frac{dc}{dy} \right|_s + S_p$$

levá strana obsahuje toky pozorované veličiny danou plochou, tj. její koncentraci (c) proudící rychlostí kolmo na stěnu (u; v) stěnami buňky o obsahu (A)

pravá strana zahrnuje difúzi (D- difúzní koeficient) a zdrojový člen v buňce (S<sub>p</sub>)

Jejich velikosti určíme interpolací z hodnoty středu. Pro tzv.

**protivětrné schéma 1. řádu** je hodnota ve stěně buňky (φ<sub>e</sub>) stejná jako hodnota středu spodní buňky ve směru proudění (φ<sub>p</sub>)

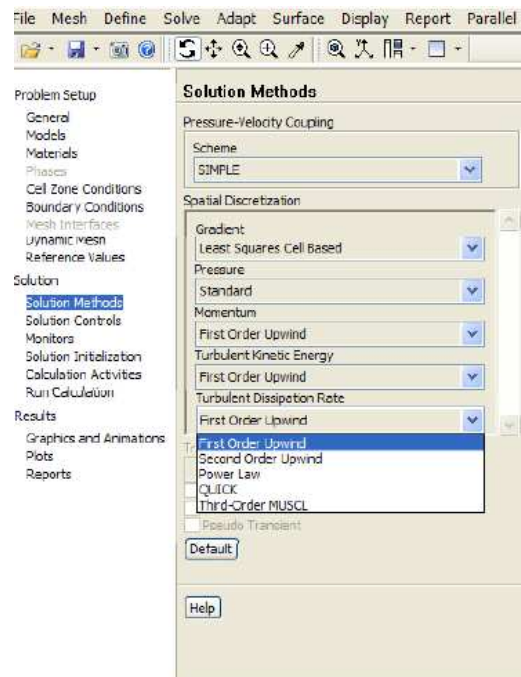


# Diskretizace

## Metody interpolace

známe 3 metody (schémata) dle použití:

- I. konvekční členy (momentum, energy, species,...)
- II. pole tlaků (při použití metody korekce tlaku - *pressure-based solver*)
- III. gradienty řešených proměnných – pro stanovení způsobu šíření toků (difúze), rychlostních „odvozenin“ a pro schémata s vyšším řádem přesnosti

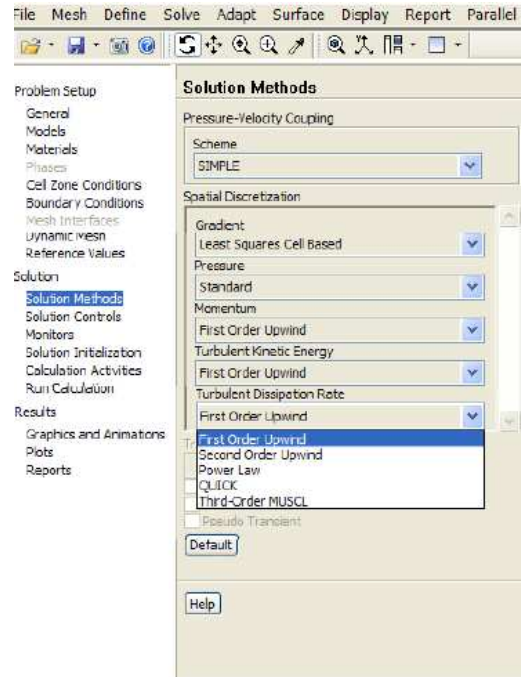


# Diskretizace

## Metody interpolace

### I. schémata pro konvekci:

- **First-Order Upwind** – nejsnadnější konvergence
- **Power Law** – pro nízká Re ( $Re_{cell} < 5$ ) přesnější metoda než „First-Order“
- **Second-Order Upwind** – schéma využívající více šablony s 2. řádem přesnosti, vhodný zejména pro případy, kdy směr proudění není ve shodě se směrem sítě (turbulentní proudění, tri/tet sítě); obvykle pomalejší konvergence
- **Third-Order MUSCL** (Monotone Upstream-Centred Schemes for Conservation Laws) – schéma řešící lokálně s 3. řádem přesnosti; vhodné pro nestruturované sítě, je přesnější při stanovení sekundárních proudů, vírů apod.
- **QUICK** (Quadratic Upwind Interpolation) – dosahuje vyšší přesnosti zejména v případech rotujícího nebo vířícího proudění a u šestistěnné výpočtové sítě
- ...

