

STEAM FLOW DISTRIBUTION IN THE SEPARATOR OF VVER 440

F. Jirouš* , P. Härtel**

Summary: *The reactors VVER – 440 are cooled and moderated by pressurized water – PWR. The primary coolant is subcooled in the PWR and steam is generated by transferring energy from the primary system to a lower pressure fluid in the steam generator. Steam flow from the generator reaches the high pressure turbine . After expansion in the high pressure turbine, the steam passes through a moisture separator, which is a low pressure drop separator external to the turbine. After passing through this separator, the steam is reheated before entering the low pressure turbine. Separator surfaces can suffer erosion–corrosion. Erosion rate is a function of velocity and of moisture stream. The paper deals with the influence of separator head design on flow distribution in the separator system.*

1. Úvod

Separátory – přihříváky páry u jaderných bloků VVER 440 slouží k odloučení vlhkosti z mokré páry, která do separační části vstupuje z vysokotlakého dílu turbíny, k jejímu přihřátí v přihříváku páry a k následnému vyvedení do nízkotlakého dílu turbíny. Separátor – přihřívák je svislá nádoba, jejíž horní polovinu tvoří separátor páry. Mokrý pára po expanzi ve vysokotlakém dílu turbíny vstupuje vstupním hrdlem do rozdělovací hlavy separátoru. V hlavě separátoru mění pára směr svisle dolů a vstupuje do separačních sekcí. Separační sekce jsou tvořeny soustavou separačních kazet z vlnitých plechů umístěných nad sebou. Uvnitř kazet žaluziového typu nastává odlučování vody z parovodní směsi vlivem změny směru proudění páry. Po obvodu válcové separační části je umístěno několik separačních sekcí, které jsou od sebe odděleny stěnami. Odloučená vlhkost z páry se odvádí hrdlem a pára zbavená vlhkosti proudí svisle dolů do přihřívákové části.

Požadavkem na konstrukci hlavy separátoru je rovnoměrné rozdělení parovodní směsi do jednotlivých separačních sekcí. Při nerovnoměrném proudění parovodní směsi do separačních sekcí hrozí nebezpečí, že v místech kazet s největší rychlostí proudění by nastávalo erozně – korozní poškození. V příspěvku je uveden návrh na úpravu hlavy separátoru pro zrovnoměnění vstupu páry do jednotlivých separačních sekcí. Zadavatelem úlohy byla společnost Vítkovice a.s. Ostrava.

*Prof. Ing. František Jirouš, DrSc., tel.: 420.224352524, fax: 420.224353705; E-Mail: Frantisek.Jirous@fs.cvut.cz

**Ing. Pavel Härtel, tel. 00420 224352930, fax. 00420 224353705, E-mail: hartel@student.fsid.cvut.cz

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a energetiky, Odbor tepelných a jaderných energetických zařízení, Technická 4, 166 07 Praha 6

Proudění parovodní směsi a její rovnoměrné rozdělení do separačních sekcí v rozdělovací hlavě je též rozhodující pro zachování maximální účinnosti separátoru. Je proto kladen takový důraz na rovnoměrné rozdělení parovodní směsi do separačních sekcí.

2. Matematický model proudění v hlavě separátoru

Byl sestaven matematický model proudění v hlavě separátoru s ohledem na měnění se průtočný průřez, ale za zjednodušujících podmínek, že proud si zachovává směr rychlosti proudění shodný se vstupní rychlostí z hrdla separátoru. Průtočný průřez se mění podle obr. 1 v důsledku válcové geometrie hlavy o vnitřním poloměru R a v důsledku osově trubky v hlavě separátoru o vnějším poloměru r . Soustava x a y je zvolena tak, že x je vzdálenost v hlavě separátoru od vstupu proudu z hrdla ve směru proudění v hlavě a y je poloviční příčný rozměr průtočného průřezu. Je hledána výška h průtočného průřezu z hmotnostní bilance za podmínky, že osová rychlost proudění do separačních sekcí je konstantní, a šířkový rozměr y se mění v závislosti na vzdálenosti x od vstupního hrdla v důsledku válcové geometrie hlavy separátoru a v důsledku vnitřní osově trubky ve čtyřech oblastech.

