



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní



MODELOVÁNÍ PŘESTUPU TEPLA VE VÝMĚNÍCÍCH - SBÍRKA PŘÍKLADŮ

Studijní opora

Jaroslav Krutil

Milada Kozubková

Ostrava 2011



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/09.0147 „Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu“.

Recenze: doc. Ing. Sylva Drábková, PhD.

Název: Modelování přestupu tepla ve výměnících - Sbírká příkladů

Autoři: Ing. Jaroslav Krutil, prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.

Vydání: první, 2011

Počet stran: 55

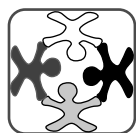
Náklad:

Studijní materiály pro studijní program Strojní inženýrství, obor Energetické stroje a zařízení
Fakulty strojní a vybrané obory Fakulty strojní

Jazyková korektura: nebyla provedena.



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.



Název: Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu

Číslo: CZ.1.07/2.3.00/09.0147

Realizace: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

© Jaroslav Krutil, Milada Kozubková

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2712-4

POKYNY KE STUDIU

Modelování přestupu tepla ve výměnících - Sbírká příkladů

Pro předměty z oboru Energetické stroje a zařízení jste obdrželi studijní balík obsahující přístup do e-learningového portálu obsahujícího studijní oporu.

Prerekvizity

Pro studium této opory se předpokládá znalost na úrovni absolventa předmětů Mechanika tekutin, Termomechanika, Matematika, Fyzika.

Cílem učební opory

Cílem je stručné seznámení studenta se 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 srovnání 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 porovnat numerický výpočet s analytickým řešením.

Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do magisterského studia oboru Energetické stroje a zařízení, studijní zaměření Jaderná energetika studijního programu N2301 Strojní inženýrství, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity. Skriptum se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



Čas ke studiu: xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden čas potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

✚ Popsat ...

✚ Definovat ...

✚ Vyřešit ...

Okamžitě potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



Výklad

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.



Shrnutí pojmů

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



Otázky

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



Úlohy k řešení

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavním významem schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti pro řešení reálných situací.

Úspěšné a příjemné studium s tímto učebním textem Vám přeji autoři.

Jaroslav Krutil, Milada Kozubková.

OBSAH

1	PŘENOS HMOTY, HYBNOSTI A TEPLA	8
2	TEPELNÉ VÝMĚNÍKY	11
2.1	Tepelný výkon.....	12
2.2	Tlaková ztráta.....	14
2.3	Bezrozměrná kritéria	16
3	ŘEŠENÍ VZOROVÉHO PŘÍKLADU – SOUPROUDÝ VÝMĚNÍK.....	20
3.1	Matematický model a teoreticko-empirický odhad úlohy	21
3.2	Systémové prostředí ANSYS Workbench.....	22
3.3	Tvorba geometrie	23
3.4	Tvorba sítě	24
3.5	ANSYS FLUENT.....	25
3.6	Výsledky k porovnání	28
4	SEZNAM PŘÍKLADŮ URČENÝCH K SAMOSTATNÉMU ŘEŠENÍ	33
4.1	Řešení přestupu tepla článkovým radiátorem.....	33
4.2	Řešení přestupu tepla deskovým radiátorem	35
4.3	Řešení přestupu tepla deskovým výměníkem	37
4.4	Řešení přestupu tepla v ERG chladiči.....	39
4.5	Řešení přestupu tepla u souproudého výměníku typ voda - voda	41
4.6	Řešení přestupu tepla u souproudého výměníku typ vzduch - voda	43
4.7	Řešení přestupu tepla svazkem trubek s uspořádáním do kříže	45
4.8	Řešení přestupu tepla svazkem trubek - uspořádání za sebou	47
4.9	Řešení přestupu tepla voštinovým výměníkem	49
4.10	Řešení přestupu tepla u protiproudého výměníku typ voda - voda	51
4.11	Řešení přestupu tepla u protiproudého výměníku typ vzduch - voda	53

1 PŘENOS HMOTY, HYBNOSTI A TEPLA



Čas ke studiu: ½ hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Popsat rovnice definující přenos obecně.
- ✚ Specifikovat metody řešení přenosu hmoty, tepla a hybnosti.
- ✚ Vysvětlit podstatu numerických metod ve vztahu k uživateli.



Výklad

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:

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

akumulace + **konvekce** = **difúze** + **zdroj**

kde ζ 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 konvečně - difúzní rovnice.

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

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

akumulace + **konvekce** = **difúze** + **zdroj**

Pokud ζ představuje teplotu, příměs nebo jinou skalární veličinu, pak se jedná o lineární rovnici druhého řádu, pokud ζ 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 ζ . Analytické řešení takových systémů je možné pouze ve výrazně zjednodušených aplikacích. Proto je v současné době kladen důraz na numerické řešení 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, Fidap, Flow 3D, Rampant, Fluidyn-Panache, 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 programování 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.



Shrnutí pojmů 1.1.

Rovnice pro popis přenosu hmoty, hybnosti a tepla, rozsah úloh pro řešení numerickými metodami, CFD programové systémy, metoda konečných objemů.



Otázky 1.1.

1. Jakými rovnicemi je popsán přenos hmoty, hybnosti, tepla?
2. Jaký je rozdíl mezi počátečními a okrajovými podmínkami?
3. K čemu slouží numerické metody v oblasti termomechaniky?
4. Jaké CFD programové systémy pro řešení přenosu existují?
5. Jaký je úkol uživatele při používání CFD programových systémů?

2 TEPELNÉ VÝMĚNÍKY



Čas ke studiu: ½ hodiny



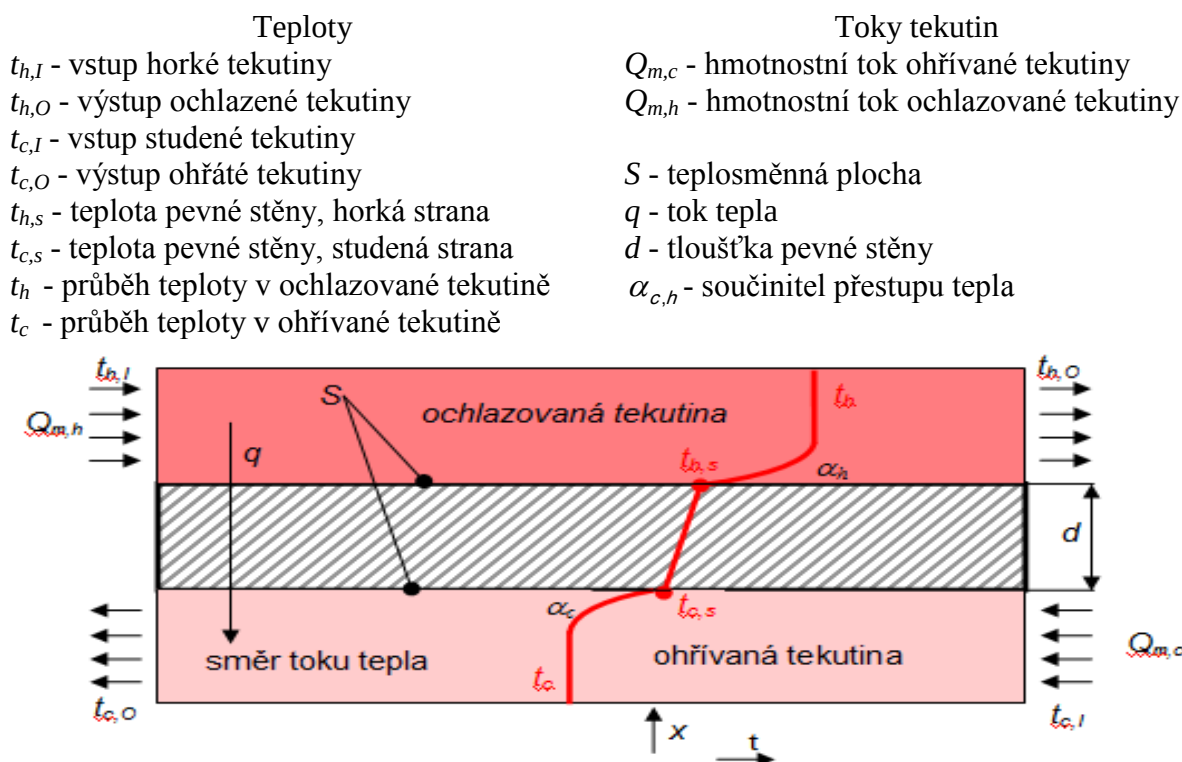
Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

✚ Popsat obecný princip výměníku.



Výklad

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.



Obrázek 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 dvoumédiové ohřívače 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 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 Obrázek 2.1.

2.1 Tepelný výkon



Čas ke studiu: 1/2 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Definovat tepelný výkon obecně.
- ✚ Aplikovat obecný předpis na tepelný výkon daný součinitelem prostupu tepla
- ✚ Řešit tepelný výkon na výměníku definovaném systémem trubek



Výklad

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 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 λ 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 [m^2], d je charakteristický rozměr [m]. V blízkosti stěny se však nachází jak 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

$$P = \alpha_c (t_{c,s} - t_c) S$$

$$P = \alpha_h (t_{h,s} - t_h) S \quad (2.2)$$

kde α_h je součinitel přestupu tepla na straně teplé tekutiny, α_c je součinitel přestupu tepla na straně chladné tekutiny, t_h je průběh teploty v ochlazované tekutině, t_c je průběh teploty v ohříváné 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 žeber, 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 ΔT_{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 ve svislé rovině, v je odhad rychlosti proudění. Tedy ΔT_{lm} je známo a tepelný výkon na jednotku délky trubky může být spočítán ze vztahu

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

2.2 Tlaková ztráta



Čas ke studiu: 1/2 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Určit tlakovou ztrátu při laminárním a turbulentním proudění výměníkem.
- ✚ Určit tlakovou ztrátu na výměníku při uspořádání trubek do kříže nebo za sebou.



Výklad

Výkon, který je nutné dodat tekutině, aby proudila výměníkem v daném množství, je možné určit pomocí tlakové ztráty z následujícího vztahu, viz [2]:

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

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

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

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 výměníků 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 je určovaná empiricky.

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

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

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

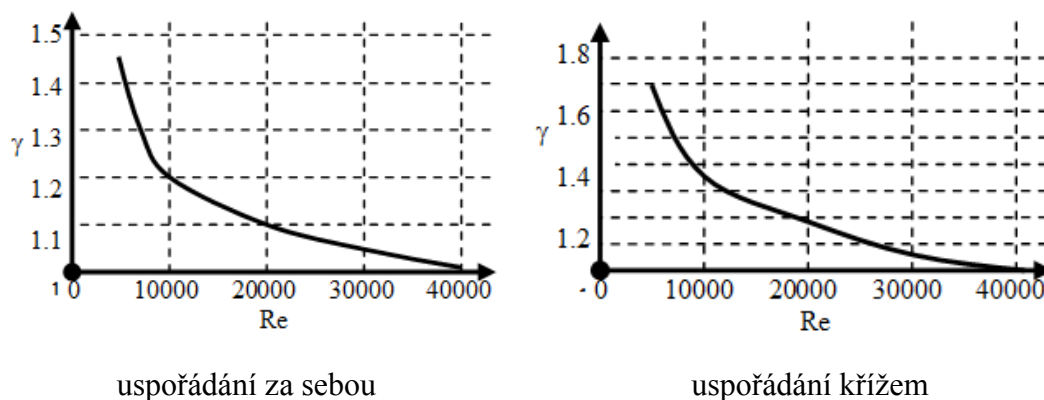
$$\text{kde } A = 0.028 \left(\frac{S_T}{2a} \right)^2 \quad a = \frac{S_T - d}{2} \quad B = \left(\frac{S_T}{2a} - 1 \right)^2$$

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 γ 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 [2].



Obrázek 2.2: Hodnoty součinitele γ v závislosti na Re čísle [2].

Jak je vidět, 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. Tím je také možno zpětně ztrátový součinitel určit, může být tedy výsledkem výpočtu. Další kapitola nastíní možnost řešení obtékání systému trubek s přestupem tepla pro jednoduchost ve 2D numerickou cestou.

2.3 Bezrozměrná kritéria



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Definovat proudění trubkou na základě Reynoldsova kritéria
- ✚ Definovat Nusseltovo číslo pomocí součinitele přestupu tepla.
- ✚ Specifikovat Nusseltovo číslo na základě dalších bezrozměrných kritériálních vztahů.
- ✚ Analyticky určit Nusseltovo číslo při proudění trubkou, při obtékání trubky a při obtékání systému trubek



Výklad

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 kritická hodnota charakterizuje proudění v přechodové oblasti mezi laminárním a turbulentním prouděním [3].

$$Re = \frac{u d_h}{\nu} \quad (2.11)$$

kde tzv. hydraulický průměr d_h reprezentuje při proudění v potrubí průměr trubky, při obtékání trubky také její průměr, ν 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.

$$Pr = \frac{\rho c_p \nu}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (2.12)$$

Pro vzduch je možno předpokládat jeho hodnotu konstantní 0.7.

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

$$Fo = \frac{\lambda \tau}{c_p \rho d_h^2} \quad (2.13)$$

τ je časová konstanta.

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

$$Nu = \frac{\alpha d_h}{\lambda} \quad (2.14)$$

Koeficient prostupu α tepla zahrnuje tepelnou vodivost λ 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.

$$Nu = \frac{P d_h}{S \Delta T \lambda} \quad (2.15)$$

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 α . Nusseltovo číslo je obecně funkcí dalších podobnostních kritérií

$$Nu = f(Re, Pr, Fo) \quad (2.16)$$

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

Pro **laminární proudění v trubce** se jeho hodnota dá určit ze vztahu

$$Nu = \sqrt[3]{49,03 + 4,17 Re Pr \frac{d}{l}} \quad (2.17)$$

Pro **turbulentní proudění v trubce** platí:

$$Nu = 0,21 Re^{0,8} Pr^{0,43} \quad (2.18)$$

Přesněji je možné hodnotu Nu určit ze vztahu

$$\text{Nu} = \frac{\frac{f}{2}(\text{Re} - 1000)\text{Pr}}{1 + 12,7\sqrt{\frac{f}{2}}(\text{Pr}^{2/3} - 1)}, \quad f = A + B\text{Re}^{-1/m} \quad (2.19)$$

Tab. 2.1 Koeficienty A, B pro výpočet Nu pro turbulentní proudění

Re	A	B	m
$2100 \leq \text{Re} \leq 4000$	0.00540	$2.3 \cdot 10^{-8}$	-1.3333
$4000 \leq \text{Re} \leq 1 \cdot 10^7$	0.00128	0.1143	3.2154

Při **obtékání trubky** je Nusseltovo číslo dáno:

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0,5 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,38} & 5 \leq \text{Re} < 1 \cdot 10^3 \\ \text{Nu} &= 0,25 \text{Re}^{0,6} \text{Pr}^{0,38} & 1 \cdot 10^3 \leq \text{Re} < 2 \cdot 10^5 \\ \text{Nu} &= 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,37} & 3 \cdot 10^5 \leq \text{Re} < 2 \cdot 10^6 \end{aligned} \quad (2.20)$$

V případě **obtékání systému trubek** je Nusseltovo číslo závislé na počtu řad. Při větším počtu řad (N_L je větší než 10) je možné definovat průměrný koeficient:

$$\text{Nu}_D = C_1 \text{Re}_{D,\max}^m \quad \text{pro } N_L > 10, 2000 \leq \text{Re}_{D,\max}^m \leq 40000, \text{Pr} = 0.7 \quad (2.21)$$

kde konstanty C_1 a m jsou určeny experimentálně, viz [3] a $\text{Re}_{D,\max} = \frac{\rho u_{\max} d}{\mu}$.

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.



Shrnutí pojmů 2.1.

Tepelný výkon výměníku, tlaková ztráta na výměníku, Reynoldsovo, Prandtlovo, Grashofovo, Fourierovo a Nusseltovo číslo.



Otázky 2.1.

6. Jak je obecně definován tepelný výkon?
7. Čím je ovlivněn výkon a tlaková ztráta výměníku?

8. Jak se určí Reynoldsovo a Nusseltovo číslo?
9. Jaká je hodnota Prandtlova čísla při proudění vzduchu?
10. Jak je určen součinitel přestupu tepla z Nusseltova čísla?
11. Jaký platí vztah pro určení tlakové ztráty při obtékání systému trubek?

3 ŘEŠENÍ VZOROVÉHO PŘÍKLADU – SOUPROUDÝ VÝMĚNÍK



Čas ke studiu: 2 hodiny



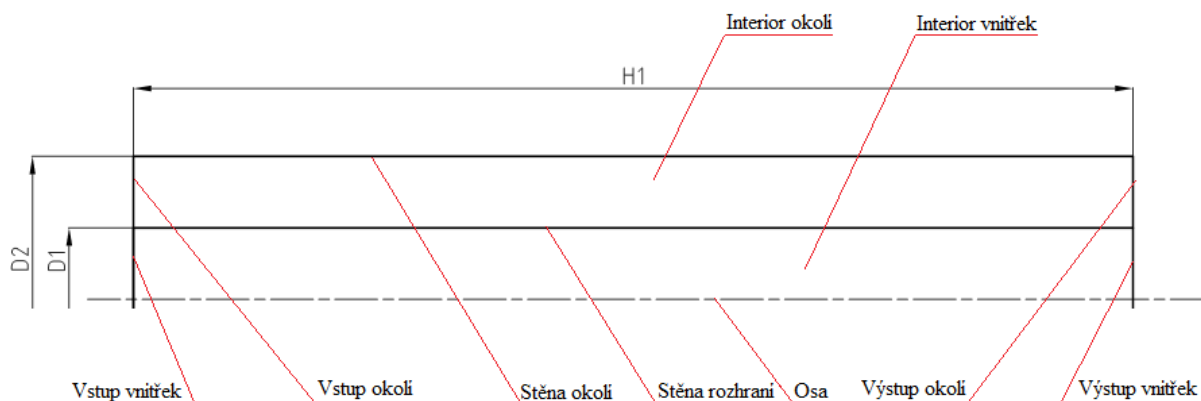
Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Specifikovat matematický model a okrajové podmínky.
- ✚ Vytvořit 2D geometrii součásti.
- ✚ Vytvořit jednoduchou síť.
- ✚ Nastavit jednoduchý numerický výpočet v programu ANSYS FLUENT 13.0.
- ✚ Vyhodnotit požadované parametry a proměnné.



Výklad

Vytvořte matematický model souproutého výměníku a proveďte zjednodušenou dvourozměrnou (2D) numerickou simulaci. Proudící tekutiny ve výměníku jsou v kombinaci voda-voda. Model souproutého výměníku je patrný z obrázku *Obrázek 3.1*. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek a výsledky graficky zhodnoťte.



Obrázek 3.1: Souproutý výměník ve 2D provedení.

Tab. 3.1 – Rozměry oblastí:

H1	0.5	m
D1	0.04	m
D2	0.08	m

V dané oblasti, která představuje souproutý chladič, proudí uprostřed kapalina - voda a v okolí proudí také voda. Stěny jsou tvořeny ocelovými trubkami o různém průměru. Kapalina se předpokládá jako nestlačitelná kapalina s konstantními fyzikálními vlastnostmi (při vyšších změnách teploty může být dána funkční závislostí). Pokud by proudící médium

byl obecně plyn (vzduch), může být uvažován jako stlačitelné médium s fyzikálními vlastnostmi závislými na teplotě, případně tlaku. Základní parametry plynů a kapalin lze najít a kopírovat z databáze Fluentu včetně Lennardových – Jonesových parametrů [2].

