

Počítačová dynamika tekutin

–

užitečný nástroj pro inženýry

M. Jahoda

Počítačová dynamika tekutin (**C**omputational **F**luid **D**ynamics, CFD) je moderní metoda, která se zabývá

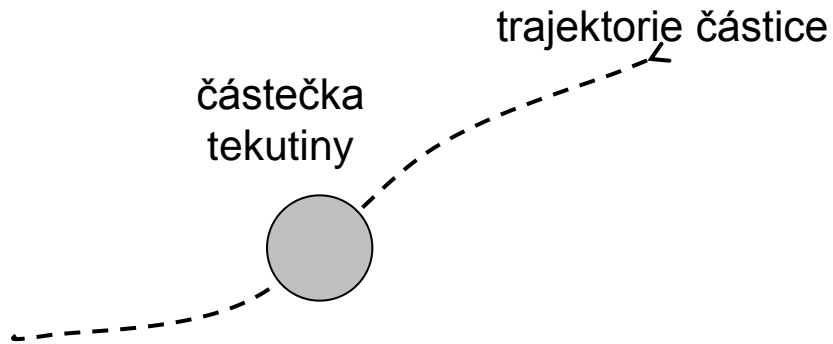
- prouděním tekutin,
- přenosem tepla a hmoty,
- průběhem chemických reakcí,
- dalšími souvisejícími jevy v definovaném prostředí.

Pro použití CFD je třeba nejprve vytvořit model (virtuální prototyp zkoumaného systému), na který jsou následně aplikovány matematické postupy tak, aby byly ze zadaných okrajových a počátečních podmínek získány vybrané údaje o dějích probíhajících v celé zkoumané oblasti při respektování fyzikálních zákonů.

Lagrangeova metoda

Celkový pohyb tekutiny je vyjádřen jako pohyb velkého počtu částic, které mají konečnou velikost, hmotu, hybnost, vnitřní energii a další vlastnosti.

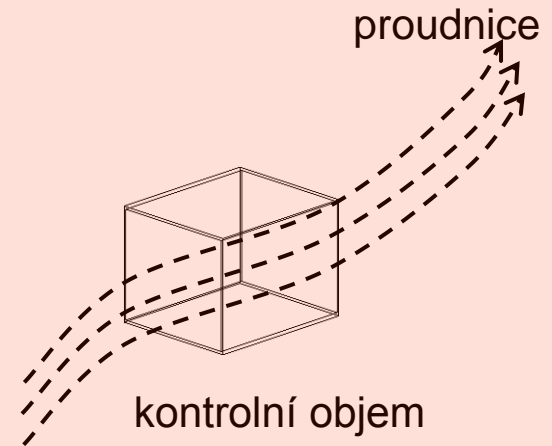
Volíme libovolnou částici tekutiny, přičemž sledujeme její pohyb v prostoru (trajektorii) za časový úsek.



Eulerova metoda

Sledujeme změny veličin charakterizující vlastnosti pohybující se tekutiny v určitém pevném bodě (místě) prostoru zaplněného tekutinou.

Sledujeme rychlost všech částic tekutiny v určitém okamžiku.



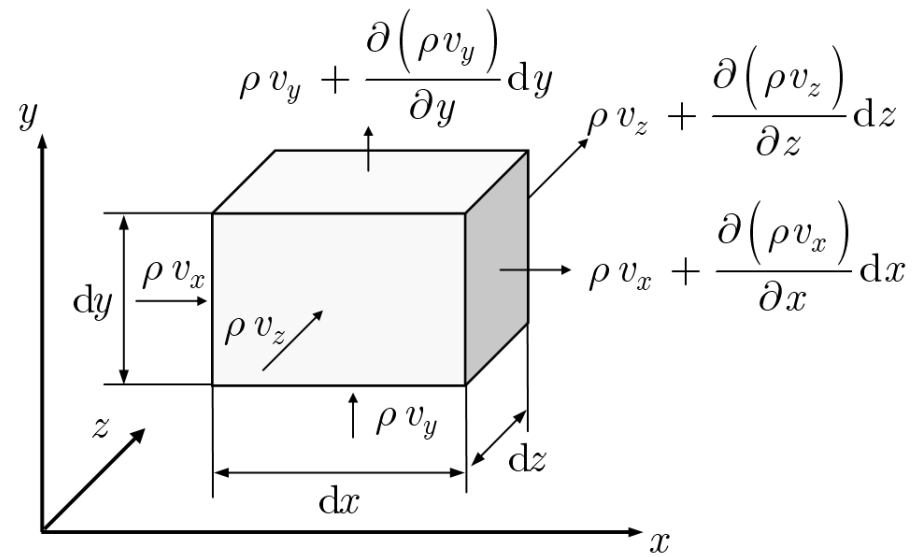
Základní rovnice

Rovnice kontinuity

- jednofázové třírozměrné neustálené proudění

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j)}{\partial x_j} = 0$$



Kontrolní objem

Základní rovnice

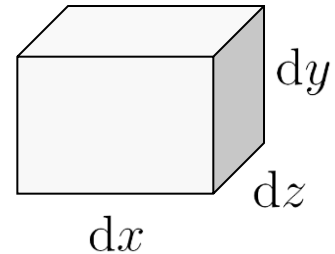
Navierovy-Stokesovy rovnice

- bilance hybnosti

setrvačná síla částice (elementárního objemu) = součet sil působících na element

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{F}_m + \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_t$$

\mathbf{F}_m hmotnostní (objemové) síly
 \mathbf{F}_p tlakové síly
 \mathbf{F}_t třecí síly
plošné síly



• ve směru osy x

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho a_x + F_x$$

• ve směru osy y

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho a_y + F_y$$

• ve směru osy z

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho a_z + F_z$$

[jednofázové třírozměrné neustálené proudění, konstantní hustota a viskozita]

Navierovy-Stokesovy rovnice

Setrvačné síly

Plošné síly

Hmotnostní (objemové) síly

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + v_j \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \right] + \rho a_i + F_i$$

tlakové síly
(normálové napětí)

třecí (viskózní) síly
(tečné napětí)

např.
gravitační síla

ostatní síly
- odstředivá
- elektromagnetická
- ...

[jednofázové třírozměrné neustálené proudění, konstantní viskozita]

Transportní rovnice složky A

$$\frac{\partial (\rho w_A)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho w_A v_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \underbrace{J_{A,j}}_{\text{Intenzita hmotnostního toku složky A molekulovou difuzí}} + \underbrace{R_A}_{\text{Rychlost vzniku/zániku složky chemickou reakcí}} + \underbrace{S_A}_{\text{Obecný zdrojový člen složky}}$$

Intenzita hmotnostního toku složky A molekulovou difuzí

$$J_{A,j} = -\rho D_A \frac{\partial w_A}{\partial x_j}$$

laminární proudění

Rychlost vzniku/zániku složky chemickou reakcí

Obecný zdrojový člen složky

Diskretizační přístupy

Metoda sítí – Finite Difference Method

- nejstarší metoda pro diskretizaci PDE;
- využívá diferenciálního tvaru rovnic;
- aproximace derivací v uzlových bodech;
- užívá cca 5% komerčních řešičů

Metoda konečných objemů – Finite Volume Method

- využívá integrálního tvaru rovnic;
- aproximace toků přes hranice kontrolního objemu;
- užívá cca 80% komerčních řešičů.

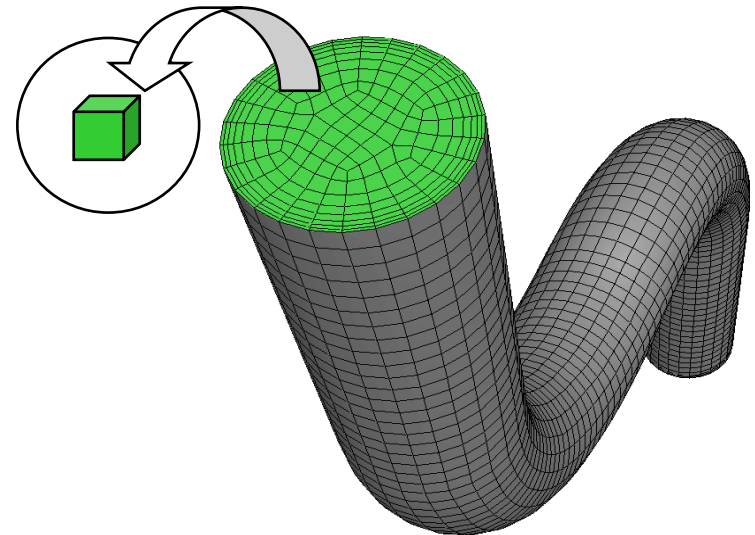
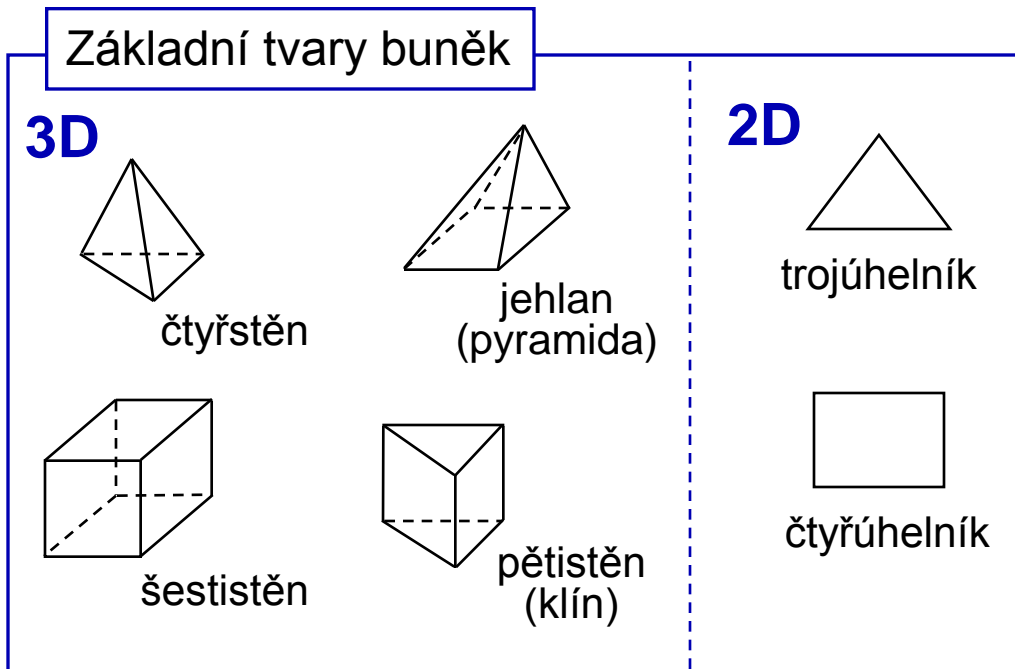
Metoda konečných prvků – Finite Element Method

- podobná metodě konečných objemů, ale řešení je aproximováno po částech lineární funkcí;
- nejvíce užívaná při pevnostních výpočtech, málo vhodná pro turbulentní proudění;
- užívá cca 15% komerčních řešičů.

