

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav procesní a zpracovatelské techniky**

**LABORATORNÍ JEDNOTKA PRO  
SEPARACI TUHÝCH ČÁSTIC Z  
KAPALINY**

**LABORATORY EQUIPMENT FOR SEPARATION OF  
PARTICLES FROM LIQUID**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	3909T012 Procesní technika
Vedoucí práce:	Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.

Praha 2016

Bc. Petr Procházka

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Lukáše Krátkého, Ph.D. a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne: .....

.....

Bc. Petr Procházka

**Poděkování:**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Lukáši Krátkému, Ph.D. za cenné připomínky v průběhu tvorby, dále pánům Ing. Karlu Peterovi, Ph.D. a Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. za pomoc při vytváření CFD simulace a především své rodině a přátelům za podporu.

# Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Petr
<b>Příjmení autora:</b>	Procházka
<b>Název práce česky:</b>	Laboratorní jednotka pro separaci tuhých částic z kapaliny
<b>Název práce anglicky:</b>	Laboratory equipment for separation of particles from liquid
<b>Rozsah práce:</b>	počet stran: 98 počet obrázků: 101 počet tabulek: 4 počet příloh: 15
<b>Akademický rok:</b>	2015/2016
<b>Jazyk práce:</b>	čeština
<b>Ústav:</b>	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
<b>Studijní program:</b>	Strojní inženýrství
<b>Vedoucí práce:</b>	Doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
<b>Oponent:</b>	
<b>Konzultant práce:</b>	
<b>Zadavatel:</b>	

**Anotace česky:** Tato diplomová práce se zabývá návrhem zařízení určeným pro separaci částic z kapaliny. Zaměřuje se na gravitační usazování a možnosti filtrace. Následně provádí nezbytné konstrukční výpočty podle normy uznávané v České republice ČSN 690010. Dále přináší náhled na tvorbu a řešení simulace v CFD software, kterou porovnává s analytickým řešením. Nakonec ukazuje možnost rozmístění zařízení a jeho příslušenství do vymezeného prostoru s ohledem na potřeby laboratorního měření.

**Anotace anglicky:** Thesis deals with design of apparatus for separation of particles from liquid. It focuses on gravity separation and possibilities of filtration. Afterwards makes necessary construction calculations by the Czech standard ČSN 690010. Also brings illustration of creation and solution of simulation in CFD software, which compares with analytical solution. Finally presents options of placement of separation device with its equipment in provided space with respect on needs of laboratory measurements.

**Klíčová slova:** Separátor, suspenze, CFD simulace, gravitační usazovák, nuč, filtr

**Keywords:** Separator, suspension, CFD simulation, gravity separator, nutsche filter

**Využití:**

## Obsah

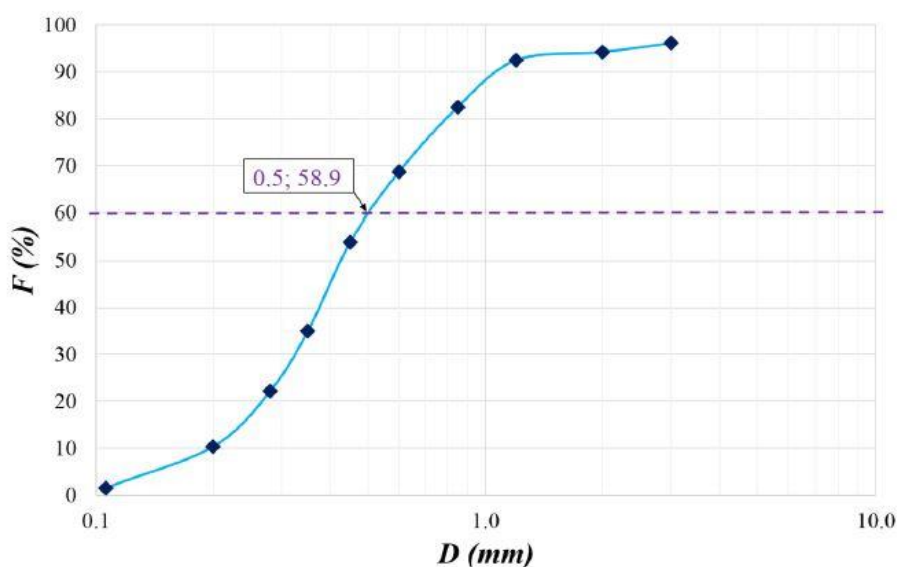
<b>1. Představení práce .....</b>	<b>3</b>
1.1 Zadání práce.....	3
1.2 Cíle práce .....	6
<b>2. Teoretické možnosti řešení .....</b>	<b>6</b>
2.1 Gravitační separátory .....	7
2.2 Odstředivky.....	9
2.3 Vírové odlučovače .....	11
2.4 Filtrace .....	12
2.4.1 Koláčková filtrace .....	12
2.4.2 Filtry.....	13
2.4.3 Membránová filtrace .....	14
<b>3. Návrh separační jednotky.....</b>	<b>16</b>
3.1 Požadavky na zařízení .....	16
3.2 Basic design separátoru .....	17
3.3 Technologické schéma jednotky.....	19
<b>4. Konstrukční řešení separátoru.....</b>	<b>21</b>
4.1 Analýza silového zatížení separátoru – kategorizace nádoby [2.1].....	21
4.2 Volba materiálu separátoru [3.1] .....	22
4.3 Pevnostní výpočet separátoru .....	23
4.3.1 Tloušťka stěny válcových částí [4.5] .....	25
4.3.2 Tloušťka stěny kuželové části separátoru [4.6].....	28
4.3.3 Tloušťka stěny klenutého víka [4.7] .....	33
4.3.4 Přírubové spoje [4.18].....	34
4.3.5 Vzpěrná pevnost.....	42
4.3.6 Tlaková zkouška.....	45
4.4 Výkresová dokumentace.....	46
<b>5. CFD analýza proudění gravitačního usazováku.....</b>	<b>52</b>
5.1 Funkce a parametry zařízení .....	52
5.1.1 Modely proudění .....	53
5.2 Modelování zařízení .....	54
5.2.1 Model zařízení.....	55
5.2.2 Tvorba sítě.....	57

5.3	Nastavení parametrů výpočtu .....	60
5.3.1	Materiál .....	60
5.3.2	Okrajové podmínky.....	60
5.3.3	Počet iterací .....	60
5.4	Sledování průběhu - residua .....	60
5.4.1	Varianta 2D .....	61
5.4.2	Varianta A .....	63
5.4.3	Varianta B .....	64
5.5	Vyhodnocení simulace.....	66
5.5.1	Varianta 2D .....	66
5.5.2	Varianta A: .....	70
5.5.3	Varianta B .....	73
5.6	Analytické řešení .....	76
5.6.1	Zjednodušené analytické řešení tlakové ztráty .....	76
5.7	Porovnání výsledků z numerického a analytického výpočtu.....	81
5.8	Porovnání tlakové ztráty: .....	87
5.9	Diskuse výsledků analytického a numerického řešení .....	87
<b>6.</b>	<b>Instalace zařízení v prostorech laboratoře ústavu .....</b>	<b>89</b>
<b>7.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>91</b>
<b>8.</b>	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>92</b>
<b>9.</b>	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>95</b>
<b>10.</b>	<b>Literatura .....</b>	<b>96</b>
<b>11.</b>	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>98</b>

# 1. Představení práce

## 1.1 Zadání práce

Úkolem diplomové práce byl návrh laboratorní jednotky určené k separaci částic. Dostal jsem k dispozici interní materiály společnosti Intecha - výstupy z analýzy velikosti částic, odlučivosti a také měření tlakové ztráty při průchodu kapaliny porézní vrstvou částic. Analýza velikosti částic byla provedena pomocí síťové metody. Rozložení jejich velikosti je uvedeno na Obr. 1.

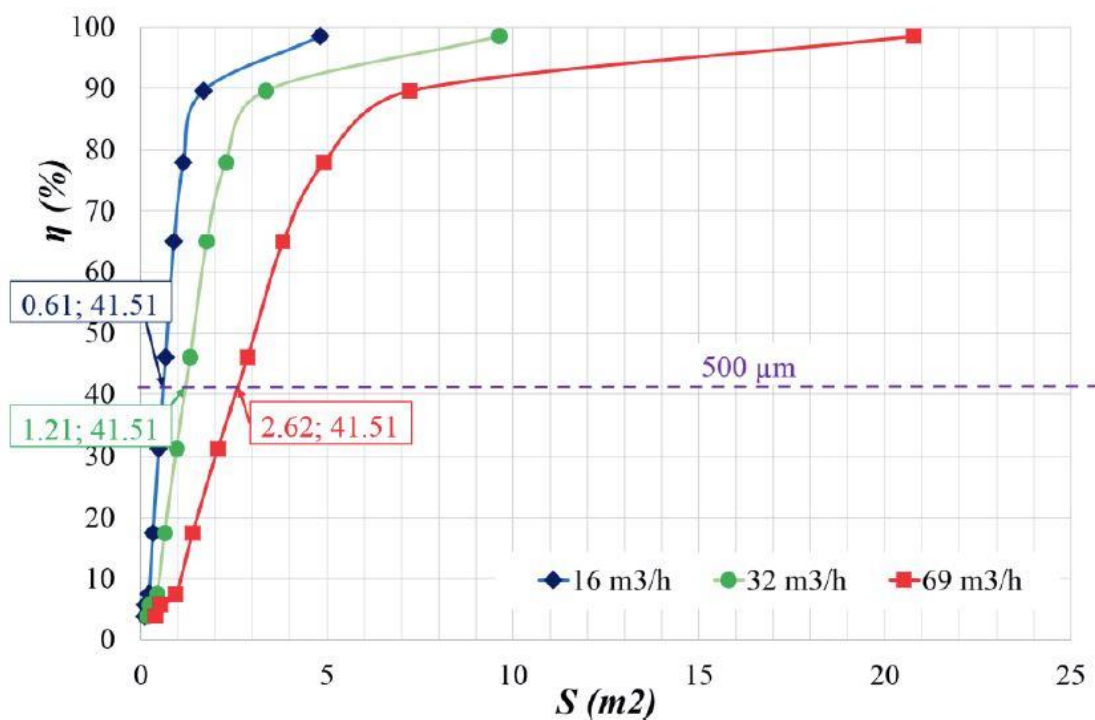


Obr. 1. Rozložení velikosti koksových částic [16]

Zde je možno vidět, že velikost částic se pohybuje v rozmezí 0,106 - 3 mm a mají jehlovitý tvar. Požadavkem bylo, odseparovat částice větší, než 500  $\mu\text{m}$ , což je maximální velikost, kterou je možno zachytit na aktuálně instalovaných filtrech v technologii.

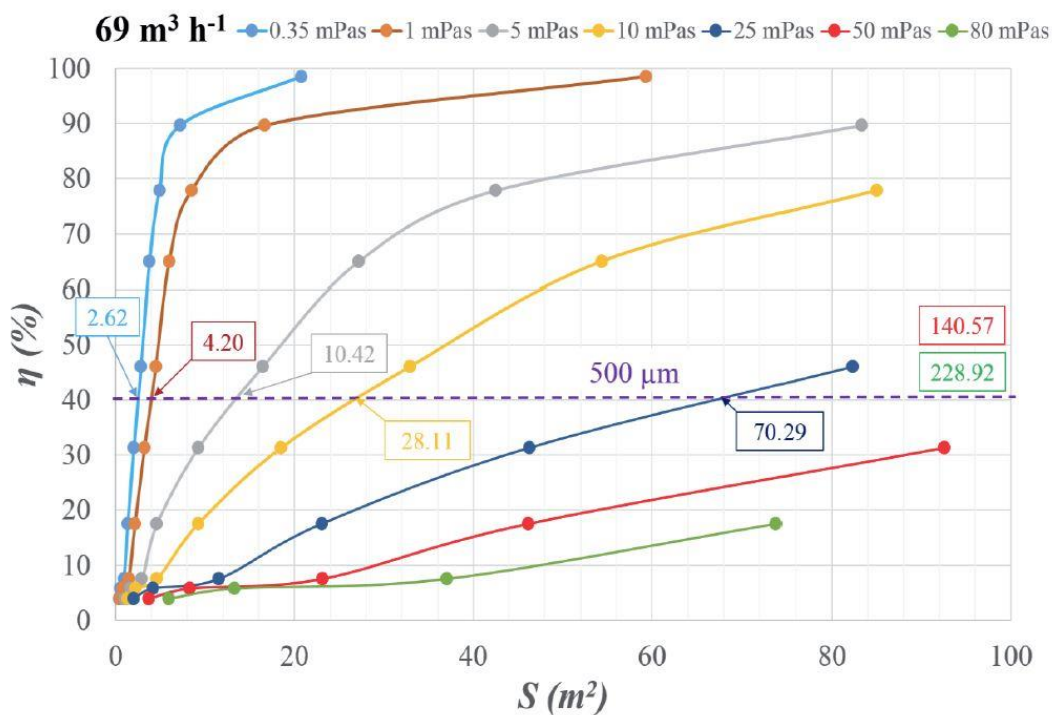
Další informací byla celková odlučivost částic. Pro jednotlivé rychlosti byla spočítána usazovací rychlost ve sloupci oleje. Pro zjednodušení byl uvažován kulový tvar částic, přestože bylo zjištěno, že mají tvar jehlovitý.

Z grafu na Obr. 2 je patrné, že k odloučení částic větších než 500  $\mu\text{m}$  při průtoku 16  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  je zapotřebí zajistit usazovací plochu o rozloze 0,61  $\text{m}^2$ . Při uvažování usazováku kruhového průřezu se jedná o průměr 0,88 m. Dále při průtoku 32  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  je zapotřebí plocha 1,21  $\text{m}^2$  ( $\phi 1,24$  m), a při průtoku 69  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  je potřebná plocha 2,62  $\text{m}^2$  ( $\phi 1,82$  m). Tyto výsledky ovšem platí pro kulový tvar částice a pístový tok uvnitř zařízení.



Obr. 2. Celková odlučivost polydisperzní suspenze koksových částic a quenčového oleje v závislosti na ploše usazováku a průtoku suspenze [16]

Také byla provedena analýza vlivu dynamické viskozity oleje v rozmezí 0,35 – 80 MPa na potřebnou plochu usazování a celkovou odlučivost oleje a částic. Výsledky jsou uvedeny na následujících obrázcích.



Obr. 3. Celková odlučivost polydisperzní suspenze koksových částic a quenčového oleje v závislosti na ploše usazováku a průtoku suspenze 69 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> [16]



Výsledný návrh byl zvolen pro objemový průtok  $69 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ , hustotu oleje  $995 \text{ kg m}^{-3}$ , dynamickou viskozitu oleje  $0,35 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  a odlučivost zařízení  $41,5\%$ , tedy usazení částic větších než  $500 \mu\text{m}$ . Tomuto návrhu odpovídá usazovací rychlost viz Tabulka 1.

Tabulka 1 - Usazovací rychlosti částic [16]

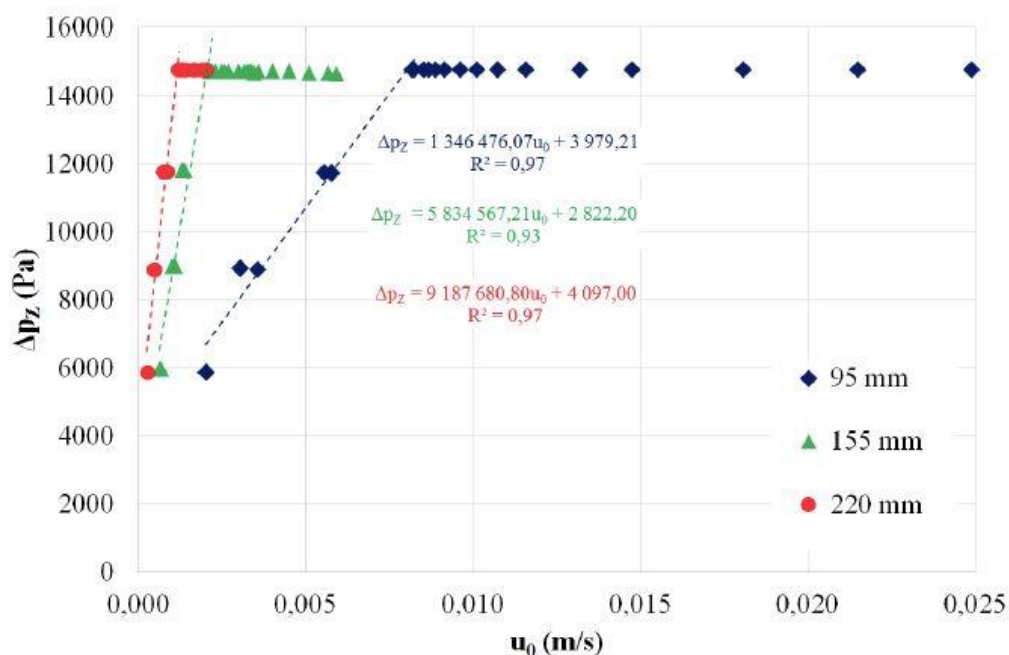
Velikost částic ( $\mu\text{m}$ )	500	900	1200	2000
Usazovací rychlost ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$1,5\cdot 10^{-2}$	$3,0\cdot 10^{-2}$	$4,1\cdot 10^{-2}$	$7,3\cdot 10^{-2}$

Posledním experimentem, který byl s částicemi prováděn, bylo stanovení propustnosti porézní vrstvy, viz Obr. 4.



Obr. 4. Provádění experimentu - stanovení propustnosti vrstvy částic [16]

Za udržování konstantní hladiny nad vrstvou částic byl měřen objemový průtok kapaliny skrz vrstvu za čas. Experiment byl prováděn pro několik různých výšek vrstvy při různých výšcích hladiny nad nimi. Výsledky testu jsou uvedeny na Obr. 5.



Obr. 5. Závislost tlakové ztráty na mimovrstvové rychlosti a výšce usazené porézní vrstvy částic koksu [16]

## 1.2 Cíle práce

Požadovaná mezní velikost částic byla stanovena na 500  $\mu\text{m}$ . Částice větší než je tato hodnota se musí odseparovat a nesmí se dostat přes výstup separátoru.