Tab. 3.2 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, voda) při 300 K:

Materiál	Ocel	Voda	
hustota ρ	8030	998	[kg.m ⁻³]
měrná tepelná kapacita c_p	502.48	4182	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
tepelná vodivost λ	16.27	0.6	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
viskozita η		0.001	[kg.m ⁻¹ s ⁻¹]

Okrajové podmínky jsou definovány na stěně okolí a stěně rozhraní. Na obou vstupech pro vodu je definován průtok a na výstupu tlak a turbulentní parametry. Vzhledem k velké rozměrnosti je úloha definována jako osově symetrická.

Tab. 3.3 – Okrajové podmínky:

	Vstup okolí	Vstup vnitřek	Výstup okolí	Výstup vnitřek	Stěna vnitřek	Stěna okolí	
teplota T	300	600				300	[K]
průtok Q	0.1	0.1					[kg.s ⁻¹]
tlak p			0	0			[Pa]
intenzita turbulence I	1	1	1	1			[%]
hydraulický průměr d_h	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04		[m]

3.1 Matematický model a teoreticko-empirický odhad úlohy

V této úloze dochází k turbulentnímu proudění, je tedy použit matematický model standard $k-\varepsilon$. Rozložení rychlosti, tlaku a teploty je řízeno výše uvedenými diferenciálními rovnicemi. Kritériem turbulence je tzv. Reynoldsovo číslo [2].:

$$\text{Re}_{\text{voda}} = \frac{v \cdot d_h}{\nu} = \frac{0,07961 \cdot 0,04}{1\text{E} - 06} = 3184,4 \quad (3.1)$$

$$Q = S \cdot v \cdot \rho \Rightarrow v = \frac{Q}{S} = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho} = \frac{0,1 \cdot 4}{\pi \cdot 0,04^2 \cdot 1000} = 0,07961 \text{ m.s}^{-1} \quad (3.2)$$

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 hodnot 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 $\tilde{\alpha} = \frac{Nu_D \lambda}{d}$ [2].

$$Nu_D = C_1 Re_{D,\max}^m = 0,25 \cdot 4800^{0,62} = 47,89 \quad (3.3)$$

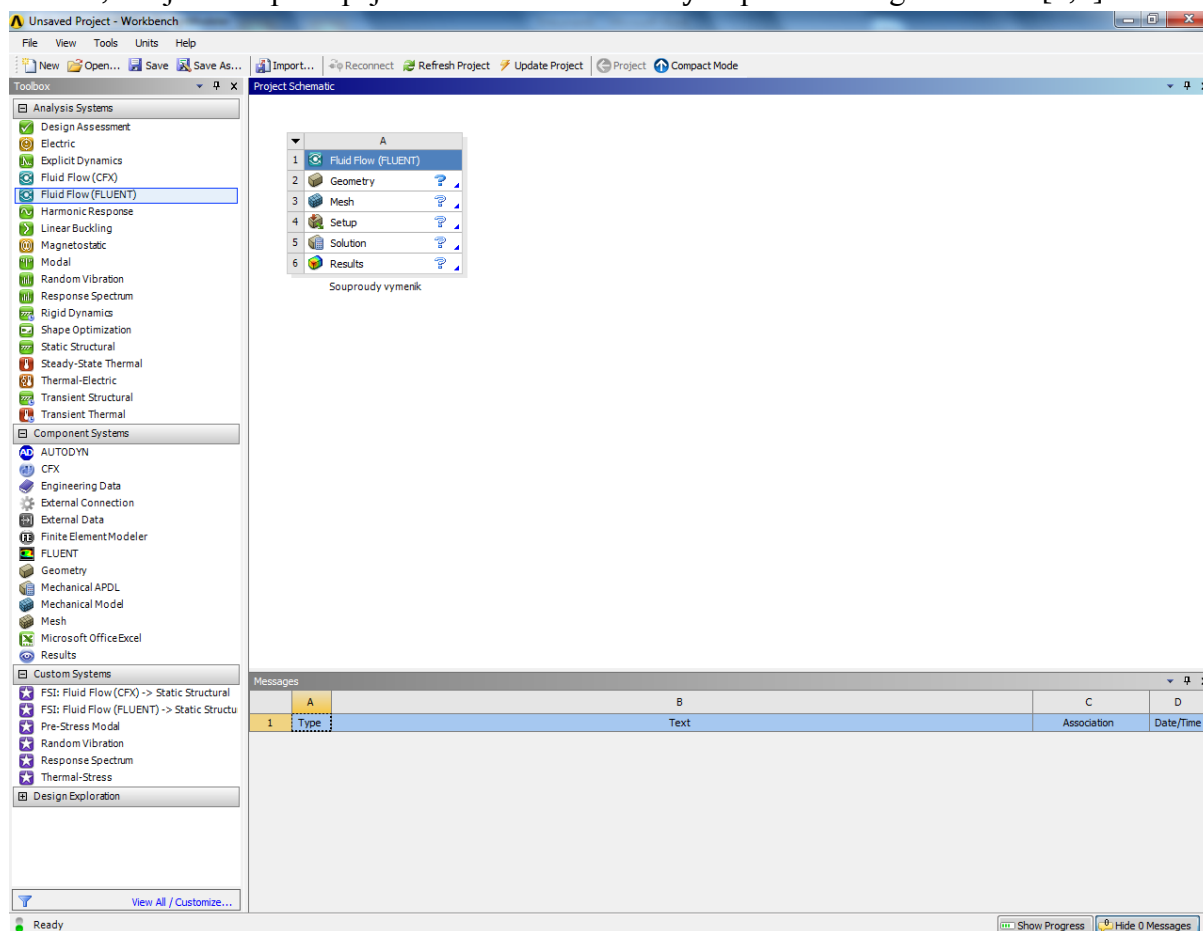
kde konstanty C_1 a m jsou určeny experimentálně, a jsou rovny $C_1 = 0,25$, $m = 0,62$

$$Re_{D,\max} = \frac{v_{\max} d}{\nu} = \frac{0,12 \cdot 0,04}{1E-06} = 4800 \quad (3.4)$$

$$\alpha = \frac{Nu_D}{d} \cdot \lambda = \frac{47,89}{0,04} \cdot 0,6 = 718,45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.5)$$

3.2 Systémové prostředí ANSYS Workbench

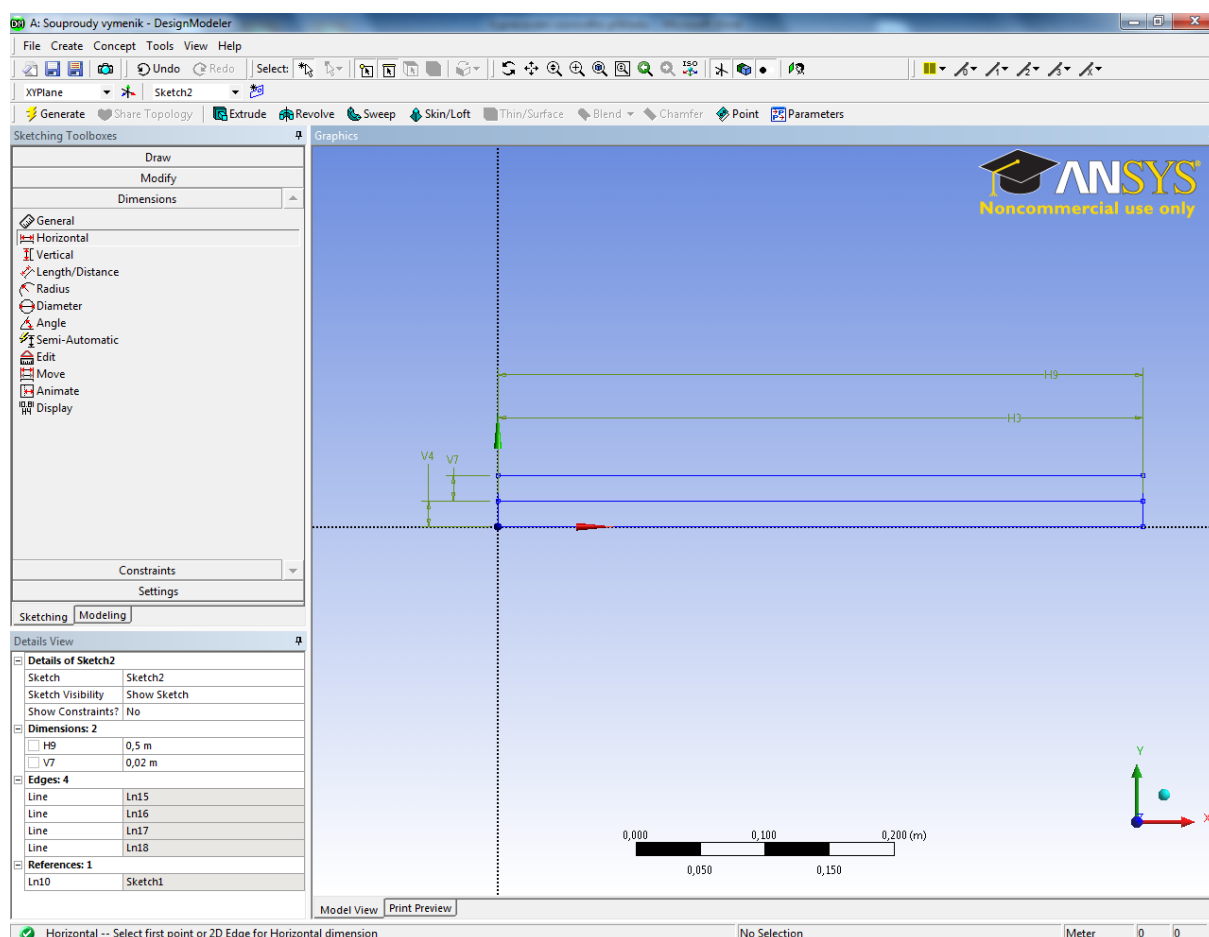
Spustíte program v nabídce **Start/All Programs/ANSYS 13.0/Workbench**. Po spuštění programu v panelu nástrojů menu v levé části okna poklepejte na **Fluid Flow (Fluent)**. Nově vytvořený panel pojmenujte jako **Souproudý výmeník** (nepoužívejte nikdy diakritiku a matematické symboly). Nyní celý projekt uložte klasickým způsobem **File/Save as**. Po uložení, dvojklikem poklepejte na nabídku **Geometry** a spustíte Design modeler [3,4].



Obrázek 3.2: Pracovní prostředí programu ANSYS Workbench 13.0 s blokem Fluid flow.

3.3 Tvorba geometrie

Po spuštění Design modeleru nastavte vhodné jednotky, ve vašem případě to je metr (meter). Ve stromu projektu, poklepejte pravým tlačítkem myši na **XYPlane** a zvolte možnost **Look at**. Tím docílíte toho, že budete kreslit součást kolmo k rovině XY pro 2-D rozměr. Po prosvětlení roviny **XYplane** vytvoříte novou skicu kliknutím na ikonu **New sketch**. Poté se vytvoří skica z názvem **sketch1**, do které začnete součást kreslit. Prosvětlete **sketch1** a změníte záložku modeling na záložku **Sketching**. Tento krok vám umožňuje nakreslit přibližný tvar součásti. Pomocí funkce **Rectangle** vytvoříte obdélník, který je velmi podobný výsledné oblasti. Počáteční bod obdélníku uchyťte k počátku souřadného systému. Po nakreslení obdélníkové oblasti přepnete do záložky **Dimensions**, kde zakótuujete hlavní rozměry pomocí funkce **Horizontal** a **Vertical** na požadované hodnoty. Vytvoříte obdobně **New sketch** a postup tvorby opakujte (s tím rozdílem, že první bod obdélníku neuchytíte k počátku souřadného systému, ale k rohu předchozího obdélníku viz *Obrázek 3.3*).



Obrázek 3.3: Tvorba geometrie souproutého výměníku.

Z těchto dvou skic nyní musíte vytvořit rovinné plochy a to pomocí funkce **Surface from sketch**, kterou naleznete v roletovém menu **Concept**. Po zapnutí této funkce s pomocí klávesy Ctrl vyberete obě skicy a vytvoříte součásti pomocí tlačítka **Generate** (tímto tlačítkem vždy potvrzujete příkazy, které chcete provést). Po tomto příkazu se vytvoří ve stromu modelu 2 součásti. Podržte klávesu Ctrl a ve stromu osnovy vyberte obě součásti. Klikněte pravým tlačítkem na jednu z nich a vyberte možnost **Form new part**. Tento příkaz

spojuje dvě součásti do jedné části a umožňuje je následně síťovat tak, že jsou sítě na sobě závislé. Nyní křížkem zavřete Design modeler a uložte opět celý projekt až v hlavním rozhraní programu Workbench. Pokud, je geometrie vytvořena bez problému, položka Geometry je zaškrtnutá zeleně.

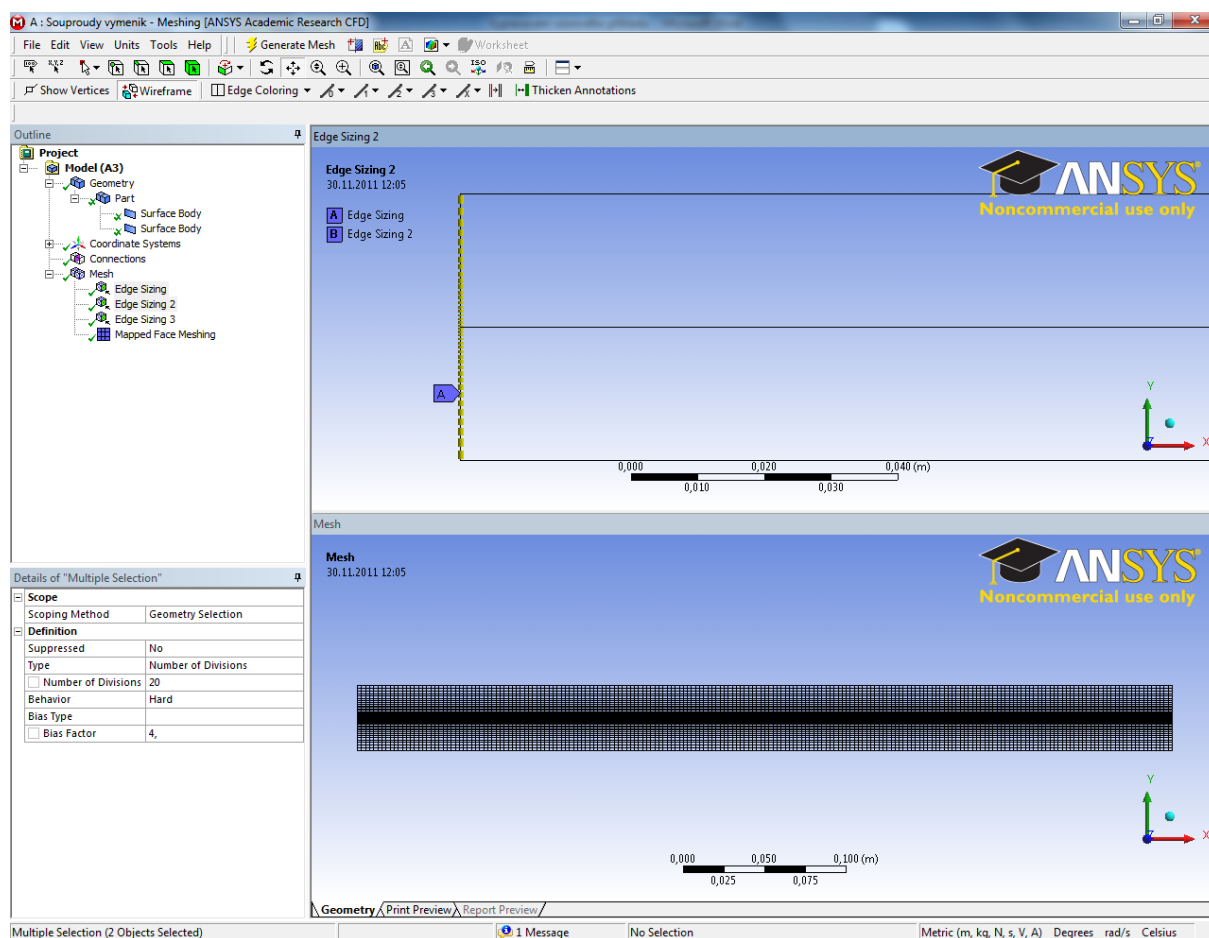
3.4 Tvorba sítě

V hlavním okně projektu poklepejte dvojklikem na možnost **Mesh** a tím spustíte program Meshing, který umožňuje síťování vygenerovaných součástí. Tento krok může trvat i několik minut. Po spuštění programu a načtení součástí máte několik možností, jak vytvořit síť. Od jednoduchého schématu, kdy v podstatě pouze poklepete na síť levým tlačítkem a spustíte příkaz **Generate mesh** (velice jednoduchá síť a pro velkou většinu případu nevyhovující) přes **Automatic method** (automatická metoda) až po uživatelem přesně definovaný tvar sítě (uživatel si sám zvolí, jak bude výsledná síť vypadat). Vy využijete poslední možnost s ohledem na vytvoření tzv. mezních vrstev v oblasti přestupu tepla stěnou na rozhraní obou sousedních oblastí.

V první části musíte nejprve vysítovat hrany modelu. Poklepete pravým tlačítkem myši ve stromu sítě na položku **Mesh** a z rozvinuté nabídky zvolte možnost **Sizing**. Poté se zobrazí pod hladinou Mesh položka **Edge sizing**. Zde vyberete hrany, které představují okrajové podmínky osa, stěna rozhraní a stěna okolí. V nabídce **Definition/Type** zvolte možnost **Number of divisions**. Tato funkce umožňuje rozdělit hranu na konečný počet segmentů. Tento počet nastavte na hodnotu 200. Totožný postup aplikujte na hrany vstupů a výstupů u obou oblastí modelu, kde počet segmentů bude 20 a kde provedete navíc zmiňované zhuštění sítě. To nastavíte v nabídce **Definition/Bias type**, kde zvolíte nejprve požadovaný typ zhuštění (máte na výběr z řady možností) a následně faktor zhuštění (**Bias factor**) nastavte na hodnotu 4.

Na závěr řešeným oblastem vymezíte tvar buněk. V tomto případě budou nejvhodnější čtyřúhelníky. Opět poklepejte pravým tlačítkem myši na položku **Mesh** a z rozvinuté nabídky nyní zvolte **Mapped face meshing**. Nyní jen stisknete tlačítko **Generate mesh** a síť se vytvoří. To může opět trvat několik minut.

Po úspěšném vysítování je nyní nezbytné definovat okrajové podmínky na jednotlivé hrany a plochy modelu. Postupujete tak, že vždy nejprve označíte levým tlačítkem myši požadovanou hranu nebo plochu. A následně pravým tlačítkem myši vyvoláte nabídku, která obsahuje položku **Create named selection**. Takovým způsobem přiřaďte názvy příslušným hranám a plochám modelu. Je vhodné používat anglické označení (osa = axis, vstup = inlet, stěna = wall atd.). Po tomto kroku křížkem zavřete program Meshing a opět uložte celý projekt v hlavním rozhraní programu Workbench. V bloku Fluid flow (FLUENT) se po úspěšném vytvoření sítě objeví u položky Mesh blesk, který signalizuje potřebu aktualizovat projekt. Aktualizace je provedena pomocí tlačítka **Update**. Tímto krokem dojde k propojení sítě s řešícím programem ANSYS FLUENT. Úspěšné provedení update a propojení je provázeno opět zeleným odškrtnutím.