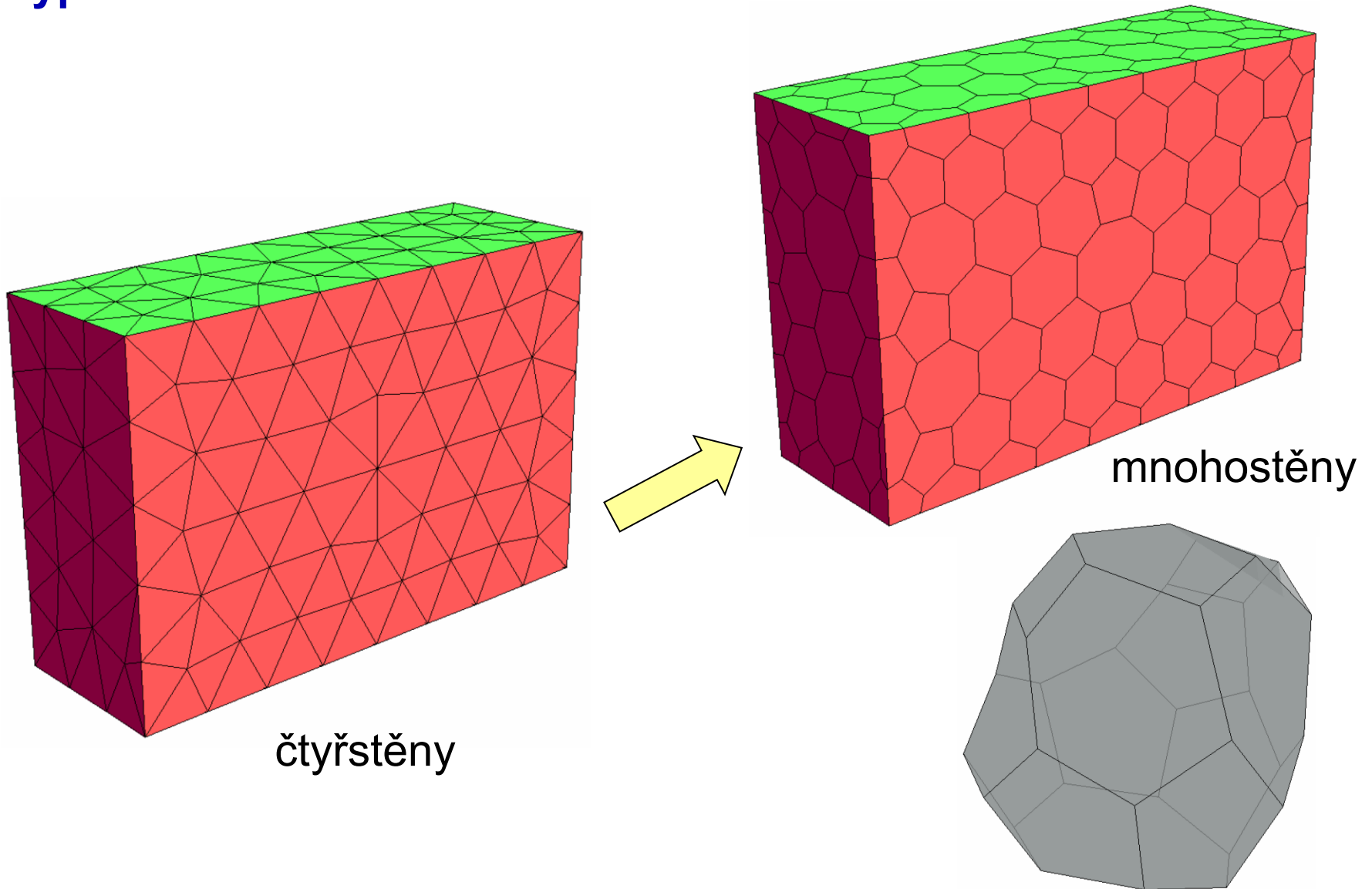
Metoda konečných objemů

Řešená oblast je rozdělena na konečný počet malých kontrolních objemů pomocí sítě (grid, mesh).

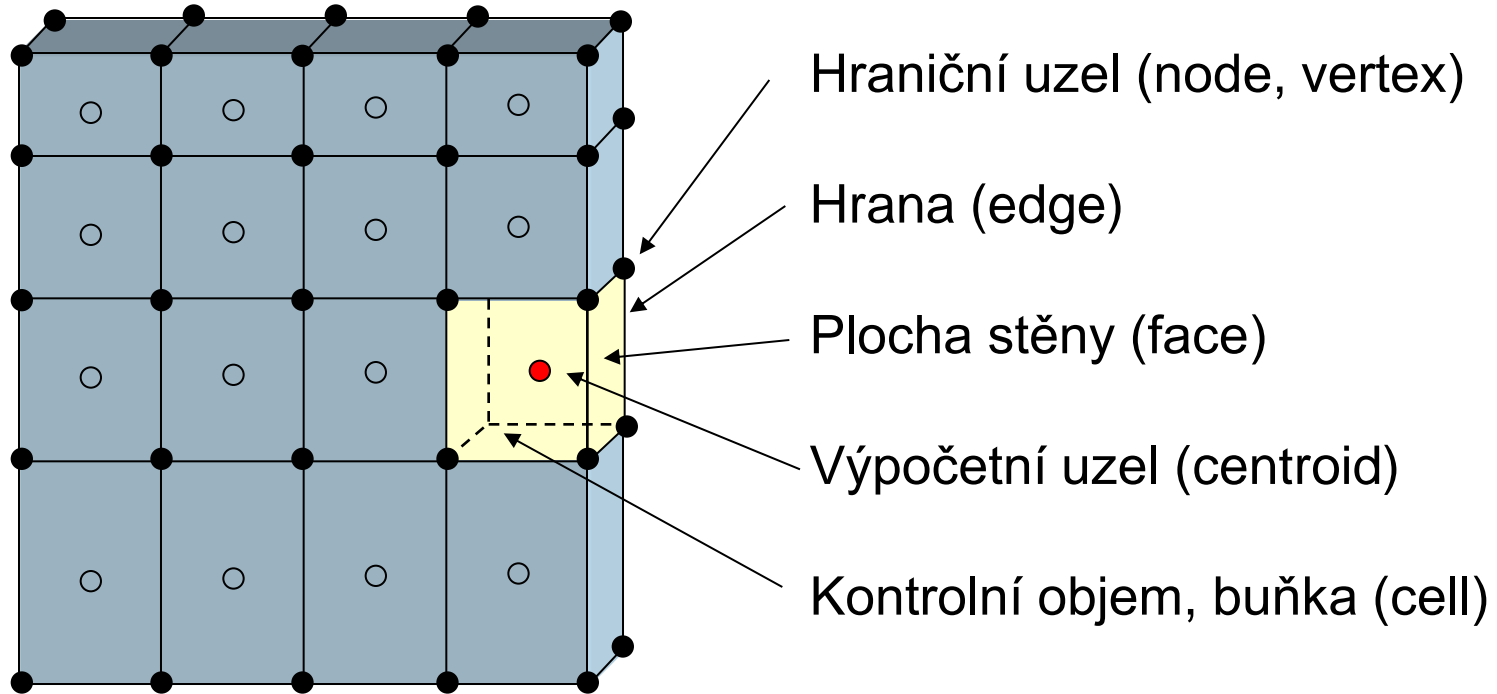
Základní rovnice (kontinuity, pohybové, energie, transportní, ...), které popisují spojité prostředí, jsou diskretizovány do soustavy algebraických rovnic.



Výpočetní síť



Výpočetní síť - základní označení

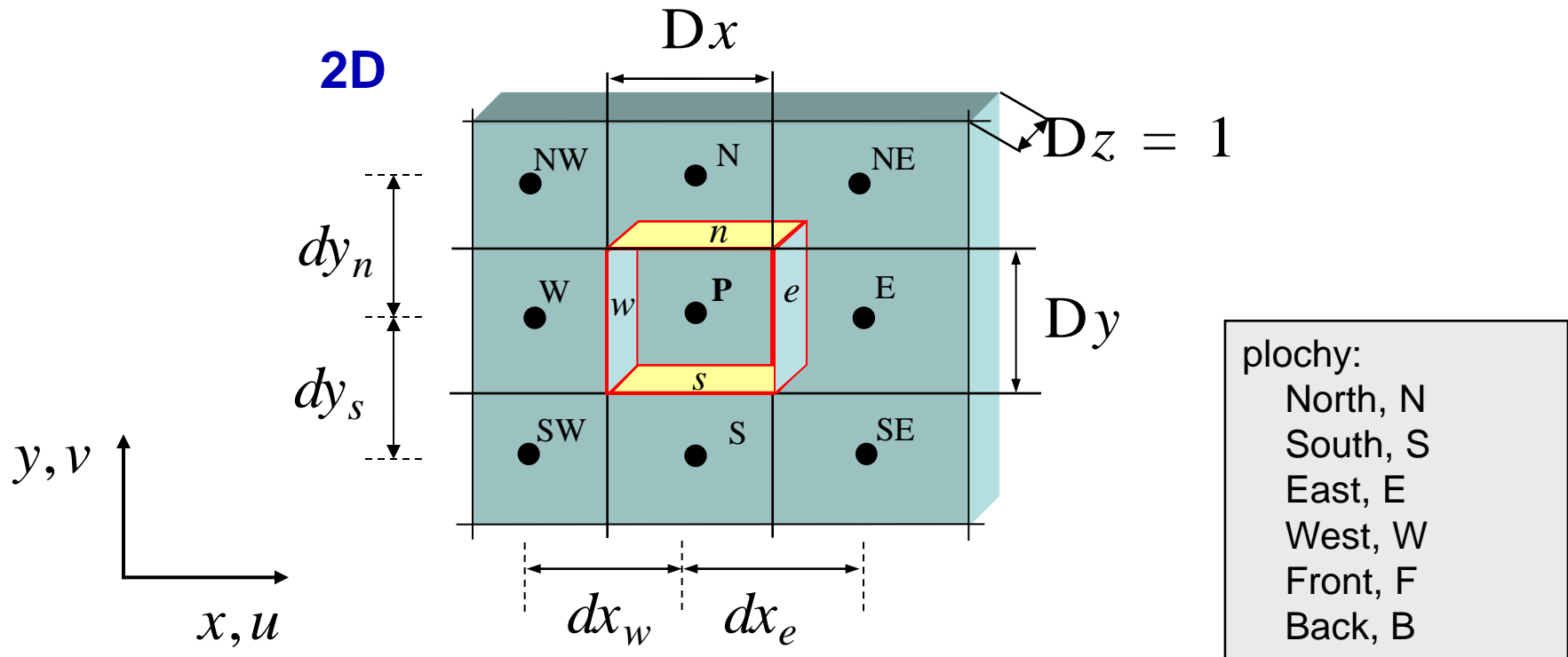


Kontrolní objemy se nepřekrývají.

