

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

# MODELOVÁNÍ PŘENOSU TEPLA, HMOTY A HYBNOSTI

---

Návody do cvičení

Milada Kozubková

Marian Bojko

Veronika Mořkovská

Patrik Marcalík

Ostrava 2020

## **Anotace**

Cílem je stručné seznámení studenta s e základními pojmy přenosu hmoty, hybnosti a tepla v aplikacích na tepelné výměníky. Následuje ilustrativní příklad obsahující definování problému, fyzikálních vlastností proudících médií, okrajových podmínek. S využitím software Ansys – Fluent se realizuje příprava geometrie, tvorba výpočtové sítě, samotný výpočet a zhodnocení výsledků a jejich orovnění s analytickým řešením. Dále je uvedena řada příkladů k řešení dle výše popsaného postupu. Po prostudování modulu by měl student být schopen popsat problém výměníku, sestavit fyzikální a matematický model, připravit daný problém pro numerický výpočet a tento výpočet také provést a vyhodnotit. Poté vyhodnotit numerický výpočet s analytickým řešením.

## **OBSAH**

<b>1</b>	<b>PŘENOS HMOTY, HYBNOSTI A TEPLA .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>TEPELNÉ VÝMĚNÍKY .....</b>	<b>6</b>
2.1	Tepelný výkon.....	6
	<b>Tepelný výkon lze určit jako hodnotu spočtenou ve Fluentu.....</b>	<b>8</b>
2.2	Tlaková ztráta.....	8
2.3	Bezrozměrná kritéria .....	9
<b>3</b>	<b>FOURIERŮV ZÁKON - VEDENÍ TEPLA V TYČI.....</b>	<b>13</b>
3.1	ANSYS Workbench.....	14
3.2	ANSYS DesignModeler .....	14
3.3	ANSYS Meshing .....	20
3.4	ANSYS Fluent.....	28
3.5	Varianty výpočtů .....	45
<b>4</b>	<b>LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ – PROUDĚNÍ VODY MEZI DESKAMI .....</b>	<b>50</b>
4.1	Vytvoření geometrie a sítě .....	51
4.2	Výpočet ve Fluentu.....	53
4.3	Varianty výpočtů .....	63
<b>5</b>	<b>TURBULENTNÍ – PROUDĚNÍ VODY MEZI DESKAMI .....</b>	<b>64</b>
5.1	Geometrie a výpočetní síť .....	65
5.2	ANSYS Fluent.....	66
5.3	Varianty výpočtů .....	72
<b>6</b>	<b>ŘEŠENÍ VZOROVÉHO PŘÍKLADU – SOUPROUDÝ VÝMĚNÍK.....</b>	<b>73</b>
6.1	Matematický model a teoreticko-empirický odhad úlohy.....	74
6.2	Tvorba geometrie .....	75
6.3	Tvorba výpočetní sítě .....	78
6.4	ANSYS FLUENT.....	80
<b>7</b>	<b>ŠÍŘENÍ TEPLA KONDUKČÍ A KONVEKČÍ V OVZDUŠÍ.....</b>	<b>108</b>
7.1	Matematický model a teoreticko-empirický odhad úlohy.....	109
7.2	Tvorba geometrie a sítě.....	110
7.3	Výpočet problému s gravitací.....	110
7.4	Výsledky .....	113

# 1 PŘENOS HMOTY, HYBNOSTI A TEPLA

Základní zákony zachování hmoty, hybnosti a energie jsou popsány integrálními nebo parciálními diferenciálními rovnicemi s okrajovými a počátečními podmínkami, které významně ovlivňují výsledek řešení. V obecné konzervativní formě je tvar rovnic následující:

$$\iiint_V \frac{\partial(\rho\zeta)}{\partial t} dV + \iint_S (\rho\zeta \vec{u} \cdot \vec{n}) dS = \iint_S [\alpha_\zeta \nabla \zeta] dS + \iiint_V S_\zeta dV \quad (1.1)$$

$$\text{akumulace} + \text{konvekce} = \text{difúze} + \text{zdroj}$$

kde  $\zeta$  je obecná proměnná a členy v rovnici jsou postupně konvektivní (souvisí s vektorem rychlosti proudění  $\vec{u}$ ), difúzní a zdrojový člen, proto se rovnice nazývá také konvektivně - difúzní rovnice.

Tuto rovnici lze vyjádřit v diferenciálním tvaru (obvyklejším v učebnicích hydromechaniky a termomechaniky):

$$\frac{\partial(\rho\zeta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \zeta) = \nabla \cdot [\alpha_\zeta \nabla \zeta] + S_\zeta \quad (1.2)$$

$$\text{akumulace} + \text{konvekce} = \text{difúze} + \text{zdroj}$$

Pokud  $\zeta$  představuje teplotu, příměs nebo jinou skalární veličinu, pak se jedná o lineární rovnici druhého řádu, pokud  $\zeta$  představuje složku rychlosti, jedná se o nelineární rovnici.

Úloha najít řešení rovnice (1.2) splňující okrajové i počáteční podmínky se nazývá smíšenou úlohou. Jsou-li okrajové podmínky rovny nule, nazývají se homogenní okrajové podmínky, podobně jsou-li počáteční podmínky rovny nule, nazývají se homogenní počáteční podmínky. Místo okrajových podmínek mohou být dány podmínky jiného typu, které se též nazývají okrajové. Úvaha o okrajových a počátečních podmínkách pro teplotu je platná pro obecnou proměnnou  $\zeta$ . Analytické řešení takových systémů je možné pouze ve výrazně zjednodušených aplikacích. Proto je v současné době kladen důraz na numerické řešení a s cílem specifikovat jeho možnosti.

Numerické modelování umožňuje řešit nejrůznější problémy, např.:

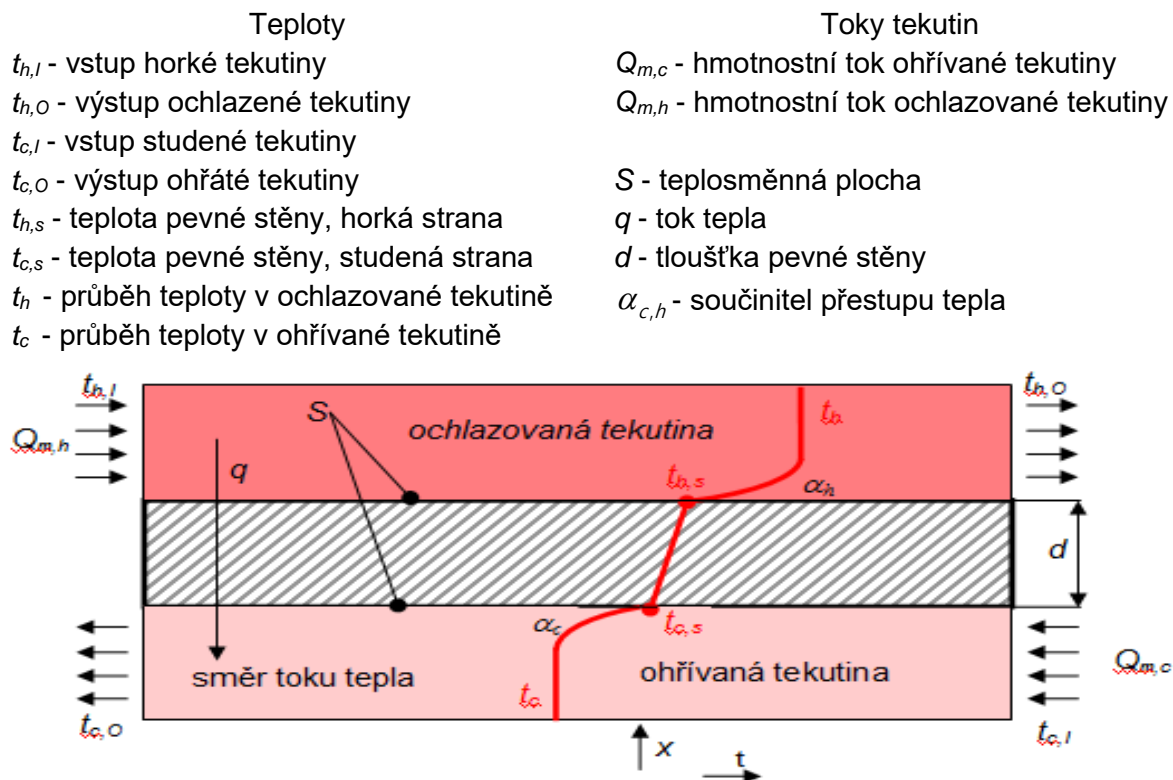
- rovinné dvourozměrné proudění, osově symetrické proudění, obecné trojrozměrné proudění
- stacionární, nestacionární a přechodové proudění
- laminární a turbulentní proudění v jednoduchých i složitých geometriích
- stlačitelné a nestlačitelné proudění
- přenos tepla, přirozená a smíšená konvekce, radiace
- přenos chemické příměsi včetně chemických reakcí, hoření
- vícefázové proudění, proudění s volnou hladinou, proudění s pevnými částicemi a bublinami
- proudění porézním prostředím, atd.

K tomuto účelu jsou dnes k dispozici výkonné CFD (Computational Fluid Dynamics) programové systémy, např. Ansys-Fluent, Ansys-CFX, OpenFoam, Star CCM+ atd. Jejich využívání je podmíněno rozšířením znalostí z oblasti proudění, numerických metod, výpočetní techniky. S rozvojem výpočetní techniky se mění požadavky na její uživatele, zejména v oblasti projektování. V poslední době nabyly poznatky vedoucí k správné volbě výpočetního modelu, výpočetní metody a interpretace výsledků, výraznou převahu nad matematickou a programátorskou stránkou řešené problematiky. Ta zůstává vyhrazena špičkovým specialistům v oblasti matematiky a programátorství a problémově orientovaným specialistům firem produkujících software.

Pokud jde o výpočetní metodu, je založena na metodě konečných objemů. Uživatel by měl znát jejich podstatu v rozsahu potřebném pro spolehlivé použití ve standardních případech. U programu Fluent je třeba vědět, s jakými tvary konečných objemů se bude pracovat, z toho vyplývá volba hustoty sítě, jaká aproximační schémata bude vhodné použít, u dynamiky mít představu o charakteru časové závislosti jednotlivých veličin a z toho vyplývající velikosti časového kroku, apod. Dále je nezbytné porozumět obecné dikci manuálů, protože bez této pomůcky není možné seriózně zpracovat zadání úlohy. Neméně významnou částí je vyhodnocení výsledků, které je obzvlášť obtížné u trojrozměrných úloh. Je optimální mít k dispozici alespoň orientační hodnoty počítaných veličin, ideální je srovnání výsledků s experimentem. Tento učební text by měl dát návod, jak postupovat při řešení výše uvedených problémů.

## 2 TEPELNÉ VÝMĚNÍKY

Výměníky tepla jsou zařízení, která zajišťují přenos vnitřní tepelné energie (entalpie) mezi dvěma a více tekutinami, mezi pevným povrchem a tekutinou, nebo mezi částicemi a tekutinou, při jejich vzájemné interakci bez dodané externí práce a tepla.



obr. 2.1 – Schéma toků tekutin a tepla výměníkem (protiproudý výměník)

Tekutiny mohou být obecně jednosložkové, nebo může jít o směs, a to jak jednofázovou, tak binární. Typickou aplikací jsou dvoumediové ohříváče a chladiče tekutin, kde jsou obě tekutiny odděleny pevnou stěnou, a výparníky v tepelných a jaderných elektrárnách. Typické výměníky lze rozdělit do několika skupin

- výměníky o trubkové, tubusové, spirální (soproudé, protiproudé a křížové),
- výměníky voštinové,
- výměníky deskové.

Základní konstrukční parametry pro popis výměníků jsou tepelný výkon a tlaková ztráta, které budou definovány pro jednoduchost dle schématu z obr. 2.1.

### 2.1 Tepelný výkon

Energetická analýza vychází z kalorimetrické rovnice, která popisuje výměnu tepla dvou nebo více objektů. Teplo prochází tedy pevnou stěnou výměníku a následně také tekutinou a je pak ovlivněno prouděním.

Vedení tepla pevnou stěnou, tedy tepelný výkon je popsán následující rovnicí

$$P = \lambda \frac{t_{h,s} - t_{c,s}}{d} S \quad (2.1)$$

kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  $t_{h,s}$  je teplota pevné stěny, horká strana,  $t_{c,s}$  je teplota pevné stěny, studená strana,  $S$  je teplosměnná plocha [ $\text{m}^2$ ],  $d$  je charakteristický rozměr [ $\text{m}$ ]. V blízkosti stěny se však nachází rychlostní, tak i teplotní mezní vrstva. Teplotní mezní vrstva souvisí s koeficientem přestupu tepla, který definuje, jak intenzivně přechází teplo z tekutiny do pevné stěny nebo naopak. Rovnice pro přestup tepla pro teplou a studenou stěnu je dáno následujícími rovnicemi

$$\begin{aligned} P &= \alpha_c (t_{c,s} - t_c) S \\ P &= \alpha_h (t_{h,s} - t_h) S \end{aligned} \quad (2.2)$$

kde  $\alpha_h$  je součinitel přestupu tepla na straně teplé tekutiny,  $\alpha_c$  je součinitel přestupu tepla na straně chladné tekutiny,  $t_h$  je průběh teploty v ochlazované tekutině,  $t_c$  je průběh teploty v ohřívané tekutině. Dále se zavede veličina, která se bude nazývat **koeficient prostupu tepla**

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_h} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_c}} \quad (2.3)$$

Po zavedení prostupu tepla pak rovnice pro výkon přejde do tvaru

$$P = k(t_h - t_c) S \quad (2.4)$$

Analýzou předchozího vztahu lze tedy stanovit parametry, které ovlivňují výkon výměníku. Pokud je záměrem maximalizovat výkon, pak je nutné vycházet z následujících podmínek

1. tloušťka stěny by měla být co nejmenší (to je důvod tenkých stěn ve výměnících)
2. tepelná vodivost pevné stěny by měla být co největší (to je důvod proč se využívají materiály s vysokou tepelnou vodivostí, hliník, měď atd.)
3. teplosměnná plocha by měla být co největší (to je důvod proč je ve výměnících velký počet žebírek, voštin, malých trubek pod.)
4. koeficient přestupu tepla by měl být co největší, jeho hodnota se dá částečně ovlivnit rychlostí tekutiny, s rostoucí rychlostí však narůstají s druhou mocninou tlakové ztráty.

Při proudění systémem trubek dochází k významné změně teploty, pak tepelný výkon by byl silně nadhodnocen při použití rozdílu teplot  $\Delta T = T_s - T_{ref}$ . Protože se tekutina pohybuje skrz systém trubek, teplota stěny se snižuje a tím také teplotní rozdíl. Proto se používá tzv. logaritmická teplotní diference

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_l) - (T_s - T_o)}{\ln\left(\frac{(T_s - T_l)}{(T_s - T_o)}\right)} \quad (2.5)$$

kde  $T_l, T_o$  jsou vstupní a výstupní teplota proudícího média. Výstupní teplota, která je potřebná k určení  $\Delta T_{lm}$  může být odhadnuta ze vztahu

$$\frac{T_s - T_o}{T_s - T_l} = \exp\left(-\frac{\pi d N \bar{\alpha}}{\rho v N_T S_T c_p}\right) \Rightarrow T_o = -\left(\exp\left(-\frac{\pi d N \bar{\alpha}}{\rho v N_T S_T c_p}\right) \cdot (T_s - T_l) - T_s\right)$$

kde  $N$  je celkový počet trubek v systému a  $N_T$  je počet trubek svíslé rovině,  $v$  je odhad rychlosti proudění. Tedy  $\Delta T_{lm}$  je známo. Samozřejmě při použití numerického výpočtu se hodnoty teploty určí jako průměrné hodnoty na vstupní a výstupní hraně.

Tepelný výkon na jednotku délky trubky může být spočítán ze vztahu

$$P = N(\pi d \bar{\alpha} \Delta T_{lm}) \quad (2.6)$$

Tepelný výkon lze určit jako hodnotu spočtenou ve Fluentu.

## 2.2 Tlaková ztráta

Výkon, který je nutné dodat tekutině, aby proudila výměníkem v daném množství, je možné určit pomocí tlakové ztráty z následujícího vztahu:

$$\rho = \frac{Q_m \Delta p}{v}$$

$$\rho \approx \frac{1}{2} \frac{\eta}{\rho^2} \frac{4l}{d_h} f(\text{Re}) \quad \text{pro laminární proudění} \quad (2.7)$$

$$\rho \approx \frac{0.046 \eta^{0.2}}{2} \frac{4l}{\rho^2 d_h} \frac{Q_m^{2.8}}{S_0^{1.8} d_h^{0.2}} \quad \text{pro turbulentní proudění}$$

$l$  je délka, na které dochází k přestupu tepla,  $d_h$  je hydraulický průměr a  $S_0$  je minimální průtočná plocha výměníku.

Obecně je tlaková ztráta výměníku závislá na následujících parametrech:

1. třecí ztráty, které souvisejí s prouděním tekutiny okolo teplosměnných ploch a tedy třecími (viskózními) silami
2. momentový efekt, který souvisí se změnou hustoty při proudění ve výměníku
3. komprese a expanze tekutiny při obtékání těles (teplosměnných ploch)
4. geometrické parametry výměníku (u velkých vertikálních výměníku je nutné zahrnout také statický tlak vyvozený gravitací, pro plyny se tato ztráta zanedbává.

Při proudění systémem trubek je tlaková ztráta závislá na ztrátovém součiniteli příslušném systému trubek a určovaném empiricky.

$$\Delta p = N_L \zeta \left( \frac{\rho U_{\max}^2}{2} \right) \text{ resp. } \Delta p = N_L \zeta \left( \frac{8 Q_m^2}{\rho \pi^2 d^4} \right) \quad (2.8)$$

Ztrátový součinitel je specifický pro různé uspořádání trubek. Při uspořádání trubek za sebou je definován následovně:

$$\zeta = \gamma \left( N_L \frac{S_L}{S_T} A + B \right) \quad (2.9)$$

$$\text{kde } A = 0.028 \left( \frac{S_T}{2a} \right)^2 \quad a = \frac{S_T - d}{2} \quad B = \left( \frac{S_T}{2a} - 1 \right)^2$$

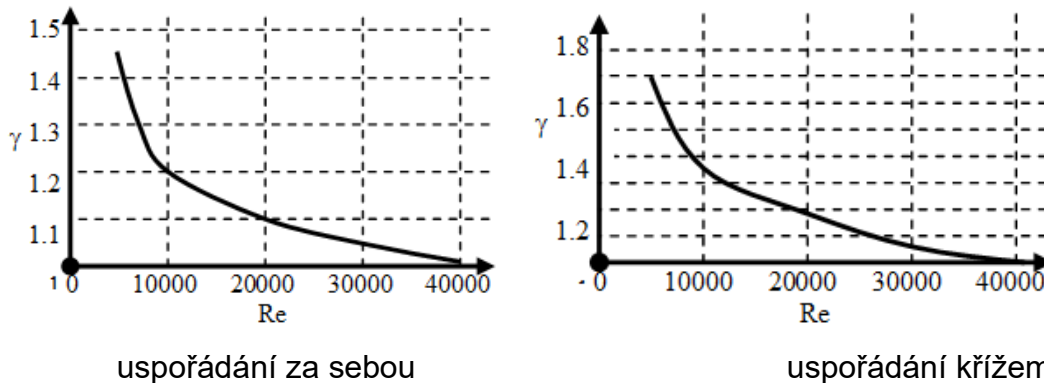
Při uspořádání trubek křížem je definován podobně:



$$\zeta = \gamma \left( 0.7 + 0.8 \left( N_L \frac{S_L}{S_T} A + B \right) \right) \quad (2.10)$$

$$\text{kde } A = 0.028 \left( \frac{S_T}{2a} \right)^2 \quad a = \frac{S_T - d}{2} \quad B = \left( \frac{S_T}{2a} - 1 \right)^2$$

Součinitel  $\gamma$  závisí na Reynoldsově čísle. Pro hodnoty vyšší než 40000 je roven jedné a pro hodnoty nižší je odhadnut z empirických měření a je zobrazen v obr. 2.2.



obr. 2.2 – Hodnoty součinitele  $\gamma$  v závislosti na  $Re$  čísle

Jak je vidět, že řešení obtékání takového systému trubek je závislé na řadě empiricky určených koeficientů, jejichž specifikace není cílem tohoto předmětu. Ve Fluentu se totiž získá tlakový spád přímo a využije se přitom průměrovaných hodnot tlaků na vstupní a výstupní hraně. Tím je také možno zpětně ztrátový součinitel určit, může být tedy výsledkem výpočtu.

$$\zeta = \frac{P_{1tot} - P_{2tot}}{P_{2dyn}} \quad (2.11)$$

### 2.3 Bezrozměrná kritéria

Při přípravě matematického modelu je nutné rozhodnout o typu proudění a pro kontrolu srovnat řešení numerické s analytickým, proto je třeba definovat bezrozměrné parametry, jako je:

**Reynoldsovo číslo** ( $Re$ ), které je určováno z okrajových a fyzikálních podmínek za účelem specifikace laminárního nebo turbulentního proudění. Jeho hodnota charakterizuje proudění v přechodové oblasti mezi laminárním a turbulentním prouděním [3].

$$Re = \frac{u d_h}{\nu} \quad (2.12)$$

kde tzv. hydraulický průměr  $d_h$  reprezentuje při proudění v potrubí průměr trubky, při obtékání trubky také její průměr,  $\nu$  je střední rychlost proudícího média. Při proudění v trubce platí, že pokud je hodnota  $Re < 2320$  jedná se o laminární proudění (částice se pohybují ve vrstvách). Při vyšším  $Re > 2320$  se jedná o turbulentní proudění (částice se víří) [4].

**Prandtlovo číslo** je pouze závislé na materiálových vlastnostech tekutiny. Vztahuje se k tloušťkám mezních vrstev, referenční rychlosti a teploty.

$$\text{Pr} = \frac{\rho c_p \nu}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (2.13)$$

Pro vzduch je možno předpokládat jeho hodnotu konstantní 0.7.

**Fourierovo číslo** je poměr vedení tepla k jeho akumulaci v pevném tělese

$$\text{Fo} = \frac{\lambda \tau}{c_p \rho d_h^2} \quad (2.14)$$

$\tau$  je časová konstanta.

**Nusseltovo číslo** vyjadřuje vliv proudění na tepelný tok stěnou, a závisí na geometrickém referenčním parametru (který je dobře definovatelný).

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d_h}{\lambda} \quad (2.15)$$

Koeficient prostupu  $\alpha$  tepla zahrnuje tepelnou vodivost  $\lambda$  pevných stěn, které oddělují obě tekutiny a dále koeficient přestupu tepla  $\alpha_{1,2}$  pro rozhraní mezi pevnou stěnou a oběma tekutinami. Tento koeficient je však závislý jak na materiálových vlastnostech proudící tekutiny, tak i na charakteru proudění v okolí pevné stěny.

Druhá definice Nusseltova čísla obsahuje lépe měřitelné veličiny, jako je tepelný výkon  $P$ , charakteristický rozměr  $d_h$ , plocha  $S$ , na které je určován přestup tepla, teplotní spád mezi teplotou stěny a referenční teplotou okolí  $\Delta T = T_s - T_{ref}$ . Teplotní spád může být specifikován také jako střední logaritmická diference.

$$\text{Nu} = \frac{P d_h}{S \Delta T \lambda} \quad (2.16)$$

Koeficient přestupu tepla je možné stanovit na základě celé řady empirických vztahů, a v praxi se nejčastěji využívá teorie podobnosti. Pokud tedy známe hodnotu Nusseltova čísla můžeme určit koeficient přestupu tepla  $\alpha$ . Nusseltovo číslo je obecně funkcí dalších podobnostních kritérií

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Fo}) \quad (2.17)$$

V případě nucené konvekce se hodnota Nusseltova čísla určuje v závislosti na hodnotě Re čísla.

Tab. 2.1 Nucená konvekce

<b>laminární proudění kolem desky, <math>T_s</math> je konstantní</b>	$Nu = 0,664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$ $Re_L = \frac{uL}{\nu}$ , $10^4 \leq Re_L \leq 5 \cdot 10^5$ , L délka desky	$0,6 \leq Pr$	
<b>laminární proudění kolem desky, <math>q</math> je konstantní</b>	$Nu = 0,908 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$ $Re_L = \frac{uL}{\nu}$ , $10^4 \leq Re_L \leq 5 \cdot 10^5$ , L délka desky	$0,6 \leq Pr$	
<b>turbulentní proudění kolem desky, <math>T_s</math> je konstantní</b>	$Nu_x = 0,0405 Re_L^{4/5} Pr^{1/3}$ $5 \cdot 10^5 \leq Re_L \leq 10^8$	$0,6 \leq Pr \leq 60$	
<b>laminární proudění v trubce</b>	$Nu = 4,36$ pro $q = \text{konst.}$ na stěně $Nu = 3,66$ pro $T = \text{konst.}$ na stěně		
<b>turbulentní proudění v trubce</b>	$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^m$ , $3 \cdot 10^4 \leq Re_L \leq 10^6$	$m = 0,3$ pro chlazení $m = 0,4$ pro ohřev	
<b>laminární, přechodové a turbulentní příčné obtékání trubky</b>	$Nu = C_1 Re^{C_2} Pr^{0,38}$ Re	C1	C2
	0,4 ÷ 4	0,989	0,330
	4 ÷ 40	0,911	0,385
	40 ÷ 4 000	0,683	0,466
	4 000 ÷ 40 000	0,193	0,618
	40 000 ÷ 400 000	0,0266	0,805
<b>laminární, přechodové a turbulentní obtékání svazku trubek, <math>N_L</math> je počet trubek</b>	$Nu_D = C_1 Re_{D,\max}^m$ $2000 \leq Re_{D,\max}^m \leq 40000$ jsou dány v tabulce $S_L$ – vodorovná rozteč trubek, $S_T$ – svislá rozteč trubek	pro $N_L > 10$ , $Pr = 0,7$ , konstanty $C_1$ a $m$	

Tab. 2.2 Konstanty pro určení Nusseltova čísla při obtékání svazku trubek

systém přímý $S_L/D$	$S_T/D= 1.25$		$S_T/D= 1.50$		$S_T/D= 2.00$		$S_T/D= 3.00$	
	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$
1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.063	0.752
1.50	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.702	0.068	0.744
2.00	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.648
3.00	0.290	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608

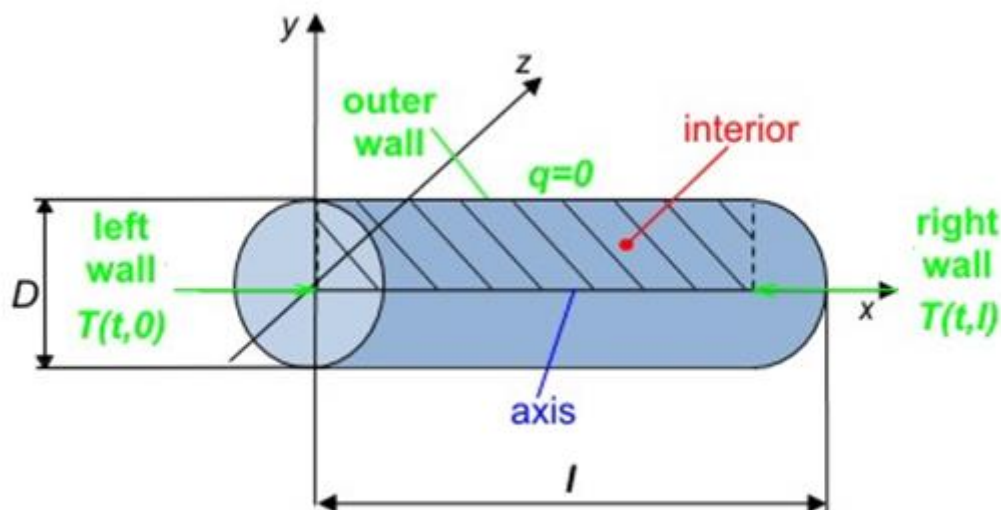
systém kříž $S_L/D$	$S_T/D= 1.25$		$S_T/D= 1.50$		$S_T/D= 2.00$		$S_T/D= 3.00$	
	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$
1.000			0.497	0.558				
1.125					0.478	0.565	0.518	0.560
1.250	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
1.500	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
2.000	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
3.000	0.310	0.592	0.356	0.580	0.448	0.562	0.482	0.574

V odborné literatuře je možné nalézt celou řadu vztahů, pomocí nichž je možné stanovit hodnotu Nusseltova čísla. Tyto rovnice jsou určeny převážně empiricky a mají omezenou platnost pro určité specifické případy. V předchozím textu byl uveden pouze velice stručný výběr nejpoužívanějších vztahů.

### 3 FOURIERŮV ZÁKON - VEDENÍ TEPLA V TYČI

#### Příklad

Řešte rozložení teploty v tyči o dané délce (obr. 3.1) v programu **ANSYS Fluent**. Úkolem je vytvořit geometrii, výpočetní síť, definovat fyzikální model, fyzikální vlastnosti materiálu, okrajové a počáteční podmínky, matematický model v programech **DesignModeler**, **ANSYS Meshing** a **ANSYS Fluent**. Následným krokem je realizovat numerický výpočet a vyhodnotit vypočtené veličiny.



obr. 3.1 – Tyč definované délky

Rozměry řešené oblasti jsou uvedené v Tab. 3.1 a fyzikální vlastnosti jednotlivých materiálu v Tab. 3.2.

Tab. 3.1 Geometrie oblasti

délka oblasti / [m]	0,5
průměr oblasti $D$ [m]	0,08

Tab. 3.2 Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, hliník, měď, dřevo) při 300 K

materiál	dřevo	ocel	hliník	měď
hustota $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	700	8030	2719	8978
měrná tepelná kapacita $c_p$ [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	2310	502,48	871	381
tepelná vodivost $\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	0,173	16,27	202,4	387,6

Okrajové podmínky jsou definovány na stěně vlevo („**left wall**“, viz obr. 3.1) teplotou  $T_0$  a na stěně vpravo („**right wall**“) teplotou  $T_l$  (Tab. 3.3). Vnější stěna („**outer wall**“) neboli plášť trubky je uvažována jako izolovaná  $q = 0 \text{ W/m}^2$ .

Tab. 3.3 Okrajové podmínky

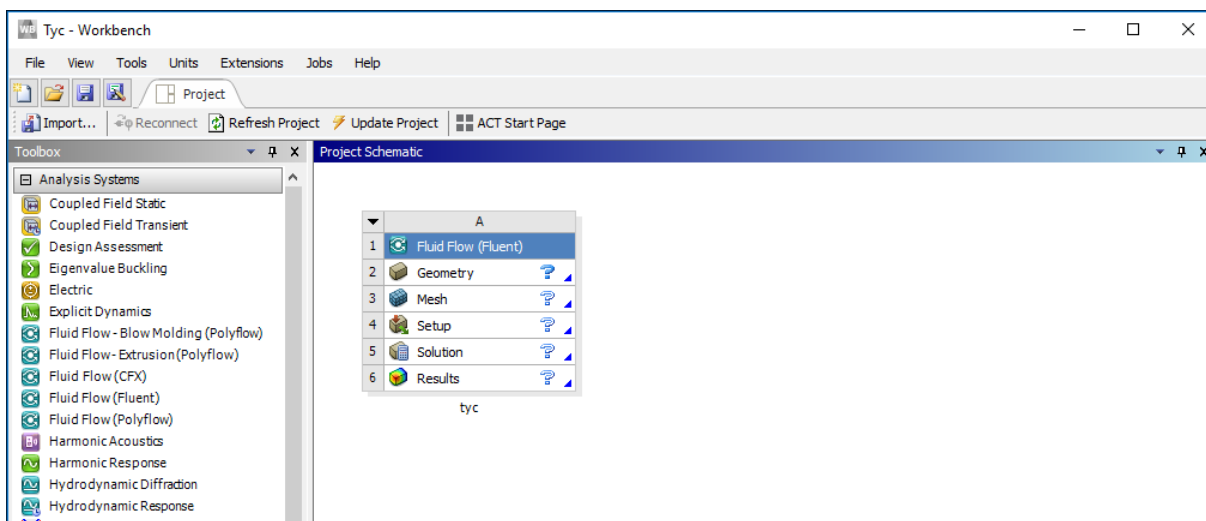
left wall	right wall	outer wall
$T_0 = 50^\circ\text{C}$	$T_l = -10^\circ\text{C}$	$q = 0 \text{ W/m}^2$

## Matematický model

V této úloze nedochází k proudění, je tedy fiktivně řešeno proudění s nulovou rychlostí, tedy jako laminární proudění.

### 3.1 ANSYS Workbench

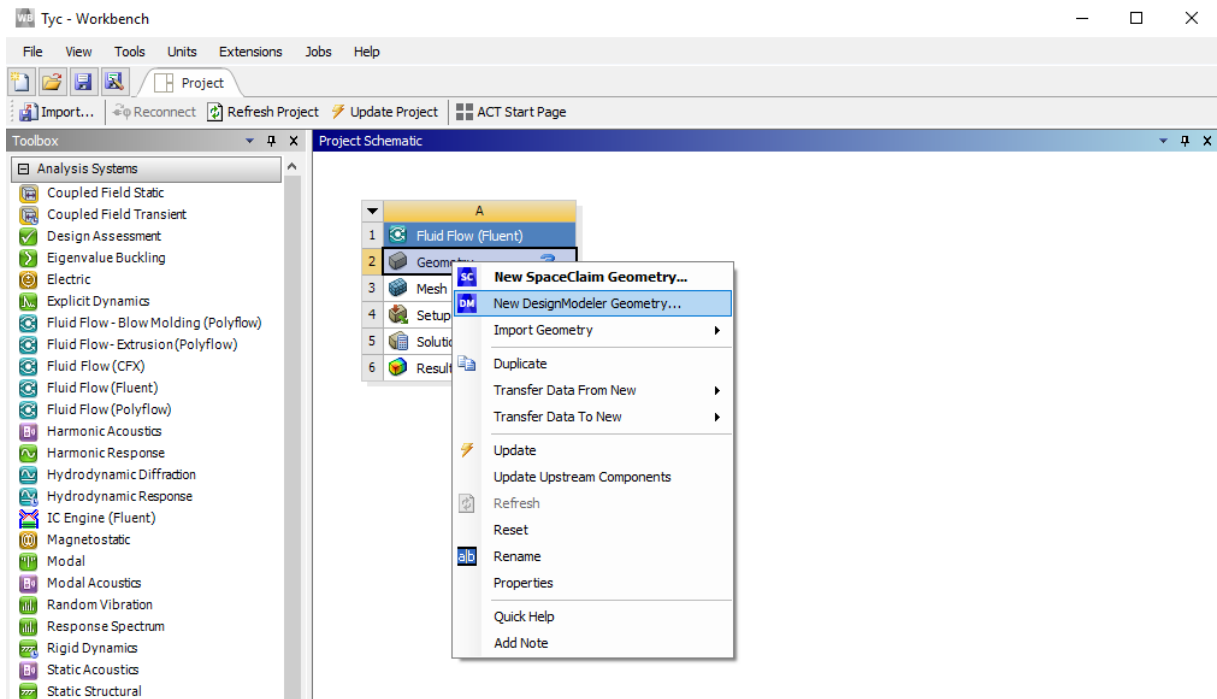
Spusťte program v nabídce **Start/All Programs/ANSYS 2019 R3/Workbench 2019 R3**. Po spuštění programu v panelu nástrojů menu v levé části okna poklepejte na **Fluid Flow (Fluent)**, viz obr. 3.2. Nově vytvořený panel pojmenujte např. jako **Tyc** (nepoužívejte nikdy diakritiku a matematické symboly). Nyní celý projekt uložte **File/Save as** do libovolného adresáře pod libovolným názvem, opět nepoužívejte diakritiku a matematické symboly.



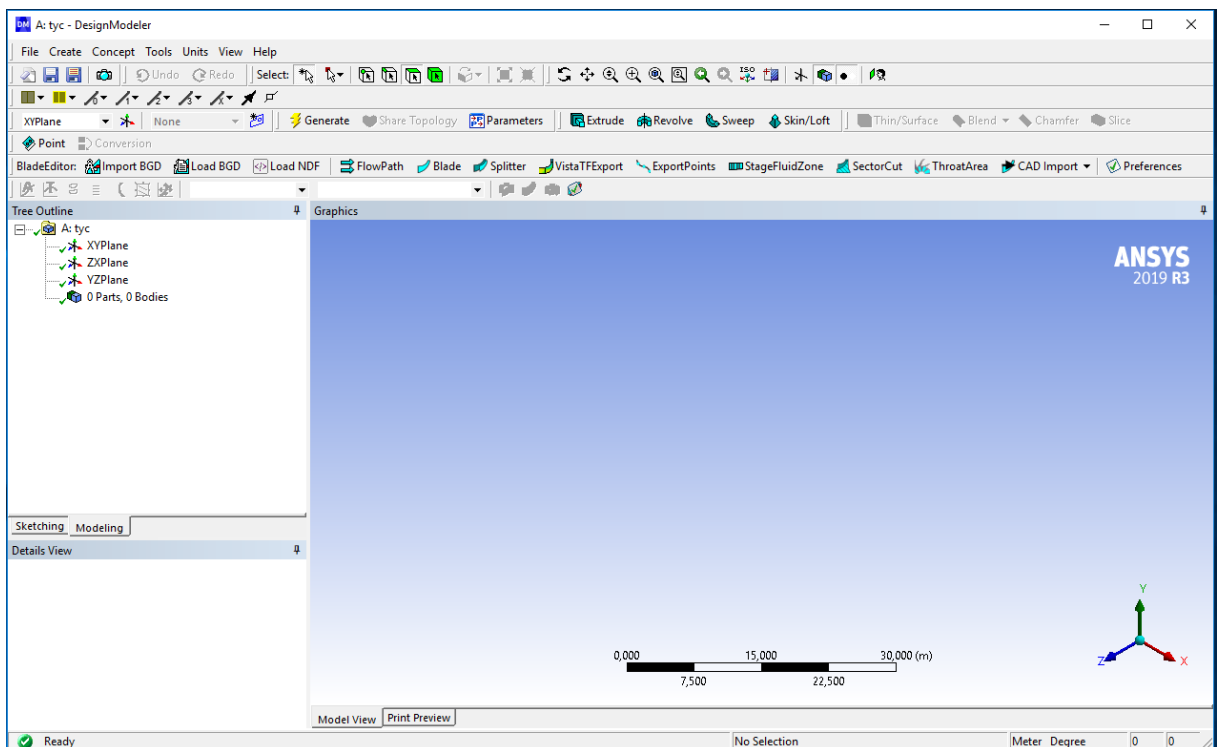
obr. 3.2 – Pracovní prostředí programu ANSYS Workbench 2019 R3 s blokem Fluid flow.

### 3.2 ANSYS DesignModeler

V první fázi je nutné vytvořit geometrii, a to v programu **DesignModeler**. Klikněte pravým tlačítkem myši na položku „**Geometry**“ a vyberte „**New DesignModeler Geometry**“ (viz obr. 3.3). Pracovní prostředí programu **DesignModeler** je znázorněno na obr. 3.4.



obr. 3.3 – Spuštění DesignModeleru

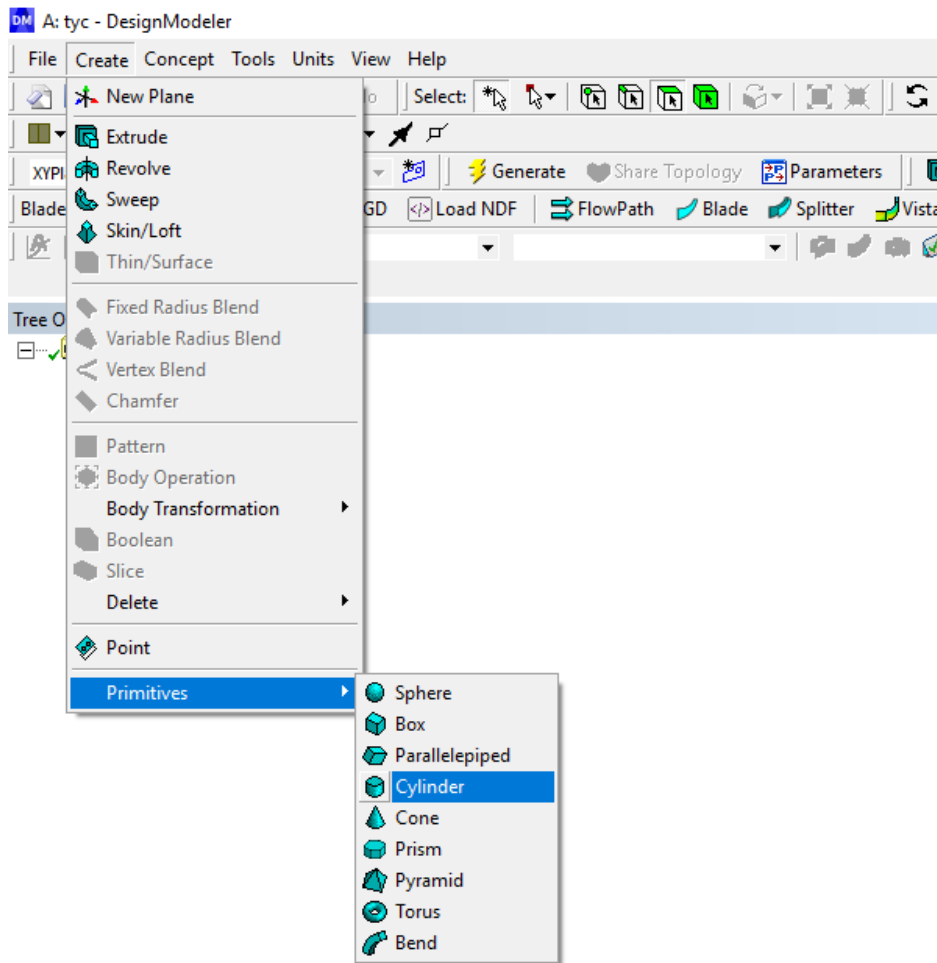


obr. 3.4 – Program DesignModeler

## Vytvoření geometrie

Po spuštění DesignModeleru nastavte vhodné jednotky, ve vašem případě to je metr (meter) – roletové menu „**Units – Meter**“. Model v tomto případě představuje jednoduchý válec o definovaných rozměrech. Postup tvorby 3D modelu spočívá ve vytvoření jednoduchého tvaru válce pomocí roletového menu „**Create – Primitives –**

**Cylinder**“ (obr. 3.5). Vybereme souřadnicovou rovinu podstavy válce (XYPlane), dále změříme polohu středu podstavy (Origin), délku osy (Axis) a poloměr dle obr. 3.6.

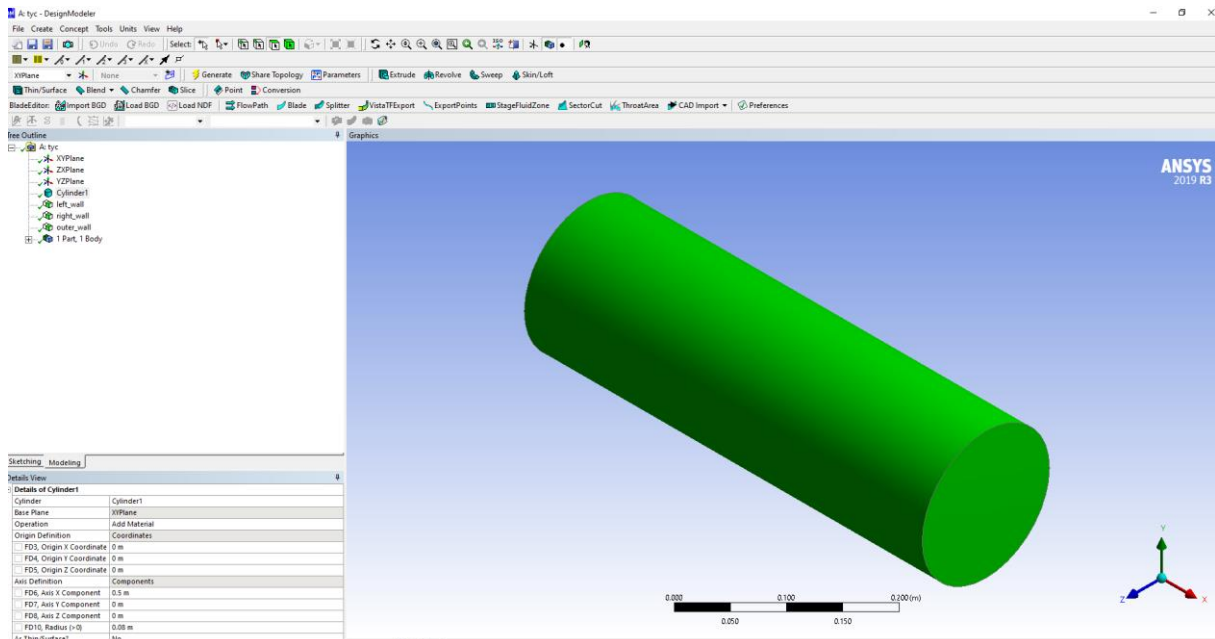


obr. 3.5 - Vytváření geometrie válce

Sketching Modeling	
Details View	
Details of Cylinder1	
Cylinder	Cylinder1
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Material
Origin Definition	Coordinates
<input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate	0 m
Axis Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component	0,5 m
<input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component	0 m
<input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component	0 m
<input type="checkbox"/> FD10, Radius (>0)	0,08 m
As Thin/Surface?	No

obr. 3.6 - Nastavení rozměrů válce

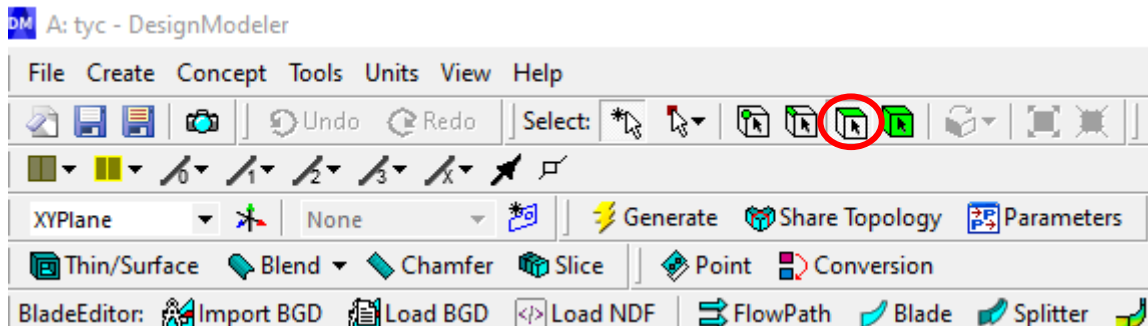




obr. 3.7 - Výsledná geometrie

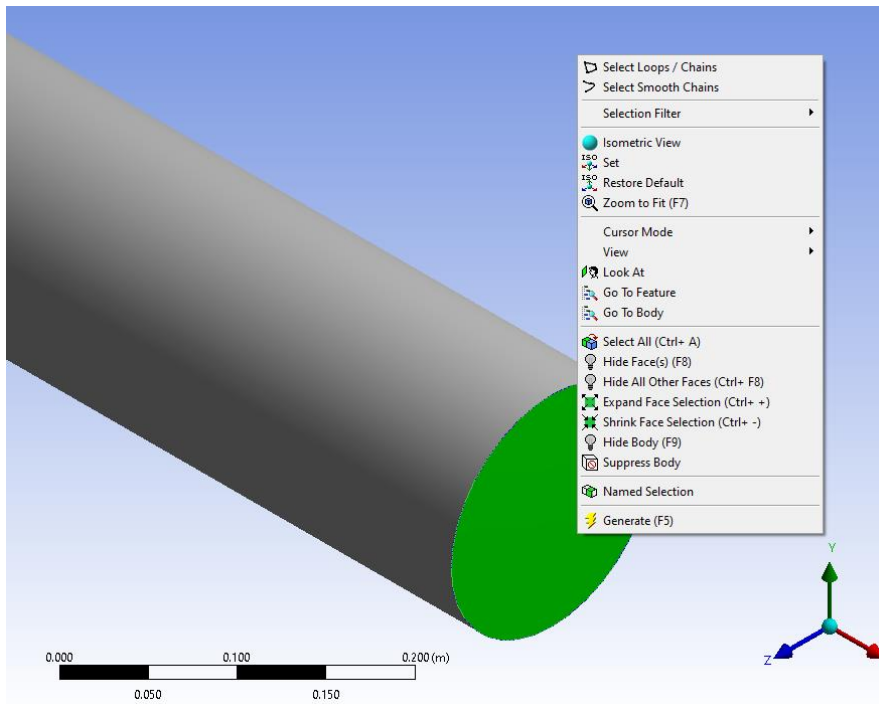
## Pojmenování okrajových podmínek

Protože model je trojrozměrný, tak hranice budou plochy oblasti (válce). V první fázi se změní výběrový mód na plochy („Face“), viz obr. 3.8.

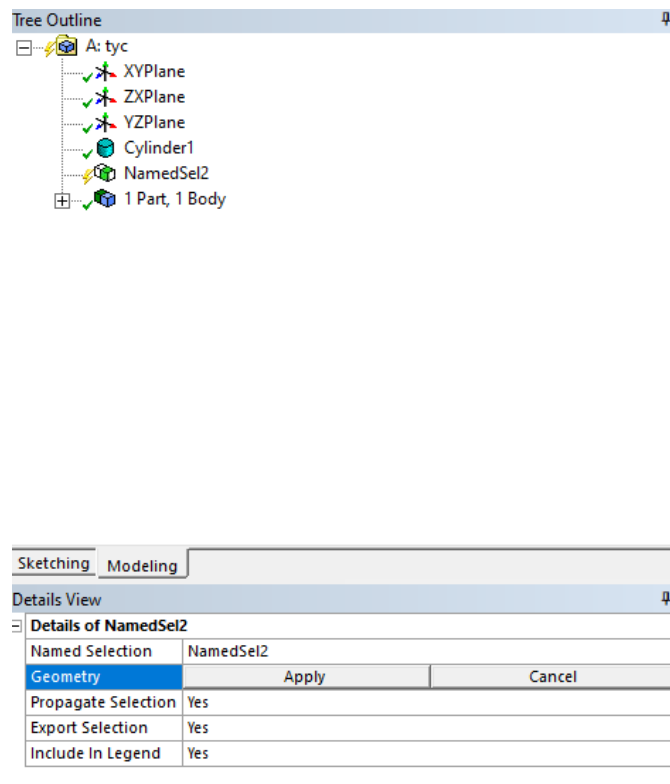


obr. 3.8 – Výběr typu výběrového módu ploch („Face“)

Ukázka pojmenování okrajové podmínky **right\_wall** dle zadání je znázorněna na obr. 3.9, obr. 3.10. Požadovaná plocha se označí a vybere se nabídka „Named selection“. V druhé fázi se provede pojmenování NamedSel2 jako „right\_wall“ a „Generate“, viz obr. 3.10.

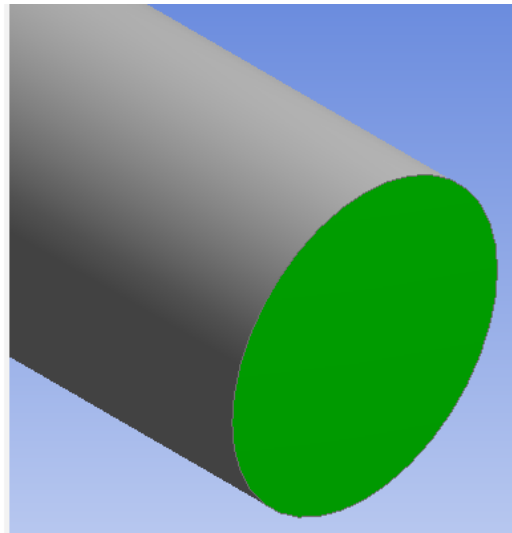
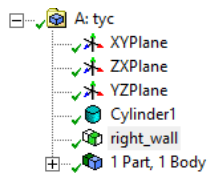


obr. 3.9 – Výběr plochy k pojmenování okrajové podmínky („Named Selection“)



obr. 3.10 – Pojmenování okrajové podmínky

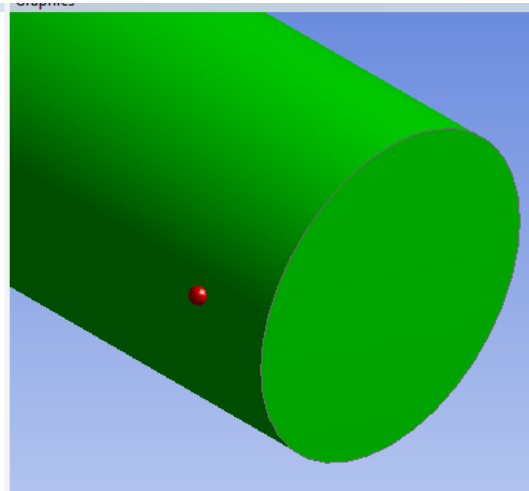
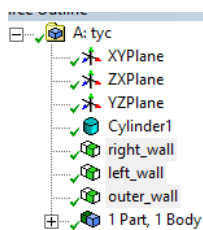
Okrajová podmínka je nově zobrazena ve stromu příkazů pod nově vytvořenou položkou „right\_wall“, viz obr. 3.11.



obr. 3.11 – Znáznornění okrajové podmínky „right\_wall“

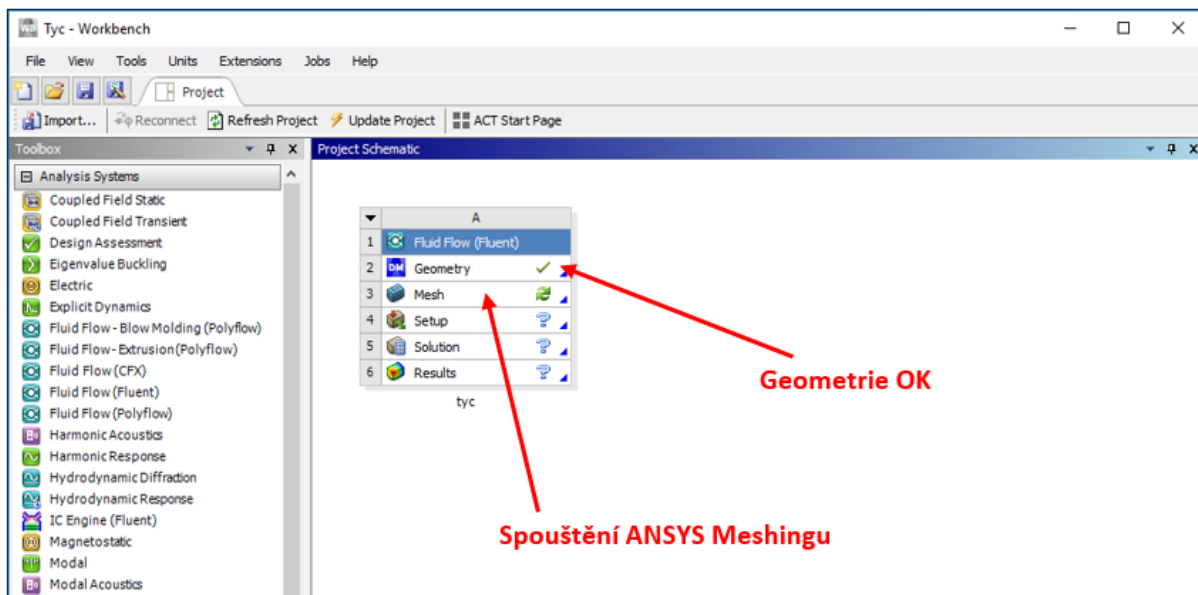
Pokud se v oblasti vyskytuje více ploch stejného významu (např. vstupy pro systém trubek ve výměníku), pak se mohou vybrat všechny (pomocí Ctrl) a pojmenují se jedním pojmenováním.