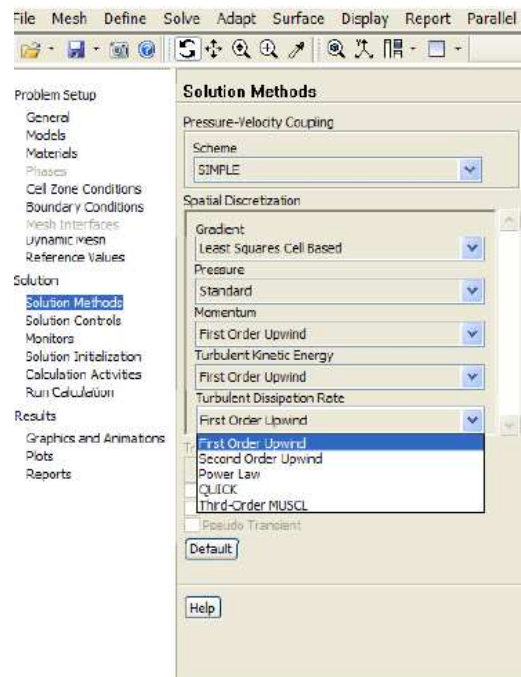


# Diskretizace

## Metody interpolace

### II. schémata pro výpočet tlakových polí:

- **Standard** – přednastavená metoda; snížená přesnost pro proudění vystavené vysokým tlakovým gradientům v blízkosti rozhraní
- **PRESTO!** – pro vysoce vířivé proudy, proudění s prudkými gradienty tlaků (např. *porous media*, *fan model*); pro vysoce zakřivené oblasti
- **Second-Order** – pro stlačitelné proudění, nevhodné pro *porous media*, *jump*, *fan model* ... a pro multifázové modely *VOF/Mixture*
- **Body Force Weighted** – pro vysoké molekulární síly (vysoká Ra při přirozené cirkulaci, vysoce vířivé proudy)
- ...



# Diskretizace

## Metody interpolace

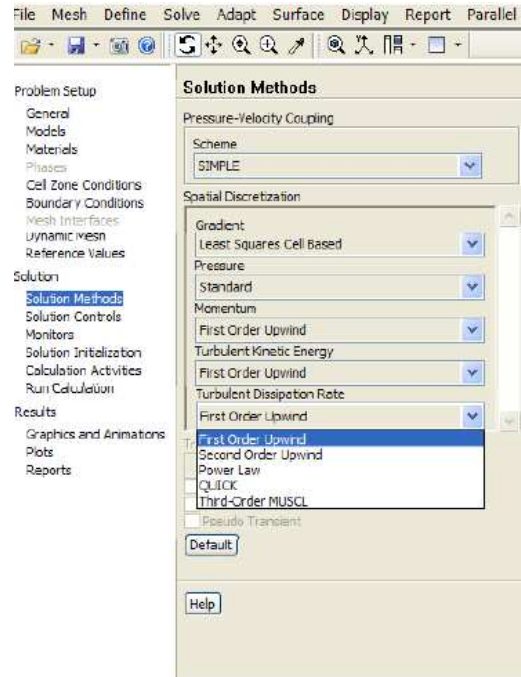
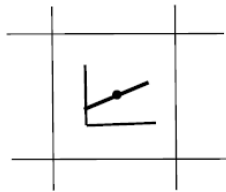
### III. gradienty řešených proměnných:

gradienty řešených proměnných ve středu buněk (výpočetních uzlech) jsou v ANSYS-FLUENT lze stanovit pomocí 3 přiblížení