Hodnoty složek rychlosti a skalárních veličin jsou v geometrických středech kontrolních objemů, hodnoty na hranicích objemu se získávají interpolací.

Výpočetní síť – kontrolní objem

Tok přes hranice kontrolního objemu je integrálním součtem přes čtyři (2D) nebo šest (3D) ploch kontrolního objemu.



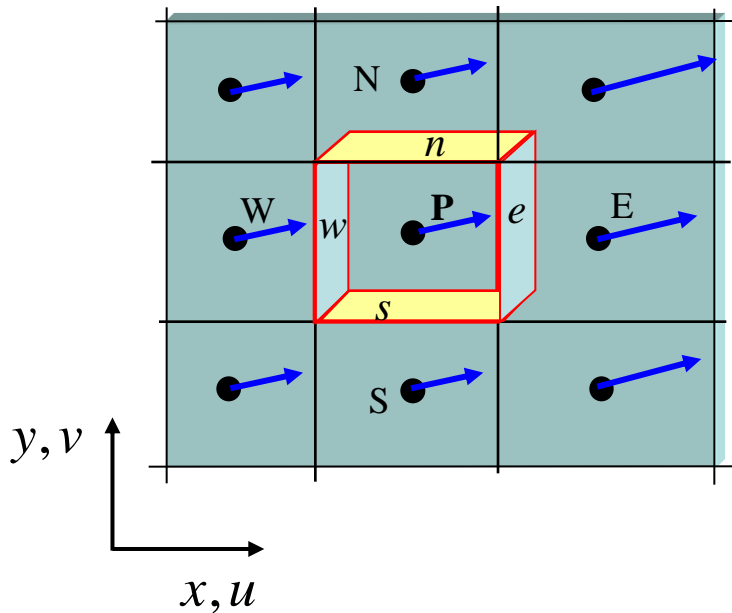
Metoda konečných objemů

Diskretizace rovnic (příklad)

- transportní rovnice (konstantní hustota, laminární tok, ustálený stav, 2D)

$$\frac{\partial (cu)}{\partial x} + \frac{\partial (cv)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) + S$$

2D



Stěny:

A_w, A_n, A_e, A_s : plochy

c_w, c_n, c_e, c_s : koncentrace

u_w, u_n, u_e, u_s : rychlost ve směru x

v_w, v_n, v_e, v_s : rychlosti ve směru y

Centra buněk:

c_W, c_N, c_E, c_S : koncentrace

u_W, u_N, u_E, u_S : rychlosti ve směru x

v_W, v_N, v_E, v_S : rychlosti ve směru y

$c \equiv c_A$ – koncentrace složky A , $D \equiv D_A$ – difuzní koeficient, $S \equiv S_A$ - zdroj

Metoda konečných objemů

Diskretizace rovnic (příklad)

$$\frac{\partial (cu)}{\partial x} + \frac{\partial (cv)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) + S$$

Integrace transportní rovnice přes objem

$$\int_V \frac{\partial (cu)}{\partial x} dV + \int_V \frac{\partial (cv)}{\partial y} dV = \int_V \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) dV + \int_V \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) dV + \int_V S dV$$

Aplikace Gaussovy věty $\int_V \frac{\partial \phi_j}{\partial x_j} dV = \int_A \phi_j n_j dA$ $n_j = (n_x, n_y, n_z)$

$$\int_A cu n_x dA + \int_A cv n_y dA = \int_A D \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) n_x dA + \int_A D \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) n_y dA + \int_V S dV$$

Metoda konečných objemů

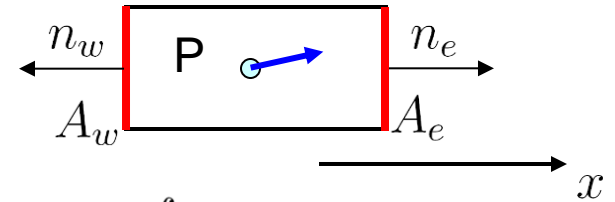
Diskretizace rovnic (příklad)

$$\int_A c u n_x dA + \int_A c v n_y dA = \int_A D \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) n_x dA + \int_A D \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) n_y dA + \int_V S dV$$

Tok napříč kontrolního objemu je suma přes stěny.

$$\int_{A_e} c u n_e dA + \int_{A_w} c u n_w dA$$

$$\int_A f_j n_j dA = \sum_k \int_{A_k} f_j n_j dA$$



$$(c u A)_e - (c u A)_w$$

Aproximace plošného integrálu ze střední hodnoty na stěně. $\int_{A_e} f dA \approx f_e A_e$

Po úpravě

$$A_e u_e c_e - A_w u_w c_w + A_n v_n c_n - A_s v_s c_s = \left(D A \frac{dc}{dx} \right)_e - \left(D A \frac{dc}{dx} \right)_w + \left(D A \frac{dc}{dy} \right)_n - \left(D A \frac{dc}{dy} \right)_s + S_P$$

$$S_P = \bar{S} \Delta V$$

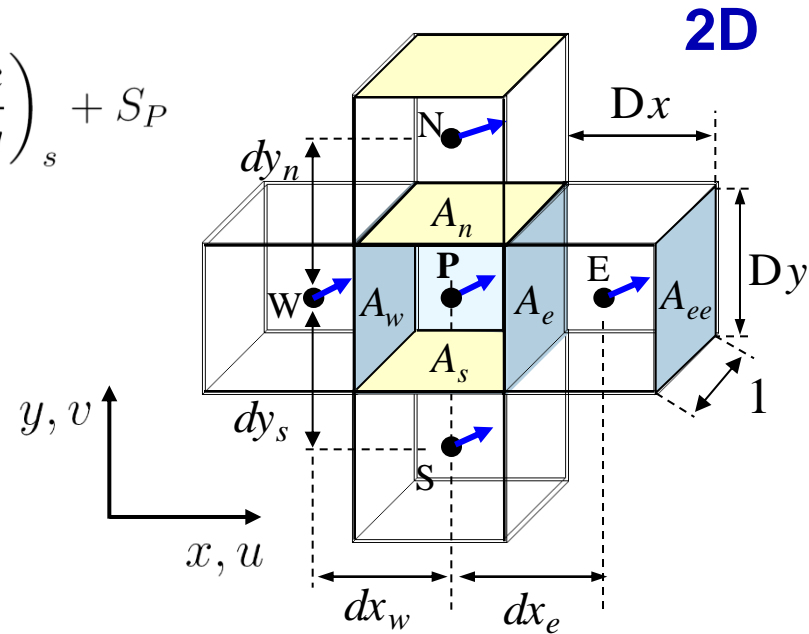
Diskretizace rovnic (příklad)

$$A_e u_e c_e - A_w u_w c_w + A_n v_n c_n - A_s v_s c_s = \left(D A \frac{dc}{dx} \right)_e - \left(D A \frac{dc}{dx} \right)_w + \left(D A \frac{dc}{dy} \right)_n - \left(D A \frac{dc}{dy} \right)_s + S_P$$

Diferenční aproximace vpřed

$$\left(\frac{d\phi}{dx} \right)_i = \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\Delta x}$$

$$D A_e \frac{c_{ee} - c_e}{\Delta x}$$



Určení hodnot v centrech buněk

- nejjednodušší interpolační schéma: **protiproud 1. řádu**

⇒ předpokládá se, že hodnota na stěně je rovná hodnotě v centru buňky ležící vlevo (proti proudu), např. $\phi_{ee} = \phi_E$, $\phi_e = \phi_P$, $\phi_w = \phi_W$

$$A_e u_P c_P - A_w u_W c_W + A_n v_P c_P - A_s v_S c_S =$$

$$D A_e \frac{c_E - c_P}{\delta x_e} - D A_w \frac{c_P - c_W}{\delta x_w} + D A_n \frac{c_N - c_P}{\delta y_n} - D A_s \frac{c_P - c_S}{\delta y_s} + S_P$$

Diskretizace rovnic (příklad)

$$A_e u_P c_P - A_w u_W c_W + A_n v_P c_P - A_s v_S c_S = \\ D A_e \frac{c_E - c_P}{\delta x_e} - D A_w \frac{c_P - c_W}{\delta x_w} + D A_n \frac{c_N - c_P}{\delta y_n} - D A_s \frac{c_P - c_S}{\delta y_s} + S_P$$



$$c_P \left(A_n v_P + A_e u_P + D \frac{A_w}{\delta x_w} + D \frac{A_n}{\delta y_n} + D \frac{A_e}{\delta x_e} + D \frac{A_s}{\delta y_s} \right) = \\ c_W \left(A_w u_W + \frac{A_w}{\delta x_w} \right) + c_N \left(D \frac{A_n}{\delta y_n} \right) + c_E \left(D \frac{A_e}{\delta x_e} \right) + c_S \left(A_s v_S + D \frac{A_s}{\delta y_s} \right) + S_P$$



$$a_P c_P = a_W c_W + a_N c_N + a_E c_E + a_S c_S + b$$



$$a_P c_P = \sum_{k=1}^{N_C} a_k c_k + b$$

- N_C – počet sousedících buněk
- koeficienty a_k a b jsou odlišné pro každou buňku při každé iteraci
- pole koncentrací je vypočítáno přepočtem c_P z této rovnice iteračně pro každou buňku v řešené oblasti

Metoda konečných objemů

Interpolační schémata (prostorová)

Protiproudá interpolace 1. řádu (First-order upwind)

- Předpokládá se, že hodnota ϕ na stěně je rovná hodnotě v centru buňky ležící vlevo (proti proudu).

Protiproudá interpolace 2. řádu (Second order upwind)

- Určuje hodnotu ϕ na stěně z hodnot v centrech dvou buněk ležící vlevo (proti proudu).

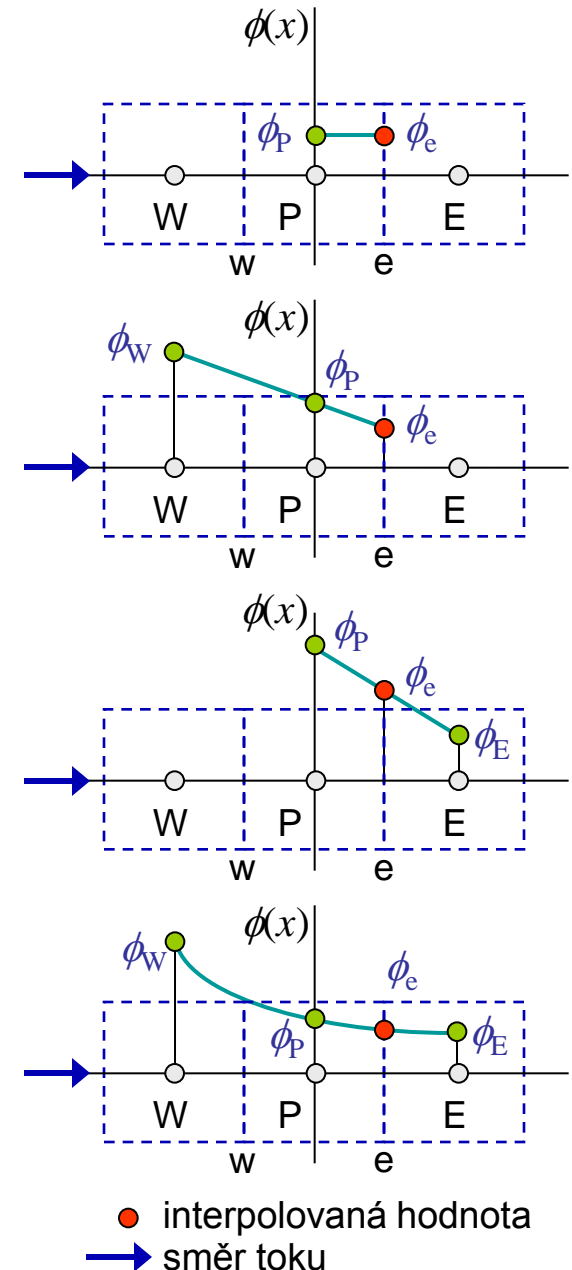
Centrální diference (Central differencing)

- Určíme hodnotu ϕ na stěně pomocí lineární interpolace mezi hodnotami ve středu sousedících buněk.