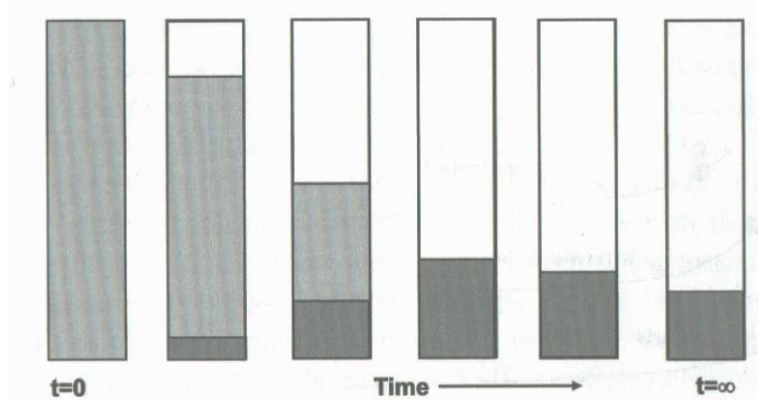
Prvním z úkolů bylo zpracovat rešerši zaměřenou na konstrukci separátorů. Tímto se budu zabývat v kapitole 2. Dalším úkolem byl návrh laboratorní jednotky dle zadaných parametrů, který byl proveden v kapitole 3 a její návrhový a konstrukční výpočet v kapitole 4, následovaný tvorbou výkresové dokumentace. Dobu, během které byl separátor ve výrobě, jsem využil k ověření realizace separace gravitačním způsobem díky orientační CFD simulaci. Posledním úkolem práce bylo ověření instalace celé jednotky ve vyhrazených prostorách laboratoře ústavu procesní a zpracovatelské techniky.

## 2. Teoretické možnosti řešení

Možností separace suspenze částice – kapalina je v dnešní době mnoho. Zaleží mimo jiné na tom, jak velké částice chceme odseparovat, nebo o jaké prostředí se jedná. V tomto případě jsem hledal nejlepší možné řešení kontinuální separace částic větších než 500  $\mu\text{m}$ . Z usazovacích metod pro dvoufázové prostředí se nabízí hned několik možností. Sedimentace, odstředění či filtrace jsou po mnoho let rozšířené metody používané v průmyslu.

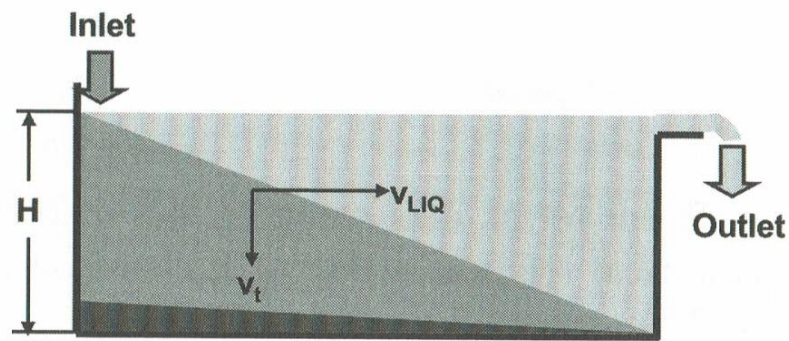
## 2.1 Gravitační separátory

Sedimentace využívá pro separaci částic z kapaliny rozdíl hustot mezi kapalnou a pevnou částí roztoku. V ideálním případě by ze zařízení odcházely z jednoho výstupu částice a z druhého vytékala kapalina. Bohužel, takové zařízení není možné vytvořit. Vždy odchází kapalina s určitým množstvím částic a naopak odcházejí vlhké částice. Sedimentace, nebo také gravitační usazování využívá pro svou funkci gravitace. V toku roztoku se díky rozdílu hustot částice pohybují směrem dolů a kapalina pokračuje ve směru proudění. Pro zlepšení se často používají flokulanty. Ty zajistí shlukování částic, což se projeví vyšší hmotností shluku, který snáze klesá kapalinou. Čím větší je rozdíl hustot, tím probíhá sedimentace rychleji. Z hlediska tvaru částice pak rychleji sedimentují částice s kulovým tvarem než jehlovitě tvarované. Hlavním faktorem suspenze je koncentrace částic a pak také jejich rozdělení a seskupení. Při vyšší koncentraci částic je vyšší pravděpodobnost vzniku shluku a tím rychlejšího usazování.



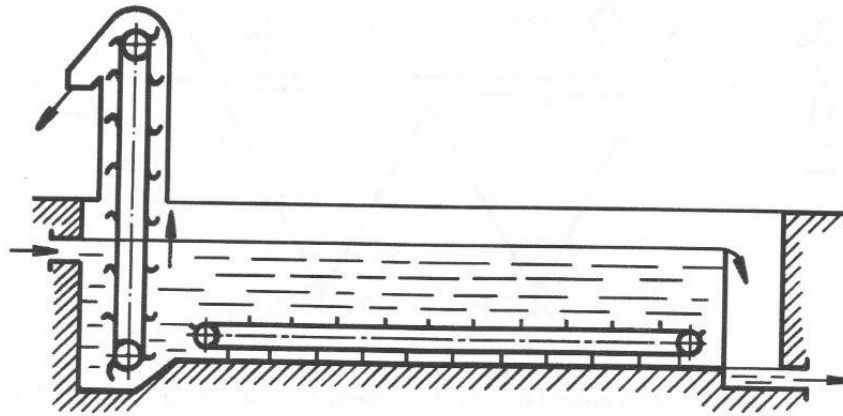
Obr. 6. Průběh usazování [15]

Jedním ze základních usazovacích způsobů je kontinuální usazování v usazovací nádrži viz Obr. 7. Princip kontinuálního usazování v usazovací nádrži. Jak je zde popsáno, usazování probíhá kontinuálně, kdy se na jedné straně nádrže přivádí suspenze, která při svém toku k výstupu ztrácí vlivem gravitace těžší frakci. Tato metoda bývá doplněna o narážky, které slouží ke zpomalování toku a změně jeho směru, čímž docílíme účinnější separace.



Obr. 7. Princip kontinuálního usazování v usazovací nádrži [15]

Tuto konfiguraci je vhodné doplnit shrabovacím zařízením pro kontinuální odstraňování usazeného materiálu viz Obr. 8. Takto dosáhneme maximálního výkonu usazovacího zařízení a zkrátíme prodlevy, které bychom vytvářeli odstavením kvůli čištění dna nádrže.



Obr. 8. Usazovák - lapač písku [1]

Dalším způsobem může být usazovák kruhového průřezu. Na Obr. 9 můžeme vidět jedno z možných provedení. Pro zabránění přebytečného víření je zde instalována zářezka u vstupu do separátoru, která nám usměrní vstupní proud. Kapalina následně pokračuje vzhůru, zatímco se díky náhlému rozšíření prostoru zpomalí rychlost proudění a částice dostanou šanci k usazení směrem ke spodnímu výstupu, kudy následně odchází.

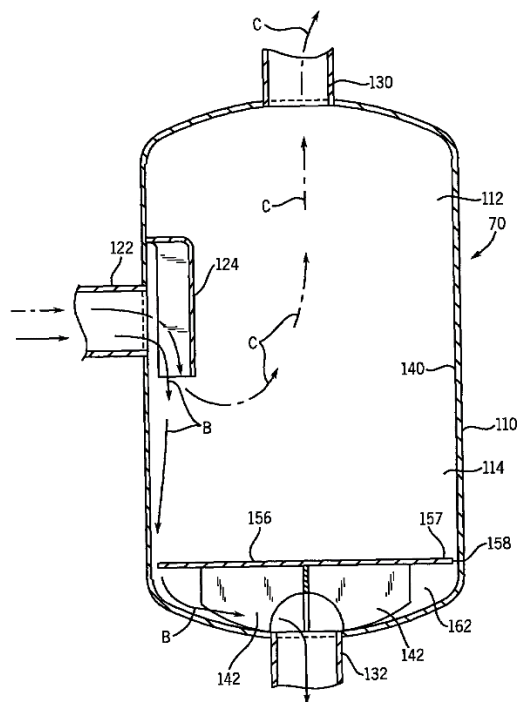
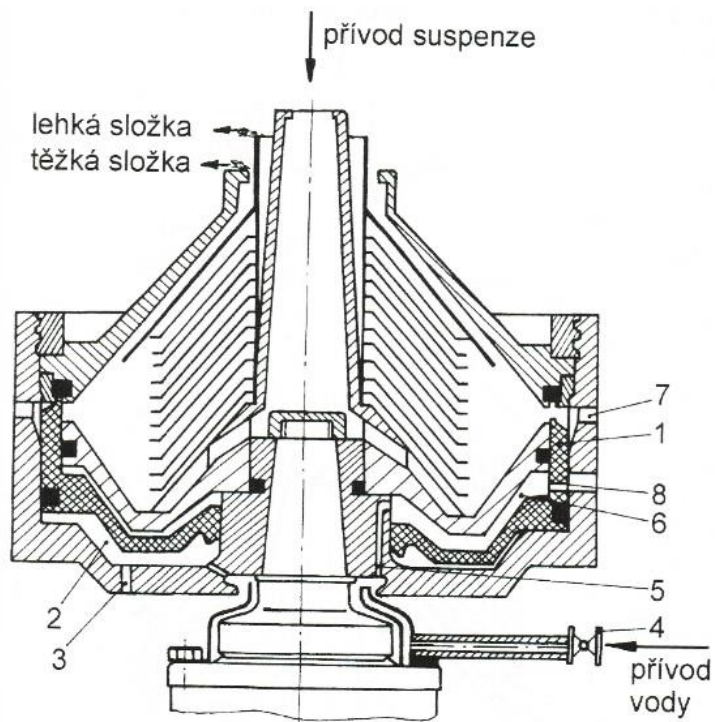


FIG. 9

Obr. 9. Gravitační způsob usazování - Oil separator for a welder [12]

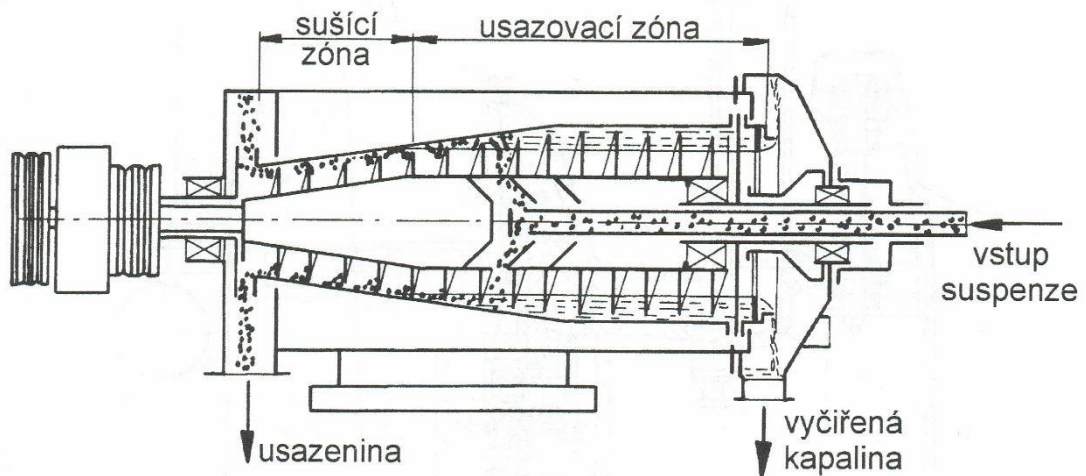
## 2.2 Odstředivky

Odstředivá síla zvýší síly na ty částice, které jsou jindy v kapalině v klidu, tedy je-li rozdíl hustot částic a kapaliny menší. Odstředivky jsou dodávány v různých variantách i velikostech. Obvykle jsou poháněny samostatným motorem, který roztáčí centrální válcový či kuželový buben. Pracují v periodickém, polokontinuálním či kontinuálním režimu. V zásadě rozlišuje hlavní dva druhy odstředivek - usazovací a filtrační. Zatímco u usazovacích odstředivek odchází lehčí kapalina poblíž rotoru a těžší částice se posunují po hladké stěně směrem ke svému výstupu, filtrační odstředivky mají odlišný postup. Zde kapalina odchází přímo stěnami tvořeny filtrační plachetkou či tenkým kovovým sítem. Provoz takových odstředivek je názorně popsán na Obr. 10, Obr. 11 a Obr. 12.

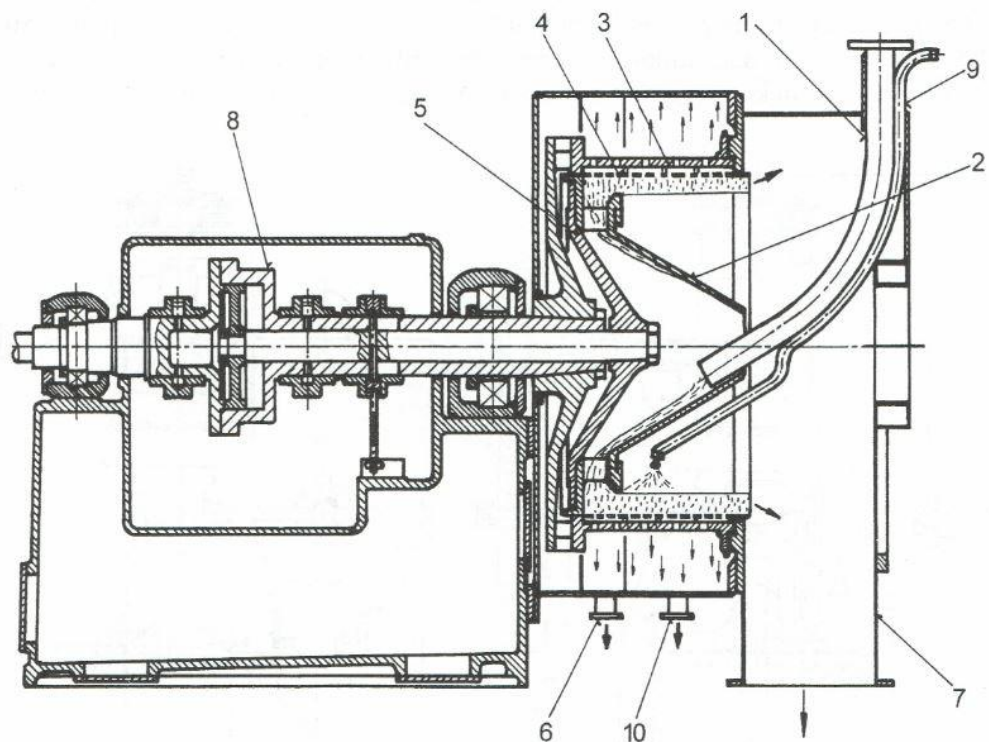


Obr. 10. Princip talířové odstředivky – usazovací princip [14]

1 – pístové šoupátko, 2 – prostor pro uzavírací kapalinu, 3 – přepadový otvor, 4 – přívodní kohout, 5 – přívodní kanálek, 6 – prostor pro kapalinu, 7 – otvory pro výstup kalu, 8 – otvor pro výstup ovládací kapaliny



Obr. 11. Schéma usazovací odstředivky se šnekovým vyprazdňováním [14]

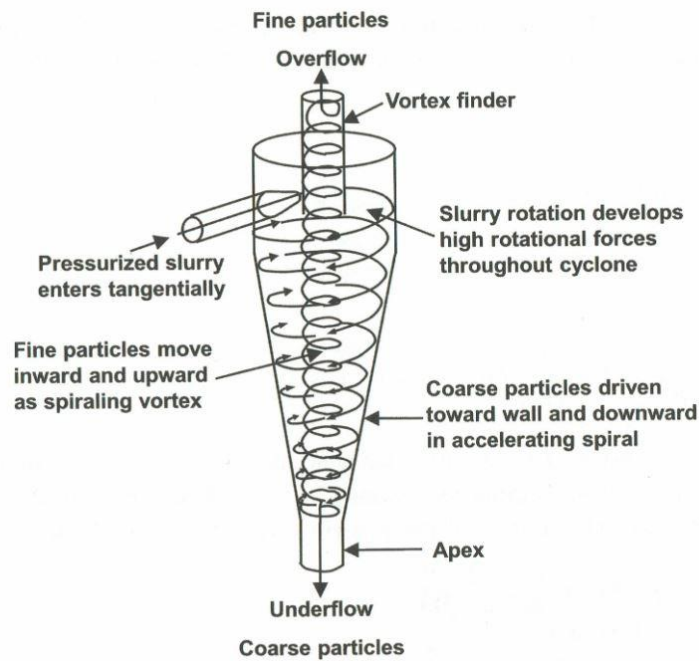


Obr. 12. Filtrační odstředivka s pulsačním vyprazdňováním [14]

1 – přívod suspenze, 2 – rozváděcí kužel, 3 – buben odstředivky, 4 – síto, 5 – pulsující píst, 6 – odvod filtrátu, 7 – výsypka, 8 – hydraulický válec, 9 – přívod promývací vody, 10 – výstup promývací vody

### 2.3 Vírové odlučovače

Mnoho výhod přináší oproti odstředivé metodě separace použití hydrocyklonu. Ten je nejenom levnější, ale také méně náročný na údržbu. Ve skutečnosti je to jeden z nejlevnějších způsobů separace. Příjemným bonusem je, že hydrocyklon neobsahuje žádné pohyblivé mechanické části, takže je méně náchylný na poruchy. Použití je v širokém rozsahu teplot a tlaků až do cca 1 000°C a 500 barů. Hydrocyklony mohou být instalovány i v uspořádání za sebou čímž zvýšíme účinnost separace. Nevýhodou je nutnost vytvoření rychlého proudění což při větších průměrech vyžaduje poměrně vysoké sací či čerpací výkony. Princip je velmi jednoduchý viz Obr. 13.