-**Green-Gauss Cell Based** – nejméně výpočetně náročný; řešení může mít chybnou difúzi

-**Green-Gauss Node-Based** – přesnější a více výpočetně náročnější; minimalizuje chyby v difúzi; vhodná pro nestrukturované sítě

-**Least-Squares Cell-Based** – přednastavená metoda; shodné vlastnosti jako metoda **Node-Based**, ale je výpočetně méně náročná



# Diskretizace

## Metody pro řešení na sobě závislých polí rychlostí a tlaků

-proudění kapalin je určeno v nejjednodušším případě rovnicí kontinuity a N-S pohybovými rovnicemi

⇒ proudění je tedy určeno rozložením tlaku a rychlostí

-tyto veličiny se vzájemně ovlivňují => početně jsou řešeny souběžně metodou pro řešení na sobě závislých polí rychlostí a tlaků

-ANSYS-FLUENT nabízí jak sekvenční tak sdužený způsob řešení této vzájemné závislosti, tj. rozeznáváme:

- sekvenční algoritmy
- sdužený algoritmus



# Diskretizace

## Metody pro řešení na sobě závislých polí rychlostí a tlaků

### Sekvenční algoritmy

-SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) - více konzervativní metoda, používající vazbu mezi korekcemi rychlostí a tlaku.

-SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) - je upravená metoda SIMPLE použitelná pro relativně nekomplikované problémy (např. čistě laminární proudění).

-PISO (Pressure-Implicit with Splitting Operators) - patří do skupiny SIMPLE algoritmů. Metoda je založena na vyšším stupni aproximací mezi korekcemi tlaku a rychlostí.

-FSM (Fractional Step Method) - metoda rozděleného kroku je v porovnání s algoritmem PISO poněkud méně výpočetně náročná. V některých případech může být také méně stabilní.

### Sdružený algoritmus

-výhodou je robustní a účinná jednofázová implementace pro stacionární proudění, která dává v porovnání se sekvenčními algoritmy vyšší výkonnost

-alternativa k metodám typu SIMPLE

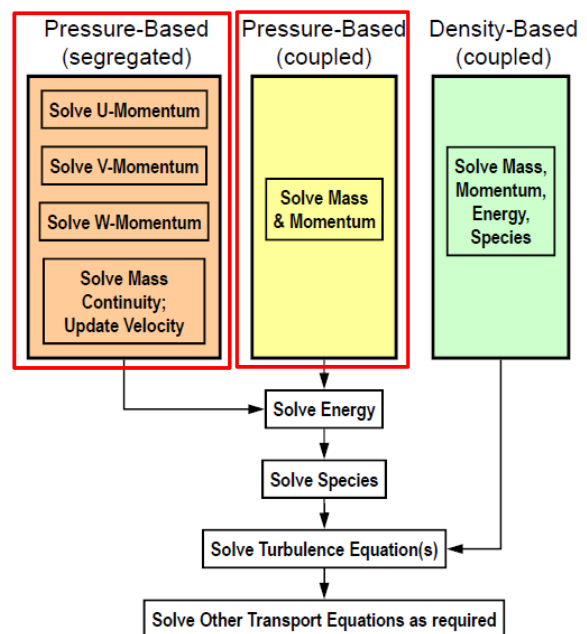
-použitelný zejména při přechodových stavech, kdy je výpočtová síť nedostatečně jemná nebo je použit velký časový krok

## Řešiče

### 2 základní metody řešení

#### 1. Metoda korekce tlaku (pressure-based solver)

- původně vyvinut pro nízké rychlosti nestlačitelné tekutiny (projection method)
- základní proměnné jsou hybnost a tlak (korekce tlaku) řešené odděleně
- projekční metoda má 2 základní fáze:
  - z transportních rovnic hybnosti se nejprve stanoví střední rychlosti (složka tlakového gradientu je ignorována)
  - pomocí rovnice tlaku (korekce tlaku) se stanoví tlakové pole, které se použije pro úpravu rychlosti (určí se prostě odchylky rychlostního pole)
  - následuje aktualizace na další iterační krok
- dva přístupy: sekvenční a sdružený algoritmus (viz předchozí slidy)