Protiproudá kvadratická interpolace (QUICK)

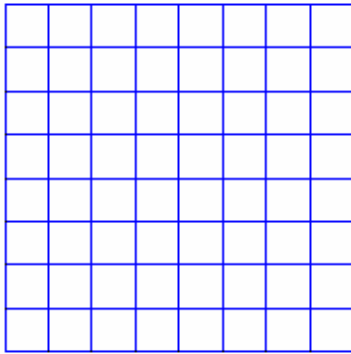
- Kvadratická křivka je aproximována ze dvou uzlů ležící proti proudu (upstream) a jednoho uzlu, který leží po proudu (downstream).

$$\phi_e = \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_E - \frac{1}{8}\phi_W$$

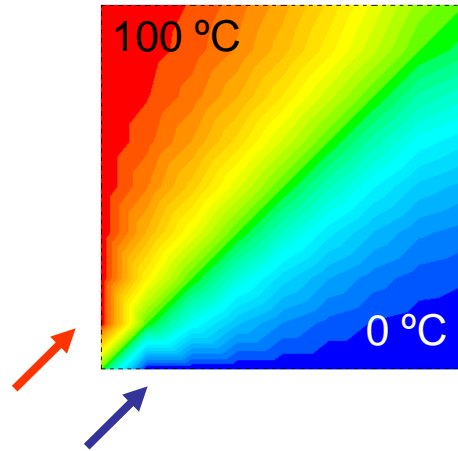


Interpolační schémata (příklad)

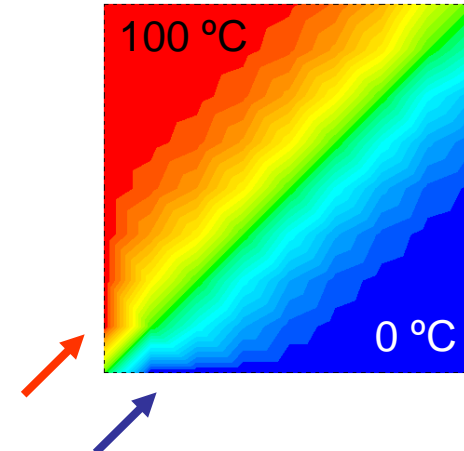
8 x 8



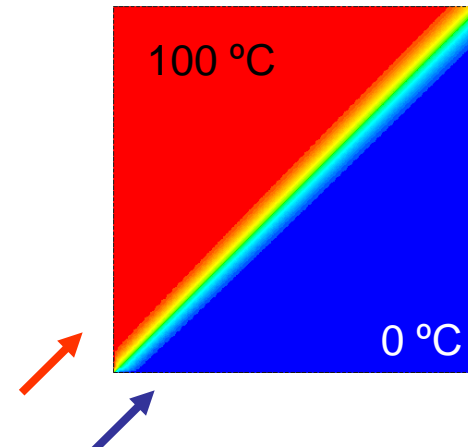
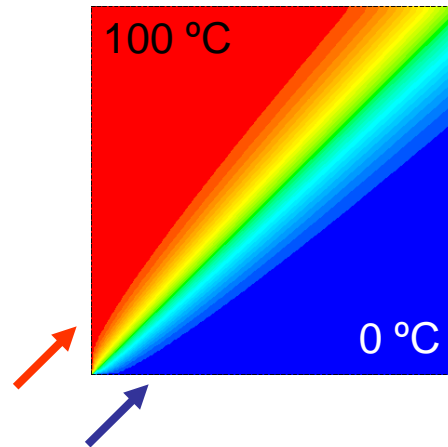
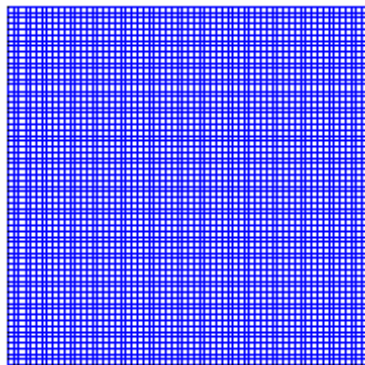
Protiproudé
1. řádu



Protiproudé
2. řádu



64 x 64



zdroj: www.bakker.org

Problém s tlakem

Gradienty tlaku se objevují v momentových rovnicích (rovnice hybnosti), proto je třeba tlakové pole počítat s ostatními rovnicemi.

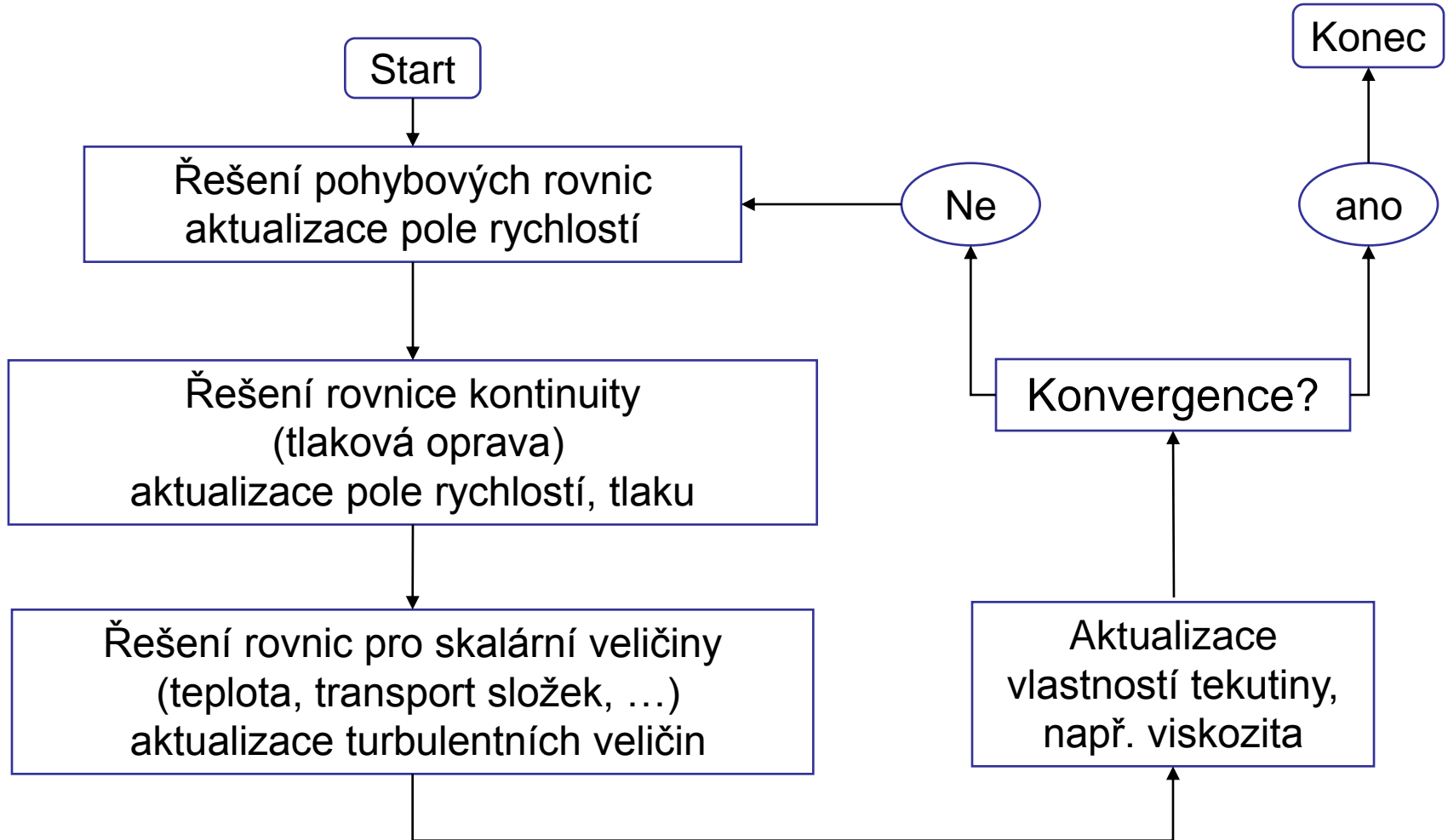
Stlačitelné tekutiny

- Rovnice kontinuity může být užita k výpočtu hustoty.
- Teplota navazuje na rovnici entalpie.
- Tlak může být počítán z rovnice ideálního plynu $p = p(\rho, T)$.

Nestlačitelné tekutiny

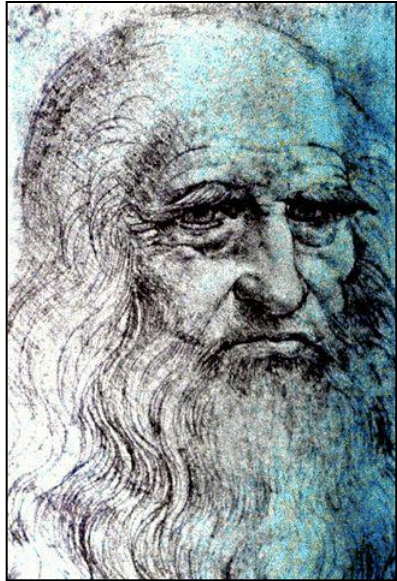
- Hustota je konstantní a není spojena s tlakem.
- Tlak se objevuje ve všech třech momentových rovnicích. Rychlostní pole musí také vyhovovat rovnici kontinuity. Ačkoliv neexistuje určitá rovnice pro tlak, máme čtyři rovnice pro čtyři proměnné. Tím je počet rovnic konečný.