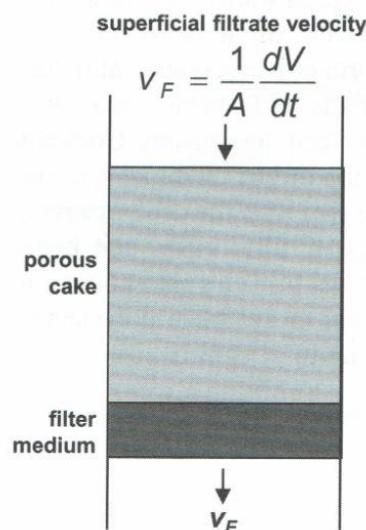


Obr. 13. Princip funkce hydrocyklonu [15]

## 2.4 Filtrace

### 2.4.1 Koláčová filtrace

Obdobu koláčové filtrace byla již naznačena u odstředivek. Využíváme nahromaděných částic k filtraci. Princip je zobrazen na Obr. 14. Takový filtr má velmi jednoduchou konstrukci. Proud kapaliny, kterou chceme vyčistit, tlačíme skrz přepážku tvořenou zespoda filtračním médiem tvořeným jemným sítím, nebo plachetkou. Na tomto médiu se vytvoří vrstva pevného sedimentu z kapaliny, kterou nazýváme filtrační koláč. Samotný sediment nám vlastně pomáhá vytvořit potřebnou filtrační přepážku.

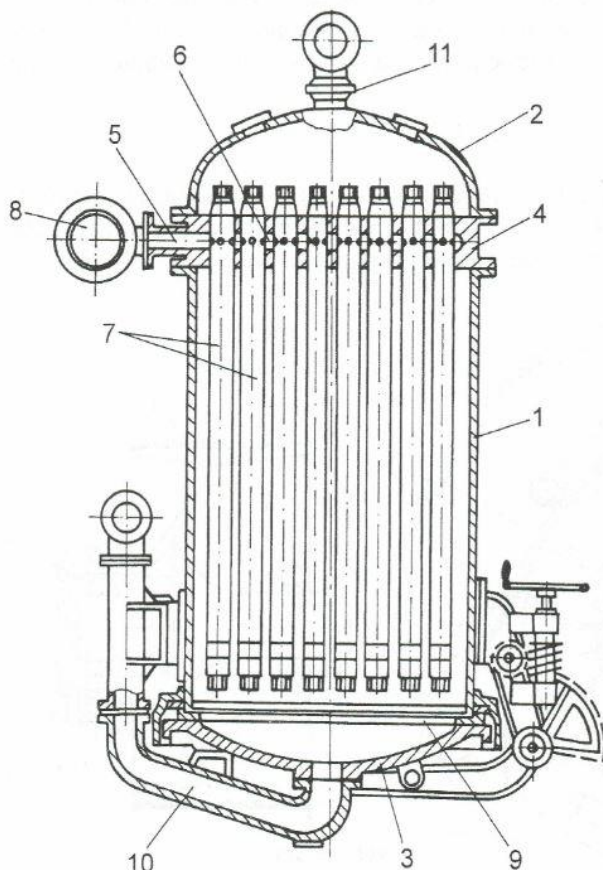


Obr. 14. Princip koláčové filtrace [15]



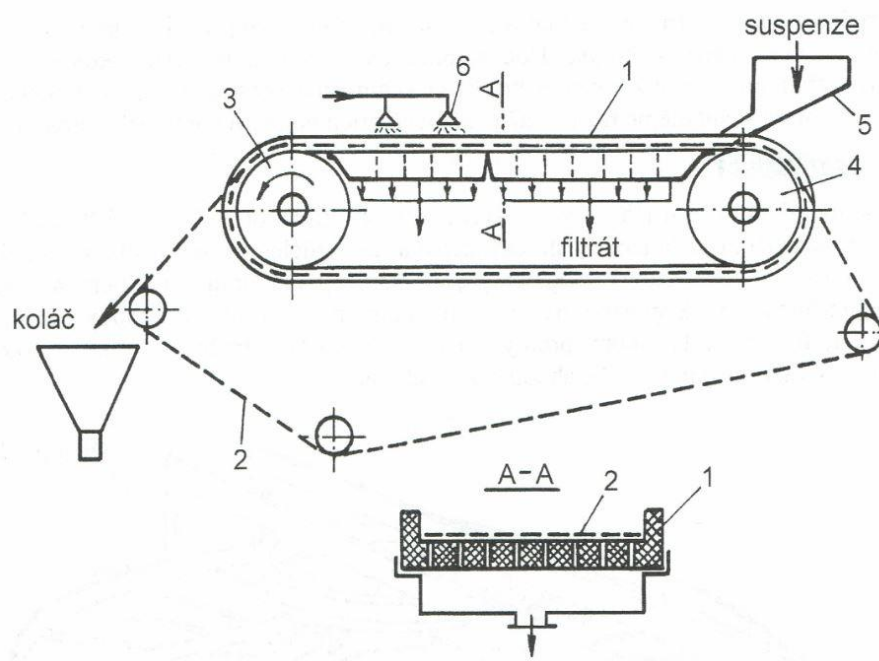
## 2.4.2 Filtry

Další možností separace je pomocí filtru. Ty mohou být tvořeny sítí, rošty, tkaninou nebo plachetkami z různých materiálů v závislosti na vlastnostech separovaných částic. Filtrace spočívá v zachycování pevné složky na filtračním médiu. Filtrování je následně kontinuálně odváděno, nebo periodicky odstraňováno z povrchu filtru. Zástupce periodicky pracujícího filtru je na Obr. 15. kontinuálně pracující filtry pak na Obr. 16 a Obr. 17.



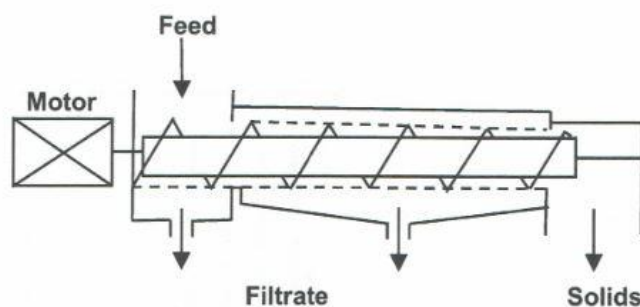
Obr. 15. Svíčkový filtr [1]

1 – plášť filtru, 2 – víko, 3 – odklápěcí dno, 4 – deska, 6 – kanálky pro filtrát, 7 – filtrační svíčky, 8 – sběrač filtrátu, 9 – perforovaná přepážka, 10 – přívod suspenze, 11 – hrdlo pro cirkulující suspenzi



Obr. 16. Pásový filtr [1]

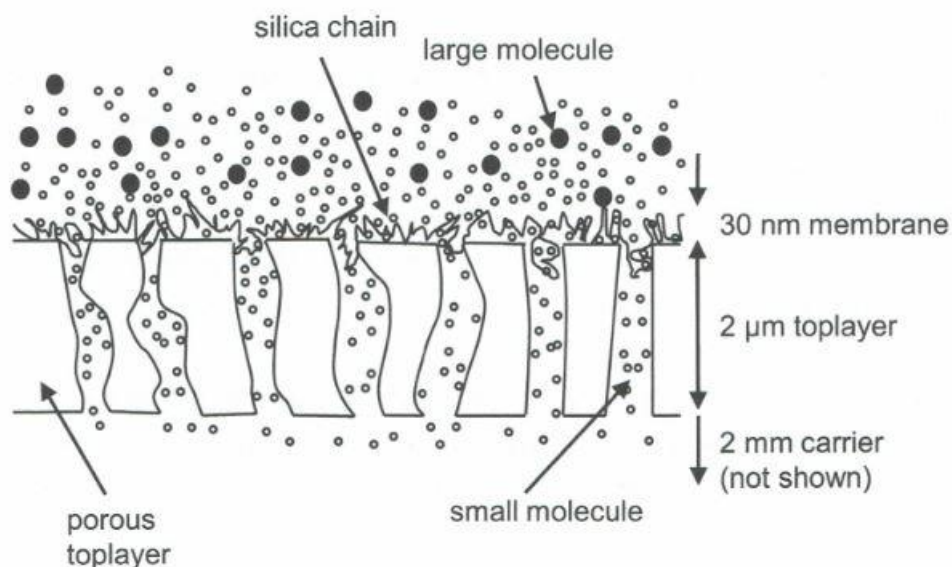
1 – pryžový pás, 2 – filtrační plachetka, 3 – hnací buben, 4 – napínací buben, 5 – přívod suspenze, 6 – přívod promývací vody



Obr. 17. Filtrace s použitím šneku [15]

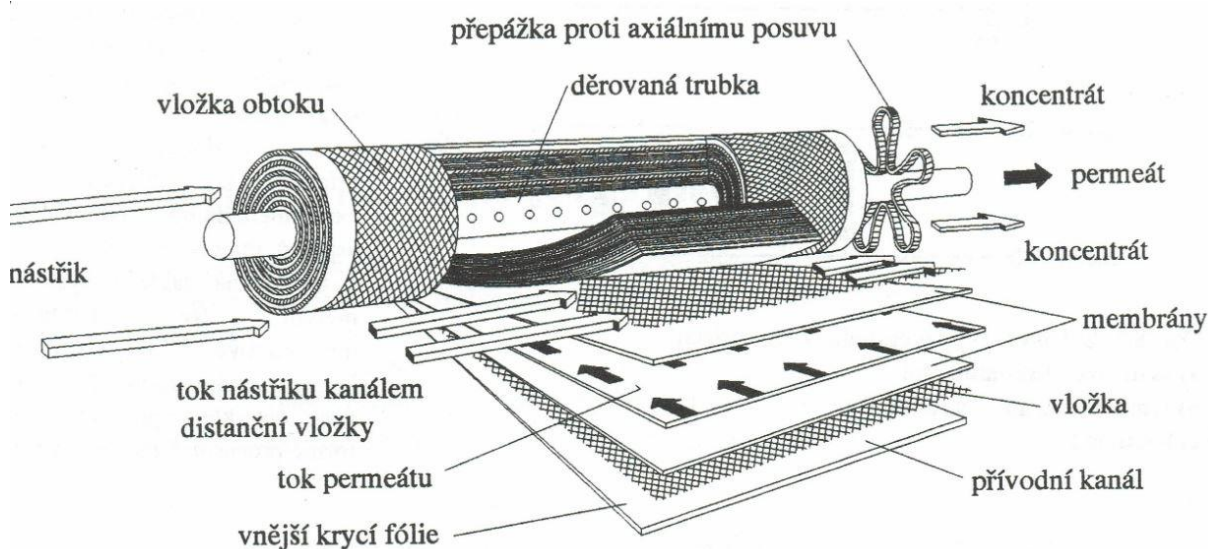
### 2.4.3 Membránová filtrace

Principem membránových procesů je rozdílná propustnost složek roztoku. Membrána se skládá z malých otvorů, takže částice větší než je velikost otvoru membránou neprojdou. Můžeme tak dělit částice nejenom různých velikostí ale také tvarů. Rozdíl oproti filtraci je především ve velikosti použitého provozního tlaku. Pro přečerpání přes takovou přepážku jsou zapotřebí větší tlaky než u filtrace. Můžeme tím ovšem tímto odseparovat částice mnohem menší velikosti. Další možností hnací síly můžou také být rozdílné koncentrace roztoků před a za membránou nebo elektrické potenciály.



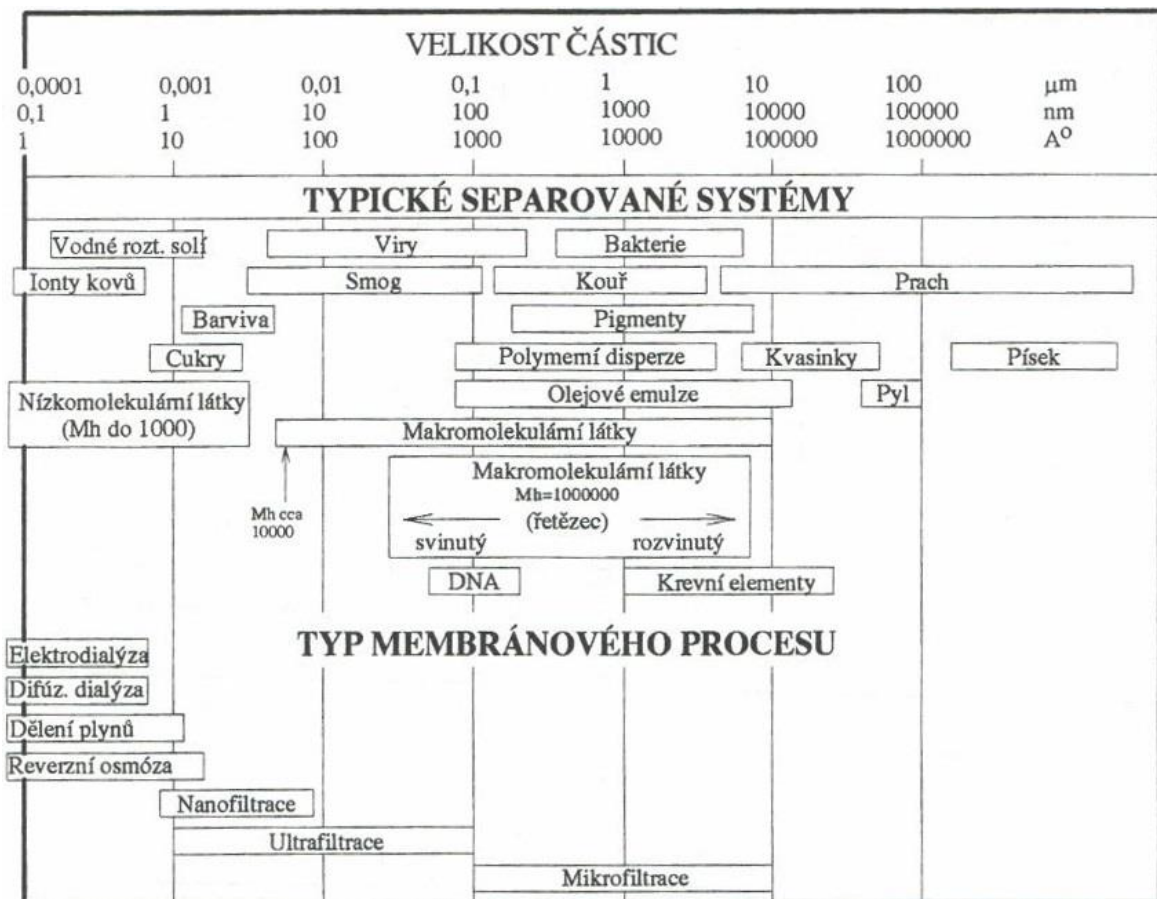
Obr. 18. Princip membránových procesů [15]

Membrány se používají ve formě membránových modulů, v současné době v několika možných provedeních. Jsou to moduly deskové, trubkové, spirálově vinuté nebo moduly s dutými vlákny. Na ukázkou jsem vybral trubkový modul na Obr. 19, kde je také popsán jeho princip a samotná konstrukce.



Obr. 19. Membránový modul [13]

Jak je možno vidět viz Obr. 20. Aplikace membránových procesů dle velikosti separovaných částic [13], mají membránové procesy široké využití. Pro náš problém jsou ale předimenzované. Použití membrány k separaci částic koksu by bylo vyhazování peněz za drahou technologii, navíc by pravděpodobně byly membrány příliš znehodnocovány abrazy tvrdých koksových částic.



Obr. 20. Aplikace membránových procesů dle velikosti separovaných částic [13]

### 3. Návrh separační jednotky

#### 3.1 Požadavky na zařízení

Hlavním požadavkem na zařízení je variabilita provedení. Bude se na něm ověřovat několik vybraných způsobů separace. Prvním je jednoduchý gravitační usazovák, v několika možných uspořádáních, dále filtrace skrz vrstvu částic a nakonec filtrace přes svíčkový filtr nebo skrz cartridge. Od takové variability se odvíjí nutnost regulace. Tu můžeme provést buďto škrcením potrubí, nebo použitím frekvenčního měniče použitého čerpadla.

Skutečným pracovním médiem je olej, který díky své teplotě má dynamickou viskozitu podobnou vodě. Při našich experimentech budeme nejčastěji používat vodu, ale pro maximální variabilitu budeme uvažovat také ohřátý olej. Pracovní teplotu jsme zvolili 60°C, ale z důvodu bezpečnosti si necháme rezervu a výpočty budu provádět pro teplotu 100°C.

Důležitým požadavkem je také snadné čištění. Jelikož se bude měřit koncentrace částic na výstupu ze zařízení, mezi jednotlivými měřeními bude třeba zařízení dostatečně vyčistit

kvůli relevantnosti naměřených hodnot. Koncentrace částic se bude pohybovat v rozmezí 200 – 1000 ppm.

V neposlední řadě je nutno zařízení navrhovat pokud možno prostorově úsporné. K měření bude k dispozici část laboratoře ústavu procesní a zpracovatelské techniky, musím tedy myslet i na realizaci samotného měření v omezeném prostoru. Rozumný hlavní průměr usazováku, který postačí na experimentální měření a zároveň bude prostorově a ekonomicky úsporný byl po dohodě stanoven na 300 mm.

Jak jsem již zmínil, zkoušet se bude nejenom gravitační usazování, ale také filtrace přes nuč či přes filtry. Kvůli tomu musí být zařízení navrženo jako tlaková nádoba.

### 3.2 Basic design separátoru

Na základě analýz vlastností částic byl navržen gravitační separátor

Vnitřní průměr těla  $\varnothing d_2=300$  mm, vstupní průměr  $\varnothing d_1=55,1$ , mm, výstupní průměr  $\varnothing d_3=27$  mm. Počet výstupních hrdel (4x) byl zvolen pro rovnoměrnost toku v celé délce hlavní části. Pro relevantní experiment bylo počítáno s dobou experimentu 30 minut. Jelikož byla zvolená vzestupná rychlost,  $u_2=0,008$  m/s, ostatní rychlosti se snadno dopočítají z geometrických poměrů.