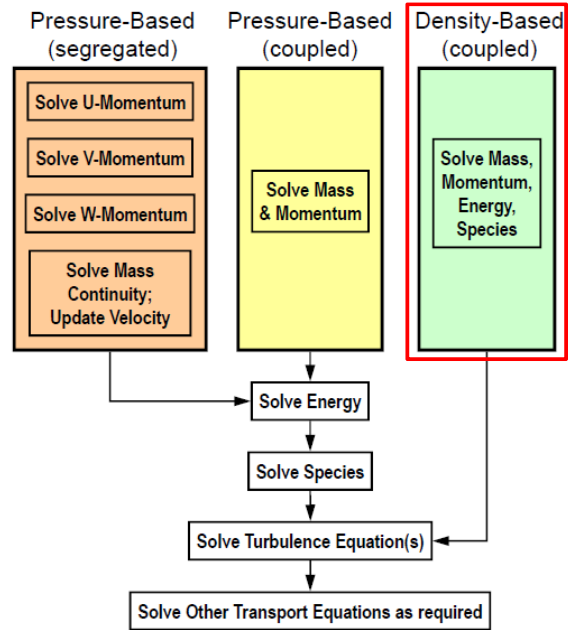


# Řešiče

## 2 základní metody řešení

### 2. Metoda korekce hustoty (density-based solver)

- původně vyvinut pro vysoké rychlosti stlačitelné tekutiny
- rychlostní pole – z rovnice hybnosti
- pole hustot – z rovnice kontinuity
- tlakové pole – ze stavové rovnice
- transportní rovnice kontinuity, hybnosti a energie a transportní rovnice pro míšení látek jsou řešeny **současně**
- transportní rovnice pro ostatní skaláry jsou řešeny následně a odděleně jedna od druhé
- nelineární transportní rovnice jsou linearizovány za účelem vytvoření soustavy rovnic závislých proměnných v každém KO
- řešením výsledné lineární soustavy je pak výpočet aktualizovaného proudového pole
- 2 způsoby linearizace: implicitní, explicitní



# Řešiče

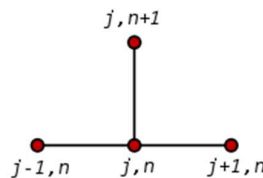
## 2. Metoda korekce hustoty

- **explicitní**
  - neznámé hodnoty stanoveny z existujících hodnot
  - každá neznámá se objevuje pouze v jedné rovnici soustavy => rovnice řešeny jedna po druhé
  - jednoduché (i výpočetně), méně přesné, někdy nestabilní

$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{k} = \frac{u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n}{h^2}$$

$$u_j^{n+1} = (1 - 2r)u_j^n + ru_{j-1}^n + ru_{j+1}^n$$

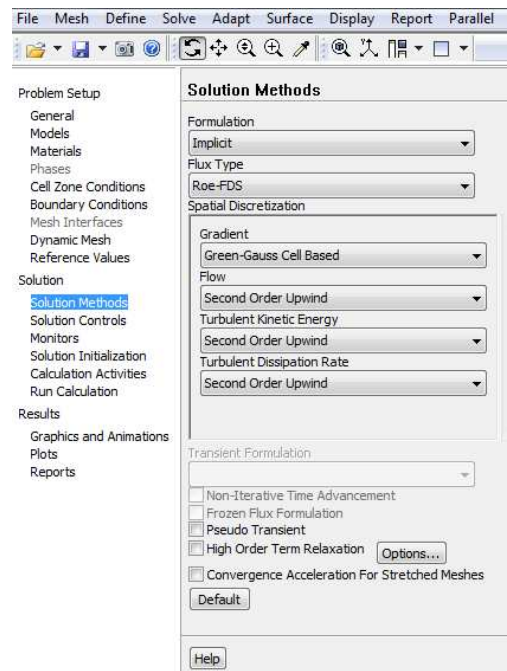
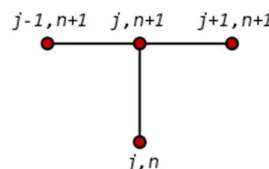
$$r = k/h^2$$