Obrázek 3.4: Detail na provedení zhuštění sítě a provedení sítě v řešené oblasti.

3.5 ANSYS FLUENT

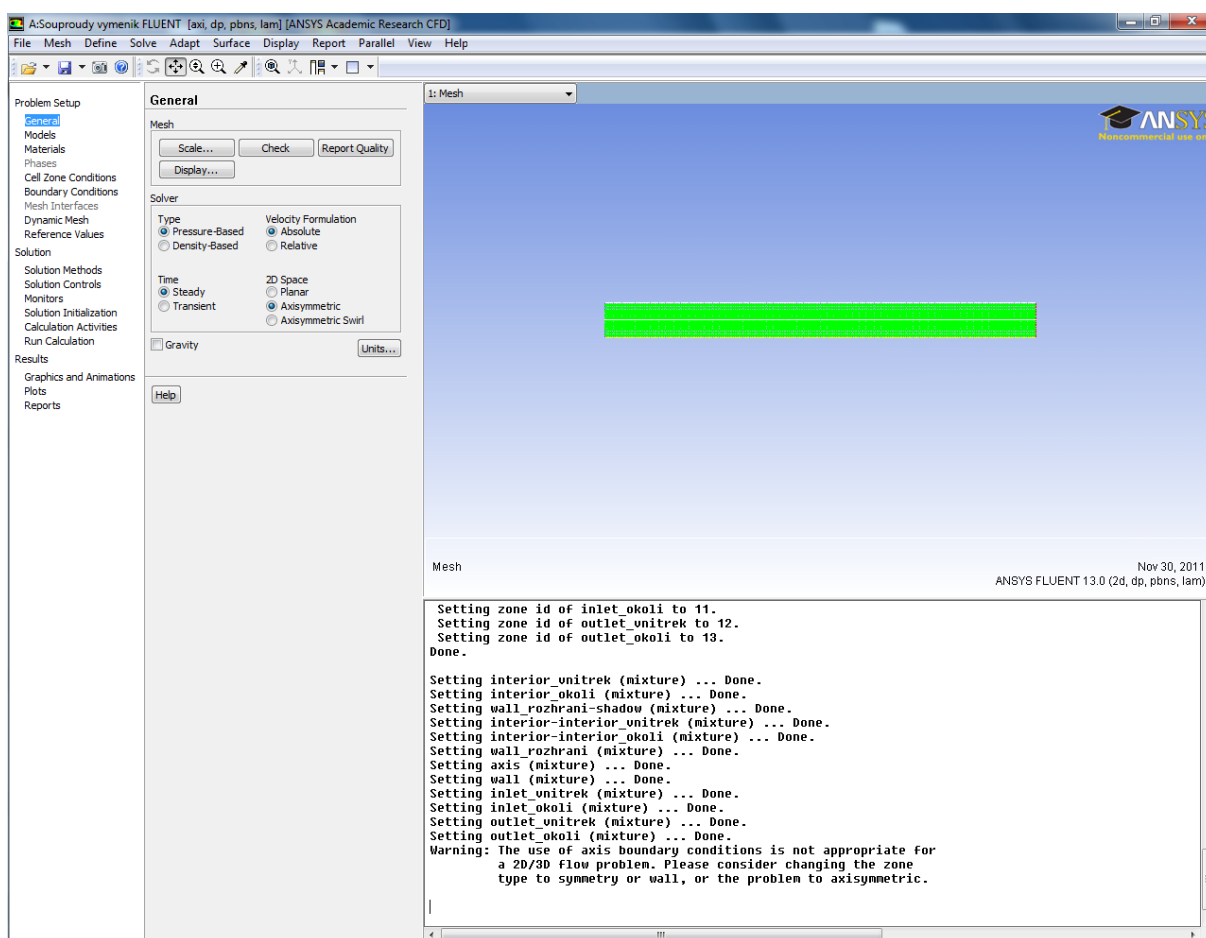
Postup řešení:

Řešení problému proudění tekutin s přestupem tepla je složitý problém, kdy při zadání úplného matematického modelu může dojít k divergenci. Proto pro řešení bývá často použita tzv. metoda step – by step, tj. postup, při kterém se řeší z hlediska numerické stability a konvergence příklad co nejsnazší a následně se upravují turbulentní modely, sítě, stěnové funkce, případně okrajové podmínky. V našem případě to znamená, že se budou postupně řešit varianty [2]:

- řešení s konstantními fyzikálními vlastnostmi, turbulentním k- ϵ standardním modelem
- řešení s fyzikálními vlastnostmi závislými na teplotě případně tlaku,
- řešení s kvalitnějším k- ω turbulentním modelem sst, který je vhodný pro nízká Reynoldsova čísla
- oprava hmotnostních průtoků tak, aby teplotní gradient odpovídal realitě (vyhodnocování pomocí průměrných hodnot rychlostí a teplot na vstupech a výstupech)

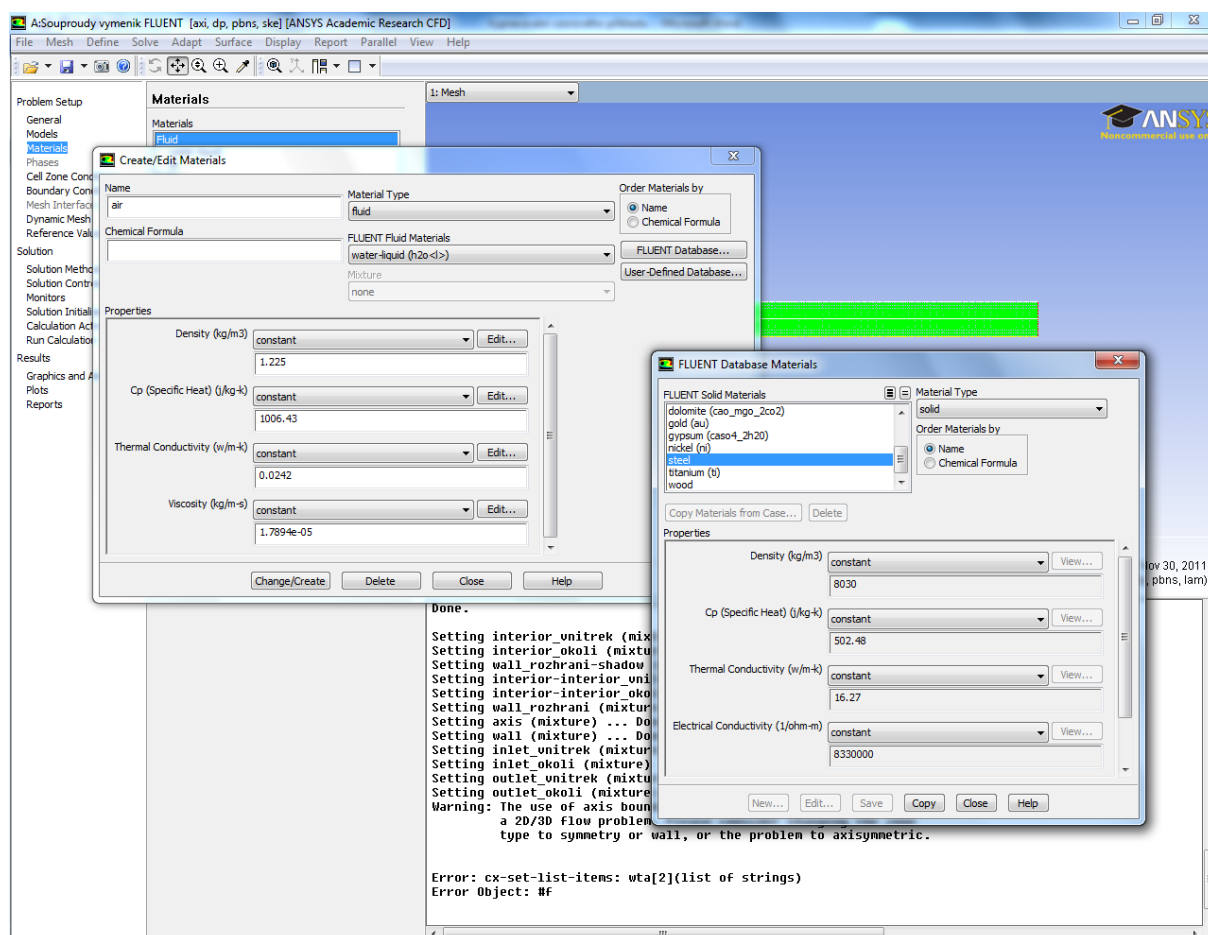
Program ANSYS FLUENT spustíte obdobným způsobem jako předchozí programy v bloku tedy pravým dvojklikem myši na položku **Setup**. Když se program spustí, na obrazovce se zobrazí vysíťované těleso. Při nastavování parametrů výpočtu v dialogovém okně **Problem setup** postupujte sestupně položku za položkou (tedy nepřeskakujte). Nejprve v nabídce **General/Scale** si zkontrolujete jednotky modelu. Tuto úlohu řešte jako osově symetrickou (s ohledem na výrazné zjednodušení modelu a zkrácení doby výpočtu). Nastavení osově symetrie provedete v nabídce **General/Solver/2D space/Axisymmetric**.

Dále přejdete do další záložky **Models**. V této záložce aktivujete model, který bude řešit přestup tepla **Models/Energy**. V této záložce zvolte také viskózní model (Viscous), který bude popisovat proudění v oblasti a je závislý na Reynoldsově číslu (v tomto případě se jedná o turbulentní proudění, jak jsme si ověřili výše). Pro první výpočet zvolte z nabídky turbulentní model z názvem standard $k-\varepsilon$ model.



Obrázek 3.5: Programové prostředí ANSYS FLUENT po spuštění načteného modelu.

V dalším kroku je nutné nastavit materiál. V záložce **Materials** poklepejte na **Change/Edit** a nakopírujete z databáze vodu a ocel viz *Obrázek 3.6*. Takto nakopírovaný materiál přiřadíte v nabídce **Cell Zone Conditions** k příslušné oblasti.

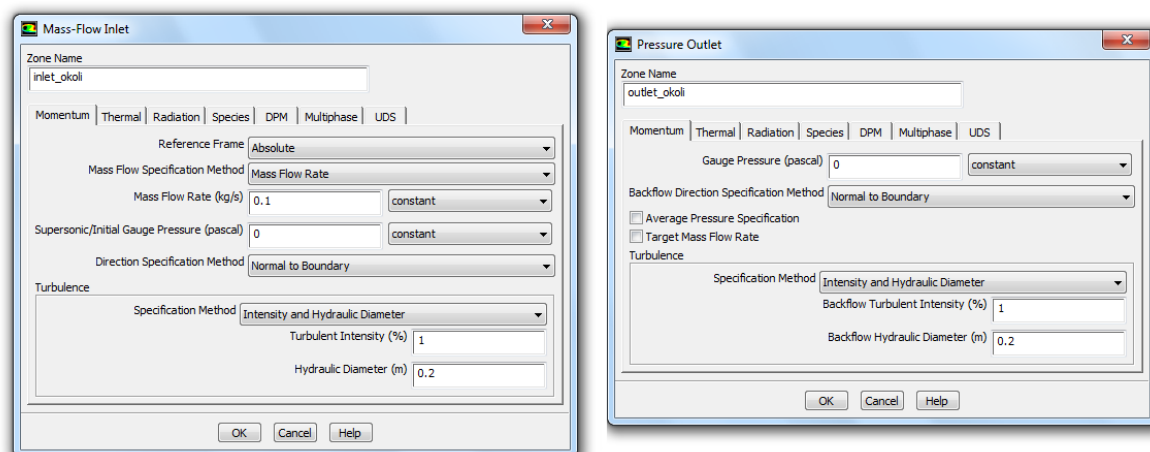


Obrázek 3.6: Dialogové okna pro kopírování a nastavení fyzikálních parametrů použitých materiálů.

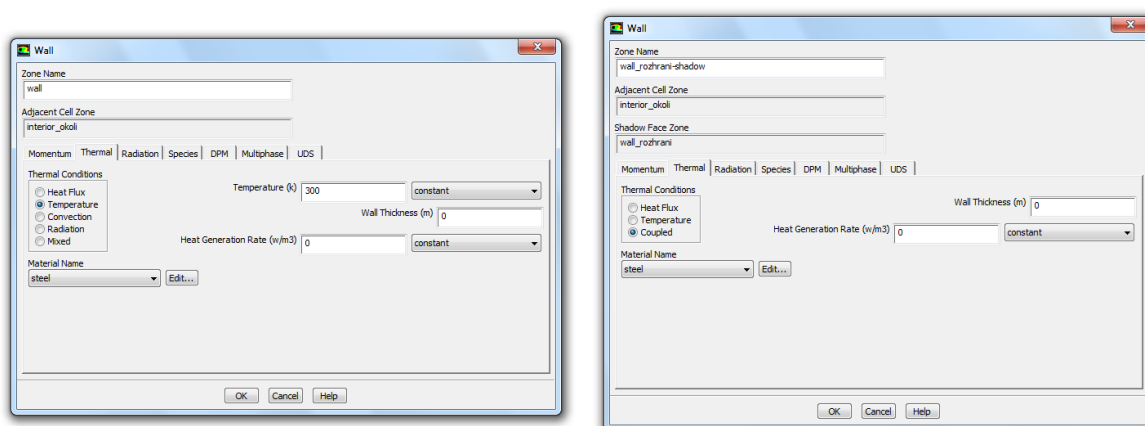
V následující části je nutné definovat okrajové podmínky (Boundary condition). Vždy dvojklikem rozbalíte příslušnou podmínku a definujeme u ní následující parametry:

- Axis => Typ podmínky: Axis (osa)
- Inlet okolí => Typ podmínky: Mass flow inlet (průtok)
- Inlet vnitřek => Typ podmínky: Mass flow inlet (průtok)
- Interior okolí => Typ podmínky: Interior (vnitřní oblast)
- Interior vnitřek => Typ podmínky: Interior (vnitřní oblast)
- Outlet okolí => Typ podmínky: Pressure outlet (tlakový výstup)
- Outlet vnitřek => Typ podmínky: Pressure outlet (tlakový výstup)
- Wall => Typ podmínky: Wall (stěna)
- Wall rozhraní => Typ podmínky: Wall (stěna)

Další parametry definované v jednotlivých dialogových oknech jsou patrné ze zadání a z obrázků Obrázek 3.7 Obrázek 3.6 a Obrázek 3.8.



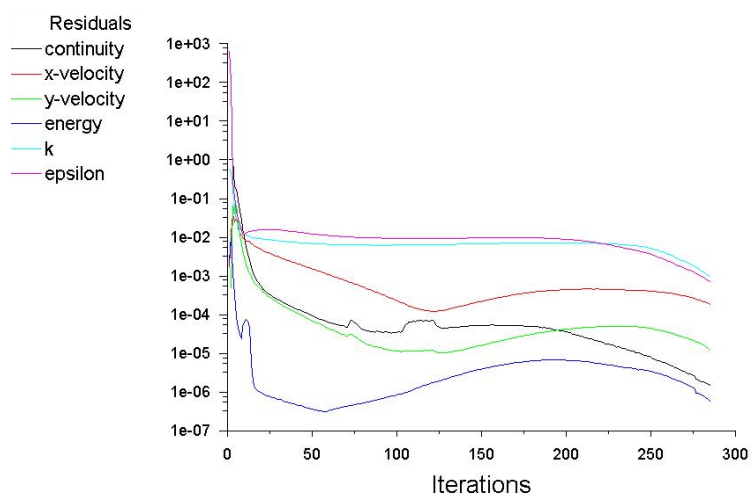
Obrázek 3.7: Dialogové okna zobrazující nastavení okrajových podmínek na vstupu a výstupu z jedné řešené oblasti.



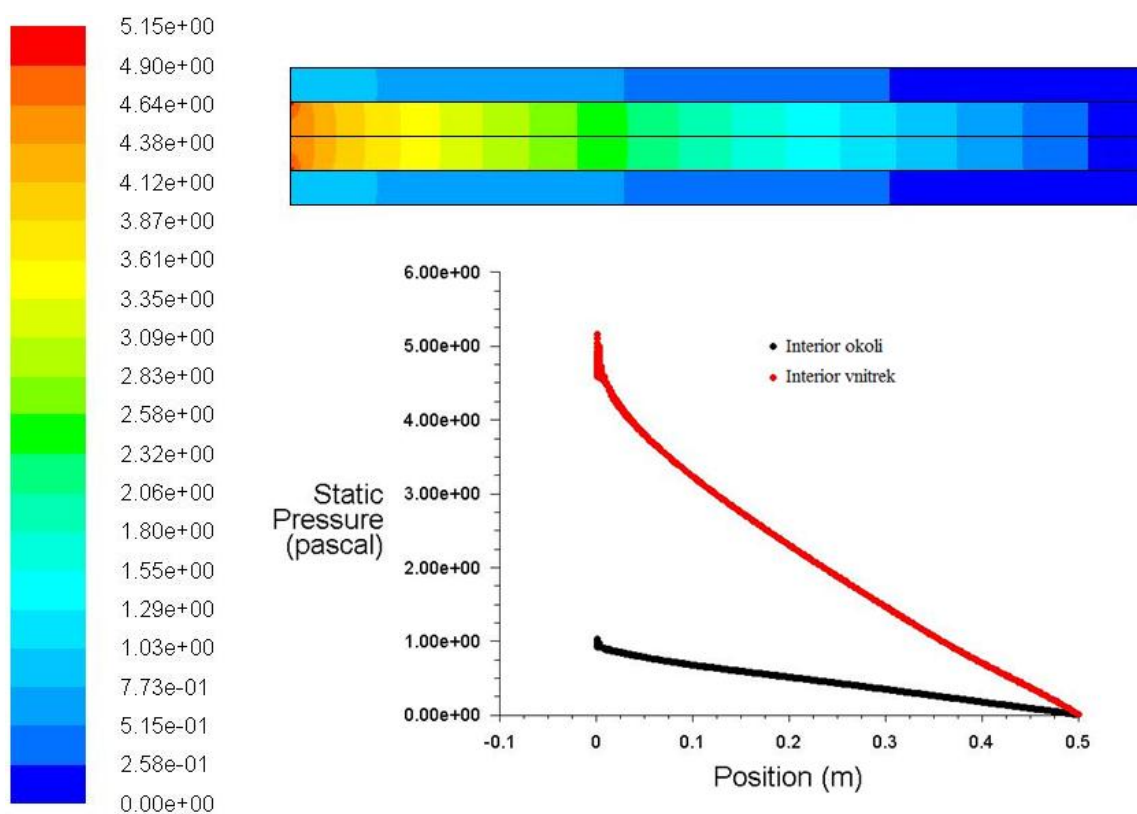
Obrázek 3.8: Dialogové okna ukazují nastavení okrajových podmínek na stěnách modelu (vlevo vnější stěna vpravo stěna rozhraní).