Průtok zařízením

$$\dot{V} = S \cdot u \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \left[ \frac{\pi \cdot d_2^2}{2} - \frac{\pi \cdot d_1^2}{2} \right] \cdot u = \left[ \frac{\pi \cdot 0,3^2}{2} - \frac{\pi \cdot 0,0551^2}{2} \right] \cdot 0,008 = 0,0005 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \\ &= 1,967 \text{ [m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{]} \end{aligned}$$

Vstupní rychlost

$$u = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad (3.2)$$

$$u_1 = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot d_1^2}{4}} = \frac{0,0005}{\frac{\pi \cdot 0,0551^2}{4}} = 0,229 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

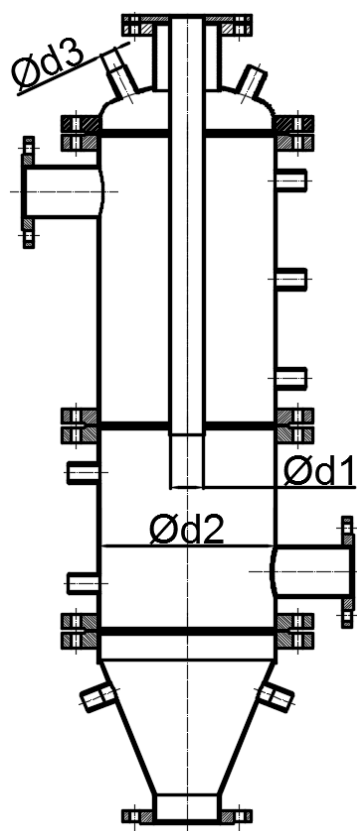
Výstupní rychlost z jednoho výstupu:

$$u_3 = \frac{\frac{\dot{V}}{4}}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{\frac{0,0005}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,027^2}{4}} = 0,239 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Doba experimentu byla na základě zkušeností stanovena na 30 minut. K tomu je potřeba objem pracovní kapaliny:

$$V = \dot{V} \cdot t \quad (3.3)$$

$$V = 0,0005 \cdot 30 = 0,984 \text{ [m}^3\text{]}$$



Obr. 21. Základní schéma zařízení

Tlaková ztráta při konfiguraci filtrace skrz nuč:

Pro tuto konfiguraci počítám s maximálním průtokem zvoleného čerpadla.

$$\Delta p_z = \frac{1}{K} \cdot \mu \cdot h \cdot u_0 \quad (3.4)$$

$$\Delta p_z = \frac{1}{2,4 \cdot 10^{-11}} \cdot 0,0001 \cdot 0,5 \cdot 0,009431 = 0,196 \text{ [MPa]}$$

$$u_0 = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad (3.5)$$

$$u_0 = \frac{2,4}{\frac{\pi \cdot 0,3^2}{4}} = 0,00943 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Vzhledem k maximální bezpečnosti bude ovšem nádoba navržena na tlak 0,6 MPa, čímž zamezíme případným nedopatřením nebo nehodám.

Separátor bude opatřen průhledítky, která nám umožní nahlédnout dovnitř a zkontrolovat správnou činnost. Pro možnost odebrání vzorku opatříme válcové části malými vstupy se závitem, po celé délce usazovací části viz Obr. 21.

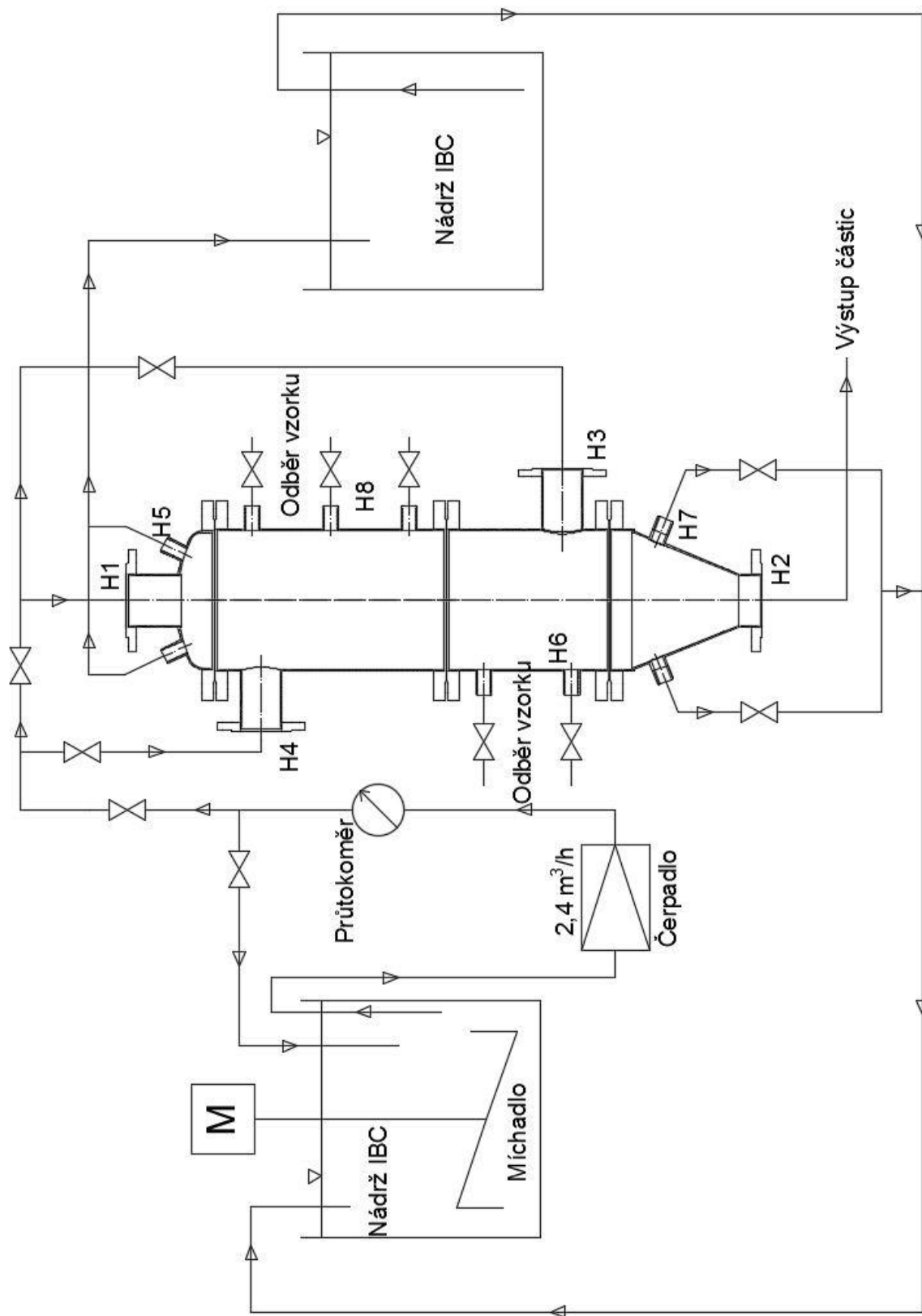
### 3.3 Technologické schéma jednotky

Laboratorní jednotka se bude skládat z hlavního multifunkčního separátoru, čerpadla, dvou přečerpávacích nádrží IBC o objemu 1 m<sup>3</sup>, a ovládacího panelu. Je nutné opatřit čerpadlo frekvenčním měničem pro snadnou regulaci průtoku. Další potřebné prvky jsou ventily, kohouty, průtokoměry a pojistný ventil.

Aparátové listy jsou v příloze pod označením P15. Obsahují specifikaci pro:

- Snímač tlaku
- Míchadlo pro IBC
- Čerpadlo
- Pojistný ventil
- Průhledítka

Technologické schéma viz Obr. 22 je v příloze, označeno P01.



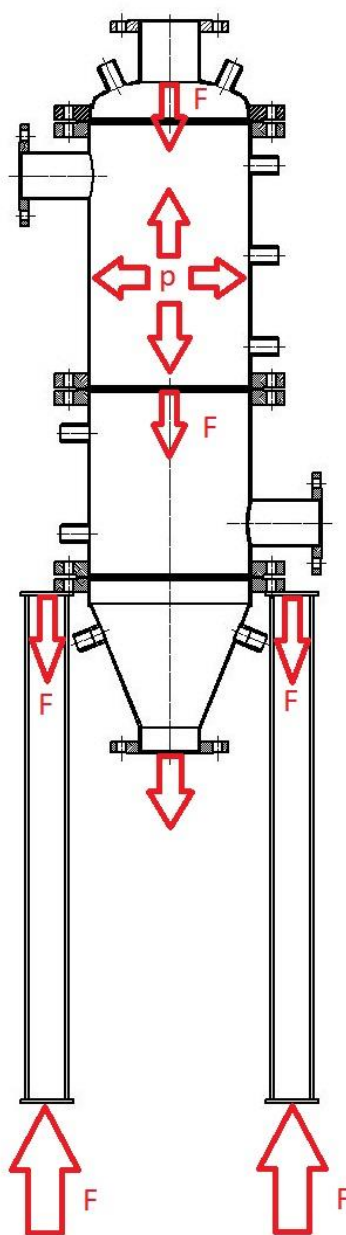
Obr. 22. Technologické schéma



## 4. Konstrukční řešení separátoru

Jelikož má zařízení sloužit v reálných podmínkách, v laboratoři ústavu procesní a zpracovatelské techniky, musí být proveden výpočet pro tlakové nádoby podle příslušné normy. Na českém území se nejčastěji stále používá norma ČSN 690010-1.1. Proto jsem tuto normou použil také, jelikož má dostačující bezpečnost. Na následujících stranách je proveden výpočet jednotlivých částí, na které norma pamatuje. Pro snazší kontrolu uvádím i čísla kapitol v normě v hranatých závorkách. Seznam použitých veličin a výsledky včetně mezivýsledků uvádím v příloze P02.

### 4.1 Analýza silového zatížení separátoru – kategorizace nádoby [2.1]



Obr. 23. Analýza zatížení

Jedná se o nádobu kategorie 4 – nádoba s pracovním přetlakem nad 0,07 MPa která neslouží k uskladnění nebezpečných látek, pracovní teplota stěny do 100°C, maximální pracovní přetlak 0,6 MPa.

#### Výpočtová teplota [4.2]

Za výpočtovou teplotu stěny části tlakové nádoby se považuje nejvyšší hodnota teploty stěny, při normálním průběhu pracovního procesu. Provozní teplota byla zvolena 60°C, ale z důvodu bezpečnosti byla uvažována maximální teplota pracovní látky 100°C.

#### Nejvyšší pracovní a zkušební přetlak [4.2]

Nejvyšším pracovním přetlakem se rozumí nejvyšší vnitřní pracovní přetlak, vznikající při normálním průběhu pracovního procesu.

$$p = 0,6 \text{ MPa}$$

Zkušební přetlak se určuje podle [7.1]:

$$p_{zk} = \max \left\{ 1,25 \cdot p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}; 0,2 \text{ MPa} \right\} \quad (4.1)$$

$$p_{zk} = \max \left\{ 1,25 \cdot 0,6 \frac{121}{121}; 0,2 \text{ MPa} \right\} = \max\{0,75; 0,2\} = 0,75 \text{ MPa}$$

## 4.2 Volba materiálu separátoru [3.1]

Materiál byl zvolen: nerezová ocel 1.4301 - Chrom niklová austenitická nestabilizovaná.

Tabulka 2 - Přehled materiálových vlastností použitého materiálu

	17 240.4		ČSN 1.4301
<b>R<sub>m20</sub></b>	580	[N/mm <sup>2</sup> ]	<i>Mez pevnosti</i>
<b>R<sub>p0,2 20</sub></b>	186	[N/mm <sup>2</sup> ]	<i>Mez kluzu při 20°C</i>
<b>R<sub>p0,2 100</sub></b>	<b>157</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	<i>Mez kluzu při 100°C</i>
<b>E<sub>20</sub></b>	199 000	[MPa]	<i>Modul pružnosti při 20°C</i>
<b>E<sub>100</sub></b>	<b>194 000</b>	[MPa]	<i>Modul pružnosti při 100°C -&gt; výpočtové teplotě</i>

### 4.3 Pevnostní výpočet separátoru

Nejvyšším pracovním přetlakem se rozumí nejvyšší vnitřní pracovní přetlak, vznikající při normálním průběhu pracovního procesu.

$$p = 0,6 \text{ MPa}$$

Zkušební přetlak se určuje podle [7.1]:

$$p_{zk} = \max \left\{ 1,25 \cdot p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}; 0,2 \text{ MPa} \right\} \quad (4.2)$$

$$p_{zk} = \max \left\{ 1,25 \cdot 0,6 \frac{121}{121}; 0,2 \text{ MPa} \right\} = \max\{0,75; 0,2\} = 0,75 \text{ MPa}$$

#### Dovolené namáhání, součinitele bezpečnosti [4.2]

Dovolené namáhání podle mezních stavů pro austenitické oceli pro provozní podmínky

$$[\sigma] = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_e \text{ nebo } R_{p0,2}}{n_T}; \frac{R_m}{n_B} \right\} \quad (4.3)$$

$$[\sigma] = 1 \cdot \min \left\{ \frac{157}{1,3}; \frac{580}{2,2} \right\} = \min\{121; 263\} = 121 \text{ [MPa]}$$

Pro tlakovou zkoušku nebo montáž

$$[\sigma]_{z,zk} = \tau \cdot \frac{R_e^{20} \text{ nebo } R_{p0,2}^{20}}{n_T} \quad (4.4)$$

$$[\sigma]_{z,zk} = 1 \cdot \frac{186}{0,95} = 196 \text{ [MPa]}$$

Kde  $\tau=1$  je opravný součinitel k dovolenému namáhání.

Nejsou-li známy hodnoty meze pevnosti při výpočtové teplotě, je dovoleno vzít hodnotu meze pevnosti při 20°C.

U tlakových nádob patřících do kategorie 3 a 4 podle 2.1 se součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti bere  $n_B=2,2$ .

V případě, že se dovolené namáhání u austenitických ocelí určuje podle vzorce pro uhlíkové a nízkolegované oceli, potom se součinitel bezpečnosti k smluvní mezi kluzu  $R_{p0,2}$  pro provoz bere  $n_T=1,3$  a pro tlakovou zkoušku  $n_T=0,95$ .

Výpočet pevnosti částí tlakových nádob pro podmínky tlakové zkoušky není nutný, jestliže:

$$p_{zk} \leq p \cdot \frac{[\sigma]_{zk}}{[\sigma]}$$

Součinitel bezpečnosti ke ztrátě stability  $n_u$ :

$n_u = 2,4$  pro provozní podmínky

$n_u = 1,8$  pro tlakovou zkoušku a montáž

Součinitel hodnoty svaru

$\varphi=1$  pro bezešvé části tlakových nádob.

$\varphi=0,7$  pro svařované části tlakových nádob.

**Přídavek k tloušťce stěny [4.2]**

$$c = c_1 + c_2 + c_3 \quad (4.5)$$

$$c = 0,8 + 0,1 + 0,1 = 1 \text{ [mm]}$$

Kde  $c_1$  je přídavek na korozi nebo erozi;

$c_2$  je přídavek na zápornou výrobní odchylku

$c_3$  je technologický přídavek

Provedená tloušťka stěny se určí ze vzorce:

$$s \geq s_R + c \quad (4.6)$$

**Nejmenší tloušťka stěny**

U nádob se při posuzování nejmenších dovolených tlouštěk stěn posuzují skutečné tloušťky stěn částí.

U částí nádob z tvářené oceli, které jsou namáhány vnitřním přetlakem, nebo zatížením, které nemůže vyvolat ztrátu stability stěny, je nejmenší tloušťka stěny 2 mm. U částí namáhaných vnějším přetlakem nebo zatížením, které může vyvolat ztrátu stability stěny, je nejmenší tloušťka stěny 3 mm.