- **implicitní**
  - neznámé hodnoty stanoveny z existujících i neznámých hodnot sousedních buněk
  - každá neznámá se objevuje ve více než rovnicích v soustavě => rovnice řešeny současně
  - výpočetně náročnější, přesnější, vhodné pro vyšší časové kroky

$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{k} = \frac{u_{j+1}^{n+1} - 2u_j^{n+1} + u_{j-1}^{n+1}}{h^2}$$

$$(1 + 2r)u_j^{n+1} - ru_{j-1}^{n+1} - ru_{j+1}^{n+1} = u_j^n$$



# Konvergence

- při výpočtech je nutné získat konvergentní řešení
- mírou konvergence jsou tzv. **rezidua** a s nimi spojená **kritéria konvergence**

## Rezidua

- pro metodu korekce tlaku je zákon zachování pro obecnou proměnnou  $\phi$  v buňce okolo bodu **P**:

$$a_p \cdot \phi_p = \sum_{j=1}^n a_j \cdot \phi_j + S_c$$

$a_p$  – centrální koeficient buňky  $P$

$$a_p = \sum_{j=1}^n a_j - S_p$$

$\phi_p$  – hodnota  $\phi$  v buňce  $P$

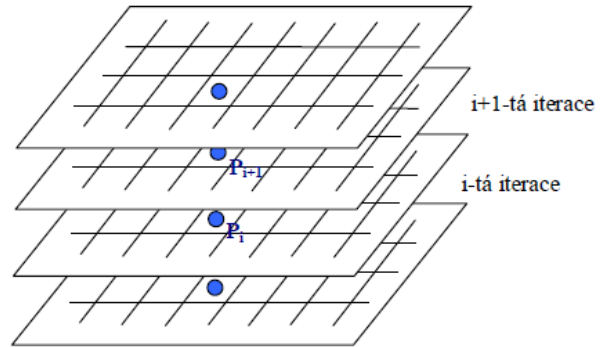
$\phi_j$  – hodnota  $\phi$  v okolních buňkách

$S_c, S_p$  – složky linearizovaného zdrojového členu

$a_j$  – koeficienty vlivu sousedních buněk

$n$  – celkový počet sousedních buněk

- aktuální hodnoty veličiny  $\phi$  v průběhu výpočtu nesplňují rovnici z.z. přesně  
 $\Rightarrow$  zavádí se tzv. **poměrné reziduum**



*iterace při numerickém stacionárním výpočtu*

# Konvergence

## Poměrné reziduum

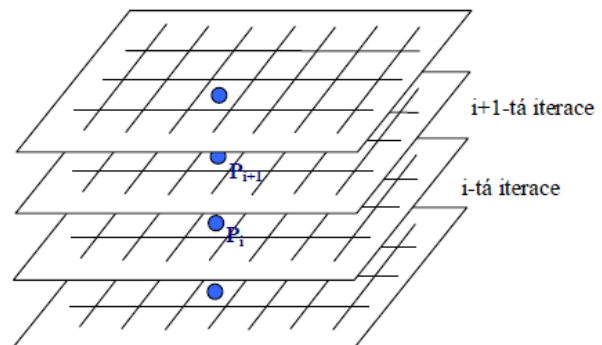
- měřítkem je součet změn veličiny v diferenční rovnici pro všechny buňky

součet abs. hodnot rozdílů mezi pravou a levou stranou z.z. proměnné  $\phi$  pro všechny buňky  $P$  v řešené oblasti

poměrné reziduum =  $\frac{\text{součet abs. hodnot rozdílů mezi pravou a levou stranou z.z. proměnné } \phi \text{ pro všechny buňky } P \text{ v řešené oblasti}}{\text{součet absolutních hodnot levé strany z.z. proměnné } \phi \text{ pro všechny buňky } P \text{ v řešené oblasti}}$

$$\bar{R}_\phi = \frac{\sum_P \left| \sum_{j=1}^n a_j \cdot \phi_j + S_c - a_p \cdot \phi_p \right|}{\sum_P |a_p \cdot \phi_p|}$$