Analogicky postupujte v případě definování a pojmenování zbylých okrajových podmínek („left\_wall, outer\_wall“), které jsou znázorněny na obr. 3.12



obr. 3.12 – Pojmenování okrajových podmínek

Nyní je geometrie modelu kompletní a připravená pro tvorbu výpočetní sítě v programu **ANSYS Meshing**. Celý projekt můžete uložit z programu **DesignModeler** příkazem „File/Save Project“ a program zavřete. Přejděte zpět do programu **Workbench**. Celý projekt můžete kdykoliv uložit z **Workbench** příkazem „File/Save“. Pokud je geometrie vytvořena bez chyb, tak u položky **Geometry** je uvedena zelená „fajfka“ (obr. 3.13).

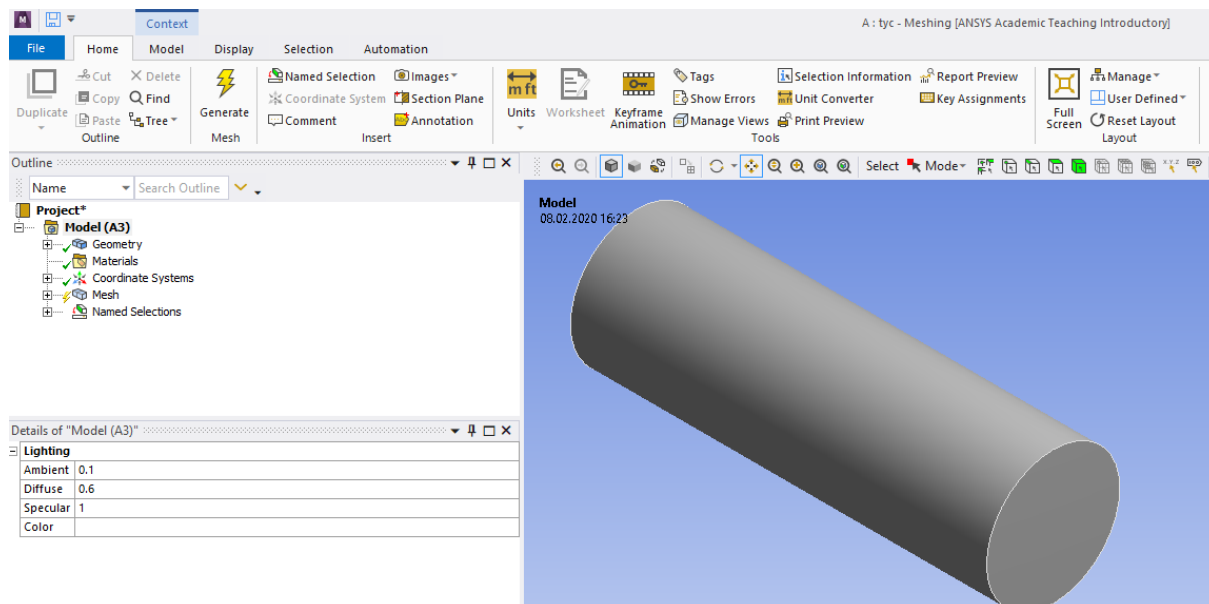


obr. 3.13 – Prostředí **Workbench** po vytvoření geometrie bez chyb

Následně můžete přejít na tvorbu výpočetní sítě v programu **ANSYS Meshing**, který se spustí z prostředí **Workbench** obdobně jako program **DesignModeler**, viz obr. 3.13.

### 3.3 ANSYS Meshing

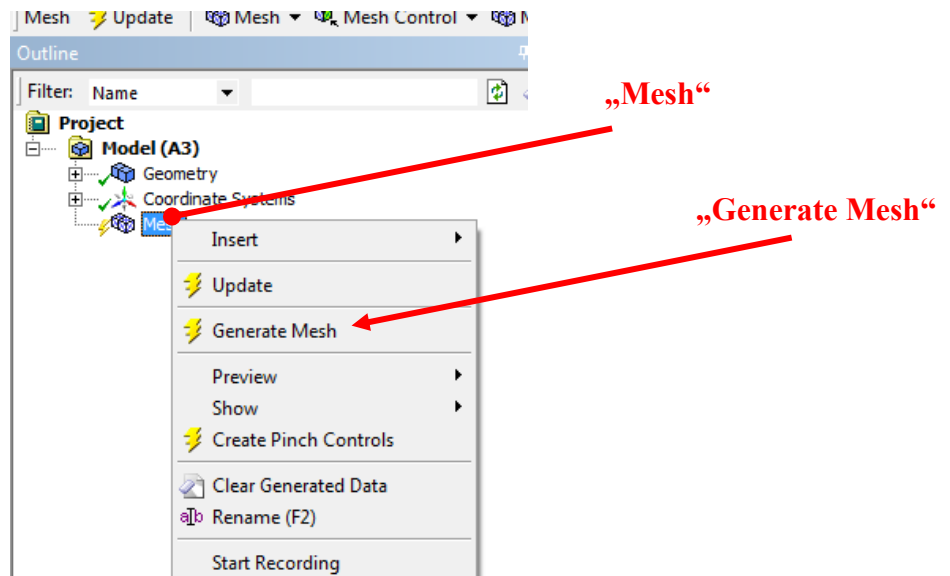
V projektu dvojklikem na položku „**Mesh**“ spustíte program **ANSYS Meshing**, který umožňuje síťování vygenerovaných součástí (obr. 3.14). Tento krok může trvat i několik minut podle složitosti modelu.



obr. 3.14 – Prostředí programu **ANSYS Meshing**

Po spuštění programu a načtení součástí máte několik možností, jak vytvořit síť. Od jednoduchého schématu, kdy v podstatě pouze poklepete na položku „**Mesh**“ (pravým

tlačítkem) a zvolíte příkaz „**Generate mesh**“ (velice jednoduchá automatická síť podle přednastavených parametrů a pro velkou většinu případů nevyhovující, (obr. 3.15) až po uživatelem přesně definovaný tvar sítě.



obr. 3.15 – Vytvoření jednoduché automatické sítě

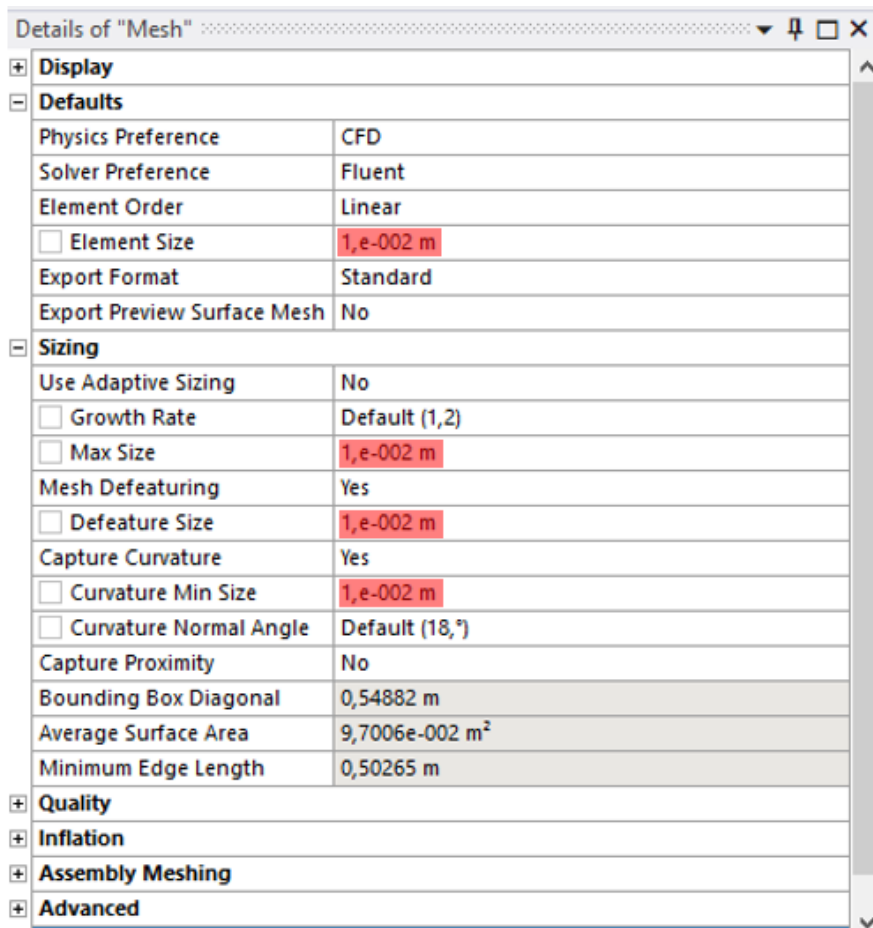
V této aplikaci je výpočetní oblast ve tvaru válce, takže jako elementy se použijí pravidelné šestistěnné elementy s vytvořením tzv. zhuštění výpočetní sítě směrem k vnější stěně „**outer wall**“. Tzn. použije se kombinace automatické sítě s uživatelem definované sítě.

K vytvoření výpočetní sítě v tomto příkladu využijete tři operace:

- Automatické nastavení velikosti elementu
- Definování parametrů zhuštění u stěny
- Definování metody Sweep

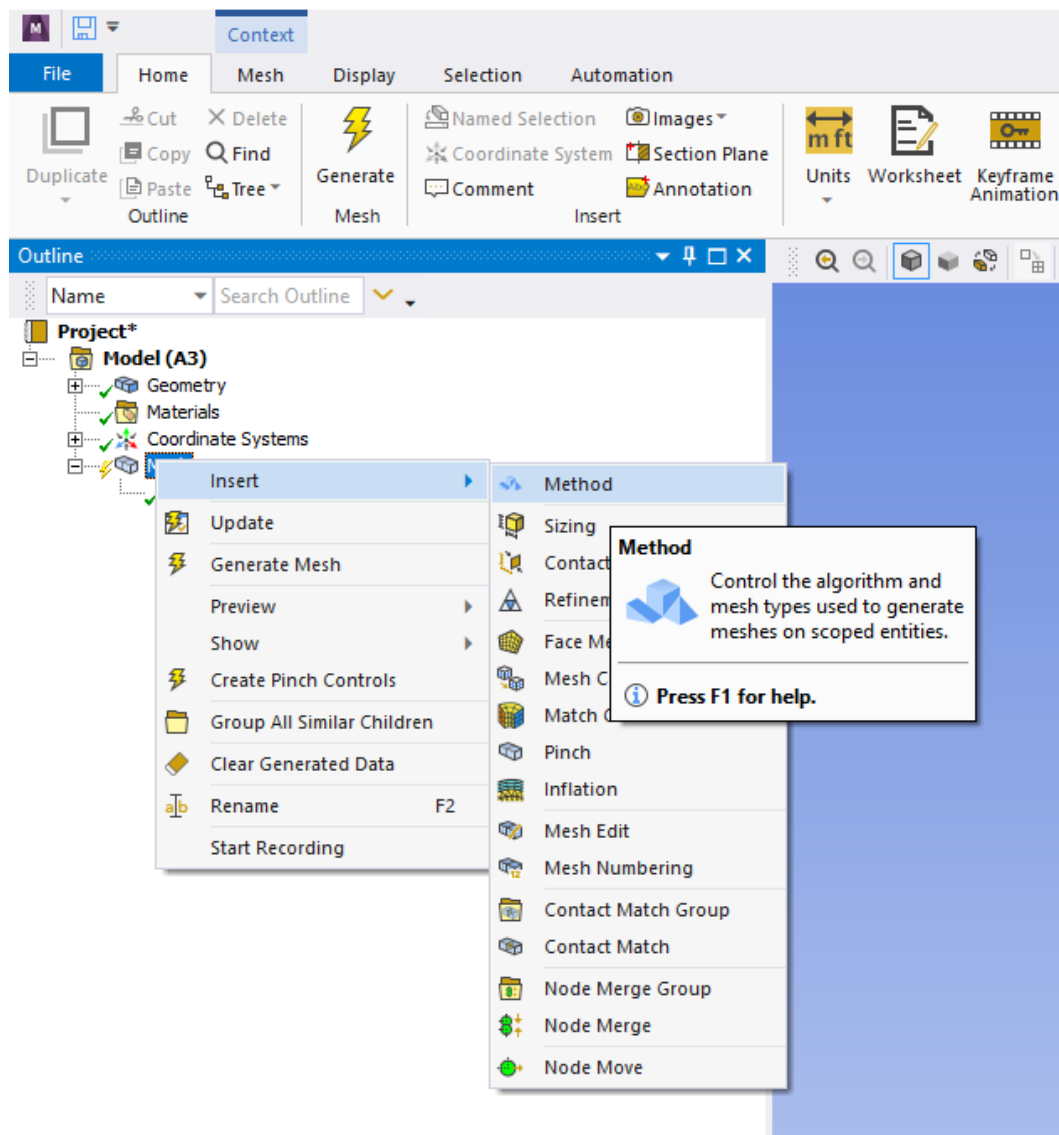
### Automatické nastavení typu elementů sítě

Kliknutím na položku „**Mesh**“ v panelu „**Outline**“ obr. 3.16 získáte informace o parametrech síťování v panelu „**Details of Mesh**“. V tomto panelu se vyskytuje řada položek. Rozkliknutím položky „**Sizing**“ dostanete předdefinované informace o velikosti elementů. Tyto hodnoty můžete měnit podle vlastní potřeby. Hodnoty jsou uvedené v jednotkách (metr), pokud jsou uvedené např. v jednotkách milimetr, tak je nutné změnit jednotky (v roletovém menu „**Units**“). Předdefinujte velikost elementu v položkách „**Element Size, Max Size, Defeature Size, Curvature Min Size**“.



obr. 3.16 - Details of Mesh

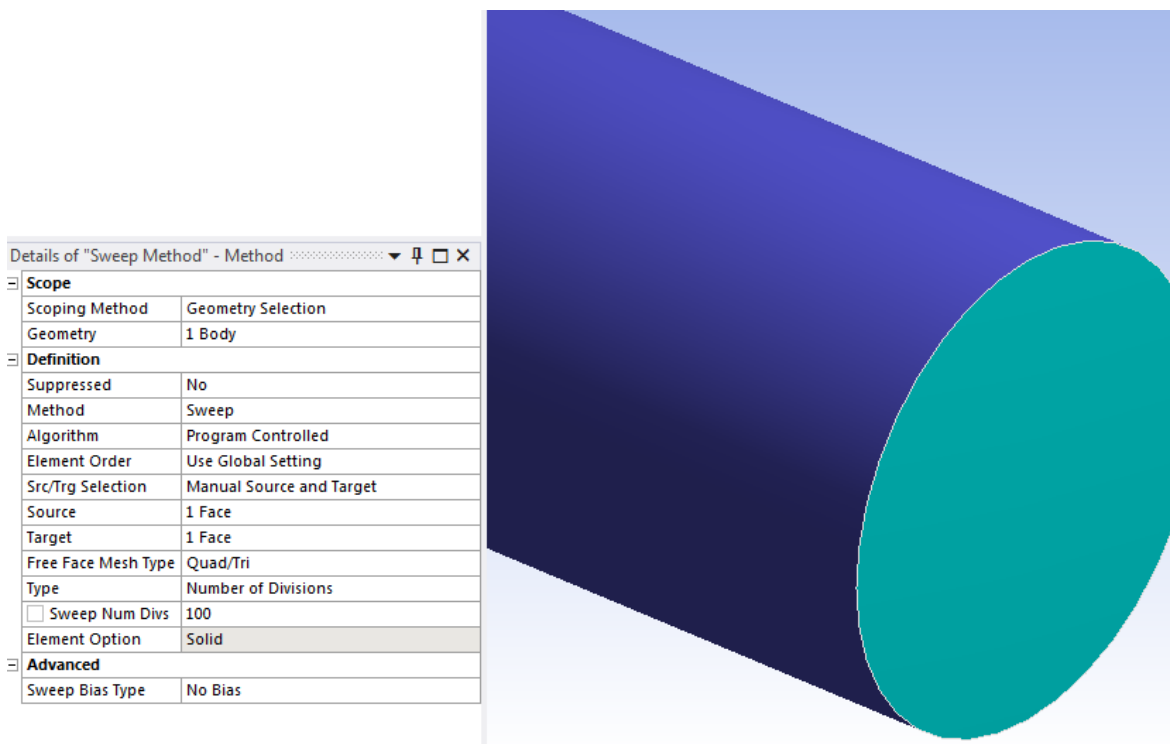
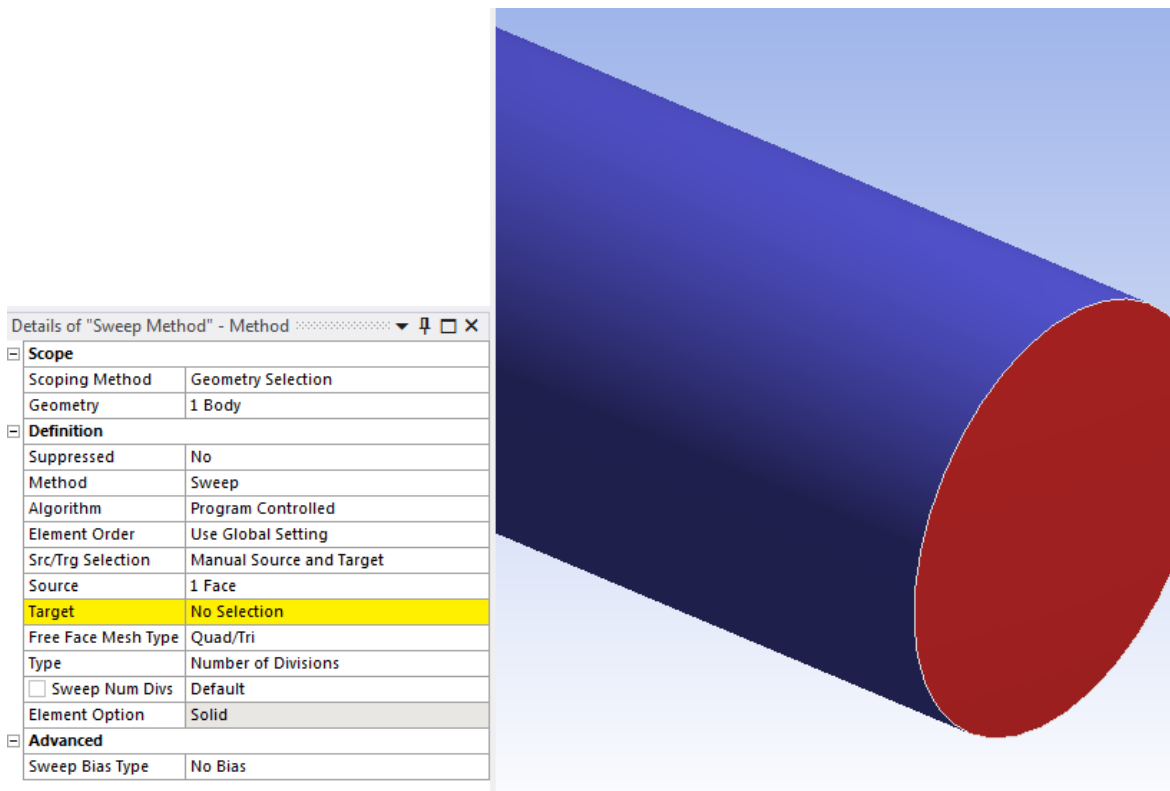
Pro tělesa tvaru válce resp. kvádru se pro síťování použije metoda **Sweep**. Použijte funkci „**Method**“ v nabídce „**Mesh/Insert/Method**“ a dále metodu „**sweep**“, která je vhodná pro geometrii válce, viz Obr. 3.17.



Obr. 3.17 - Vložení metody

Vybereme objem „**Geometry**“. Musíme nadefinovat „**Source Face**“ v tabulce „**Details of Sweep Method**“. V položce „**Src/Trg Selection**“ vybereme možnost „**Manual Source**“. Jako „**Source**“ označíme plochu left\_wall. Počet elementů po délce lze zadat v „**Type**“ („**number of division**“ a „**sweep num divs**“). Vloží se počet elementů po délce oblasti (např. **number of division=100**). Nastavení a výsledná oblast je zobrazena na

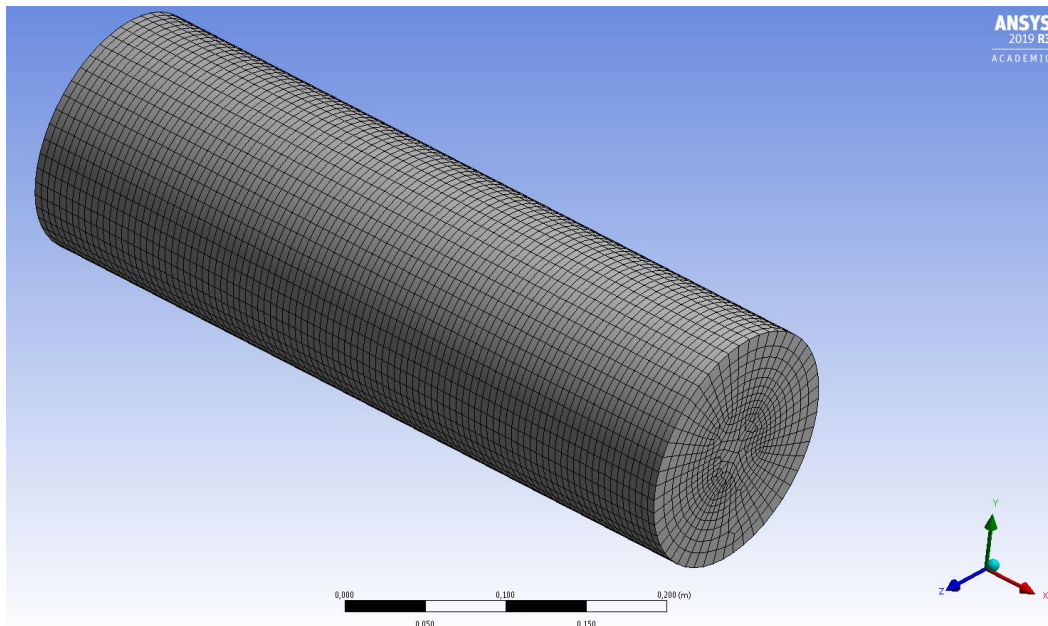
Obr. 3.18.



Obr. 3.18 - Nastavení parametrů pro metodu Sweep

Následně můžeme síť vygenerovat kliknutím na příkaz „**Generate**“. Výsledná výpočetní síť je zobrazena na Obr. 3.19.



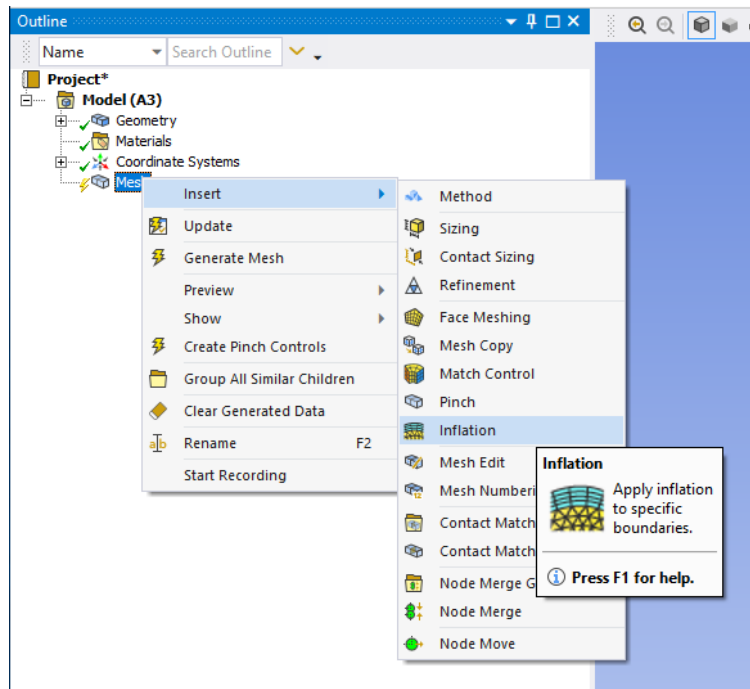


Obr. 3.19 - Výsledná výpočetní síť

Je patrné, že síť není zhuštěná u stěny, což je vhodné v případě proudění s turbulencí. Proto se použije na opravu sítě metoda **Inflation**.

### Definování parametrů Inflation (zhuštění u stěny)

Inflation definujeme pro plochu „Source Face“ v nabídce „**Mesh/Insert/Inflation**“. Tuto nabídku dostanete pravým tlačítkem myši (obr. 3.20).

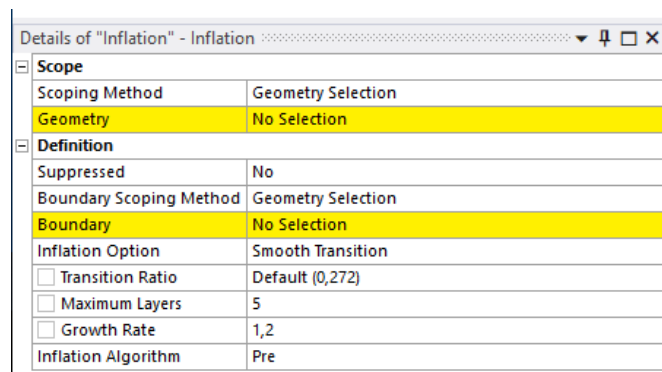


obr. 3.20 – Výběr nástroje „Inflation“

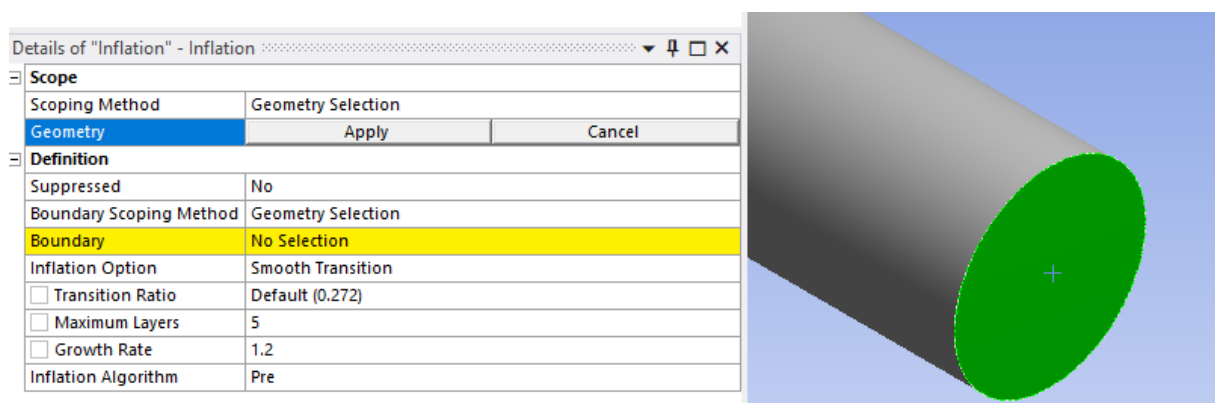
V obecném případě pro vytváření Inflation je nutné specifikovat následující parametry:

- geometrie (2D nebo 3D oblasti), kde bude Inflation vygenerována
- hranice, při které bude Inflation vytvořena (ve 2D je to hrana (čára), ve 3D je to plocha)
- parametry Inflation, tj. zmenšení první buňky u hranice, počet vrstev (buněk) Inflation, růstový faktor charakterizující postupné zvětšování velikosti buněk,

Charakteristika parametrů definujících Inflation je znázorněna na obr. 3.21. Žlutě zvýrazněné položky „**No Selection**“ je nutné vybrat z geometrie modelu. Položka „**Geometry/No Selection**“ představuje výběr oblasti (plochy nebo objemu), kde se bude Inflation. Změnou „**Geometry Selection**“ lze vybírat podle jména oblasti. Nejdříve klikněte do okna „**No Selection**“ (přejde na „**Apply**“, viz obr. 3.22). Následně vyberte oblast kliknutím na model (dojde k zelenému podbarvení). Výsledek potvrďte tlačítkem „**Apply**“.

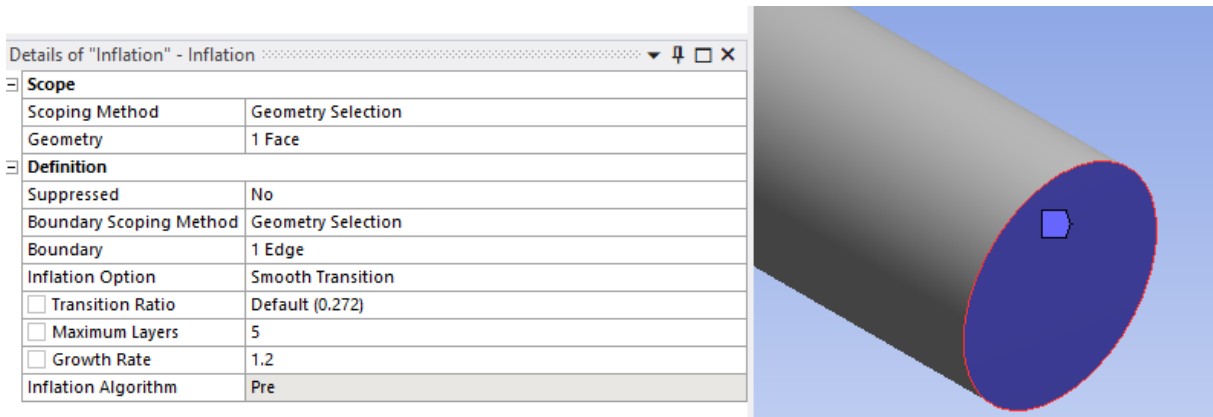


obr. 3.21 – Charakteristika Inflation



obr. 3.22 – Výběr oblasti, ve které bude Inflation vytvořena

Analogicky postupujte v případě definování hranice, vůči které je definována Inflation. Hranu definujte v položce „**Boundary**“ (obr. 3.23). Nejdříve klikněte do pole „**No Selection**“. Následně vyberte hranu modelu. Poté klikněte na hranici a položku „**Apply**“. Výsledek je patrný z obr. 3.23.

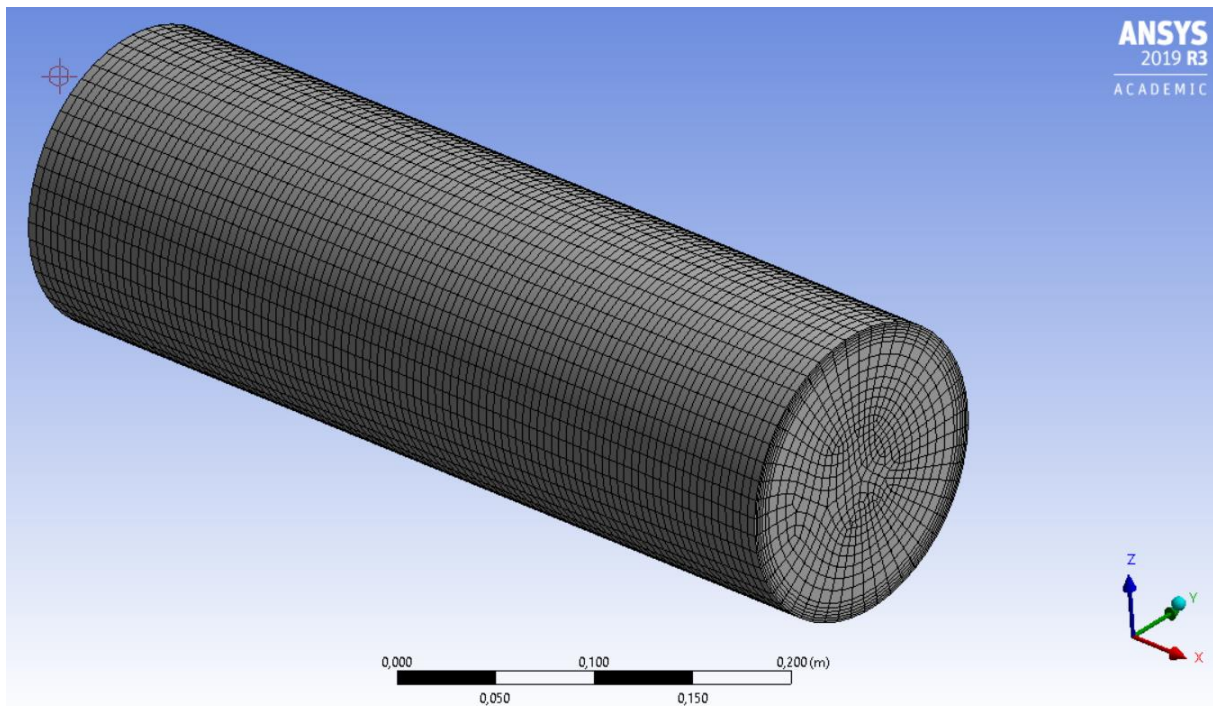


obr. 3.23 – Výběr hrany k definování Inflation

Poté definujte parametry Inflation (obr. 3.23)

- faktor charakterizující postupné zmenšování velikosti buněk – 0,272
- počet vrstev (buněk) vrstvy Inflation – 5
- růstový faktor – 1,2

Následně můžeme síť vygenerovat kliknutím na příkaz „**Generate**“. Výsledná výpočetní síť včetně zhuštění je zobrazena na Obr. 3.24.

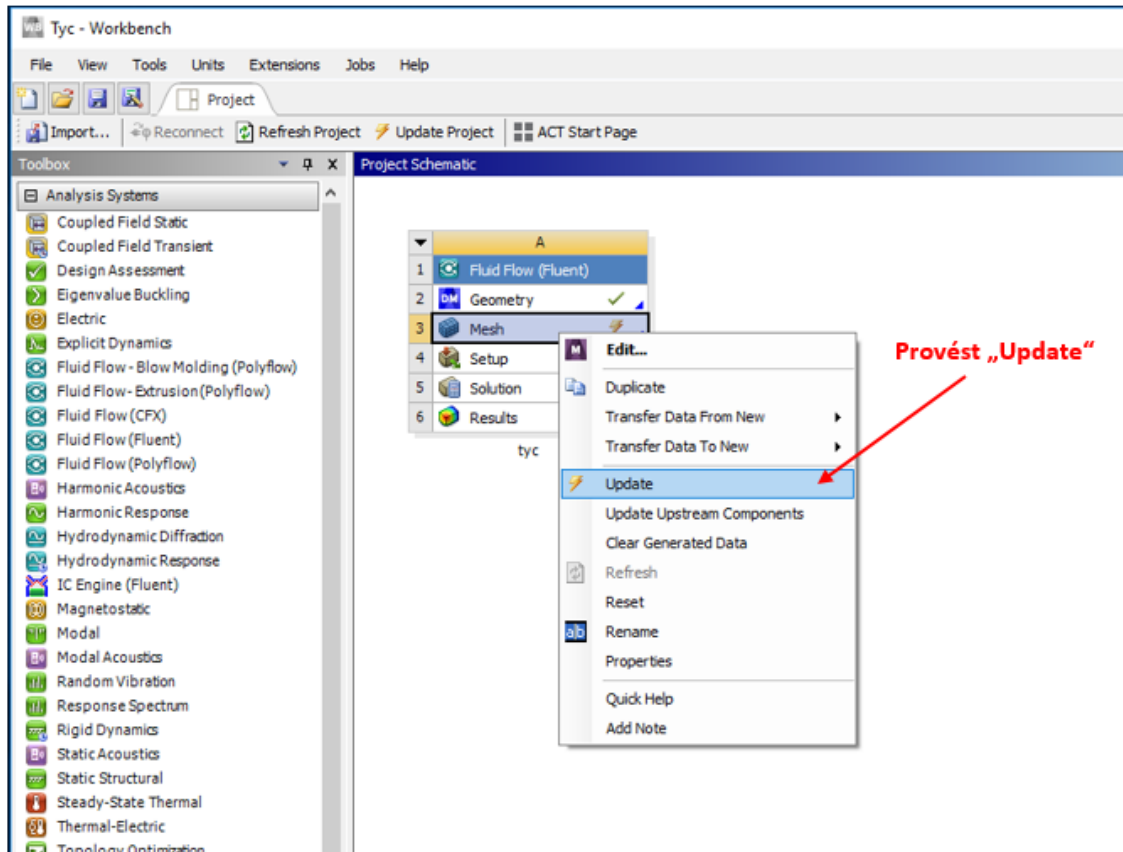


Obr. 3.24 - Výsledná výpočetní síť

Uložte projekt v **ANSYS Meshing** příkazem „**File/Save Project**“.

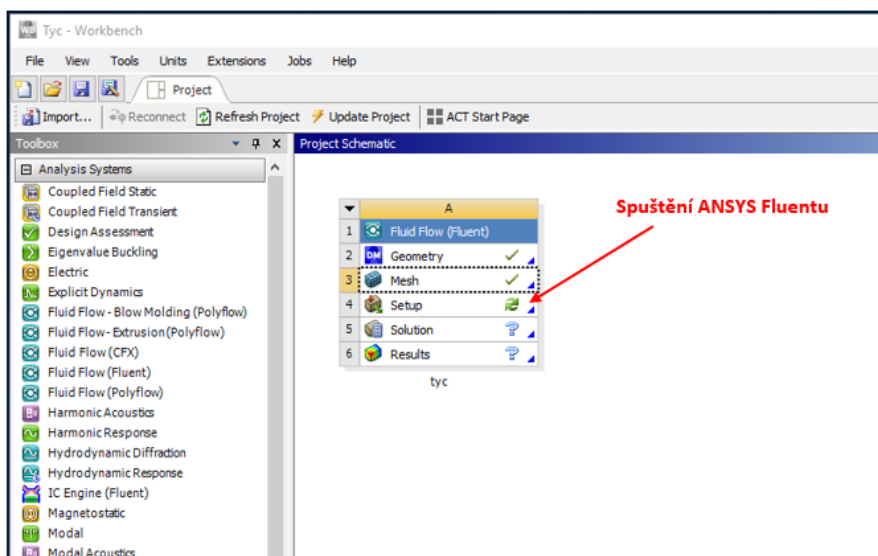
### 3.4 ANSYS Fluent

Před spuštěním **ANSYS Fluent** je třeba ověřit, jestli u položek „**Geometry**“ a „**Mesh**“ je zelená fajfka. Pokud tomu tak není, potom se musí provést update „**Geometry**“ nebo „**Mesh**“ příkazem „**Update**“. V tomto případě je nutné provést „**Update**“ pro „**Mesh**“ pravým tlačítkem myši (obr. 3.25).



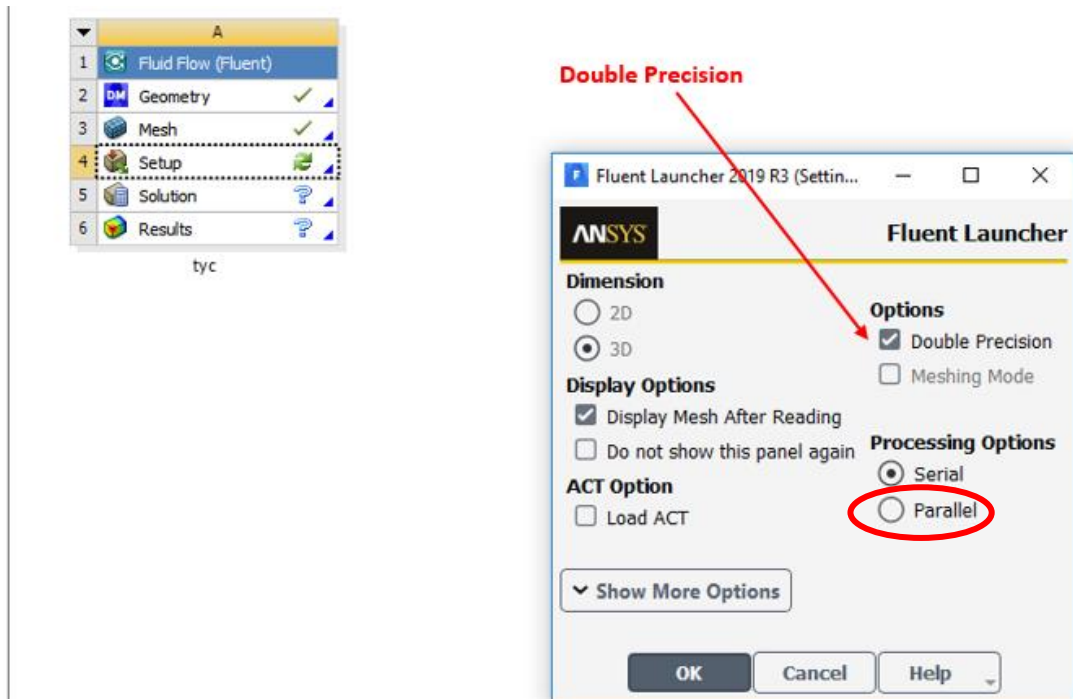
obr. 3.25 – Znárodnění značky pro Update výpočetní sítě

Výsledný projekt v prostředí **Workbench** je znázorněn na obr. 3.26.



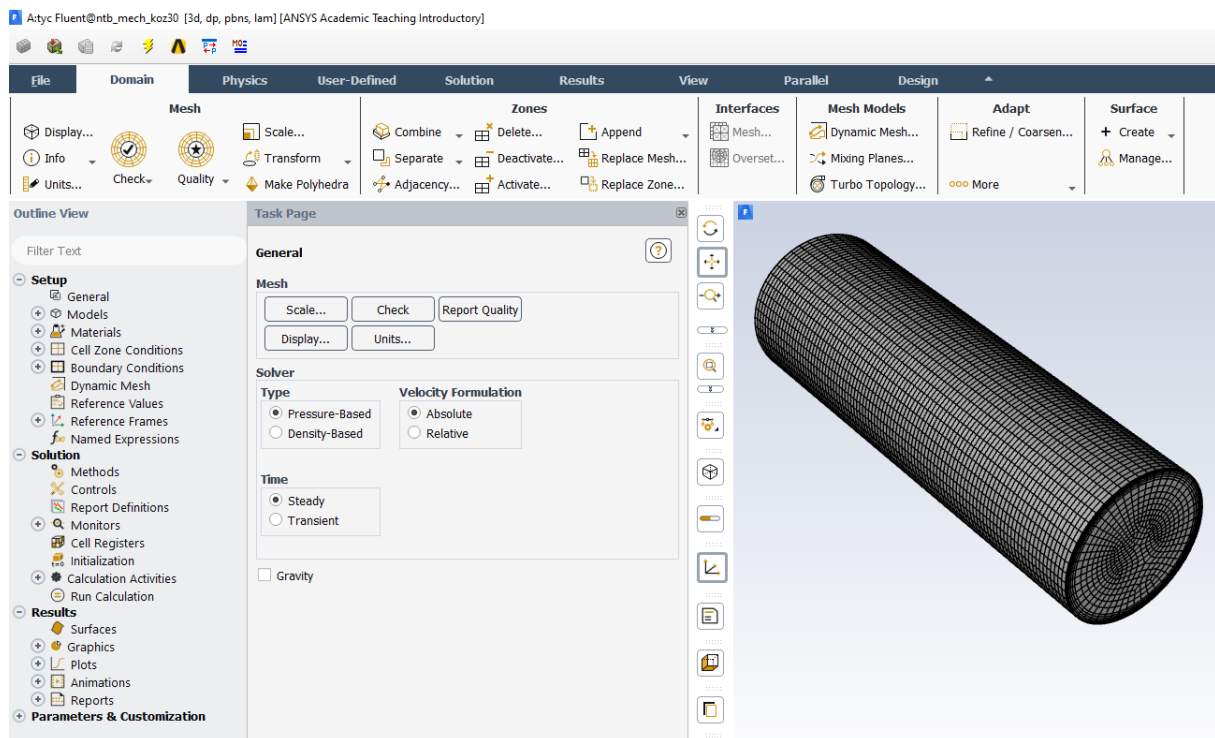
obr. 3.26 – Výsledný panel projektu

Program **ANSYS Fluent** se spustí pomocí položky „**Setup**“ dvojklikem. Po spuštění programu **Fluent** se ověří rozměr oblasti (3D), a zda výpočet bude proveden s obvyklou nebo dvojnásobnou přesností („**Double Precision**“). Definujte „**Double Precision**“ (obr. 3.27). Dále je vhodné nastavit při větším množství buněk paralelní výpočet v „**Processing Options/Parallel**“. Počet jader je např. 4.



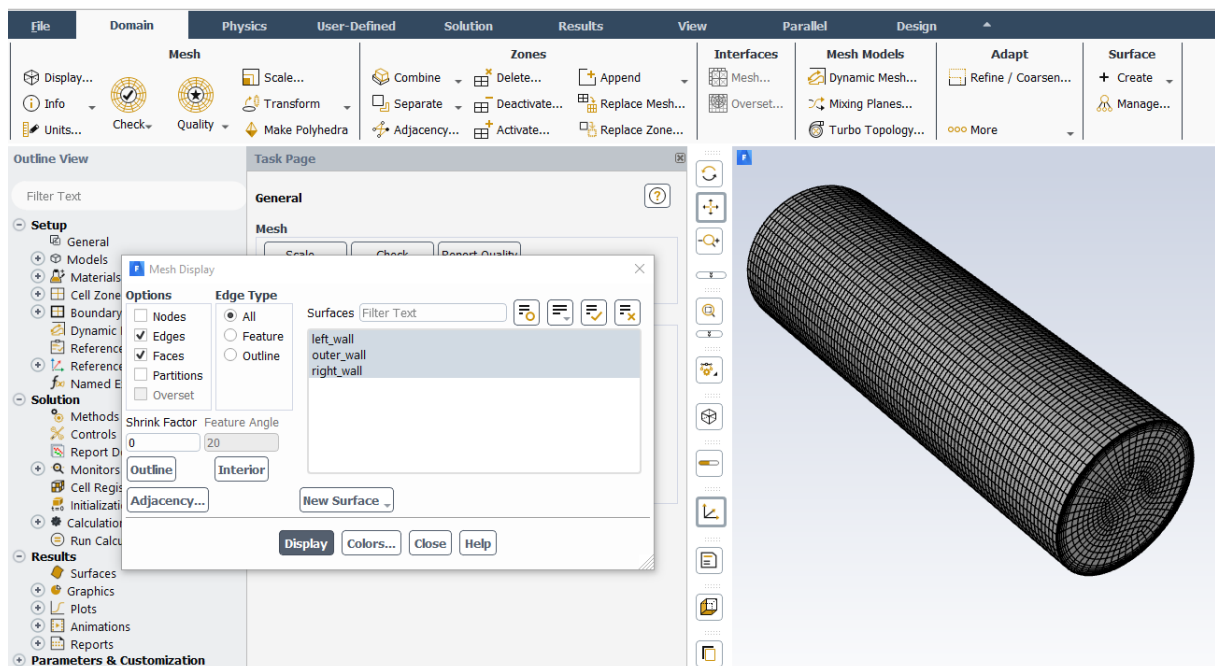
obr. 3.27 – Spouštění programu **ANSYS Fluent 2019 R3**

Pak se otevře program **ANSYS Fluent** (obr. 3.28).