Nestlačitelné tekutiny – schéma řešení



Turbulence

Leonardo da Vinci
(1452 – 1519)



Modelování turbulentního proudění

Přímá numerická simulace - Direct Numerical Simulation (DNS)

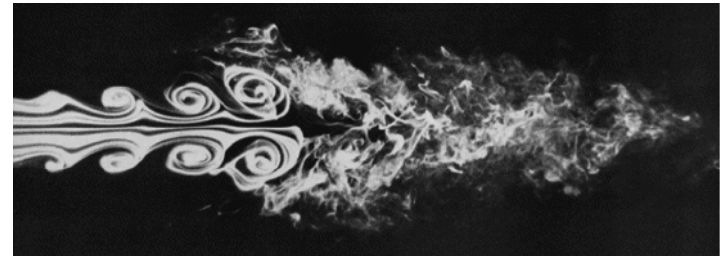
- Počítá se celé spektrum vírů všech měřítek.
- Stále nepoužitelné pro praktické úlohy.
- $N_{\text{buněk}} \sim (3\text{Re})^{9/4}$ $\text{Re} = 5000 \rightarrow N_{\text{buněk}} = 630 \times 10^6$

Metoda velkých vírů - Large Eddy Simulation (LES)

- Velké víry počítány přímo, malé modelovány.
- Výpočetně méně náročné než DNS, ale pro vysoká Re čísla vyžaduje velký výpočetní výkon.

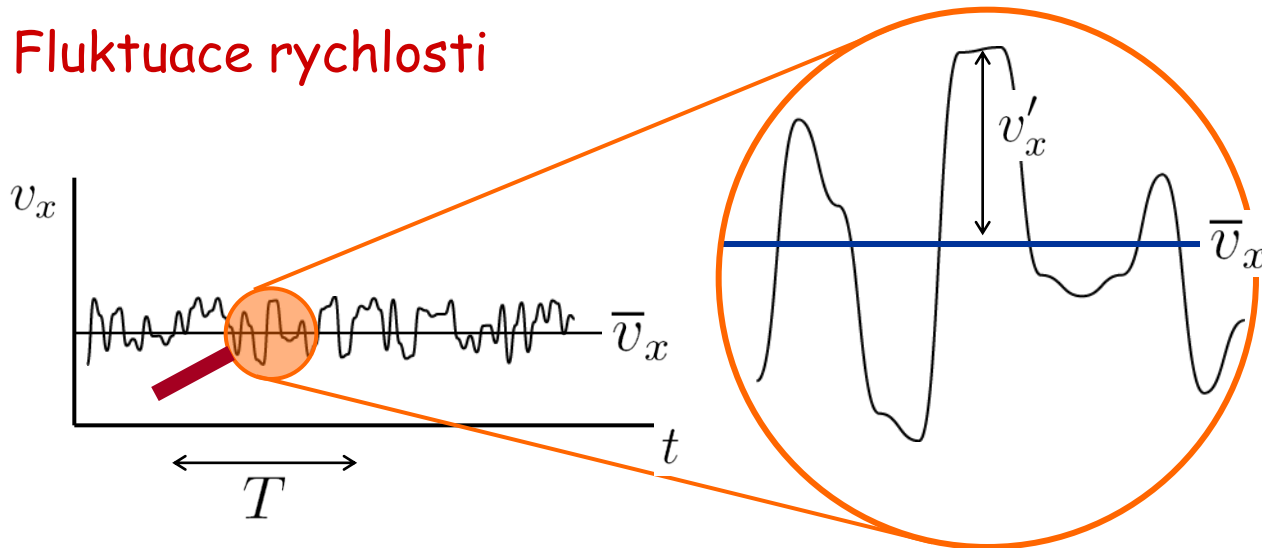
Reynoldsova metoda časového středování Navierových-Stokesových rovnic

- Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)
- Řešení středovaných Navierových-Stokesových rovnic.
- Modelování vírů všech měřítek.
- Používáno na průmyslové aplikace.
- Statistické modely turbulence
 - Standard k-eps
 - RNG k-eps
 - Realizable k-eps
 - ...



Modelování turbulentního proudění (RANS)

Fluktuace rychlosti



$$v(x, y, z, t) = \bar{v}(x, y, z, t) + v'(x, y, z, t)$$

$$v_i = \bar{v}_i + v'_i \quad i = x, y, z$$

Střední hodnota

$$\bar{v}_x = \frac{1}{T} \int_0^T v_x dt$$

Střední hodnota fluktuací

$$\bar{v}'_x = \frac{1}{T} \int_0^T v'_x dt = 0$$

Všechny hydrodynamické veličiny, které popisují turbulentní proudění, mají náhodný charakter, obvykle s normálovým rozložením

- vyšetřují se časově vyhlazené charakteristiky, tj. statistický popis

Navierova-Stokesova rovnice

$$\frac{\partial (\rho v_i)}{\partial t} + v_j \frac{\partial (\rho v_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \right] + \rho a_i + F_i$$

po časovém středování

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \bar{v}_i)}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial (\rho \bar{v}_i)}{\partial x_j} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\eta \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{\rho v'_i v'_j} \right) + \rho a_i + F_i \end{aligned}$$

$-\overline{\rho v'_i v'_j}$ Reynoldsovo (turbulentní) napětí
- musí být modelované

Modelování turbulentního proudění (RANS)

Modely turbulence

Spalart-Allmaras

- vhodný pro rozsáhlé sítě, dobré výsledky pro tenké vrstvy (převážně 2D výpočty), rychlé výpočty
- nevhodný pro modelování ve 3D, velké cirkulace
- užití: obtékání těles (křídla, letadla, lodě, ...)

Standard k-eps

- stabilní, nejvíce užívaný v běžných technických výpočtech
- nevhodný pro složité proudění a tvary těles (s velkými gradienty)
- vhodný pro počáteční (odhadové) výpočty

RNG k-eps

- podobný jako standard k-eps, ale rozšířený o vířivý tok, rychlé toky (napětí) a místní přechodové toky
- vhodný pro výpočet vírového pole za tělesy, proudění v difuzorech a ventilátorech

Realizable k-eps

- stejné jako RNG k-eps, více přesnější a stabilnější

Standard k-omega

- vhodný pro modelování proudění v blízkosti stěn (složité toky u stěny, nepříznivé gradienty tlaku) a nízká Reynoldsova čísla (přechodové proudění)

Reynolds-stress Model

- přesné výpočty pro různé typy proudění (od přechodového k vysoce turbulentnímu)
- vhodný pro složité 3D toky, zakřivená potrubí, cyklóny, proudění u stěny
- nevýhoda: velká časová náročnost výpočtu (7 rovnic)

Modelování turbulentního proudění (RANS)

Model turbulence: standardní k - ε

$$-\overline{\rho v'_i v'_j} = \eta_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$\eta_t = \rho C_\eta \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{turbulentní viskozita, Pa s} \equiv \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$$

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{v}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{\rho v'_i v'_j} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{v}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{Pr_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(-\overline{\rho v'_i v'_j} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$C_\eta = 0,09$
$C_1 = 1,44$
$C_2 = 1,92$
$Pr_k = 1$
$Pr_\varepsilon = 1,3$

Boussinesquova hypotéza

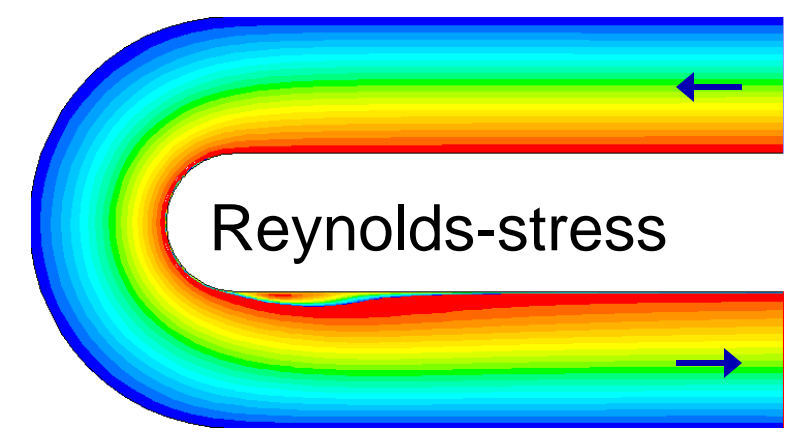
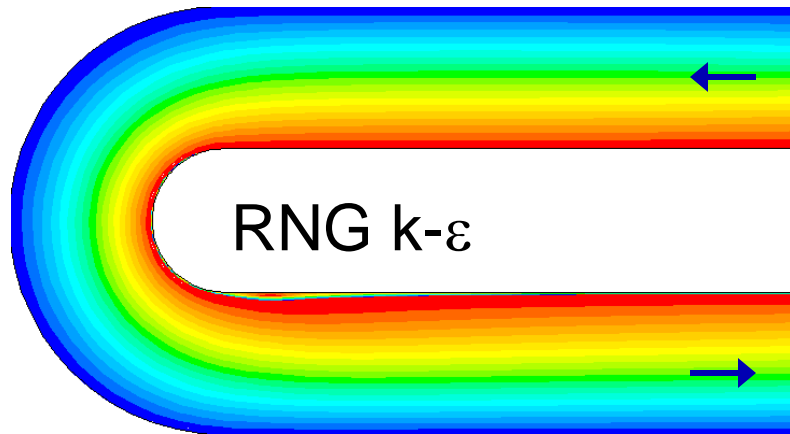
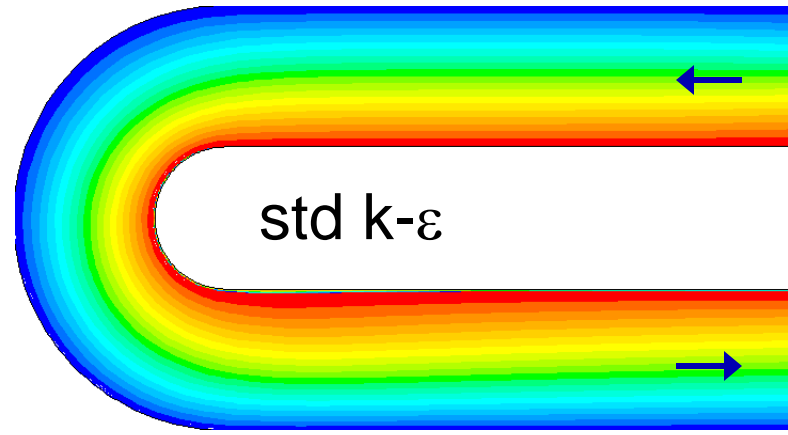
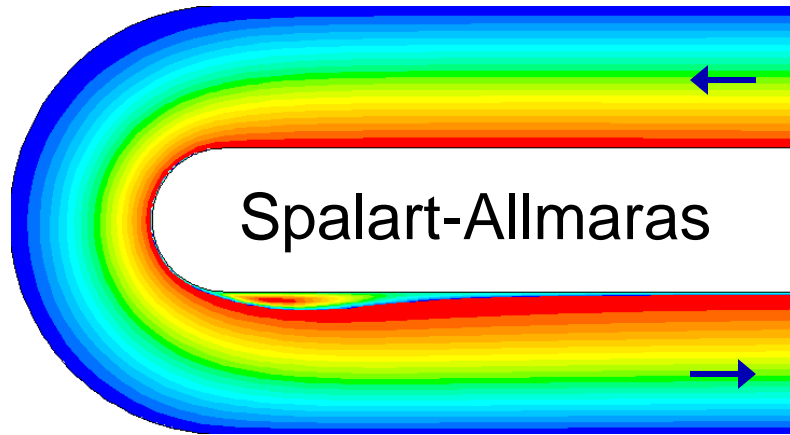
Předpokládá, že Reynoldsovo napětí může být vyjádřeno gradienty středních rychlostí.