- vyhodnocováno pro všechny počítané veličiny v každém kroku iterace



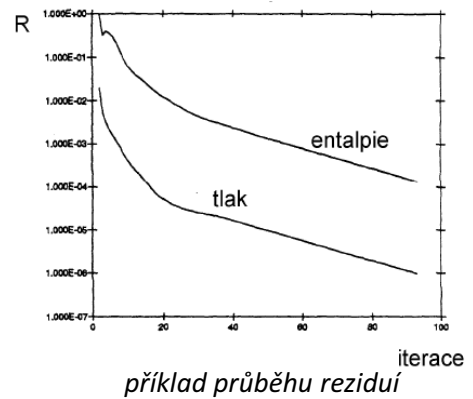
*iterace při numerickém stacionárním výpočtu*

# Konvergence

## Kritéria konvergence

- vyhodnocuje se, ve kterém bodě řešené oblasti je nejvyšší hodnota  $\bar{R}_\phi$
- nejvyšší hodnota  $\bar{R}_\phi$  se uvádí ve výpisech reziduí pro veličinu  $\phi$  v dané iteraci
- kritérii konvergence jsou pak předem stanovené doporučené maximální hodnoty  $\bar{R}_\phi$  :
  - všechny řešené rovnice (s výjimkou rovnice energie):  $10^{-3}$
  - rovnice energie:  $10^{-6}$
- často mají pouze podpůrný/informativní charakter, důležité je sledovat zejména chování dalších (fyzikálních) parametrů

Normalizované reziduály				
počet iterací	tlak	rychlost $u$	rychlost $v$	entalpie
5.00000E+00	2.64710E-01	3.62767E-01	4.01625E-01	3.49503E-01
1.00000E+01	4.21854E-02	7.31087E-02	6.09502E-02	1.15607E-01
1.50000E+01	1.61787E-02	5.57186E-02	6.77023E-02	6.28091E-02
2.00000E+01	9.91924E-03	4.11899E-02	5.52667E-02	4.24032E-02
2.50000E+01	7.78245E-03	3.71804E-02	5.02612E-02	3.19044E-02
3.00000E+01	6.71127E-03	3.33559E-02	4.61688E-02	2.55360E-02
3.50000E+01	4.96045E-03	3.13033E-02	4.34564E-02	2.11992E-02
4.00000E+01	6.07668E-03	3.01096E-02	4.09786E-02	1.80783E-02
4.50000E+01	5.21358E-03	2.85215E-02	3.89507E-02	1.56768E-02
5.00000E+01	6.70681E-03	2.67667E-02	3.67708E-02	1.38577E-02



## Relaxace

Nelinearita diferenciálních rovnic => není možné získat hodnoty proměnných ( $\phi$ ) řešením aproximačních diferenčních schémat

=> konvergence lze dosáhnout užitím **relaxace**, která redukuje změny proměnných v každé iteraci