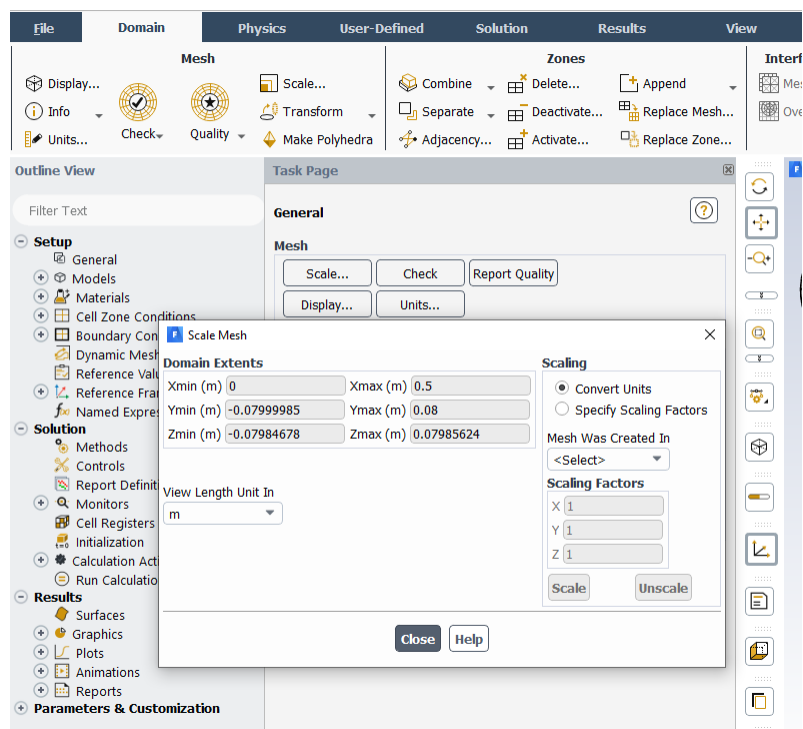
obr. 3.28 – Základní prostředí programu **ANSYS Fluent**

V první fázi je nutné provést kontrolu výpočetní sítě jednak zobrazením všech hranic (okrajových podmínek) a celé oblasti příkazem „**Domain/Mesh/Display**“ (obr. 3.29). Označením všech položek v okně „**Surfaces**“ se zobrazí okrajové podmínky.



obr. 3.29 – Kontrola sítě a okrajových podmínek

Dále je nutné provést kontrolu jednotek rozměrů sítě příkazem „**Domain/Mesh/Scale**“ (obr. 3.30). Pokud je výpočetní oblast vytvořená v jiných rozměrech (mm, cm, ...), lze pomocí příkazu „**Scaling**“ a „**Specify Scaling Factors**“ převést rozměry na základní jednotky metry (m).



obr. 3.30 – Kontrola jednotek rozměrů

Další kontrola se týká počtu buněk sítě příkazem „**Domain/Mesh/Info/Size**“. Následně se zobrazí v textovém okně (Console) řádek s informací o počtu buněk (**Cells**), ploch (**Faces**) a uzlech (**Nodes**) sítě, viz obr. 3.31.

```
writing right_wall (type wall) (mixture) ... Done.
writing outer_wall (type wall) (mixture) ... Done.
writing left_wall (type wall) (mixture) ... Done.
writing zones map name-id ... Done.

Mesh Size

Level    Cells    Faces    Nodes    Partitions
  0      75500   229355   78477     1

1 cell zone, 4 face zones.
```

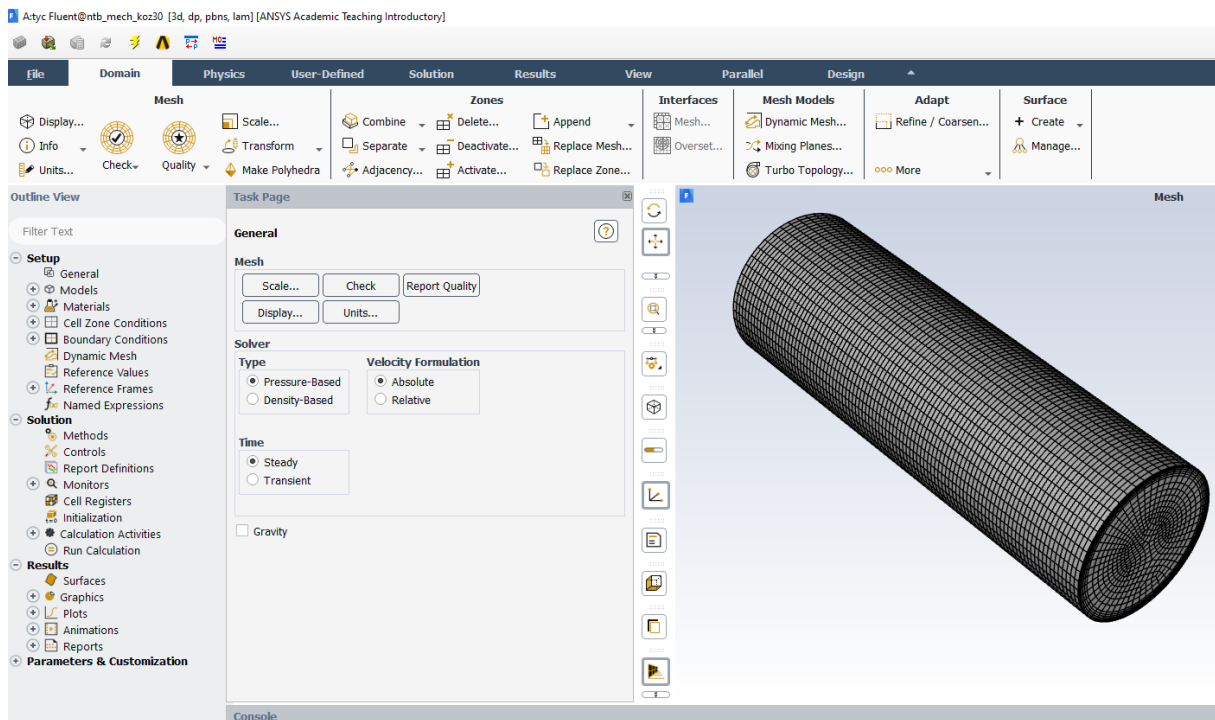
obr. 3.31 – Zobrazení počtu buněk, ploch a uzlů

Následuje kontrola existence záporných objemů v síti příkazem „**Domain/Mesh/Check/Perform Mesh Check**“ (obr. 3.32), což se může vyskytnout u komplikovaných geometrií a v tom případě je nutné síť vytvořit znovu.

```
Console
Domain Extents:
x-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 5.000000e-01
y-coordinate: min (m) = -7.999985e-02, max (m) = 8.000000e-02
z-coordinate: min (m) = -7.984678e-02, max (m) = 7.985624e-02
Volume statistics:
minimum volume (m3): 1.785957e-08
maximum volume (m3): 2.940157e-07
total volume (m3): 1.002666e-02
Face area statistics:
minimum face area (m2): 3.571914e-06
maximum face area (m2): 5.880315e-05
Checking mesh.....
Done.
```

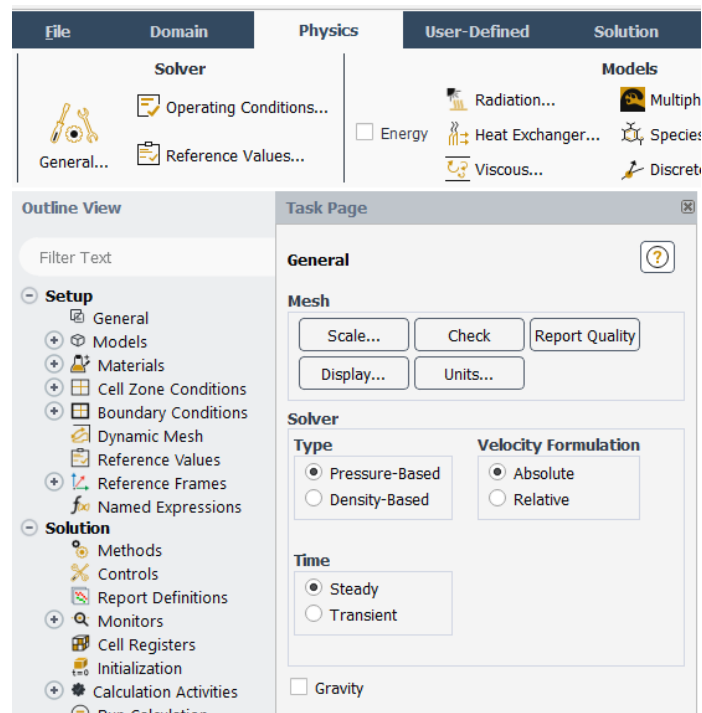
obr. 3.32 – Kontrola sítě na existenci záporných objemů

Pokud jsou všechny údaje v pořádku, postupuje se v nabídce menu zleva doprava a shora dolů. Řada podstatných příkazů, které se vyskytují v záložkovém menu, jsou zároveň v levém roletovém panelu (obr. 3.33).



obr. 3.33 – Nabídka příkazů definujících matematický model

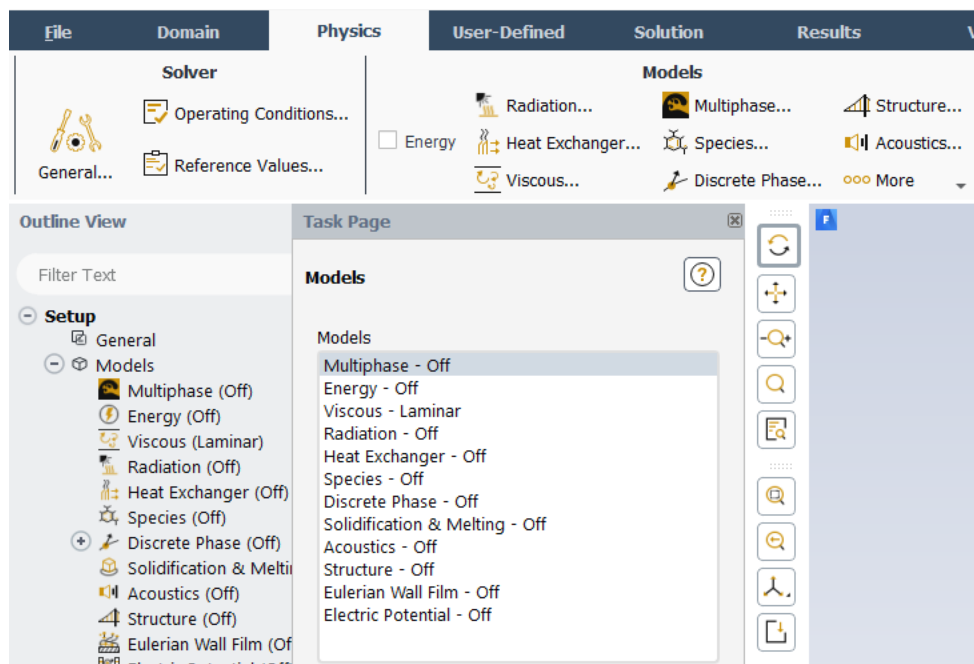
První příkazy z nabídky „**Solver**“ („**Physics/Solver**“) definují typ řešiče, „**Time-Steady**“ pro časově nezávislé řešení. Dále definujte „**Type-Pressure-Based**“, „**Velocity Formulation-Absolute**“. Nastavení příkazů „**Solver**“ je na obr. 3.34. Dále je zde možno definovat vnější sílu (např. gravitační) pomocí zrychlení „**Gravity**“ v libovolném směru a změnit fyzikální jednotky „**Units**“ ze soustavy SI na jinou soustavu jednotek nebo jen jednotky vybraných veličin.



obr. 3.34 – Příkazy z nabídky „**Solver**“

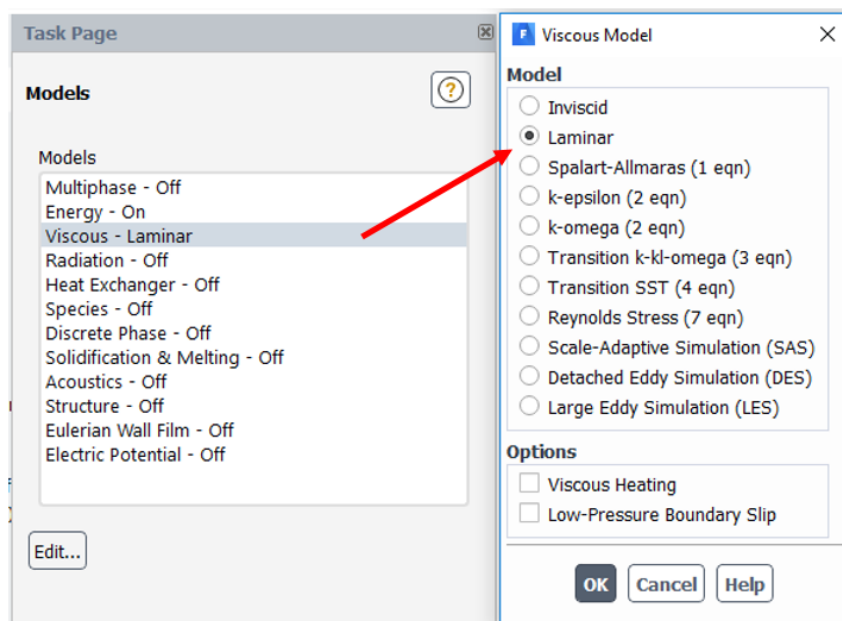


Další příkazy jsou z nabídky „**Models**“ („**Physics/Models**“), kde se definuje fyzikální podstata úlohy dle velice názorné nabídky, tedy „**Multiphase**“, „**Energy**“, „**Species**“, „**Discrete Phase**“ resp. „**Viscous**“, kde lze definovat laminární proudění, turbulentní proudění pomocí různých turbulentních modelů a lze také řešit speciální případ proudění ideální kapaliny „**Inviscid**“ (obr. 3.35).



obr. 3.35 – Charakteristika příkazu „**Models**“

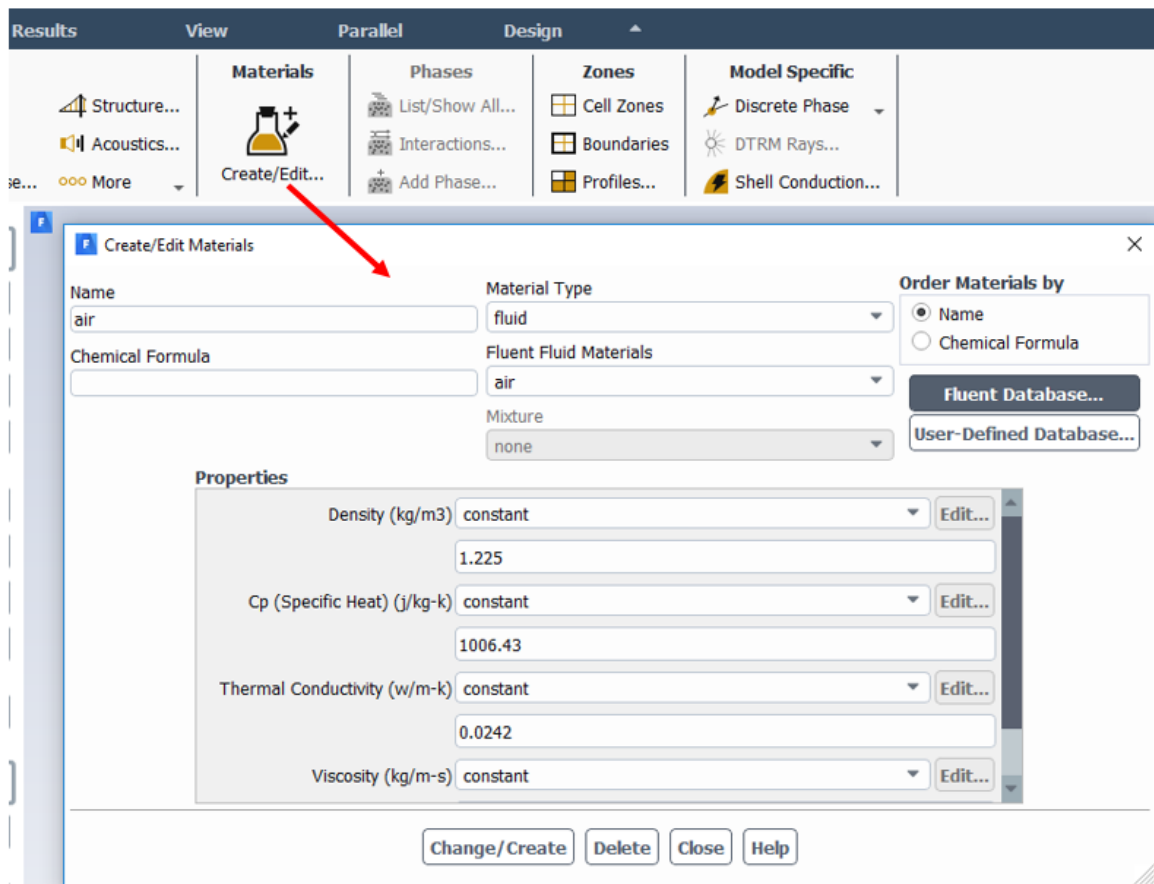
V této úloze je řešena problematika přenosu tepla tzn., definujte tedy pouze rovnici energie „**Energy**“. V úloze nedochází k proudění, je tedy fiktivně řešeno proudění s nulovou rychlostí jako laminární „**Laminar**“ (obr. 3.36).



obr. 3.36 – Nastavení matematického modelu řešeného problému

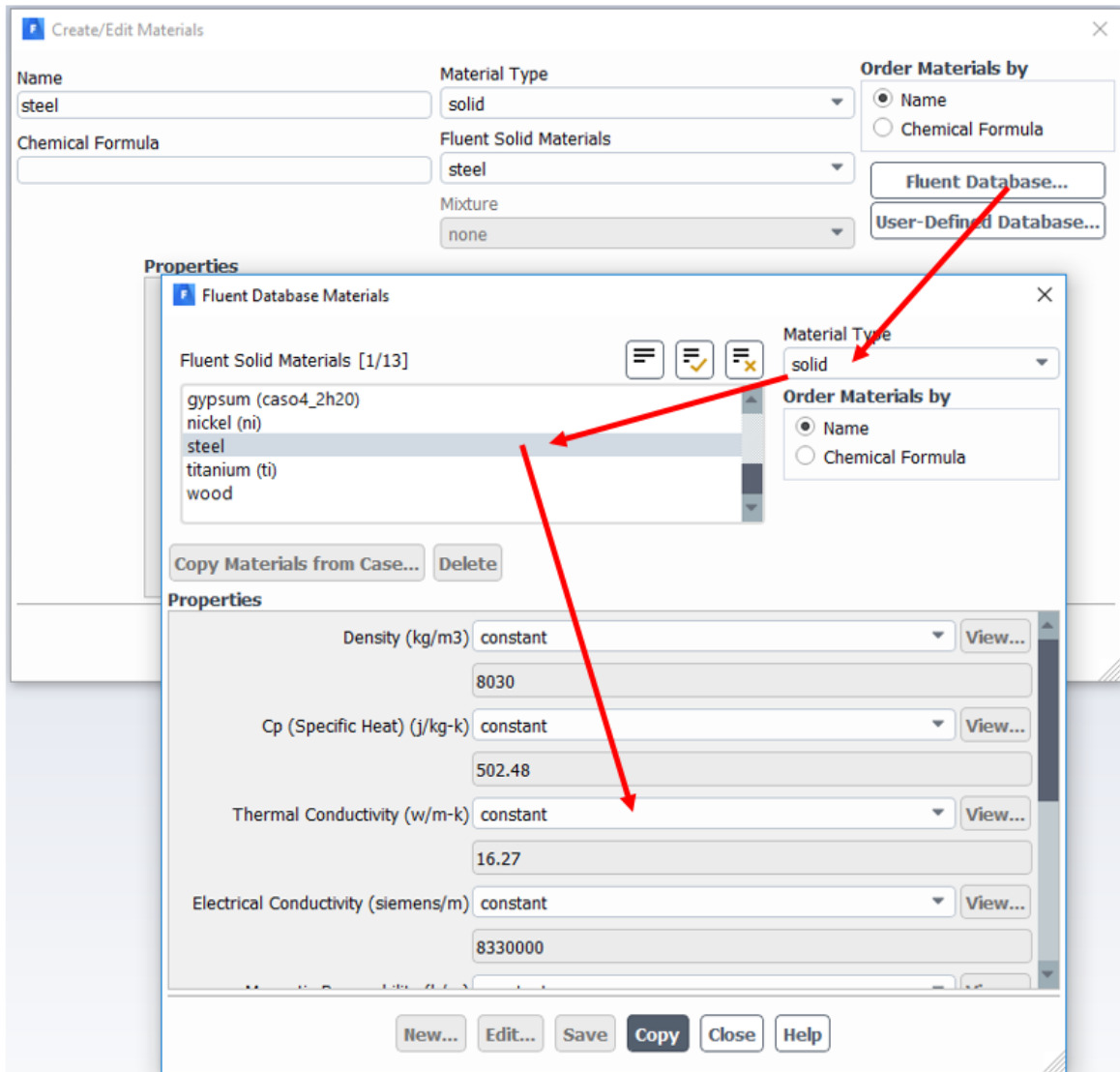
## Definování materiálu tyče

Typ „**Fluid**“ definuje proudící médium (voda, vzduch,...). Typ „**Solid**“ definuje pevný materiál (ocel, měď,...). V tomto příkladu definujeme přenos tepla v pevné tyči (materiál „**Solid**“), typ materiálu je ocel. Materiál definujete příkazem „**Physics/Materials/Create/Edit Materials**“, viz obr. 3.37.



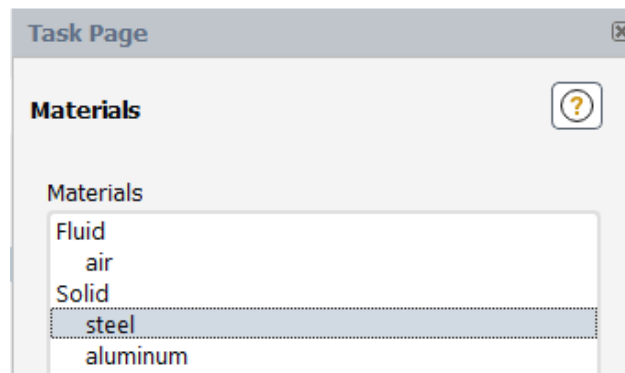
obr. 3.37 Charakteristika příkazu „**Materials**“

Vyberte položku „**Solid**“ v databázi **ANSYS Fluentu** (položka „**Fluent Database**“) změňte nabídku „**Material Type**“ na „**Solid**“. Dále v nabídce materiálů („**Fluent Solid Materials**“) označte „**steel**“. Přesun do matematického modelu potvrďte příkazem „**Copy**“, viz obr. 3.38. Fyzikální vlastnosti (Density, Specific Heat, Thermal Conductivity,...) jsou vidět v dolní části nabídky a mohou se měnit podle požadavků řešitele.



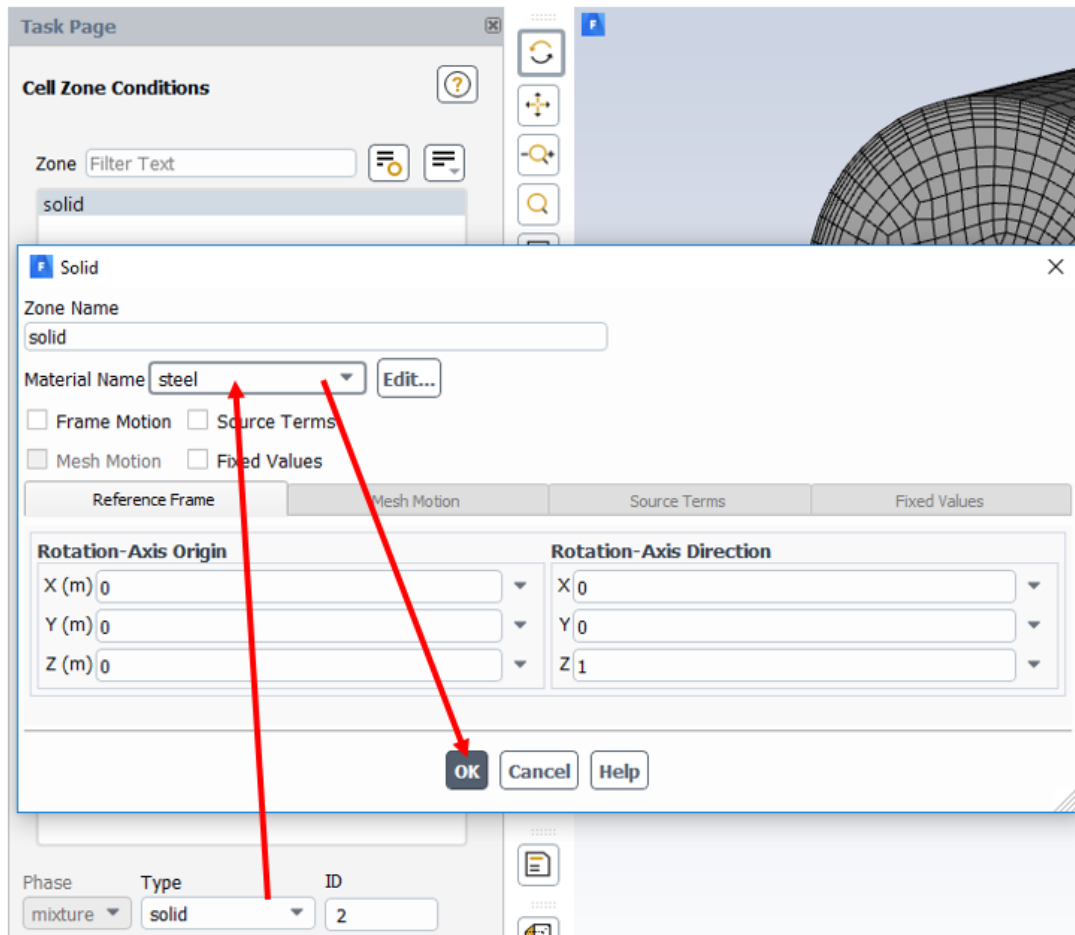
obr. 3.38 – Výběr materiálu ocel („steel“) z databáze ANSYS Fluent

Výsledkem je přesun materiálu „steel“ do položky „Materials“ (obr. 3.39)



obr. 3.39 Materiál „steel“ v nabídce „Materials“

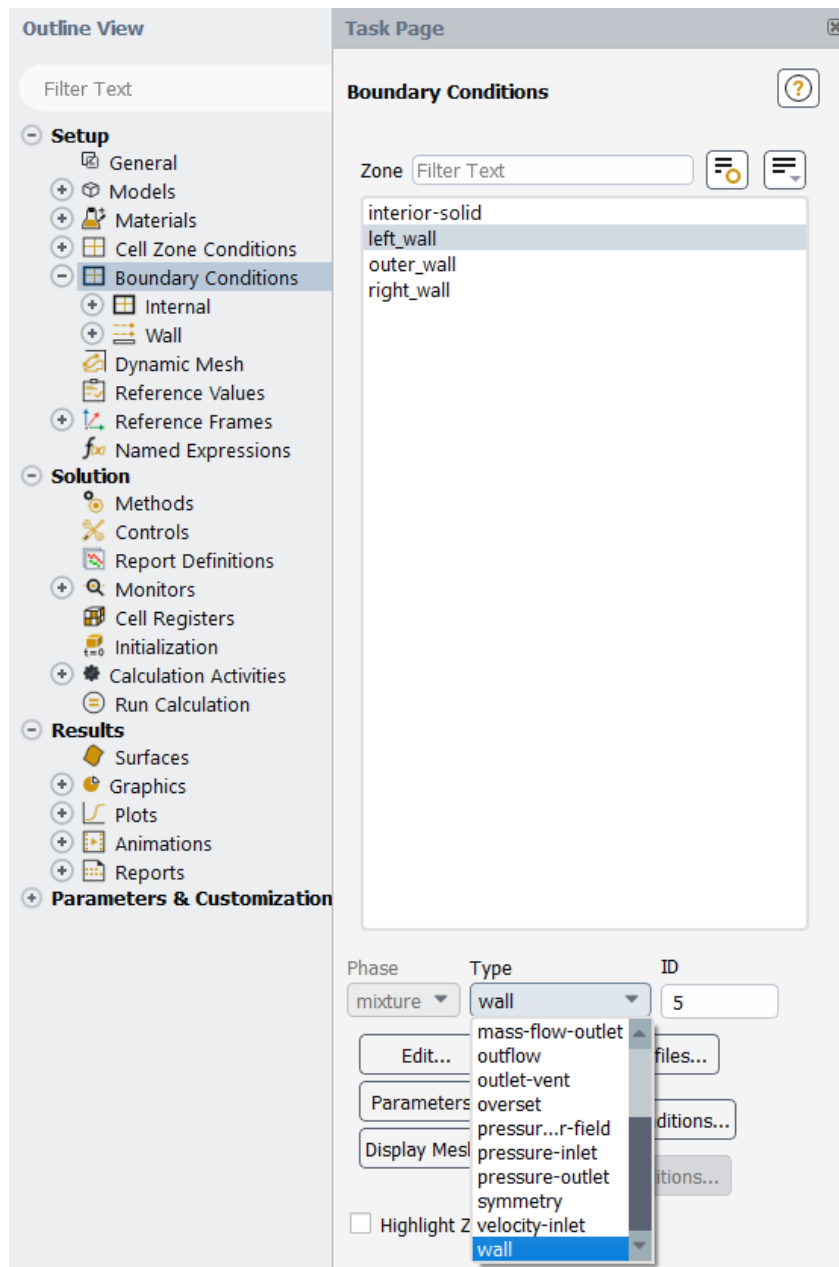
Výsledné přiřazení materiálu „steel“ do oblasti provedete příkazem „Physics/Zones/Cell Zone Conditions“, viz obr. 3.40. Nejdříve zvolte typ („Type“) „solid“. Poté „Material Name“ – „Steel“ a potvrďte tlačítkem OK (obr. 3.40).



obr. 3.40 – Charakteristika příkazu „Cell Zone Conditions“

### Definování okrajových podmínek

Okrajové podmínky definujeme pomocí menu „Physics/Zones/Boundary Conditions“, viz obr. 3.41.

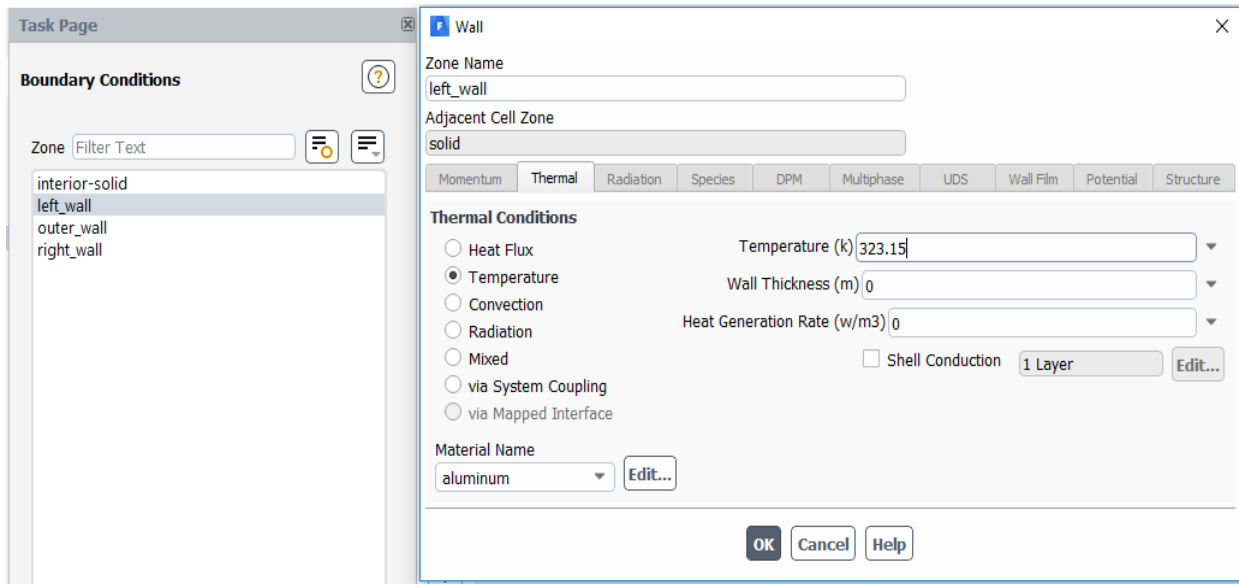


obr. 3.41 – Okrajové podmínky („**Boundary Conditions**“) a typy okrajových podmínek

Přednastavený typ okrajové podmínky v programu **ANSYS Fluent** je stěna („**wall**“). Pokud pojmenujeme určitou okrajovou podmínku v programu **ANSYS Meshing** dle zvyklostí **ANSYS Fluentu** bude k této podmínce přiřazen specifický typ. Typy okrajových podmínek lze definovat dle nabídky viz obr. 3.41. Např. pro pojmenování **axis** je přiřazen typ okrajové podmínky osa („**axis**“). Dále pro pojmenování **inlet** je přiřazen typ vstupu („**velocity inlet**“) proudícího média do oblasti a pro pojmenování **outlet** je přiřazen typ výstupu („**pressure outlet**“) proudícího média z oblasti atd.

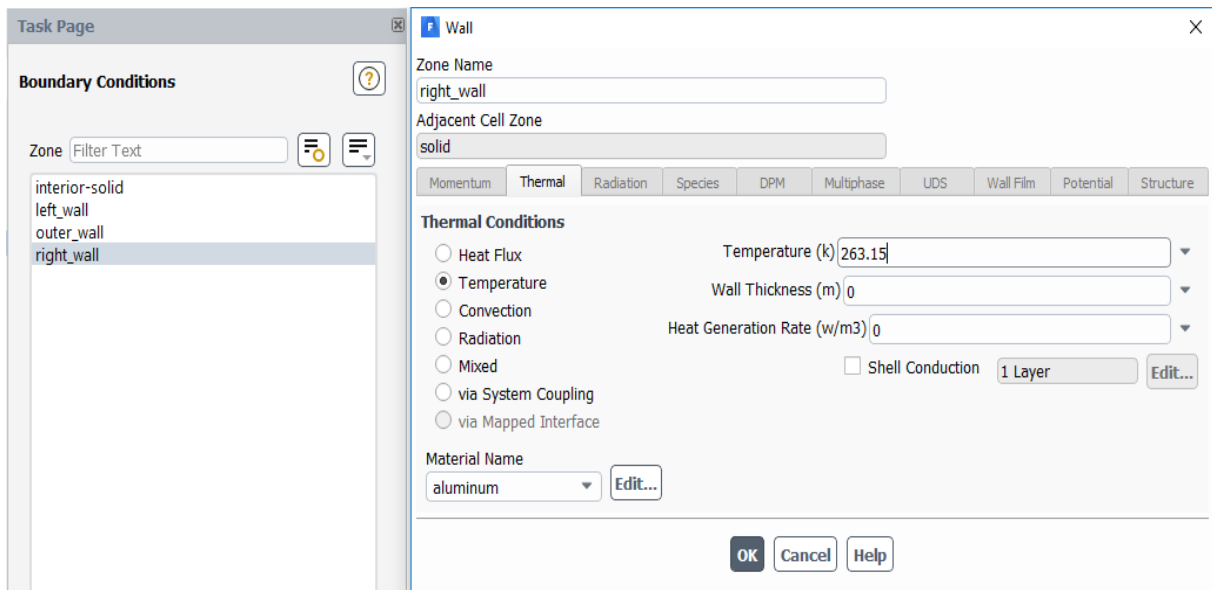
### Specifikace okrajových podmínek

- **left wall** – typ „**wall**“ - „**Edit**“ ( $T_0 = 50 \text{ } ^\circ\text{C} = 323.15\text{K}$ ), viz obr. 3.42.



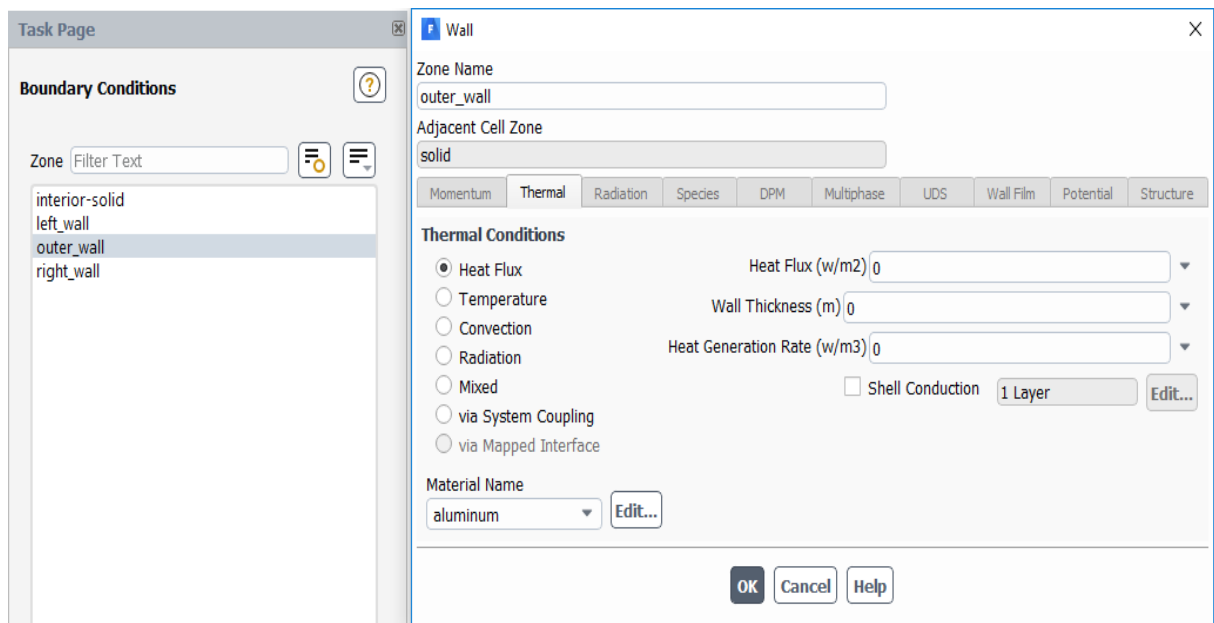
obr. 3.42 – Definování okrajové podmínky „left\_wall“

- **right\_wall** – typ „wall“ - „Edit“  $T_l = -10^{\circ}\text{C} = 263.15\text{K}$ , viz obr. 3.43.



obr. 3.43 – Definování okrajové podmínky „right\_wall“

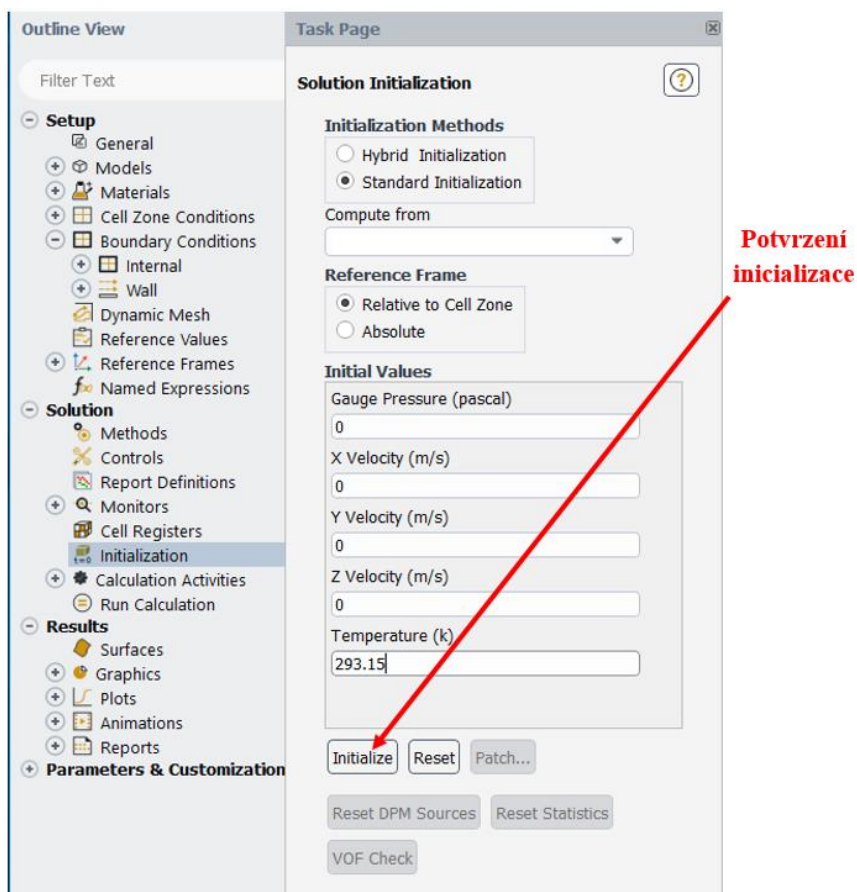
- **outer\_wall** – typ „wall“ - „Edit“  $q = 0\text{ W/m}^2$ , viz obr. 3.44.



obr. 3.44 – Definování okrajové podmínky „outer\_wall“

## Inicializace

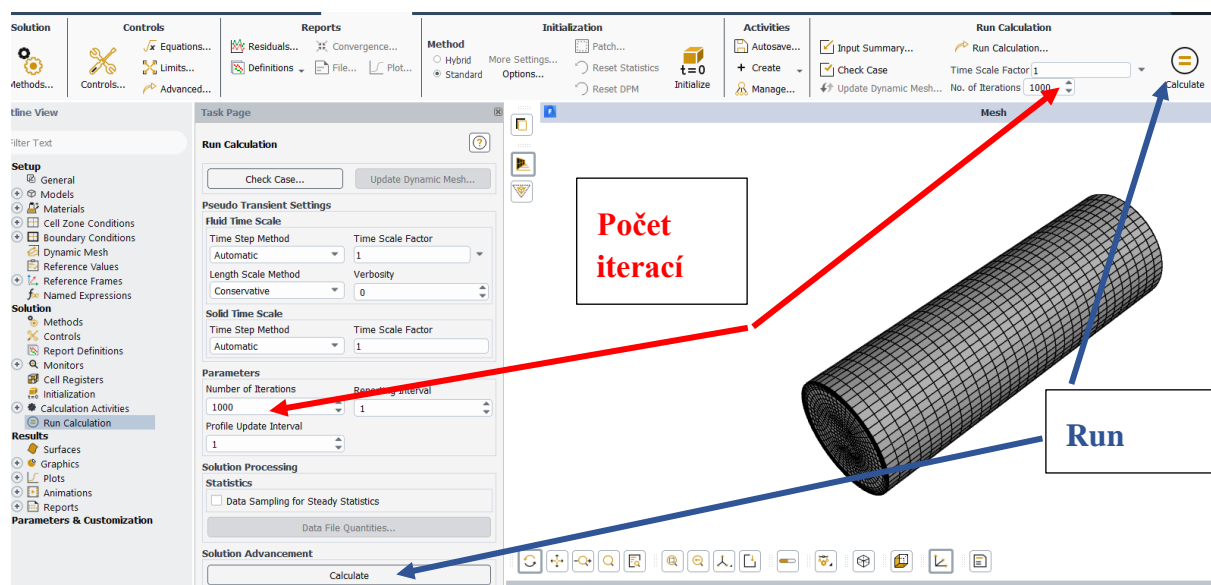
Následně se provede standardní inicializace (**Standard Initialization**) výpočtové oblasti, tzn. definování počátečních podmínek do celé oblasti pomocí příkazu „**Solution/Initialization/Method**“. Definujte standardní inicializaci „**Method-Standard**“ pomocí nabídky „**Options**“, viz obr. 3.45. V této úloze definujeme pouze teplotu. Definujte střední hodnotu teploty  $T = 293.15K$ . Inicializaci potvrďte tlačítkem „**Initialize**“ (obr. 3.45).



obr. 3.45 – Inicializace výpočtové oblasti

## Výpočet

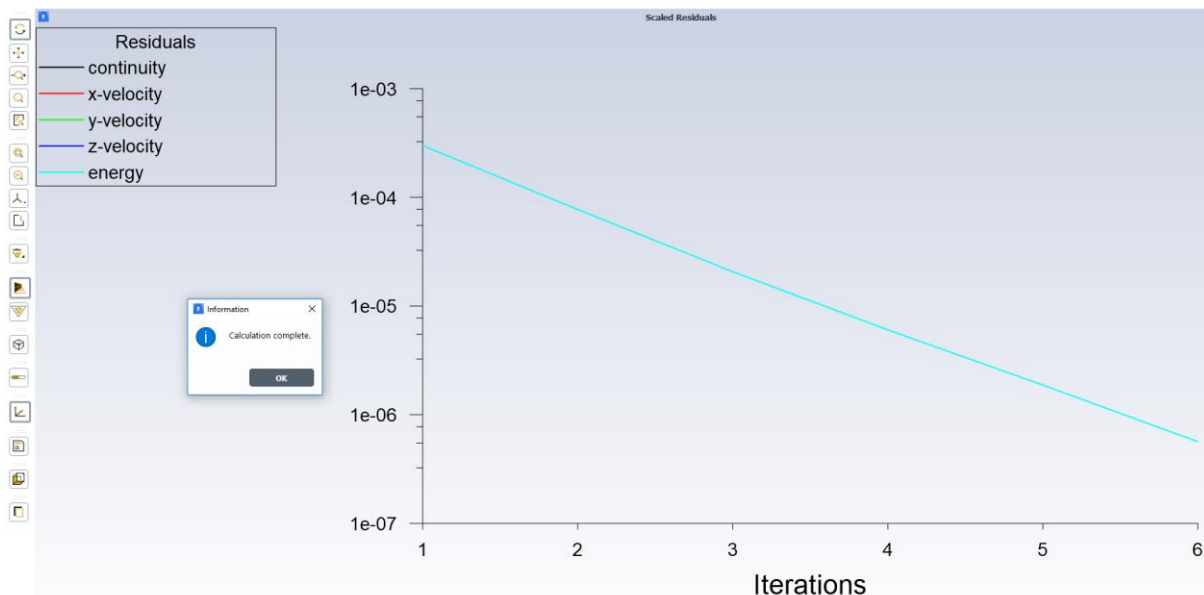
Po provedení inicializace se spustí iterační výpočet příkazem „**Solution/Run Calculation**“, viz obr. 3.46. Je nutné zadat počet iterací (**Number of Iterations**). Předdefinovaná hodnota je 0. Zadává se hodnota dosti vysoká, např. 1000, kdy se předpokládá, že bude dosažena konvergence.



obr. 3.46 – Příklad „Run Calculation“



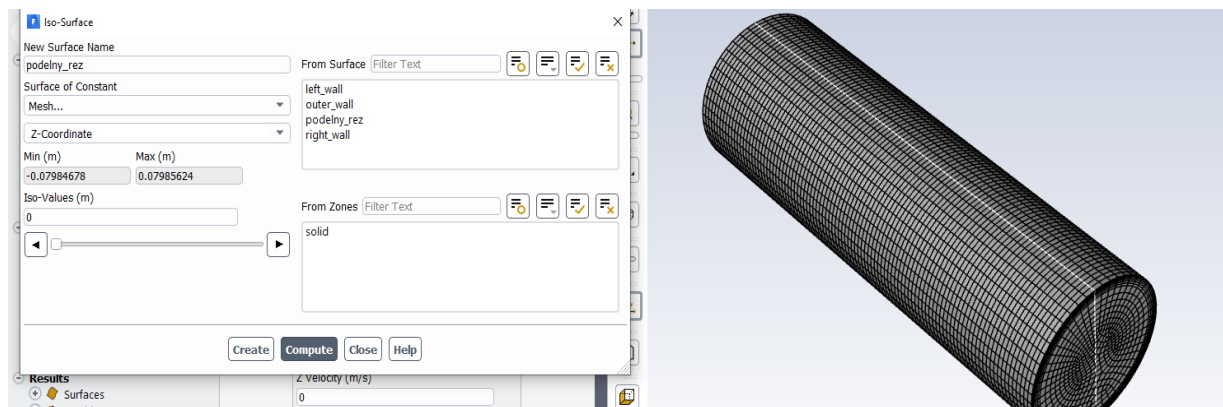
Následně se spustí iterační výpočet tlačítkem „**Calculate**“. Konvergenci lze sledovat jak graficky, tak číselně (obr. 3.47). Protože neřešíme proudění, tak složky rychlosti ani tlak (**continuity**) se nepočítají. Pouze se počítá teplota (**energy**) a jakmile je dosaženo požadované nastavené přesnosti („**Results/Residuals**“), výpočet je ukončen poznámkou, že řešení je zkonvergováno (**solution is converged**), viz obr. 3.47



obr. 3.47 – Průběh konvergence

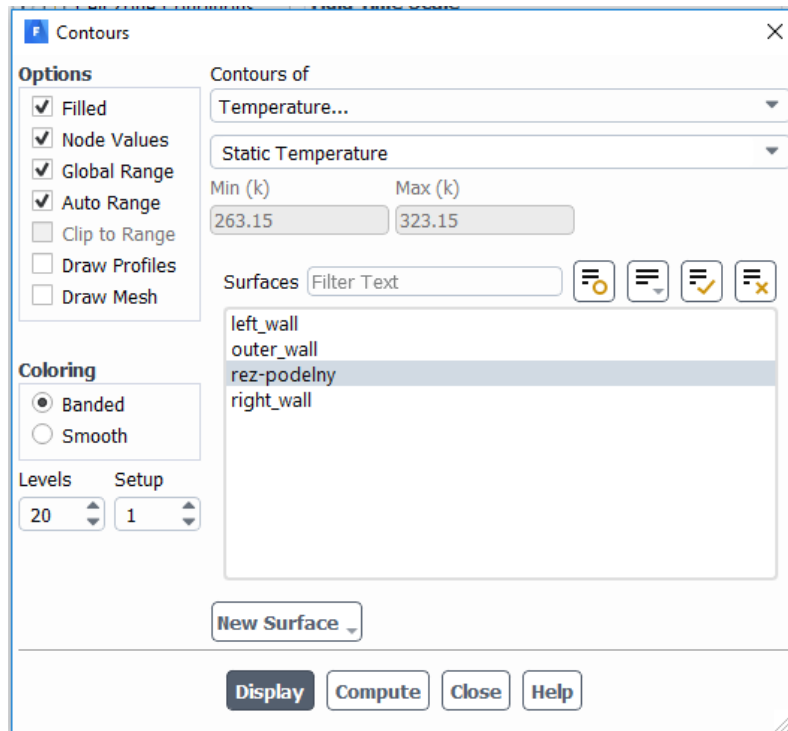
## Vyhodnocení výpočtu

Nejprve potřebujeme vytvořit podélný řez geometrií. Zobrazíme si geometrii pomocí příkazu „**Domain/Display**“ abychom zjistili, ve které ose musíme řez vytvořit. Řez vytvoříme příkazem „**Domain/Surface/Create/Iso-Surface**“. Jako „**Surface of Constant**“ vybereme „**Mesh**“ a vybereme osu z (viz Obr. 3.48). Kliknutím na *Compute* zjistíme souřadnice v ose z. Jelikož chceme mít řez uprostřed válce, zadáme do *Iso-Values* hodnotu, která je uprostřed těchto souřadnic. Kliknutím na *Create* řez potvrdíme.



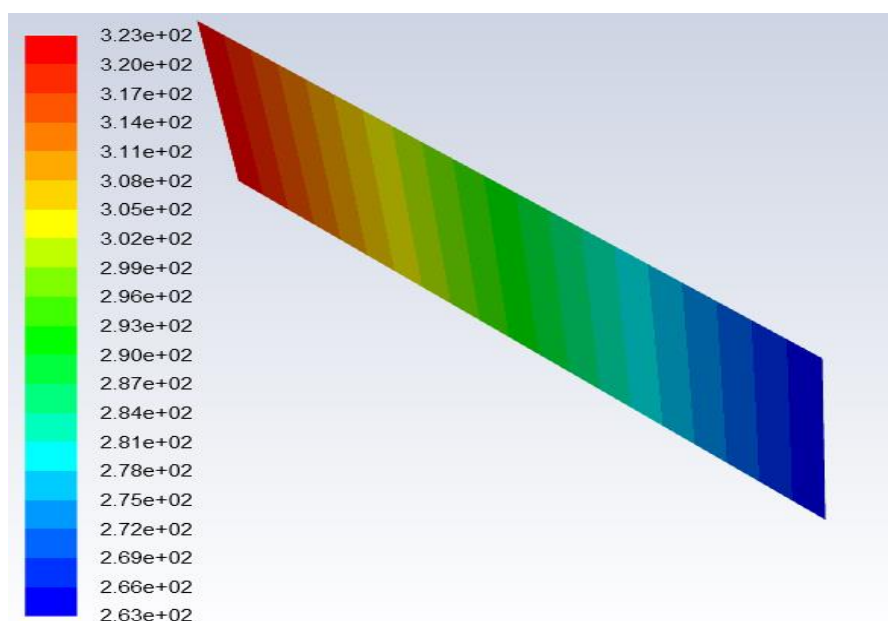
Obr. 3.48 - Vytvoření řezu (Iso-Surface)

Pro přehlednost se uvádějí možnosti vyhodnocení, tj. vyplněné izočáry teploty, ostatní veličiny nemají smysl, i když jsou nabízeny, jako je tlak, rychlost atd. Vyplněné izočáry teploty vyhodnotíme příkazem „**Results/Graphics/Contours**“. Izočáry vyhodnotíme ve vytvořeném podélném řezu. Nastavení vykreslení izočar teploty je patrné z obr. 3.49.



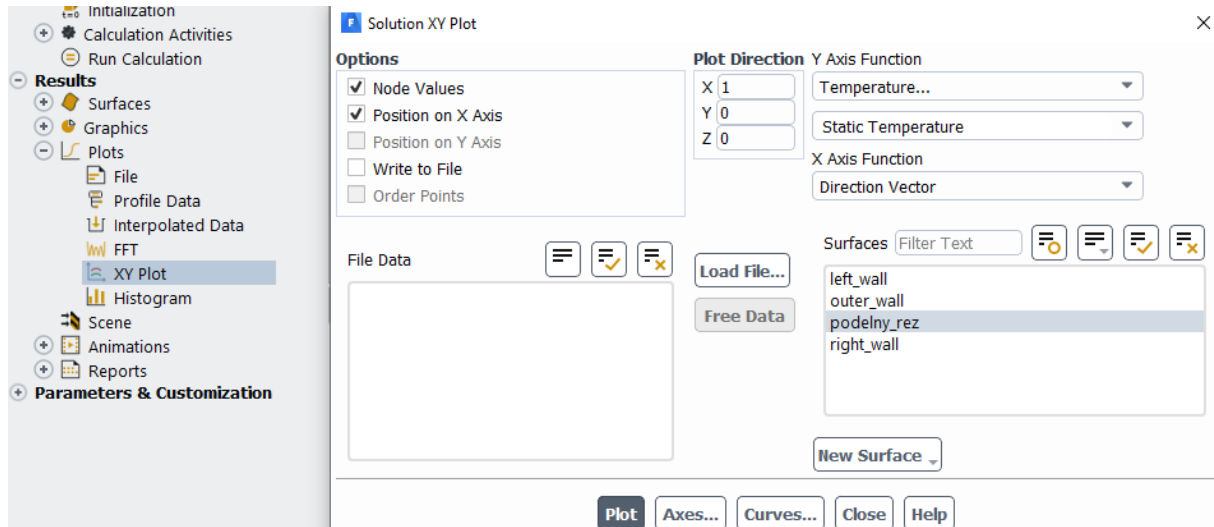
obr. 3.49 – Nastavení vykreslení izočar teploty příkazem „**Contours**“

Výsledek vyhodnocení izočar teploty je patrný z obr. 3.50, kde je vidět lineární pokles teploty od 323.15K do 263.15K. Toto je ve shodě s analytickým řešením (přímka spojující okrajové hodnoty teploty).



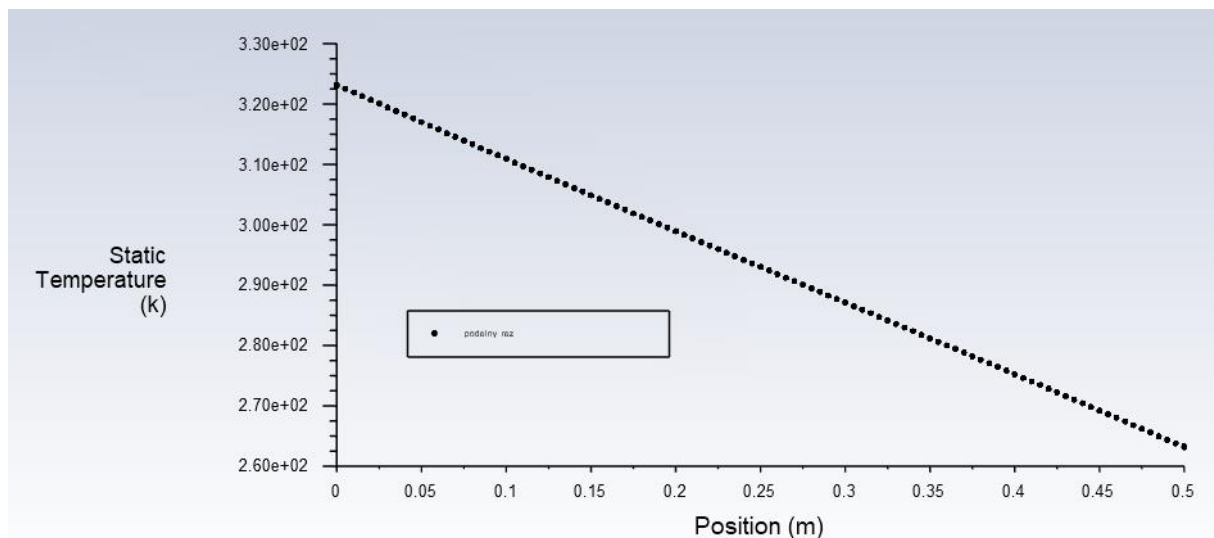
obr. 3.50 – Rozložení teploty v celé oblasti [K]

Kromě toho lze vyhodnotit rozložení teploty po délce oblasti příkazem „Results/Plots/XY Plot“, viz obr. 3.51. V nabídce „Y Axis Function“ vyberte „Temperature/Static Temperature“ a v položkách „Surfaces“ vyberte **podélný řez oblastí**. Do „Plot Direction“ je třeba zadat správný směr, ve kterém leží geometrie válce.