Matematický model proudění v rozdělovací hlavě separátoru je sestaven za předpokladu, že tlakový rozdíl separačních sekcí je stejný. Aby nedocházelo k růstu tlaku se snižující se rychlostí proudění parovodní směsi v rozdělovací hlavě, je dána též podmínka konstantní radiální rychlosti proudění v rozdělovací hlavě.

Na základě uvedených předpokladů a za daných podmínek, je hmotnostní průtok v místě x podle obr. 1 dán rovnicí:

$$M(x) = 2 \cdot V_1 \cdot \rho_1 \cdot y(x) \cdot h(x) \quad (1)$$

Pro elementární množství je

$$dM(x) = 2 \cdot V_1 \cdot \rho_1 \cdot d(y \cdot h) \quad (2)$$

Současně z rovnice kontinuity je

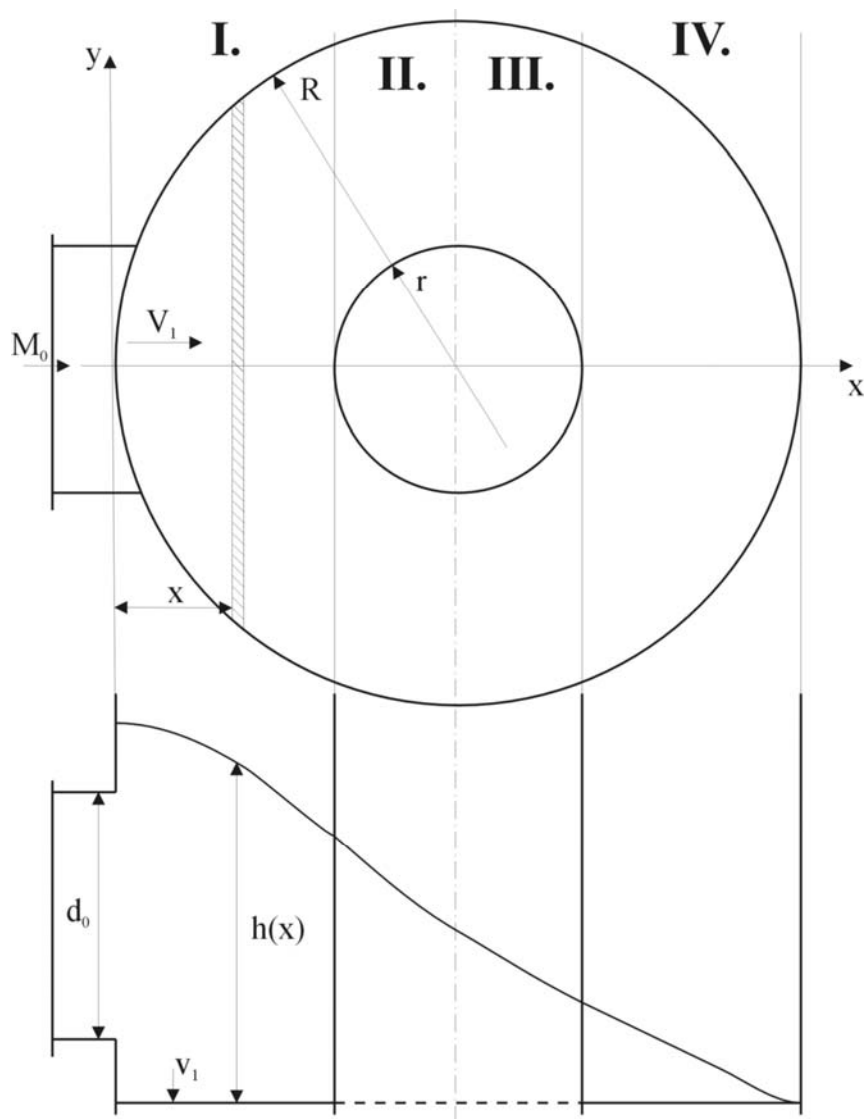
$$dM(x) = -2 \cdot y \cdot dx \cdot v_1 \cdot \rho_1 \quad (3)$$