### 4.3.1 Tloušťka stěny válcových částí [4.5]

#### Hladké válcové skořepiny [4.5]

Rozsah platnosti výpočtových vztahů:

Výpočtové vzorce platí při poměru tloušťky stěny k průměru

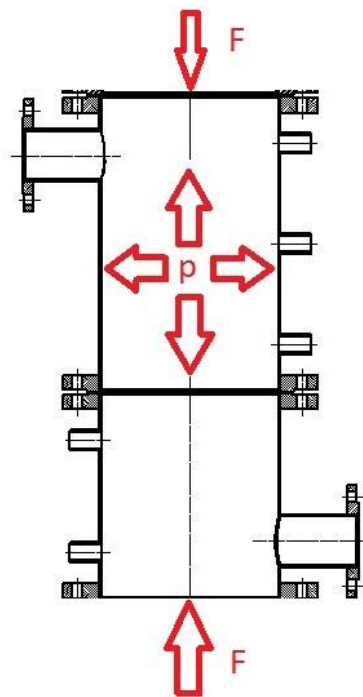
$$\frac{s-c}{D} \leq 0,1 \text{ pro skořepiny s } D \geq 200 \text{ mm}$$

$$\frac{s-c}{D} \leq 0,3 \text{ pro trubky s } D < 200 \text{ mm}$$

Výpočtové vzorce pro skořepiny, které jsou zatíženy osovou tlakovou silou, platí pokud:

$$\frac{l \text{ nebo } b}{D} \geq 1,0$$

#### Skořepiny zatížené vnitřním přetlakem



Obr. 24. Zatížení válcové skořepiny

#### Tloušťka stěny

$$s_R = \frac{p \cdot D}{2 [\sigma] \cdot \varphi_p - p} \quad (4.7)$$

$$s_R = \frac{0,6 \cdot 300}{2 \cdot 121 \cdot 0,7 - 0,6} = 1,068 \text{ [mm]}$$

$$s \geq s_R + c$$

$$s \geq 1,068 + 1$$

$$\text{Volba } - s = 3 \text{ [mm]}$$

Dovolený vnitřní přetlak

$$[p] = \frac{2 [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} \quad (4.8)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 121 \cdot 0,7 \cdot (3 - 1)}{300 + (3 - 1)} = 1,120 \text{ [MPa]}$$

### Skořepiny zatížené osovou tlakovou silou

Dovolené osová tlaková síla

$$[F] = \frac{[F]_P}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_P}{[F]_E}\right)^2}} \quad (4.9)$$

$$[F] = \frac{229\,162}{\sqrt{1 + \left(\frac{229\,162}{818\,402}\right)^2}} = 220\,674 \text{ [N]}$$

Dovolená osová síla v plastické oblasti

$$[F]_P = \pi(D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \quad (4.10)$$

$$[F]_P = \pi \cdot (300 + 3 - 1) \cdot (3 - 1) \cdot 121 = 229\,162 \text{ [N]}$$

Dovolená osová síla v elastické oblasti:

$$[F]_E = \text{MIN}\{[F]_{E1}; [F]_{E2}\} \quad (4.11)$$

kde

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_u} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100(s - c)}{D}\right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100(s - c)}{D}} \quad (4.12)$$

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 194\,000}{2,4} \cdot 300^2 \cdot \left[\frac{100(3 - 1)}{300}\right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100(3 - 1)}{300}} = 818\,402 \text{ [N]}$$

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_u} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda_K}\right)^2 \quad (4.13)$$

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (300 + 3 - 1) \cdot (3 - 1) \cdot 194\,000}{2,4} \cdot \left(\frac{\pi}{15,930}\right)^2 = 5\,965\,134 \text{ [N]}$$

Štíhlost  $\lambda_K$  se určí ze vzorce

$$\lambda_K = \frac{2,83 \cdot L_K}{D + s - c} \quad (4.14)$$

$$\lambda_K = \frac{2,83 \cdot 1700}{300 + 3 - 1} = 15,930 \text{ [-]}$$

Redukovaná délka  $L_K$  se bere podle typu vzpěru

$$L_K = 2 \cdot L \quad (4.15)$$

$$L_K = 2 \cdot 850 = 1700 \text{ [mm]}$$

V případě, že  $\frac{l}{D} < 10$ , vzorec  $[F]_E = \text{MIN}\{[F]_{E1}; [F]_{E2}\}$  má tvar:

$$[F]_E = [F]_{E1} \quad (4.16)$$

$$[F]_E = 818\,402 \text{ [N]}$$

### Skořepiny zatížené současně několika zatíženími

Skořepiny zatížené libovolnou kombinací zatížení musí kromě kontroly na jednotlivá zatížení podle příslušných článků vyhovět kontrole na kombinaci zatížení. Kontrola se provádí pro nejméně příznivou kombinaci zatížení a to jak pro stav pevnostní, tak i stabilní, může-li nastat. Kontrola se nemusí provádět v případě, že přídatná napětí vzhledem k napětím od přetlaku nezvýší celkovou napjatost o více jak 5 % jednotlivě, to znamená, že platí:

$$\left| \frac{F}{[F_p]} \right| \leq 0,05 \cdot \left| \frac{p}{[p]_p} \right|$$

$$\left| \frac{500}{229\,162} \right| \leq 0,05 \cdot \left| \frac{0,6}{1,120} \right|$$

$$|2,182 \cdot 10^{-3}| \leq 0,0268$$

→ Kontrola se nemusí provádět

## Válcové skořepiny vyztužené prstenci

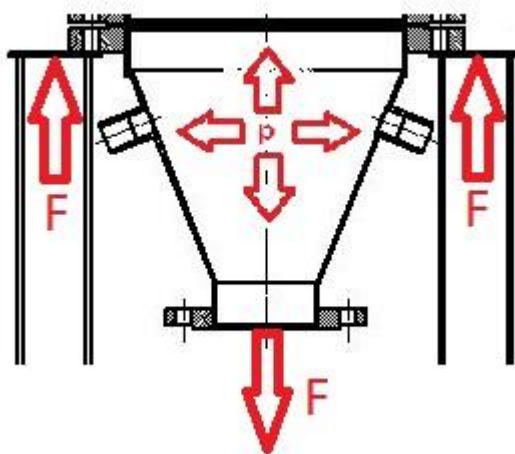
Je-li dán výpočtový přetlak  $p$  a tloušťka stěny, součinitel  $K_4$  se vypočítá:

$$K_4 = \frac{p \cdot (D + s - c)}{s \cdot \varphi_p \cdot [\sigma] \cdot (s - c)} - 1 \quad (4.17)$$

$$K_4 = \frac{0,6 \cdot (300 + 3 - 1)}{3 \cdot 0,7 \cdot 121 \cdot (3 - 1)} - 1 = -0,464 [-]$$

Je-li  $K_4 \leq 0$ , není třeba vyztužných prstenců.

### 4.3.2 Tloušťka stěny kuželové části separátoru [4.6]



Obr. 25. Zatížení kuželové skořepiny

Výpočtové parametry:

$$a_1 = 0,7 \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1} (s_1 - c)} \quad (4.18)$$

$$a_1 = 0,7 \sqrt{\frac{300}{\cos 22} (3 - 1)} = 17,807 [mm]$$

$$a_2 = 0,7 \sqrt{D \cdot (s_2 - c)} \quad (4.19)$$

$$a_2 = 0,7 \sqrt{300 \cdot (3 - 1)} = 17,146 [mm]$$

Výpočtový průměr hladké kuželové skořepiny:

$$D_K = D - 1,4 \cdot a_1 \cdot \sin \alpha_1 \quad (4.20)$$



$$D_K = 300 - 1,4 \cdot 17,628 \cdot \sin(22) = 290,661 \text{ [mm]}$$

Předchozí vzorce platí pokud:

$$0,001 \leq \frac{(s_1 - c)}{D} \leq 0,05$$

### Kuželové skořepiny zatížené vnitřním přetlakem

#### Tloušťka stěny (Wall thickness)

$$s_{KR} = \frac{p \cdot D_K}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_1} \quad (4.21)$$

$$s_{KR} = \frac{0,6 \cdot 290,661}{2 \cdot 121 \cdot 0,7 - 0,6} \cdot \frac{1}{\cos 22} = 1,116 \text{ [mm]}$$

$$s_K \geq s_{KR} + c$$

$$s_K \geq 1,116 + 1$$

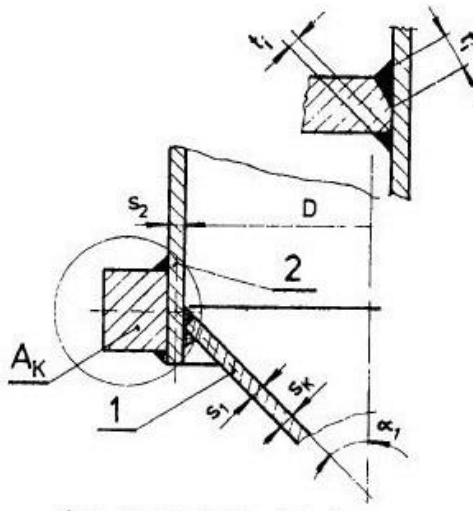
$$\text{Volba } s_K = 3 \text{ [mm]}$$

#### Dovolený vnitřní přetlak

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_K - c)}{\frac{D_K}{\cos \alpha_1} + (s_K - c)} \quad (4.22)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 121 \cdot 0,7 \cdot (3 - 1)}{\frac{290,661}{\cos 22} + (3 - 1)} = 1,072 \text{ [MPa]}$$

## Spojení kuželové a válcové skořepiny s výztužným prstencem



Obr. 26. Spojení kuželové a válcové skořepiny s výztužným prstencem

Výpočtové vzorce platí při splnění podmínek:

$$\alpha_1 \leq 70^\circ$$

-u spojů s válcovou skořepinou

$$s_1 - c \geq s_2 - c$$

Jestliže  $s_1 - c < s_2 - c$ , je nutné při kontrolním výpočtu dosadit  $s_2 - c = s_1 - c$

$$\varphi_R = \sqrt{\varphi_T} ; \varphi_{AR} = 1$$

**Plocha příčného průřezu výztužného prstence**

$$A_K = \frac{p \cdot D^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{8 [\sigma]_A \cdot \varphi_{AR}} \left( 1 - \frac{\beta_A + 0,25}{\beta + 0,25} \right) \quad (4.23)$$

$$A_K = \frac{0,6 \cdot 300^2 \cdot \operatorname{tg} 22}{8 \cdot 121 \cdot 1} \left( 1 - \frac{2,284 + 0,25}{0,65 + 0,25} \right) = -39,862 [mm^2]$$

Jestliže  $A_K \leq 0$ , není nutné přechod vyztužovat prstencem

**Dovolený vnitřní přetlak**

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \cdot \varphi_R \cdot (s_2 - c)}{D \cdot \beta_2 + (s_2 - c)} \quad (4.24)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 121 \cdot 0,837 \cdot (3 - 1)}{300 \cdot 0,711 + (3 - 1)} = 1,852 \text{ [MPa]}$$

### Součinitelé tvaru

$$\beta_A = \left( \frac{2[\sigma]_2 \cdot \varphi_R}{p} - 1 \right) \cdot \frac{s_2 - c}{D} \quad (4.25)$$

$$\beta_A = \left( \frac{2 \cdot 121 \cdot 0,837}{0,6} - 1 \right) \cdot \frac{3 - 1}{300} = 2,239 \text{ [-]}$$

$$\varphi_R = \sqrt{\varphi_T} = \sqrt{0,7} = 0,837 \text{ [-]}$$

$$\beta_2 = \max[0,5; \beta_0] \quad (4.26)$$

$$\beta_2 = \max[0,5; 0,711] = 0,711 \text{ [-]}$$

$\beta_0$

$$= \frac{0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \cdot \text{tg } \alpha_1 - B_3 \left[ 1 + \sqrt{\frac{1 + \kappa \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2 \cos \alpha_1}} \cdot \kappa \cdot \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right) \right]}{B_2 + 1 + \sqrt{\frac{1 + \kappa \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2 \cos \alpha_1}} \cdot \kappa \cdot \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)} \quad (4.27)$$

$$\beta_0 = \frac{0,4 \sqrt{\frac{300}{3 - 1}} \cdot \text{tg } 22 - 0,25 \left[ 1 + \sqrt{\frac{1 + 1 \left( \frac{3 - 1}{3 - 1} \right)^2}{2 \cos 22}} \cdot 1 \cdot \left( \frac{3 - 1}{3 - 1} \right) \right]}{(0) + 1 + \sqrt{\frac{1 + 1 \left( \frac{3 - 1}{3 - 1} \right)^2}{2 \cos 22}} \cdot 1 \cdot \left( \frac{3 - 1}{3 - 1} \right)} = 0,721 \text{ [-]}$$

$$B_2 = \frac{1,6 A_k}{(s_2 - c) \cdot \sqrt{D} \cdot (s_2 - c)} \cdot \frac{[\sigma]_A}{[\sigma]_2} \cdot \frac{\varphi_{AR}}{\varphi_R} \quad (4.28)$$

$$B_2 = \frac{1,6 (0)}{(3 - 1) \cdot \sqrt{300} \cdot (3 - 1)} \cdot \frac{121}{121} \cdot \frac{1}{0,837} = 0 \text{ [-]}$$

$$B_3 = 0,25$$

$$\kappa = \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2} \quad (4.29)$$

$$\kappa = \frac{121}{121} = 1$$

### Kuželové skořepiny zatížené osovými silami

Tloušťka stěny

$$s_{KR} = \frac{F}{\pi \cdot D_1 \cdot \varphi_T \cdot [\sigma]} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_1} \quad (4.30)$$

$$s_{KR} = \frac{200}{\pi \cdot 106,8 \cdot 0,7 \cdot 121} \cdot \frac{1}{\cos 22} = 0,008 \text{ [mm]}$$

$$s_K \geq s_{KR} + c$$

$$s_K \geq 0,008 + 1$$

$$s_K \geq 1,008$$

$$s_K = 3 \text{ [mm]}$$

Dovolená tahová síla

$$[F] = \pi \cdot D_1 \cdot (s_K - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T \cdot \cos \alpha_1 \quad (4.31)$$

$$[F] = \pi \cdot 106,8 \cdot (3 - 1) \cdot 121 \cdot 0,7 \cdot \cos 22 = 52\,598 \text{ [N]}$$

### Sčítání zatížení

Jestliže je kuželová skořepina zatížena přetlakem, osovou silou a ekvivalentní přetlak vyvolaný součtem vedlejších zatížení určených podle vzorce

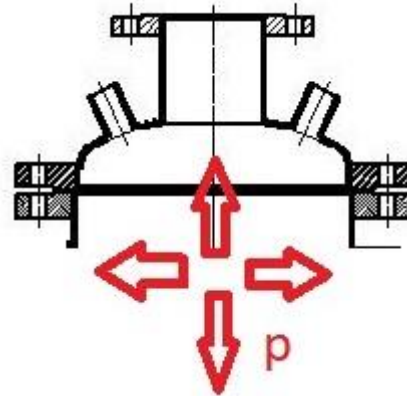
$$p_F = \frac{4F}{\pi D_R^2} \quad (4.32)$$

Je pro odpovídající výpočtový průměr menší než 10 % pracovního přetlaku, dimenzuje se kuželová skořepina pouze na zatížení přetlakem.

$$p_F = \frac{4 \cdot 200}{\pi \cdot 290,661^2} = 0,003 \text{ [MPa]}$$

→ Dimenzovat jen na zatížení přetlakem

### 4.3.3 Tloušťka stěny klenutého víka [4.7]



Obr. 27. Zatížení klenutého dna

Rozsah platnosti výpočtových vzorců

$$0,001 \leq \frac{(s_1 - c)}{D} \leq 0,1$$

$$0,2 \leq \frac{H}{D} \leq 0,5$$

Tloušťka stěny

$$s_{1R} = \frac{p \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0,5 p} \quad (4.33)$$

$$s_{1R} = \frac{0,6 \cdot 300}{2 \cdot 1 \cdot 121 - 0,5 \cdot 0,6} = 0,746 \text{ [mm]}$$

$$s_1 \geq s_{1R} + c$$

$$s_1 \geq 0,746 + 1$$

Volba tloušťky stěny  $s_1=3$  [mm]

Dovolený vnitřní přetlak

$$[p] = \frac{2(s_1 - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{R + 0,5 \cdot (s_1 - c)} \quad (4.34)$$

$$[p] = \frac{2(3 - 1) \cdot 0,7 \cdot 121}{300 + 0,5 \cdot (3 - 1)} = 1,1 \text{ [MPa]}$$

Poloměr křivosti ve vrcholu dna

$$R = \frac{D^2}{4H} \quad (4.35)$$

$$R = \frac{300^2}{4 \cdot 75} = 300 \text{ [mm]}$$

$$H = 0,25D \quad (4.36)$$

$$H = 0,25 \cdot 300 = 75 \text{ [mm]}$$

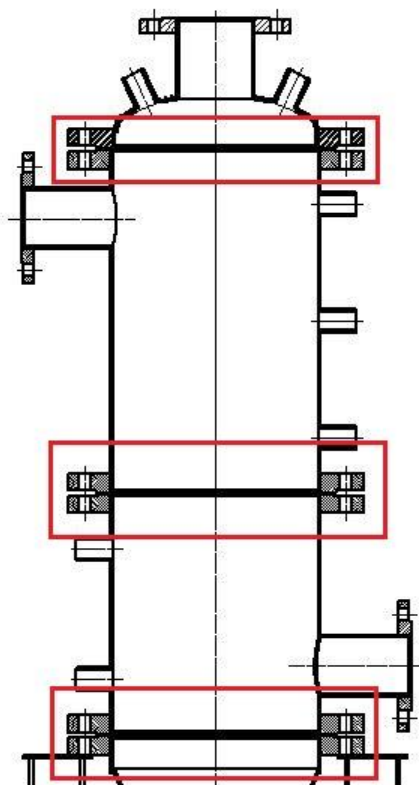
Jestliže délka válcové části lemu dna

$$l > 0,8\sqrt{D(s_1 - c)}$$

Potom jeho tloušťka nesmí být menší než tloušťka válcového pláště počítaného podle [4.5]

U den zhotovených z jednoho kusu platí  $\varphi=1$ .

#### 4.3.4 Přírubové spoje [4.18]



Obr. 28. Zobrazení oblasti výpočtu

Rozsah platnosti:

Je-li přírubový spoj zatížen vnějšími silami a moment, je třeba tento vliv zahrnout do výpočtu. To znamená celkovou sílu ve šroubech zvětšit o vnější sílu  $F_{V1}$ , jestliže namáhá šrouby na tah (obrácená síla se neuvažuje). Při vnějším momentu  $M_V$  se celková síla ve šroubech zvětší o

$$F_{V2} = \frac{4M_V}{D_2} \quad (4.37)$$

Moment na přírubu  $M_P$  nebo  $M_M$  se zvětší o hodnotu

$$M_R = (F_{V1} + F_{V2}) \cdot a_1 \quad (4.38)$$

Výpočtová teplota

Příruba

$$t = 0,9 \cdot t_m \quad (4.39)$$

$$t = 0,9 \cdot 100 = 90 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Šrouby

$$t = 0,85 \cdot t_m \quad (4.40)$$

$$t = 0,85 \cdot 100 = 85 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Kde  $t_m$  je teplota pracovního média.