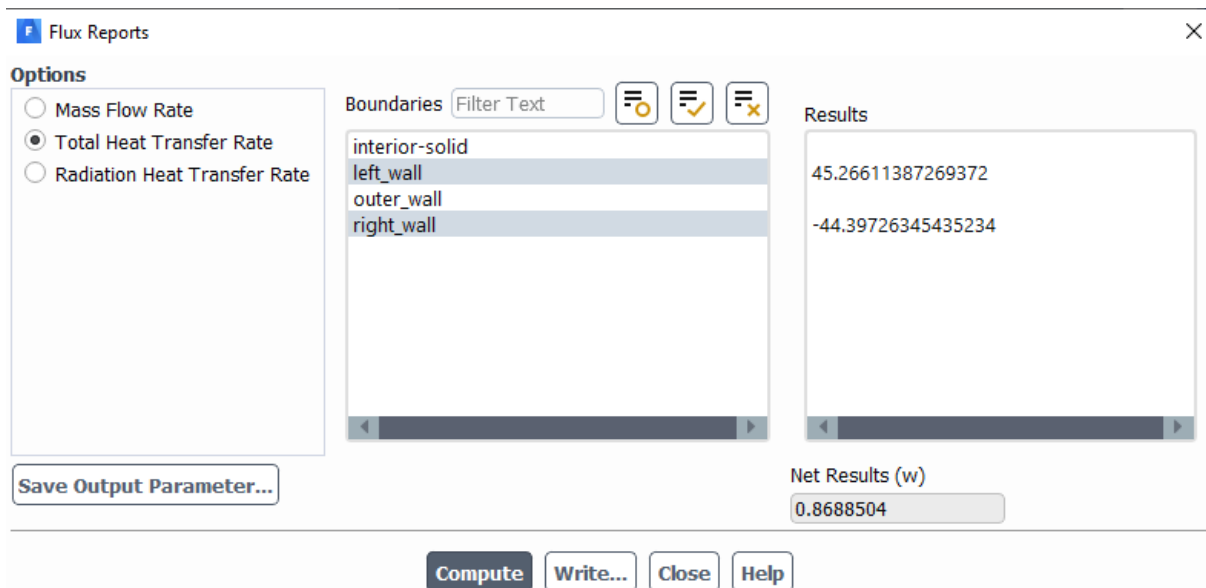
obr. 3.51 – Charakteristika příkazu „XY Plot“

Vykreslení rozložení teploty po délce oblasti je patrné z obr. 3.52.



obr. 3.52 – Rozložení teploty po délce oblastí

Velmi zajímavé je vyhodnocení množství tepla procházejícího stěnami **left wall** a **right wall**. Vyhodnocení provedeme příkazem „Results/Reports/Fluxes“, viz obr. 3.53. V nabídce „Options“ vyberte „Total Heat Transfer Rate“ a v nabídce „Boundaries“ označte **left wall** a **right wall**. Výsledné hodnoty jsou uvedené v položce „Results“ a Tab. 3.4.

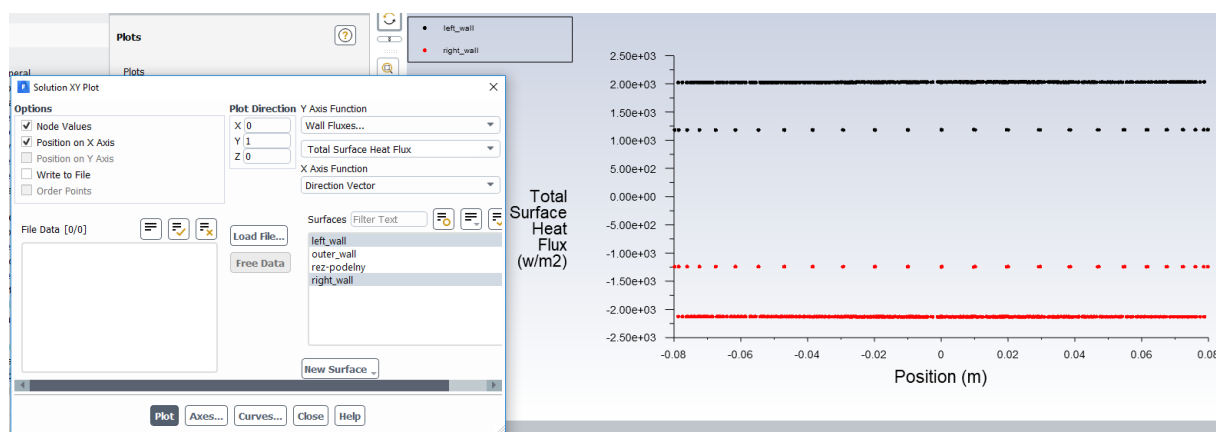


obr. 3.53 – Příklad „Fluxes“

Tab. 3.4 – Teplo procházející stěnou

teplo procházející stěnou $Q$ [W]	ocel
left wall	45.27
right wall	-44.40

Přestup tepla procházející elementy stěny v jednotkách  $[W \cdot m^{-2}]$  lze také vyhodnotit podrobně v každém místě stěny. V tomto jednoduchém případě je konstantní, protože rozložení teplot je ve směru z lineární a síť je po délce s konstantním krokem, tedy existuje jediná směrnic (derivace teploty je tok), ale v obecné geometrii tomu tak nebude. Vykreslení provedeme příkazem „Results/XY Plot“, viz obr. 3.54. V nabídce „Plot Direction“ definujte  $X=0, Y=1, Z=0$ , v nabídce „Y Axis Function“ vyberte „Wall Fluxes/Total Surface Heat Flux“ a v položkách „Surfaces“ vyberte **left\_wall** a **right\_wall**. Na grafu se objevuje čára hodnoty uvnitř plochy a několik hodnot, které jsou na hranici a jsou modifikovány v souvislosti s okrajovou podmínkou na „outer wall“.



obr. 3.54 – Rozložení toku tepla stěny „left wall a right wall“

### 3.5 Varianty výpočtů

- Definujte odlišný materiál (Tab. 3.5) výpočtové oblasti (tyče). Realizujte numerické výpočty a vzájemně porovnejte výsledky tak, jak jsou uvedené ve vzorovém příkladě.

Tab. 3.5 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, hliník, měď, dřevo)

materiál	dřevo	ocel	hliník	měď
hustota $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	700	8030	2719	8978
měrná tepelná kapacita $c_p$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	2310	502.48	871	381
tepelná vodivost $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	0.173	16.27	202.4	387.6

- Definujte varianty odlišných teplotních okrajových podmínek na stěnách **left wall** a **right wall** tak, jak jsou uvedené v Tab. 3.6, proveďte výpočet a porovnejte výsledky.

Tab. 3.6 – Varianty okrajových podmínek na stěnách **left wall** a **right wall**

Varianta	OKRAJOVÉ PODMÍNKY				
	left wall	right wall	right wall	right wall	
	$T_0$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_l$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$q_l$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	$\alpha$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$T_{\infty}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
A	50	-10			
B	-20	100			
C	50		162700		
D	50		0		
E	50			1000	-10

kde  $T_0$  je teplota na „**left wall**“

$T_l$  je teplota na „**right wall**“

$q_l$  je měrný tepelný tok na „**right wall**“

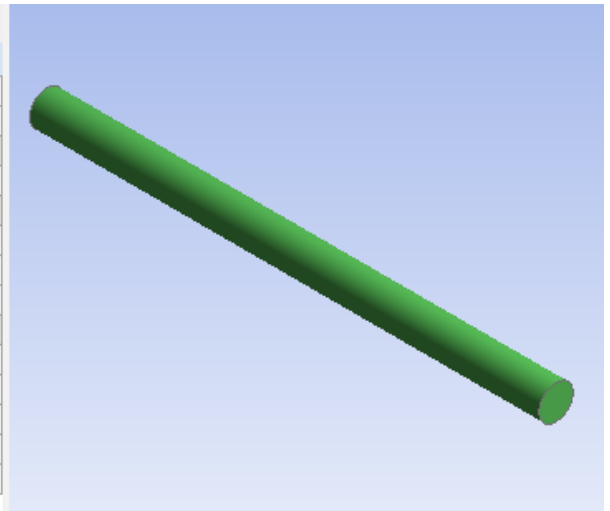
$T_{\infty}$  je teplota okolí

$\alpha$  je součinitel přestupu tepla na „**right wall**“

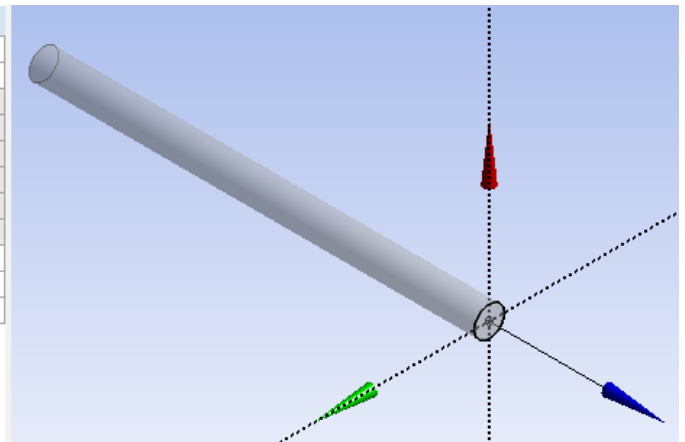
- Připravte oblast řešení sestávající ze tří tyčí odlišných průměrů, při definování geometrie využijte přesun souřadného systému vždy na konec tyče („**Create/New Plane**“). Okrajové podmínky jsou stejné. Při síťování využijte sweep metodu na první a třetí tyč, druhá tyč vzhledem k jinému průměru se vysítuje jen pomocí inflation

Tvorba geometrie:

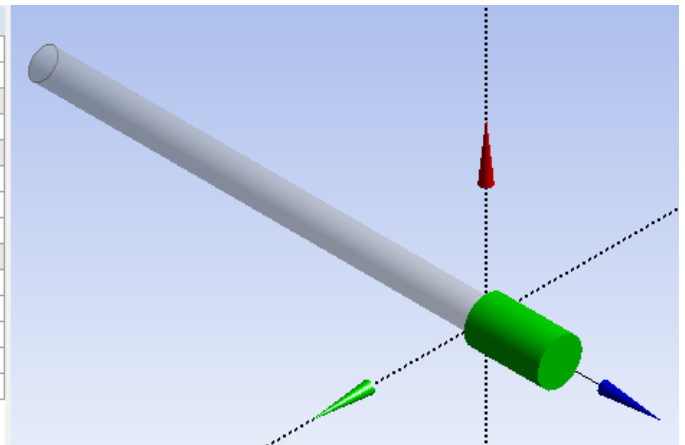
Sketching Modeling	
Details View	
Details of Pipe22	
Cylinder	Pipe22
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Frozen
Origin Definition	Coordinates
<input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate	0 m
Axis Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component	0.3 m
<input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component	0 m
<input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component	0 m
<input type="checkbox"/> FD10, Radius (>0)	0.01 m
As Thin/Surface?	No



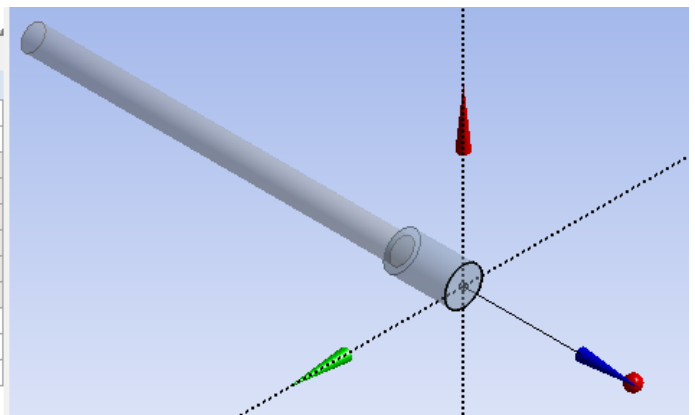
Details View	
Details of EndPipe22	
Plane	EndPipe22
Sketches	0
Type	From Face
Subtype	Outline Plane
Base Face	Selected
Use Arc Centers for Origin?	Yes
Transform 1 (RMB)	None
Reverse Normal/Z-Axis?	No
Flip XY-Axes?	No
Export Coordinate System?	No

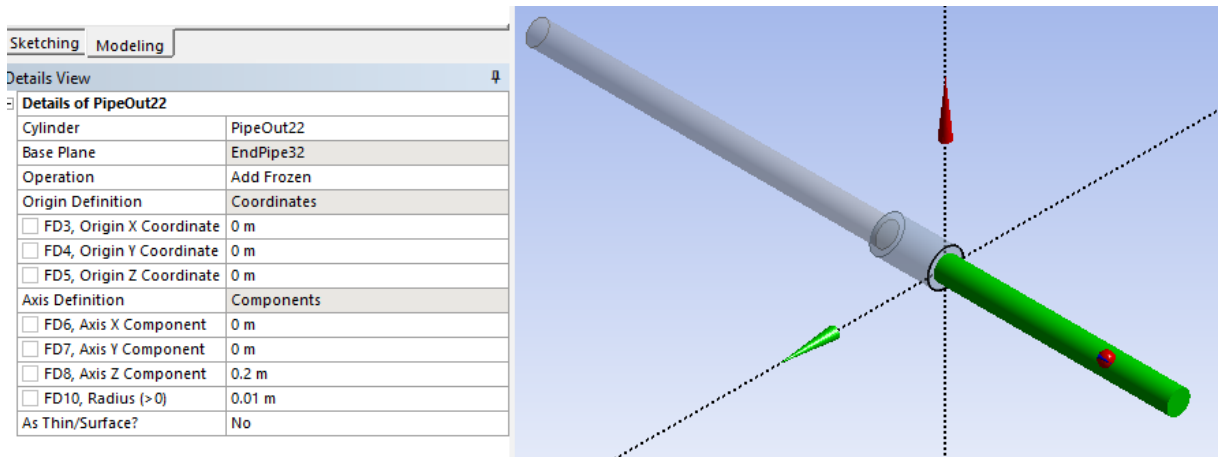


Details View	
Details of Pipe32	
Cylinder	Pipe32
Base Plane	EndPipe22
Operation	Add Frozen
Origin Definition	Coordinates
<input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate	0 m
Axis Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component	0 m
<input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component	0 m
<input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component	0.05 m
<input type="checkbox"/> FD10, Radius (>0)	0.015 m
As Thin/Surface?	No

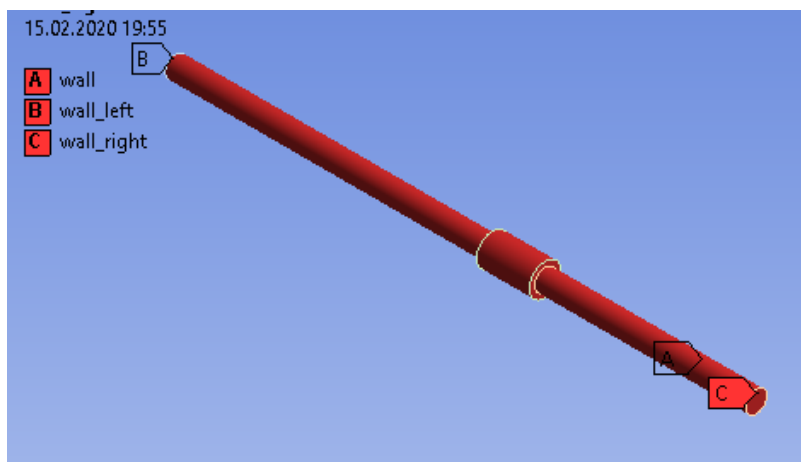


Sketching Modeling	
Details View	
Details of EndPipe32	
Plane	EndPipe32
Sketches	0
Type	From Face
Subtype	Outline Plane
Base Face	Selected
Use Arc Centers for Origin?	Yes
Transform 1 (RMB)	None
Reverse Normal/Z-Axis?	No
Flip XY-Axes?	No
Export Coordinate System?	No



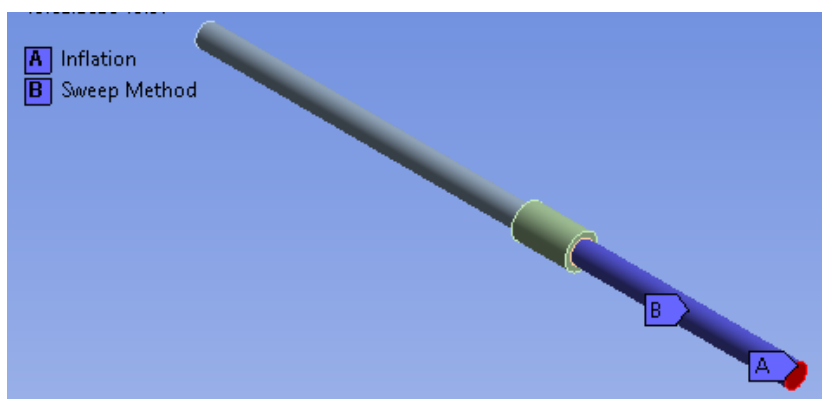


Okrajové podmínky:

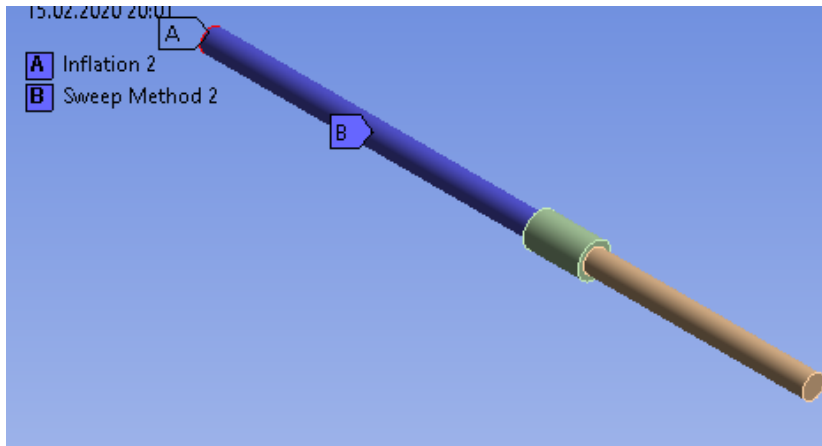


Síťování:

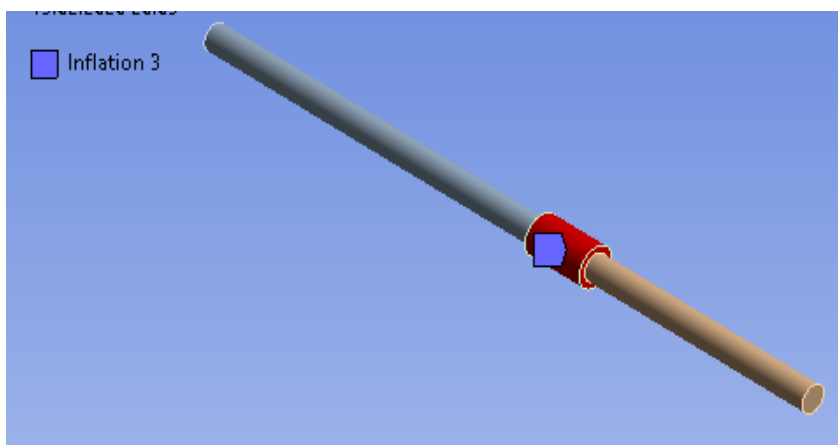
Inflation na plochu right\_wall, hranice je kružnice, sweep se použije jen na třetí trubku (další trubka mění průměr, proto nelze pokračovat také sweepem)



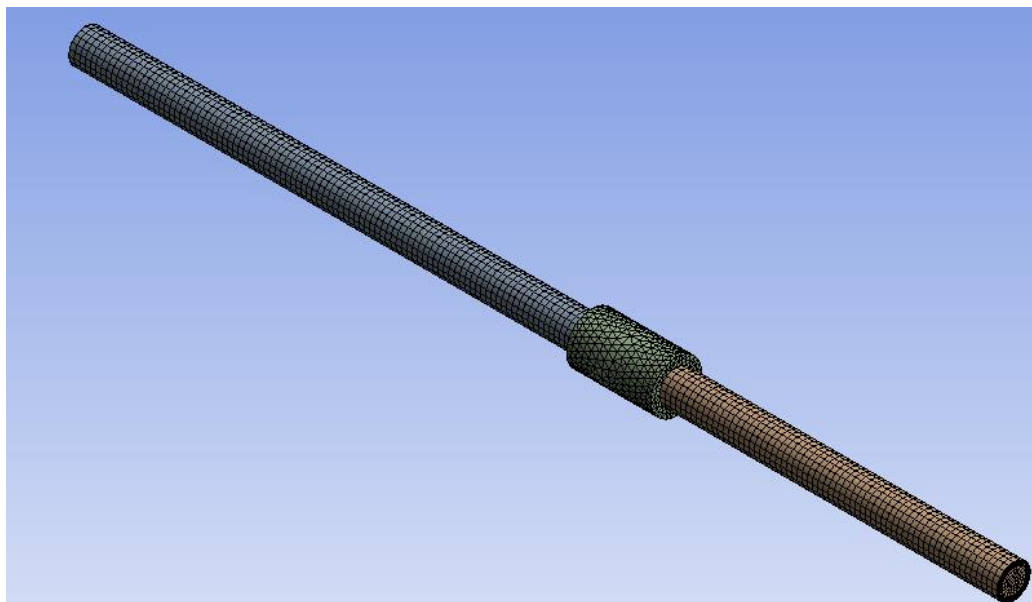
Inflation na plochu left\_wall, hranice je kružnice, sweep se použije jen na první trubku



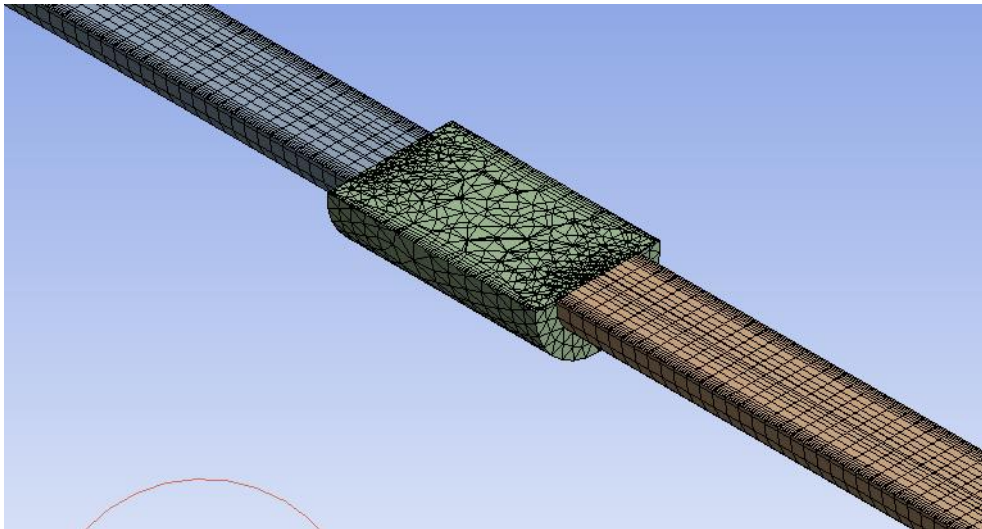
Inflation na objem druhé trubky, hranice je plocha trubky



Výsledná síť





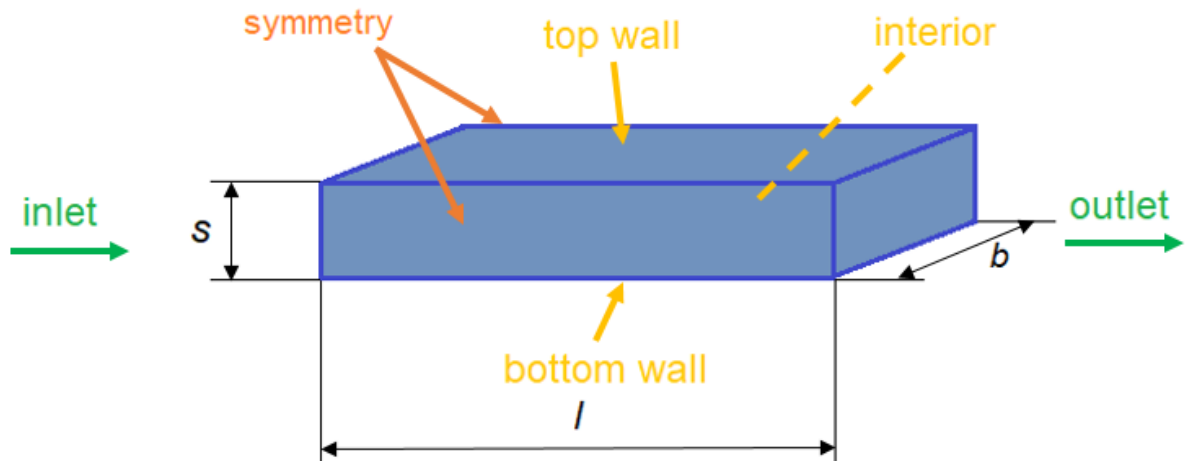


Další výpočet probíhá podle přechozí úlohy.

## 4 LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ – PROUDĚNÍ VODY MEZI DESKAMI

### Příklad

Řešte proudění vody mezi dvěma nekonečně velkými deskami, viz obr. 4.1. Fyzikální model je dán tvarem oblasti, typem proudění a hydraulickými parametry proudění. Numerický výpočet definujte v programovém prostředí **ANSYS Fluent**. K tvorbě výpočetní oblasti (geometrie) a výpočetní sítě využijte programy **DesignModeler** a **ANSYS Meshing**.



obr. 4.1 – Schéma oblasti

Voda vtéká do oblasti rychlostí  $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a vystupuje do ovzduší, kde je relativní tlak  $0 \text{ Pa}$ . Úloha je dána jako 3D model a představuje proudění v oblasti tvaru kvádrů o dané délce, tloušťce a šířce, viz Tab. 4.1. Fyzikální vlastnosti proudícího média jsou dány v Tab. 4.2.

Tab. 4.1 – Geometrie oblasti

délka oblasti $l$ [m]	0.5
výška oblasti $s$ [m]	0.02
šířka oblasti $b$ [m]	0.1

Tab. 4.2 – Fyzikální vlastnosti vody

hustota vody $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	998
dynamická viskozita $\eta$ [ $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ ]	0.001003

## Okrajové podmínky

Na „inletu“ je definována rychlostní okrajová podmínka (**VELOCITY INLET**) a na „outletu“ je dána podmínka statického tlaku (**PRESSURE-OUTLET**). Na stěnách („top wall, bottom wall“) je okrajová podmínka typu **WALL**, kde se předpokládá nulová rychlost proudění (je předdefinovaná). Na boční stěny je definována okrajová podmínka typu **SYMMETRY** (nekonečně velké desky). Okrajové podmínky jsou uvedené v Tab. 4.3.

Tab. 4.3 – Okrajové podmínky

<b>inlet</b> – střední rychlost $u_s$ [m.s <sup>-1</sup> ]	0.05
<b>outlet</b> – statický tlak $p$ [Pa]	0

## Matematický model

Výběr matematického modelu bude řešen v dalších kapitolách, nyní se ponechá předdefinovaný (laminární model proudění).

Kriterium laminarity je Reynoldsovo číslo:

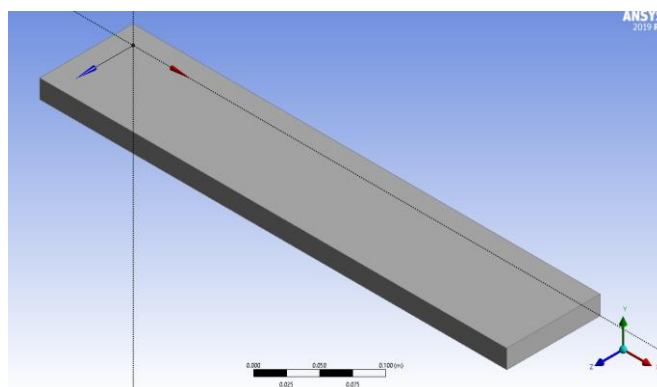
$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} = \frac{0.05 \cdot 0.02}{1.10^{-6}} = 1000$$

Proudění je tedy laminární.

## 4.1 Vytvoření geometrie a sítě

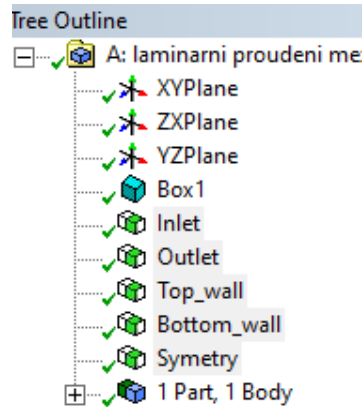
V prostředí **Workbench** vyberte „**Fluid Flow /Fluent**“ a přetáhněte jej do pracovního okna. Klikněte pravým tlačítkem na „**Geometry**“ a vyberte „**New DesignModeler Geometry**“. Vytvořte geometrii kvádru o daných rozměrech pomocí příkazu „**Create/Primitives/Box**“ (Obr. 4.2). Kvádr potvrďte kliknutím na „**Generate**“.

Sketching Modeling	
Details View	
Details of Box1	
Box	Box1
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Material
Box Type	From One Point and Diagonal
Point 1 Definition	Coordinates
<input type="checkbox"/> FD3, Point 1 X Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD4, Point 1 Y Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD5, Point 1 Z Coordinate	0 m
Diagonal Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD6, Diagonal X Component	0,5 m
<input type="checkbox"/> FD7, Diagonal Y Component	0,02 m
<input type="checkbox"/> FD8, Diagonal Z Component	0,1 m
As Thin/Surface?	No



Obr. 4.2 - Vytvoření geometrie kvádru

V další fázi pojmenujte okrajové podmínky, tak jak jsou popsány na obr. 4.1. Přejmenování okrajových podmínek se provede pomocí příkazu „**Named Selection**“. Výsledné označení a pojmenování všech okrajových podmínek je patrné z obr. 4.3.

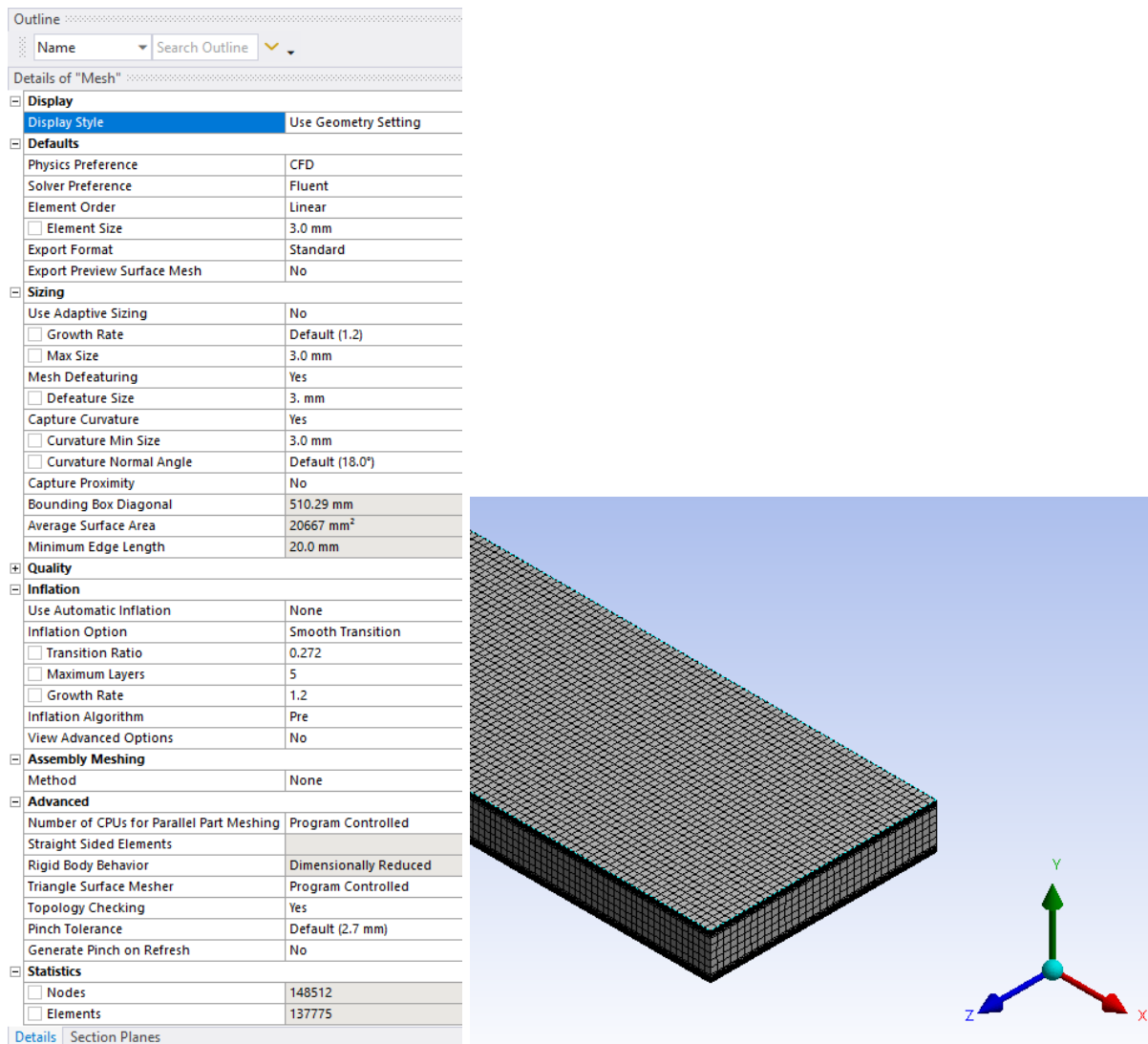


obr. 4.3 – Označení okrajových podmínek

Síťování provedete v **ANSYS Meshing**. Protože se jedná o proudění mezi deskami, je nutné vložit na plochu „inlet“ Inflation k oběma stěnám (**top wall, bottom wall**). Vytvořte Inflation pro obě hrany najednou identicky jako v kap. 3.3 použitím příkazu „**Meshing/Inflation**“ (parametry jsou uvedené na obr. 4.4). Následně použijte metodu „**Sweep**“ dle kap. 3.4. Parametry jsou uvedené na obr. 4.4. Následně vygenerujte novou výpočetní síť příkazem „**Generate Mesh**“. Výsledná podoba výpočetní sítě včetně parametrů síťování je znázorněna na obr. 4.5.

Details of "Inflation" - Inflation		Details of "Sweep Method" - Method	
<b>Scope</b>		<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection	Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face	Geometry	1 Body
<b>Definition</b>		<b>Definition</b>	
Suppressed	No	Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection	Method	Sweep
Boundary	2 Edges	Algorithm	Program Controlled
Inflation Option	Smooth Transition	Element Order	Use Global Setting
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0.2	Src/Trg Selection	Manual Source
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	10	Source	1 Face
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.2	Target	Program Controlled
Inflation Algorithm	Pre	Free Face Mesh Type	All Quad
		Type	Number of Divisions
		<input type="checkbox"/> Sweep Num Divs	200
		Element Option	Solid
		<b>Advanced</b>	
		Sweep Bias Type	No Bias

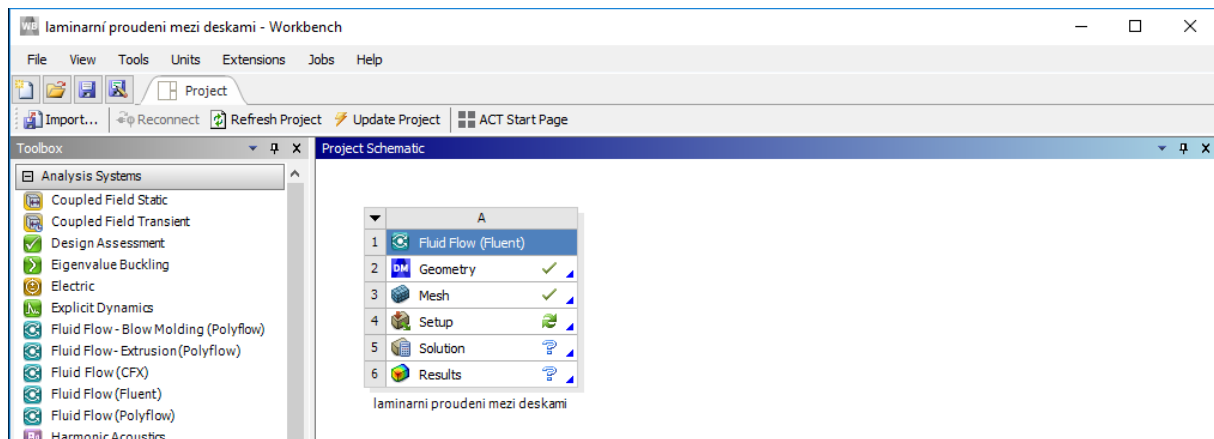
obr. 4.4 – Parametry zhuštění (**Inflation**) a metody **Sweep**



obr. 4.5 – Výsledná podoba výpočetní sítě pro proudění mezi deskami

## 4.2 Výpočet ve Fluentu

Po vytvoření výpočetní sítě, se vraťte zpět do prostředí **Workbench**, obr. 4.6. Před spuštěním programu **ANSYS Fluent** je nutné provést update výpočetní sítě příkazem „**Update**“ u položky „**Mesh**“ pravým tlačítkem (mělo objevit zelené zatržení). Program **ANSYS Fluent** se spustí pomocí položky „**Setup**“ dvojklikem. Nezapomeňte nastavit výpočet s vyšším řádem přesnosti „**Double precision**“ a paralelní výpočet pomocí „**Processing Options/Parallel**“.



obr. 4.6 – Panel **ANSYS Workbench** po provedení update

Po spuštění programu ANSYS Fluent zkontrolujte rozměry výpočetní oblasti a okrajové podmínky stejně jako v předchozí úloze (kap. 3.4)

Pokud jsou všechny údaje v pořádku, postupuje v nastavení úlohy v **ANSYS Fluentu**:

- Příkaz pro nastavení solveru **Physics – General/Solver-Type (Pressure-Based)**
- Příkaz pro nastavení časově nezávislého řešení **Physics – General/Solver - Time (Steady)**
- Příkaz pro nastavení gravitační síly **Physics – General/Solver Gravity (no)**
- Příkaz pro nastavení fyzikálních jednotek **Physics – General/Solver-Units – SI**
- Příkaz pro nastavení laminárního modelu **Physics – Models – Viscous Model – Laminar**

### Definice fyzikálních vlastností tekutiny

- Příkaz pro kopírování vody z databáze **Physics – Materials>Create/Edit Materials – Fluent Database Materials** (vybrat “Material Type” water-liquid a kopírovat příkazem **Copy**)
- Příkaz pro definování tekutiny v oblasti proudění **Physics – Zones-Cell Zones Conditions** (označte **Zone (solid)** a vyberte material water-liquid). Zóna musí být typu Fluid

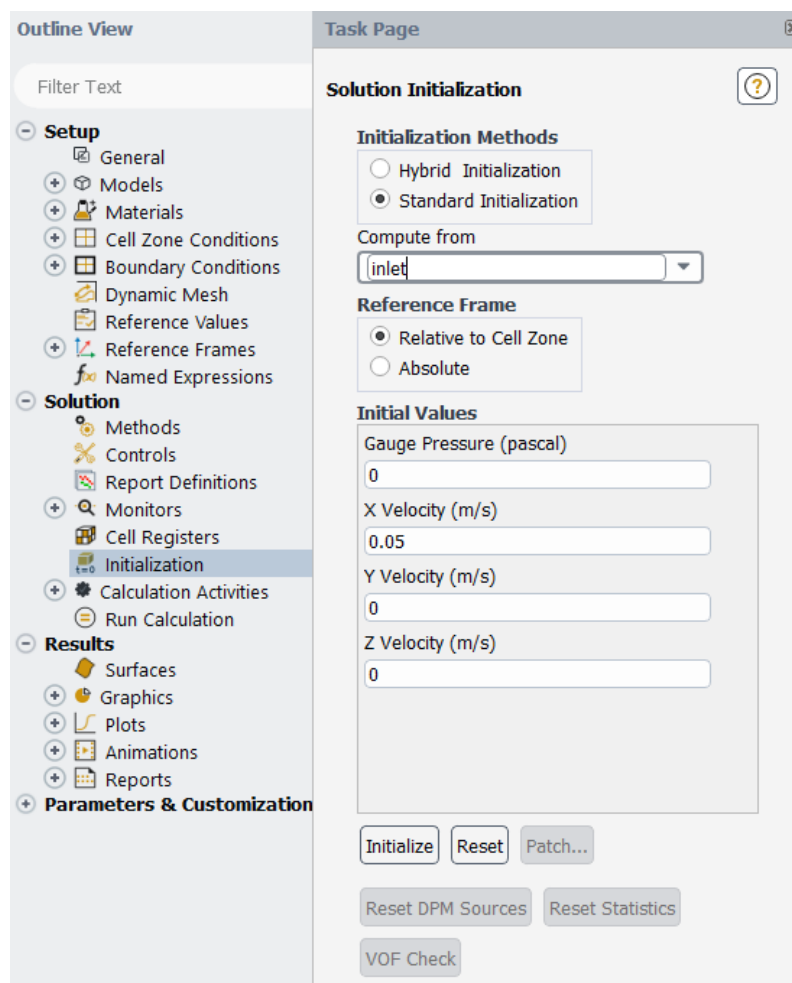
### Definování okrajových podmínek

- bottom wall – typ wall (definujte pevnou nepohybující se stěnu, defaultní nastavení)

- inlet – typ velocity inlet (definujte velikost rychlosti dle *Tab. 4.3*)
- outlet - typ pressure outlet (definujte velikost statického tlaku dle *Tab. 4.3*)
- top wall – typ wall (definujte pevnou nepohybující se stěnu, defaultní nastavení)
- symmetry1, symmetry2 – typ symmetry

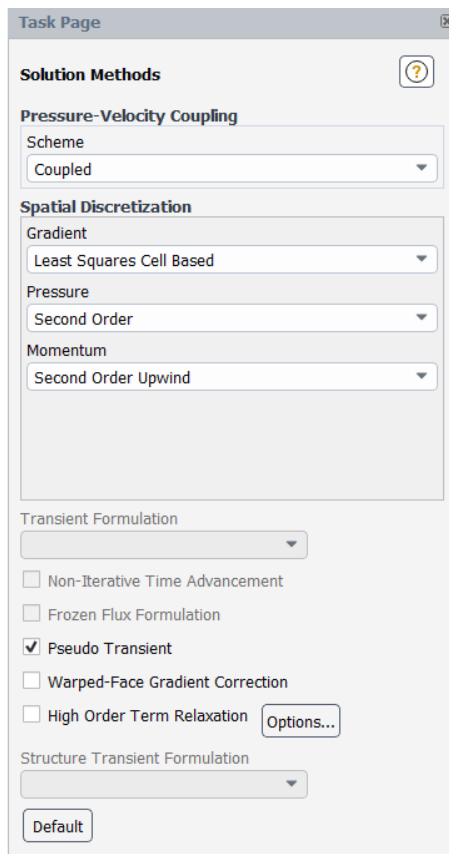
## Inicializace

Následně se provede inicializace proudového pole, tzn. definování počátečních podmínek do celé oblasti pomocí příkazu „**Solution-Initialization-Method(Standard/Options)**“. Hodnoty jsou definovány na základě vstupní okrajové podmínky „**Compute from Inlet**“, viz *obr. 4.7*.



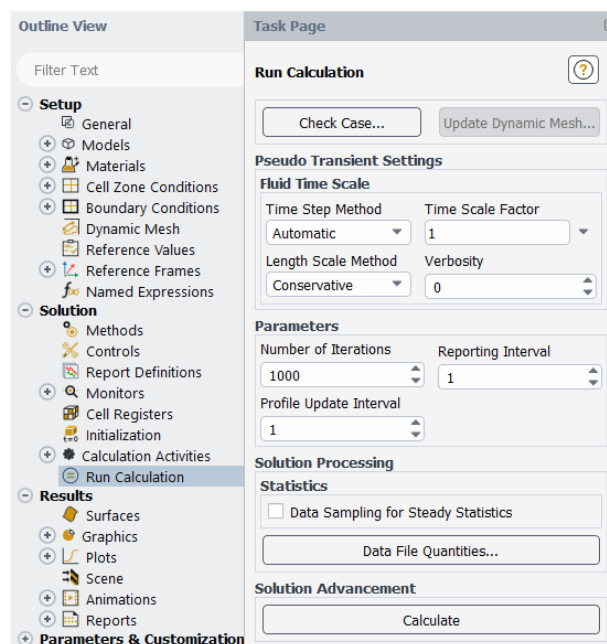
*obr. 4.7 – Inicializace na základě vstupní okrajové podmínky*

Před spuštěním výpočtu nastavte stabilizační schémata výpočtu jednotlivých proměnných příkazem „Solution/Methods“, viz *obr. 4.8* s ohledem na stabilitu numerického výpočtu.



obr. 4.8 – Nastavení stabilizačních schémat

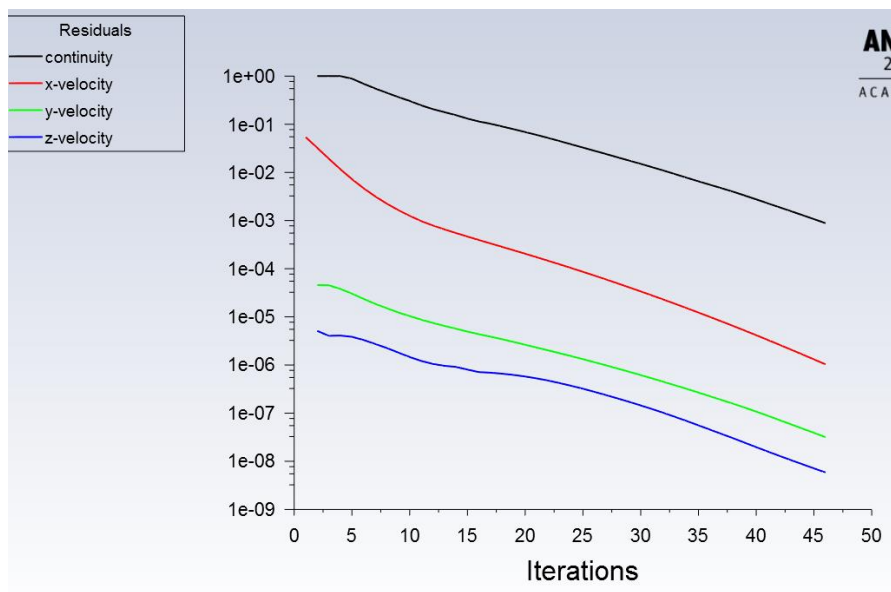
Poté spustíte iterační výpočet „**Solution-Run Calculation**“. Je nutné zadat počet iterací „**Number of Iterations**“. Předdefinovaná hodnota je 0. Zadává se hodnota dosti vysoká, např. 1000, kdy se předpokládá, že bude dosažena konvergence, viz obr. 4.9. Konvergenci lze sledovat jak graficky, tak číselně.



obr. 4.9 – Nastavení počtu iterací a spuštění výpočtu

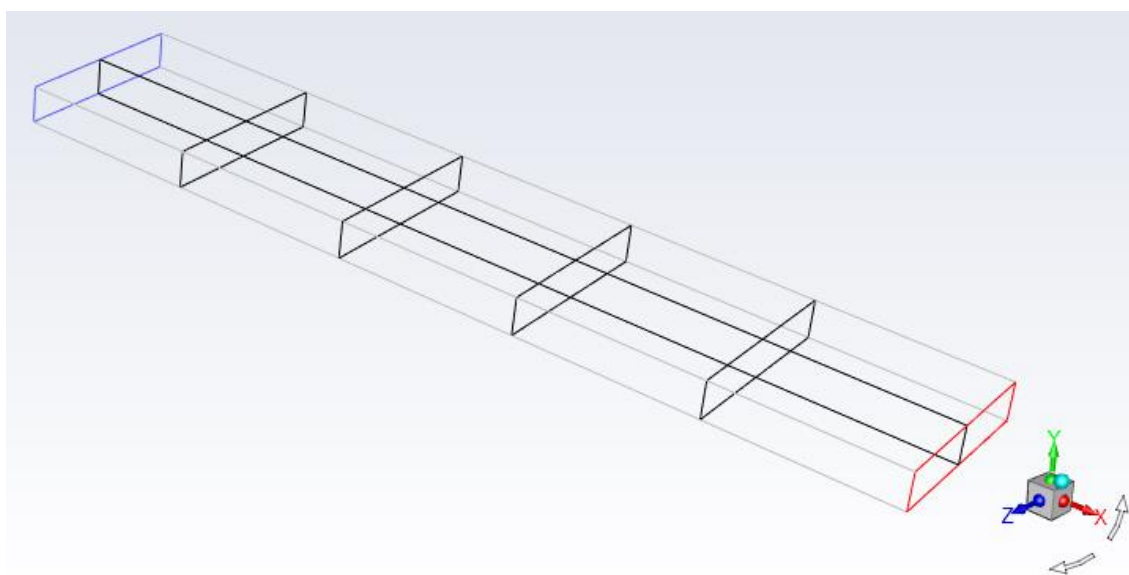


Výpis reziduálů se aktivuje z menu příkazy „**Results/Residuals/Residuals Monitors**“. Průběh reziduálů je znázorněn na *obr. 4.10*. Hodnoty reziduálů (relativních chyb) pro každou počítanou proměnnou (tlak – continuity, rychlost ve směru x – x-velocity, rychlost ve směru y – y-velocity a rychlost ve směru z – z-velocity) musí být menší než 0.001. Při dosažení této přesnosti je výpočet sám ukončen.



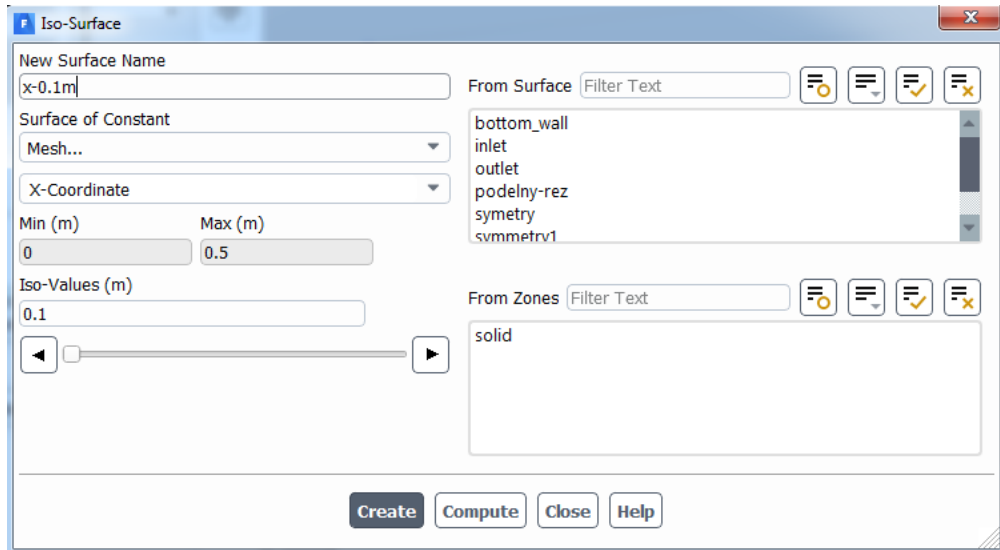
*obr. 4.10 – Průběh reziduálů*

V dalších krocích bude následovat vyhodnocení této varianty výpočtu. Pro lepší přehlednost je možno vytvořit pomocné řezy o daných souřadnicích, ve kterých se zobrazí např. vektory rychlosti. Následovat bude vytvoření příčných rovin ve vzdálenostech  $x=0.1\text{m}$ ,  $0.2\text{m}$ ,  $0.3\text{m}$  a  $0.4\text{m}$  a podélného řezu středem oblasti v ose z (*obr. 4.11*).



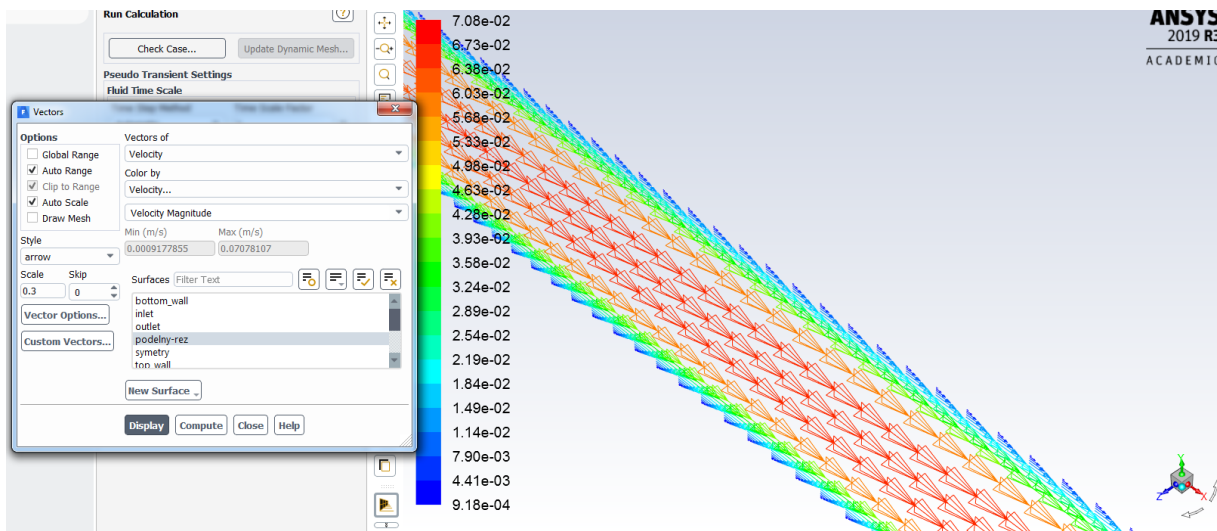
*obr. 4.11 – Vytvořené roviny k vyhodnocení*

Vytvoření příčných rovin ve vzdálenostech  $x=0.1\text{m}$ ,  $0.2\text{m}$ ,  $0.3\text{m}$  a  $0.4\text{m}$  provedeme příkazem „**Results/Surface/Create/Iso-surface**“. Vytvoření příčné roviny ve vzdálenosti  $x=0.1\text{m}$  je patrné z obr. 4.12. V nabídce „**Surface of Constant**“ vyberte **Mesh/X-Coordinate**". Dále zadejte hodnotu  $0.1$  u položky **Iso-Values**. A pojmenujte řez např. **x-0.1m** v okně **New Surface Name**. Obdobným způsobem vytvořte řezy ve vzdálenosti  $x=0.2\text{m}$ ,  $0.3\text{m}$  a  $0.4\text{m}$ . Stejně provedeme vytvoření podélného řezu tím, že vybereme **Z-Coordinate**.