S hmotnostním průtokem M_0 je vstupní rychlost z hrdla do hlavy separátoru

$$V_{10} = \frac{4 \cdot M_0}{\pi \cdot d_0^2 \cdot \rho_1} = konst. \quad (4)$$

A axiální vstupní rychlost do separačních sekcí

$$v_1 = \frac{M_0}{\pi \cdot (R^2 - r^2) \cdot \rho_1} = konst. \quad (5)$$



Obr. 1 Schematické zobrazení rozdělovací hlavy separátoru

Pro interval **I**

$$x_0 \leq x \leq (R - r) \quad \text{kde } x_0 = 0$$

platí rovnice:

$$y = \sqrt{R^2 - (x - R)^2} \quad (6)$$

$$M(x) = M_0 - 2 \cdot v_1 \cdot \rho_1 \cdot \int_{x_0}^x y \, dx \quad (7)$$

$$M(x) = 2 \cdot y \cdot h(x) \cdot \rho_1 \cdot V_1 \quad (8)$$

$$h(x) = \frac{M(x)}{2 \cdot y \cdot \rho_1 \cdot V_1} \quad (9)$$

$$M(R-r) = M_0 - 2 \cdot v_1 \cdot \rho_1 \cdot \int_{x_0}^{(R-r)} y \, dx \quad (10)$$

$$h(R-r) = \frac{M(R-r)}{2 \cdot \sqrt{R^2 - r^2} \cdot \rho_1 \cdot V_1} \quad (11)$$

Pro interval **II** platí:

$$(R-r) \leq x \leq R$$

$$y = \sqrt{R^2 - (x-R)^2} - \sqrt{r^2 - (x-R)^2} \quad (12)$$

$$M(x) = M(R-r) - 2 \cdot v_1 \cdot \rho_1 \cdot \int_{(R-r)}^x y \, dx \quad (13)$$

$$h(x) = \frac{M(x)}{2 \cdot y \cdot \rho_1 \cdot V_1} \quad (14)$$

$$M(R) = M(R-r) - 2 \cdot v_1 \cdot \rho_1 \cdot \int_{(R-r)}^R y \, dx \quad (15)$$

$$h(R) = \frac{M(R)}{2 \cdot (R-r) \cdot \rho_1 \cdot V_1} \quad (16)$$

Pro interval **III** platí:

$$R \leq x \leq (R+r)$$

$$y = \sqrt{R^2 - (x-R)^2} - \sqrt{r^2 - (x-R)^2} \quad (17)$$

$$M(x) = M(R) - 2 \cdot v_1 \cdot \rho_1 \cdot \int_R^x y \, dx \quad (18)$$

$$h(x) = \frac{M(x)}{2 \cdot y \cdot \rho_1 \cdot V_1} \quad (19)$$

$$M(R+r) = M(R) - 2 \cdot v_1 \cdot \rho_1 \cdot \int_R^{(R+r)} y \, dx \quad (20)$$

$$h(R+r) = \frac{M(R+r)}{2 \cdot (R^2 - r^2) \cdot \rho_1 \cdot V_1} \quad (21)$$

Pro interval **IV** platí:

$$(R+r) \leq x \leq 2 \cdot R$$

$$y = \sqrt{R^2 - (x - R)^2} \quad (22)$$

$$M(x) = M(R+r) - 2 \cdot v_1 \cdot \rho_1 \cdot \int_{R+r}^x y \, dx \quad (23)$$