Dovolené namáhání

Dovolené namáhání pro tlakovou zkoušku

$$[\sigma]_Z = \frac{R_e^{20} \text{ nebo } R_{p0,2}^{20} \text{ nebo } R_{p1,0}^{20}}{1,1} \quad (4.41)$$

$$[\sigma]_Z = \frac{800}{1,1} = 727 \text{ [MPa]}$$

Dovolené namáhání šroubů pro provozní podmínky se určí z:

$$[\sigma]_S = \text{Min} \left\{ \frac{R_{es} \text{ nebo } R_{p0,2}^{20} \text{ nebo } R_{p1,0s}}{n_T}; \frac{R_{m/10^5s}}{n_D} a \right. \\ \left. / \text{nebo } \frac{R_{p1,0/10^5}}{n_n} \right\} \quad (4.42)$$

$$[\sigma]_S = \frac{590}{2,5} = 236 \text{ [MPa]}$$

Dovolené namáhání šroubů při montáži pro tlakovou zkoušku se určí z:

$$[\sigma]_{SZ} = \frac{R_{es}^{20} \text{ nebo } R_{p0,2}^{20} \text{ nebo } R_{p1,0s}^{20}}{n_M} \quad (4.43)$$

$$[\sigma]_{SZ} = \frac{640}{1,7} = 376,5 \text{ [MPa]}$$

Součinitelé bezpečnosti:

Tabulka 3 - Přehled součinitelů bezpečnosti

Druh šroubů	$n_T$	$n_D$	$n_n$	$n_M$
Šrouby hlavové a svorníkové s nezeslabeným dříkem menší nebo rovné M20	2,5	2,5	1,6	1,7
Šrouby hlavové větší než M20 Šrouby svorníkové s nezeslabeným dříkem M22 až M30 a šrouby se zeslabeným dříkem menší nebo rovné M20	2,3	2,3	1,5	1,57
Šrouby svorníkové s nezeslabeným dříkem M33 a větší Šrouby se zeslabeným dříkem M22 až M30	2,1	2,1	1,4	1,45
Šrouby se zeslabeným dříkem M33 a větší	2,00	2,00	1,33	1,40



## Pomocné hodnoty

Ramena sil

Rameno síly od přetlaku

$$a_1 = \frac{1}{2}(D_2 - D_0 - s_1) \quad (4.44)$$

$$a_1 = \frac{1}{2}(380 - 306 - 2) = 36,0 \text{ [mm]}$$

Rameno síly potřebné k utěsnění

$$a_2 = \frac{1}{2}(D_2 - D_t) \quad (4.45)$$

$$a_2 = \frac{1}{2}(380 - 329,9) = 25,0 \text{ [mm]}$$

Opravný součinitel na rozteč otvorů pro šrouby

$$\eta = \max \left\{ \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot D_2}{5 \cdot n \cdot d_s}}; 1 \right\} \quad (4.46)$$

$$\eta = \max \left\{ \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot 380}{5 \cdot 12 \cdot 16}}; 1 \right\} = \max\{1,075; 1\} = 1,075 \text{ [-]}$$

Součinitel průměrů otvorů pro šrouby

$$K = \max \left\{ \frac{48 - d_s}{18}; 1 \right\} \quad (4.47)$$

$$K = \max \left\{ \frac{48 - 16}{18}; 1 \right\} = \max\{1,914; 1\} = 1,914 \text{ [-]}$$

Pro šrouby M12 a menší se dosadí  $K=2$ .

Součinitel tuhosti přírubového spoje

$$\alpha = \min \left\{ 1,4; \max \left\{ C_1 \cdot \frac{a_1}{a_2} + C_2; 1 \right\} \right\} \quad (4.48)$$

$$\alpha = \min \left\{ 1,4; \max \left\{ 0,91 \cdot \frac{36}{25} + 0,05; 1 \right\} \right\} = \min\{1,4; \max\{1,36; 1\}\} = 1,36 \text{ [-]}$$

Kde

$$C_1 = 0,91 \text{ a } C_2 = 0,05$$

### Výpočet sil

Výpočtový průměr těsnění

$$D_t = D' - 2b_v \quad (4.49)$$

$$D_t = 346 - 2 \cdot 8,05 = 329,9 \text{ [mm]}$$

$D_t$  závisí na typu použitého těsnění

### Provozní síla

Provozní síla od přetlaku

$$F_1 = \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot p \quad (4.50)$$

$$F_1 = \frac{\pi}{4} \cdot 430^2 \cdot 0,6 = 87\,132 \text{ [N]}$$

Síla potřebná k udržení těsnosti

$$F_2 = 2 \cdot \pi \cdot D_t \cdot b_v \cdot m \cdot p \quad (4.51)$$

$$F_2 = 2 \cdot \pi \cdot 329,9 \cdot 8,05 \cdot 2,5 \cdot 0,6 = 25\,029 \text{ [N]}$$

Provozní síla

$$F_p = F_1 + F_2 \quad (4.52)$$

$$F_p = 87\,132 + 25\,029 = 112\,161 \text{ [N]}$$

### Montážní síla pro tlakovou zkoušku

Síla pro udržení zkušebního přetlaku

$$F_{pz} = \frac{p_z}{p} (F_1 \cdot \alpha + F_2) \quad (4.53)$$

$$F_{pz} = \frac{0,75}{0,6} (87\,132 \cdot 1,36 + 25\,029) = 179\,170 \text{ [N]}$$

Síla utahovací pro dosažení těsnosti

$$F_u = \pi \cdot D_t \cdot b_v \cdot q_t \quad (4.54)$$

$$F_u = \pi \cdot 329,9 \cdot 8,05 \cdot 21 = 175\,202 \text{ [N]}$$

Jestliže je  $F_{pz} \geq F_u$ , potom síla montážní pro tlakovou zkoušku je dána vztahem

$$F_M = F_{pz} \quad (4.55)$$

Jestliže je  $F_{pz} < F_u$ , určí se montážní síla pro tlakovou zkoušku z

$$F_M = 0,2 \cdot F_u + 0,8 \cdot \sqrt{F_{pz} \cdot F_u} \quad (4.56)$$

$$F_M = 179\,170 \text{ [N]}$$

### Výpočet šroubů

Potřebná plocha průřezu šroubů

$$S = \max\left\{\frac{F_P}{[\sigma]_s}; \frac{F_M}{[\sigma]_{sz}}\right\} \quad (4.57)$$

$$S = \max\left\{\frac{112\,161}{236}; \frac{179\,170}{376,5}\right\} = \max\{475,3; 475,9\} = 475,9 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Používání šroubů s průměrem menším než M16 se nedoporučuje.

→ Volba šroubu M16

$$d_3 = 13,546 \text{ [mm]}$$

$$S_1 = 144,1 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Počet šroubů se určí z

$$n = \frac{S}{S_1} \quad (4.58)$$

$$n = \frac{475,9}{144,1} = 3,3 \text{ [1]}$$

Kde  $S_1$  je v tab 6. počet šroubů musí být sudé číslo, přednostně dělitelné 4.

→ Volba  $n=12$

## Plochá přivařovací příruba

Výpočet tloušťka listu - Pomocné hodnoty

$$A = (D_0 + s_1) \cdot 0,75 \cdot s_1^2 \cdot \frac{[\sigma]_p}{[\sigma]} \quad (4.59)$$

$$A = (306 + 2) \cdot 0,75 \cdot 2^2 \cdot \frac{121}{121} = 924 [-]$$

$$B = D_1 - D_0 - K \cdot d \quad (4.60)$$

$$B = 430 - 306 - 1,914 \cdot 18 = 89,5 [-]$$

$$Z = 1,275 \cdot \frac{M}{[\sigma]} \quad (4.61)$$

$$Z = 1,275 \cdot \frac{3\,763\,724}{121} = 39\,735 [-]$$

$$M = \max\{M_p; M_M\} \quad (4.62)$$

$$M = \max\{3\,763\,724; 781\,244\} = 3\,763\,724 [N \cdot mm]$$

$$M_p = F_1 \cdot a_1 + F_2 \cdot a_2 \quad (4.63)$$

$$M_p = 87\,132 \cdot 36 + 25\,029 \cdot 25 = 3\,763\,724 [N \cdot mm]$$

$$M_M = \max\left\{M_p \cdot \frac{p_z}{p}; F_M \cdot a_2\right\} \cdot \frac{[\sigma]}{[\sigma]_z} \quad (4.64)$$

$$\begin{aligned} M_M &= \max\left\{3\,881\,779 \cdot \frac{0,75}{0,6}; 179\,170 \cdot 25\right\} \cdot \frac{121}{727} \\ &= \max\{4\,852\,224; 4\,479\,250\} \cdot 0,166 = 781\,244 [N \cdot mm] \end{aligned}$$

Tloušťka listu

$$s = \max\left\{\eta \cdot \sqrt{\frac{Z - A}{B}}; 1,25 \cdot d_s\right\} \quad (4.65)$$

$$s = \max\left\{1,075 \cdot \sqrt{\frac{39\,735 - 924}{89,5}}; 1,25 \cdot 16\right\} = \max\{22,388; 20\} = 22,388 [mm]$$

Volba  $s=25$  [mm]

Výpočet průřezového modulu příruby

$$W = \frac{\pi}{4} \left[ B \cdot s^2 \cdot \frac{1}{\eta^2} + A \right] \quad (4.66)$$

$$W = \frac{\pi}{4} \left[ 89,5 \cdot 25^2 \cdot \frac{1}{1,075^2} + 924 \right] = 38\,737 \text{ [mm}^3\text{]}$$

### **Pevnostní kontrola přírubového spoje**

U přírubových spojů, jejichž rozměry jsou dány, vyjma přírub podle rozměrových norem použitých v rozsahu jejich platnosti, se provádí pevnostní kontrola

Pevnostní kontrola šroubů

Nosné průřezy šroubů a jejich počet musí splňovat podmínku:

Pro provoz

$$\frac{F_p}{n \cdot S_1 \cdot [\sigma]_s} \leq 1 \quad (4.67)$$

$$\frac{112\,161}{12 \cdot 144,1 \cdot 236} \leq 1$$

$$0,275 \leq 1$$

→ Vyhovuje

Pro montáž

$$\frac{F_M}{n \cdot S_1 \cdot [\sigma]_{sz}} \leq 1 \quad (4.68)$$

$$\frac{179\,170}{12 \cdot 144,1 \cdot 376,5} \leq 1$$

$$0,275 \leq 1$$

→ Vyhovuje

Pevnostní kontrola příruby:

Rozměry příruby nebo obruby musí splňovat podmínku

$$\frac{M}{W \cdot [\sigma]} \leq 1 \quad (4.69)$$

$$\frac{3\,763\,724}{38\,737 \cdot 121} \leq 1$$

$$0,803 \leq 1$$

→ Vyhovuje

Pevnostní kontrola těsnění

Rozměry těsnění musí vyhovovat podmínce

$$\frac{F_p}{\pi \cdot D_t \cdot b_t \cdot \gamma \cdot q_t} \leq 1 \quad (4.70)$$

$$\frac{112\,161}{\pi \cdot 329,9 \cdot 20 \cdot 3 \cdot 21} \leq 1$$

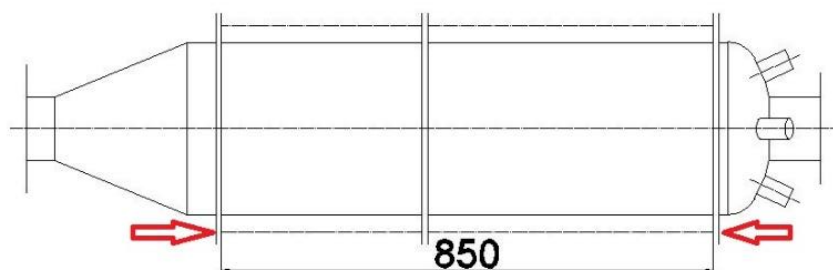
$$0,0928 \leq 1$$

→ Vyhovuje

#### 4.3.5 Vzpěrná pevnost

Dále je potřeba zkontrolovat nohy separátoru a vzpěry používané jako vodící tyče či podpora při konfiguraci s plastovými díly.

Vzpěry: Nejprve provedu kontrolní výpočet vzpěr. Pro naprostou stabilitu jsem navrhl umístit 4 vzpěry v místě zobrazeném na Obr. 29.



Obr. 29. Zatížení vzpěry

$$J_{min} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (4.71)$$

$$J_{min} = \frac{\pi \cdot 16^4}{64} = 3\,216,991 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (4.72)$$

$$A = \frac{\pi \cdot 16^2}{4} = 201,0619 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{A}} \quad (4.73)$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{3\,216,991}{201,0619}} = 4 \text{ [-]}$$

$$\lambda = \frac{l}{i_{min}} \quad (4.74)$$

$$\lambda = \frac{850}{4} = 212,5 \text{ [-]}$$

$$\lambda_{mez} = \sqrt{n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_u}} \quad (4.75)$$

$$\lambda_{mez} = \sqrt{4 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 200\,000}{210}} = 193,9$$

$$F_{kr} = n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{l^2} \quad (4.76)$$

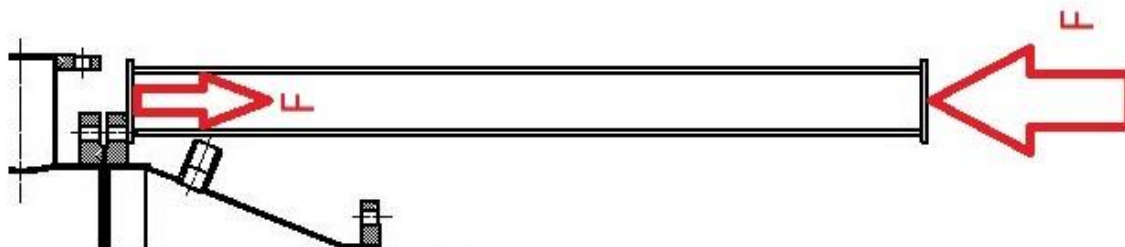
$$F_{kr} = 2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 200\,000 \cdot 3\,216,991}{850^2} = 35\,165,2 \text{ [N]}$$

$$F_D \leq \frac{F_{kr}}{k} \quad (4.77)$$

$$F_D \leq \frac{35\,165,2}{3} = 11\,718,7 \text{ [N]}$$

Jelikož předpokládám zatížení od klenutého víka a případných komponent cca 60 kilogramů, je jištění vzpěrami více než dostatečné.

Nohy: 3 nohy o rozměru U 80x40x4



Obr. 30. Zatížení nohy separátoru

$$J_{min} = \frac{B \cdot H^3 - (B - t) \cdot (H - 2 \cdot t)^3}{12} \quad (4.78)$$

$$J_{min} = \frac{40 \cdot 80^3 - (40 - 4) \cdot (80 - 2 \cdot 4)^3}{12} = 586\,922,7 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = H \cdot B + 2 \cdot (B - t) \cdot t \quad (4.79)$$

$$A = 80 \cdot 40 + 2 \cdot (40 - 4) \cdot 4 = 608 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{586\,922,7}{608}} = 31,1 \text{ [-]}$$

$$\lambda = \frac{950}{31,1} = 30,576 \text{ [-]}$$

$$\lambda_{mez} = \sqrt{4 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 200\,000}{210}} = 193,9$$

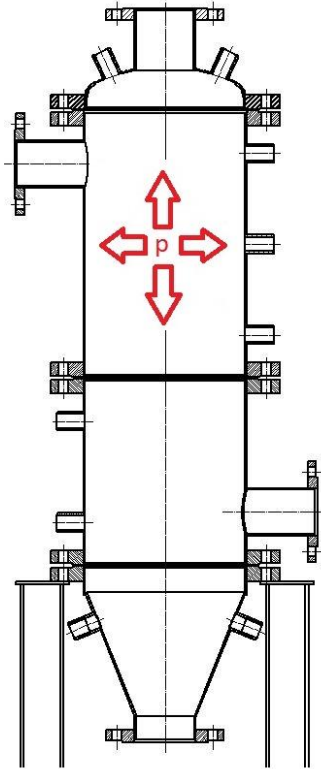
$$F_{kr} = 2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 200\,000 \cdot 586\,922,7}{950^2} = 5\,134\,798 \text{ [N]}$$

$$F_D \leq \frac{5\,134\,798}{3} = 1\,711\,599 \text{ [N]}$$

Celý separátor včetně provozní kapaliny nebude vážit více než 400 kg, takže jsou nohy předdimenzovány pro každý případ.



### 4.3.6 Tlaková zkouška

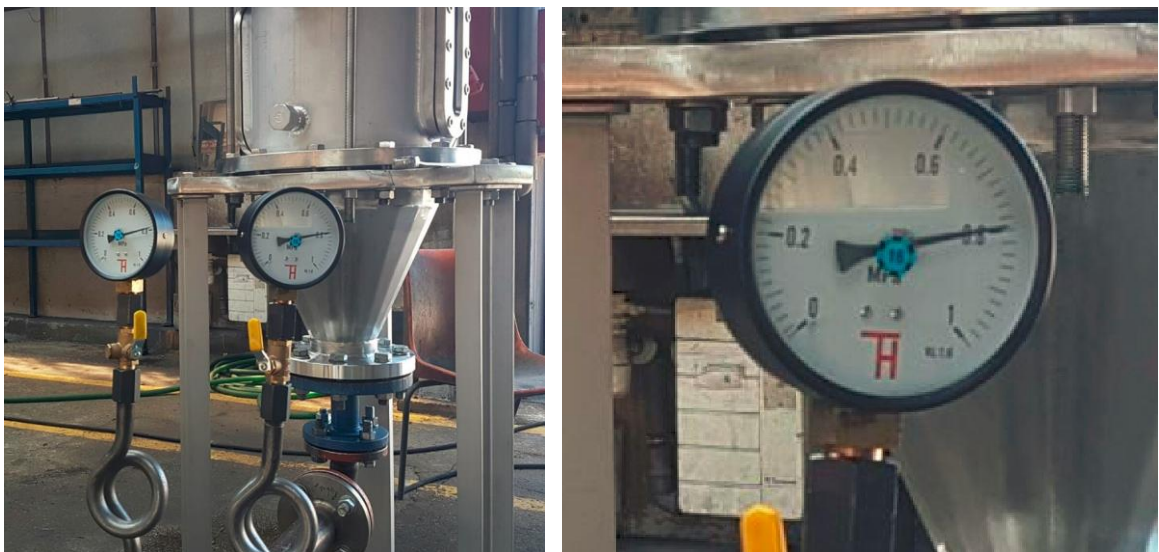


Obr. 31. Tlaková zkouška- zatížení

Zkušební přetlak se určuje podle [7.1]:

$$p_{zk} = \max \left\{ 1,25 \cdot p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}; 0,2 \text{ MPa} \right\} \quad (4.80)$$

$$p_{zk} = \max \left\{ 1,25 \cdot 0,6 \frac{121}{121}; 0,2 \text{ MPa} \right\} = \max \{0,75; 0,2\} = 0,75 \text{ MPa}$$



Obr. 32. Tlaková zkouška

#### 4.4 Výkresová dokumentace

Na základě všech výpočtů, po důsledném návrhu všech částí bylo možno vytvořit výkresovou dokumentaci separátoru. Nejlepší přístup z hlediska rychlosti provedení případných změn či parametrů představuje v nynější době tvorba modelu ve 3D. K tomu mi posloužil program společnosti Autodesk – Inventor 2014. Ukázka modelu viz Obr. 33.