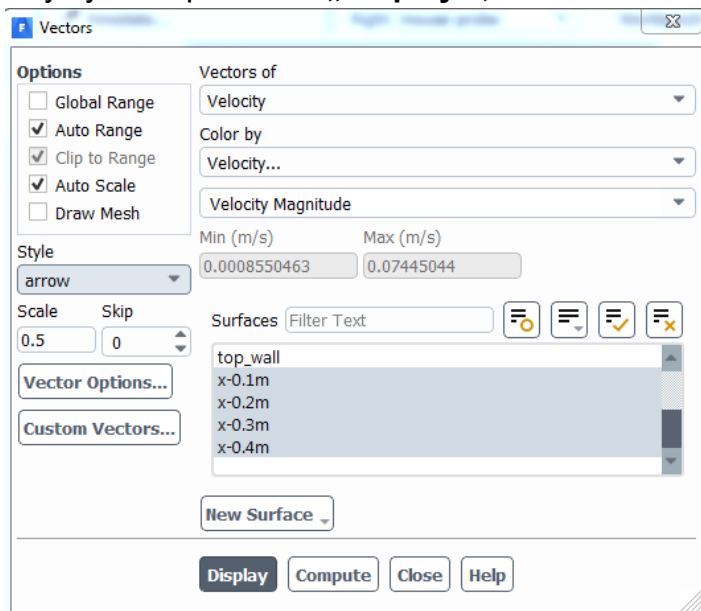
obr. 4.12 – Vytvoření pomocné roviny ve vzdálenosti  $x=0.1\text{ m}$

Poté lze pro ilustraci vyhodnotit, vektory rychlosti, rychlostní profily a vyplněné izočáry. Vektory rychlosti jsou definovány v každé buňce výpočetní domény příkazem „**Results/Graphics/Vectors/**“, kde je možné definovat obarvení vektorů jinou proměnnou (např. teplotou). Pro vyhodnocení vektorů použijeme podélný řez a obarvení velikosti rychlosti „**Color by-Velocity-Velocity Magnitude**“. Dále „**Scale**“ umožní zmenšit velikost vektoru a „**Skip**“ přeskočit určitý počet vektorů, aby byly vektory méně husté. Proto je pro  $\text{Scale} = 0.3$  a  $\text{Skip} = 0$ . Výsledek je zřejmý z obr. 4.13

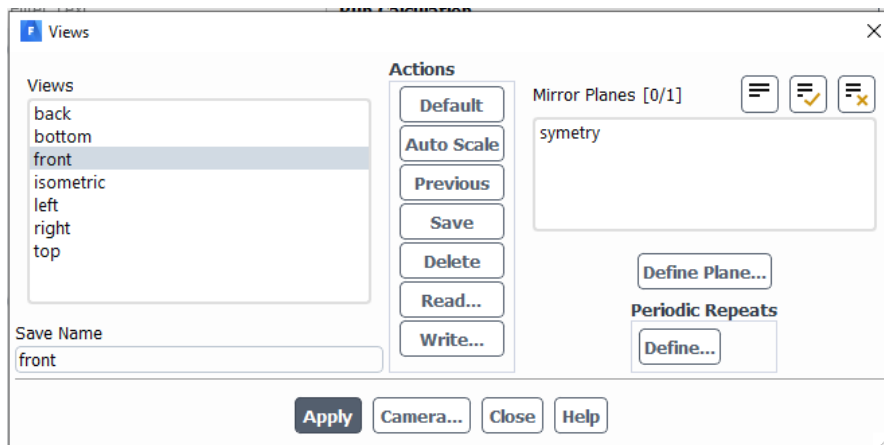


obr. 4.13 – Vektory rychlosti pro  $\text{Scale}=0,3$  a  $\text{Skip}=0$  ( $u[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ )

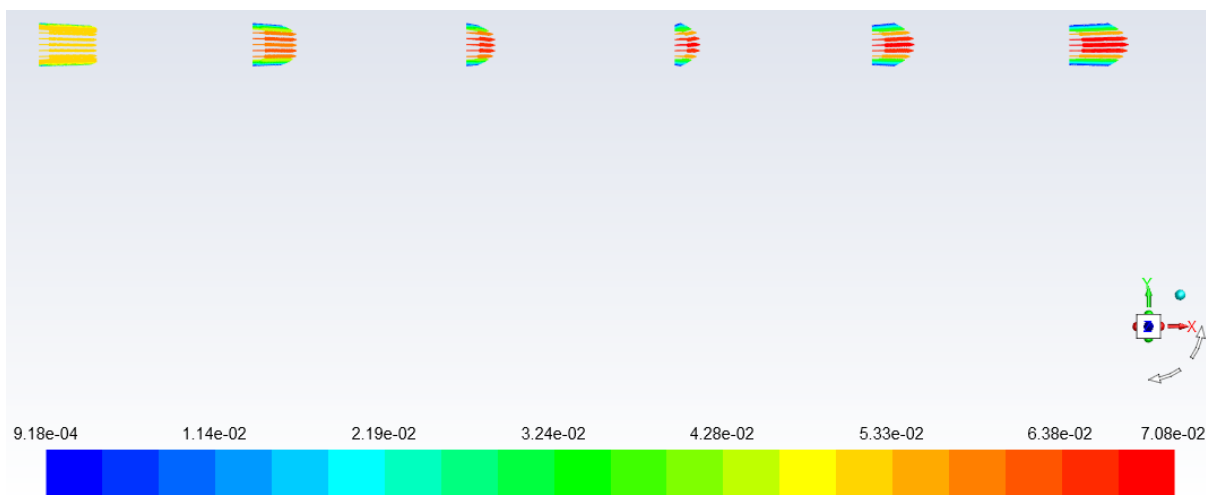
Dále vykreslíme profily rychlosti příkazem „**Results/Graphics/Vectors/**“ v jednotlivých příčných řezech. V okně „**Surfaces**“ vyberte příslušné roviny včetně inletu a outletu (obr. 4.14). Úprava pohledu se provede příkazem „**View/Views**“, viz obr. 4.15. Pak se vektory vykreslí příkazem „**Display**“, viz obr. 4.16.



obr. 4.14 – Definice vektorů rychlosti v příčných řezech

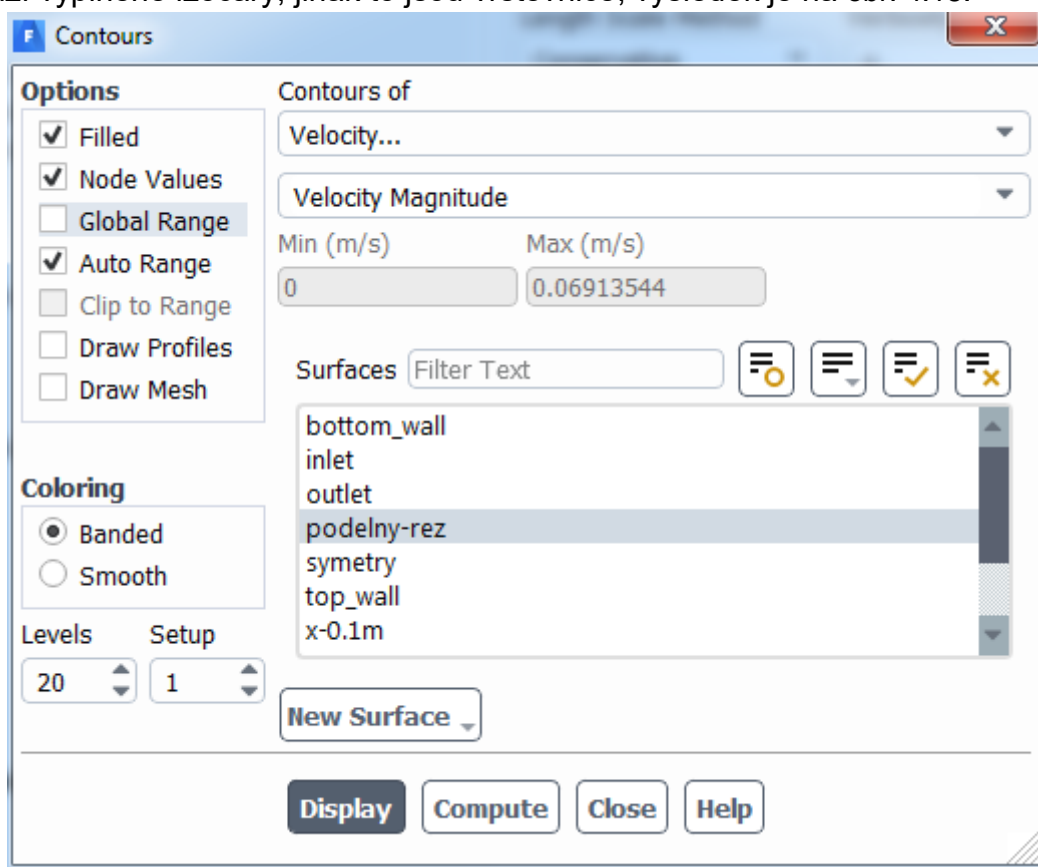


obr. 4.15 – Menu pro definování pohledu „front“.

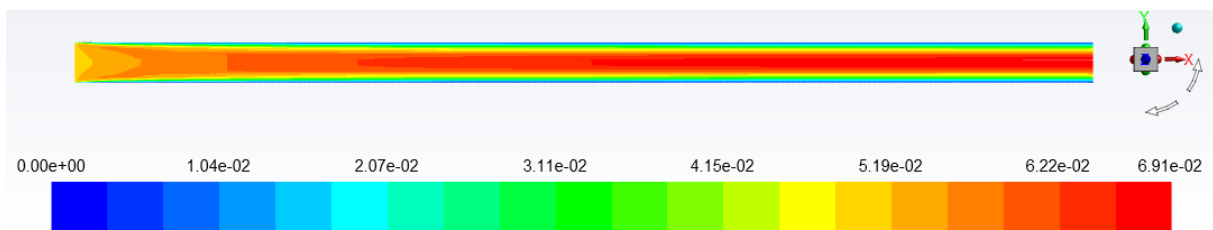


obr. 4.16 – Vektory rychlosti v jednotlivých řezech ( $u[m.s^{-1}]$ )

Z vyhodnocení je patrné, že po délce výpočetní oblasti dochází k postupnému formování parabolického rychlostního profilu. Pro dosažení požadovaného tvaru rychlostního profilu (z předchozího řešení) je výpočetní oblast krátká. Kontury velikosti rychlosti se vykreslí příkazem „**Results/Graphics/Contours**“, obr. 4.15. Dále se upřesní, jestli se vykreslí velikost rychlosti nebo složky rychlosti případně jiné veličiny v podélném řezu. **Levels** definuje počet izoploch, zatržením **Filled** v **Options** se zobrazí vyplněné izočáry, jinak to jsou vrstevnice, výsledek je na obr. 4.18.

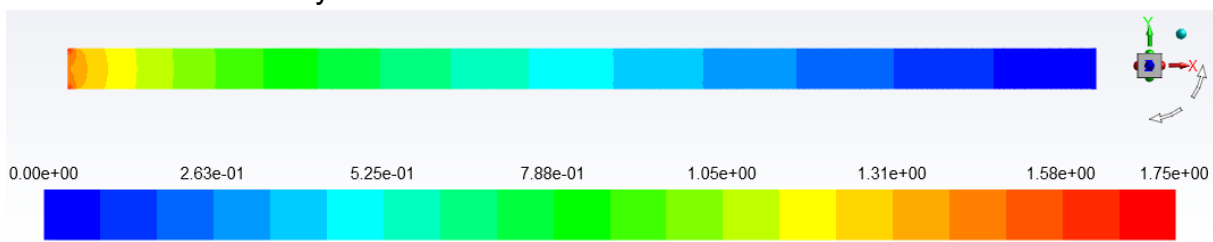


obr. 4.17 – Menu pro vytvoření Vyplněných izoploch velikosti rychlosti



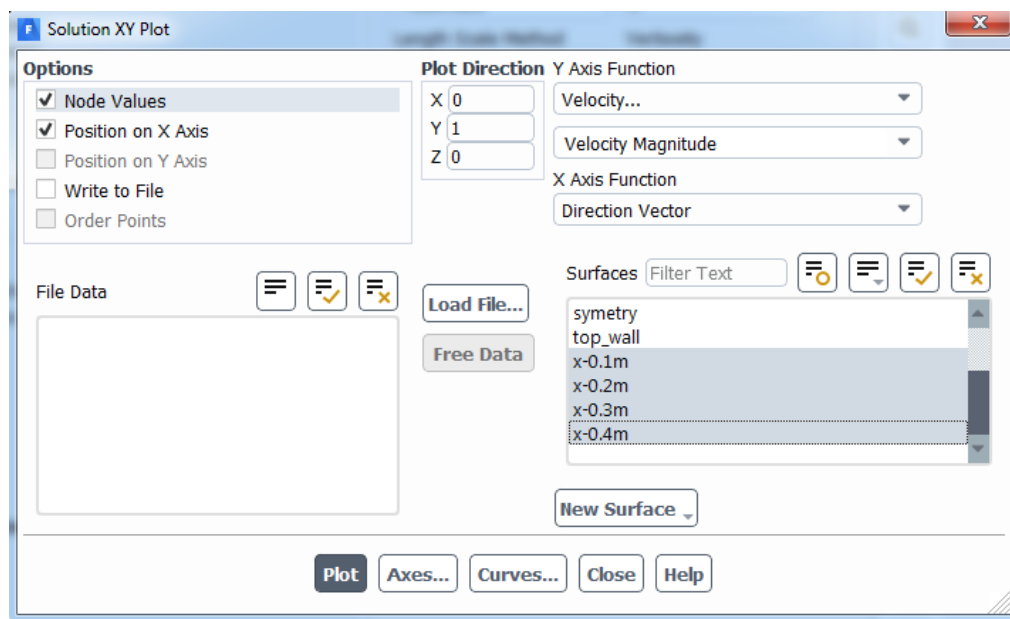
obr. 4.18 – Kontury velikosti rychlosti ve výpočetní oblasti ( $u[m.s^{-1}]$ )

Podobně se nastaví vykreslení izočar statického tlaku statického tlaku na obr. 4.19



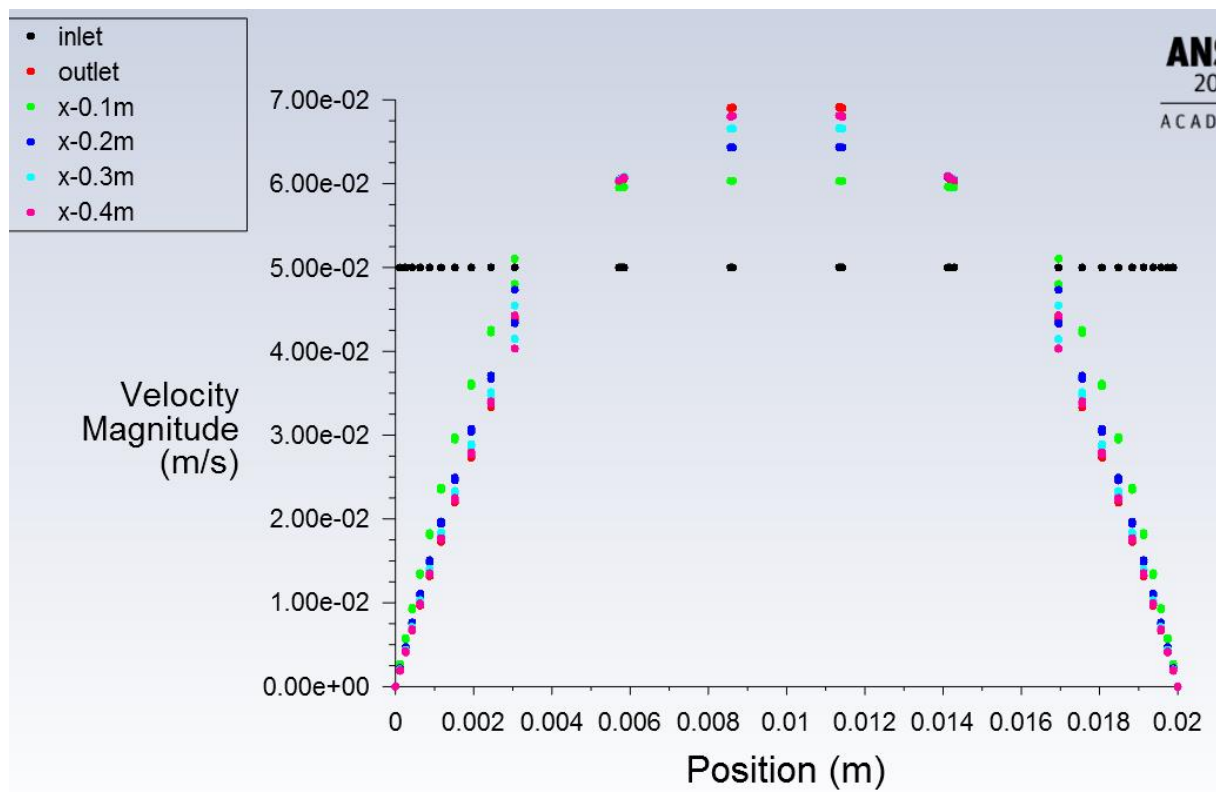
obr. 4.19 – Vyplněné izočary statického tlaku ve výpočetní oblasti  $p_{stat}$  [Pa]

Další vyhodnocení prezentuje rychlostní profily v jednotlivých řezech od vstupu **inlet** do výstupu **outlet** s krokem 0.05 m po délce výpočetní oblasti. Toto vyobrazení je velmi názorné, pokud je třeba porovnat profily veličin na vstupu, výstupu, případně v dalších řezech oblasti. Vykreslení se provede pomocí příkazu „**Results/Plots/XY Plot/Solution XY Plot**“. V nabídce **Y Axis Function** vyberte **Velocity - Velocity Magnitude** a v nabídce **X Axis Function** vyberte **Direction Vector**. Dále v nabídce **Plot Direction** upravte  $X=0$  a  $Y=1$  a  $Z=0$ , tzn. že budete vykreslovat závislost na  $Y$ , viz obr. 4.20 a v nabídce **Surfaces** označte příslušné řezy.



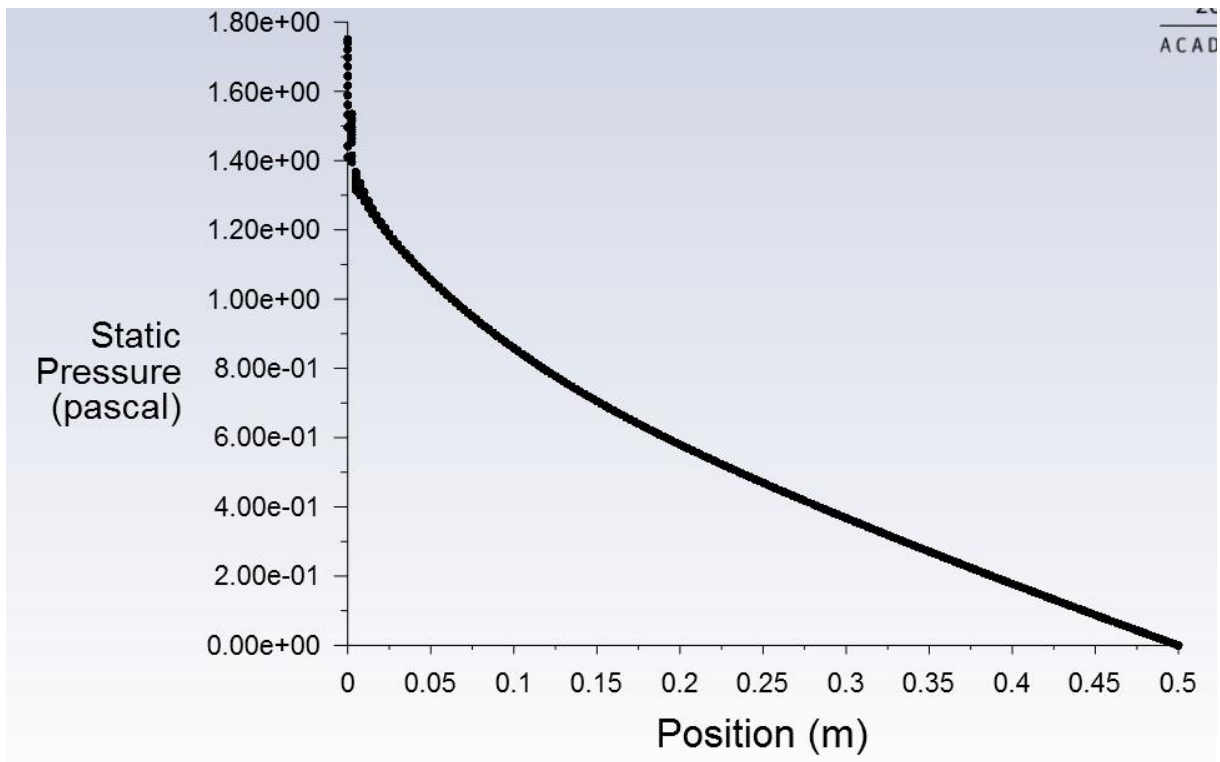
obr. 4.20 – Menu pro vytvoření profilů velikosti rychlosti

Z výsledků je patrné formování rychlostního profilu od konstantní hodnoty rychlosti na vstupu **inlet** až po parabolický rychlostní profil na výstupu **outlet** z oblasti (obr. 4.21). Další možnosti získání dat je pomocí nabídky **Options-Write to File**, kdy se provede export dat do externího textového souboru. Tento soubor se pak přečte a upraví v Excelu.



obr. 4.21 – Formování rychlostního profilu

Dalším vyhodnocením je průběh statického tlaku po délce výpočetní oblasti. Statický tlak je vyhodnocen v podélném řezu výpočetní oblasti, viz obr. 4.22.



obr. 4.22 – Průběh statického tlaku po délce vyhodnocený v ose trubky ( $p_{stat}$  [Pa])

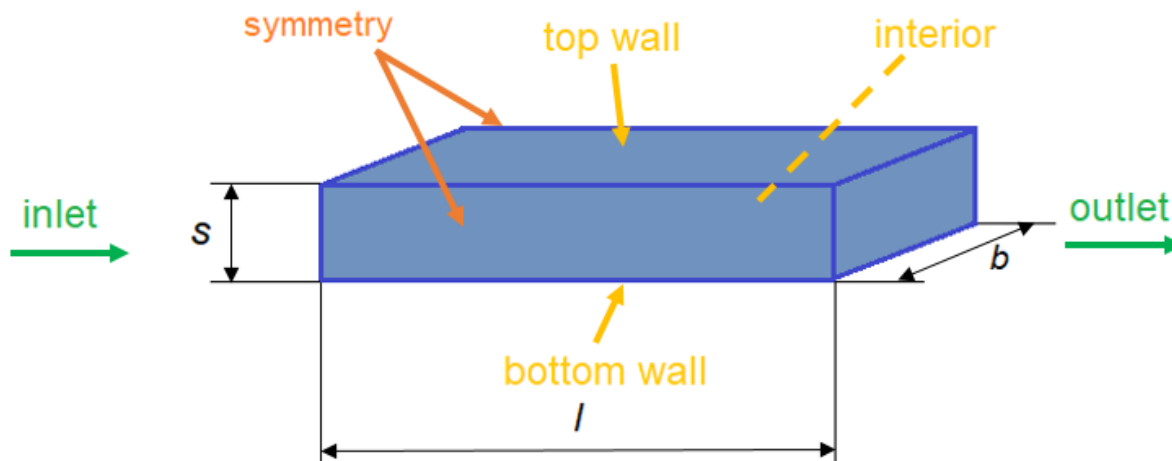
### 4.3 Varianty výpočtů

Definujte konvektivní přenos tepla okrajovými tepelnými podmínkami. Vyhodnoťte dle příkladu z kap. 3 a 4.

## 5 TURBULENTNÍ – PROUDĚNÍ VODY MEZI DESKAMI

### Příklad

Řešte proudění vody mezi dvěma nekonečně velkými deskami (obr. 5.1). Fyzikální model je dán tvarem oblasti, typem proudění a hydraulickými parametry proudění. Numerický výpočet definujte v programovém prostředí **ANSYS Fluent**. K tvorbě výpočetní oblasti (geometrie) a výpočetní sítě využijte programy **DesignModeler** a **ANSYS Meshing**.



obr. 5.1 – Schéma oblasti

Voda vtéká do oblasti rychlostí  $1 \text{ m.s}^{-1}$  a vystupuje do ovzduší, kde je relativní tlak 0 Pa. Rozměry oblasti zobrazeny v Tab. 5.1. Úloha je dána jako 3D model a představuje proudění v obdélníkové mezeře o dané délce a tloušťce mezery. Fyzikální vlastnosti proudícího média jsou dány v Tab. 5.2.

Tab. 5.1 – Geometrie oblasti

délka oblasti $l$ [m]	0.5
výška oblasti $s$ [m]	0.02
šířka oblasti $b$ [m]	0.1

Tab. 5.2 – Fyzikální vlastnosti vody

hustota vody $\rho$ [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	998
dynamická viskozita $\eta$ [ $\text{kg.(m.s)}^{-1}$ ]	0.001003



## Okrajové podmínky

Na **inletu** je definována rychlostní okrajová podmínka (**VELOCITY INLET**) a na **outletu** je dána podmínka statického tlaku (**PRESSURE-OUTLET**). Na stěnách (**top wall, bottom wall**) je okrajová podmínka typu **WALL**, kde se předpokládá nulová rychlost proudění (je předdefinovaná). Okrajové podmínky včetně turbulentních jsou uvedené v Tab. 5.3.

Tab. 5.3 Okrajové podmínky

<b>Inlet</b>	Střední rychlost $u_s$ [m.s <sup>-1</sup> ]	<b>1</b>
	Turbulentní intenzita [%]	<b>1</b>
	Hydraulický průměr [m]	<b>0.02</b>
<b>Outlet</b>	Statický tlak pressure $p$ [Pa]	<b>0</b>
	Turbulentní intenzita zpětného proudění [%]	<b>1</b>
	Hydraulický průměr [m]	<b>0.02</b>

## Matematický model

Výběr matematického modelu závisí na Reynoldsově čísle.

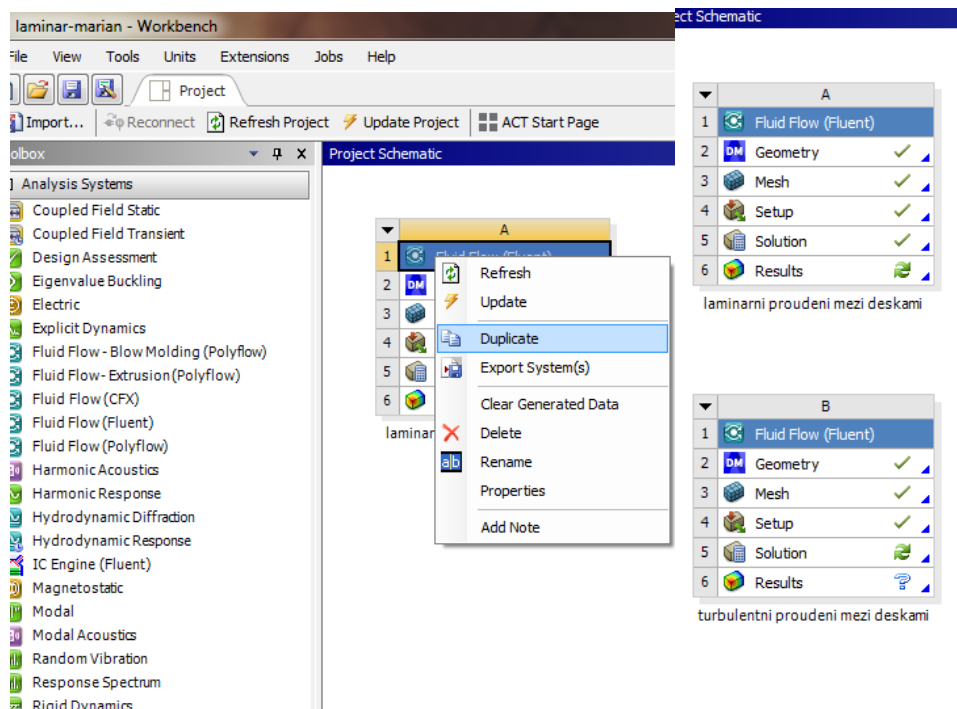
Kriterium laminarity je Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} = \frac{1 \cdot 0.02}{1 \cdot 10^{-6}} = 20000$$

Proudění je tedy turbulentní, ale s nízkou hodnotou Reynoldsova čísla, takže bude použit **RNG k-ε** turbulentní matematický model.

## 5.1 Geometrie a výpočetní síť

Geometrie a síť budou použity z předchozího příkladu (laminární proudění) a to kopírováním celého panelu v prostředí Workbench. Kopírování se provede příkazem „**Duplicate**“, který je vyvolán pravým tlačítkem myši, viz obr. 5.2.



obr. 5.2 – Kopírování panelu příkazem „Duplicate“

Poté panel přejmenujte např. na „turbulentní proudění mezi deskami“ a program ANSYS Fluent spustíte příkazem „Setup“ k modifikaci úlohy na turbulentní proudění mezi deskami. Další nastavení zůstalo z úlohy laminárního proudění, uvádí se jen pro zopakování. Změní se jen okrajové podmínky.

## 5.2 ANSYS Fluent

### Nastavení v ANSYS Fluentu

- Příkaz pro nastavení solveru **Setting Up Physics – General/Solver-Type (Pressure-Based)**
- Příkaz pro nastavení časově závislého řešení **Setting Up Physics – General/Solver -Time (Steady)**
- Příkaz pro nastavení gravitační síly - **Setting Up Physics – General/Solver Gravity (no)**
- Příkaz pro nastavení fyzikálních jednotek - **Setting Up Physics – General/Solver-Units – SI**
- Příkaz pro nastavení turbulentního modelu **Setting Up Physics – Models – Viscous Model – k-epsilon RNG**, stěnová funkce **Scable Wall Functions**

### Definice fyzikálních vlastností tekutiny

- Příkaz pro kopírování vody z databáze - **Setting Up Physics – Materials-Create/Edit Materials – Fluent Database Materials** (vybrat „Material Type“ **water-liquid** a kopírovat příkazem **Copy**)

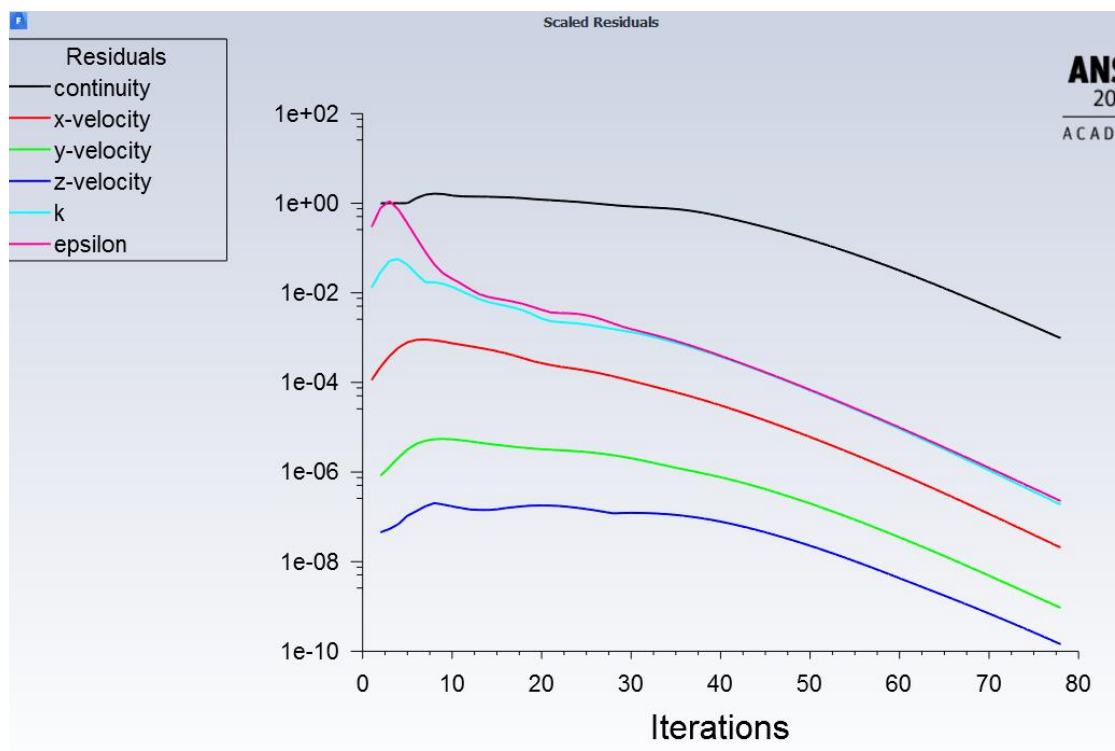
- Příkaz pro definování tekutiny v oblasti proudění - **Setting Up Physics – Zones-Cell Zone Conditions** (označte **Zone (surface\_body)** a vyberte material water-liquid)

### Definování okrajových podmínek

- bottom wall – typ wall (**Setting Up Physics-Boundaries** – definujte pevnou nepohybující se stěnu, defaultní nastavení)
- inlet – typ velocity inlet (definujte velikost rychlosti dle Tab. 5.3)
- outlet - typ pressure outlet (definujte velikost statického tlaku dle Tab. 5.3)
- top wall – typ wall (**Setting Up Physics-Boundaries** – definujte pevnou nepohybující se stěnu, defaultní nastavení)

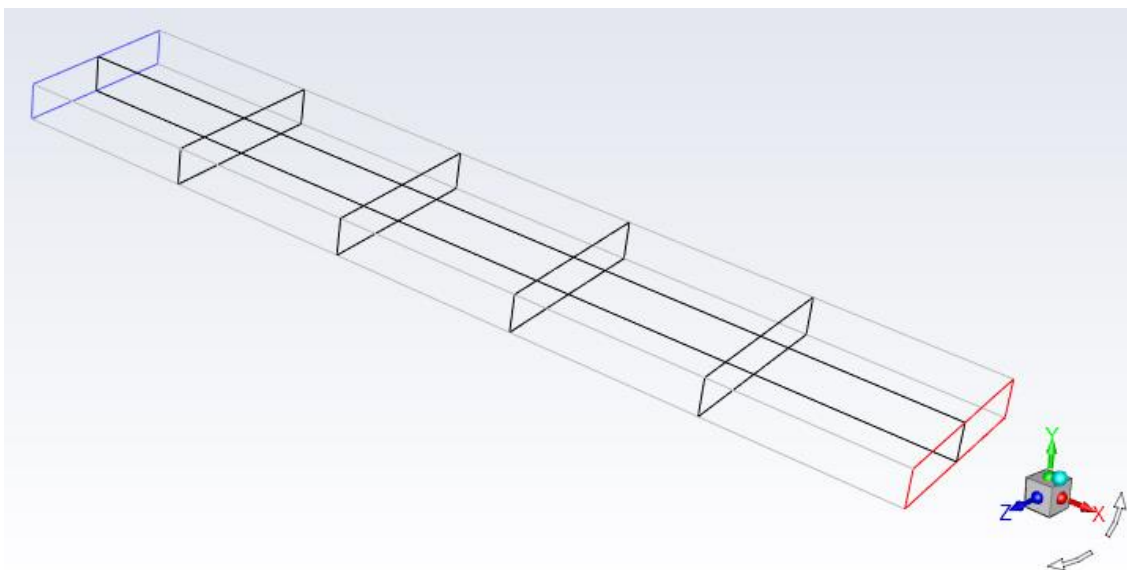
### Inicializace

Následně se provede inicializace proudového pole, tzn. definování počátečních podmínek do celé oblasti pomocí příkazu „**Solving-Initialization-Method(Standard/Options)**“. Hodnoty jsou definovány na základě vstupní okrajové podmínky. Poté upravte stabilizační schémata dle obr. 4.8. Následně se spustí iterační výpočet. Výsledné reziduály jsou patrné z obr. 5.3.



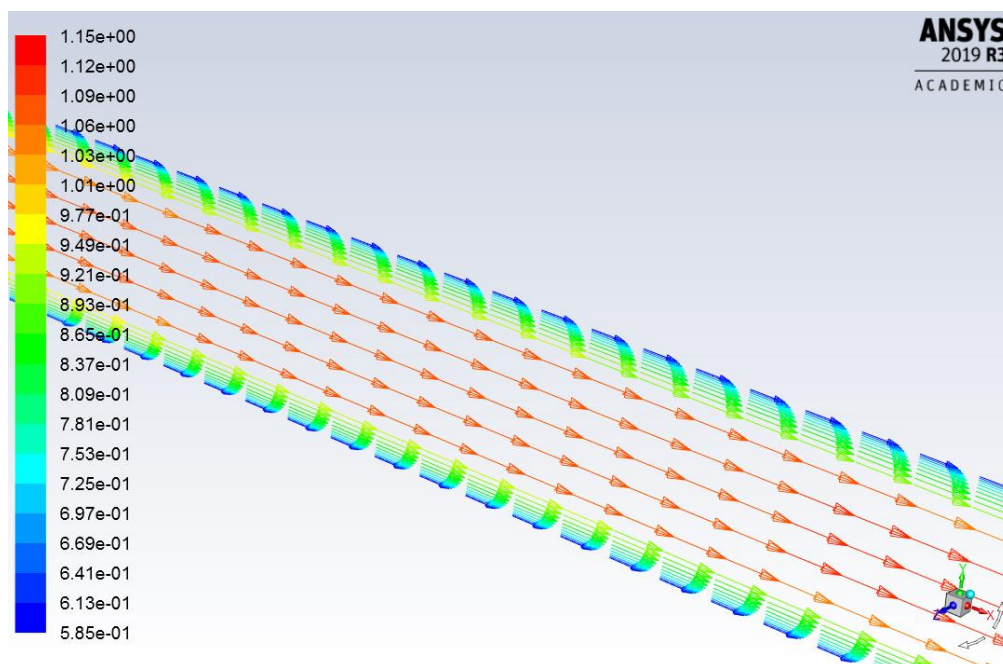
obr. 5.3 – Průběh reziduálů

V dalších krocích bude následovat vyhodnocení této varianty výpočtu v příčných rovinách ve vzdálenostech  $x=0.1\text{m}$ ,  $0.2\text{m}$ ,  $0.3\text{m}$  a  $0.4\text{m}$  a v podélném řezu středem oblasti v ose  $z$  (obr. 5.4).

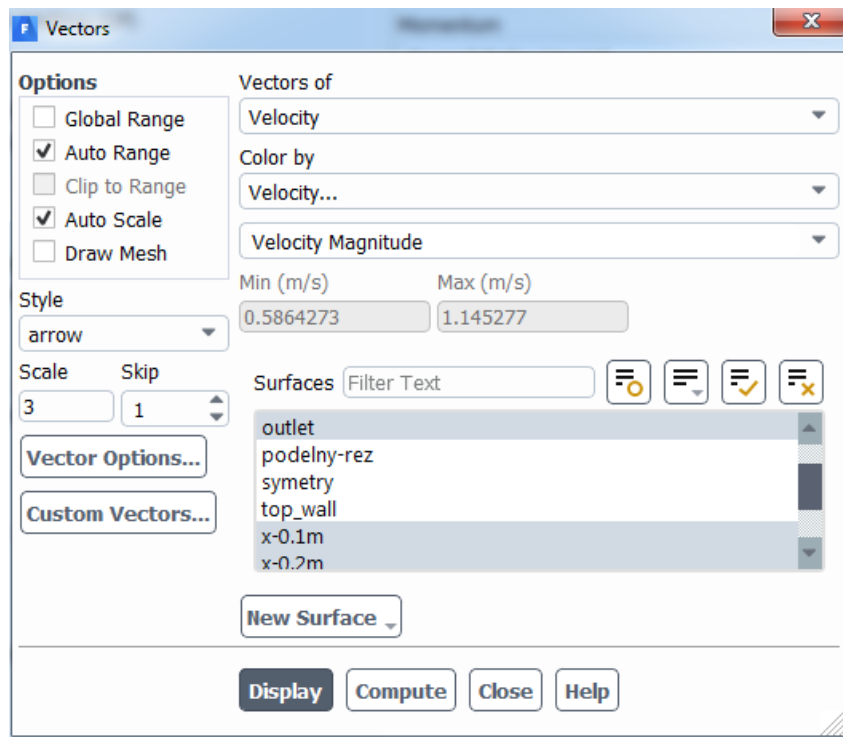


obr. 5.4 – Vytvořené rovin k vyhodnocení

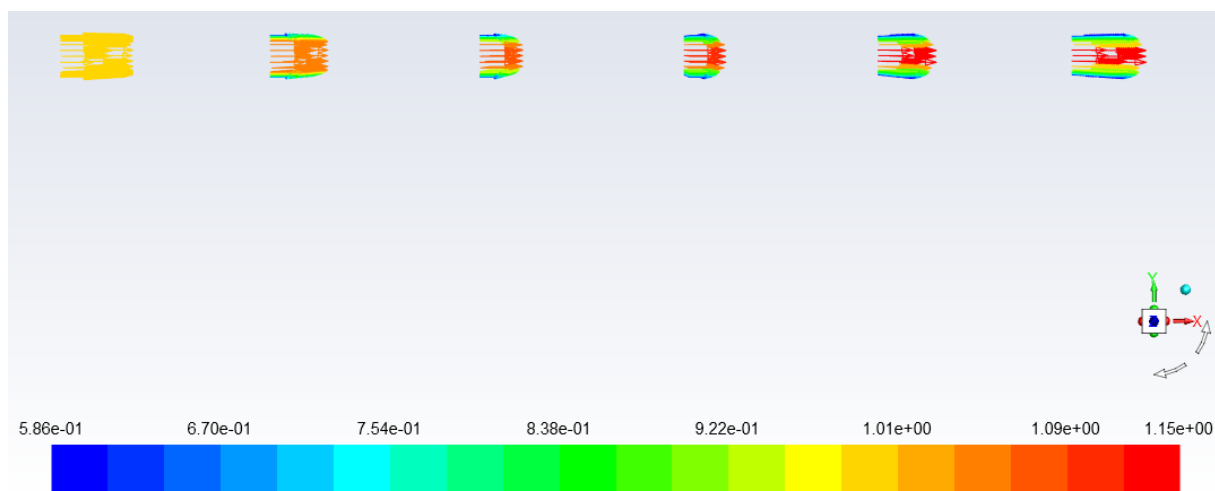
Vytvoření příčných rovin je popsáno v předchozí kapitole. Následně lze vyhodnotit, vektory rychlosti, rychlostní profily a vyplněné izočáry. Vektory rychlosti jsou definovány v každé buňce výpočetní domény příkazem „**Postprocessing/Graphics/Vectors**“. Pro vyhodnocení vektorů použijeme podélný řez. Nastavení k vyhodnocení upravte na  $\text{Scale} = 1$  a  $\text{Skip} = 1$ . Výsledné zobrazení je patrné z obr. 5.5.



obr. 5.5 – Vektory rychlosti pro  $\text{Scale}=1$  a  $\text{Skip}=1$  ( $u[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ )

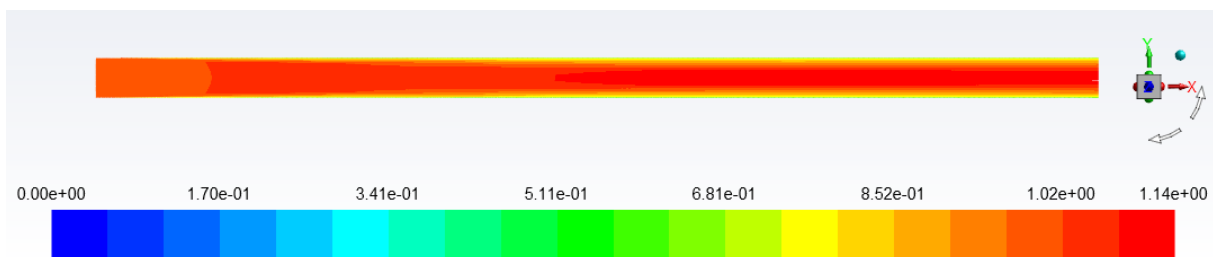


obr. 5.6 – Menu pro vyhodnocení vektorů rychlosti v jednotlivých příčných řezech



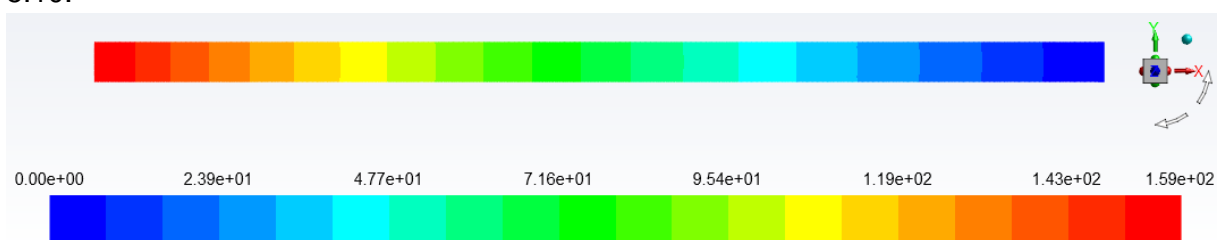
obr. 5.7 – Vektory rychlosti v jednotlivých řezech ( $u[m.s^{-1}]$ )

Z vyhodnocení je patrné, že po délce výpočetní oblasti dochází k postupnému formování turbulentního rychlostního profilu. Kontury velikosti rychlosti v podélném řezu jsou znázorněny na obr. 5.8 a vykreslí se příkazem „**Postprocessing/Graphics/Contours**“.

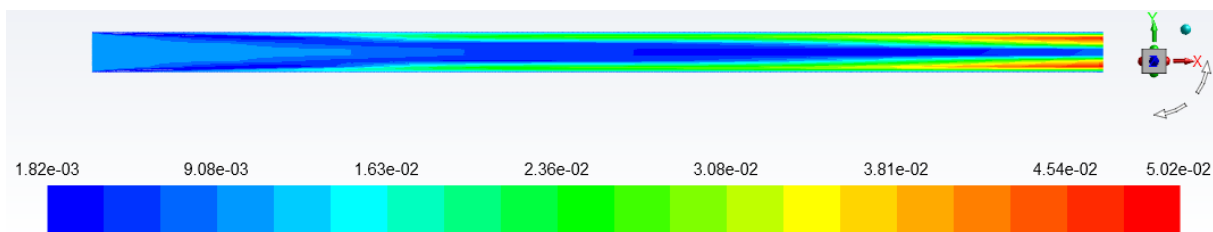


obr. 5.8 – Kontury velikostí rychlosti ve výpočetní oblasti ( $u[m \cdot s^{-1}]$ )

Podobně se vykreslí izočáry statického tlaku na obr. 5.9 a efektivní viskozity na obr. 5.10.

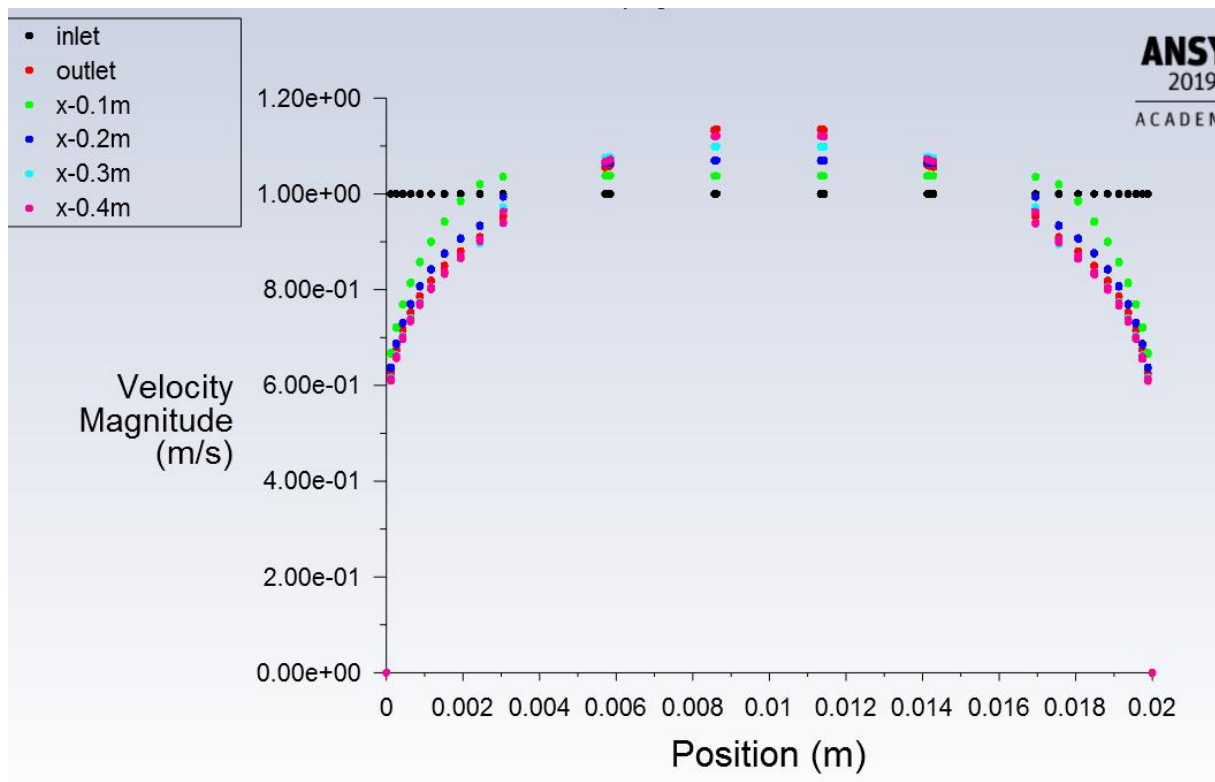


obr. 5.9 – Vyplněné izočáry statického tlaku ve výpočetní oblasti  $p_{stat}$  [Pa]



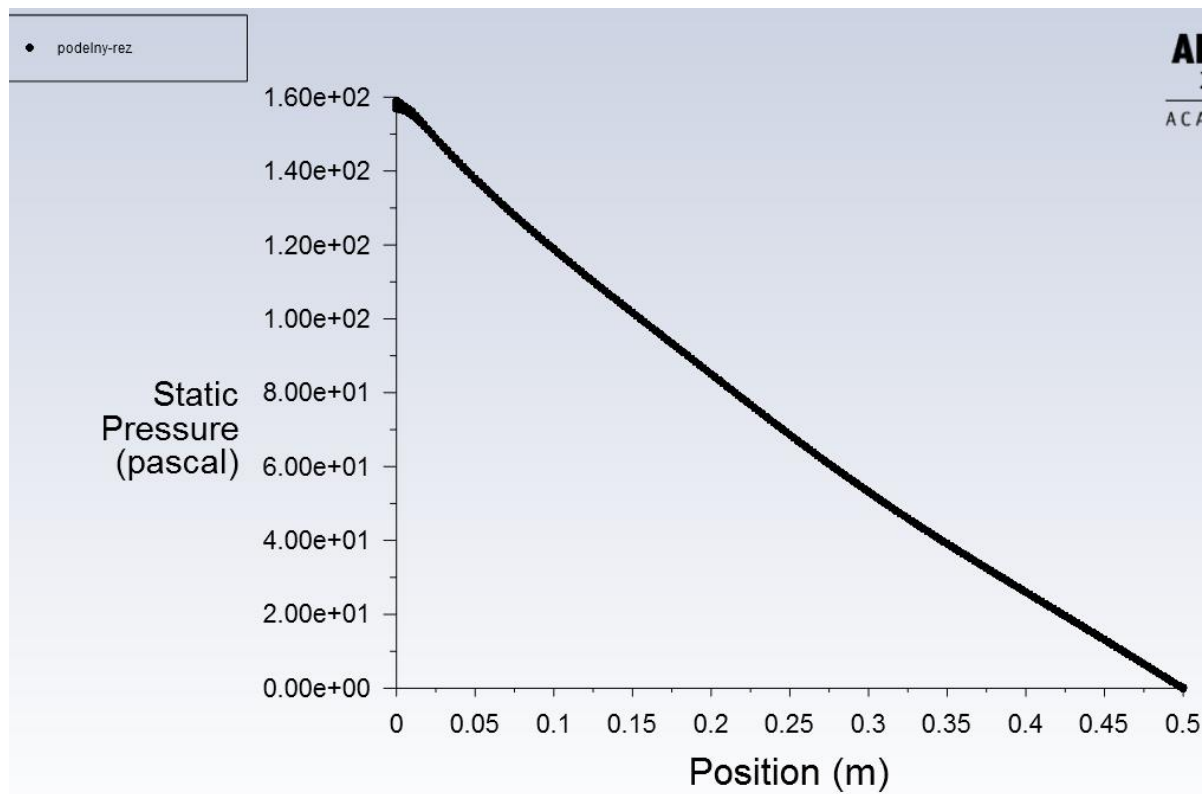
obr. 5.10 – Vyplněné izočáry efektivní viskozity

Další vyhodnocení prezentuje rychlostní profily v jednotlivých příčných řezech, viz obr. 5.11 pomocí grafu. Vykreslení se provede pomocí příkazu „**Postprocessing/Plots/XY Plot/Solution XY Plot**“. V nabídce **Y Axis Function** vyberte **Velocity- Velocity Magnitude** a v nabídce **X Axis Function** vyberte **Direction Vector**. Dále v nabídce **Plot Direction** upravte  $X=0$  a  $Y=1$  tzn. chceme vykreslovat závislost na  $Y$  a v nabídce **Surfaces** označte příslušné řezy.



obr. 5.11 – Formování rychlostního profilu

Dalším vyhodnocením je průběh statického tlaku po délce výpočetní oblasti. Statický tlak je vyhodnocen v ose výpočetní oblasti, viz obr. 5.12.



obr. 5.12 Průběh statického tlaku po délce vyhodnocený v ose trubky ( $p_{stat}$  [Pa])

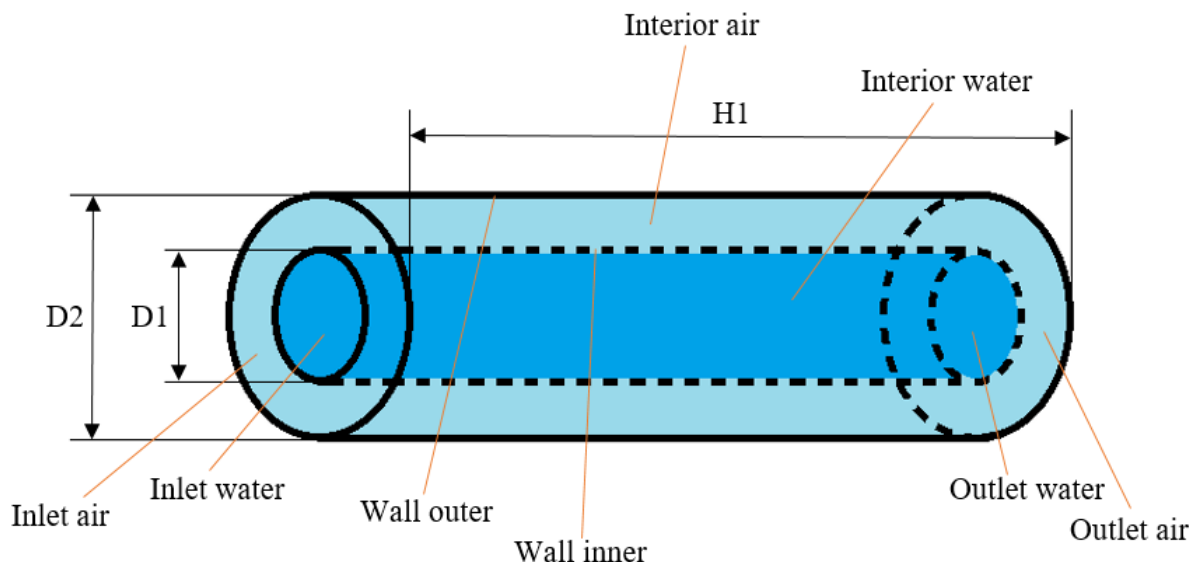
### **5.3 Varianty výpočtů**

Definujte konvektivní přenos tepla okrajovými tepelnými podmínkami. Vyhodnoťte dle příkladu z kap. 3 a 4.