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{v_x'^2} + \overline{v_y'^2} + \overline{v_z'^2} \right) \quad \text{kinetická energie turbulence, J kg}^{-1} \equiv \text{m}^2 \text{s}^{-2}$$

$$\varepsilon = -\frac{dk}{dt} \quad \text{rychlost disipace kinetické energie turbulence, J kg}^{-1} \text{s}^{-1} \equiv \text{m}^2 \text{s}^{-3}$$

Modelování turbulentního proudění (RANS)

Modely turbulence



→ směr toku

zdroj: Monson *et al.* (1990)

Large Eddy Simulation, LES

Filtrované Navierovy-Stokesovy rovnice

$$\rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \rho \bar{v}_i \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho a_i + F_i$$

Podsít'ový model Smagorinského-Lillyho

$$\tau_{ij} = 2 \eta_t \bar{S}_{ij}, \quad \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\eta_t = \rho L_s^2 |\bar{S}|, \quad |\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$$

Směšovací délka: $L_s = \min(\kappa \ell, C_s V^{1/3})$

κ je von Kármánová konstanta (0,42),

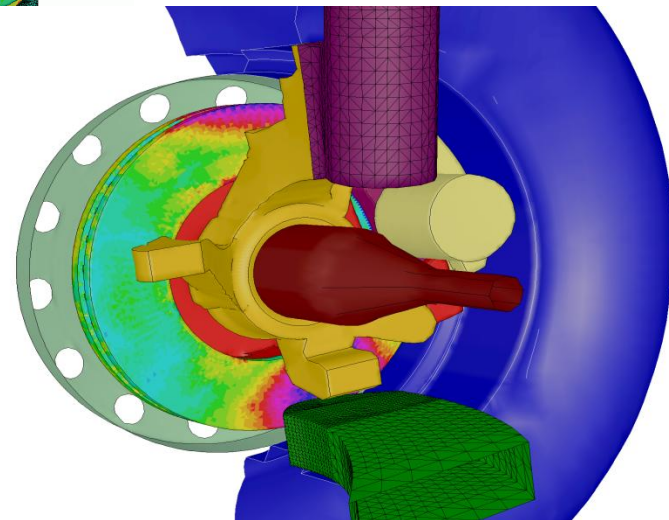
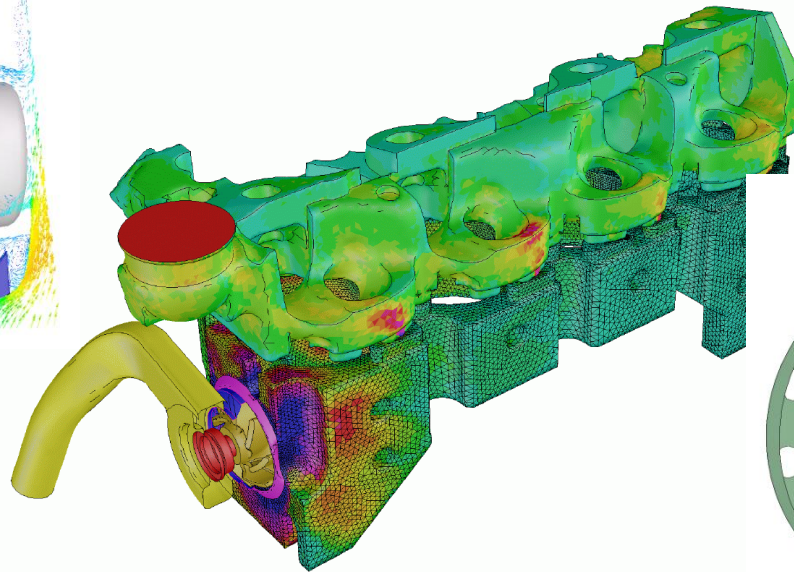
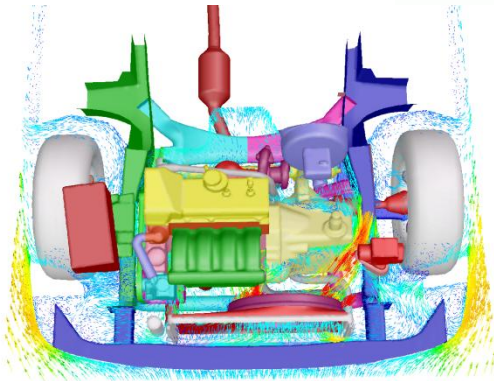
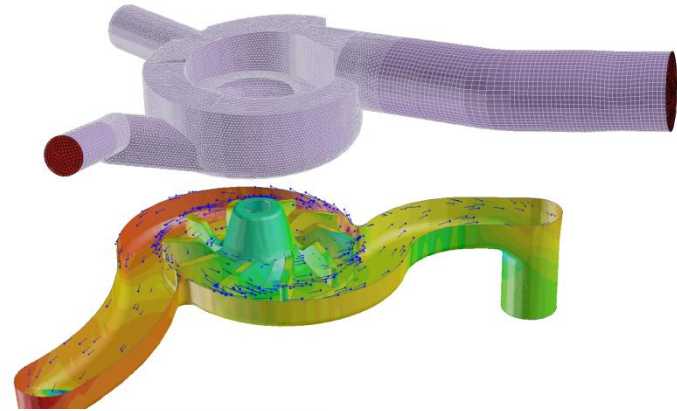
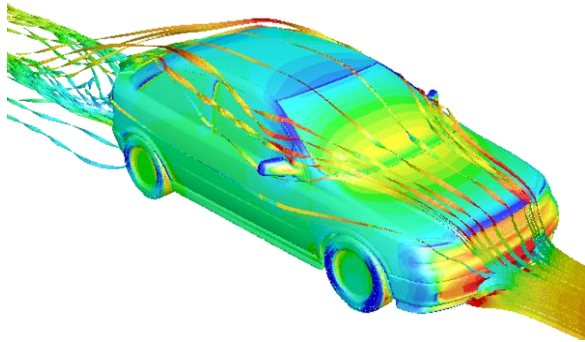
ℓ – vzdálenost k nejbližší stěně,

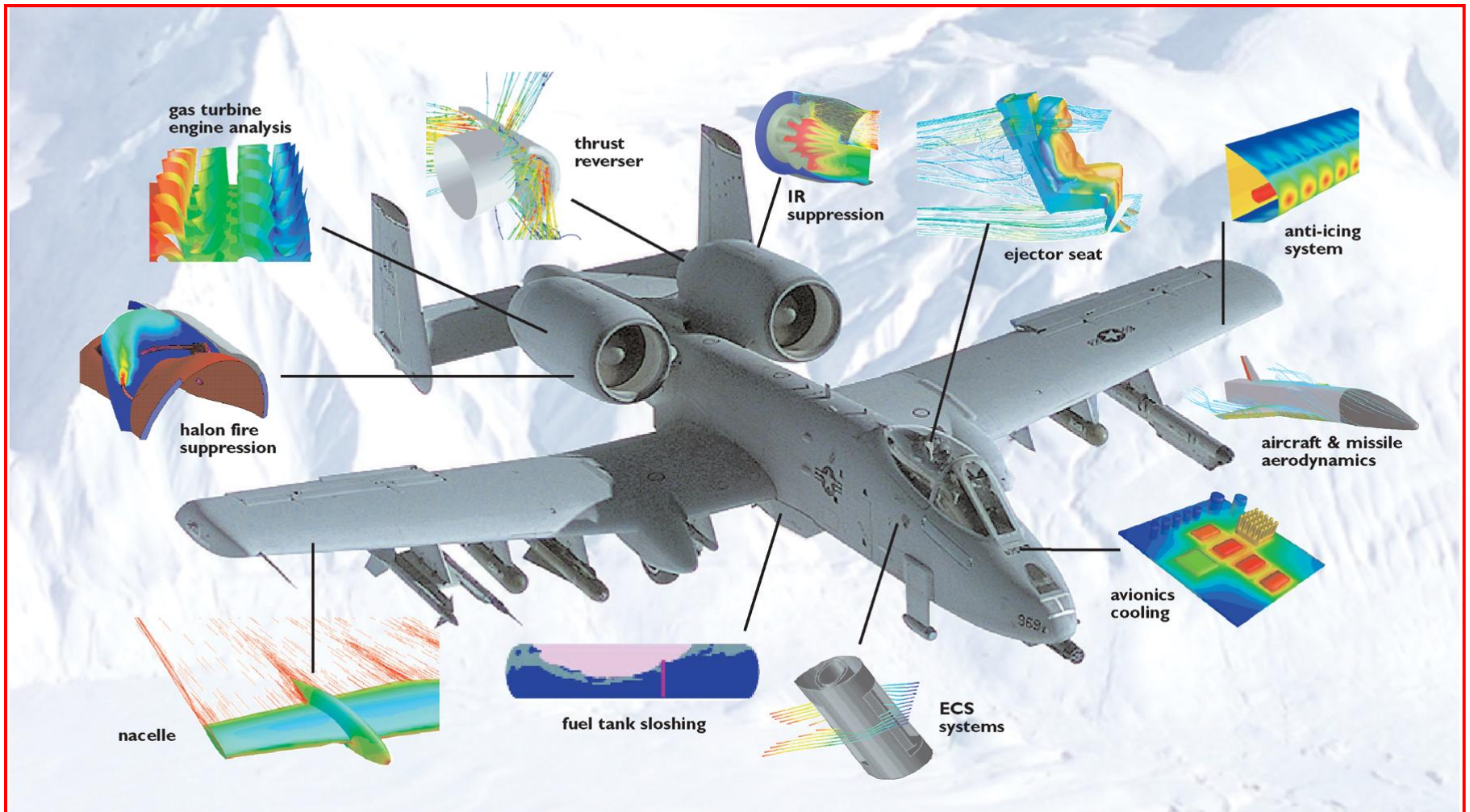
C_s – Smagorinskyho konstanta,

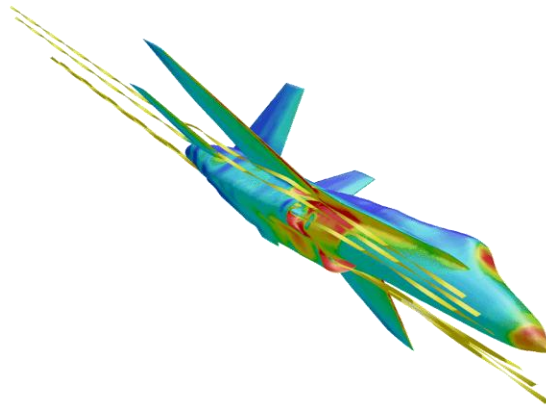
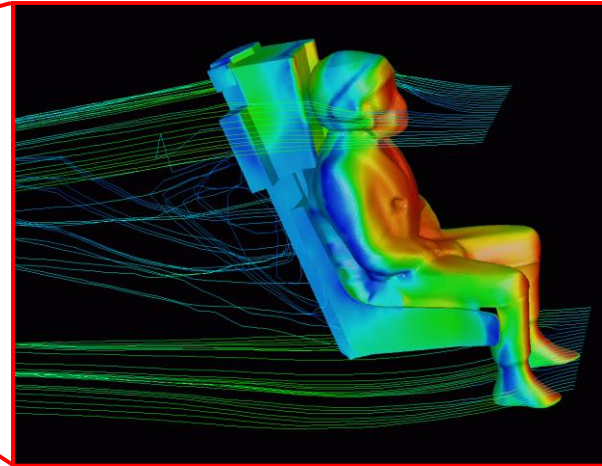
V – objem výpočetní buňky.