Obr. 33. 3D model z programu Autodesk Inventor 2014

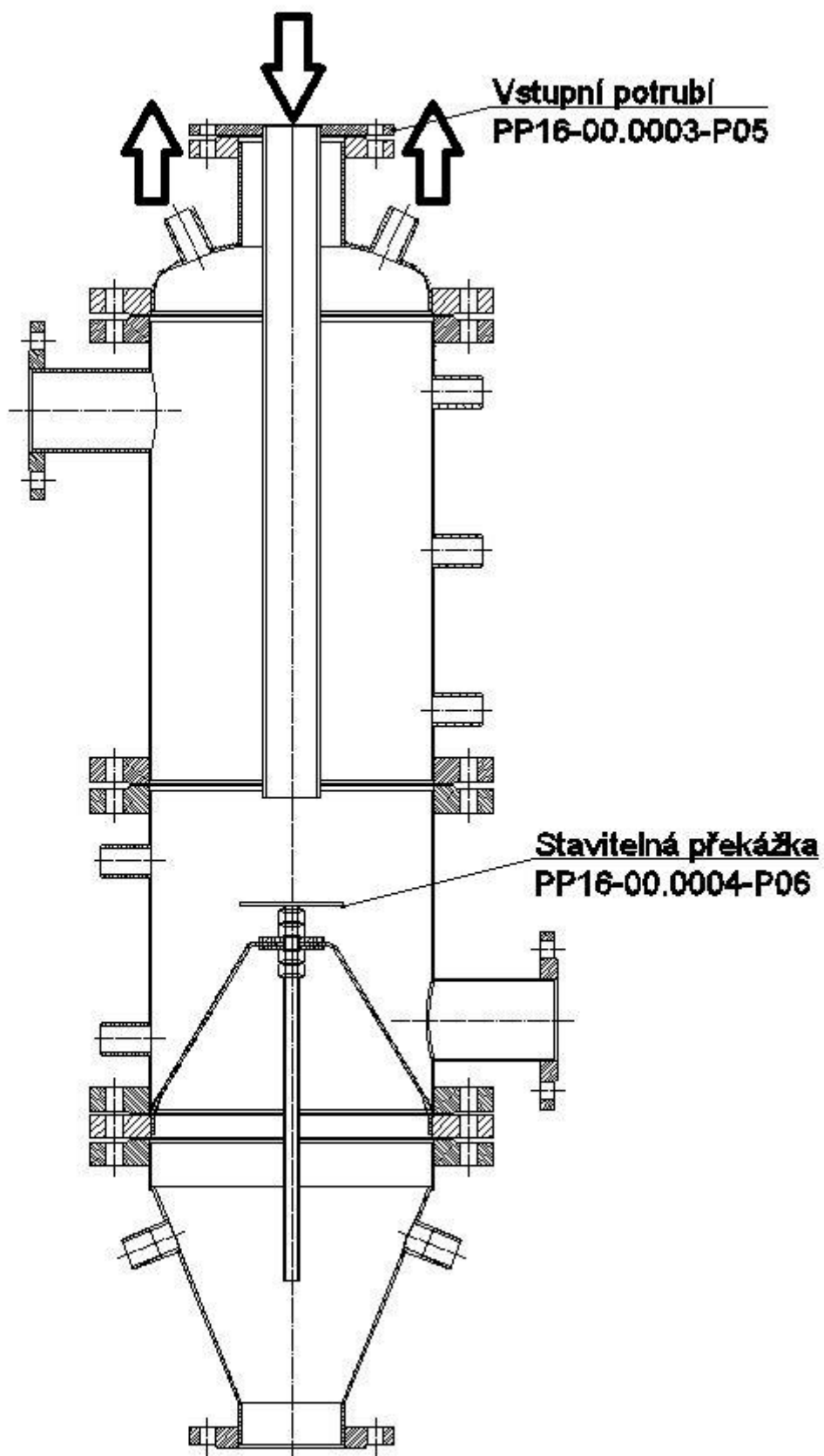
Podle tohoto modelu jsem pak mohl vytvořit potřebnou výkresovou dokumentaci pomocí programu Autodesk Autocad. Všechny výkresy jsou přiloženy v příloze pod označením P3 - P14. Čím dál častěji si výrobní společnosti tvoří detailní výkresovou dokumentaci sami, jelikož sami nejlépe znají své možnosti na dílně, proto stačilo vytvořit výkresy v daném rozsahu. Společnost Monts, sídlící v Hradci Králové se pak postarala o výrobu kompletního zařízení, viz Obr. 34. Jednotlivé konfigurace jsou zobrazeny na následujících stránkách.



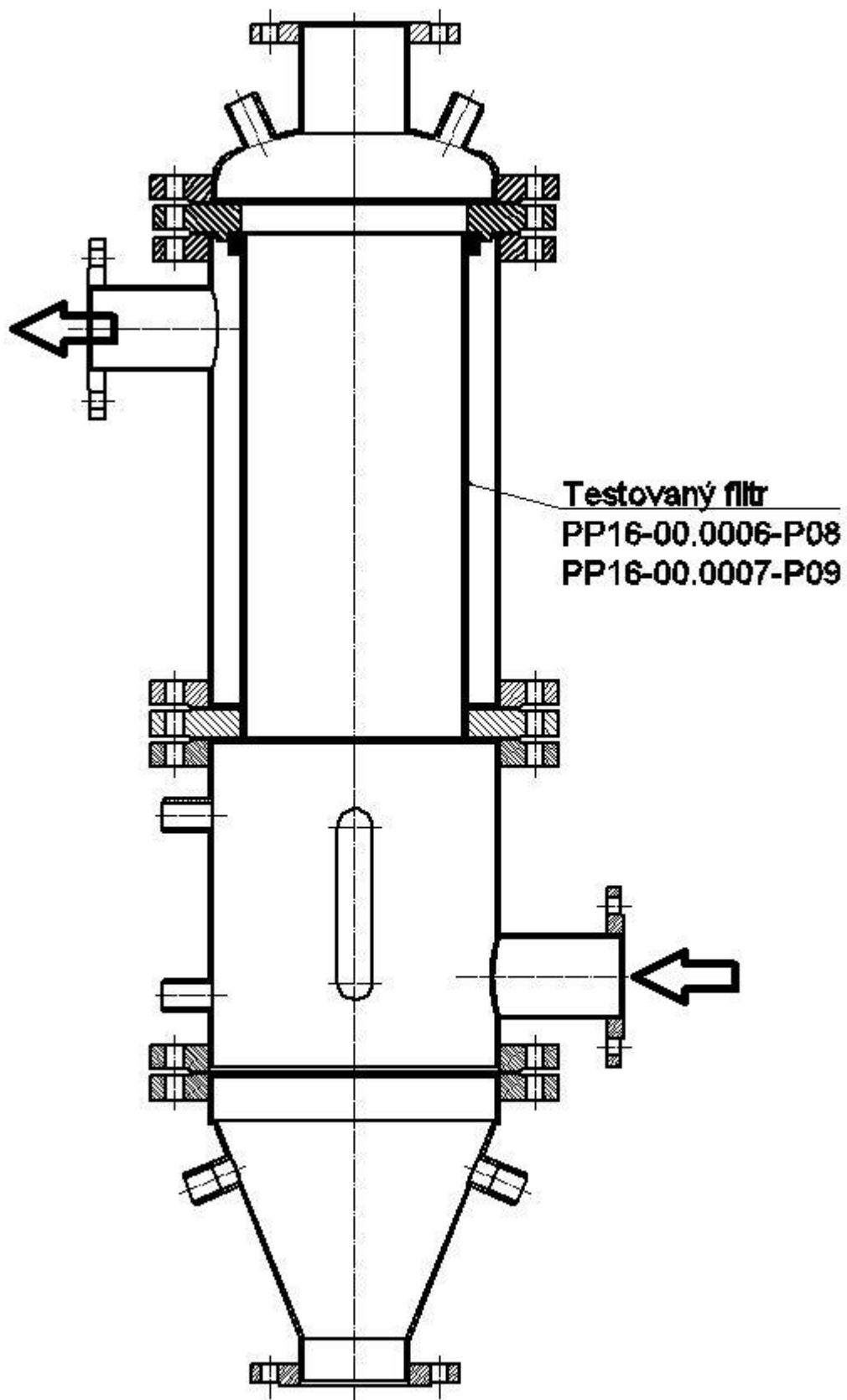
Obr. 34. Vyrobený separátor v priestoroch firmy Monts



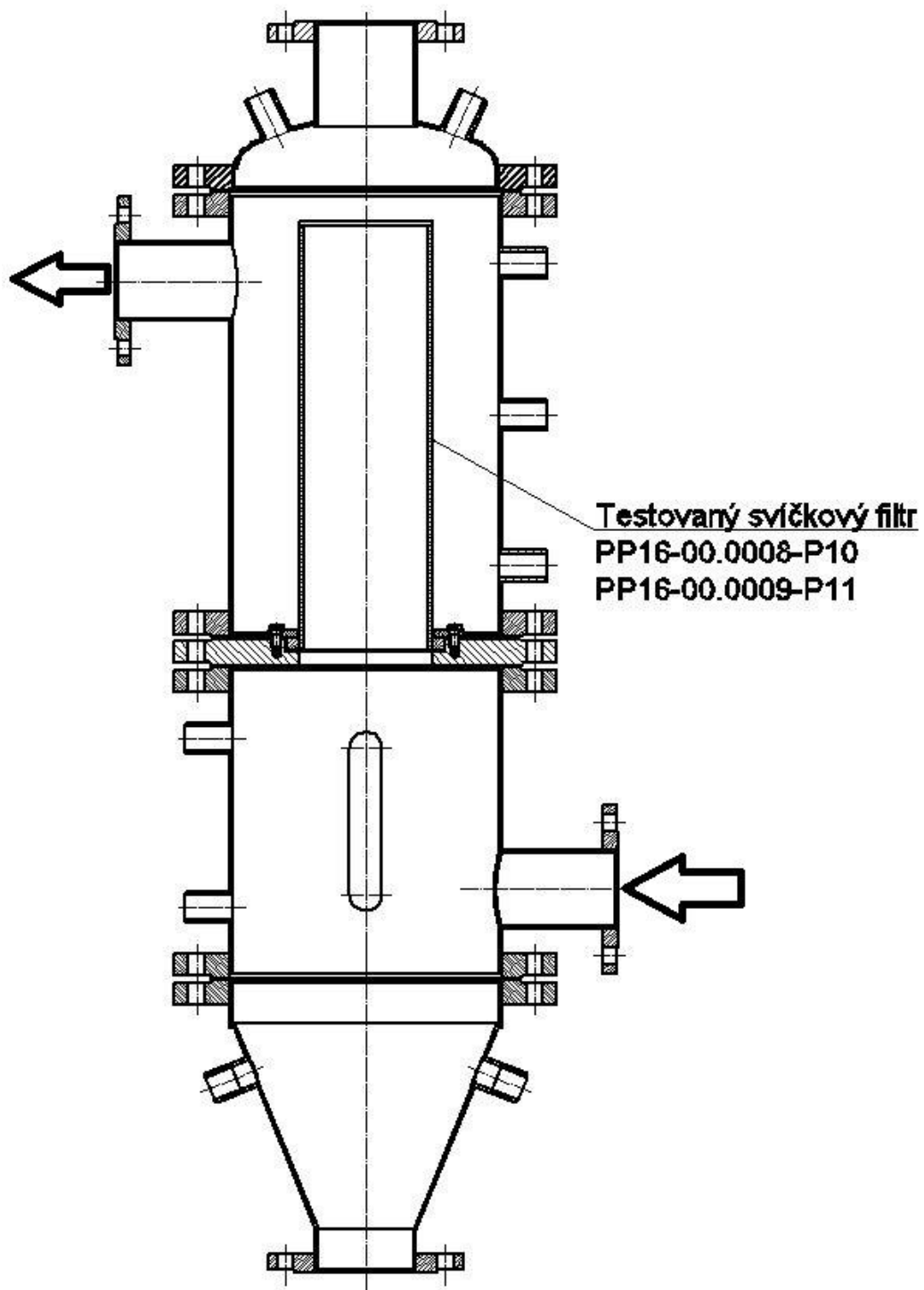
Obr. 35. Sestavený separátor



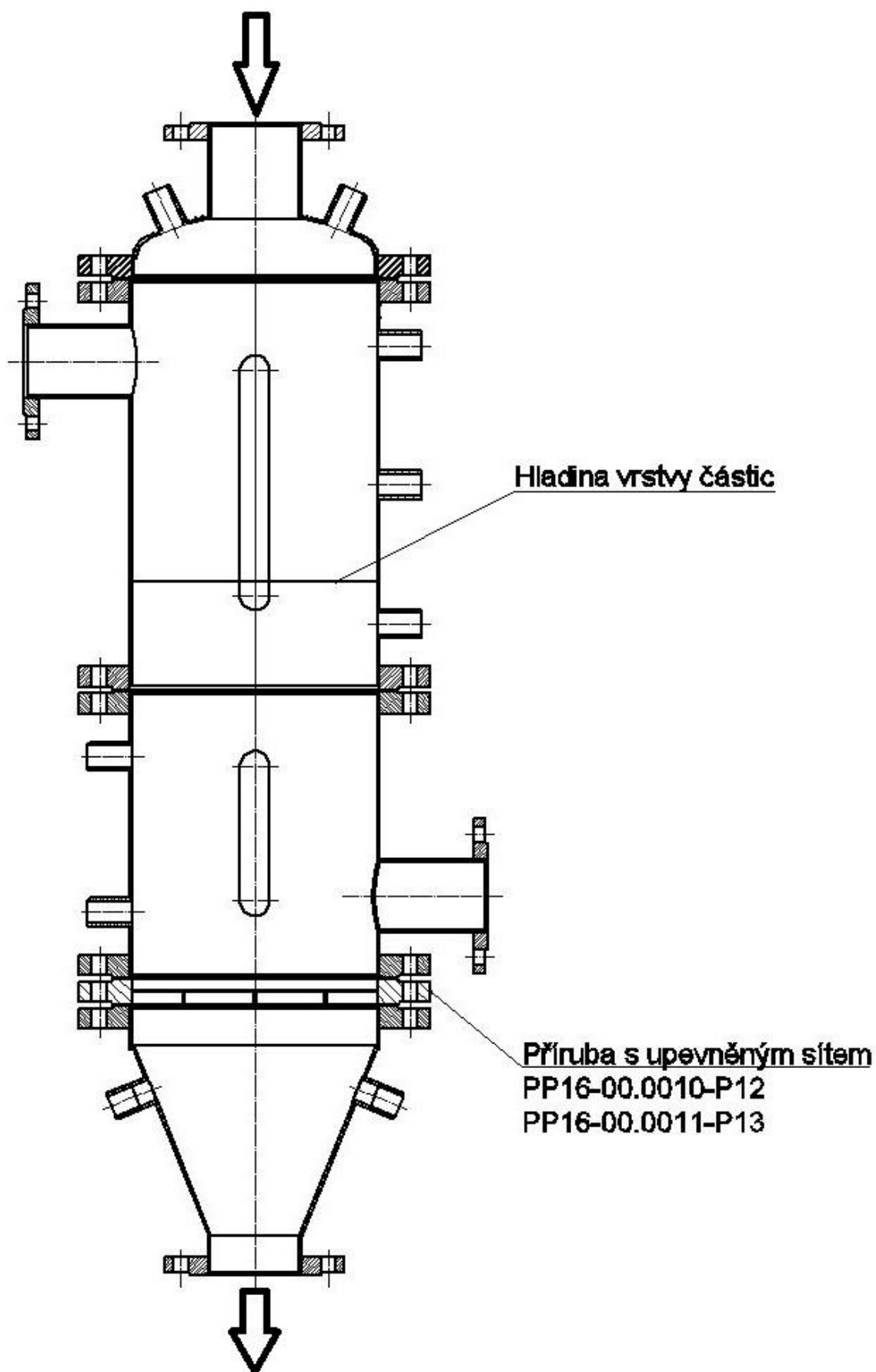
Obr. 36. Konfigurace - gravitační usazovák



Obr. 37. Konfigurace - separace pomocí filtru



Obr. 38. Konfigurace - svíčkový filtr



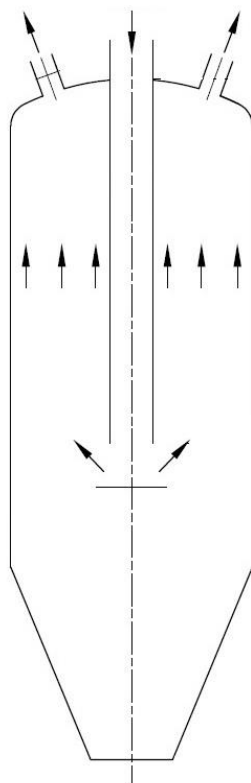
Obr. 39. Konfigurace - filtrace skrz nuč

## 5. CFD analýza proudění gravitačního usazováku

Přestože poloprovodní nebo experimentální zařízení je stále nejspolehlivějším ukazatelem, CFD simulace při správném nastavení umožňuje poměrně dobré zobrazení proudění i v těch nejsložitějších zařízeních. Proto jsem před vlastní výrobou nejprve provedl počítačové simulace v software společnosti Ansys. Díky tomuto software jsem mohl ověřit, zda návrh, který byl vytvořen, má reálný základ a zda navržená konfigurace bude moci skutečně fungovat.

### 5.1 Funkce a parametry zařízení

Separace probíhá uvnitř těla separátoru. Pro ukázkou simulace jsem zvolil konfiguraci gravitačního usazování. Shora přivádějící proud nesoucí částice je nucen prudce změnit svůj směr. Následně se kapalina vrací směrem vzhůru k výstupním otvorům takovou rychlostí, aby se částice byly schopny usazovat na dno zařízení. Zařízení musí být schopno otestovat i jiné konfigurace, ale ty jsem z důvodu nedostatku času na takovéto testování neprováděl.