## 6 ŘEŠENÍ VZOROVÉHO PŘÍKLADU – SOUPROUDÝ VÝMĚNÍK

Vytvořte matematický model souproutého výměníku a provedte trojrozměrnou (3D) numerickou simulaci. Proudící tekutiny ve výměníku jsou v kombinaci voda-vzduch. Model souproutého výměníku je patrný z obr. 6.1. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek a výsledky graficky zhodnoťte.



obr. 6.1 – Souproutý výměník ve 3D provedení.

Tab. 6.1 – Rozměry oblastí

<b>H1</b>	0.5	m
<b>D1</b>	0.04	m
<b>D2</b>	0.08	m

V dané oblasti, která představuje souproutý chladič, proudí uprostřed kapalina – voda (**water**) a v okolí proudí vzduch (**air**). Stěny jsou tvořeny ocelovými trubkami o různém průměru.

Tab. 6.2 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, voda, vzduch) při 300 K

<b>Materiál</b>	<b>Ocel</b>	<b>Voda</b>	<b>Vzduch</b>	
<b>hustota</b> $\rho$	8030	998.2	1.225	[kg.m <sup>-3</sup> ]
<b>měrná tepelná kapacita</b> $c_p$	502.48	4182	1006.43	[J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
<b>tepelná vodivost</b> $\lambda$	16.27	0.6	0.0242	[W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
<b>viskozita</b> $\eta$		0.001003	0.000017894	[kg.m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]

Tab. 6.3 – Okrajové podmínky

	Inlet air	Inlet water	Outlet air	Outlet water	Wall inner	Wall outer	
teplota $T$	300	363.15				300	[K]
rychlost $u$	3	0.3					[m.s <sup>-1</sup> ]
tlak $p$			0	0			[Pa]
intenzita turbulence $I$	1	1	1	1			[%]
hydraulický průměr $d_h$	0.02	0.04	0.02	0.04			[m]

Dále uvažujte s tloušťkou vnitřní stěny (**wall inner**) a vnější stěny (**wall outer**) 003m. Materiál stěny uvažujte ocel.

## 6.1 Matematický model a teoreticko-empirický odhad úlohy

V této úloze dochází k turbulentnímu proudění, je tedy použit matematický model RNG  $k-\varepsilon$ . Kritériem turbulence je tzv. Reynoldsovo číslo.

**Re pro proudění vody:**

$$Re_{voda} = \frac{v \cdot d_h}{\nu} = \frac{0.3 \cdot 0.04}{1.01e-06} = 12000 \quad (6.1)$$

**Re pro proudění vzduchu:**

$$Re_{vzduch} = \frac{v \cdot d_h}{\nu} = \frac{3 \cdot 0.02}{1.46e-05} = 4323 \quad (6.2)$$

Výpočet Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla vychází z empirických vztahů, které jsou detailně popsány v literatuře [2]. V následujícím kroku, je proveden pouze analytický výpočet, který bude porovnán s numerickým výpočtem. Ze zadaných parametrů lze spočítat výše uvedené parametry proudění a přestupu tepla (Reynoldsovo číslo je počítáno z maximální rychlosti). Odhad Nusseltova čísla je problematický a je opravdu jen orientační. Na tento odhad navazuje výpočet součinitele přestupu tepla stěnou určeného z Nusseltova čísla vztahem  $\tilde{\alpha} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}$  [2].

**Výpočet Nusseltova čísla pro oblast proudění vody v trubce:**

$$Pr = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \nu}{\lambda} = \frac{998.2 \cdot 4182 \cdot 1.01e-6}{0.6} = 6.99 \quad (6.3)$$

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3}$$

$$Nu = 0.023 \cdot 12000^{0.8} \cdot 6.99^{0.3} = 75.5 \quad (6.4)$$

Pak součinitel přestupu tepla je

$$\alpha = \frac{Nu}{d_h} \cdot \lambda = \frac{75.5}{0.04} \cdot 0.6 = 1132.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.5)$$

**Výpočet Nusseltova čísla pro oblast proudění vzduchu kolem trubky:**

$$Pr = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \nu}{\lambda} = \frac{1.225 \cdot 1006.43 \cdot 1.46e-5}{0.0242} = 0.707 \quad (6.6)$$

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$$

$$Nu = 0.023 \cdot 4323^{0.8} \cdot 0.707^{0.4} = 16.79 \quad (6.7)$$

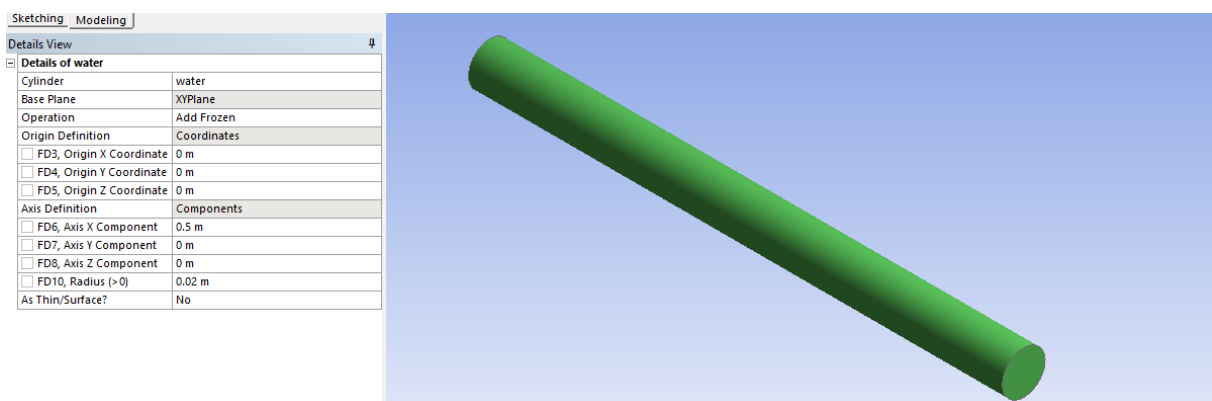
Pak součinitel přestupu tepla je

$$\alpha = \frac{Nu}{d_h} \cdot \lambda = \frac{16.79}{0.02} \cdot 0.0242 = 20.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.8)$$

## 6.2 Tvorba geometrie

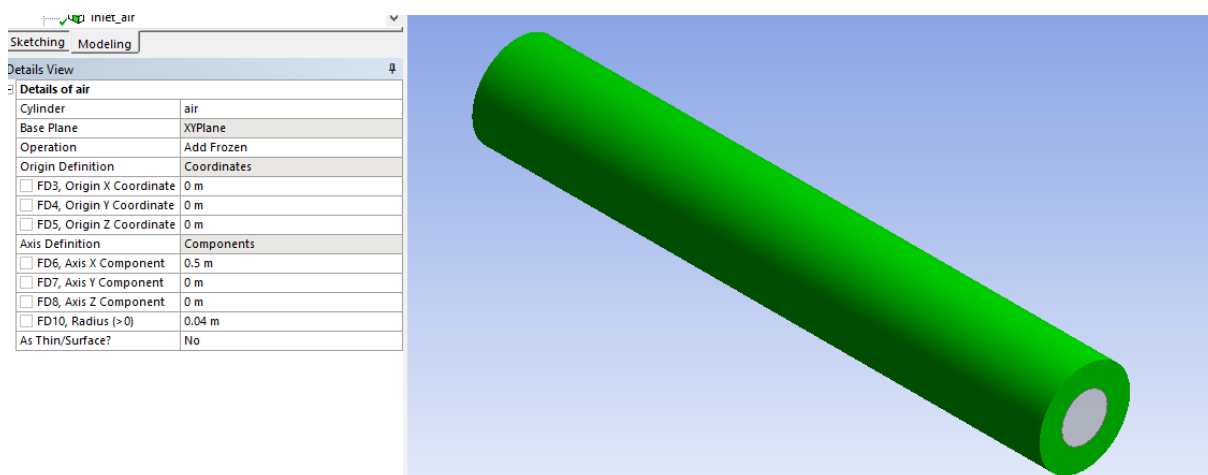
Spusťte program **ANSYS 2019 R3** dle kap. 3.1. Nově vytvořený panel pojmenujte např. **Souproudy\_vymenik** (nepoužívejte nikdy diakritiku a matematické symboly). Následně uložte celý projekt pod libovolným názvem a spusťte program na tvorbu geometrie **DesignModeler**.

K tvorbě geometrie využijte podrobného návodu v kap. 3.2, protože výsledný model souproutého výměníku je 3D model obdobný 3D modelu tyče. Model souproutého výměníku představuje dvě oblasti (**interior water**, **interior air**), viz. obr. 6.1. Jedná se tedy o dva válce, které musíme od sebe odečíst. Oblasti vytvoříte identicky pomocí **Create/Primitives/Cylinder** jako v případě příkladu vedené tepla v tyči. Výsledná podoba oblasti **interior water** vytvořená pomocí válce (**Cylinder**) včetně rozměrů je patrná z obr. 6.2.



obr. 6.2 – Vytvoření oblasti **interior water** („**Cylinder**“)

Výsledná podoba oblasti **interior air** vytvořená pomocí válce („**Cylinder**“) včetně rozměrů je patrná z obr. 6.3.

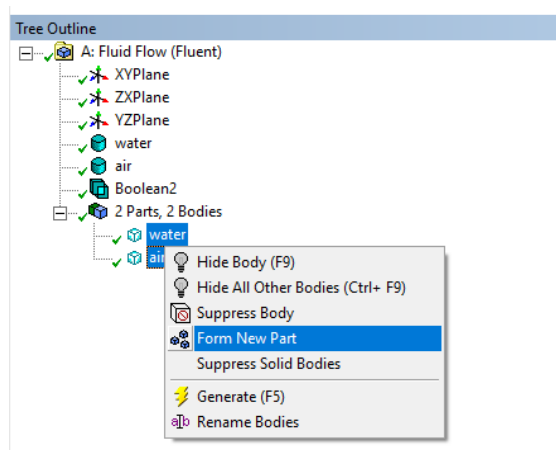


obr. 6.3 – Vytvoření oblasti *interior air* („Cylinder“)

V případě dvou oblastí, které mají být, jako samostatné objemy je nutné definovat v nástrojích **Operation** položku **Add Frozen**. Tím nedojde ke sloučení ploch.

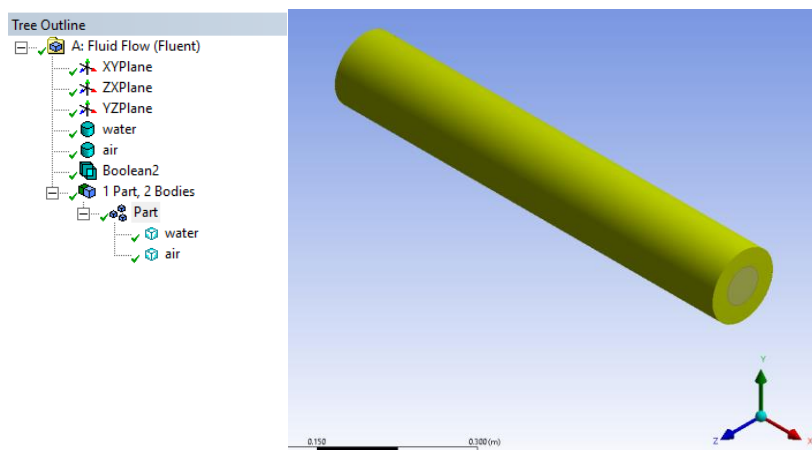
Nyní je potřeba válce od sebe odečíst Boolovskými operacemi pomocí příkazu „**Create/Boolean/Operation-Subtract**“. Jako *target body* vybereme oblast vzduchu a jako *tool body* vybereme oblast vody. Vybereme možnost *Preserve Tool Body*, tím se zachová oblast vody. Kliknutím na *Generate* vzniknou dva oddělené objemy pro oblast vody a oblast vzduchu.

Poslední operací je sloučení objemů do jednoho celku tzn. „new part“. Sloučením objemů do jednoho celku bude zachována návaznost výpočetní sítě mezi jednotlivými plochami. Příkaz dostanete označením obou objemů v záložce **2 Parts, 2 Bodies** a pravým tlačítkem myši na nabídku „**Form New Part**“, viz obr. 6.4.



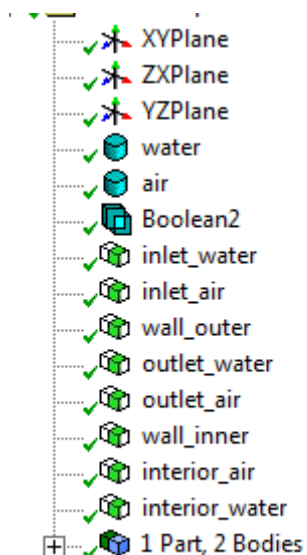
obr. 6.4 – Sloučení objemů do jednoho celku („Form New Part“)

Výsledná podoba příkazu „**Form New Part**“ je patrná z obr. 6.5.



obr. 6.5 – Výsledná podoba příkazu „Form New Part“

V další fázi pojmenujte okrajové podmínky, tak jak jsou popsány na obr. 6.1 (**inlet air, inlet water, outlet air, outlet water, wall inner, wall outer**). Pojmenování okrajových podmínek se provede pomocí příkazu „**Named Selection**“ s výběrovým módem na plochy (Face) (3.2). Výsledné označení a pojmenování všech okrajových podmínek je patrné z obr. 6.6. Navíc oproti okrajovým podmínkám na stěnách model obsahuje dvě oblasti interioary (objemy), které je nutné definovat (**interior\_air a interior\_water**).



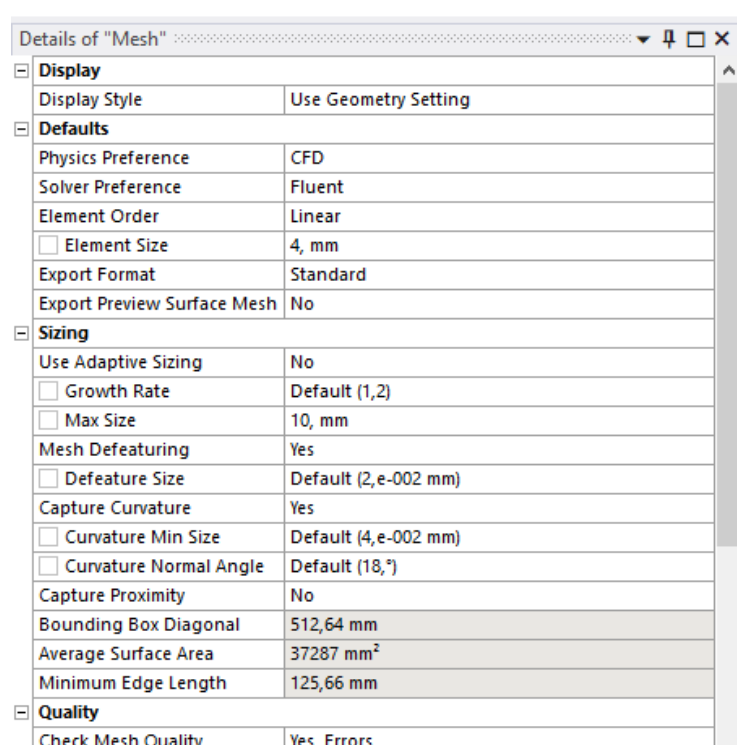
obr. 6.6 – Označení okrajových podmínek

Tím je model souprůdného výměníku v programu **DesignModeller** kompletní.

### 6.3 Tvorba výpočetní sítě

Nyní můžete přejít na tvorbu výpočetní sítě v programu **ANSYS Meshing**. Postup spuštění programu je popsán v kap. 3.3. K výsledné podobě výpočetní sítě, která je znázorněna na obr. 6.10 využijte opět stejné nástroje, jako jsou uvedené v kap. 3.3. Vytvořte síť s mezními vrstvami v oblasti **interior water** a **interior air** směrem k **wall inner** a **wall outer**.

K vytvoření výpočetní sítě v této podobě využijete zhuštění sítě (vytvořit jen na čele obou válců) a sweep. Jedná se tedy o stejné operace, jako byly použity při tvorbě výpočetní sítě v příkladu vedení tepla v tyči. V panelu **Details of Mesh** předefinujte velikost elementu v položkách **Element Size** na hodnotu 4 mm, **Max Size** na hodnotu 10 mm.



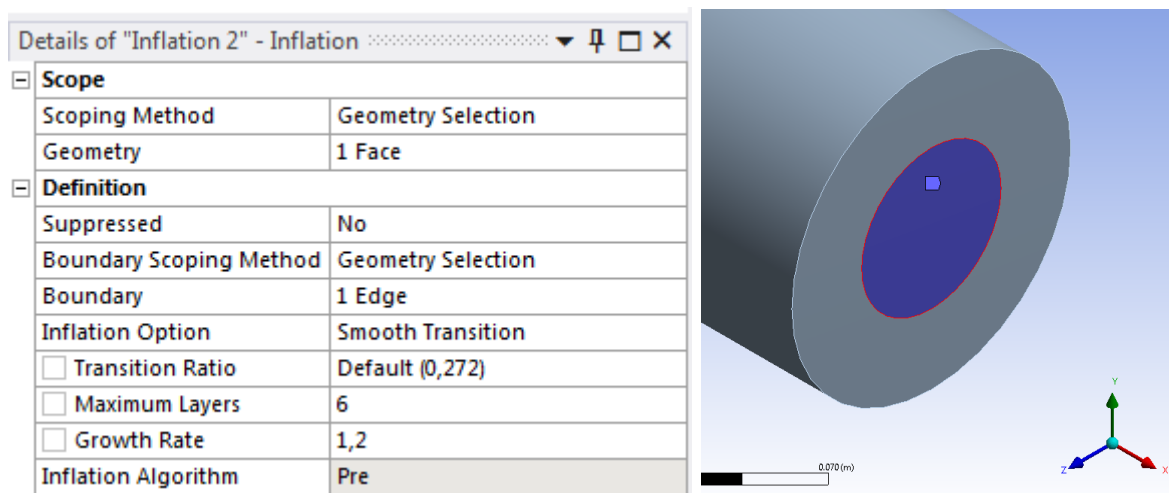
obr. 6.7 – Definování velikosti elementu

#### Definování parametrů zhuštění („Inflation“)

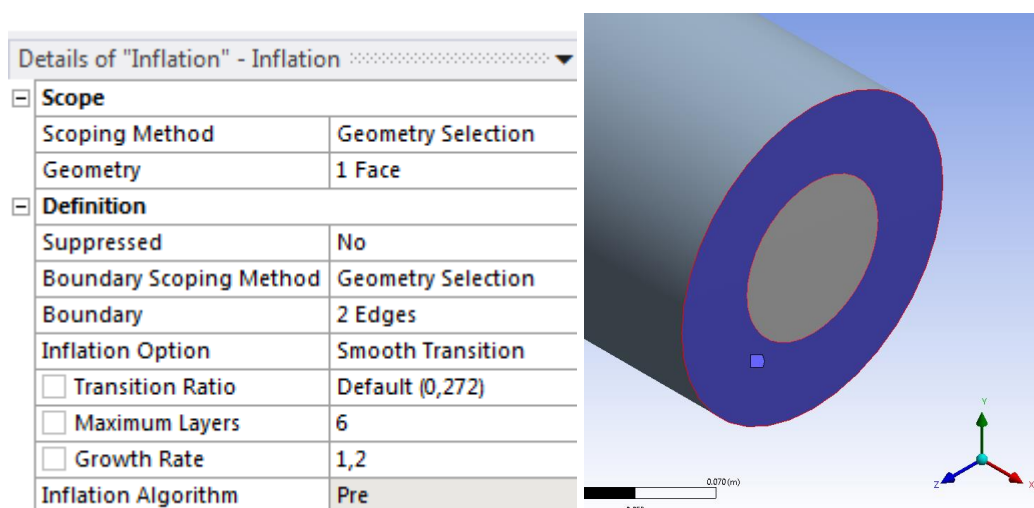
Poté definujte parametry zhuštění výpočetní sítě. Počet vrstev (buněk) zhuštění, růstový faktor charakterizující postupné zmenšování velikosti buněk směrem k hranici, poměr zmenšení poslední buňky zhuštěné oblasti. Definujte dvě oblasti zhuštění, a to do každé oblasti (**interior water**, **interior air**) směrem k stěně **wall inner**.

- Počet vrstev (buněk) mezní vrstvy – 6
- Růstový faktor – 1,2
- Faktor charakterizující postupné zmenšování velikosti buněk – 0,272

Parametry zhuštění (**Inflation**) směrem k stěně **wall inner** pro oblasti **interior water** a **interior air** jsou patrné z obr. 6.8 a obr. 6.9.



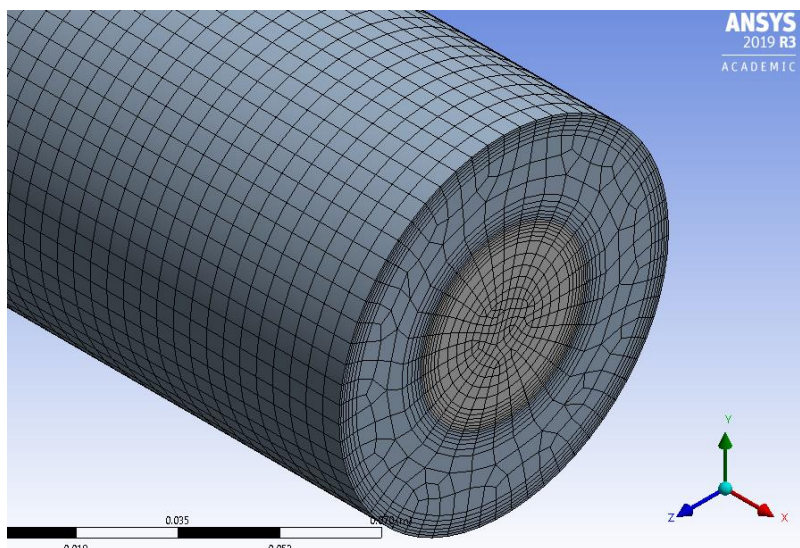
obr. 6.8 – Parametry zhuštění pro oblast **interior water**



obr. 6.9 – Parametry zhuštění pro oblast **interior air**

Nyní vložíme metodu „Sweep“ (nastavení viz kap 3.3) a tím protáhneme povrchovou síť do objemu.

Vygenerování výpočetní sítě provedete příkazem **Generate Mesh**. Výsledná podoba výpočetní sítě je patrná z obr. 6.10.



obr. 6.10 – Výsledná podoba výpočetní sítě

## 6.4 ANSYS FLUENT

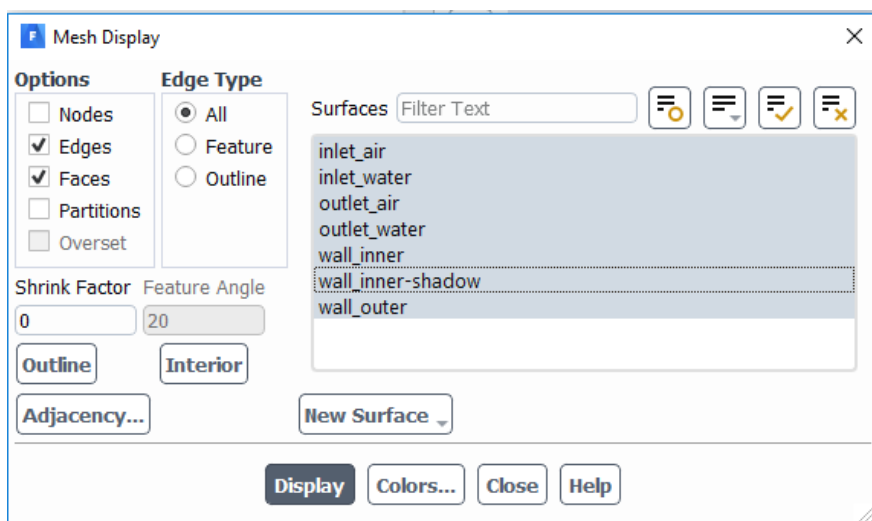
Program ANSYS FLUENT 2019 R3 spustíte obdobným způsobem jako v případě příkladu vedení tepla v tyči.

Po úspěšném načtení výpočetní sítě do programu ANSYS Fluent 2019 R3 zkontrolujte:

- jednotky rozměrů sítě příkazem „**Domain /Mesh/Scale**“
- počet buněk sítě příkazem „**Domain/Mesh/Info/Size**“
- existenci záporných objemů v síti příkazem „**Domain/Mesh/Check**“
- výpočetní sítě zobrazením všech hranic (okrajových podmínek) a všech oblastí příkazem „**Domain/Mesh/Display**“

Při kontrole sítě příkazem „**Domain/Mesh/Display**“ jsou všechny okrajové podmínky pojmenovány, tak jak byly nadefinovány v programu **ANSYS Meshing**. S výjimkou jedné nově vytvořené okrajové podmínky **wall\_inner-shadow**. Což představuje identickou okrajovou podmínku jako **wall\_inner**. Byla vytvořena nová okrajová podmínka **wall\_inner-shadow** (obr. 6.11), která společně s podmínkou **wall\_inner** definuje tzv. dvouvrstvou stěnu, kdy jedná je součástí oblasti **interior water** a druhá je součástí oblasti **interior air**. Tento typ okrajové podmínky nabízí definování dalších možnosti na přechodu mezi oběma oblastmi.



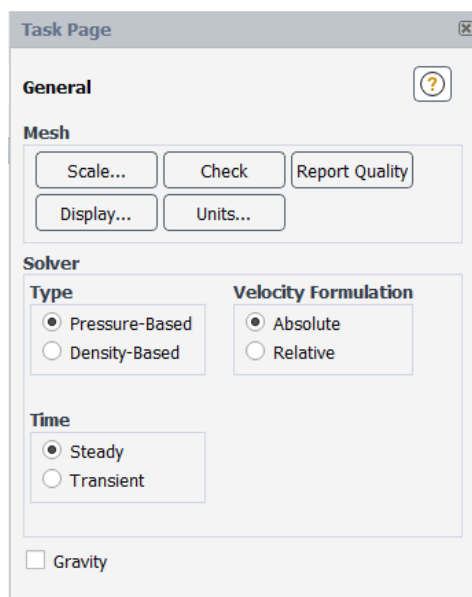


obr. 6.11 – Kontrola okrajových podmínek

Použijte následující nastavení matematického modelu:

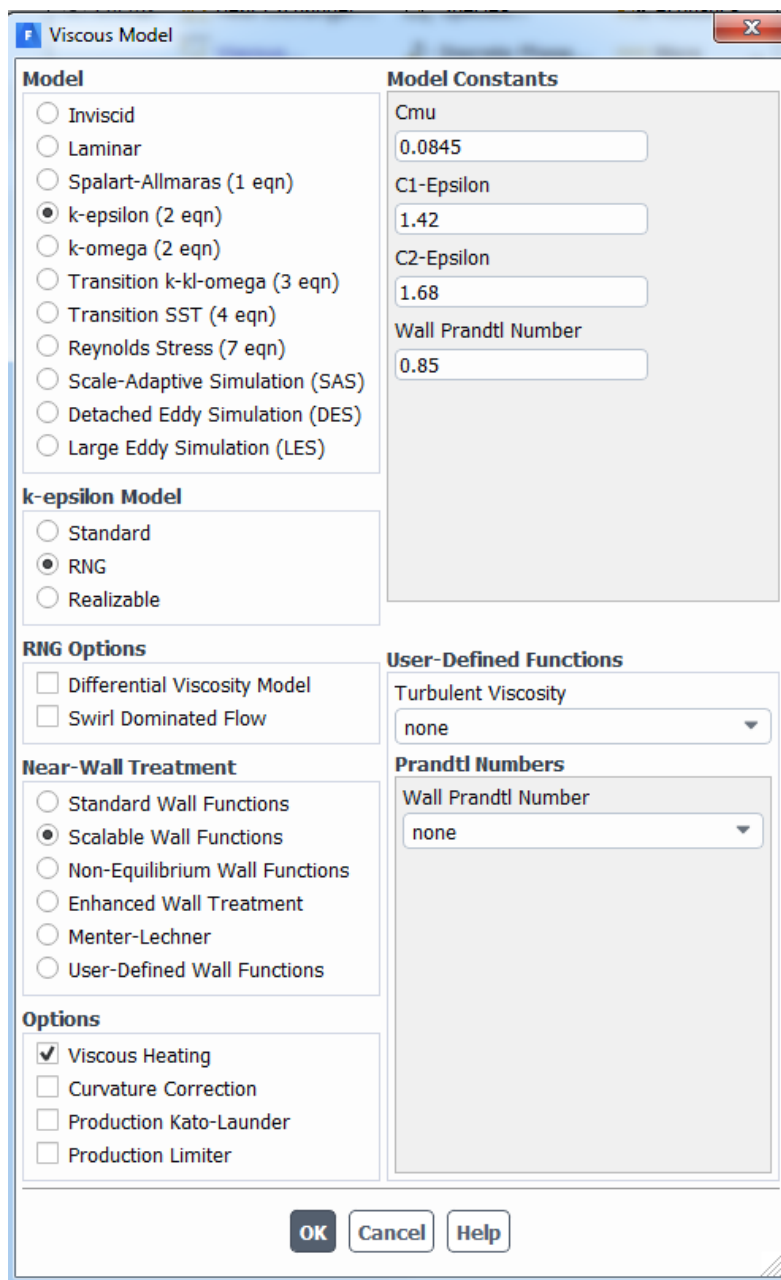
- Časově ustálené proudění
- Turbulentní k- $\epsilon$  RNG model proudění pro vodu i vzduch
- Bez uvažování tíhového zrychlení
- Uvažujte přenos tepla (rovnice energie)
- Definujte konstantní fyzikální vlastností vody a vzduchu (nakopírujte materiály z knihovny Fluentu)

V rámci příkazu „**General**“ definujte „**Solver**“ typu „**Pressure-Based**“. Časově ustálené proudění „**Steady**“. Tíhové zrychlení neuvažujte. Nastavení příkazu „**General**“ je patrné z obr. 6.12.



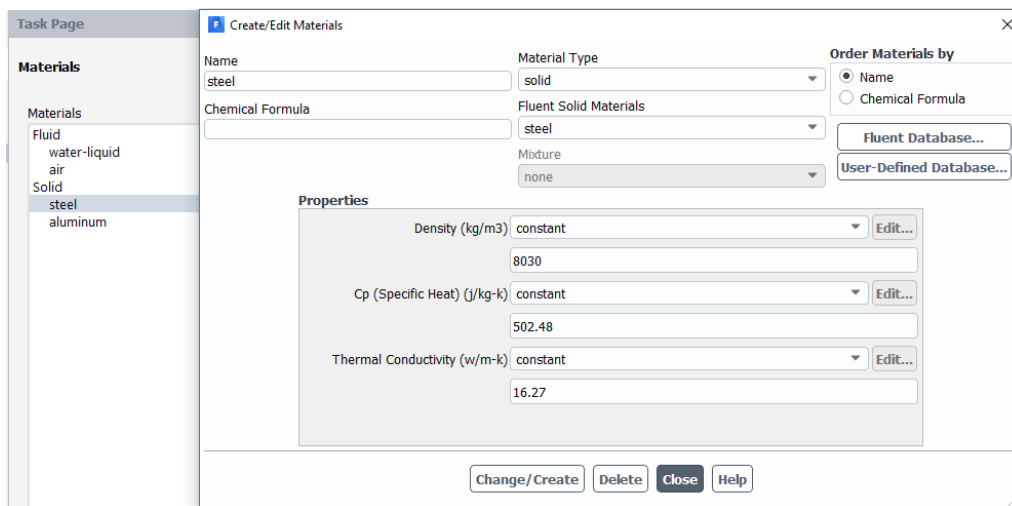
obr. 6.12 – Příkaz „**General**“

Dalším příkazem je **Models** („**Physics/Define/Models**“), kde se definuje fyzikální podstata úlohy, tj. proudění s teplem **Energy** a turbulentní **k-ε RNG** model proudění v položce **Viscous** společně se stěnovou funkcí **Scable Wall Functions**, viz obr. 6.13.



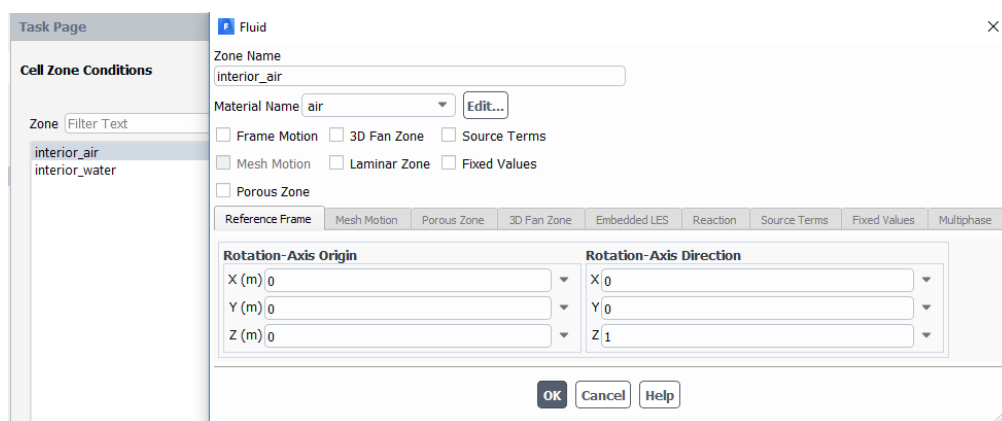
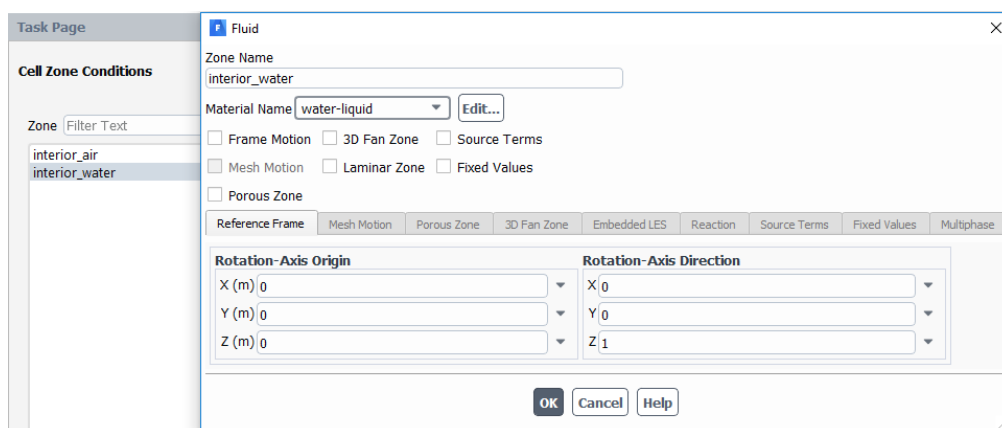
obr. 6.13 – Nastavení matematického modelu řešeného problému

Definování materiálu provedete příkazem **Materials** („**Physics/Materials/Create/Edit Materials**“). Analogicky jako v případě vedení tepla v tyči z databáze programu **ANSYS Fluent** vyberte materiály: voda, vzduch, ocel, které nakopírujete. Jedná se o materiály typu **fluid** a **solid**, a definujte konstantní fyzikální vlastností pro všechny materiály. Výsledná podoba nabídky materiálu je patrná z obr. 6.14.



obr. 6.14 – Požadované materiály pro matematický model

Definování proudící tekutiny do dané oblasti provedete příkazem „**Physics/Cell Zone Conditions**“. V tomto případě máme dvě oblasti (**interior water**, **interior air**). Do oblasti **interior water** definujte **water**, a do oblasti **interior air** definujte **air**, viz obr. 6.15.



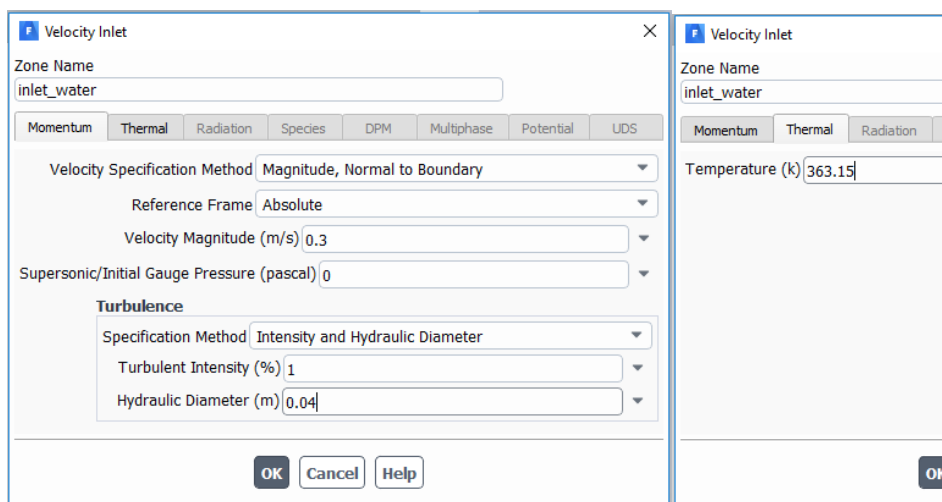
obr. 6.15 – Definování proudících médií do daných oblastí

Okrajové podmínky definujte pomocí příkazu „**Physics/Boundary Conditions**“. Podmínky mohou být různého typu, a to podle charakteristiky fyzikálního modelu. Výčet podmínek je patrný z Tab. 6.4.

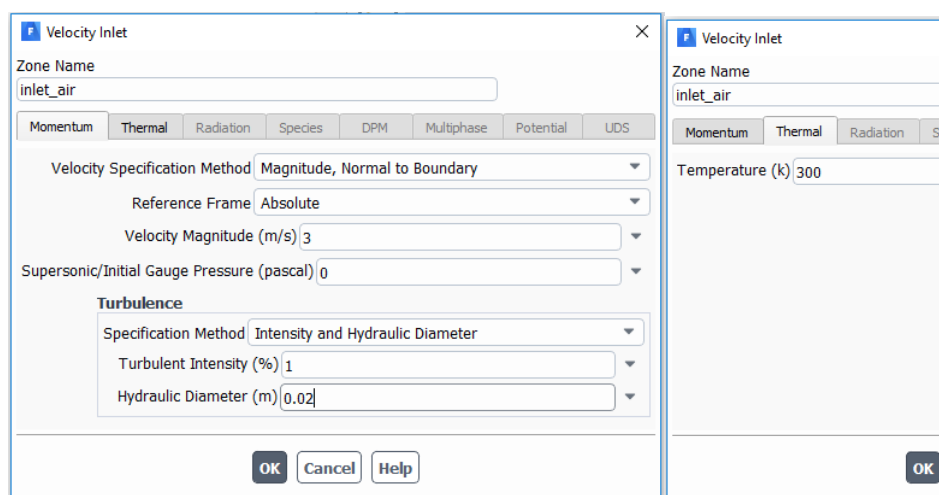
Tab. 6.4 – Typy jednotlivých okrajových podmínek

Okrajová podmínka	Typ okrajové podmínky
inlet water	VELOCITY INLET
inlet air	VELOCITY INLET
outlet water	PRESSURE OUTLET
outlet air	PRESSURE OUTLET
wall inner	WALL
wall outer	WALL
interior water	INTERIOR
interior air	INTERIOR

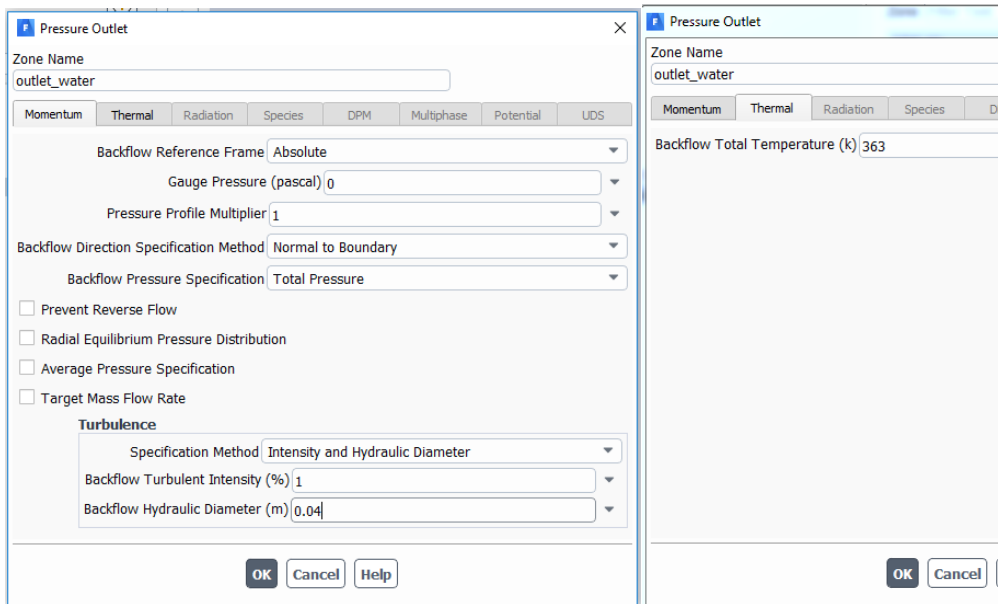
Parametry na jednotlivých okrajových podmínkách odpovídají zadání dle Tab. 6.3. Nastavení okrajových podmínek je zobrazeno na následujících obrázcích.



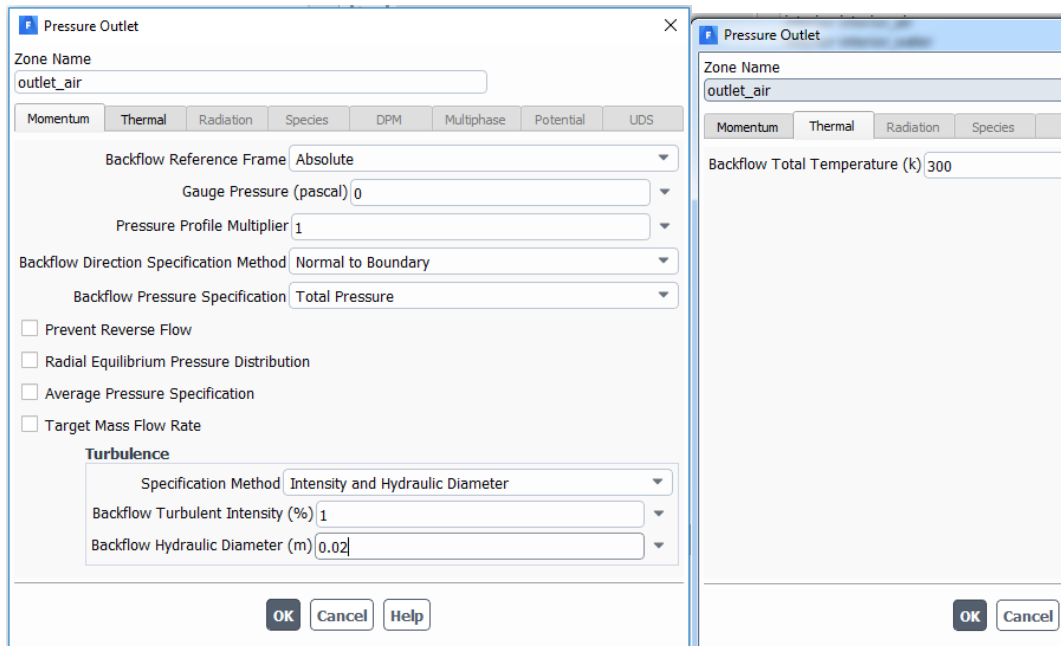
obr. 6.16 – Parametry okrajové podmínky *inlet water*



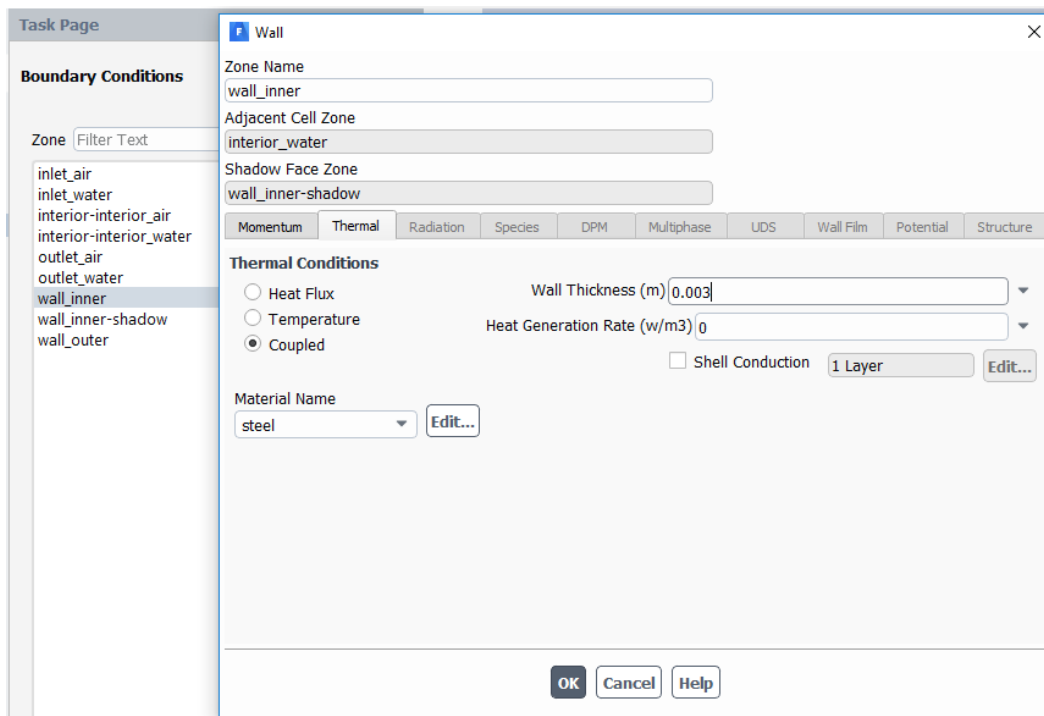
obr. 6.17 – Parametry okrajové podmínky *inlet air*



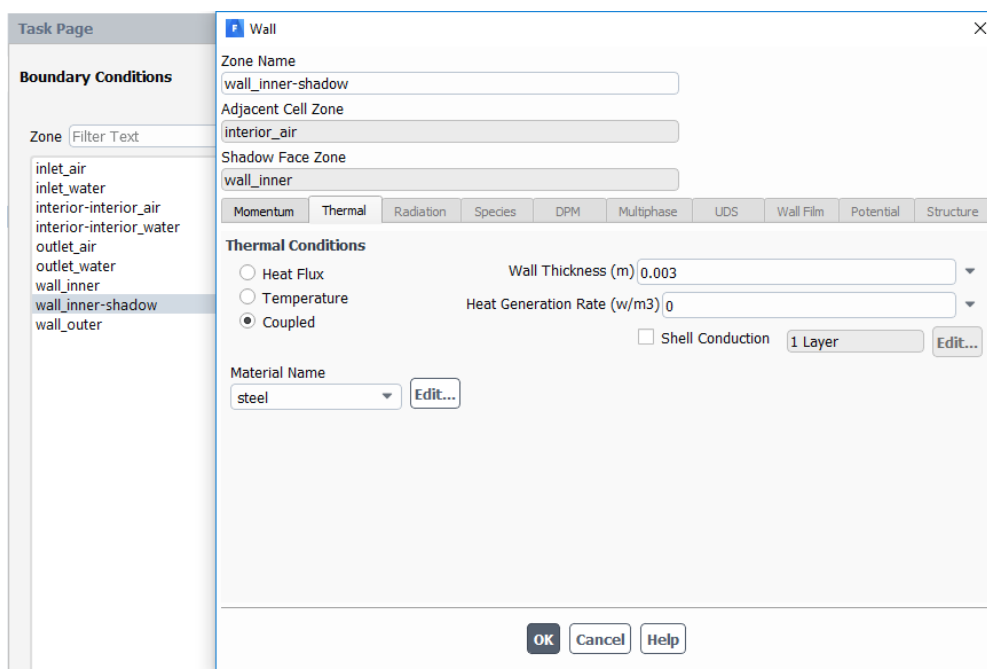
obr. 6.18 – Parametry okrajové podmínky **outlet water**



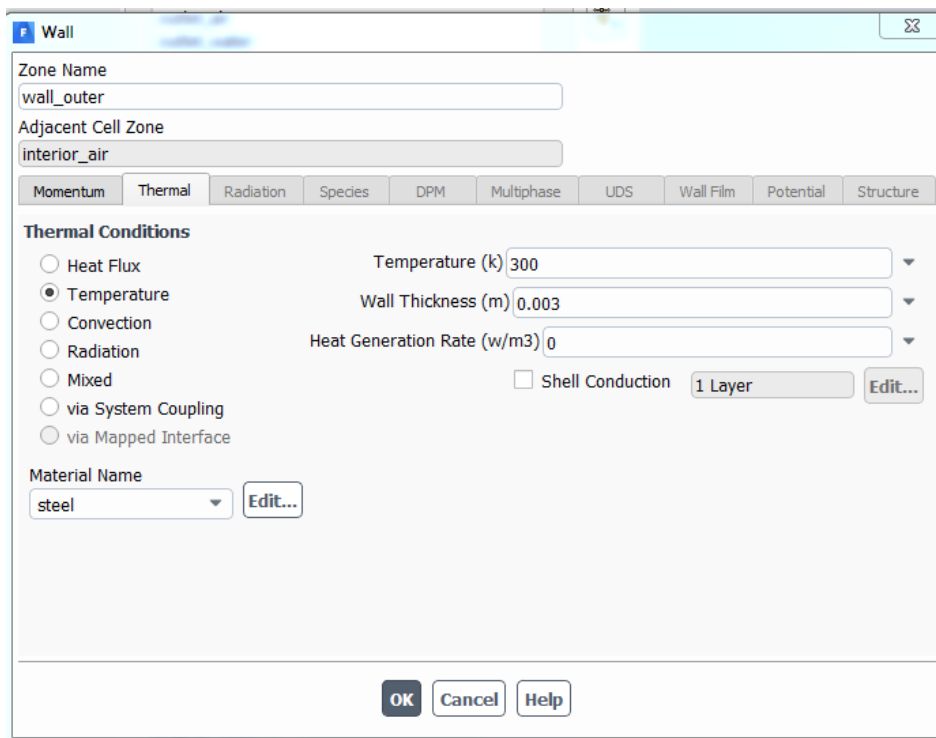
obr. 6.19 – Parametry okrajové podmínky **outlet air**



obr. 6.20 – Parametry okrajové podmínky **wall inner**

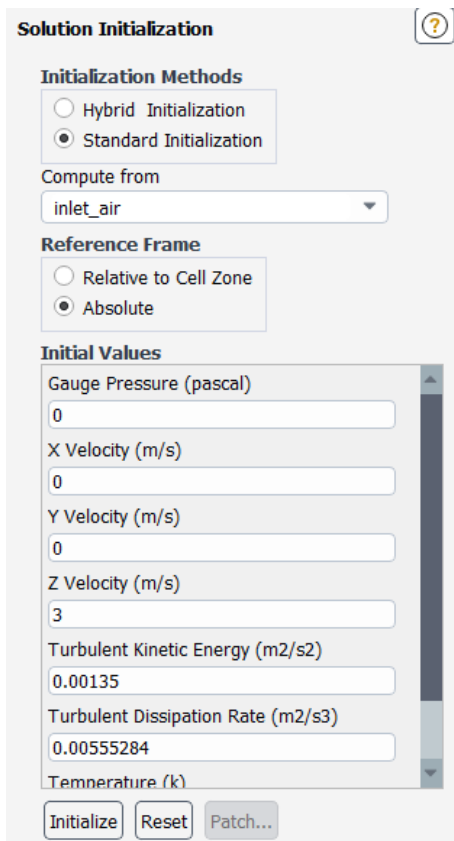


obr. 6.21 – Parametry okrajové podmínky **wall inner-shadow**



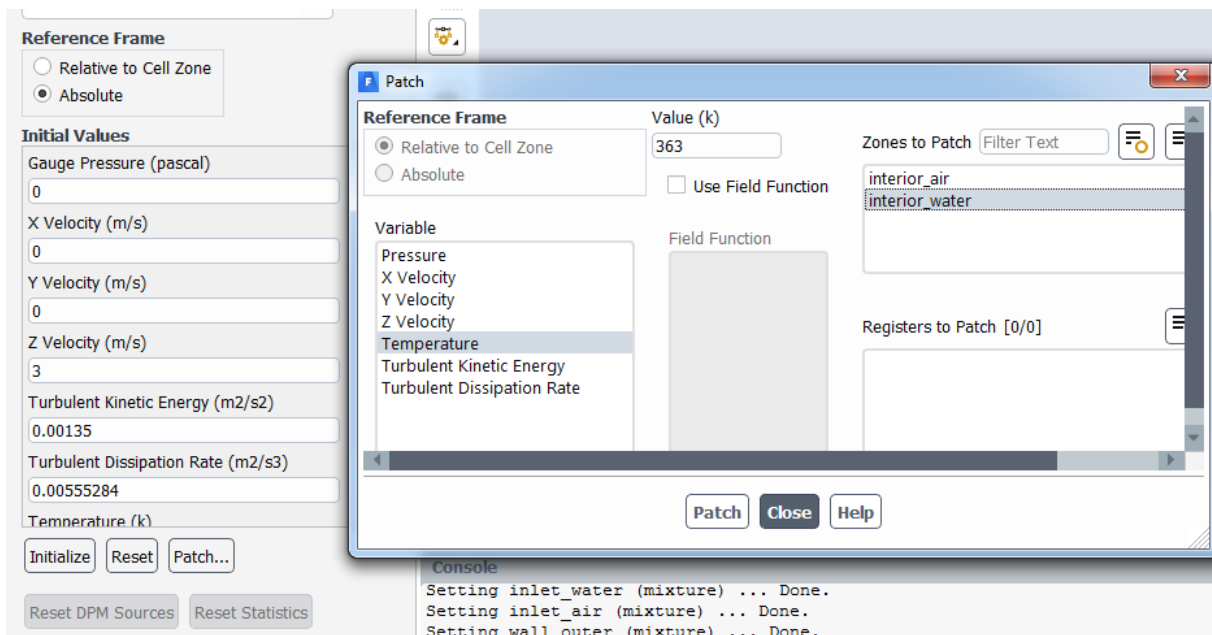
obr. 6.22 – Parametry okrajové podmínky **wall outer**

Následně se provede inicializace výpočtové oblasti („**Solving-Initialization-Method(Standard/Options)**“), tzn. definování počátečních podmínek do celé oblasti. V prvním kroku definujte počáteční podmínky (nulové hodnoty, minimální teplota) na základě parametrů na okrajové podmínce **inlet\_air**.



obr. 6.23 – Inicializace výpočtové oblasti („**Solution Initialization**“)

V druhém kroku definujte počáteční hodnotu teploty  $T=363\text{K}$  do celé oblasti proudění vody (interior\_water) pomocí příkazu **Patch** ve stejném okně (obr. 6.24) a to z důvodu urychlení numerického výpočtu.