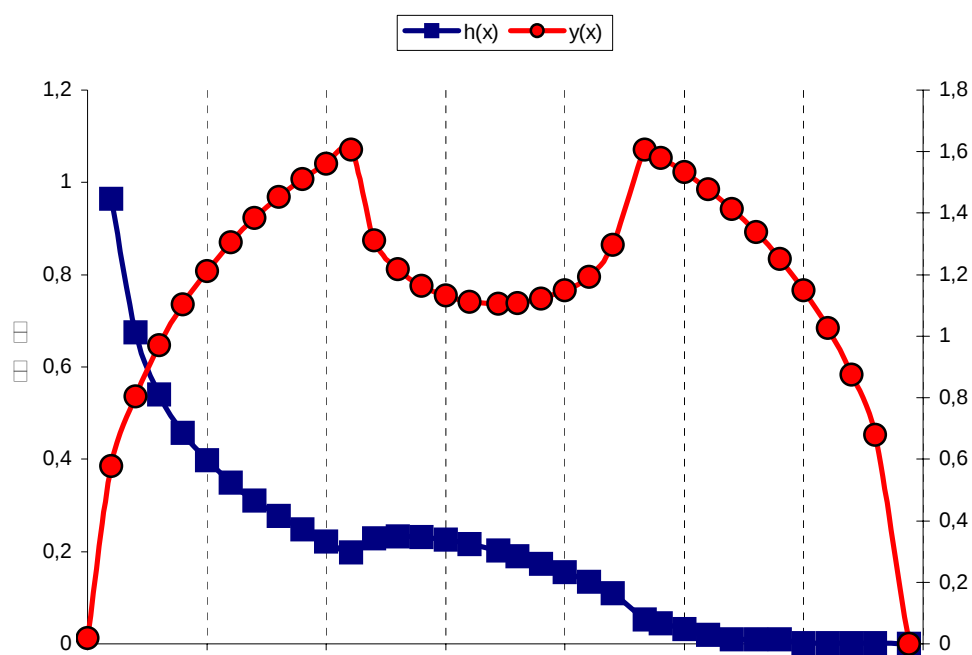
$$h(x) = \frac{M(x)}{2 \cdot y \cdot \rho_1 \cdot V_1} \quad (24)$$