3.6 Výsledky k porovnání

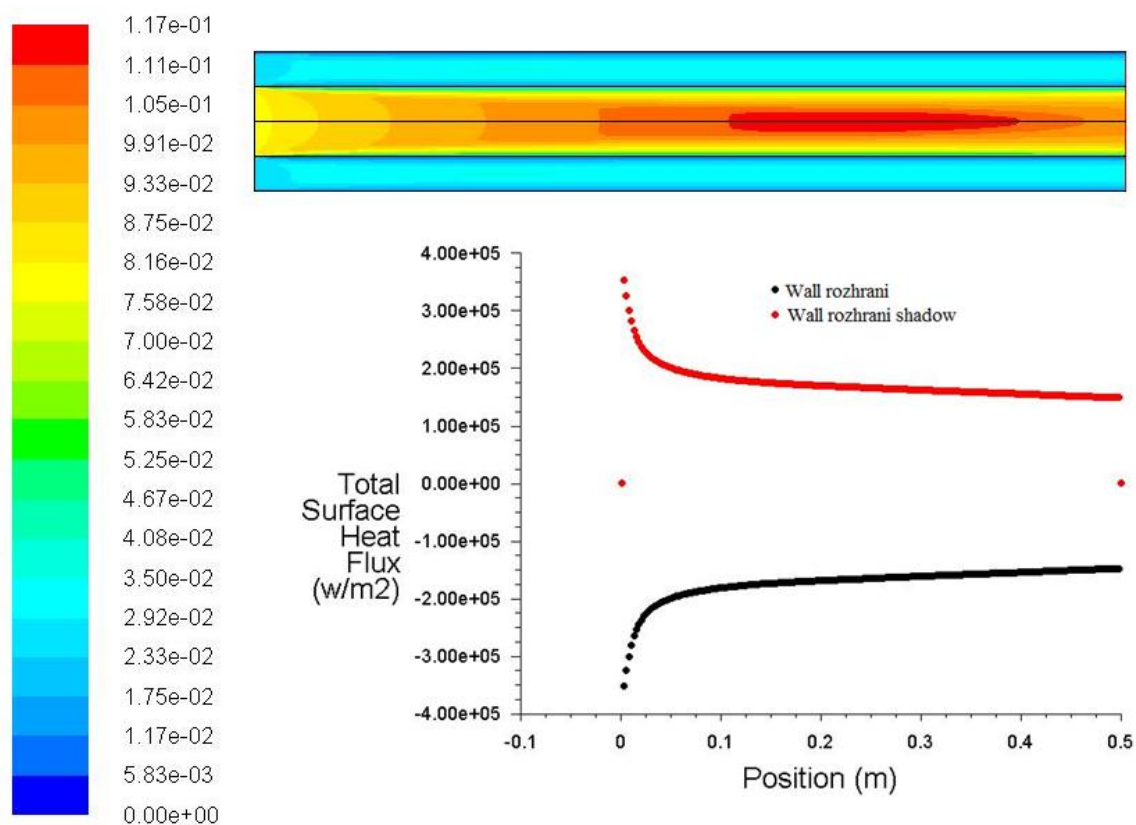
První kontrolou výpočtu je sledování reziduálů (relativních chyb). Po dosažení hodnot reziduálů pod hranici 0.001 pro všechny proměnné a 0.000001 pro teplotu je zaručeno, že výpočet numericky zkonvergoval. Nakolik jsou výsledky reálné, tj. zda není výsledek deformovaný náhodnými chybami ve výběru materiálů nebo okrajových podmínek, je otázkou vyhodnocení všech počítaných veličin. Řada výsledků se optimálně zobrazí užitím kontur, jiná možnost je využití zobrazení vektorů rychlosti a XY grafů. Optimální postup spočívá v kontrole a porovnání výsledků s reálným experimentem. Jinak je třeba využít teoretických znalostí uživatele.



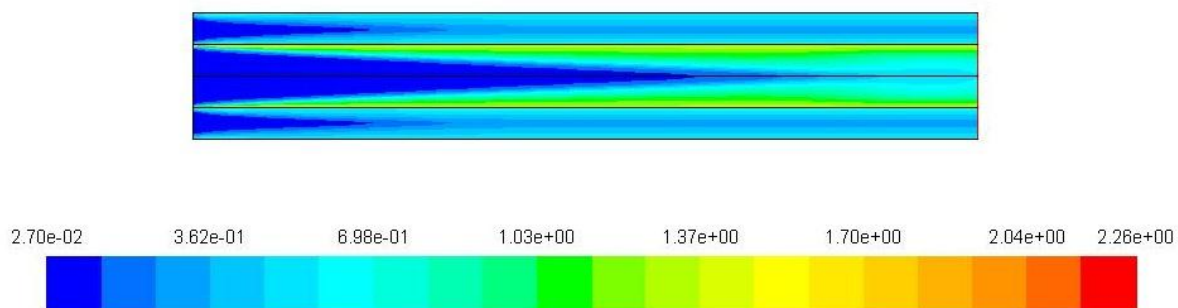
Obrázek 3.9: Průběh residuálů.



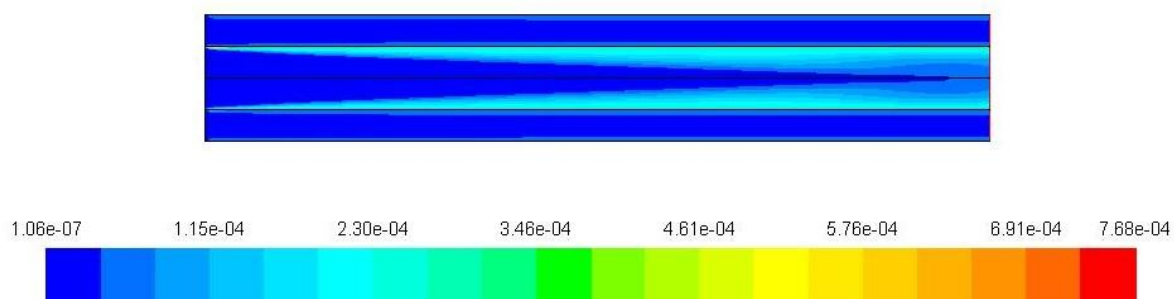
Obrázek 3.10: Průběh statického tlaku v řešené oblasti zobrazené pomocí vyplněných kontur a doplněné o graf popisující závislost tlakového spádu na délce oblasti.



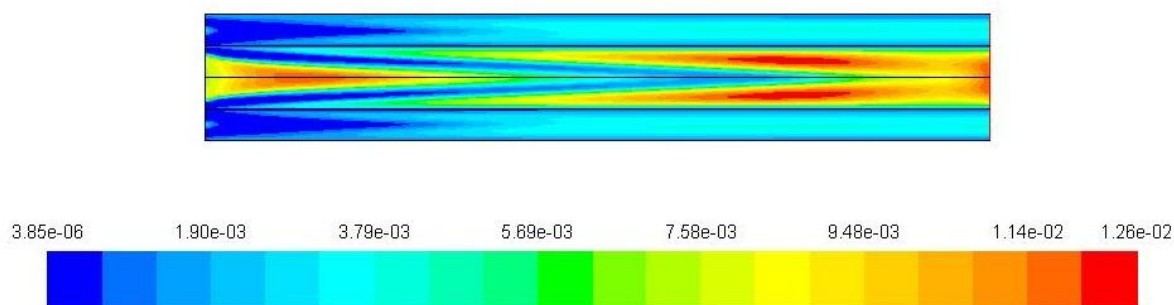
Obrázek 3.11: Grafické zobrazení kontur rychlosti s vyhodnocením toku tepla přes stěnu rozhraní.



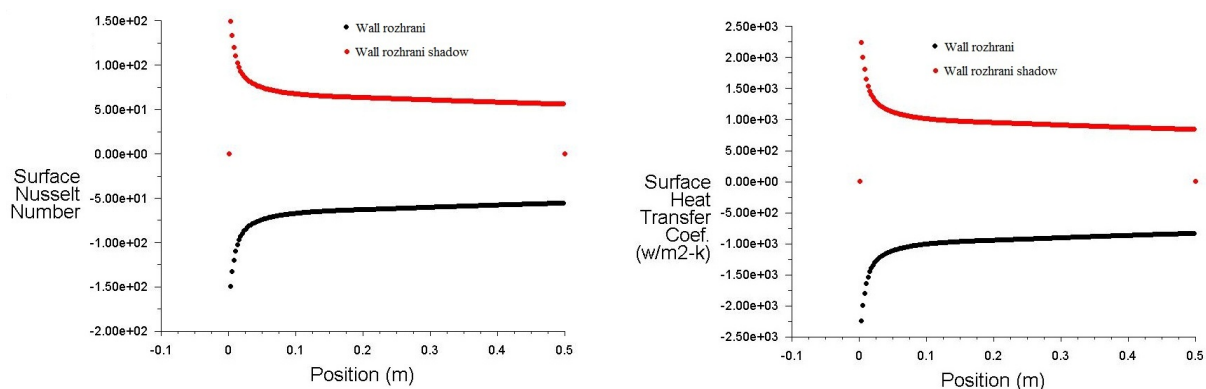
Obrázek 3.12: Grafické zhodnocení kontur intenzity turbulence.



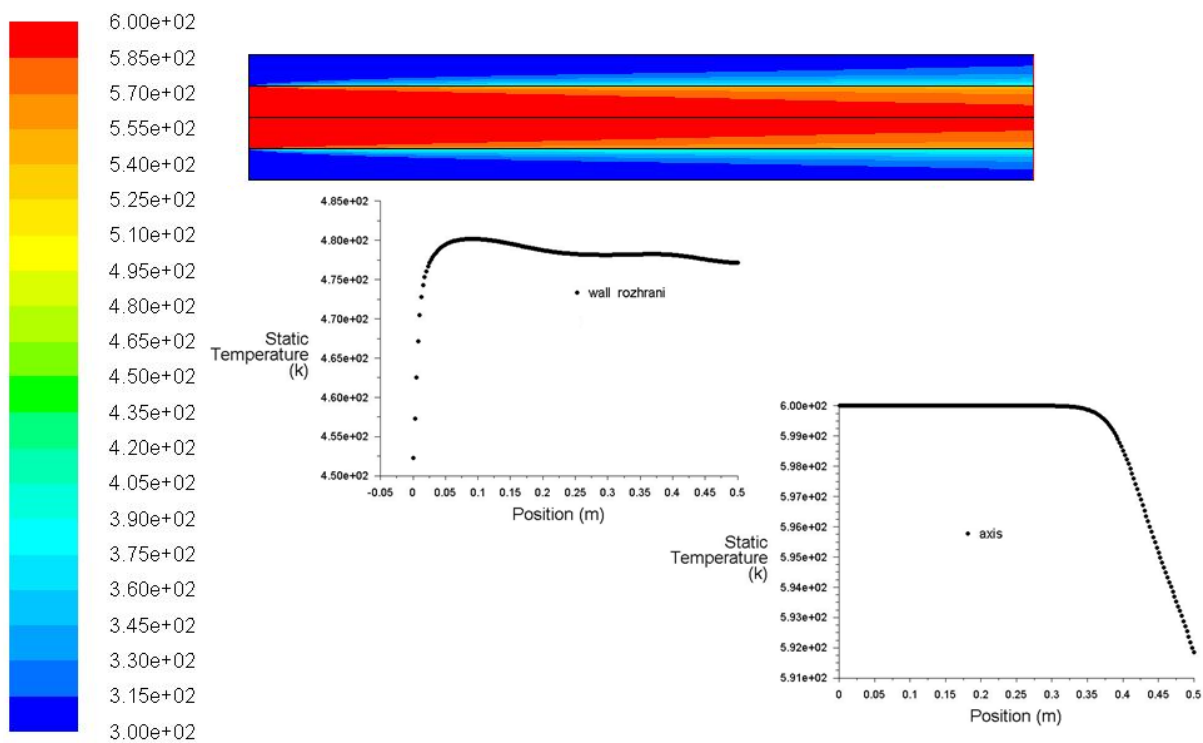
Obrázek 3.13: Průběh tvorby turbulentní kinetické energie znázorněné pomocí vyplněných kontur.



Obrázek 3.14: Průběh turbulentní viskozity v řešené oblasti.



Obrázek 3.15: Nusseltovo číslo (vlevo) a součinitel přestupu tepla (vpravo) vyhodnoceného na stěně rozhraní.



Obrázek 3.16: Vyhodnocení teplotního pole s průběhem teploty podél stěny rozhraní (vlevo) a v ose (vpravo).

Výsledky z teoreticko-empirického odhadu významných veličin při řešení obtékání systému souproudého chladiče s přestupem tepla jsou v následující tabulce porovnány se středními hodnotami získanými z numerického výpočtu [2].

Tab. 3.4 – Závěrečné srovnání výsledků:

Model	Zkoumaná veličina	Odhad	Výpočet	Jednotka
Standard k-ε	Součinitel přestupu tepla	718,45	963,1	$[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
	Nusseltovo číslo	47,89	64,2	[1]
RNG k-ε	Součinitel přestupu tepla	718,45	1130,5	$[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
	Nusseltovo číslo	47,89	75,6	[1]
SST k-ω	Součinitel přestupu tepla	718,45	267,3	$[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
	Nusseltovo číslo	47,89	17,8	[1]

Odchylky 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.



Shrnutí pojmů 3.1.

Určení součinitele přestupu tepla a Nusseltova čísla u obtékání systému souproudého chladiče za pomoci teoreticko-empirického odhadu tak i pomoci numerické simulace.



Otázky 3.1.

12. Jak rozhodnout o typu proudění?
13. Jak je definováno Nusseltovo číslo uvnitř trubky?
14. K čemu slouží adaptace sítě?
15. Jaké turbulentní modely mohou být zvoleny v programu ANSYS FLUENT 13.0?
16. Co je to operační tlak?
17. Jakou funkční závislostí se definují fyzikální veličiny?
18. Jaké typy vstupních okrajových podmínek mohou být definovány?
19. Jaké typy okrajových podmínek lze definovat na stěny modelu?
20. Co je to residuál?

4 SEZNAM PŘÍKLADŮ URČENÝCH K SAMOSTATNÉMU ŘEŠENÍ



Čas ke studiu: 8 hodin (realizace jednoho příkladu)



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

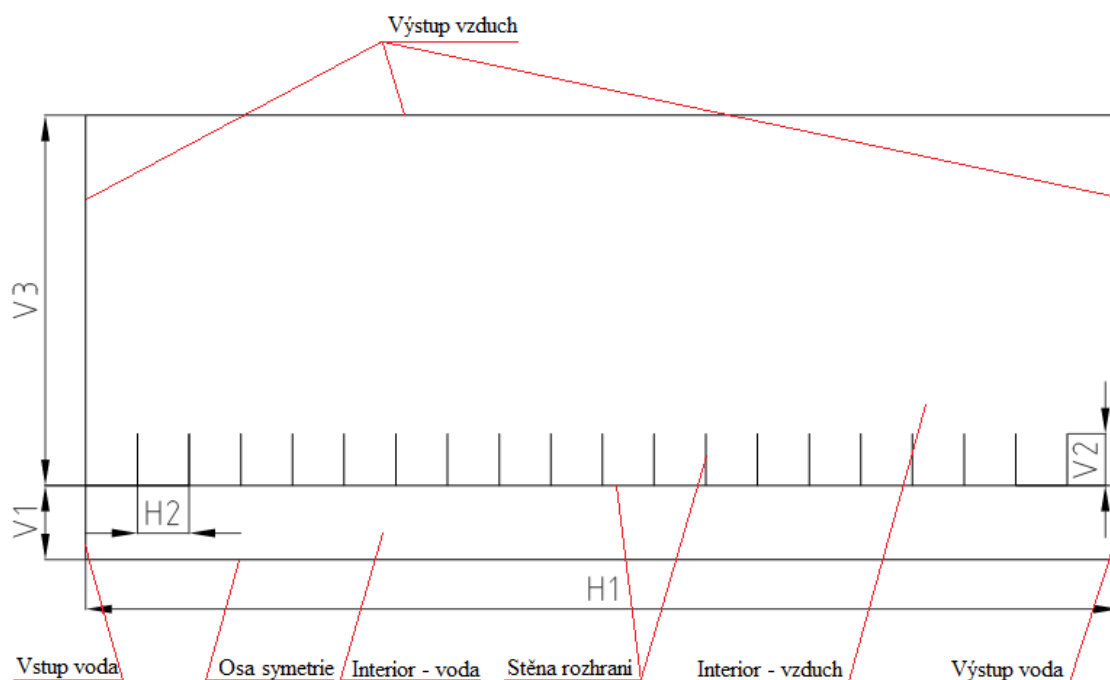
- ✚ Provést simulaci jednoduché 2D úlohy proudění tekutin s přestupem tepla.
- ✚ Popsat problematiku numerického modelování.
- ✚ Definovat pojmy z numerického modelování.



Výklad

4.1 Řešení přestupu tepla článkovým radiátorem

Proved'te matematickou simulaci proudění s přestupem tepla v článkovém radiátoru, jehož 2D geometrie je patrná z *Obrázek 4.1*. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek a výsledky zhodno'te.



Obrázek 4.1: Provedení článkového radiátoru s okolní oblastí ve 2D rozměru.

Tab. 4.1 – Rozměry oblasti:

H1	1.4	m
H2	0.07	m
V1	0.1	m
V2	0.07	m
V3	0.5	m

Pozn.: V programu ANSYS FLUENT definujte tloušťku stěny radiátoru a žeber $t = 0.003$ m.