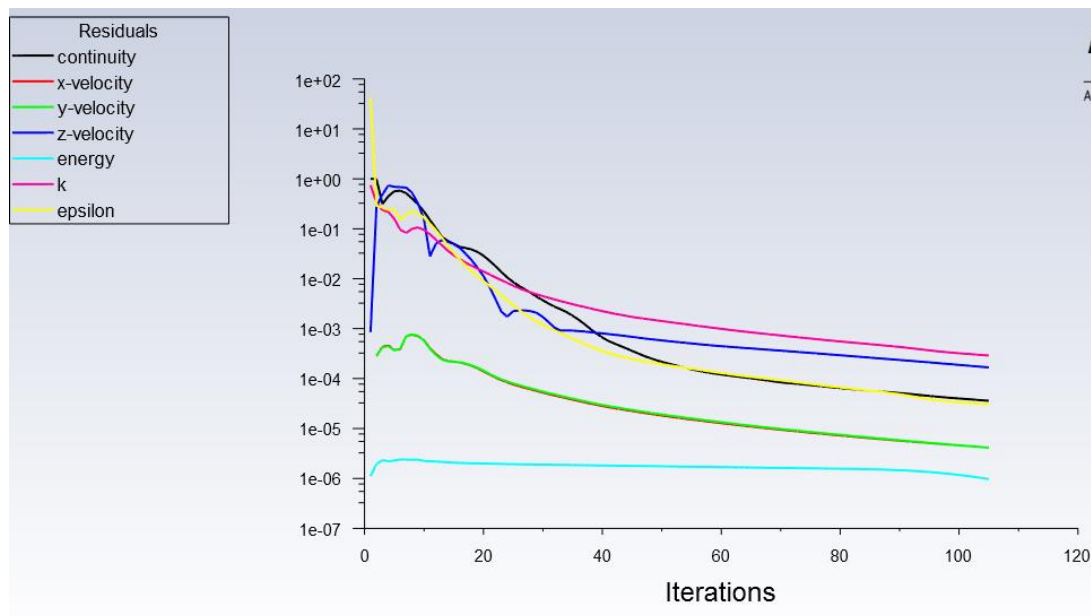


obr. 6.24 – Inicializace oblasti proudění vody příkazem **Patch**

Následně spustíme numerický výpočet příkazem „**Run Calculation**“. První kontrolou výpočtu je sledování reziduálů (relativních chyb). Po dosažení hodnot reziduálů pod

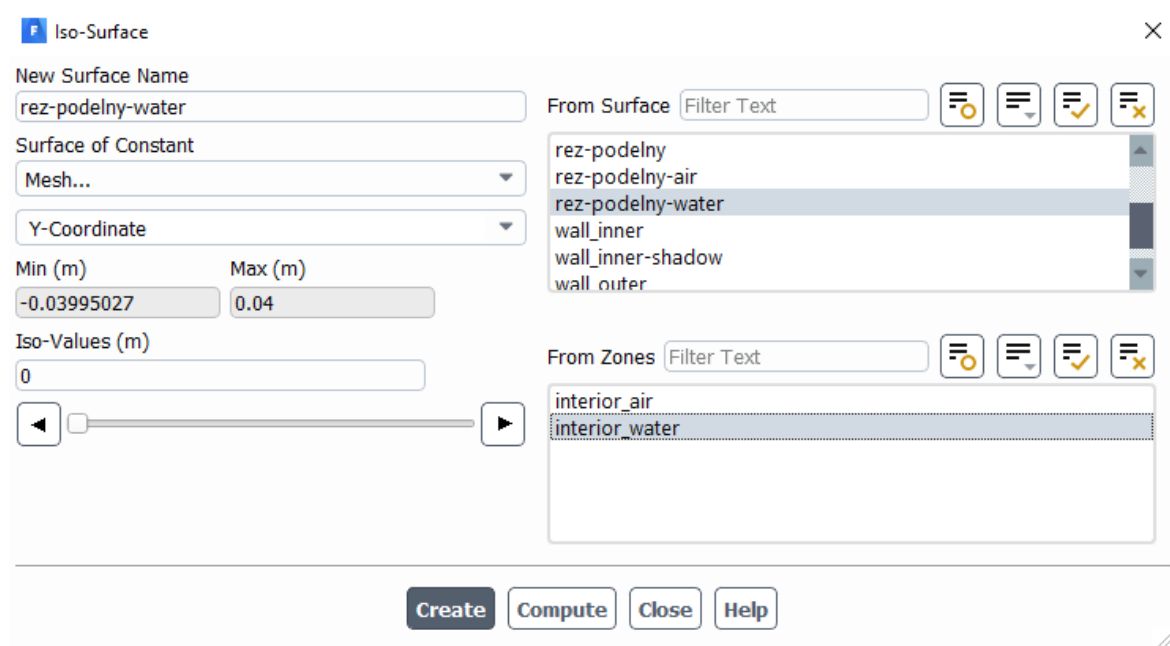


hranici 0.001 pro všechny proměnné a 0.000001 pro teplotu je zaručeno, že výpočet numericky zkonvergoval. Nakolik jsou výsledky reálné, tj. zda není výsledek deformovaný náhodnými chybami ve výběru materiálů nebo okrajových podmínek, je otázkou vyhodnocení všech počítaných veličin. Průběh reziduálů je znázorněn na obr. 6.25 – Průběh reziduálů.



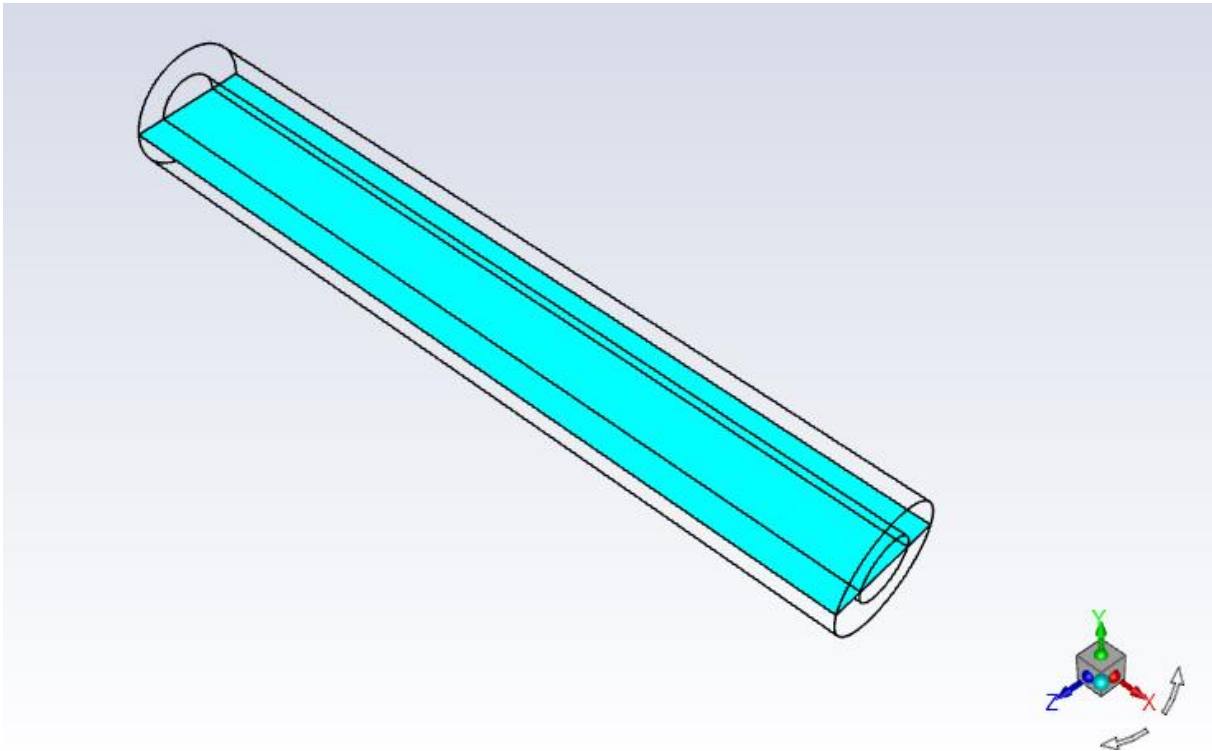
obr. 6.25 – Průběh reziduálů

Pro vyhodnocení je potřeba vytvořit podélný řez oblastí pomocí příkazu „**Results/Surface/Create/Iso-Surface**“. V tomto řezu následně vyhodnocujte grafické výstupy. Nastavení vytvoření podélného řezu skrz oblast proudění vody je patrné z obr. 6.26. Obdobně vytvoříme i řez oblastí **interior-air** s tím rozdílem, že v položce **From Zones** vybereme **interior\_air**.



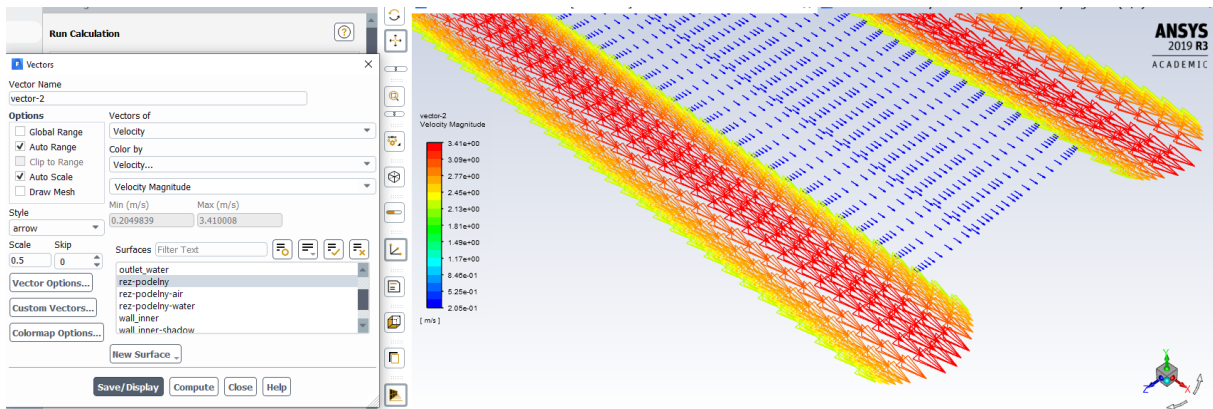
obr. 6.26 – Vytvoření podélného řezu v oblasti **interior water**

Výsledný řez je patrný z obr. 6.27.



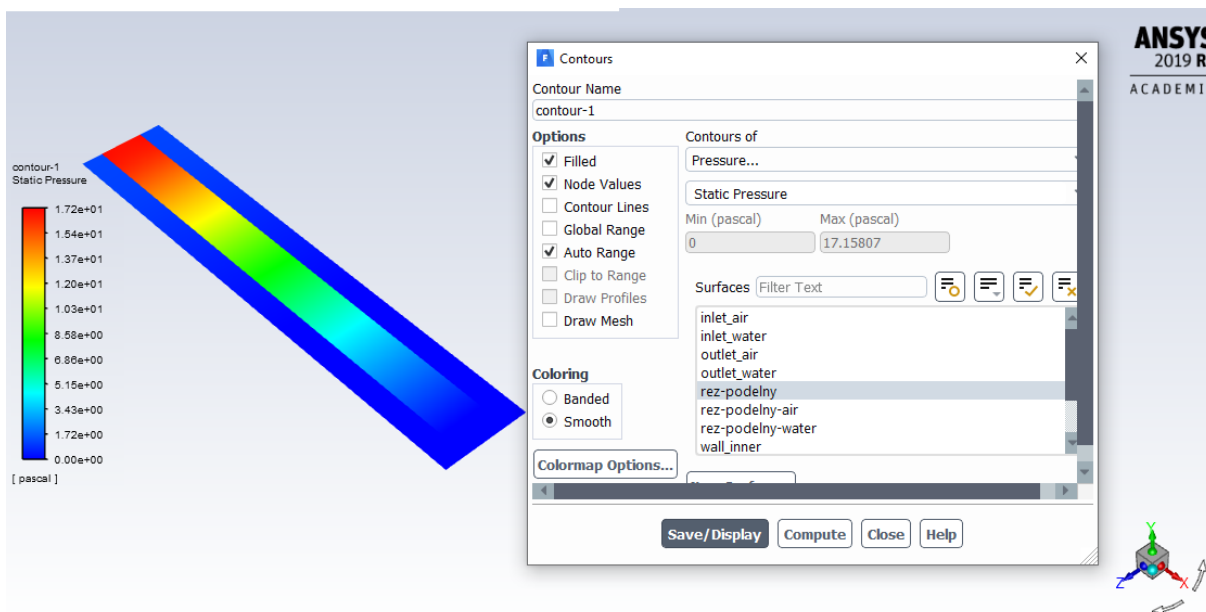
obr. 6.27 – Podélný řez vedený středem výpočetní oblasti

Pro vyhodnocení vektorů rychlostí, které jsou definovány v každé buňce výpočetní oblasti pomocí příkazu „**Results/Graphics/Vectors**“ upravte hodnotu parametru „Scale“. Definujte novou hodnotu parametru „Scale=0.5“, viz obr. 6.28.



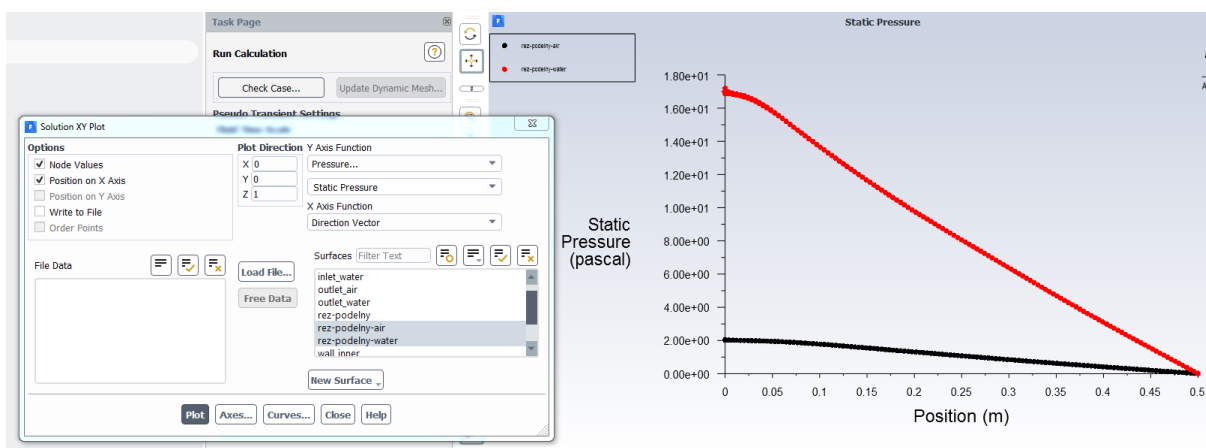
obr. 6.28 – Vektory rychlosti ( $u[m \cdot s^{-1}]$ )

Průběh statického tlaku v podélném řezu v řešených oblastech (**interior water, interior air**) lze zobrazit pomocí vyplněných kontur „**Results/Graphics/Contours**“, viz obr. 6.29.



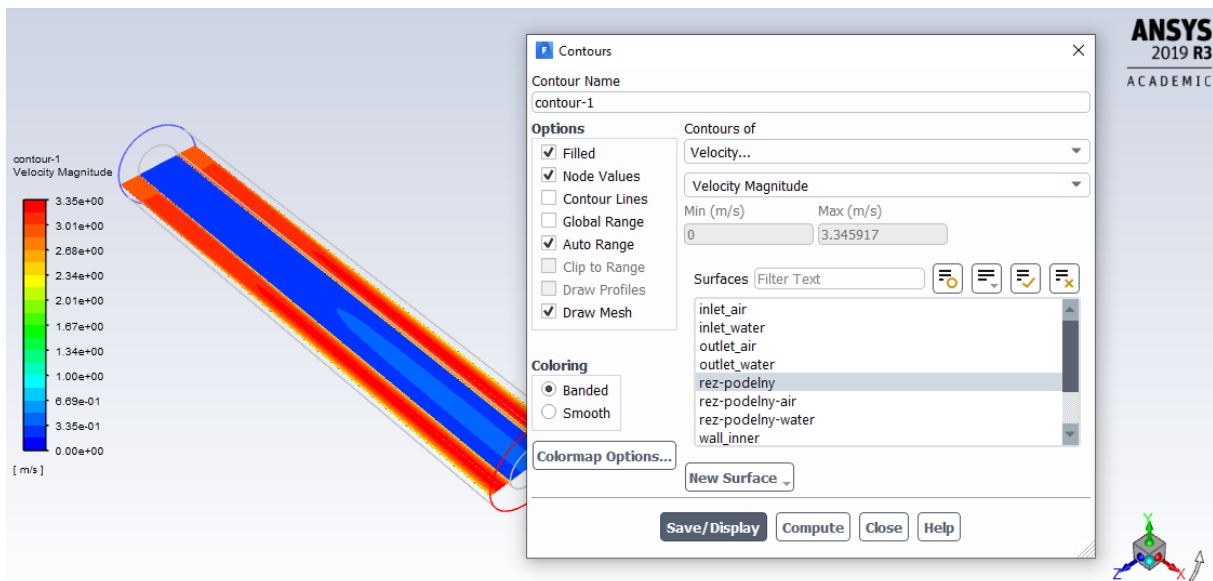
obr. 6.29 – Kontury statického tlaku (Pa)

Průběh statického tlaku lze zobrazit i pomocí 2D grafu příkazem „**Results/Plots/XY Plot/Solution XY Plot**“ v jednotlivých oblastech (**interior water, interior air**). Následné vykreslení průběhu tlaku příkazem „**Results/Plots/XY Plot/Solution XY Plot**“ v jednotlivých oblastech je patrné z obr. 6.30. Výsledky lze skreslit do jednoho grafu.



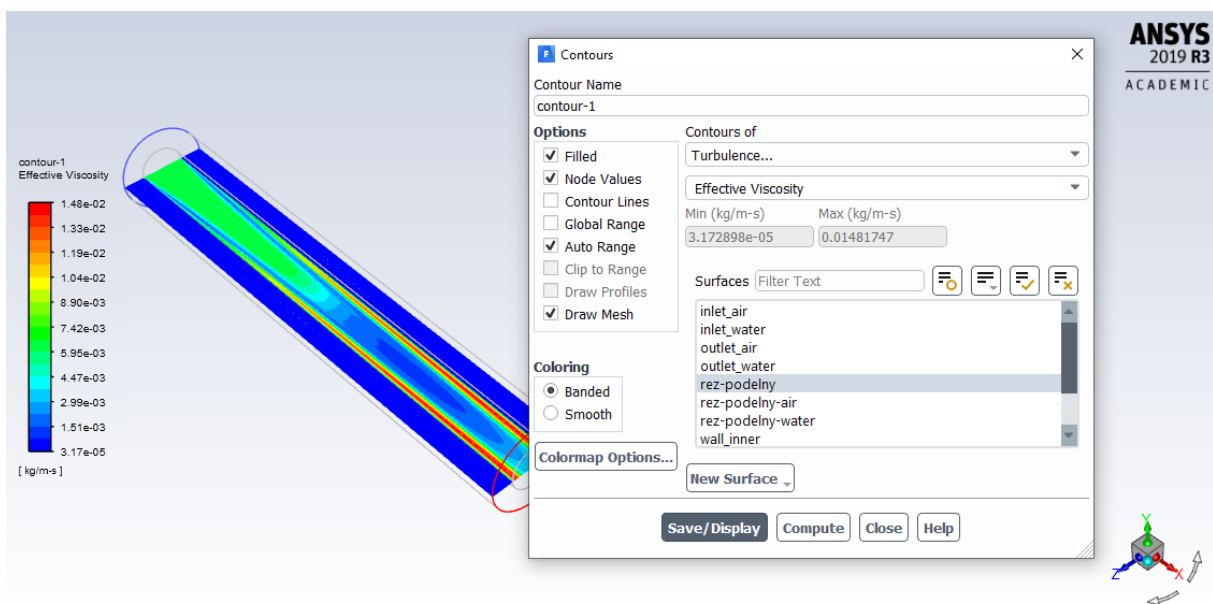
obr. 6.30 – Průběh statického tlaku po délce v oblasti **interior water a interior air**

Další vyhodnocení představují kontury rychlostí v podélném řezu pomocí vyplněných kontur „**Results/Graphics/Contours**“, viz obr. 6.31.



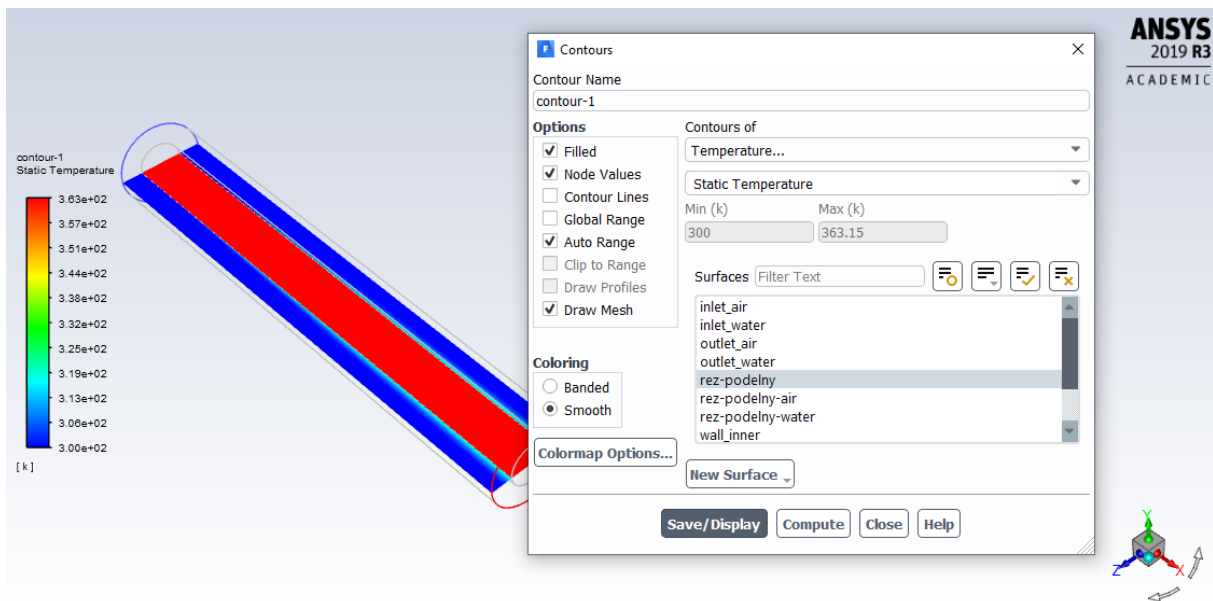
obr. 6.31 - Kontury rychlosti [m/s]

Průběh efektivní viskozity pomocí vyplněných kontur „Results/Graphics/Contours“ je na obr. 6.32.



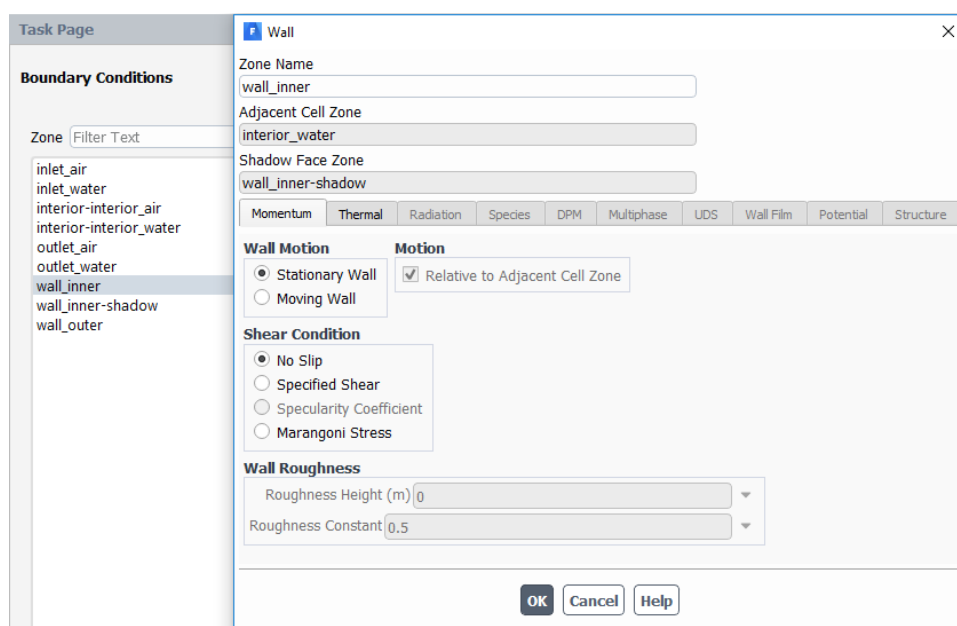
obr. 6.32 – Efektivní viskozita [kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>]

Vyhodnocení teplotního pole pomocí vyplněných kontur „Results/Graphics/Contours“ je na obr. 6.33.



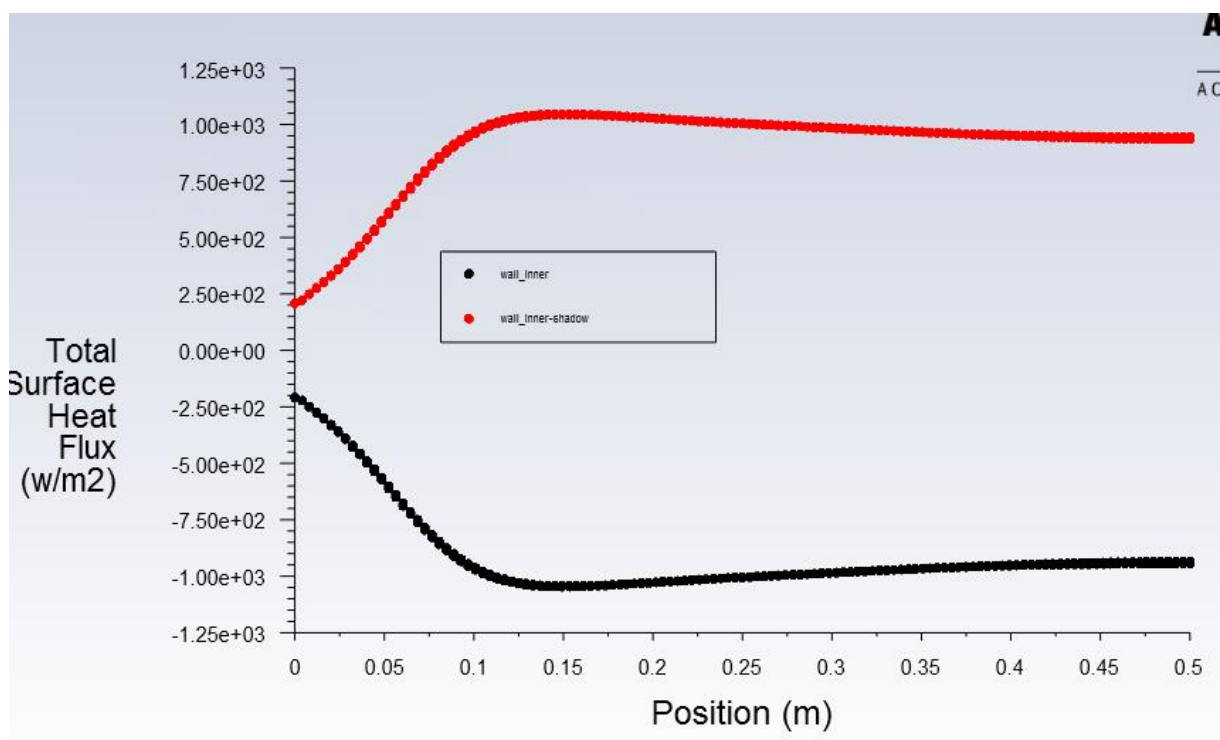
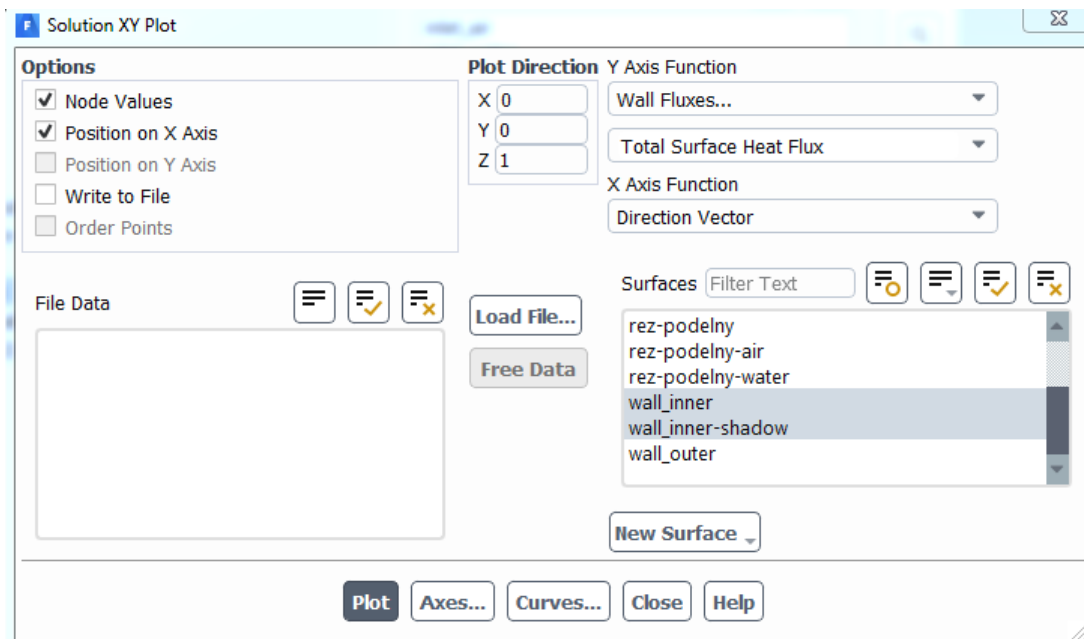
obr. 6.33 – Teplotní pole [K]

Tok tepla přes stěnu rozhraní (**wall inner, wall inner-shadow**) lze vyhodnotit příkazem „**Results/Plots/XY Plot/Solution XY Plot**“, viz obr. 6.35. Stěna rozhraní je rozdělena na dvě stěny (**wall inner a wall inner-shadow**), kdy jedná je rozhraním pro vodu a druhá je rozhraním pro vzduch. Jejich přesné označení souvisí s následným vyhodnocením součinitele přestupu tepla a Nusseltovým číslem. Zjistit přesné označení, která stěna je součástí dané oblasti proudění, je možné příkazem „**Physics/Zones/Boundary Conditions**“. Následným editováním např. stěny **wall inner** je uvedeno, že stěna sousedí s okolní oblastí (Adjacent Cell Zone) – **interior \_water**, tzn. s vodou, viz obr. 6.34. V případě stěny **wall\_inner-shadow** bude tomu naopak (stěna sousedí s oblastí vzduch).



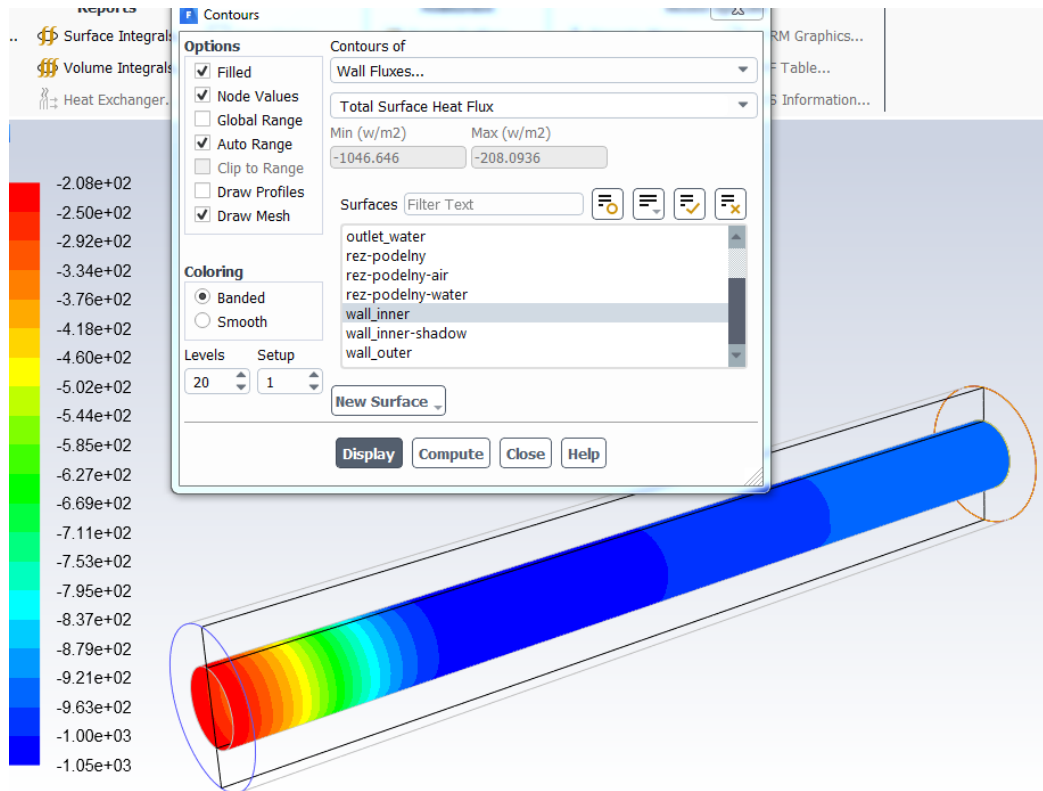
obr. 6.34 – Identifikace stěny **wall inner** sousedící s okolní vodou

Vyhodnocení toku tepla (**Total Surface Heat Flux**) stěnou **wall inner** a **wall inner-shadow** pomocí příkazu „**Results/Plots/XY Plot/Solution XY Plot**“ je na obr. 6.35.

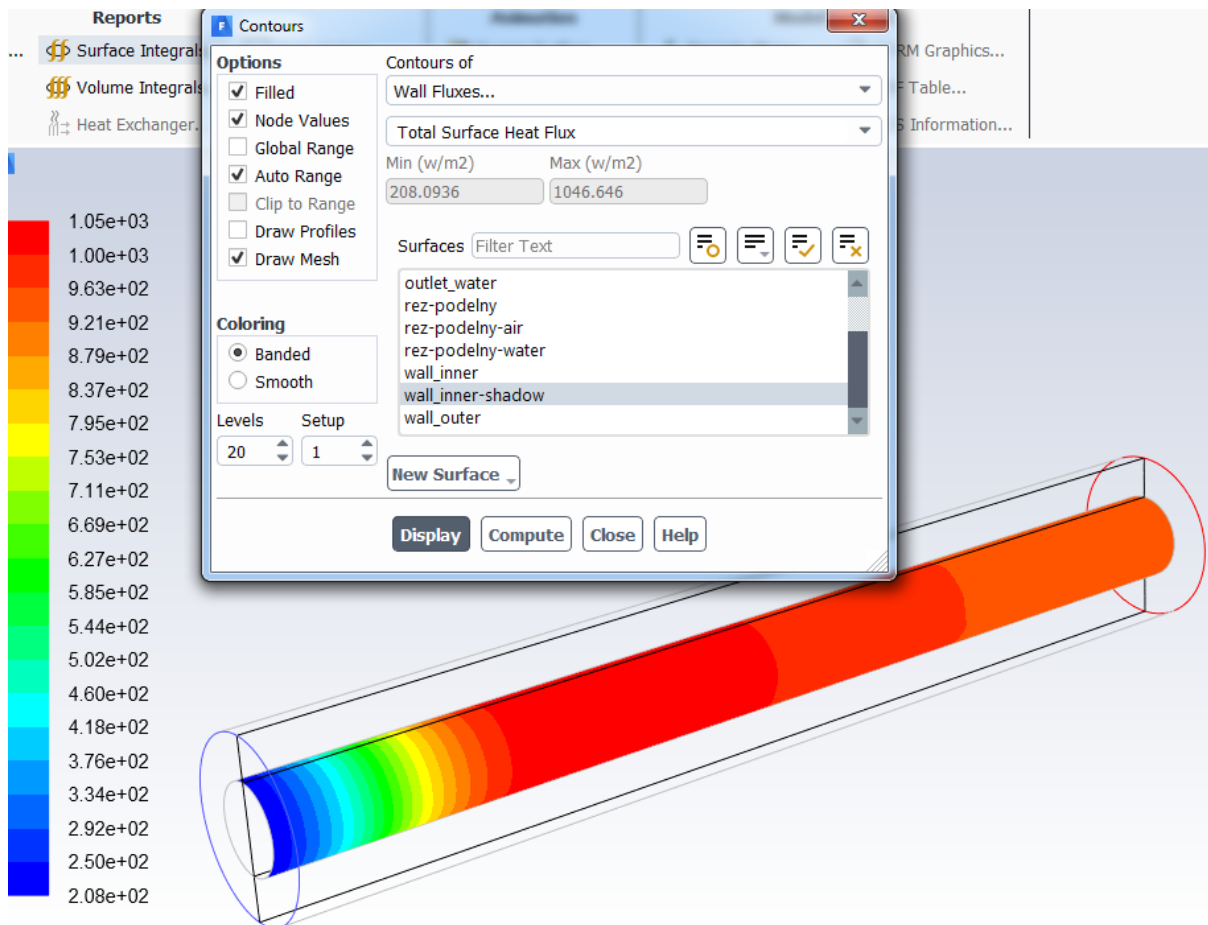


obr. 6.35 – Tok tepla ( $W/m^2$ ) přes stěnu rozhraní (**wall inner**, **wall inner-shadow**)

Analogicky lze tok tepla na stěnách vyhodnotit pomocí vyplněných kontur „**Results/Graphics/Contours**“ (obr. 6.36).



obr. 6.36 – Tok tepla ( $\text{W/m}^2$ ) přes stěnu rozhraní (*wall inner*)



obr. 6.37 – Tok tepla ( $\text{W/m}^2$ ) přes stěnu rozhraní (*wall inner-shadow*)

Dále je vyhodnocení zaměřeno na **součinitele přestupu tepla  $\alpha$  a Nusseltovo číslo  $Nu$**  do vody a vzduchu, přitom je nutné definovat referenční hodnoty.

### Vyhodnocení pro vodu

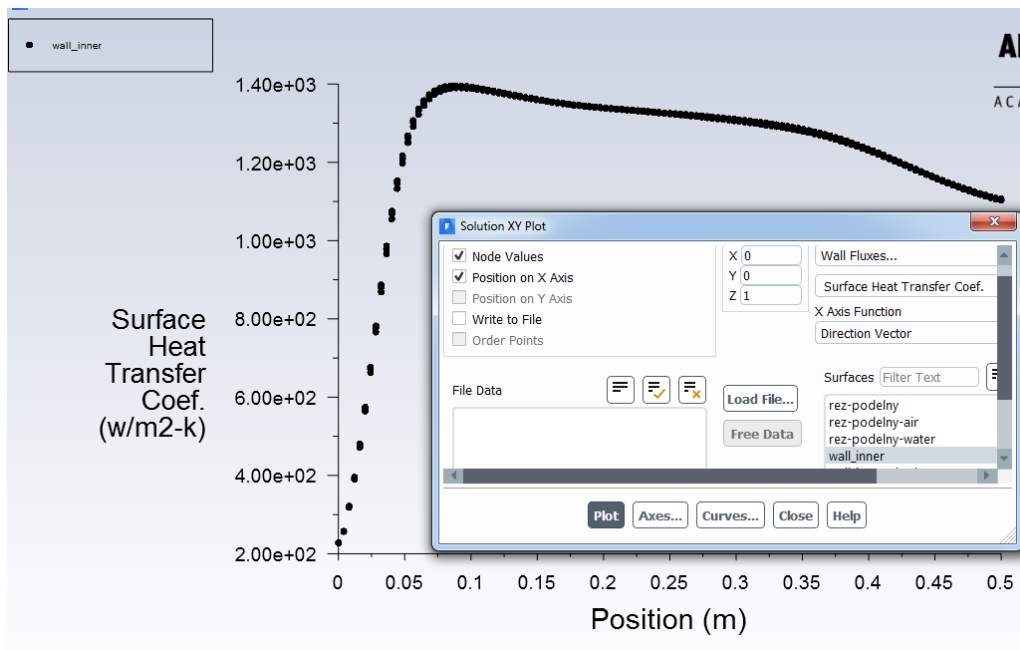
Nejdříve definujte referenční hodnoty dle vstupu vody (**inlet water**) příkazem „**Results/Report/Reference Values**“. V položce „**Compute from**“ vyberte **inlet water**. V nabídce referenčních hodnot („**Reference Values**“) upřesněte referenční teplotu („**Temperature**“) a charakteristický rozměr („**Length**“) - ( $T_{ref}=363.15$  K,  $d_h=0.04$  m), viz obr. 6.38.

Reference Values	
Area (m2)	1
Density (kg/m3)	998.2
Enthalpy (j/kg)	0
Length (m)	0.04
Pressure (pascal)	0
Temperature (k)	363.15
Velocity (m/s)	0.3
Viscosity (kg/m-s)	0.001003
Ratio of Specific Heats	1.4

obr. 6.38 – Referenčních hodnoty pro vyhodnocení do vody pro stěnu **wall inner**

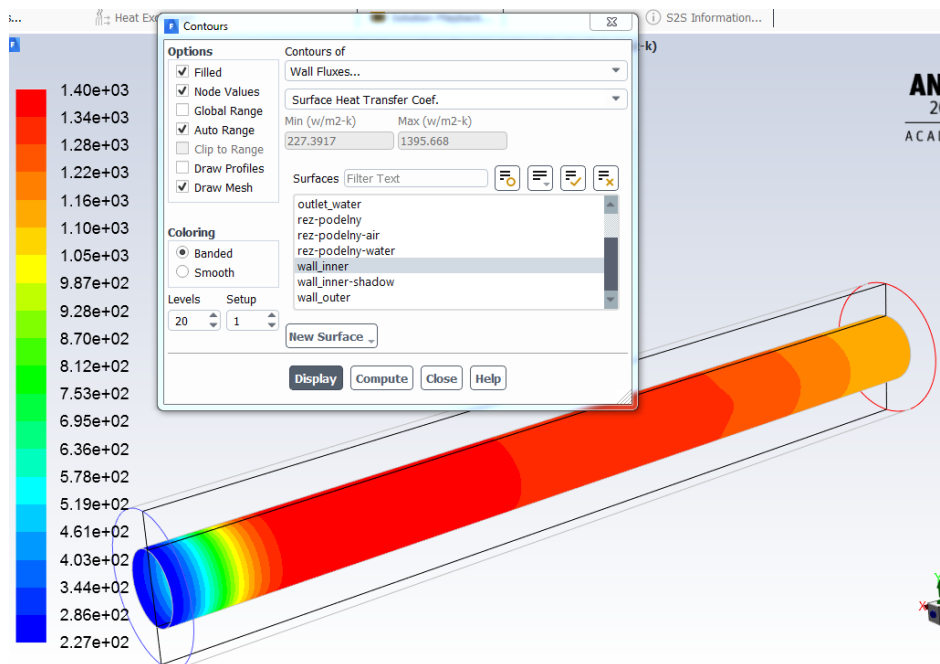
Vyhodnocení součinitele přestupu tepla  $\alpha$  („**Surface heat transfer coefficient**“) ze strany vody do stěny rozhraní (**wall inner**) realizujeme příkazem „**Results/Plots/XY Plot/Solution XY Plot**“, viz obr. 6.39.





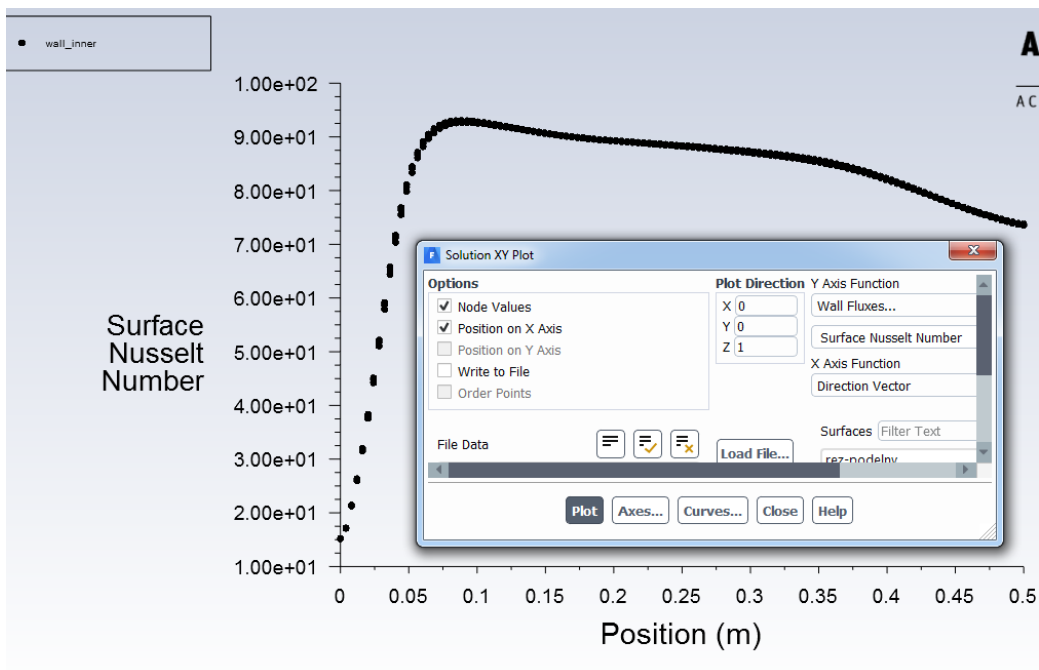
obr. 6.39 – Součinitel přestupu tepla stěnou rozhraní (**wall inner**) [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]

Analogicky lze součinitele přestupu tepla na stěně vyhodnotit pomocí vyplněných kontur „Results/Graphics/Contours“ (obr. 6.40).



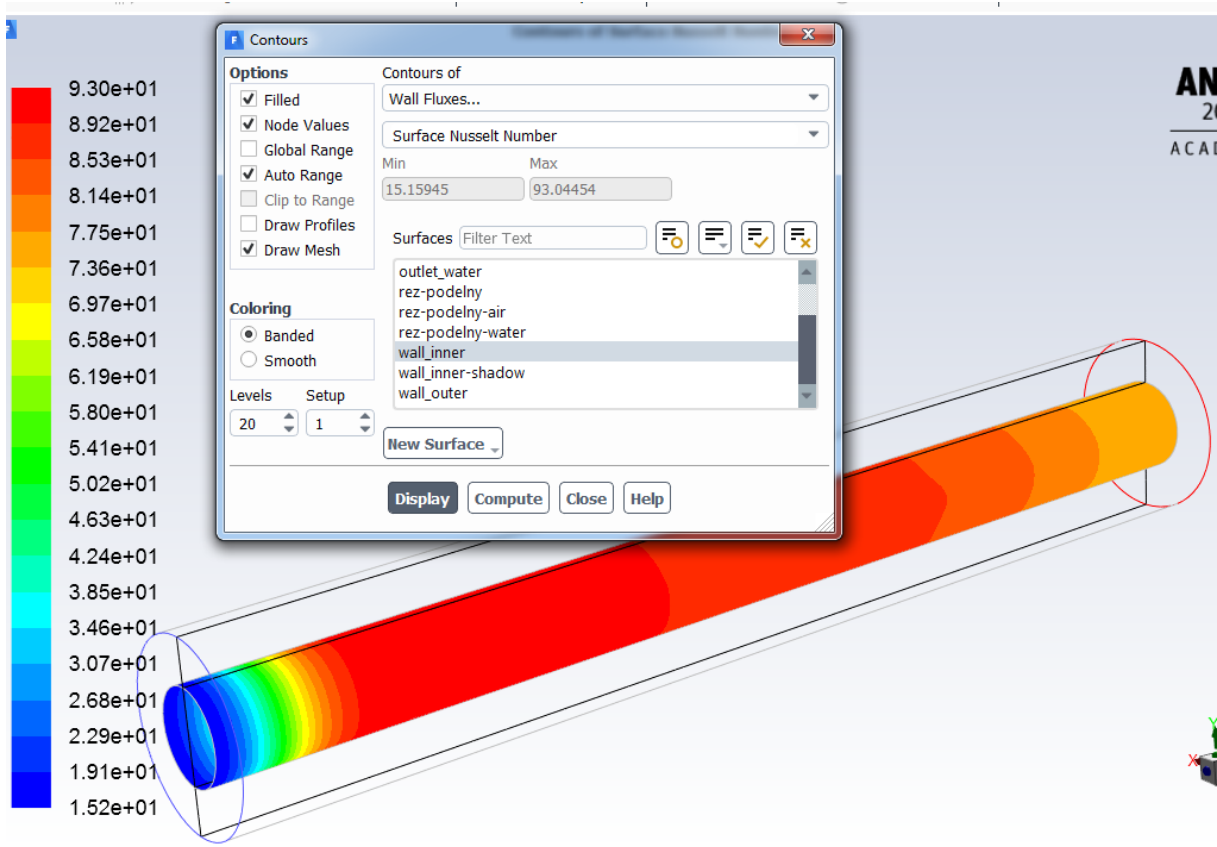
obr. 6.40 – Součinitel přestupu tepla stěnou rozhraní (**wall inner**) [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ] pomocí kontur

Následně lze vyhodnotit **Nusseltovo číslo** na stěně rozhraní (**wall inner**). Nejdříve prověřte referenční hodnoty příkazem „Results/Report/Reference Values“ (Temperature -  $T_{ref}=363.15$  K a Length -  $d_h=0.04$  m. Pak vykreslete **Nusseltovo číslo** příkazem „Results/Plots/XY Plot/Solution XY Plot“ (obr. 6.41).



obr. 6.41 – Nusseltovo číslo vyhodnoceného na stěně rozhraní (**wall inner**)

Nusseltovo číslo lze vyhodnotit pomocí vyplněných kontur „Results/Graphics/Contours“ (obr. 6.42).