$$M(2 \cdot R) = 0 \quad (25)$$

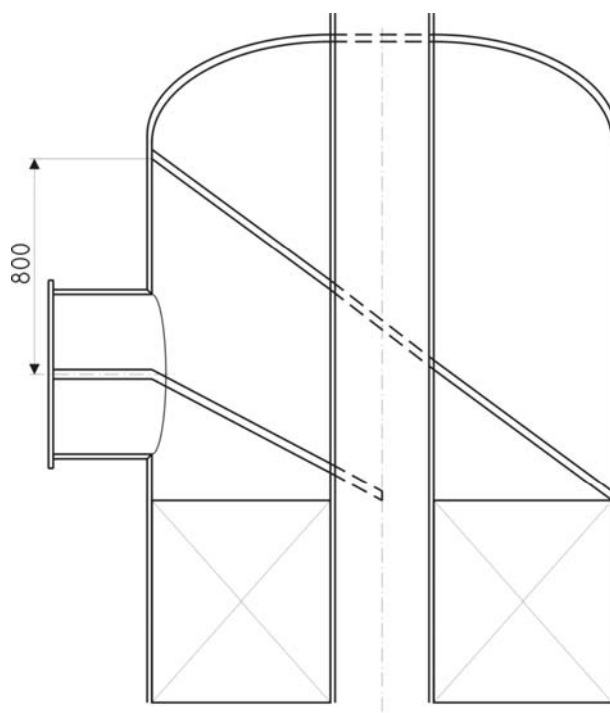
$$y(2 \cdot R) = 0 \quad (26)$$

$$h(2 \cdot R) = 0 \quad (27)$$

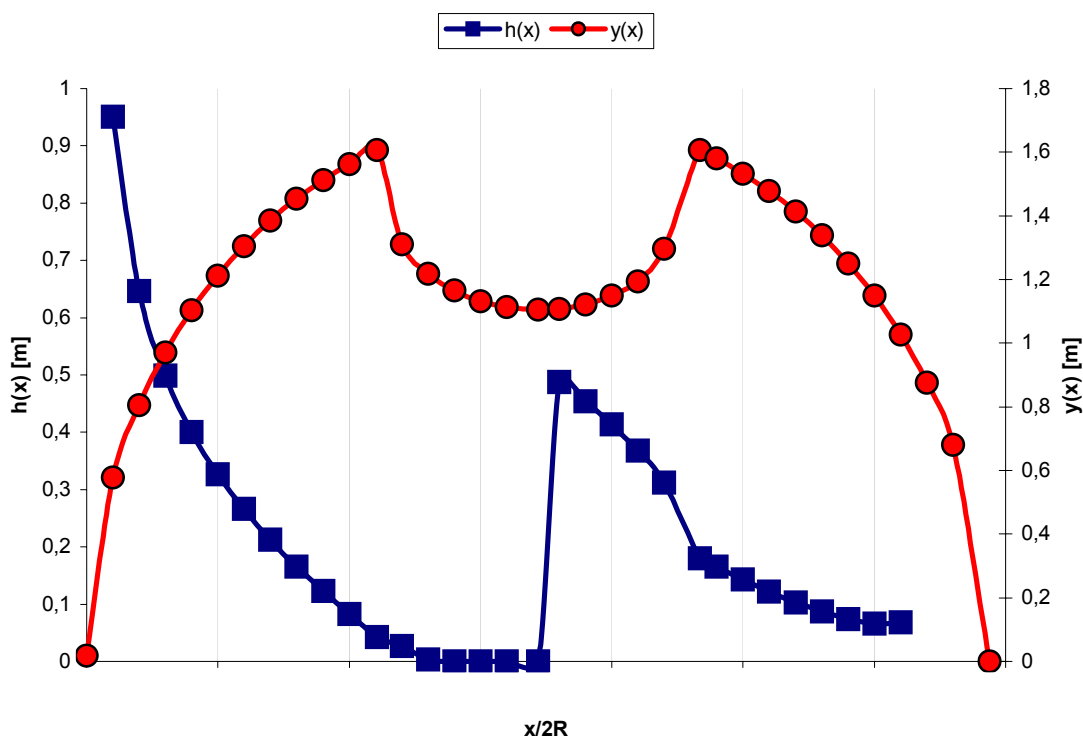
Průběh výšky plochy pro konstantní rychlost proudění na vstupu do separačních sekcí určený podle matematického modelu je na obr. 2. Po propočítání několika variant byla zadavateli navržena konstrukční úprava podle obr. 3. Vsazené usměrňovací plochy rozpůlí vstupující proud parovodní směsi a aproximací výšky plochy pro konstantní rychlost proudění do separačních sekcí, určené matematickým modelem, vznikne řešení zadané úlohy.



Obr. 2 Průběh výšky plochy konstantní rychlosti



Obr. 3 Návrh konstrukční úpravy



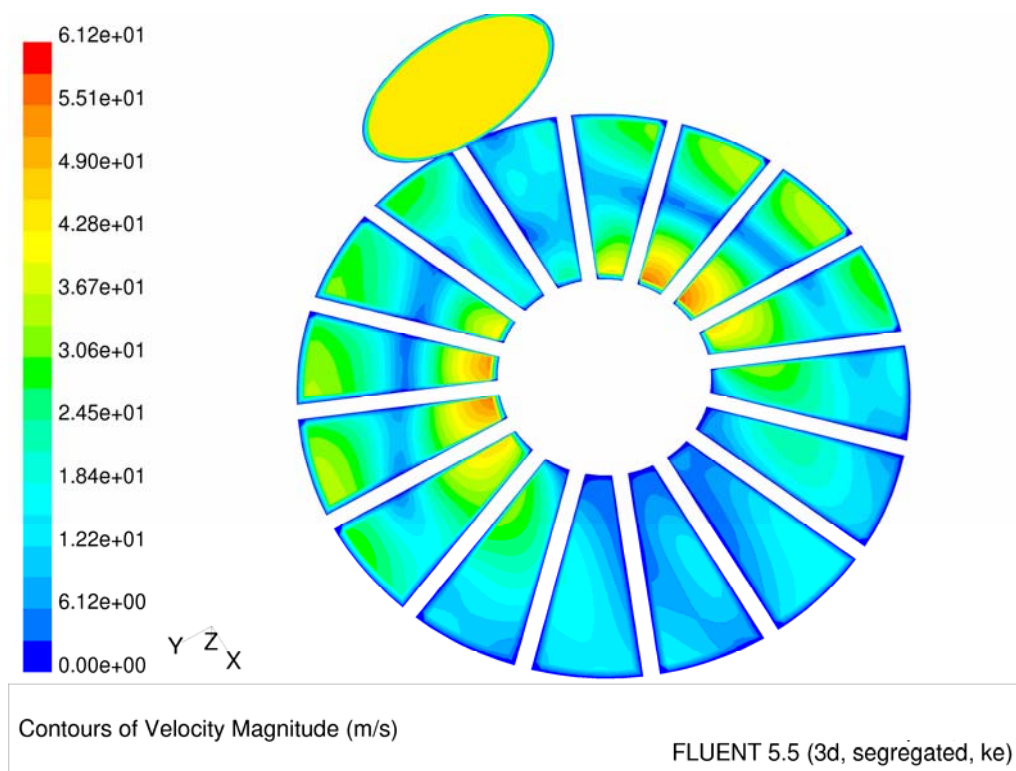
Obr. 4 Průběh výšky plochy konstantní rychlosti