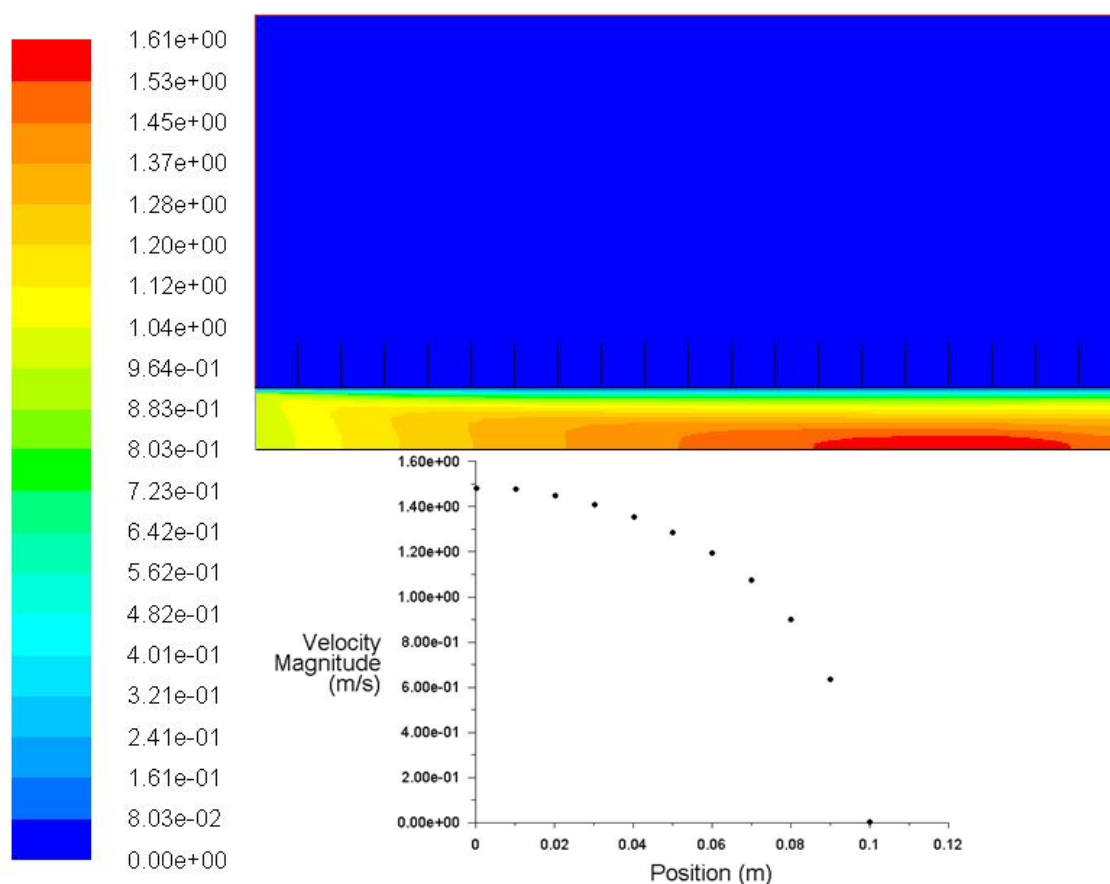
Tab. 4.2 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, vzduch, voda) při 300 K:

Materiál	Ocel	Vzduch	Voda	
hustota ρ	8030	1.225	998	[kg.m ⁻³]
měrná tepelná kapacita c_p	502.48	1006.43	4182	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
tepelná vodivost λ	16.27	0.0242	0.6	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
viskozita η		1.7894e-05	0.001	[kg.m ⁻¹ s ⁻¹]

Tab. 4.3 – Okrajové podmínky:

	Vstup voda	Výstup voda	Výstup vzduch	
teplota T	333.15			[K]
rychlost v	1			[m.s ⁻¹]
tlak p		0	0	[Pa]

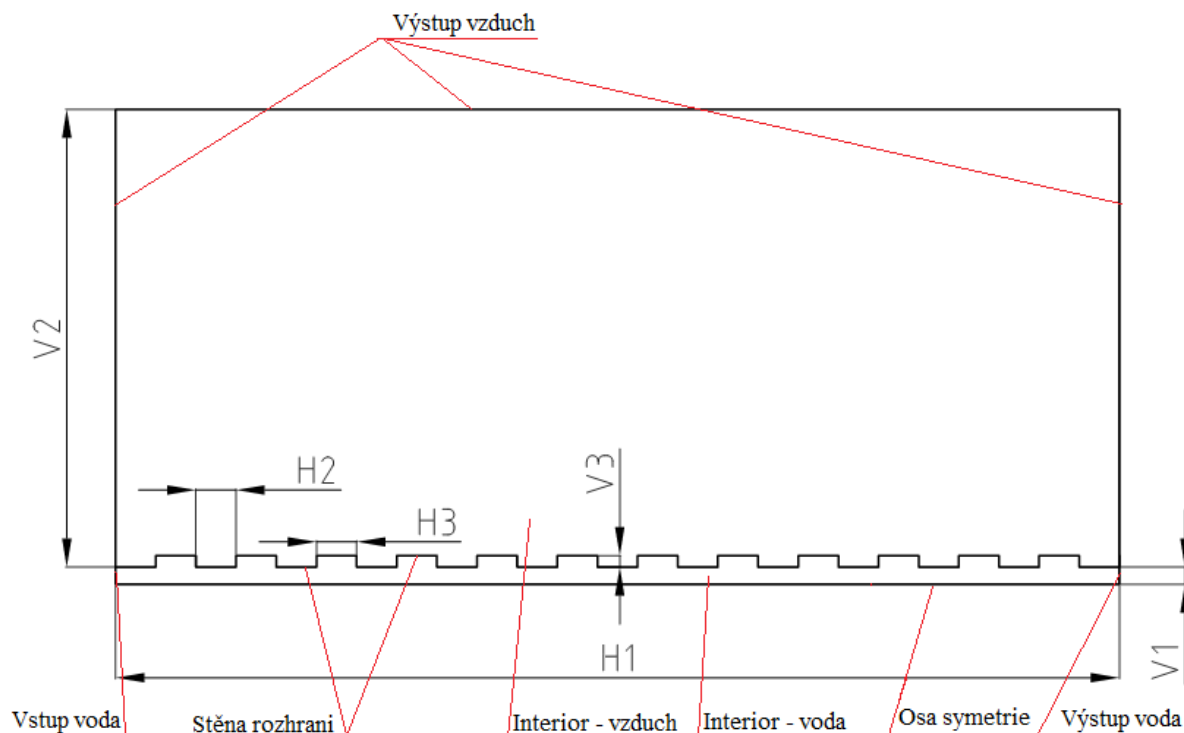
Příklad výsledku k porovnání s vlastním řešením:



Obrázek 4.2: Vyhodnocení rychlostního pole s detailem rychlostního profilu na výstupu z oblasti.

4.2 Řešení přestupu tepla deskovým radiátorem

Proveďte matematickou simulaci proudění s přestupem tepla v článkovém radiátoru, jehož 2D geometrie je patrná z *Obrázek 4.3*. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek a výsledky zhodnoťte.



Obrázek 4.3: Provedení deskového radiátoru s okolní oblastí ve 2D rozměru.

Tab. 4.4 – Rozměry oblastí:

H1	0.875	m
H2	0.035	m
H3	0.035	m
V1	0.015	m
V2	0.4	m
V3	0.01	m

Pozn.: V programu ANSYS FLUENT definujte tloušťku stěny radiátoru a žeber $t = 0.003$ m.

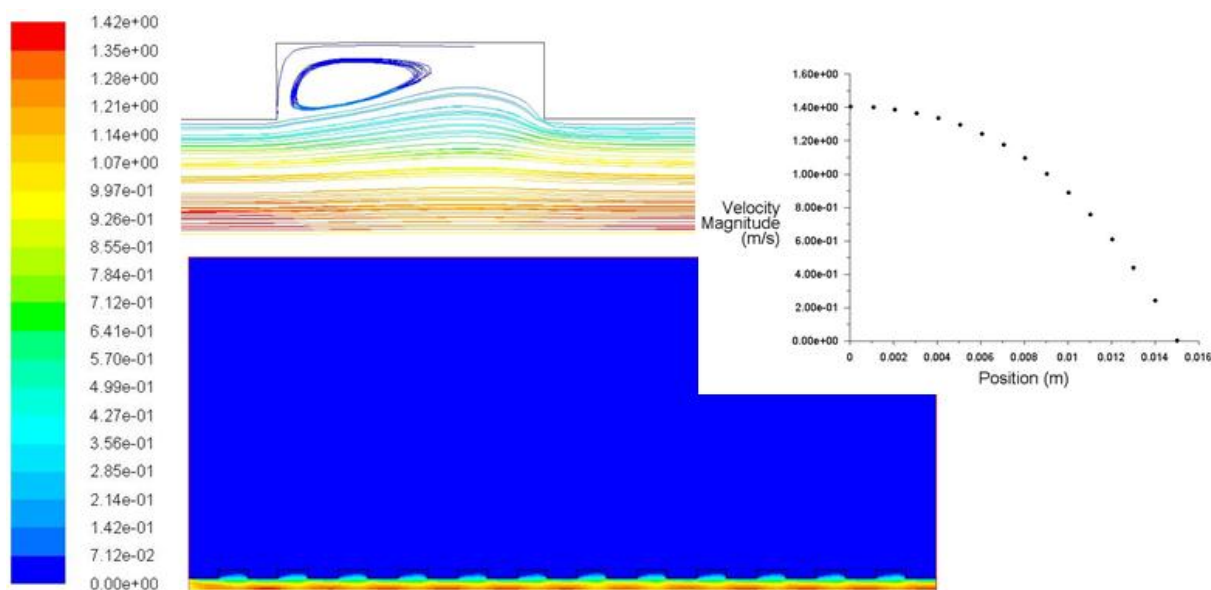
Tab. 4.5 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, vzduch, voda) při 300 K:

Materiál	Ocel	Vzduch	Voda	
hustota ρ	8030	1.225	998	[kg.m ⁻³]
měrná tepelná kapacita c_p	502.48	1006.43	4182	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
tepelná vodivost λ	16.27	0.0242	0.6	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
viskozita η		1.7894e-05	0.001	[kg.m ⁻¹ s ⁻¹]

Tab. 4.6 – Okrajové podmínky:

	Vstup voda	Výstup voda	Výstup vzduch	
teplota T	333.15			[K]
rychlost v	1			[m.s ⁻¹]
tlak p		0	0	[Pa]

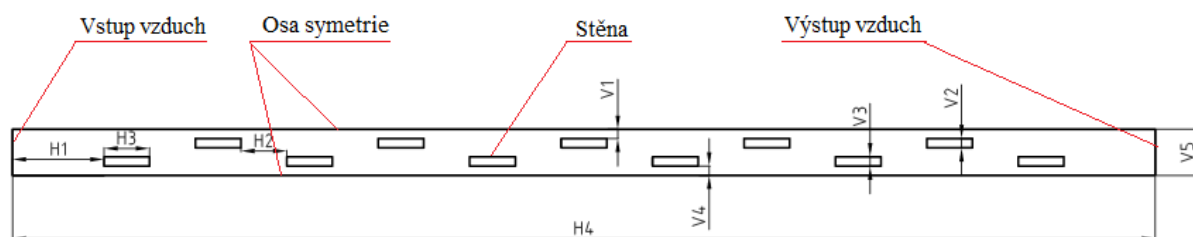
Příklad výsledku k porovnání:



Obrázek 4.4: Vyhodnocení rychlostního pole s detailem rychlostního profilu na výstupu z řešené oblasti. Obrázek nahoře zobrazuje detail proudění v jednom zubu radiátoru

4.3 Řešení přestupu tepla deskovým výměníkem

Vytvořte matematický model deskového výměníku (výplň z přesazených proužků), který je vyobrazen níže. Úlohu řešte jako 2D. Výpočet opakujte pro různé varianty rychlosti. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek a výsledky zhodnoťte.



Obrázek 4.5: Provedení deskového výměníku ve 2D rozměru.

Tab. 4.7 – Rozměry oblasti:

H1	0.1	m
H2 = H3	0.05	m
H4	1.25	m
V1=V2=V3=V4	0.01	m
V5	0.05	m

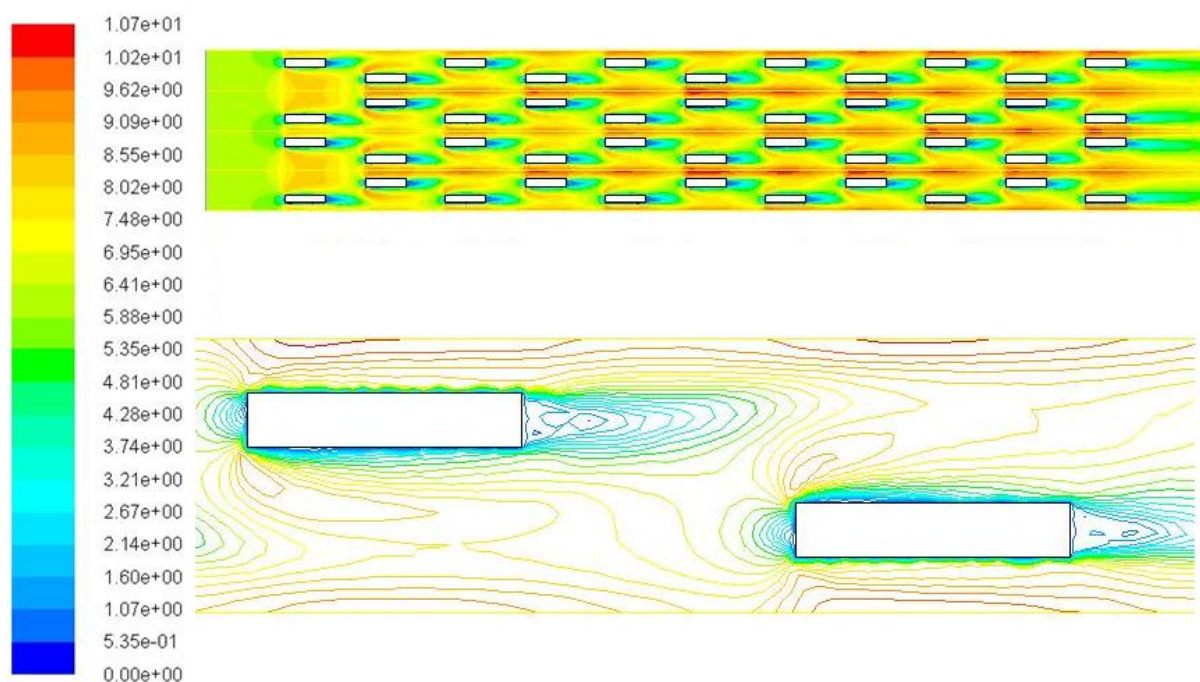
Tab. 4.8 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, vzduch) při 300 K:

Materiál	Ocel	Vzduch	
hustota ρ	8030	1.225	[kg.m ⁻³]
měrná tepelná kapacita c_p	502.48	1006.43	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
tepelná vodivost λ	16.27	0.0242	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
viskozita η		1.7894e-05	[kg.m ⁻¹ s ⁻¹]

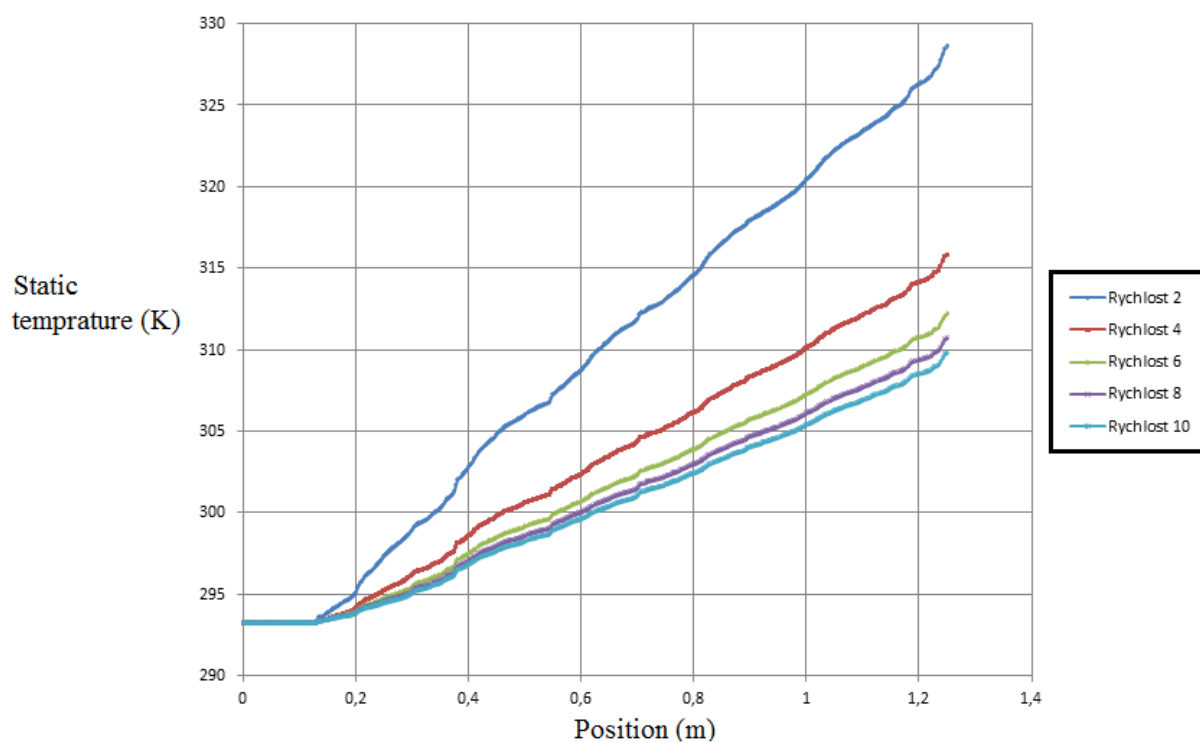
Tab. 4.9 – Okrajové podmínky:

	Vstup vzduch	Výstup vzduch	Stěna
teplota T	293.15		393.15 [K]
rychlost v	2, 4, 6, 8, 10		[m.s ⁻¹]
tlak p		0	[Pa]

Příklad výsledků k porovnání:



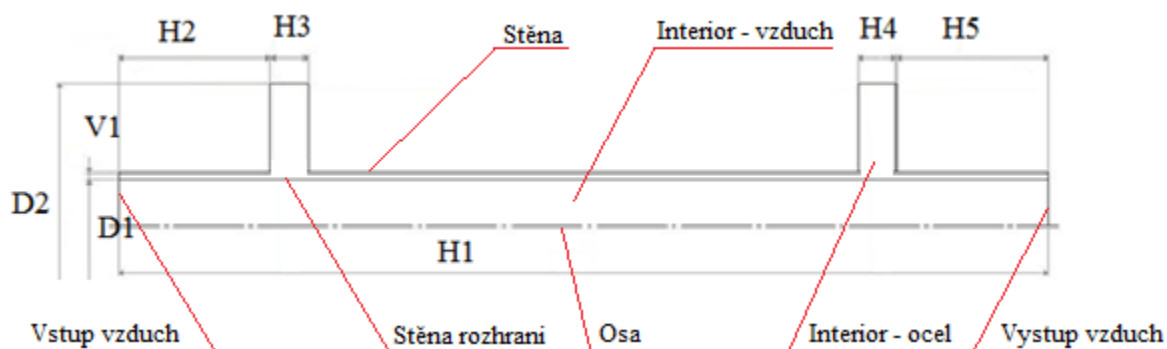
Obrázek 4.6: Kontury proudového pole s detailem na desky kde je patrné odtržení proudu za jejich hranou. Výsledky jsou pro vstupní rychlost $v = 6 \text{ m.s}^{-1}$.



Obrázek 4.7: Srovnání statických teplot po délce výměníku (v místě osy symetrie) při různých variantách vstupních rychlostí

4.4 Řešení přestupu tepla v ERG chladiči

Proveďte 2D matematickou simulaci proudění s přestupem tepla v EGR chladiči, který je v poloze „By-Pass“ pro různé varianty vstupního průtoku. Tvar EGR chladiče je patrný z Obrázek 4.8. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek a výsledky zhodnoťte.



Obrázek 4.8: ERG chladič ve 2D provedení.