1. Definice cílů.
2. Stanovení modelované oblasti.
3. Vytvoření výpočetní sítě.
4. Výběr správného řešiče.
5. Nastavení parametrů numerického modelu.
6. Řešení.
7. Zkonvergování řešení.
8. Prohlížení výsledků.
9. Adaptace výpočetní sítě.
10. Revize modelu.

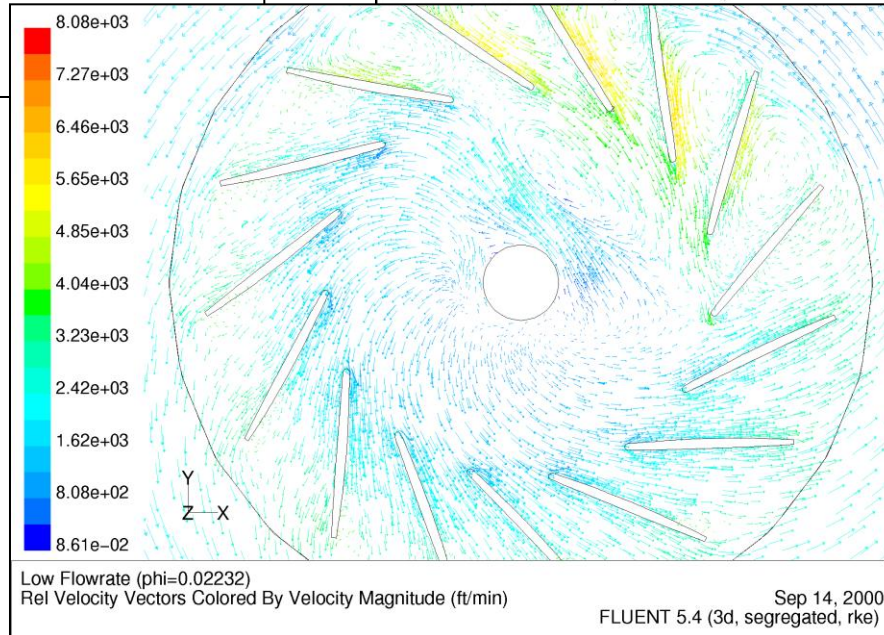
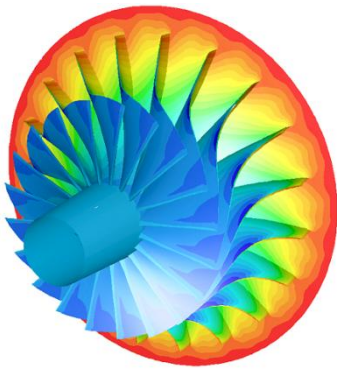
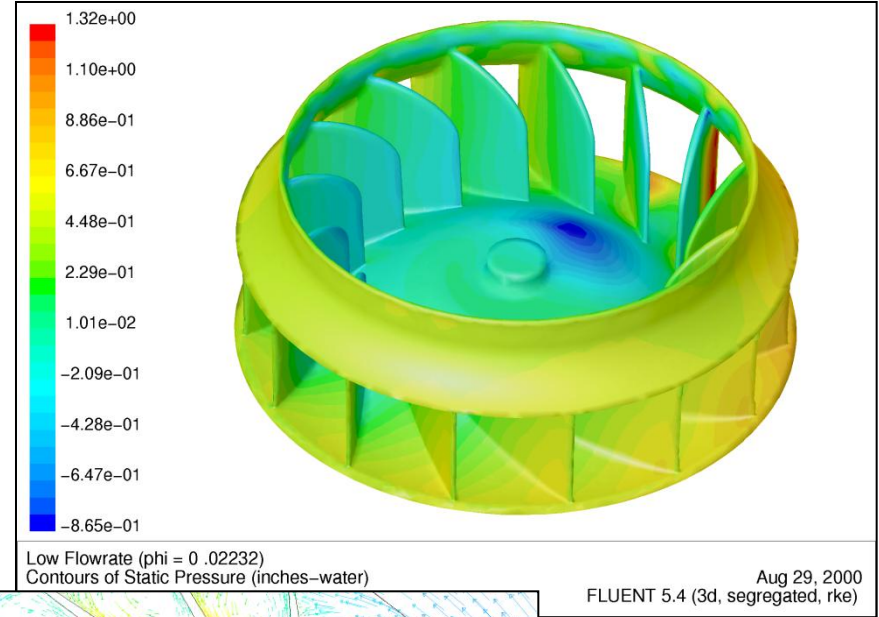
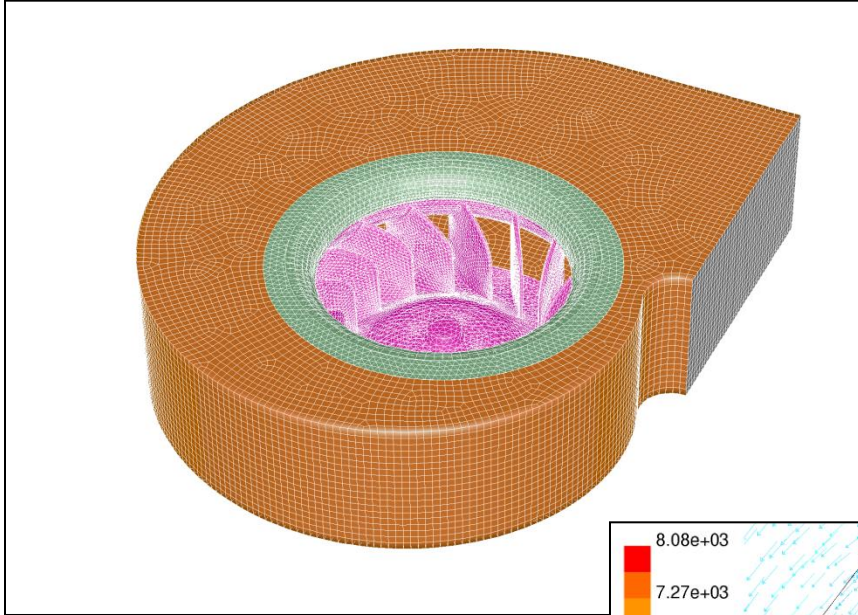
Automobilový průmysl





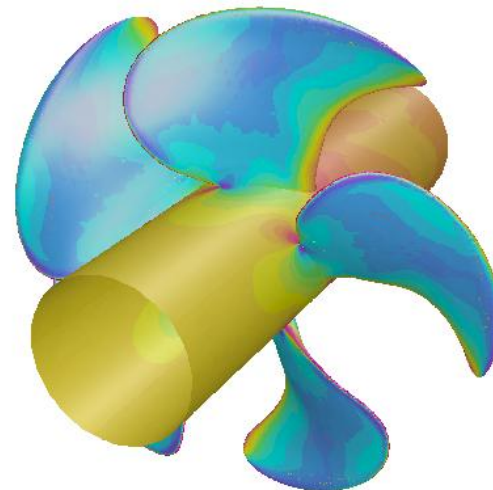
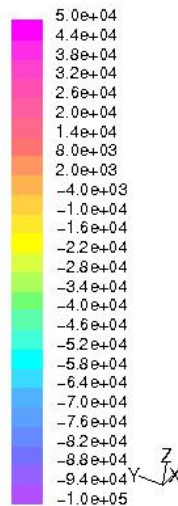
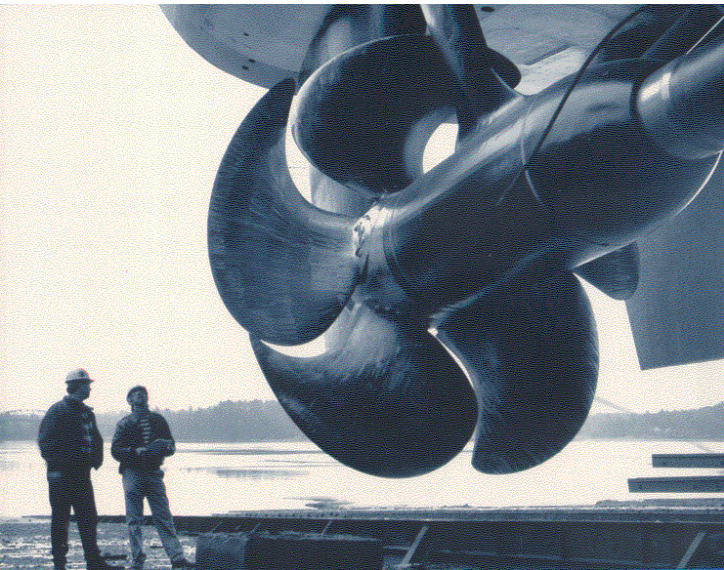
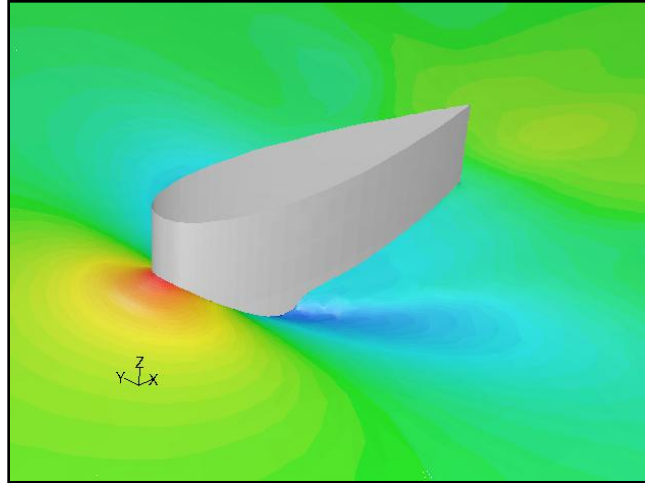
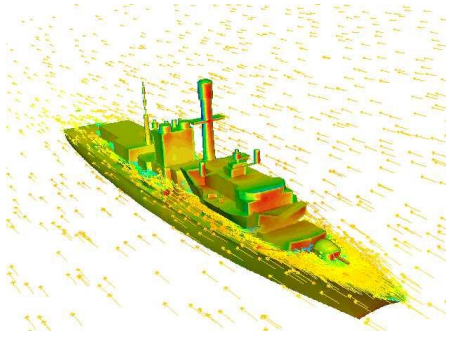