3. Výpočty prováděné programem FLUENT

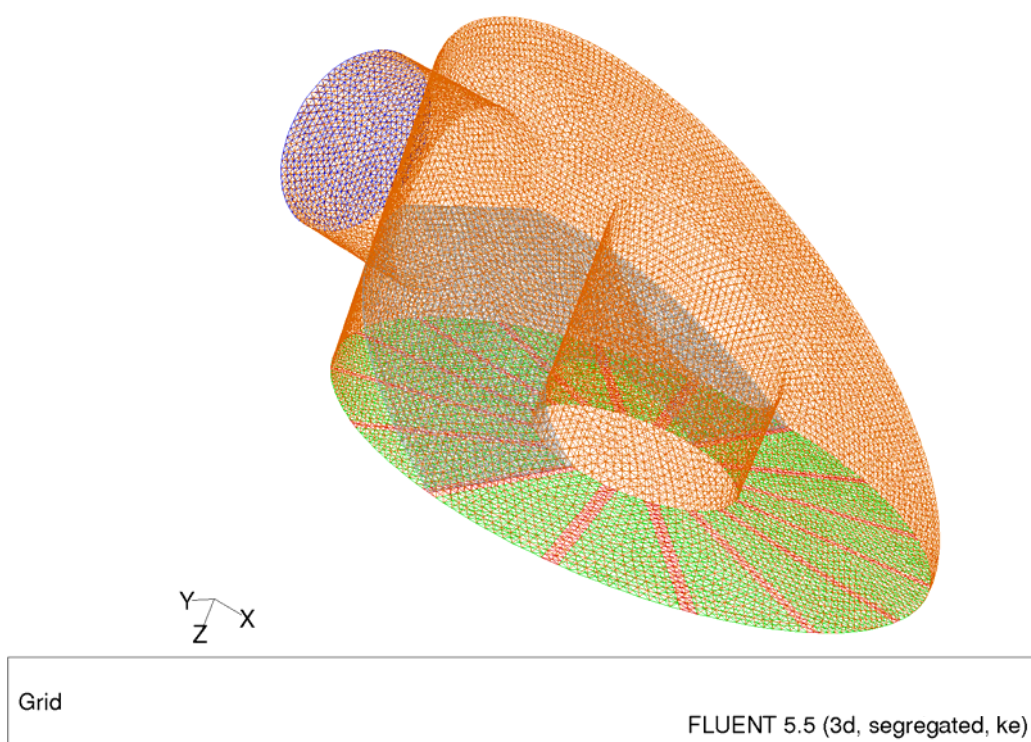
Kontrolní výpočty rozložení rychlostí na vstupu do separačních sekcí byly prováděny programem FLUENT 5.5. Byla použita nestrukturovaná výpočtová síť v prostoru 3-D, generovaná programem GAMBIT 1.3.

V první variantě je počítáno rozložení rychlosti proudění do separačních sekcí pro případ, že v hlavě separátoru nejsou žádné usměrňovací plechy pro zrovnoměrnění proudění. Výsledek je na obr. 5.