Tab. 4.10 – Rozměry oblastí:

H1	0.245	m
H2	0.04	m
H3	0.01	m
H4	0.01	m
H5	0.04	m
V1	0.002	m
D1	0.026	m
D2	0.082	m

Pozn.: Definujte v celé oblasti operační tlak (operating condition) - 180000 Pa

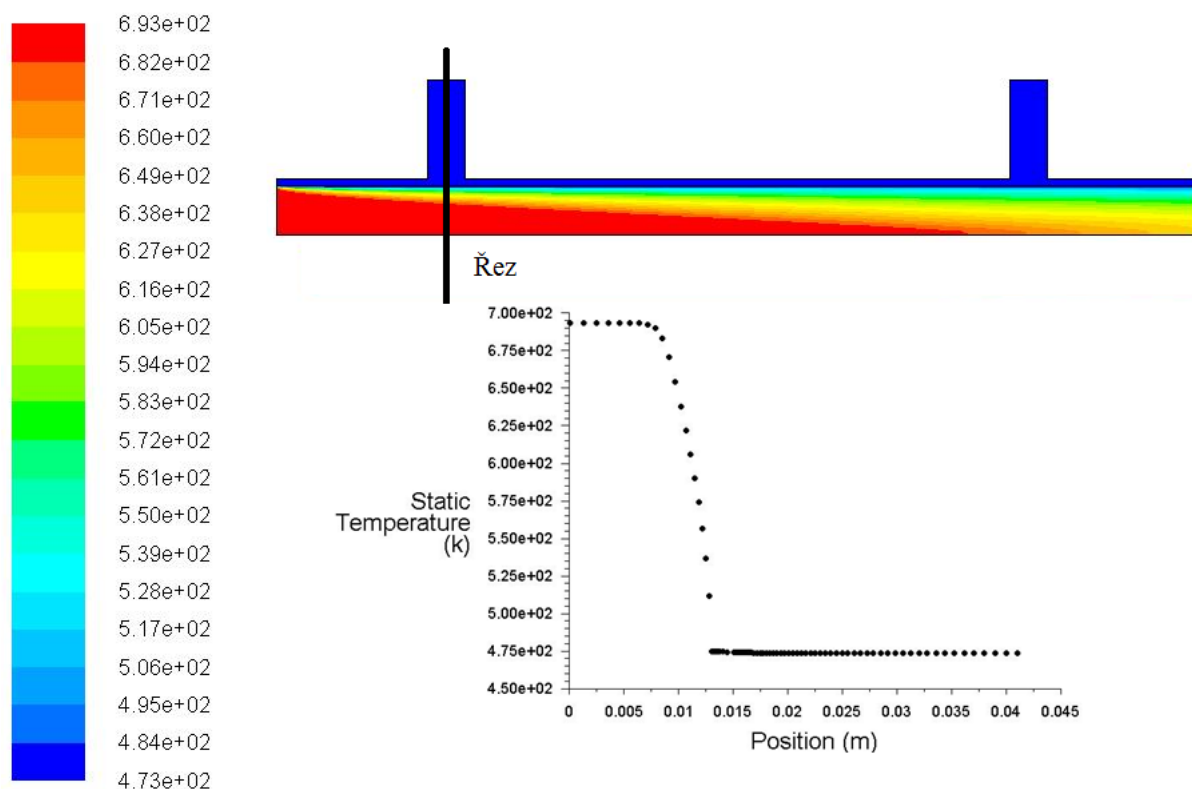
Tab. 4.11 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, vzduch) při 300 K:

Materiál	Ocel	Vzduch	
hustota ρ	8030	1.225	[kg.m ⁻³]
měrná tepelná kapacita c_p	502.48	1006.43	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
tepelná vodivost λ	16.27	0.0242	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
viskozita η		1.7894e-05	[kg.m ⁻¹ s ⁻¹]

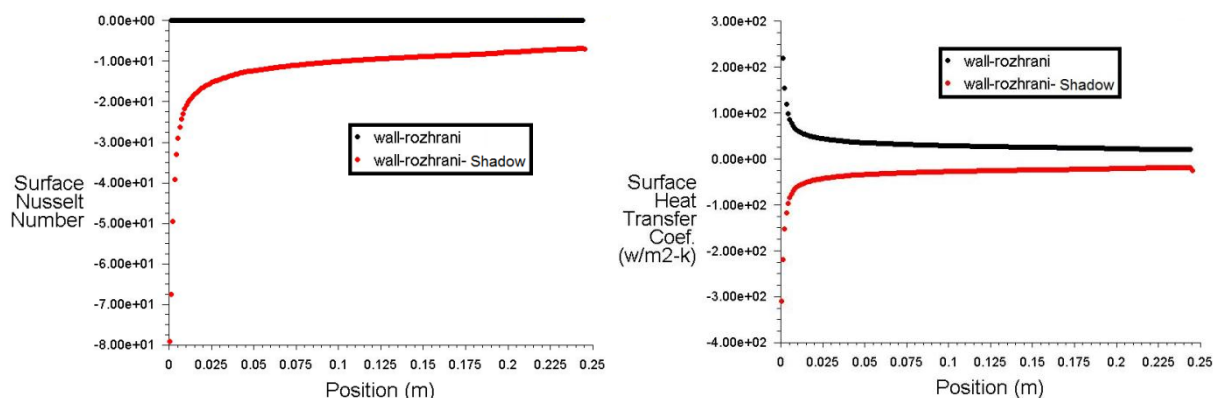
Tab. 4.12 – Okrajové podmínky:

	Vstup vzduch	Výstup vzduch	Stěna
teplota T	693.15		473.15 [K]
průtok Q	0.001, 0.01, 0.075		[kg.s ⁻¹]
tlak p		0	[Pa]

Příklad výsledků k porovnání:



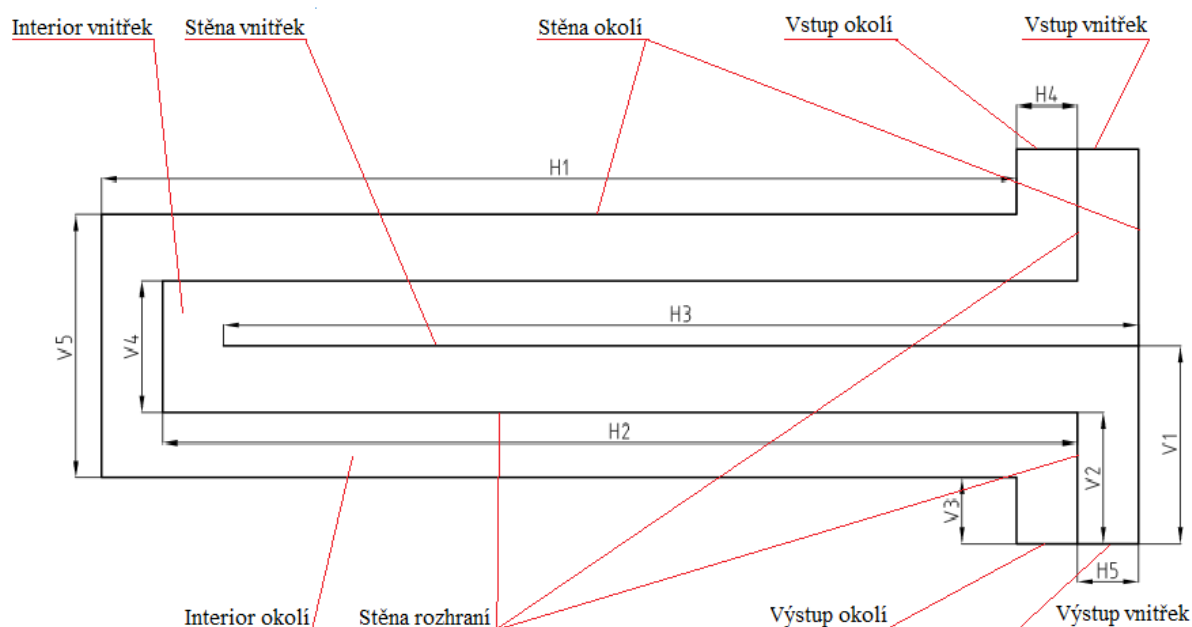
Obrázek 4.9: Rozložení statické teploty v řešené oblasti a vyhodnocení teplot v místě řezu.



Obrázek 4.10: Odhad Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla podél stěny rozhraní.

4.5 Řešení přestupu tepla u souproudého výměníku typ voda - voda

Vytvořte matematický model souproudého výměníku a proveďte 2D numerickou simulaci souproudého výměníku dle *Obrázek 4.11*. Řešte výměník typu voda-voda. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek a výsledky zhodnoťte v závěrečné zprávě dle osnovy vypracování.



Obrázek 4.11: Provedení souproudého výměníku ve 2D provedení.

Tab. 4.13 – Rozměry oblastí:

H1=H2=H3	1.5	m
H4	0.1	m
H5	0.1	m
V1	0.3	m
V2	0.2	m
V3	0.1	m
V4	0.2	m
V5	0.4	m

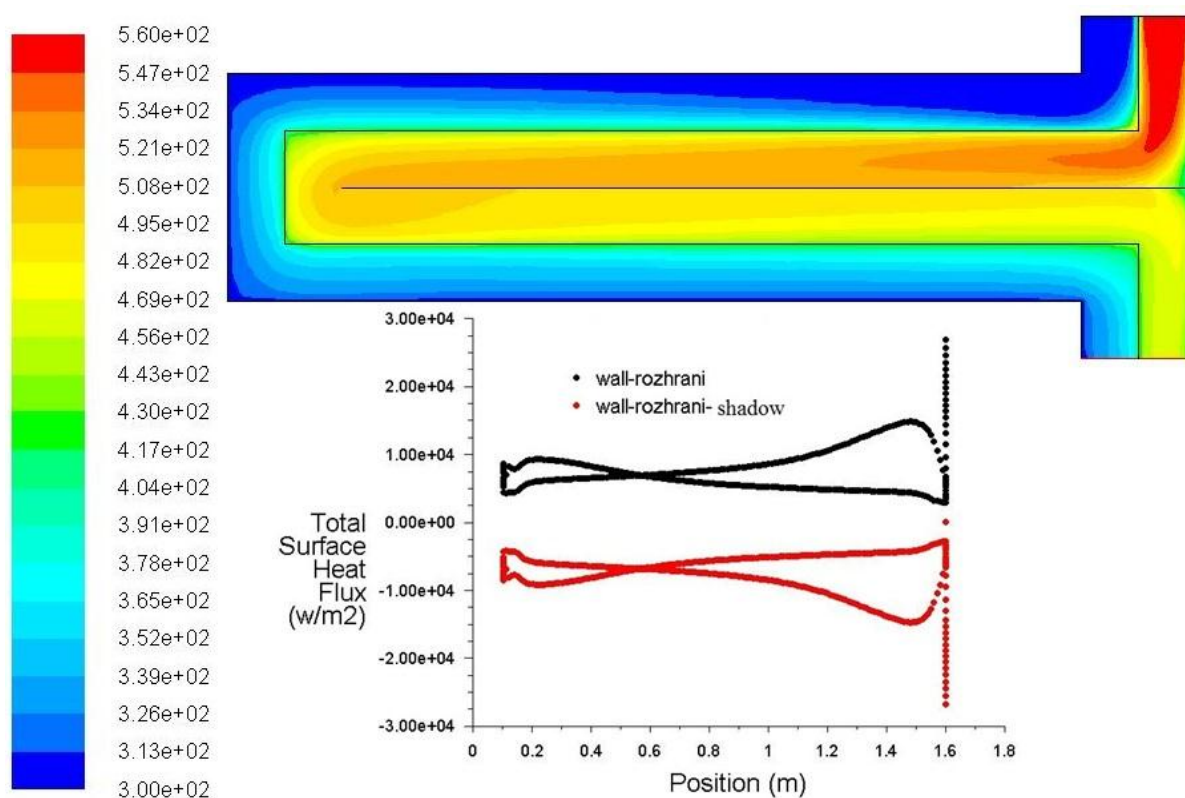
Tab. 4.14 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, voda) při 300 K:

Materiál	Ocel	Voda	
hustota ρ	8030	998	[kg.m ⁻³]
měrná tepelná kapacita c_p	502.48	4182	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
tepelná vodivost λ	16.27	0.6	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
viskozita η		0.001	[kg.m ⁻¹ s ⁻¹]

Tab. 4.15 – Okrajové podmínky:

	Vstup okolí	Vstup vnitřek	Výstup okolí	Výstup vnitřek	Stěna vnitřek	Stěna okolí	
teplota T	300	560				300	[K]
průtok Q	0.1 voda	0.1					[kg.s ⁻¹]
tlak p			0	0			[Pa]
tok tepla q					0		[W.m ⁻¹]

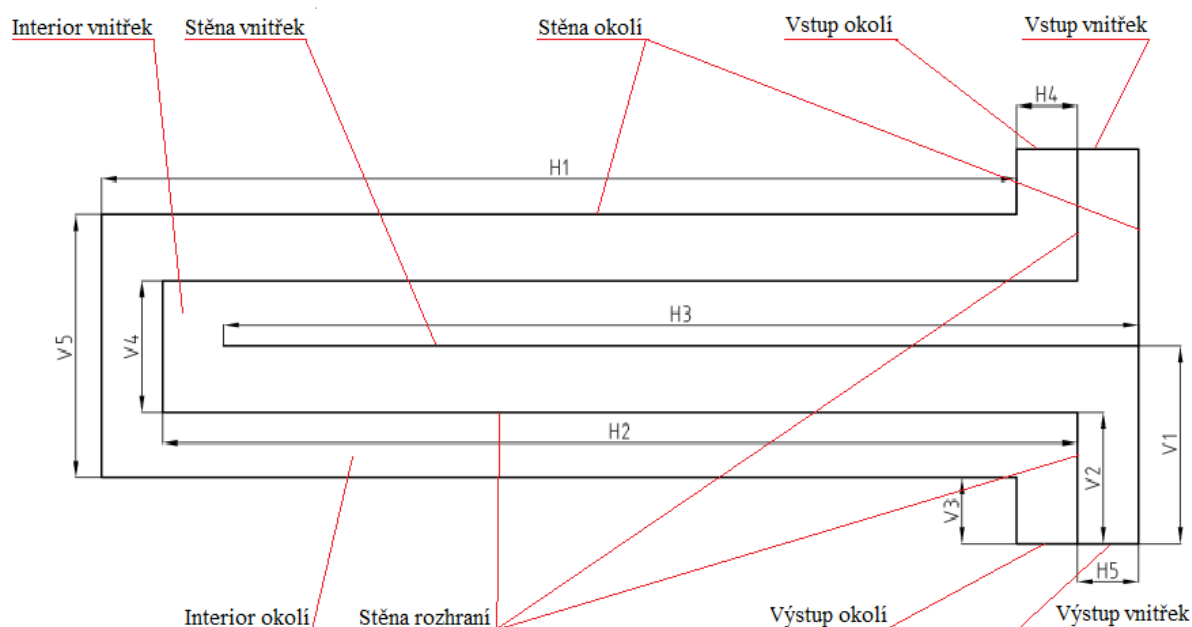
Příklad výsledků k porovnání:



Obrázek 4.12: Rozložení statické teploty v řešené oblasti s vyhodnocením tepelného toku přes stěnu rozhraní.

4.6 Řešení přestupu tepla u souproutého výměníku typ vzduch - voda

Vytvořte matematický model souproutého výměníku a proveďte 2D numerickou simulaci souproutého výměníku dle *Obrázek 4.13*. Řešte výměník typu vzduch-voda. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek. Při řešení můžete použít nekonzstantní fyzikální vlastnosti pro vzduch. Výsledky zhodnoťte.



Obrázek 4.13: Provedení souproutého výměníku ve 2D provedení.

Tab. 4.16 – Rozměry oblastí:

H1=H2=H3	1.5	m
H4	0.1	m
H5	0.1	m
V1	0.3	m
V2	0.2	m
V3	0.1	m
V4	0.2	m
V5	0.4	m

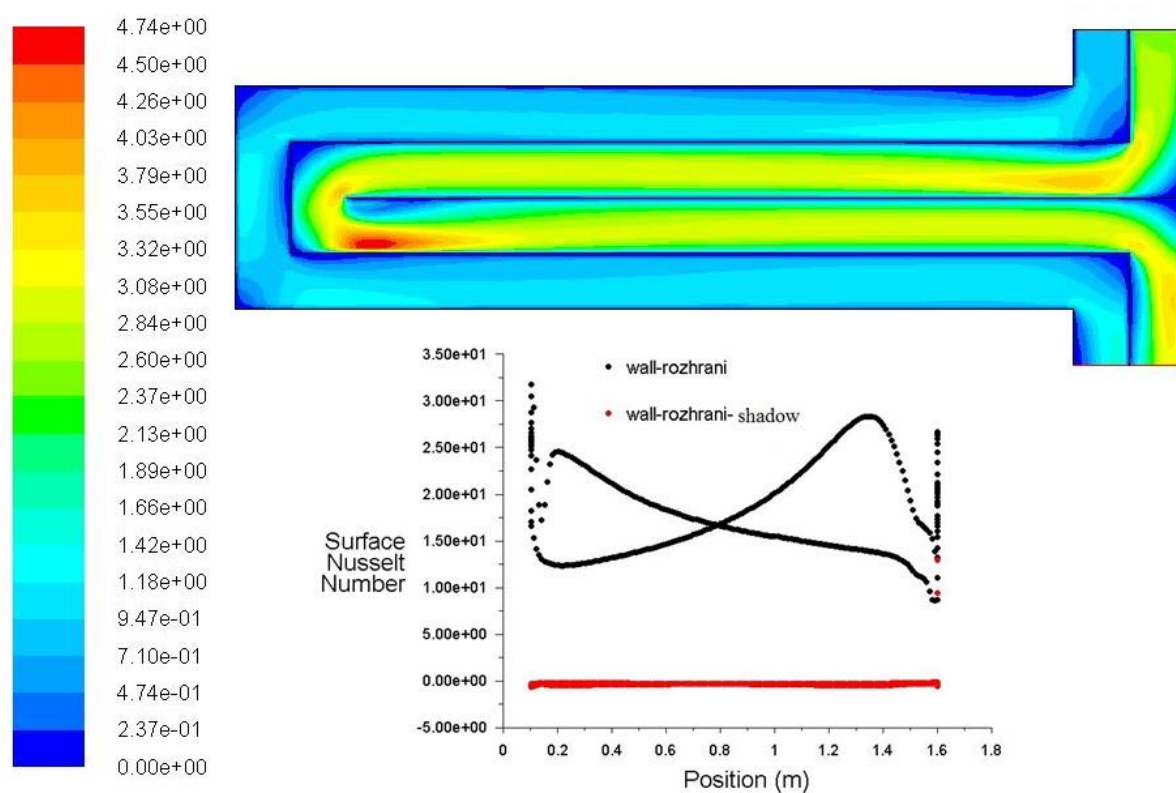
Tab. 4.17 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, vzduch, voda) při 300 K:

Materiál	Ocel	Vzduch	Voda	
hustota ρ	8030	1.225	998	[kg.m ⁻³]
měrná tepelná kapacita c_p	502.48	1006.43	4182	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
tepelná vodivost λ	16.27	0.0242	0.6	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
viskozita η		1.7894e-05	0.001	[kg.m ⁻¹ s ⁻¹]

Tab. 4.18 – Okrajové podmínky:

	Vstup okolí	Vstup vnitřek	Výstup okolí	Výstup vnitřek	Stěna vnitřek	Stěna okolí	
teplota T	300	560				300	[K]
průtok Q	0.1 voda 0.1 vzduch	0.1					[kg.s ⁻¹]
tlak p			0	0			[Pa]
tok tepla q					0		[W.m ⁻¹]

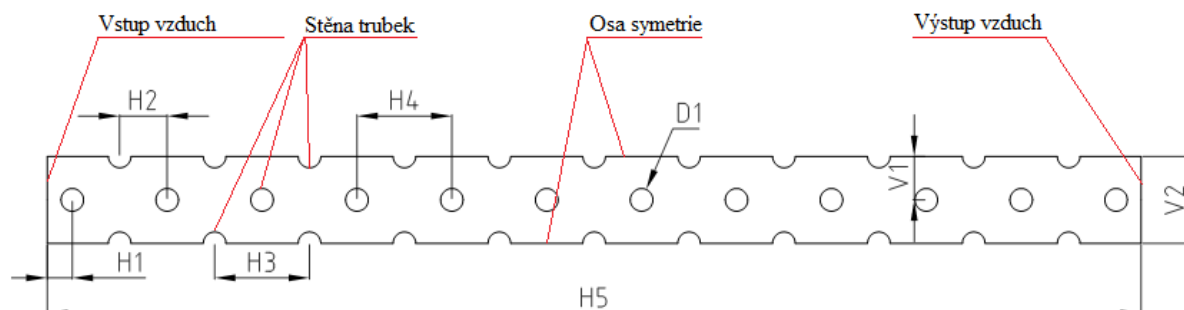
Příklad výsledků k porovnání:



Obrázek 4.14: Vyhodnocení rychlostního pole s odhadem Nusseltova čísla na stěně rozhraní.