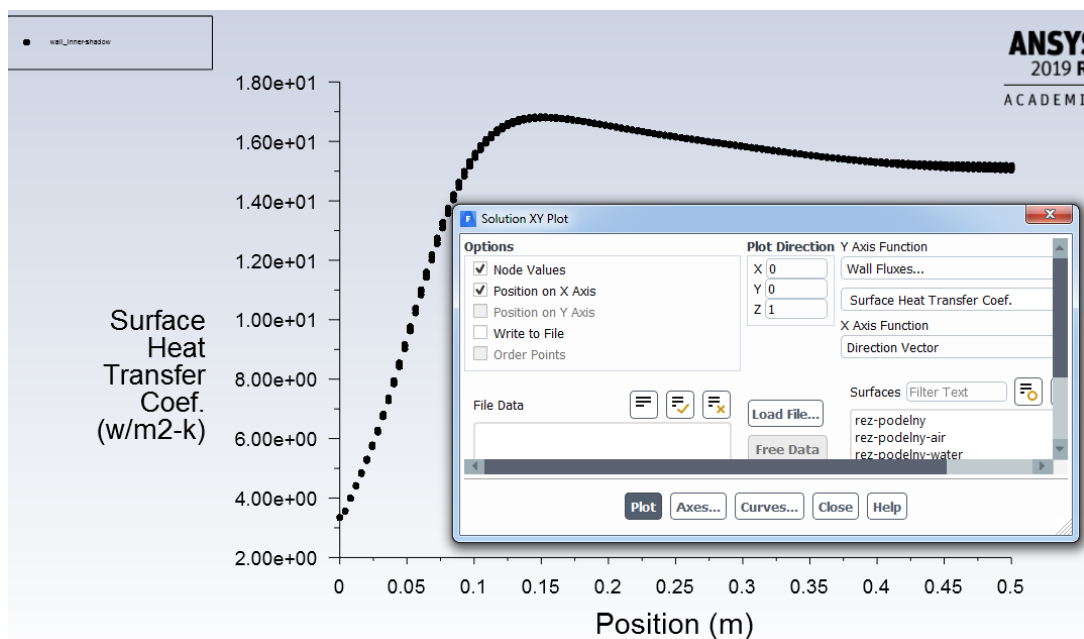
obr. 6.42 – Nusseltovo číslo vyhodnoceného na stěně rozhraní (**wall inner**)

## Vyhodnocení pro vzduch

Dále vyhodnotíme součinitele přestupu tepla  $\alpha$  („**Surface heat transfer coefficient**“) a Nusseltovo číslo  $Nu$  ze strany stěny (**wall inner-shadow**) do vzduchu příkazem „**Results/Plots/XY Plot/Solution XY Plot**“. Nejdříve definujte referenční hodnoty dle vstupu vzduchu (**inlet air**) příkazem „**Results/Report/Reference Values**“. V položce „**Compute from**“ vyberte **inlet air**. V nabídce referenčních hodnot („**Reference Values**“) upřesněte referenční teplotu („**Temperature**“) a charakteristický rozměr („**Length**“) - ( $T_{ref}=300$  K,  $d_h=0.02$  m), viz obr. 6.43.

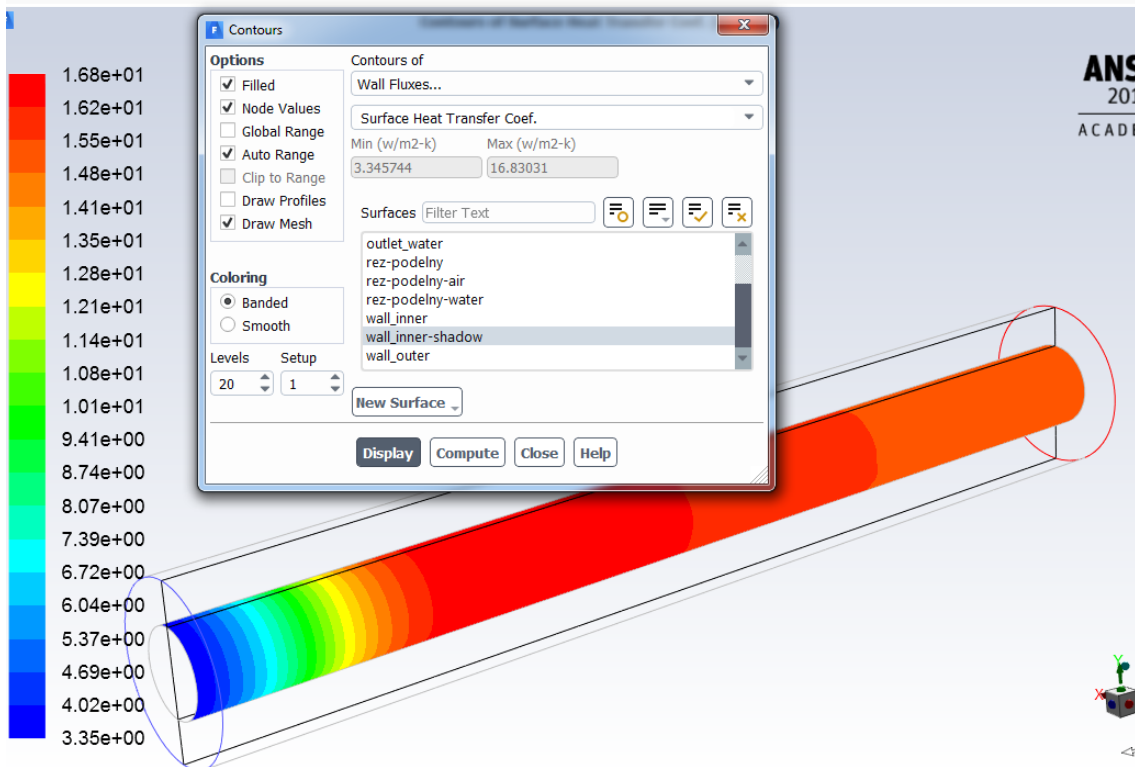
Reference Values	
Area (m2)	1
Density (kg/m3)	1.225
Enthalpy (j/kg)	0
Length (m)	0.02
Pressure (pascal)	0
Temperature (k)	300
Velocity (m/s)	3
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

obr. 6.43 – Referenčních hodnoty pro stěnu **wall inner-shadow**



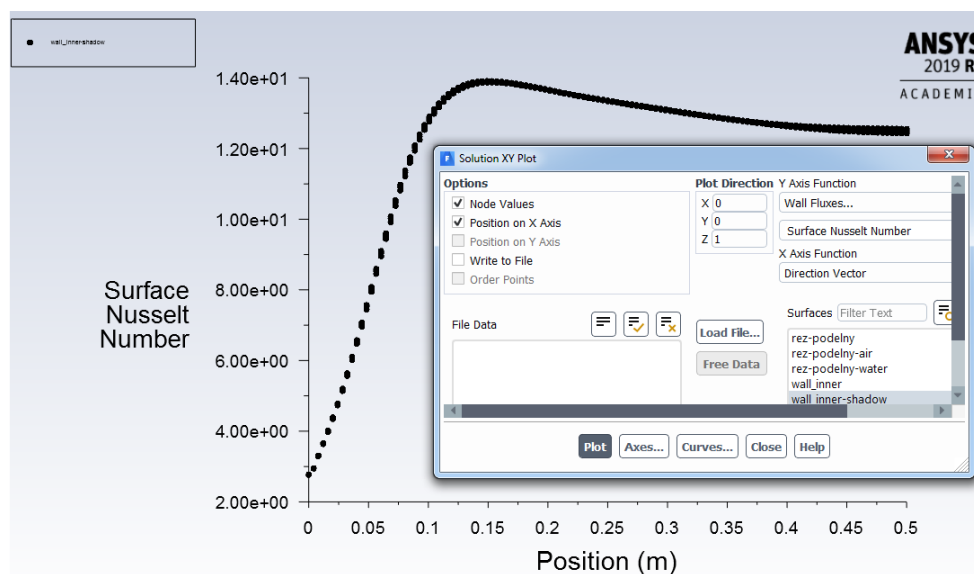
obr. 6.44 – Součinitel přestupu tepla do vzduchu pro rozhraní (**wall inner-shadow**) [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

Vyhodnocení součinitele přestupu tepla pomocí vyplněných kontur „Results/Graphics/Contours“ je na obr. 6.45.



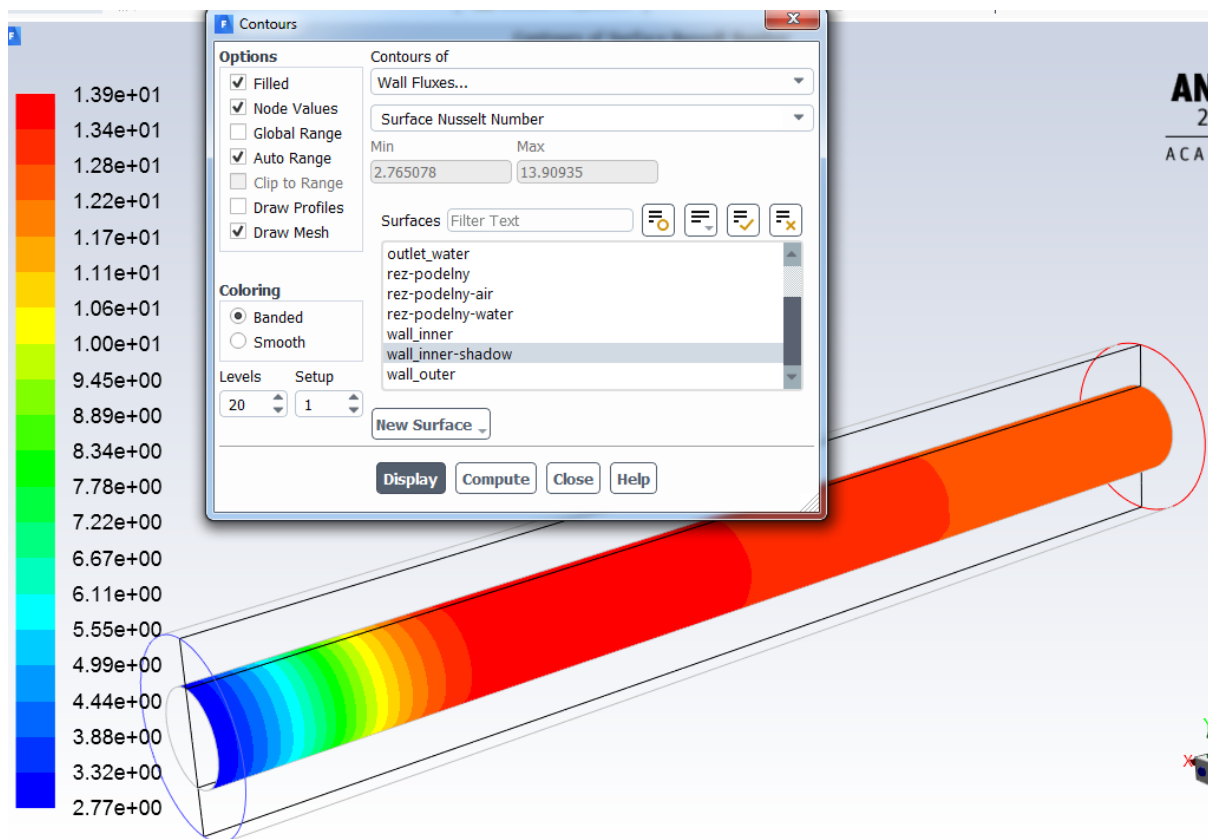
obr. 6.45 – Součinitel přestupu tepla do vzduchu pro rozhraní (*wall inner-shadow*) [ $W.m^{-2}.K^{-1}$ ]

Podobně vyhodnotíme **Nusseltovo číslo** na stěně rozhraní vzduch stěna (*wall inner-shadow*). Prověřte referenční hodnoty příkazem „Results/Report/Reference Values“ (Temperature -  $T_{ref}=300$  K a Length -  $d_h=0.02$  m). Následně vykreslete Nusseltovo číslo příkazem „Results/Plots/XY Plot/Solution XY Plot“, viz obr. 6.46.



obr. 6.46 – Nusseltovo číslo vyhodnocené na stěně rozhraní (*wall inner-shadow*)

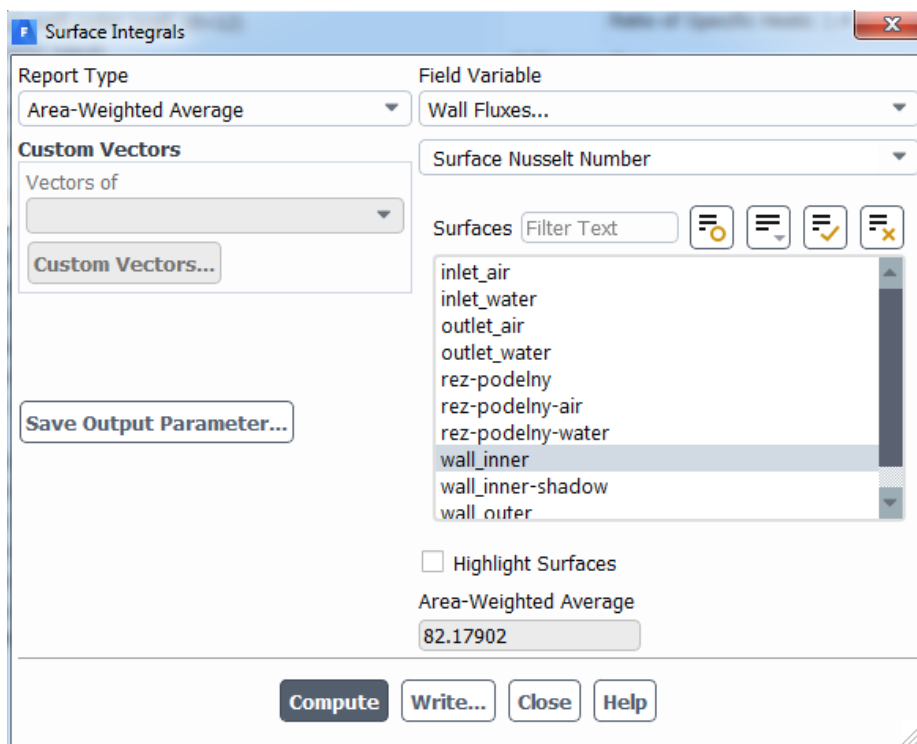
Analogicky lze Nusseltovo číslo vyhodnotit pomocí vyplněných kontur „Results/Graphics/Contours“ (obr. 6.47).



obr. 6.47 – Nusseltovo číslo vyhodnocené na stěně rozhraní (**wall inner-shadow**)

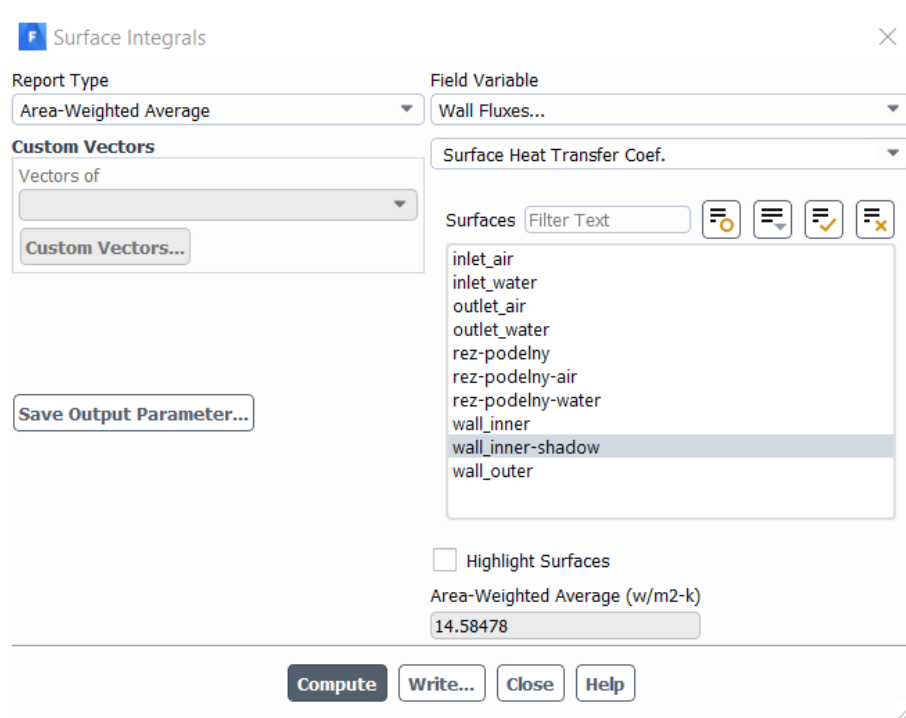
### Vyhodnocení průměrných hodnot

Průměrnou hodnotu **Nusseltova čísla** na stěně rozhraní (**wall inner**) pro oblast proudění vody (**water**) vyhodnotíte pomocí příkazu „Results/Report/Surface Integral“. Nejdříve definujte referenční hodnoty dle obr. 6.38. V nabídce „Report Type“ vyberte „Area-Weighted Average“. Dále v nabídce „Field Variable“ vyberte „Wall Fluxes-Surface Nusselt Number“ a v položce „Surface“ vyberte „wall inner“ (obr. 6.48). Výslednou hodnotu zapište do Tab. 6.5.



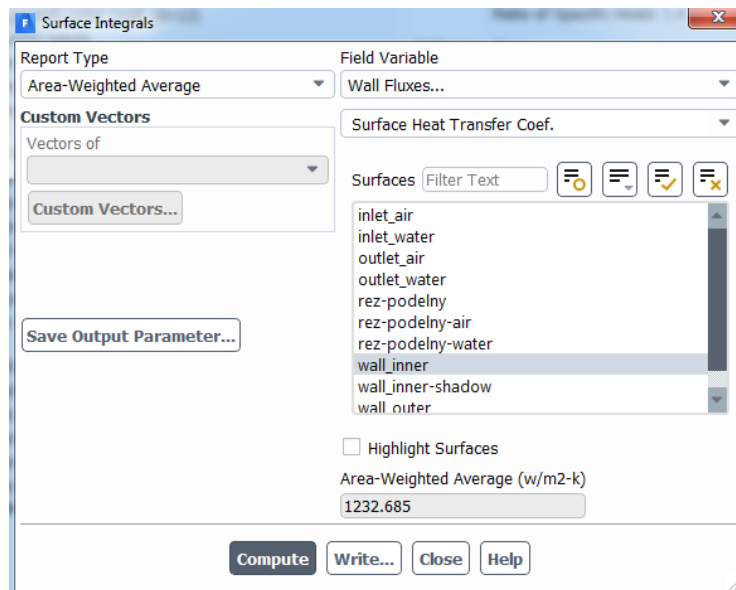
obr. 6.48 – Vyhodnocení průměrné hodnoty **Nusseltova čísla** na stěně rozhraní (**wall inner**) pro oblast proudění vody (**water**)

Obdobným způsobem postupujte v případě vyhodnocení průměrné hodnoty **Nusseltova čísla** na stěně rozhraní (**wall inner-shadow**) pro oblast proudění vzduchu (**air**), viz obr. 6.49. Referenční hodnoty definujte dle obr. 6.43.



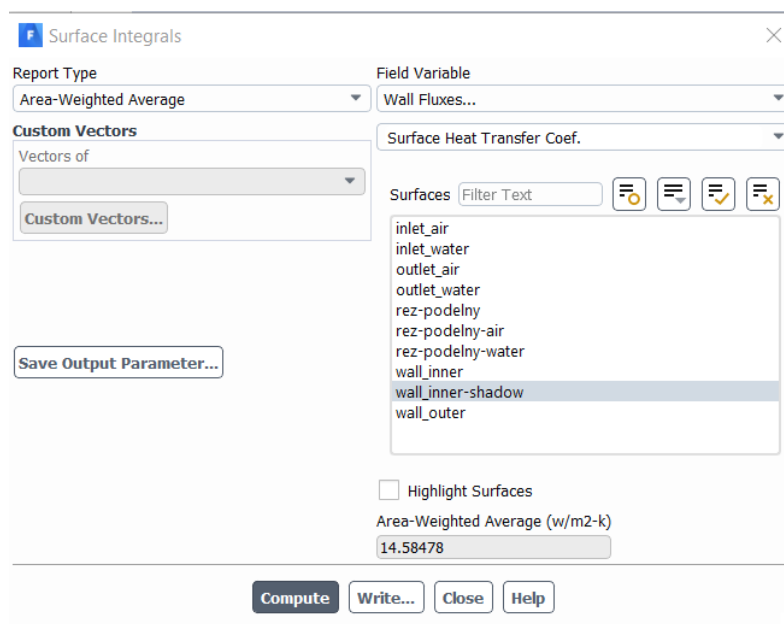
obr. 6.49 – Vyhodnocení průměrné hodnoty **Nusseltova čísla** na stěně rozhraní (**wall inner-shadow**) pro oblast proudění vzduchu (**air**)

Stejným způsobem vyhodnoťte průměrnou hodnotu součinitele přestupu tepla  $\alpha$  („**Surface heat transfer coefficient**“) na stěně rozhraní (**wall inner**) pro oblast proudění vody (**water**) příkazem „**Postprocessing/Report/Surface Integral**“ (obr. 6.50).



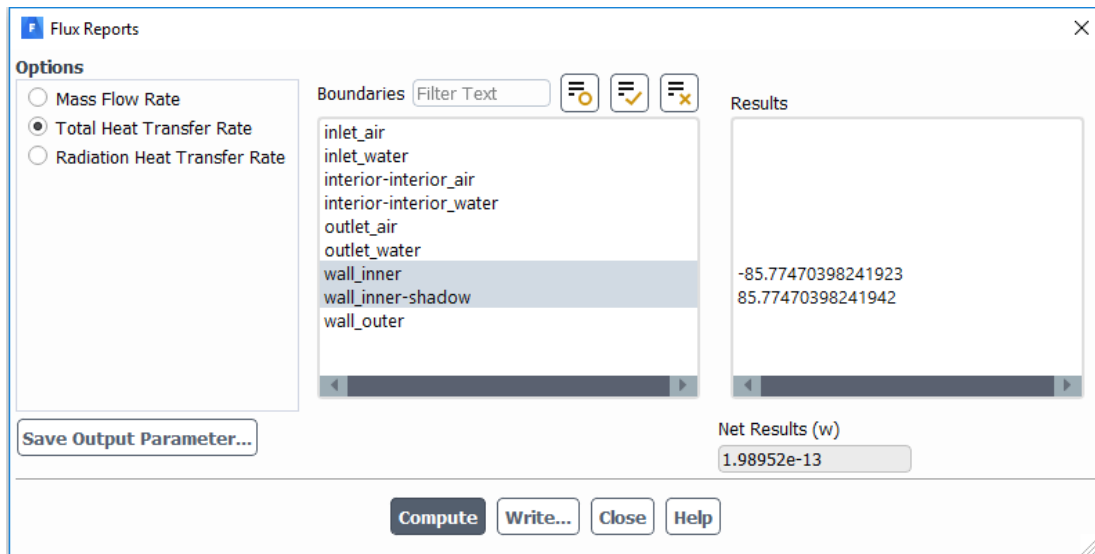
obr. 6.50 – Vyhodnocení průměrné hodnoty **součinitele přestupu tepla  $\alpha$**  na stěně rozhraní (**wall inner**) pro oblast proudění vody (**water**)

Obdobným způsobem postupujte v případě vyhodnocení průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla  $\alpha$  na stěně rozhraní (**wall inner-shadow**) pro oblast proudění vzduchu (**air**), viz obr. 6.51. Referenční hodnoty definujte dle obr. 6.43.



obr. 6.51 – Vyhodnocení průměrné hodnoty **součinitele přestupu tepla  $\alpha$**  na stěně rozhraní (**wall inner-shadow**) pro oblast proudění vzduchu (**air**)

**Tepelný výkon  $P$**  vyhodnotíte příkazem „**Results/Report/Fluxes**“ v **Options** zvolte **Total Heat Transfer Rate**“ a v nabídce **Boundaries** označte **wall inner** a **wall inner-shadow**, viz obr. 6.52.



obr. 6.52 – Vyhodnocení tepelného toku  $P$  [W]

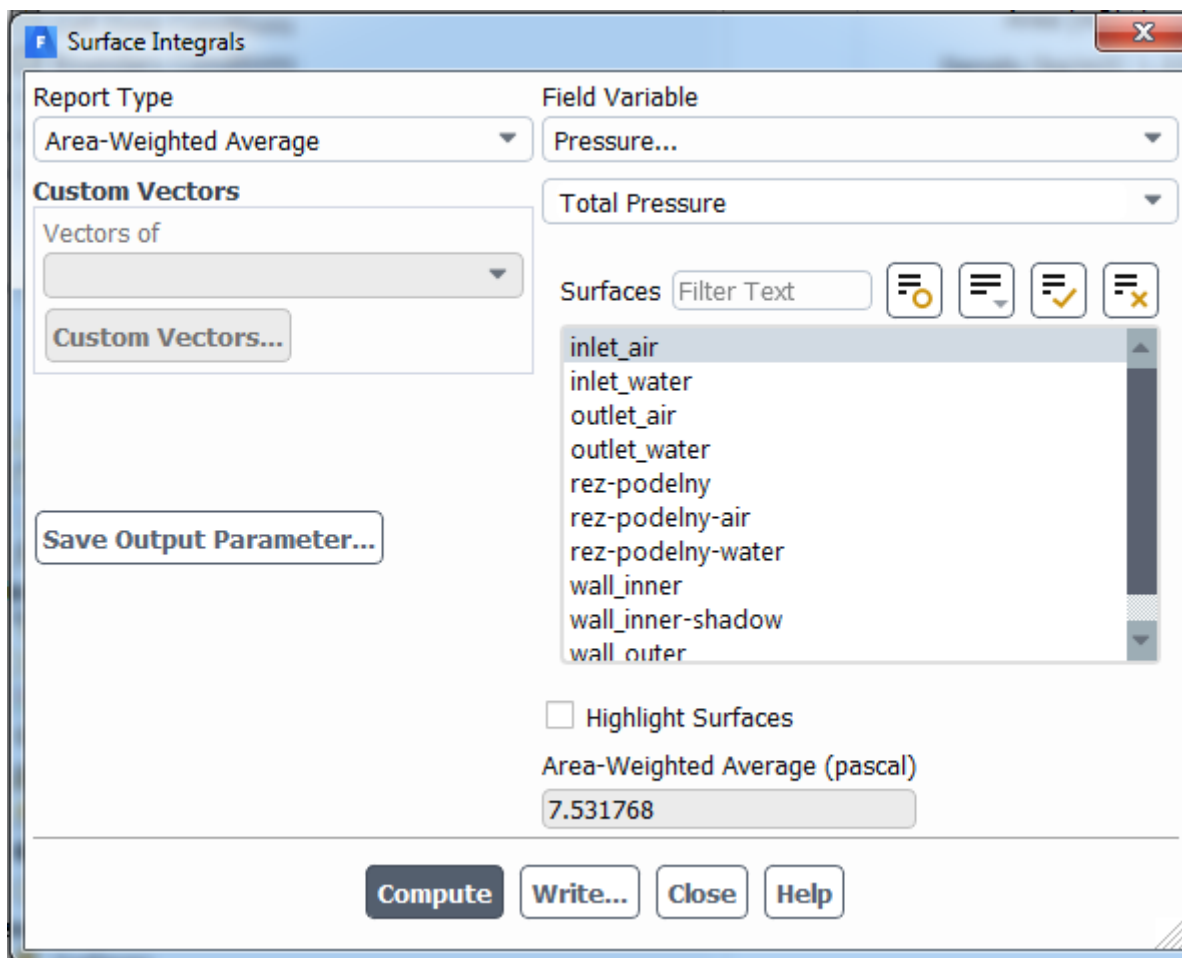
**Ztrátový součinitel  $\zeta$**  určete na základě příslušných tlaků definovaných v rovnici uvedené níže.

$$\zeta = \frac{P_{1tot} - P_{2tot}}{P_{2dyn}} \quad (6.9)$$

Vyhodnocení tlaků proveďte pomocí příkazu „**Results/Report/Surface Integrals**“ vždy na vstupu (**inlet**) a výstupu (**outlet**) proudící vody (**water**) a vzduchu (**air**). Ukázka vyhodnocení  $p_{1tot}$  totálního tlaku na vstupu pro vzduch (**inlet air**) je představena na obr. 6.53. Následně hodnotu zapište do

Tab. 6.5. Identicky postupujte u vyhodnocení zbylých hodnot tlaků ( $p_{2tot}$ ,  $p_{2dyn}$ ).





obr. 6.53 – Vyhodnocení  $p_{1tot}$  na vstupu pro vzduch (*inlet air*)

Výpočet ztrátového součinitele  $\zeta$  pro oblast proudění vzduchu:

$$\zeta = \frac{p_{1tot} - p_{2tot}}{p_{2dyn}} = \frac{9,16 - 5,8}{5,78} = 0,58 \quad (6.10)$$

Výpočet ztrátového součinitele  $\zeta$  pro oblast proudění vody:

$$\zeta = \frac{p_{1tot} - p_{2tot}}{p_{2dyn}} = \frac{71,48 - 47,08}{47,003} = 0,52 \quad (6.11)$$

Tab. 6.5 – Závěrečné srovnání průměrných výsledků

	Odhad pro vzduch	Odhad pro vodu	CFD řešení vzduch	CFD řešení voda	Jednotky
<b><i>u</i></b>	3	0.3	3	0.3	[m.s <sup>-1</sup> ]
<b>Re</b>	4108	11943	4108	11943	[1]
<b>Nu</b>	15,9	91,62	12.05	82,18	[1]
<b><i>α</i></b>	19,2	1374,3	14.58	1232,7	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
<b><i>P</i></b>			85,77	85,77	[W]
<b><i>p</i><sub>1tot</sub></b>			7,53	61,85	[Pa]
<b><i>p</i><sub>2tot</sub></b>			5,59	45,73	[Pa]
<b><i>p</i><sub>2dyn</sub></b>			5,59	45,67	[Pa]
<b><i>ζ</i></b>			0,35	0,35	[1]

***u*** rychlost

**Re** Reynoldsovo číslo

**Nu** Nusseltovo číslo

***α*** Součinitel přestupu tepla

***P*** Tepelný výkon

***p*<sub>1tot</sub>** totální tlak (**total pressure**) na vstupu (**inlet**)

***p*<sub>2tot</sub>** totální tlak (**total pressure**) na výstupu (**outlet**)

***p*<sub>2dyn</sub>** dynamický tlak (**dynamic pressure**) na výstupu (**outlet**)

***ζ*** ztrátový součinitel

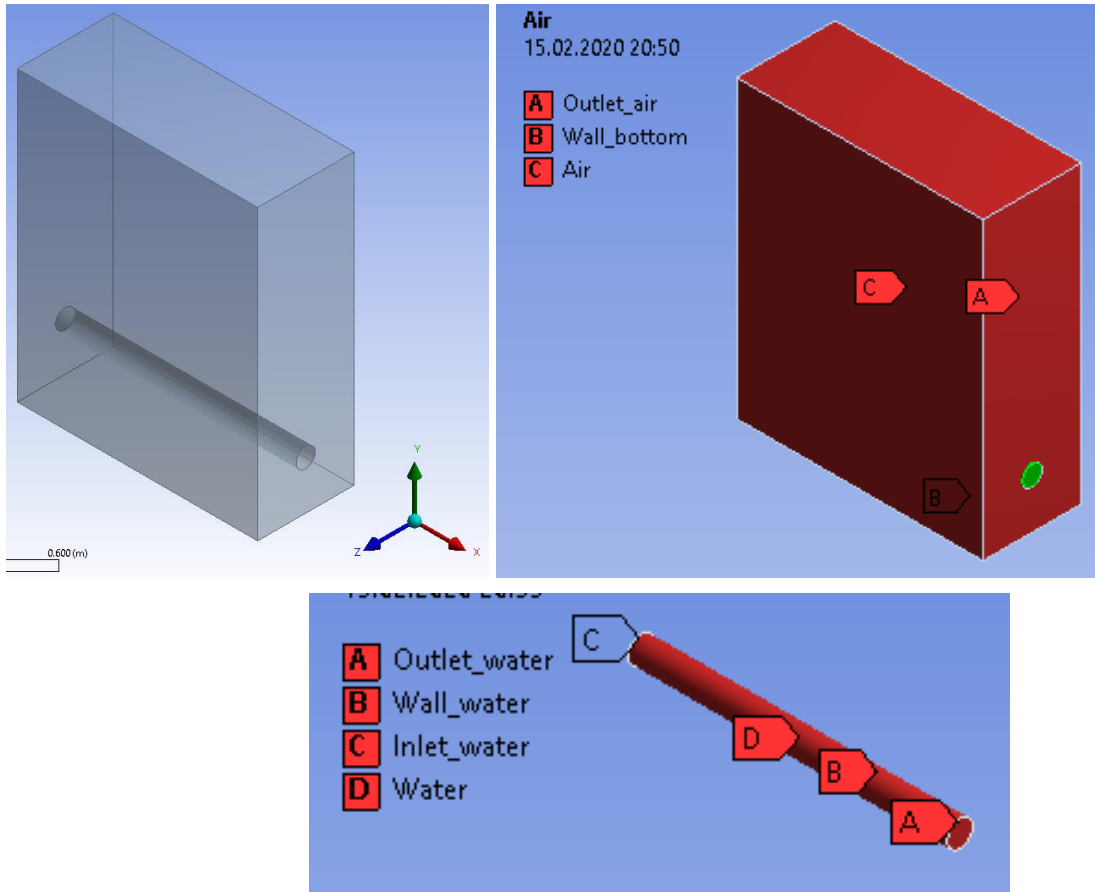
## Závěr

Odchytky v řešení jsou způsobené jak ze strany odhadu **Nusseltova čísla** analyticky, tak ze strany numerického řešení, kde je možno testovat vliv kvality sítě, modelů a fyzikálních vlastností. Zejména analytické vztahy odhadu **Nusseltova čísla** ne zcela odpovídají charakteristice dané úlohy souproudeho výměníku. Mají za účel poskytnout základní informaci o odhadu **Nusseltova čísla**. Hodnoty **Nusseltova čísla** získané z analytických vztahů a numerického výpočtu se shodují v řádu, což lze hodnotit jako uspokojivé.

Přesnost numerického výpočtu závisí na kvalitě výpočetní sítě, která může být dodatečně zhušťována. Je několik možných variant adaptace, např. lze v meshingu připravit jemnější síť a porovnat výsledky.

## 7 ŠÍŘENÍ TEPLA KONDUKČÍ A KONVEKČÍ V OVZDUŠÍ

Vytvořte matematický model teoreticky analogický souproudému výměníku s tím rozdílem, že místo vnější trubky bude definováno okolí vzduchu. Proveďte trojrozměrnou (3D) numerickou simulaci. Tekutiny jsou v kombinaci voda-vzduch. Model je patrný z obr. 6.1. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek a výsledky graficky zhodnoťte.



obr. 7.1 – Geometrie a okrajové podmínky.

Tab. 7.1 – Rozměry oblastí

<b>Délka trubky H1</b>	0.5	m
<b>Průměr trubky D1</b>	0.04	m
<b>Kvádr pomocí dvou bodů na diagonále</b>	(0.0 -0.1 -0.1)	m
	(0.5 0.5 0.1)	

Trubkou proudí uprostřed kapalina – voda (**water**), stěna je tvořena ocelovou trubkou o daném průměru. Dále uvažujte s tloušťkou stěny (**wall water**) 003m. Materiál stěny uvažujte ocel.

Okolí je vzduch (**air**) ohraničený atmosférickým tlakem, tedy podmínkou pressure outlet. Dolní stěna (outlet bottom) je izolovaná stěna.

Tab. 7.2 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, voda, vzduch) při 300 K

Materiál	Ocel	Voda	Vzduch	
hustota $\rho$	8030	998.2	1.225	[kg.m <sup>-3</sup> ]
měrná tepelná kapacita $c_p$	502.48	4182	1006.43	[J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
tepelná vodivost $\lambda$	16.27	0.6	0.0242	[W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
viskozita $\eta$		0.001003	0.000017894	[kg.m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]

Tab. 7.3 – Okrajové podmínky

	Inlet water	Outlet water	Wall water	Outlet air	Wall bottom	
teplota $T$	363.15		coupled		q=0	[K]
rychlost $u$	0.3					[m.s <sup>-1</sup> ]
tlak $p$		0		0		[Pa]
intenzita turbulence $I$	1	1		1		[%]
hydraulický průměr $d_h$	0.04	0.04		0.5		[m]

## 7.1 Matematický model a teoreticko-empirický odhad úlohy

V této úloze dochází k turbulentnímu proudění, je tedy použit matematický model RNG  $k-\varepsilon$ . Kritériem turbulence je tzv. Reynoldsovo číslo. Vzduch tměř neproudí, např. rychlost je 0.001 m/s.

**Re pro proudění vody:**

$$Re_{voda} = \frac{v \cdot d_h}{\nu} = \frac{0.3 \cdot 0.04}{1.01e-06} = 12000 \quad (7.1)$$

Výpočet Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla vychází z empirických vztahů, které jsou detailně popsány v literatuře [2]. V následujícím kroku, je proveden pouze analytický výpočet, který bude porovnán s numerickým výpočtem. Ze zadaných parametrů lze spočítat výše uvedené parametry proudění a přestupu tepla (Reynoldsovo číslo je počítáno z maximální rychlosti). Odhad Nusseltova čísla je problematický a je opravdu jen orientační. Na tento odhad navazuje výpočet součinitele prostupu tepla stěnou určeného z Nusseltova čísla vztahem  $\tilde{\alpha} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}$  [2].

### Výpočet Nusseltova čísla pro oblast proudění vody v trubce:

$$Pr = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \nu}{\lambda} = \frac{998.2 \cdot 4182 \cdot 1.01e-6}{0.6} = 6.99 \quad (7.2)$$

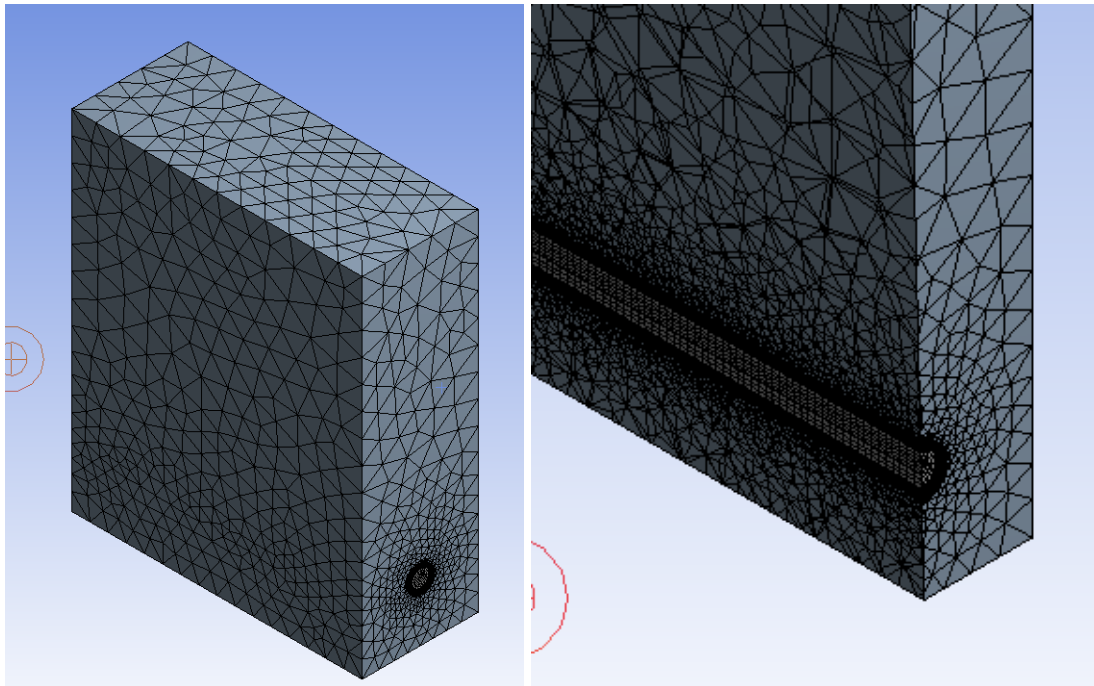
$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3}$$
$$Nu = 0.023 \cdot 12000^{0,8} \cdot 6.99^{0,3} = 75.5 \quad (7.3)$$

Pak součinitel přestupu tepla je

$$\alpha = \frac{Nu}{d_h} \cdot \lambda = \frac{75.5}{0.04} \cdot 0.6 = 1132.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7.4)$$

## 7.2 Tvorba geometrie a sítě.

Geometrie je dána dvěma entitami, tj. válcem a kvádrem, použitím Boolovského odečítání se vytvoří oblast vody a oblast vzduchu. Metodika tvorby sítě je shodná s metodikou popsanou v kap. 6, tj. metoda inflation a sweep na trubku a metoda inflation pro objem vzduchu. Síť má následující tvar.

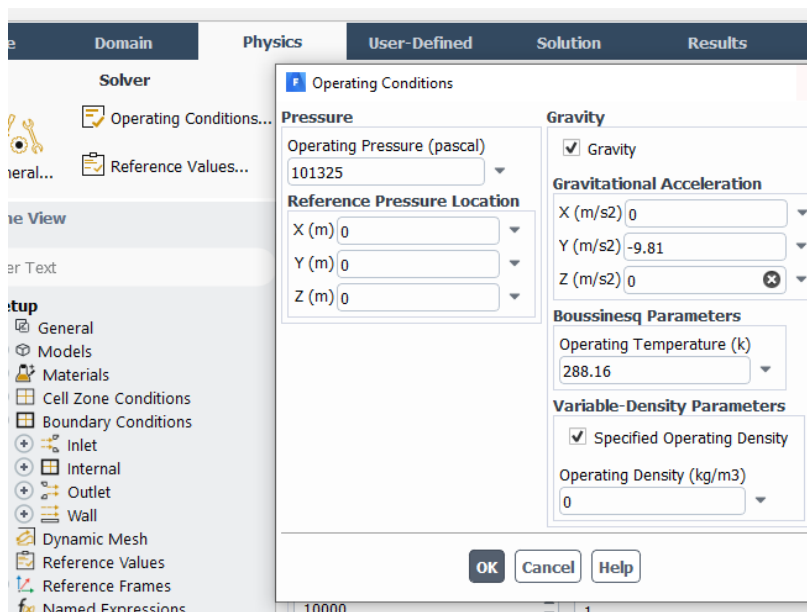


obr. 7.2 – Povrchová síť a detail s inflation.

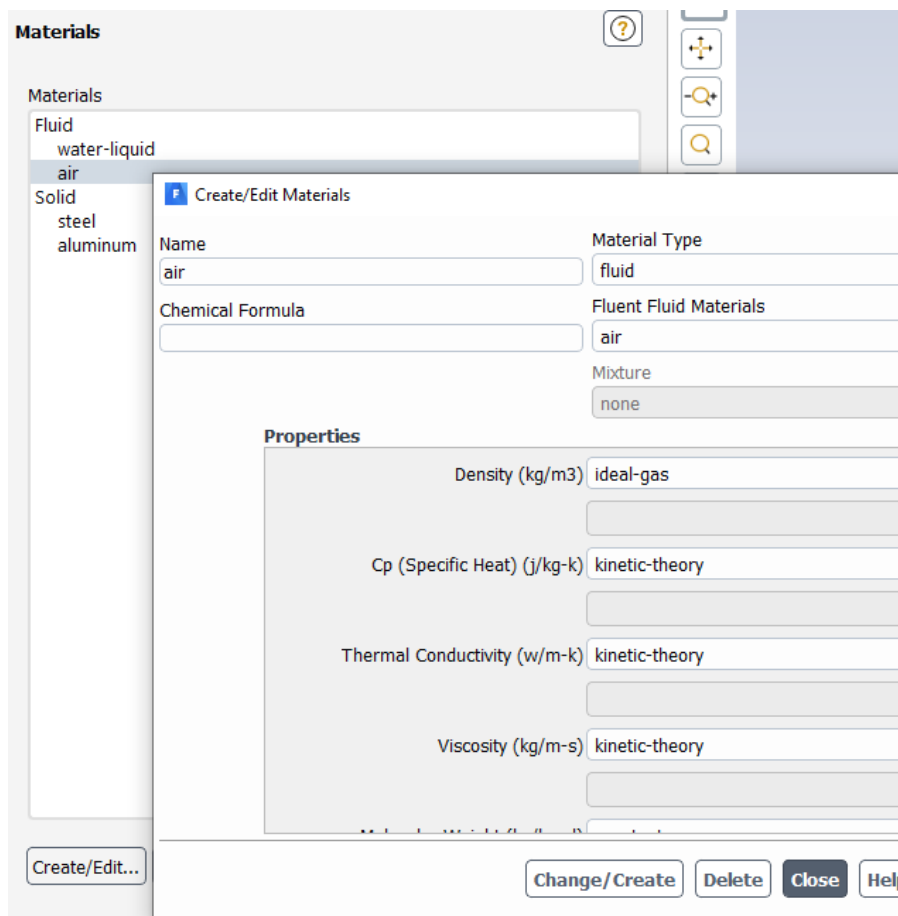
## 7.3 Výpočet problému s gravitací.

Úpravy při řešení šíření tepla v okolí budou ve Fluentu provedeny následovně:

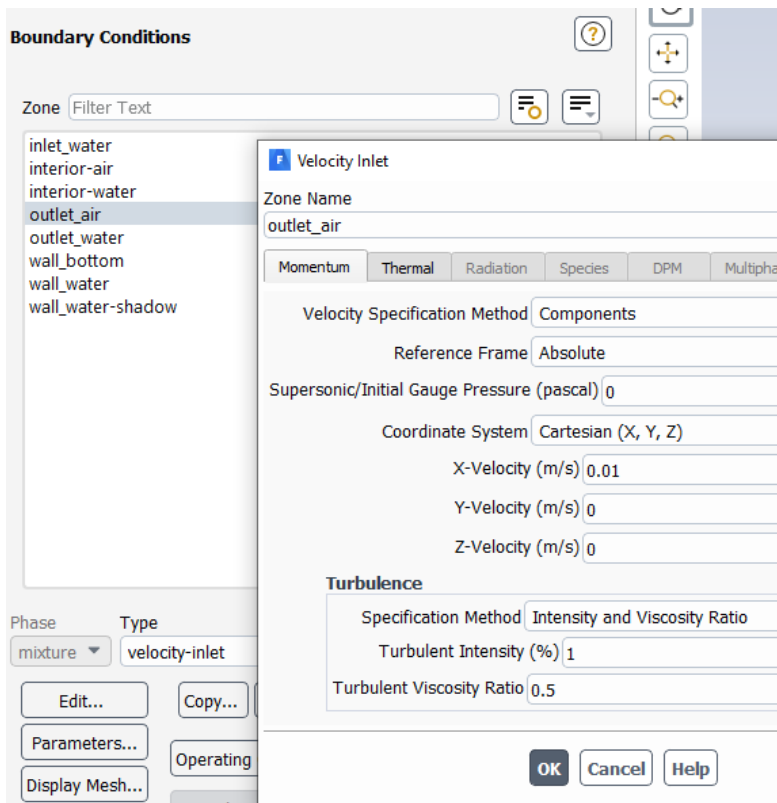
Teplo šířící se prouděním vzduchu do okolí je významně ovlivňováno gravitací. Zadává se např. v menu „**Physics/Operating Conditions/Gravity**“ a hustota se upřesní v „**Physics/Operating Conditions/Operating Density**“, jejíž hodnota je 0. Pak lze pozorovat stratifikaci tlaku ve výsledku.



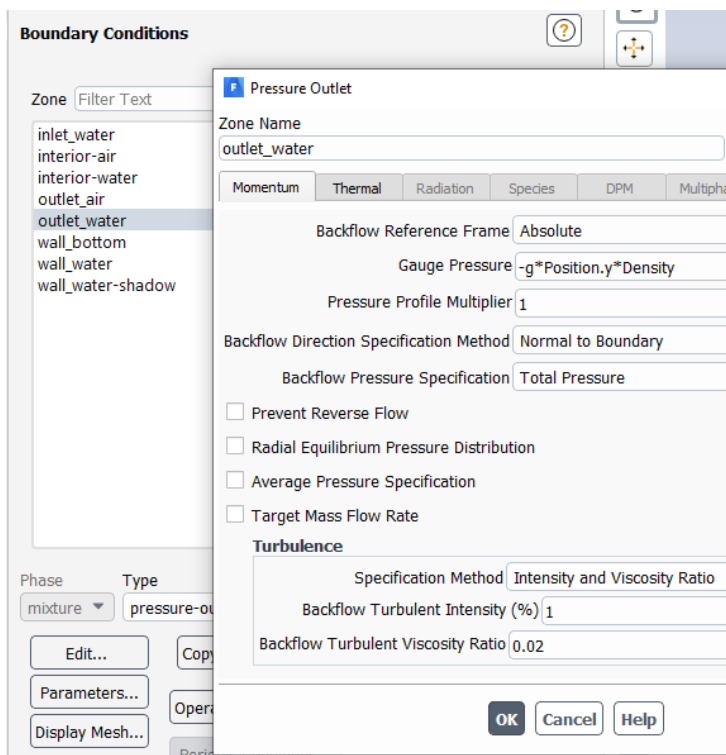
Fyzikální vlastnosti vzduchu budou závislé na teplotě případně na tlaku, tedy hustota je dána stavovou rovnicí a další fyzikální vlastnosti tzv. kinetickou teorií.



Příliš „volná“ okrajová podmínka atmosférického tlaku způsobuje výrazné zpětné proudění a pak divergenci. Proto je výhodné použít rychlostní podmínku s velmi malou hodnotou, např. 0.001 m/s.



Při zadání gravitačního zrychlení se generuje automaticky hydrostatický tlak v oblasti vzduchu i trubky. Proto tlaková podmínka na výstupu vody z trubky bude nahrazena hydrostatickým tlakem.

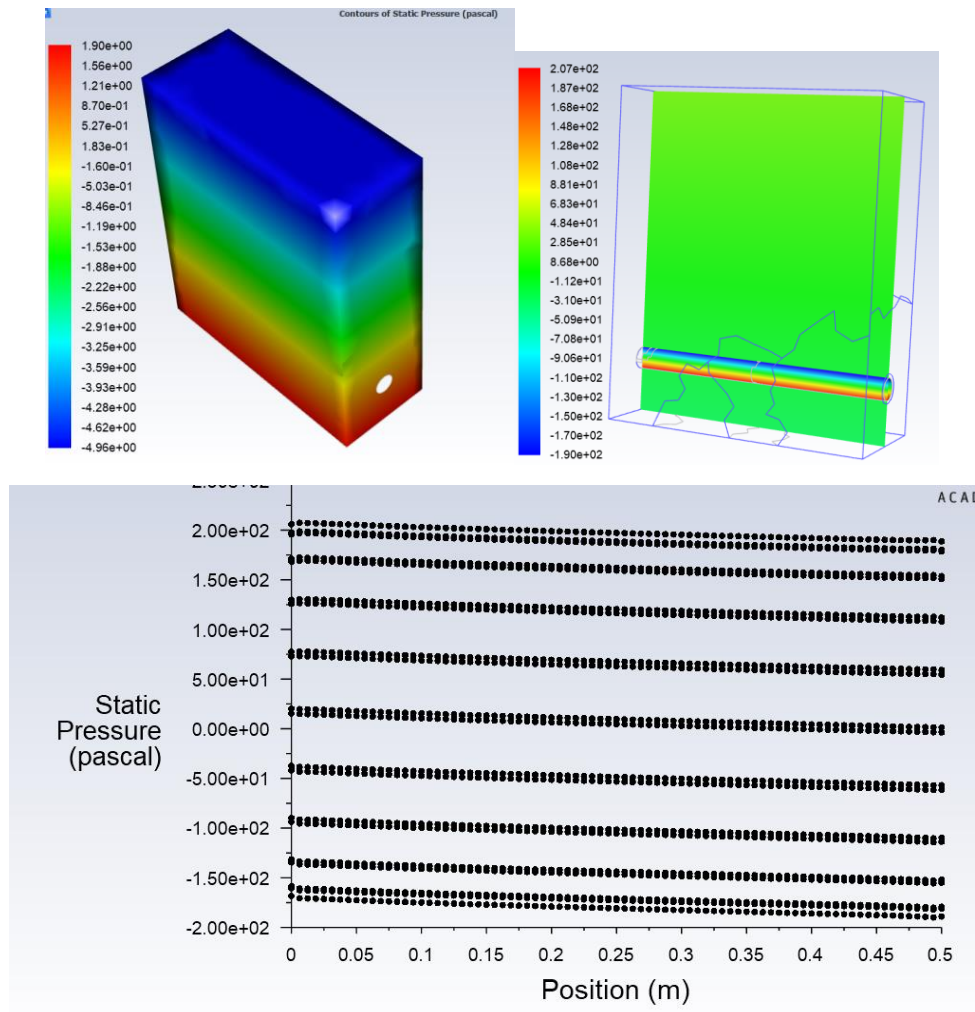


Pak úloha dobře konvergovat a výsledky budou reálné.

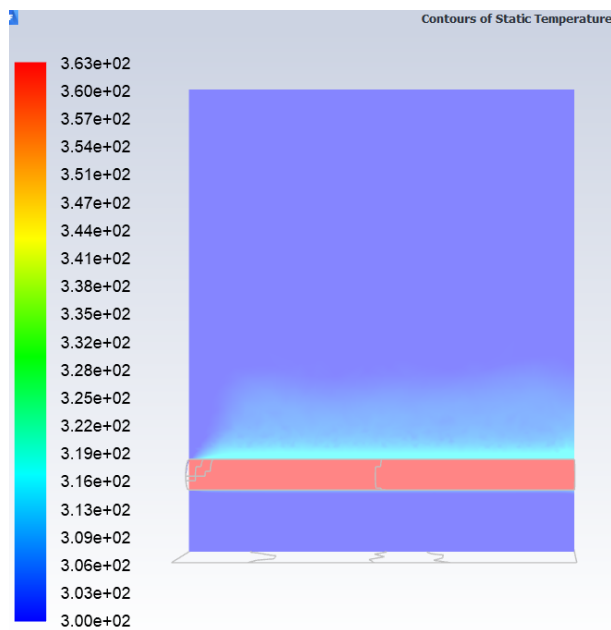


## 7.4 Výsledky

Inicializace je realizována především reálnými hodnotami teploty (300 K). Pro oblast vody se použije PATCH s teplotou 363 K. Na dalších obázcích jsou uvedeny příklady vyhodnocení.



obr. 7.3 – Kontury hydrostatického tlaku na hranici vzduchu a trubce a tlakový spád v trubce (PLOT XY).



*obr. 7.4 – Rozložení teploty v osovém řezu oblastí s ohřevem vzduchu nad trubicou.*