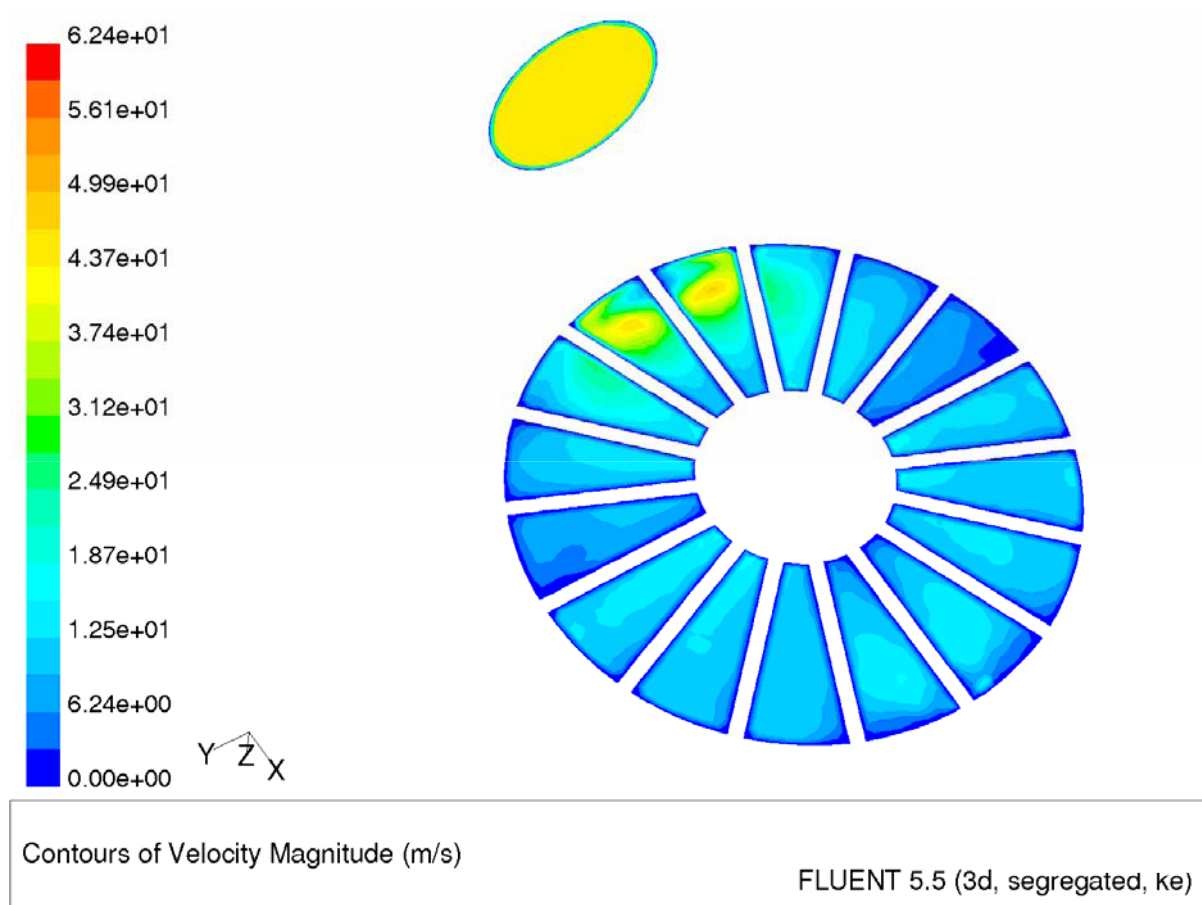
V další variantě je počítáno rozložení rychlosti proudění na vstupu do separačních sekcí pro konečnou navrhovanou úpravu hlavy separátoru podle obr. 3. Výpočtovou síť znázorňuje obr. 6 a výsledek výpočtu je na obr. 7.



Obr 5. Rozložení rychlostí proudění na vstupu do separačních sekcí



Obr 6. Zvolená geometrie pro výpočet programem FLUENT



Obr 7. Rozložení rychlostí proudění na vstupu do separačních sekcí

4. Závěr

Uvedené kontrolní výpočty nebyly jediné. Nejlepší rozložení rychlosti proudění do separačních sekcí však dávala konečná navrhovaná úprava hlavy separátoru podle obr. 3. Tato úprava hlavy s usměrňovacími plechy a s výpočtem podle matematického modelu dala nejlepší řešení a proto toto řešení bylo doporučeno zadavateli úlohy.