4.7 Řešení přestupu tepla svazkem trubek s uspořádáním do kříže

Proveďte numerický výpočet systému trubek uspořádaných do kříže, který je ofukován vzduchem. Daná oblast je vyobrazena níže na *Obrázek 4.15*. Úlohu řešte jako dvourozměrnou. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek a výsledky zhodnoťte.



Obrázek 4.15: Systém trubek uspořádaných do kříže ve 2D provedení.

Tab. 4.19 – Rozměry oblastí:

H1	0.0182	m
H2	0.0343	m
H3	0.0686	m
H4	0.0686	m
H5	0.791	m
V1	0.0313	m
V2	0.0626	m
D1	0.0164	m

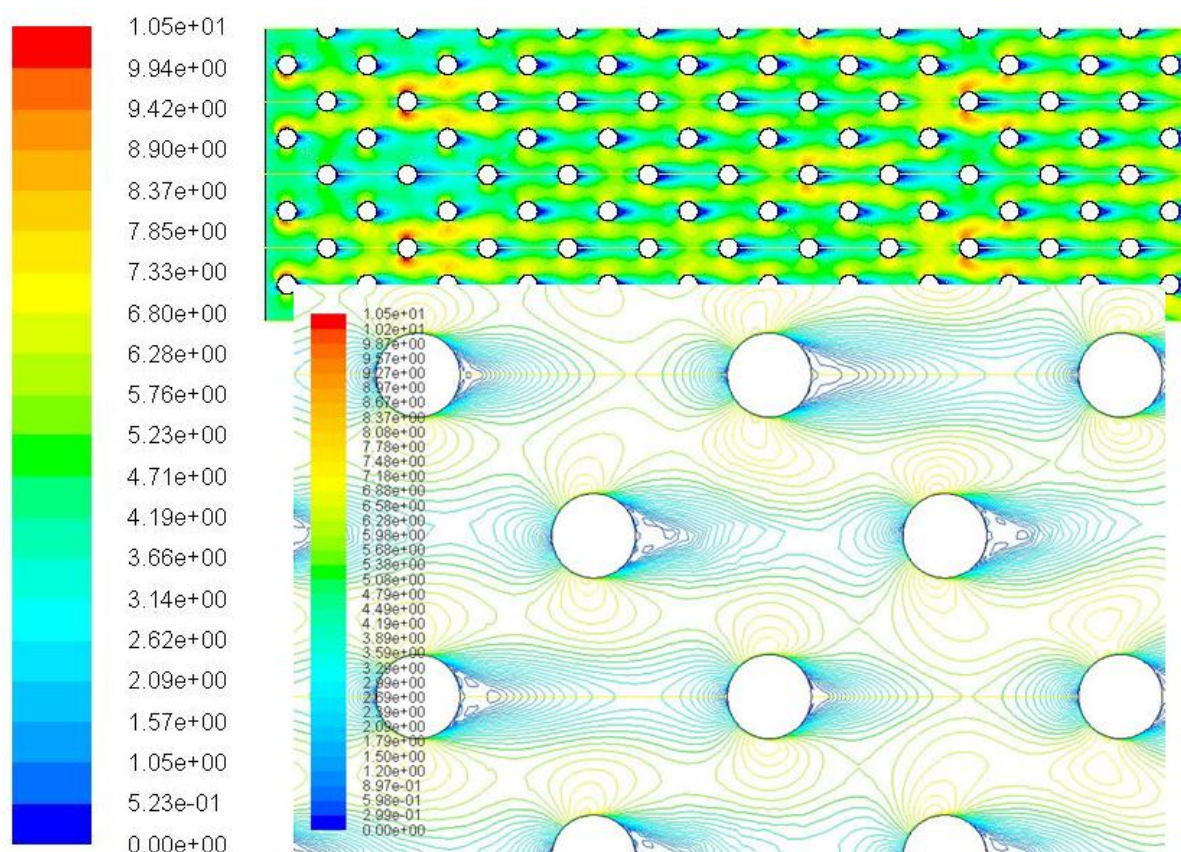
Tab. 4.20 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, vzduch) při 300 K:

Materiál	Ocel	Vzduch	
hustota ρ	8030	1.225	[kg.m ⁻³]
měrná tepelná kapacita c_p	502.48	1006.43	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
tepelná vodivost λ	16.27	0.0242	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
viskozita η		1.7894e-05	[kg.m ⁻¹ s ⁻¹]

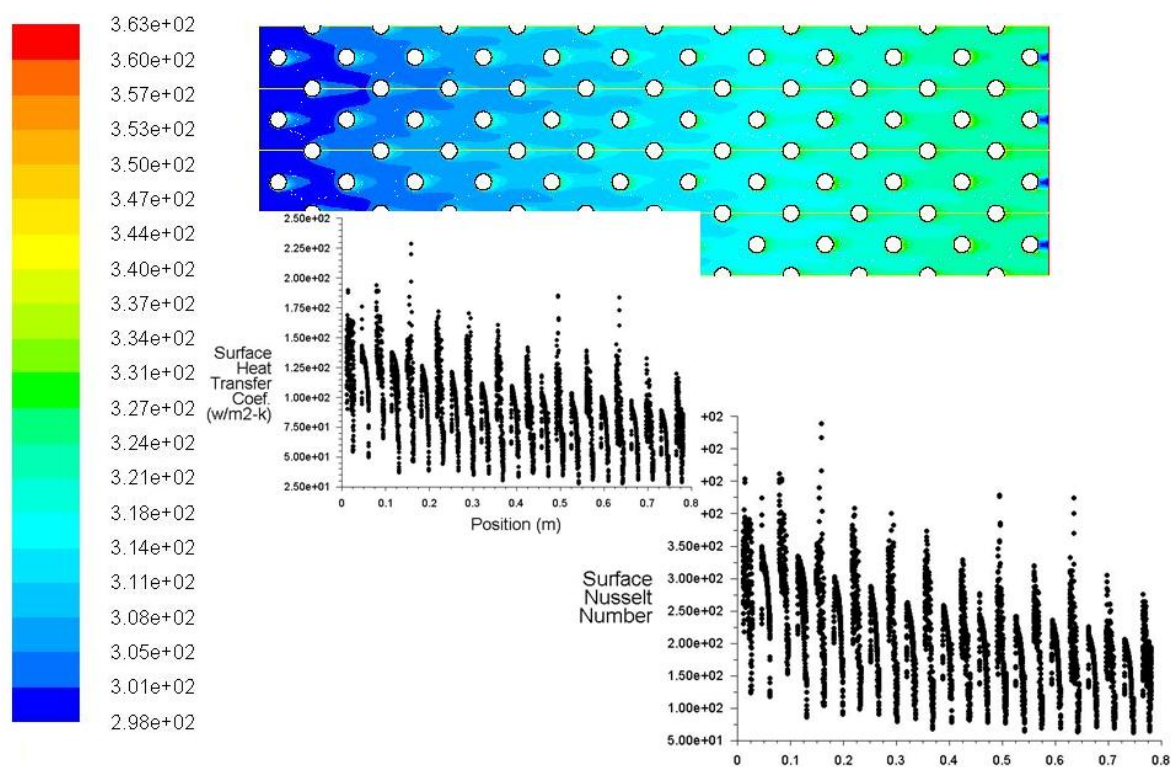
Tab. 4.21 – Okrajové podmínky:

	Vstup vzduch	Výstup vzduch	Stěna trubek
teplota T	298.15		363.15 [K]
průtok Q	0.3		[kg.s ⁻¹]
tlak p		0	[Pa]

Příklad výsledků k porovnání:



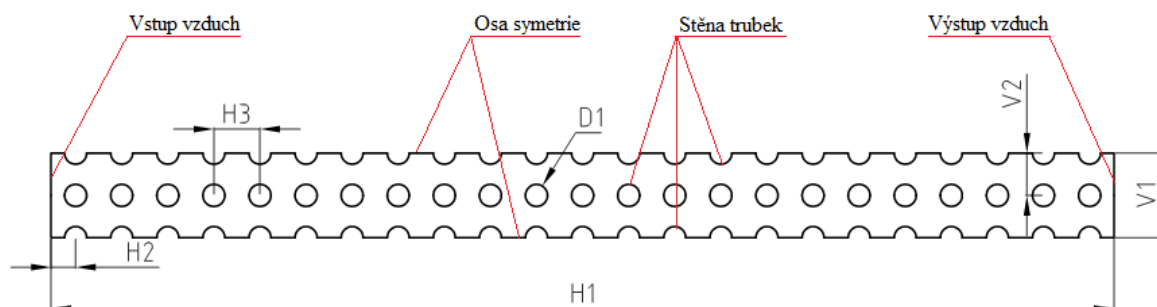
Obrázek 4.16: Grafické znázornění kontur rychlostí s detailem na obtékání stěn trubek.



Obrázek 4.17: Rozložení teplotního pole zkoumané oblasti s odhady součinitele přestupu tepla a Nusseltova čísla na stěnách potrubí.

4.8 Řešení přestupu tepla svazkem trubek - uspořádání za sebou

Proveďte numerický výpočet systému trubek uspořádaných za sebou, který je ofukován vzduchem. Daná oblast je vyobrazena na *Obrázek 4.18*. Úlohu řešte jako 2D rozměrnou. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadáných okrajových podmínek a výsledky zhodnoťte v závěrečné zprávě dle osnovy vypracování.



Obrázek 4.18: Systém trubek uspořádaných za sebou ve 2D provedení.

Tab. 4.22 – Rozměry oblasti:

H1	0.791	m
H2	0.0182	m
H3	0.0343	m
V1	0.0313	m
V2	0.0626	m
D1	0.0164	m

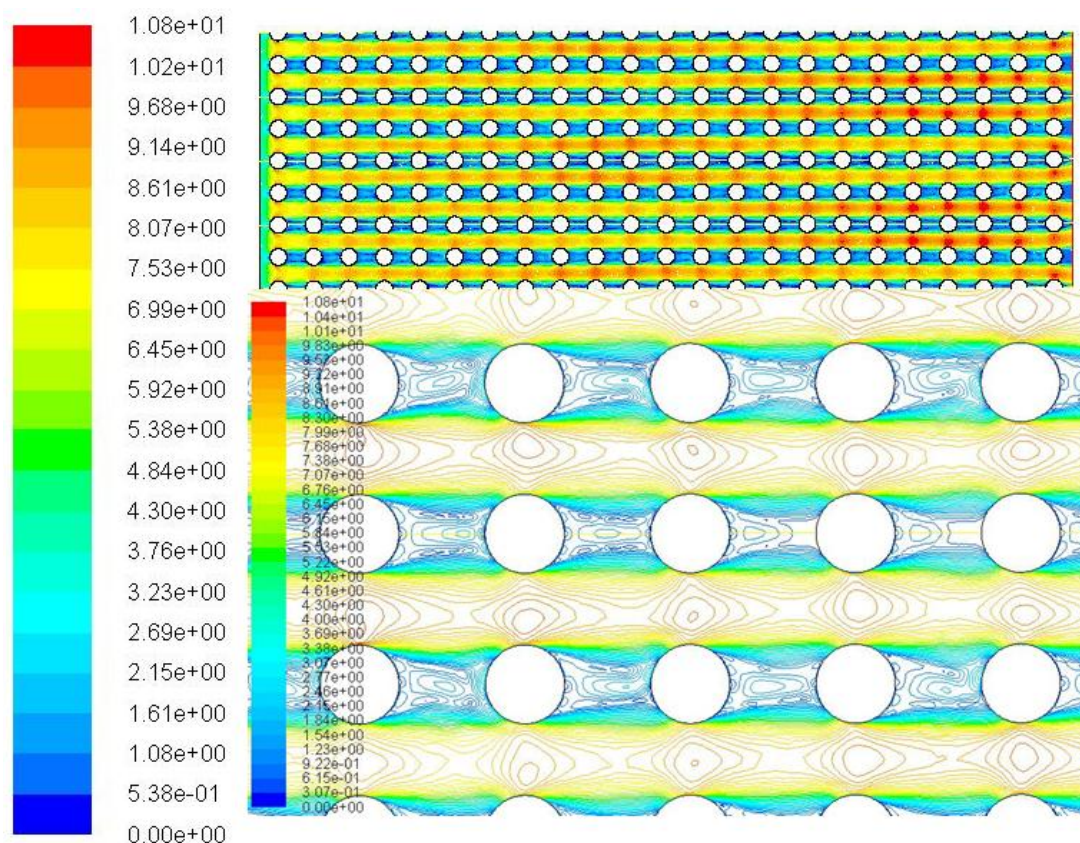
Tab. 4.23 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, vzduch) při 300 K:

Materiál	Ocel	Vzduch	
hustota ρ	8030	1.225	[kg.m ⁻³]
měrná tepelná kapacita c_p	502.48	1006.43	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
tepelná vodivost λ	16.27	0.0242	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
viskozita η		1.7894e-05	[kg.m ⁻¹ s ⁻¹]

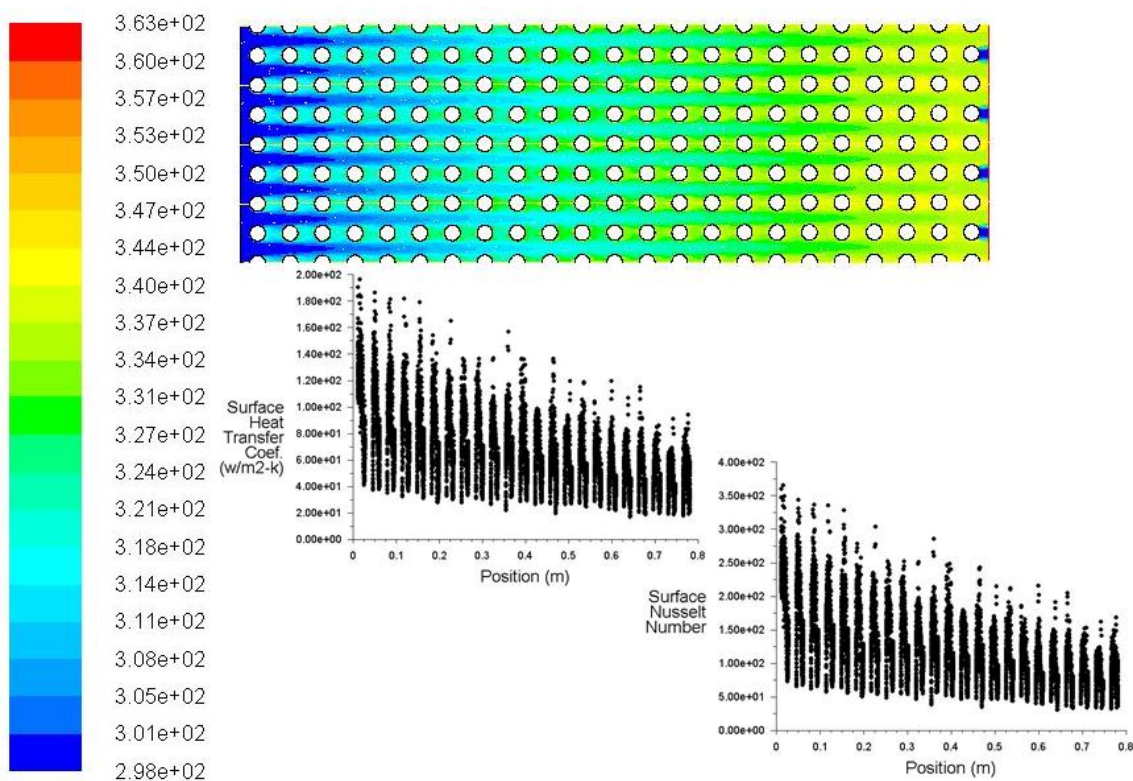
Tab. 4.24 – Okrajové podmínky:

	Vstup vzduch	Výstup vzduch	Stěna trubek
teplota T	298.15		363.15 [K]
průtok Q	0.3		[kg.s ⁻¹]
tlak p		0	[Pa]

Příklad výsledků k porovnání:



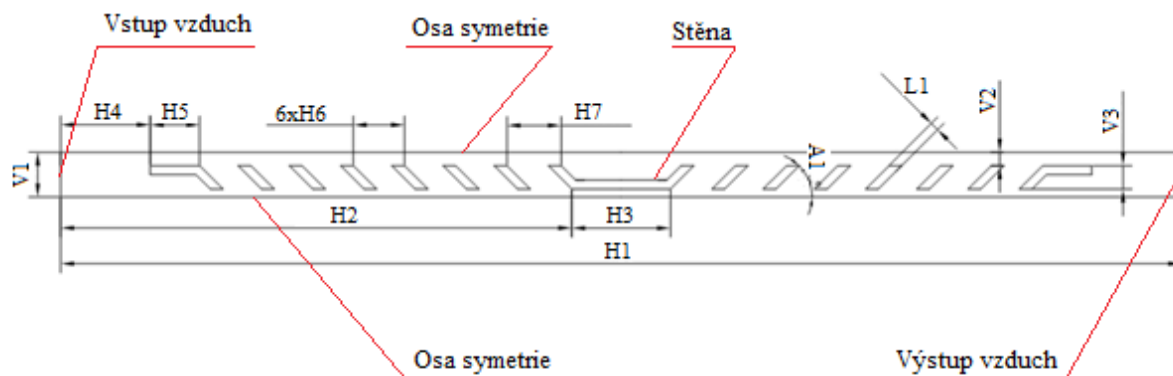
Obrázek 4.19: Grafické znázornění kontur rychlostí s detailem na obtékání stěn trubek.



Obrázek 4.20: Rozložení teplotního pole zkoumané oblasti s odhady součinitele přestupu tepla a Nusseltova čísla na stěnách potrubí.

4.9 Řešení přestupu tepla voštinovým výměníkem

Proveďte 2D matematickou simulaci voštinového výměníku (žaluziová výplň), který je vyobrazen na *Obrázek 4.21*. Výpočet opakujte pro různé varianty rychlosti. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek a výsledky zhodnoťte.



Obrázek 4.21: Provedení voštinového výměníku ve 2D rozměru.