Turbíny, čerpadla

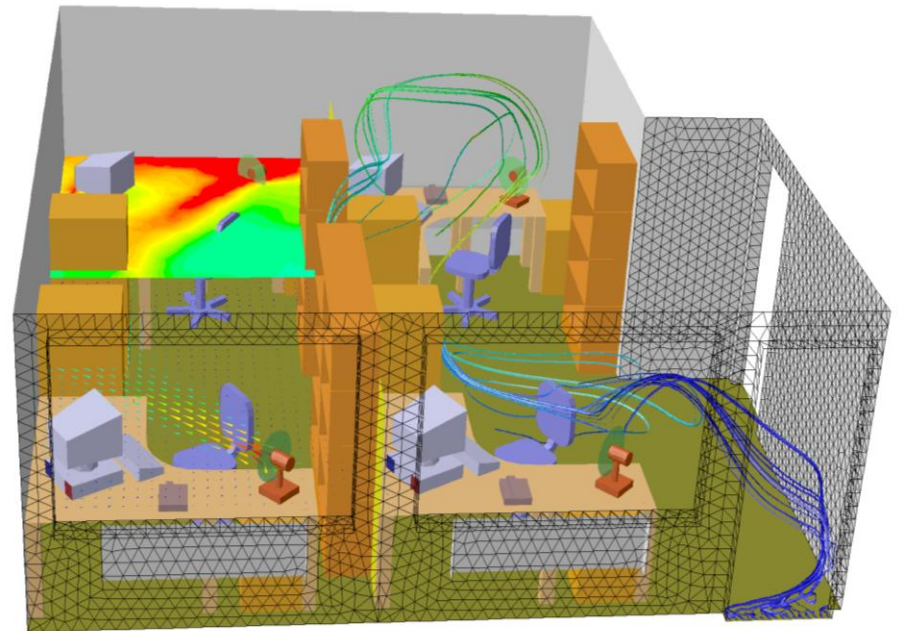
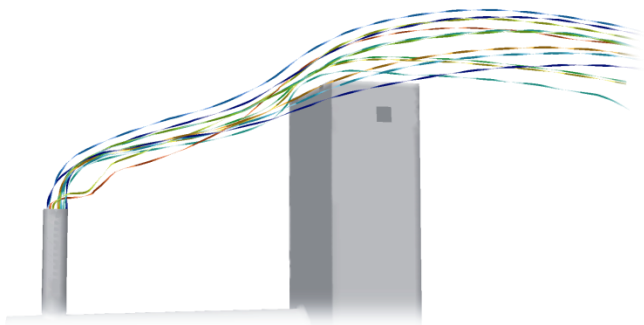
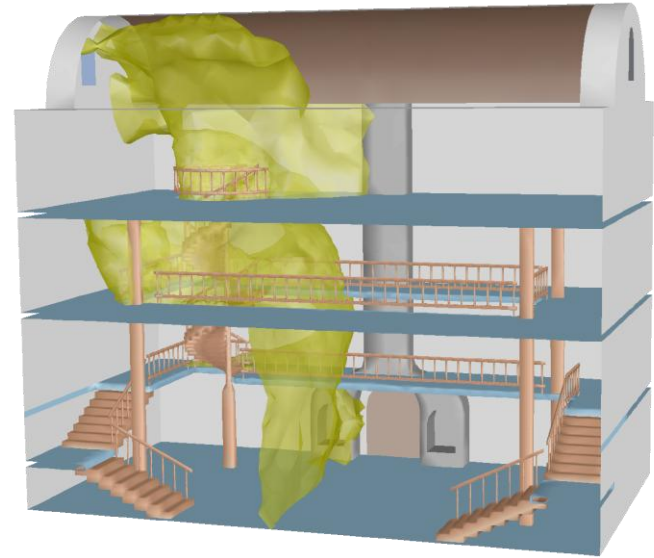
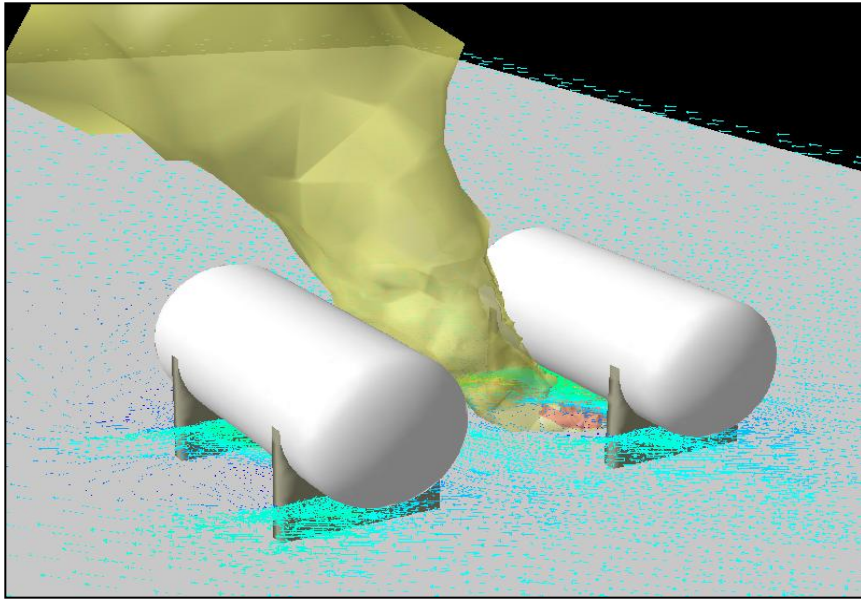


Aplikace CFD

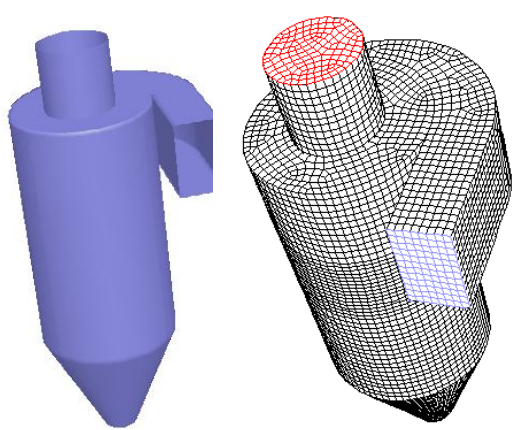
Lodní průmysl



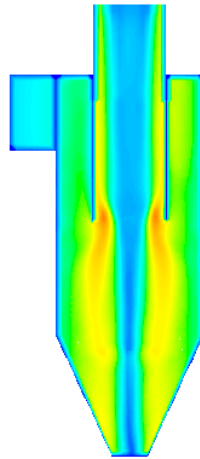
zdroj:  **FLUENT**
INCORPORATED



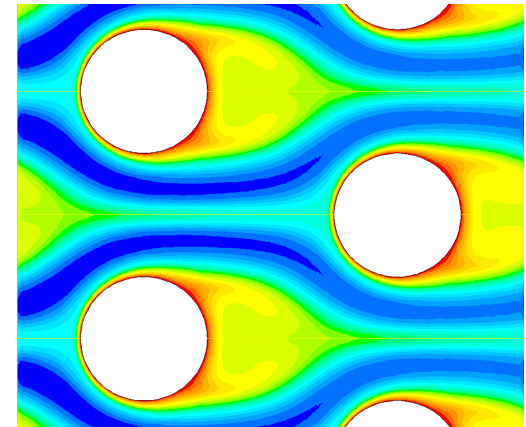
Chemický průmysl



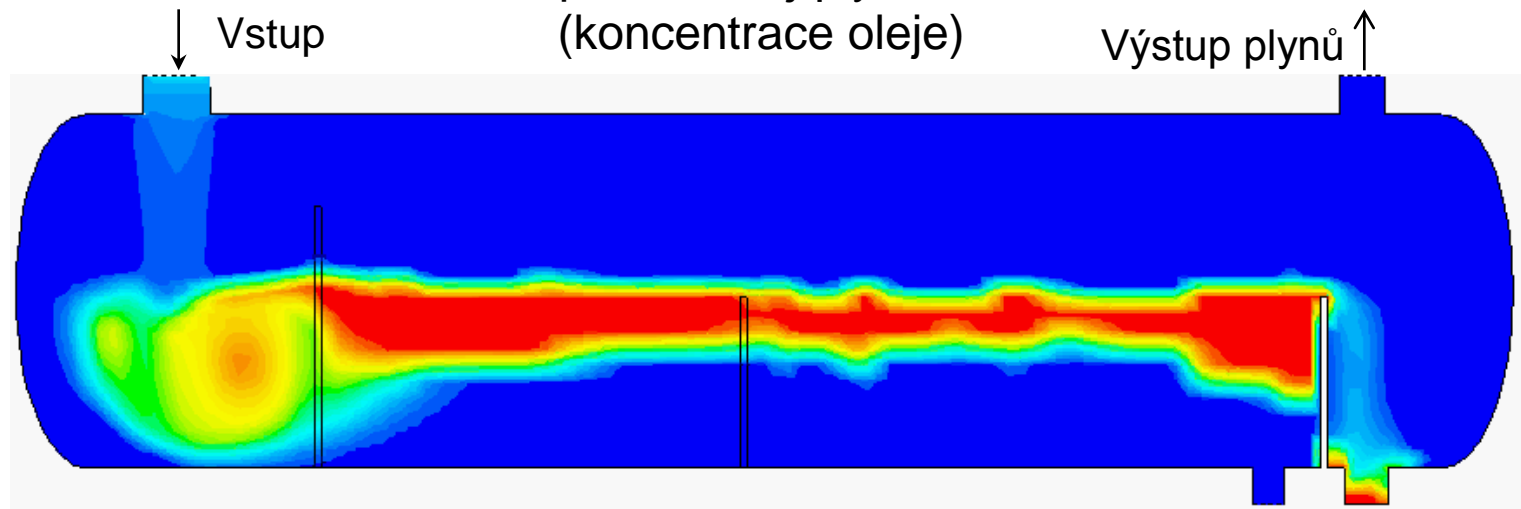
Cyklon



Teplotní profil trubkového výměníku tepla



Separátor olej-plyn-voda
(koncentrace oleje)



Shrnutí výhod CFD

Nízké náklady

- Užití experimentů pro získání základní inženýrských dat pro návrh průmyslového zařízení může být nákladné.
- Počítačové simulace jsou relativně málo nákladné, výpočetní čas se bude dále snižovat s rostoucím výkonem počítačů.

Rychlost

- CFD výpočtu mohou proběhnou v krátké době.
- Získané výsledky se mohou okamžitě užít při návrhu nebo úpravě zařízení.

Schopnost simulací reálných podmínek

- Některé poznatky je obtížné (nemožné) získat experimentálně, např. rychlostní profily v celém aparátu, požáry, výbuchy,
- Pomocí CFD můžeme teoreticky simulovat kterékoliv fyzikální podmínky.

Výsledky CFD simulací ověřujeme experimenty (pokud to jde).