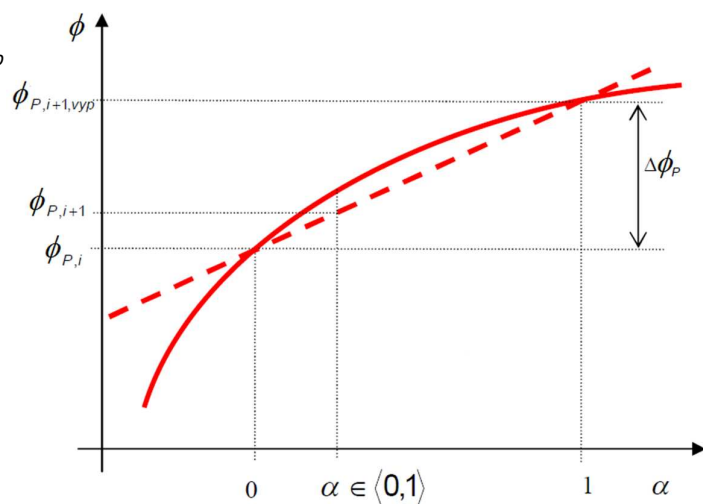
Nová hodnota  $\phi_{P,i+1}$  v buňce s bodem  $P$  závisí na:

- hodnotě z předešlé iterace  $\phi_{P,i}$ ,
- nové hodnotě z aktuální iterace  $\phi_{P,i+1,vyp}$
- relaxačním parametru  $\alpha \in \langle 0,1 \rangle$  :

$$\begin{aligned} \phi_{P,i+1} &= \alpha \cdot \phi_{P,i+1,vyp} + (1-\alpha) \cdot \phi_{P,i} \\ &= \phi_{P,i} + \alpha \cdot \Delta\phi_P \end{aligned}$$

kde vypočtená změna:

$$\Delta\phi_P = \phi_{P,i+1,vyp} - \phi_{P,i}$$

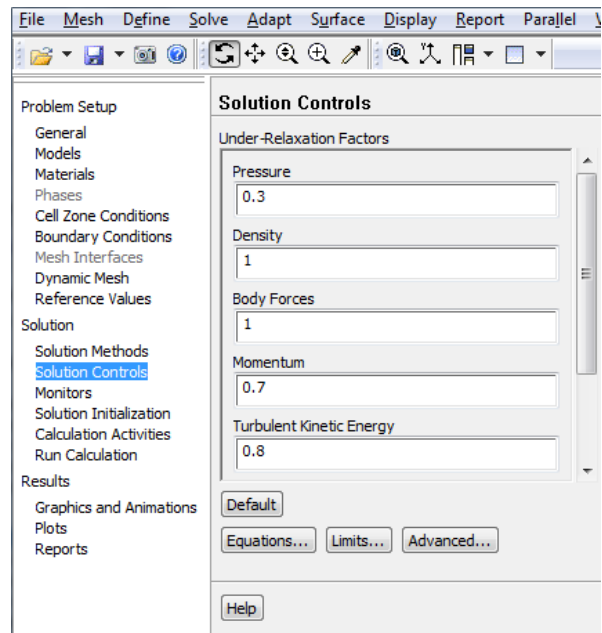


popis relaxačního parametru

# Relaxace

## Relaxační faktory – Under-Relaxation Factors

- lze nastavit pro všechny počítané proměnné
- změnou relaxačního faktoru lze urychlit konvergenci:
  - mezi iteracemi jsou změny rezidua velké => relaxační faktor se sníží (tlumí se nonlinearity)
  - mezi iteracemi se změny rezidua stávají konstantní => vhodné relaxační faktor zvětšit
- ve většině případů je vhodné začínat iterační proces s přednastavenými hodnotami
  - pokud rezidua stoupají i po prvních 4-5 iteracích => snížit relaxační faktory



# Literatura

- [Bakker, 2008] Bakker, A.: Applied Computational Fluid Dynamics, Lectures; 2008. [Citace: 24. 2. 2013]  
<http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/>
- [Kozubková, 2008] Kozubková, M.: Modelování proudění tekutin. VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2008
- [Barták, 2010] Barták, M.; Úvod do přenosových jevů pro inteligentní budovy, ČVUT v Praze, 2010.
- [Fluent, 2011] ANSYS FLUENT Theory Guide, Release 14.0. ANSYS, Inc., November 2011
- [FDM, online] Finite difference method, Wikipedia. [Citace: 12.3.2013]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_difference\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_difference_method)