Tab. 4.25 – Rozměry oblastí:

H1	1.25	m
H2	0.57	m
H3	0.11	m
H4	0.1	m
H5	0.055	m
6xH6	0.0571	m
H7	0.0605	m
V1	0.05	m
V2	0.015	m
V3	0.026	m
L1	0.015	m
A1	45	°

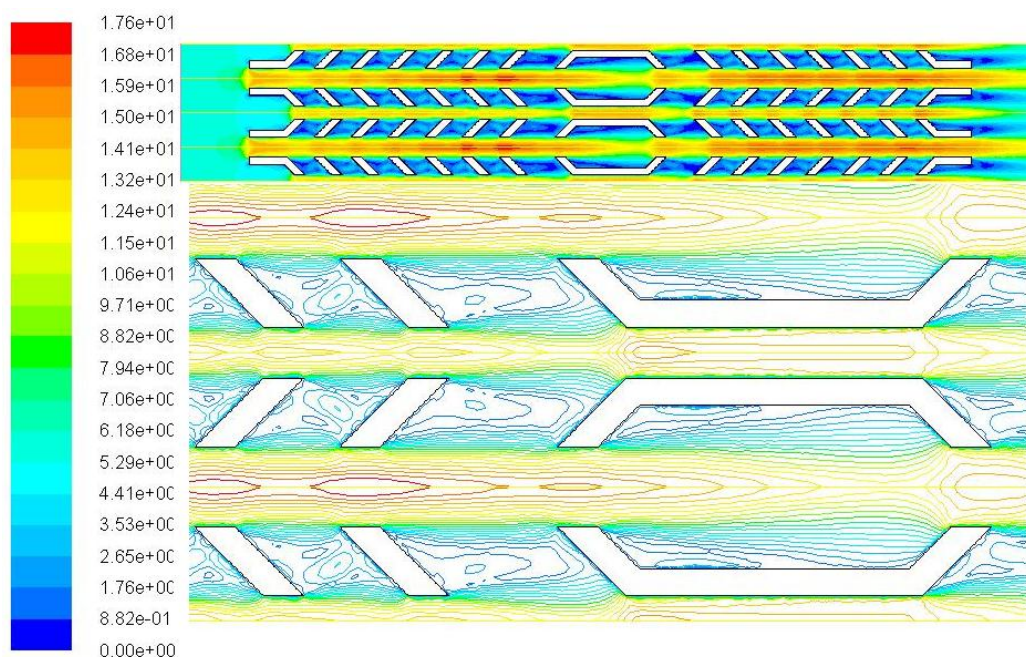
Tab. 4.26 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, vzduch) při 300 K:

Materiál	Ocel	Vzduch	
hustota ρ	8030	1.225	[kg.m ⁻³]
měrná tepelná kapacita c_p	502.48	1006.43	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
tepelná vodivost λ	16.27	0.0242	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
viskozita η		1.7894e-05	[kg.m ⁻¹ s ⁻¹]

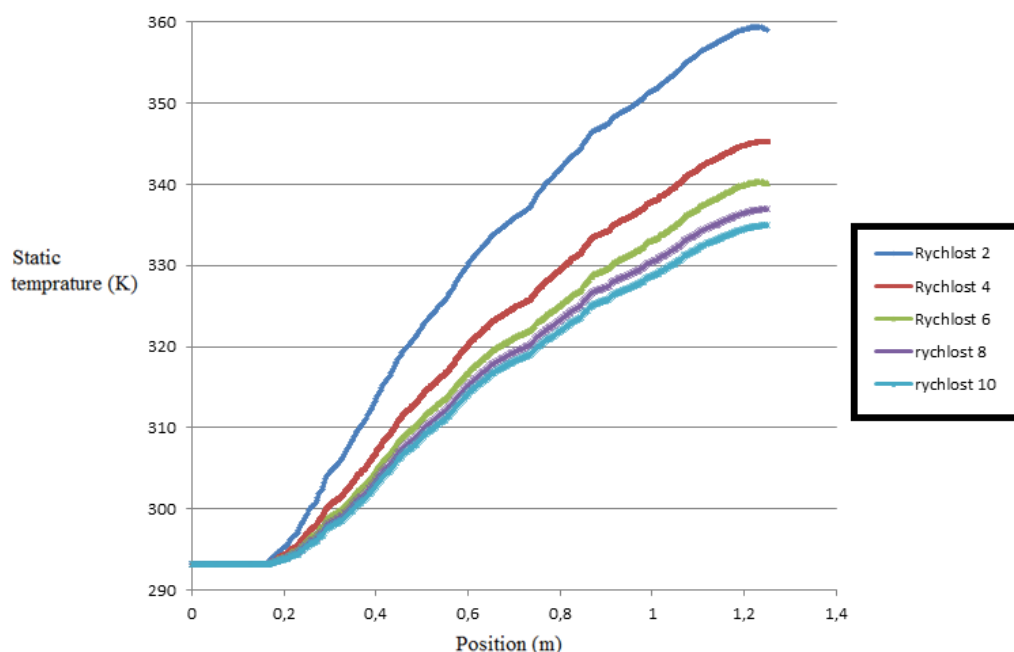
Tab. 4.27 – Okrajové podmínky:

	Vstup vzduch	Výstup vzduch	Stěna
teplota T	293.15		393.15 [K]
rychlost v	2, 4, 6, 8, 10		[m.s ⁻¹]
tlak p		0	[Pa]

Příklad výsledků k porovnání:



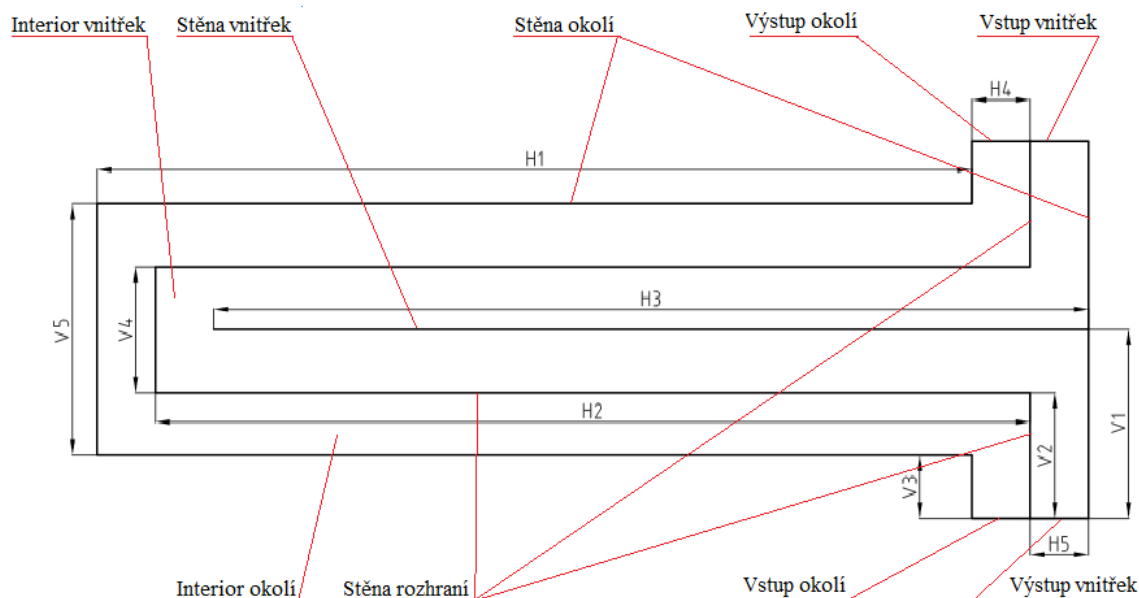
Obrázek 4.22: Kontury proudového pole s detailem na voštiny kde je patrné odtržení proudů. Výsledky jsou pro vstupní rychlost $v = 6 \text{ m.s}^{-1}$.



Obrázek 4.23: Srovnání statických teplot po délce výměníku (v místě osy symetrie) při různých variantách vstupních rychlostí

4.10 Řešení přestupu tepla u protiproudého výměníku typ voda - voda

Vytvořte matematický model protiproudého výměníku a proveďte 2D numerickou simulaci souproudého výměníku dle Obrázek 4.24. Řešte výměník typu voda-voda. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek a výsledky zhodnoťte.



Obrázek 4.24: Protiproudý výměník ve 2D provedení.

Tab. 4.28 – Rozměry oblastí:

H1=H2=H3	1.5	m
H4	0.1	m
H5	0.1	m
V1	0.3	m
V2	0.2	m
V3	0.1	m
V4	0.2	m
V5	0.4	m

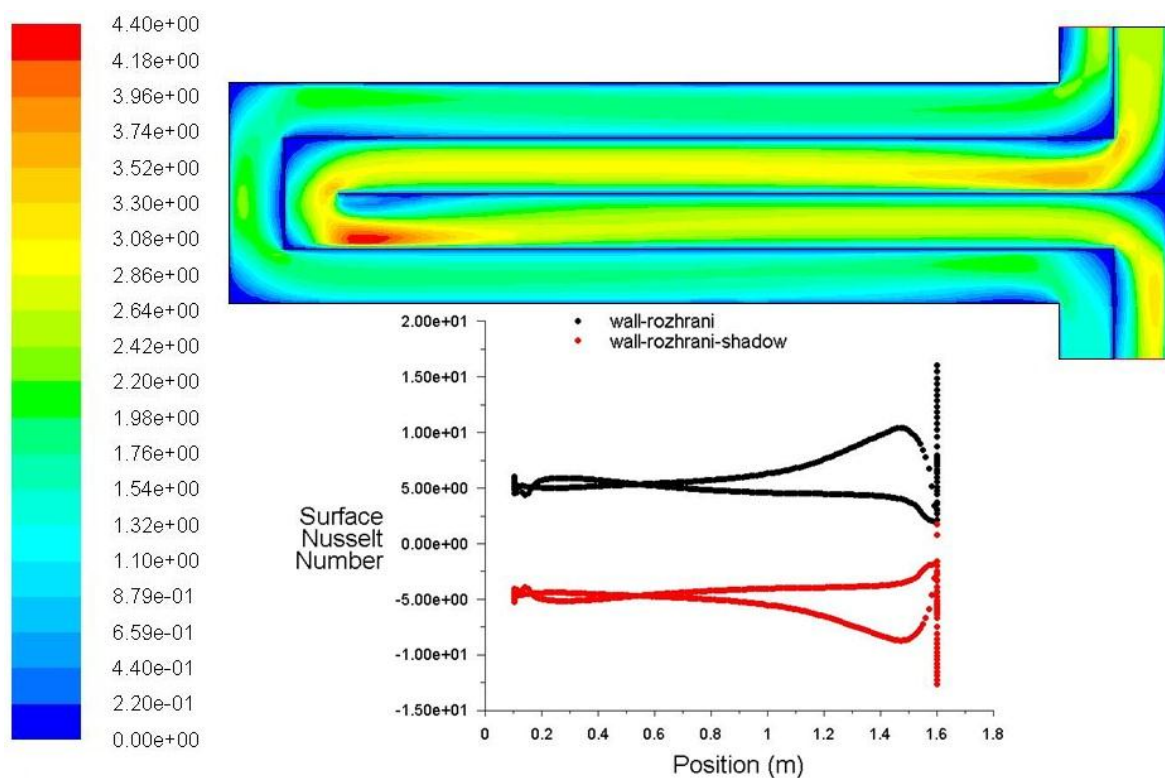
Tab. 4.29 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, voda) při 300 K:

Materiál	Ocel	Voda	
hustota ρ	8030	998	[kg.m ⁻³]
měrná tepelná kapacita c_p	502.48	4182	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
tepelná vodivost λ	16.27	0.6	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
viskozita η		0.001	[kg.m ⁻¹ s ⁻¹]

Tab. 4.30 – Okrajové podmínky:

	Vstup okolí	Vstup vnitřek	Výstup okolí	Výstup vnitřek	Stěna vnitřek	Stěna okolí
teplota T	300	560				300 [K]
průtok Q	0.1 voda	0.1				[kg.s ⁻¹]
tlak p			0	0		[Pa]
tok tepla q					0	[W.m ⁻¹]

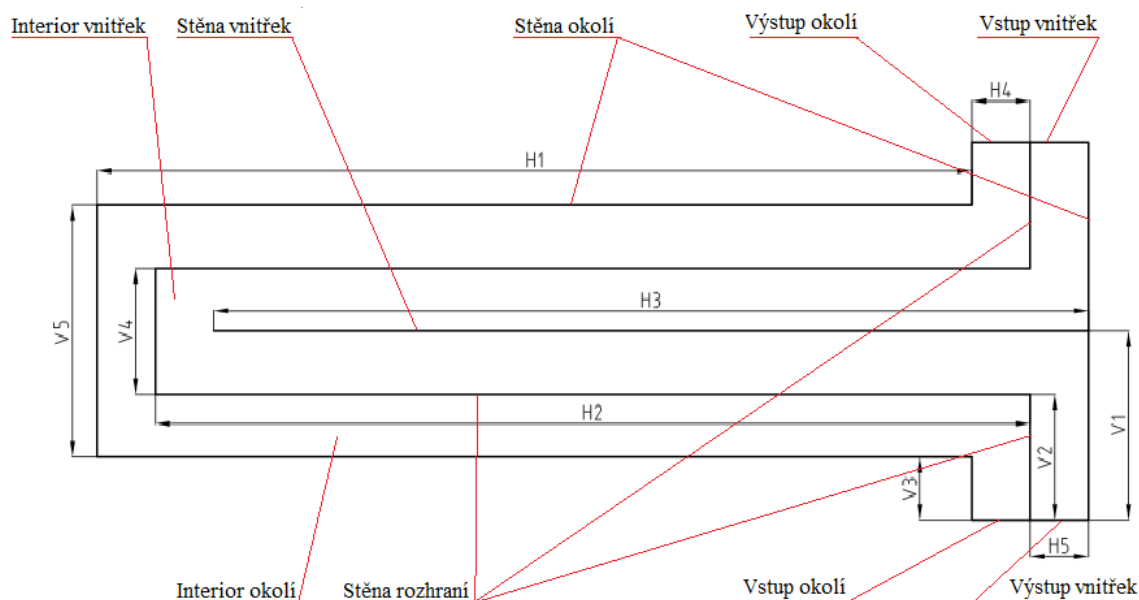
Příklad výsledků k porovnání:



Obrázek 4.25: Vyhodnocení rychlostního pole s odhadem Nusseltova čísla na stěně rozhraní mezi oběma řešenými oblastmi.

4.11 Řešení přestupu tepla u protiproudého výměníku typ vzduch - voda

Vytvořte matematický model protiproudého výměníku a proveďte 2D numerickou simulaci souproudého výměníku dle *Obrázek 4.26*. Řešte výměník typu vzduch-voda. Definujte jednotlivé oblasti a parametry dle zadaných okrajových podmínek a výsledky zhodnoťte v závěrečné zprávě dle osnovy vypracování.



Obrázek 4.26: Protiproudý výměník ve 2D provedení.

Tab. 4.31 – Rozměry oblastí:

H1=H2=H3	1.5	m
H4	0.1	m
H5	0.1	m
V1	0.3	m
V2	0.2	m
V3	0.1	m
V4	0.2	m
V5	0.4	m

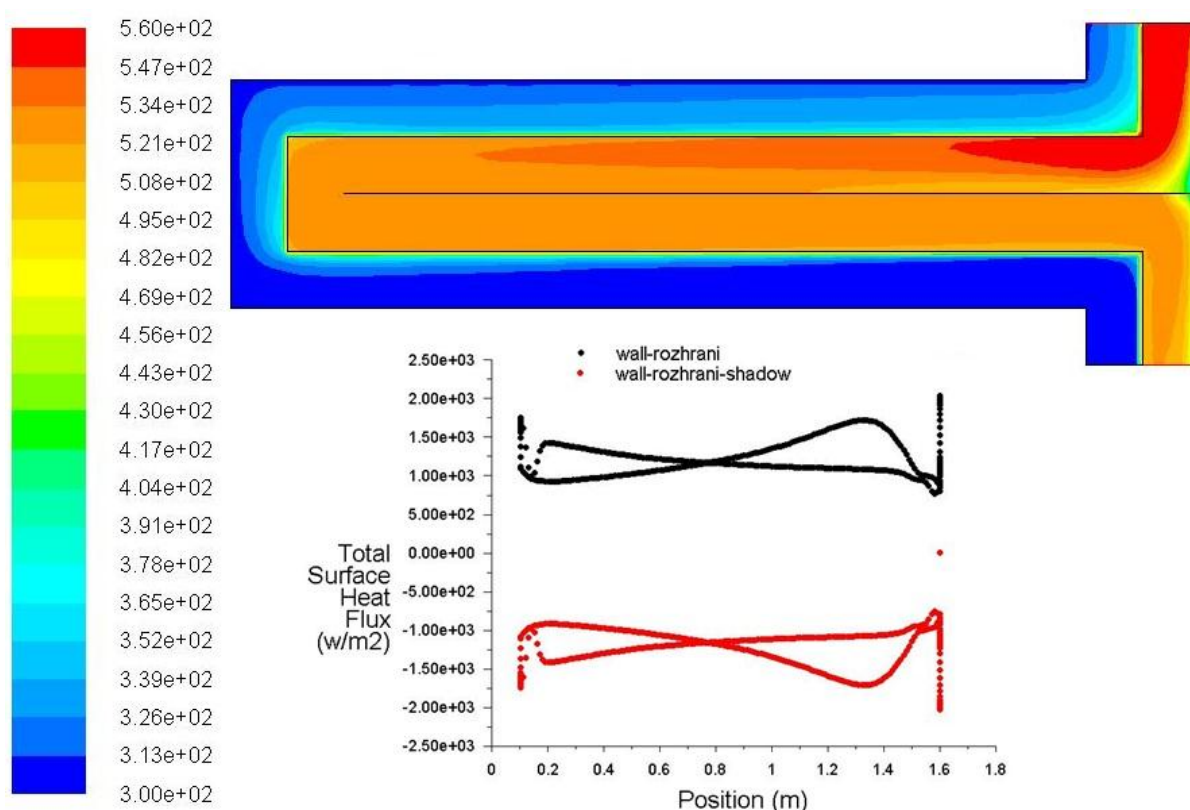
Tab. 4.32 – Fyzikální vlastnosti materiálu (ocel, vzduch, voda) při 300 K:

Materiál	Ocel	Vzduch	Voda	
hustota ρ	8030	1.225	998	[kg.m ⁻³]
měrná tepelná kapacita c_p	502.48	1006.43	4182	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
tepelná vodivost λ	16.27	0.0242	0.6	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
viskozita η		1.7894e-05	0.001	[kg.m ⁻¹ s ⁻¹]

Tab. 4.33 – Okrajové podmínky:

	Vstup okolí	Vstup vnitřek	Výstup okolí	Výstup vnitřek	Stěna vnitřek	Stěna okolí	
teplota T	300	560				300	[K]
průtok Q	0.1 voda 0.1 vzduch	0.1					[kg.s ⁻¹]
tlak p			0	0			[Pa]
tok tepla q					0		[W.m ⁻¹]

Příklad výsledků k porovnání:



Obrázek 4.27: Rozložení statické teploty v řešené oblasti s vyhodnocením tepelného toku přes stěnu rozhraní



Další zdroje

1. JANALÍK, J.; ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin*. VŠB-TUO, Ostrava, 2002, 125s. ISBN 80-248-0038-1.

2. KOZUBKOVÁ, M.; BLEJCHAŘ, T., BOJKO, M. *Modelování přenosu hmoty, hybnosti a tepla*. VŠB-TUO, Ostrava, 2011, 174s. ISBN - 978-80-248-2491-8.
3. FLUENT: FLUENT 13 - *User's guide*. Fluent Inc. 2009 [online]. Dostupné z < <http://spc.vsb.cz/portal/cz/documentation/manual/index.php> >.
4. BOJKO, M.: *3D Proudění – ANSYS Fluent*, e-learningová skripta, VŠB-Technická Univerzita Ostrava, 2010, 226s.