Obr. 40. Základní schéma zařízení v konfiguraci gravitačního usazováku

Zařízení má být zmenšeným modelem reálného zařízení a zároveň byl vznesen požadavek na multifunkční použití na několik konfigurací. Z důvodu zjednodušení jsem uvažoval pouze



zjednodušený model bez napojení jednotlivých částí, bez dalších vstupů, které nám ve skutečnosti budou nepatrně ovlivňovat proudění uvnitř separátoru.

Pro náročnost simulace proudění částic v kapalině mi bylo doporučeno upustit od zahrnutí částic do výpočtu. Také pro velmi nízkou koncentraci jsem uvažoval pouze proudění kapaliny.

### **5.1.1 Modely proudění**

Ansys Fluent umožňuje volbu rovnou několika modelů proudění, které se od sebe liší vhodností pro určité podmínky. Pro každý případ bychom měli zvolit správný model, pro zajištění korektního výpočtu daného problému včetně všech jeho částí.

Nejjednodušším modelem turbulence je model směšovací délky, tzv. nularovnicový model, který popisuje rozložení turbulentní viskozity. Hodí se pro modelování proudění ve smykové vrstvě, neobsahuje ale transport turbulence.

Aby byl v modelu pokryt i transport turbulence, zavedl se jednorovnicový model. Základem je zde rovnice pro měrnou turbulentní kinetickou energii  $k$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ]. Zde je nutno řešit diferenciální transportní rovnici. Nevýhodou tohoto modelu je nutnost definice délkového měřítko, které má charakterizovat turbulentní pohyb, nehodí se tak pro složitější modely proudění, kde se nedá jednoduše algebraicky definovat. Tam je zapotřebí použít dvourovnicový model turbulence.

Dvourovnicové modely vznikaly po roce 1968. O jejich řešení se pokoušely týmy z mnoha univerzit. Problémem bylo nalézt vhodnou uzavírací rovnici pro uzavření soustavy rovnic kontinuity. To se nakonec podařilo využitím exaktní rovnice pro izotropní disipaci turbulentní kinetickou energii  $\epsilon$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ ] (model  $k - \epsilon$ ), nebo disipaci připadající na jednotku turbulentní kinetické energie  $\omega$  [ $\text{s}^{-1}$ ] (model  $k - \omega$ ).

### **Viskózní model turbulentní $k-\epsilon$**

Modely  $k - \epsilon$  patří mezi nejrozšířenější a nejpoužívanější modely turbulence. Model  $k - \epsilon$  se používá již velmi dlouhou dobu, ale má také svoje nedostatky. Mezi ně patří průběh  $\epsilon$  v blízkosti stěny. Řešením tohoto problému bylo řešení poněkud složitých stěnových funkcí, ale nebyl to příliš elegantní způsob. Proto se začal i přes počáteční obtíže používat model  $k - \omega$ . Přesto byl tento model jedním z těch který jsem vyzkoušel. Právě díky době, kterou se používá, je poměrně dobře nastavený.

## Viskózní model turbulentní k- $\omega$

Tento model se více hodí pro proudění v blízkosti obtékaných stěn, protože se dá integrovat až do těsné blízkosti obtékaných stěn bez nutnosti korekce na nízké Reynoldsovo číslo, dále umožňuje spočítat i přechod do mezní vrstvy. Vznikal oproti k –  $\epsilon$  poněkud se zpožděním, ovšem jakmile se dokázala definovat veličina  $\omega$ , začal se i tento model masově využívat. Tyto dva modely nakonec vytvořily dvojici, která je dnes součástí takřka všech komerčních software. Nevýhodou dvourovnicových modelů je však skutečnost, že nedosahují na vliv sekundárního proudění vznikajícího v kanálech složitějších geometrických průřezů. To však naštěstí není případ proudění v tomto zařízení. Jeho modifikovanou verzi k- $\omega$ -SST intermittency jsem používal při simulaci proudění v zařízení. Dále budu označovat tento model jako k- $\omega$ -SST z důvodu zkrácení. Nutností pro použití tohoto modelu je vytvoření hustější sítě poblíž stěn, protože je zde citlivější.

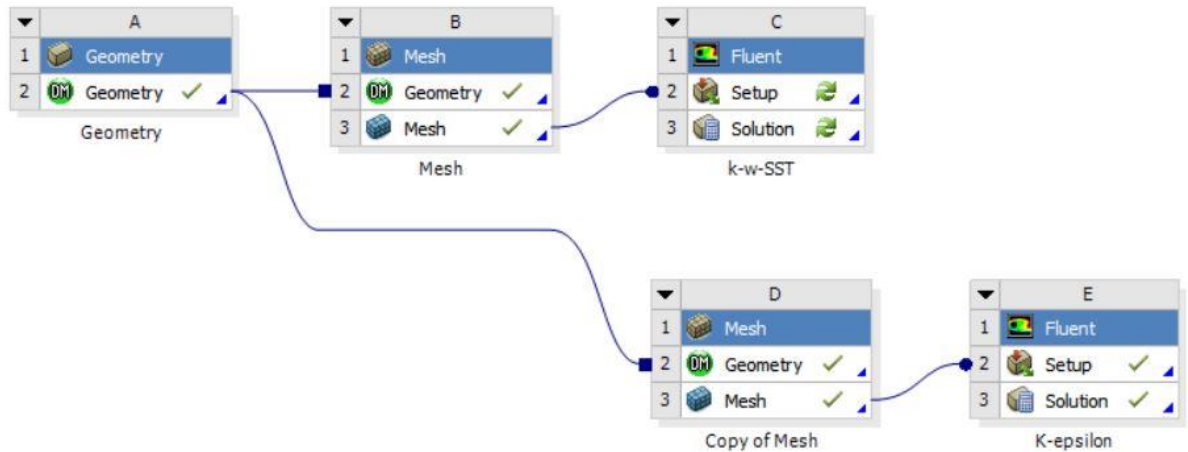
## SST

Poslední model, o kterém se zmíním, je model SST. Z výsledků experimentů provedených v minulosti se zjistilo, že turbulentní smykové napětí je ve velké části mezní vrstvy přibližně úměrné turbulentní energii. Předchozí dvourovnicové modely ovšem neberou v úvahu vliv transportu turbulentního smykového napětí. Tento nedostatek byl vyřešen modelem SST, který už počítá s vlivem historie vývoje turbulentní struktury proudění. Upozorňuji však, že model SST a k- $\omega$ -SST nejsou totožné.

## 5.2 Modelování zařízení

Pro numerickou simulaci potřebujeme definovat geometrii a vytvořit vhodnou výpočetní síť, se kterou bude program schopný počítat. Pro možnost porovnání jsem vytvořil 2D verzi zařízení, dále 3D variantu finální verze zařízení a pro další srovnání ještě 3D verzi jedné z původních variant zařízení. I tu jsem nastavil stejně jako konečnou verzi, liší pouze lehce pozměněnou geometrií. Pro snazší orientaci značím prvotní verzi A, a finální verzi B. Pokud bych v průběhu tvorby modelu nebo sítě udělal chybu, mohly by se výsledky diametrálně lišit. Oba modely jsou vytvořeny v programu Ansys DesignModeler. Vytvoření modelu a následné importování z programu Autodesk Inventor ve formátu STEP jsem zavrhl, pro takřka žádnou úsporu času, jelikož bych musel model následně upravovat pro tvorbu sítě. Při změně průměru zařízení či jiné změně konfigurace by bylo nutné tento postup opakovat.

### 5.2.1 Model zařízení



Obr. 41. Struktura nastavení prostředí Workbench

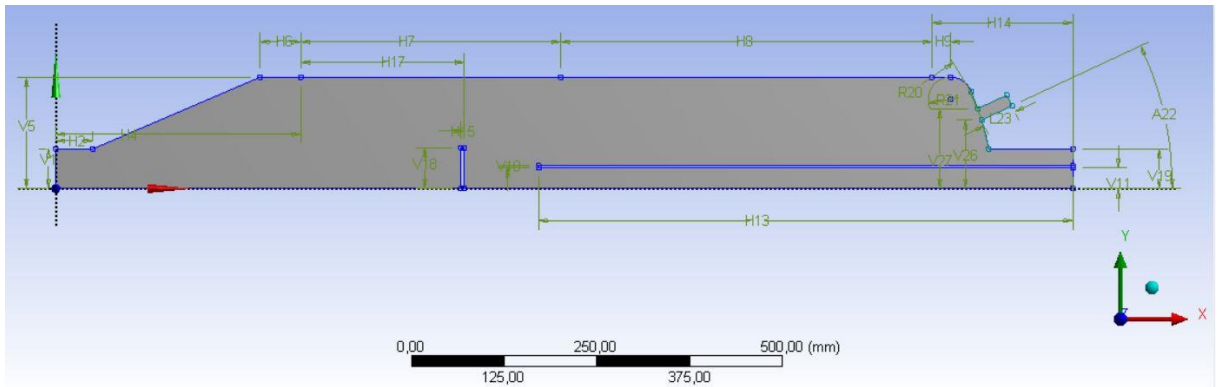
V nastavbě programu Ansys – DesignModeler jsem vytvořil 2D i 3D model. 2D varianta byla méně náročná na tvorbu. Jelikož je separátor takřka osově symetrický, mohl jsem vytvořit pouze polovinu a v programu poznamenat že se jedná o symetrickou úlohu – viz Tvorba 2D modelu. Problémem však je, že program nyní počítá s tím, že je zařízení opravdu symetrické, tedy včetně výstupu. Když ale rotujeme tento náčrt, z výstupu nám vznikne jakési mezikruží. Proto jsem alespoň spočítal ekvivalentní průřez výstupu a výstupu značně ubral na průřezu.

Průřez výstupů:

$$S_1 = 4 \cdot \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \quad (5.1)$$

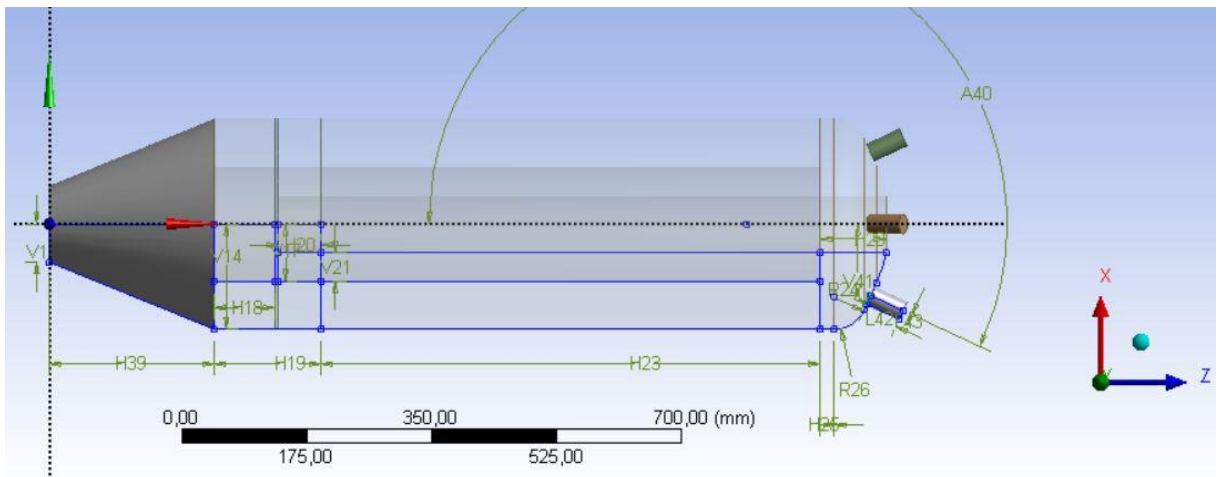
Ekvivalentní průřez vytvořený rotací profilu (zjednodušeně):

$$S_e = \pi \cdot (R - r) \quad (5.2)$$

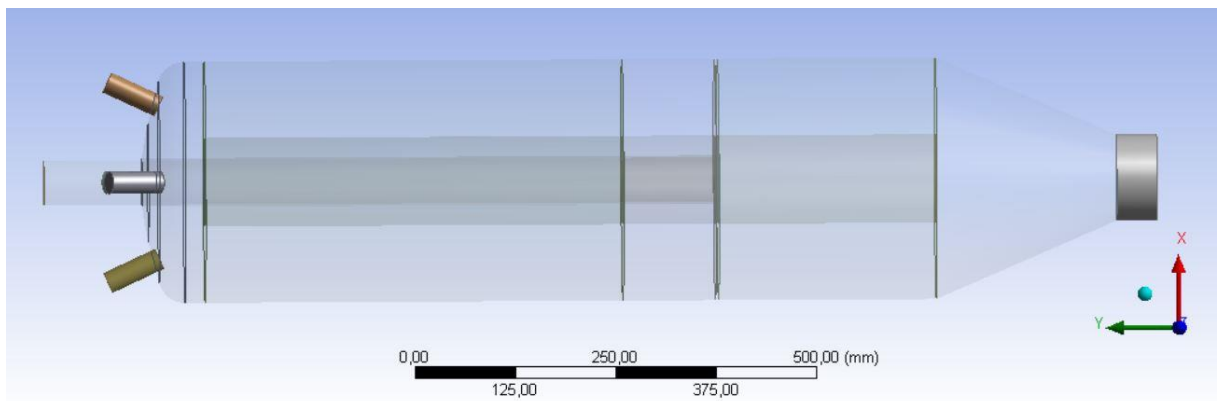


Obr. 42. Tvorba 2D modelu

Poněkud složitější bylo vytvořit funkční 3D model. Přestože se jedná o poměrně jednoduchý model, bylo potřeba ho rozdělit na 14 částí v případě modelu A (viz Obr. 43), nebo na 17 částí v případě modelu B (viz. Obr. 44). Rozdělení bylo nutné, pro tvorbu sítě v následujícím kroku. Bez této úpravy se stávala síť nepoužitelnou, jelikož nadstavba Mesh si nebyla schopná s modelem poradit.



Obr. 43. Tvorba geometrie – model A

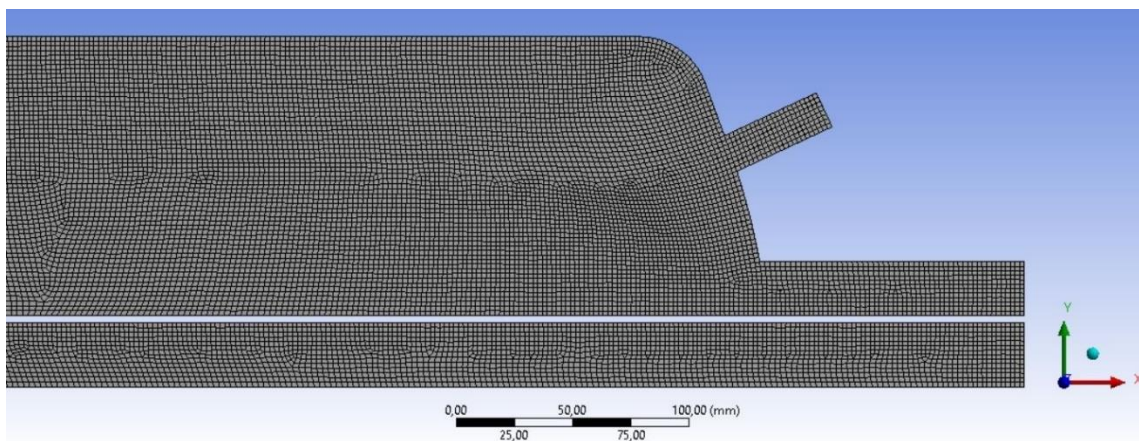


Obr. 44. Tvorba geometrie - model B

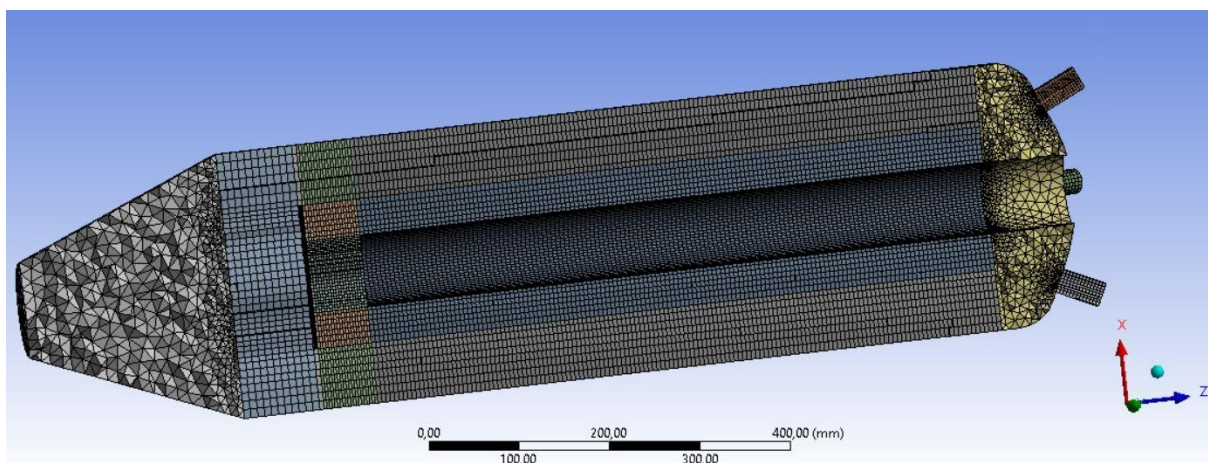
### 5.2.2 Tvorba sítě

U tvorby sítě jsem se snažil o kvalitní síť, v rámci možností, s podmínkou studentské verze o maximální počet 0,5 milionu prvků v programu Ansys Meshing. Z kritérií pro posouzení kvality sítě, jsem se zaměřoval především na optimální velikost buněk, vhodnost uspořádání buněk v prostoru a jednotlivou návaznost při přechodu na jiný rozměr. Z důvodu šetření počtu buněk jsem dvě části, ve kterých nás chování příliš nezajímalo, poněkud zjednodušil. Přesto u 3D variant dělalo problém se pod hraniční hodnotou 0,5 milionu buněk dostat. Pro skutečně relevantní síť pro model takových rozměrů by mělo být použito násobně více buněk. Jelikož nám ale nešlo o výpočet složitých úloh typu přestup tepla, síť jsem v rámci možností maximálně zjednodušil. Snažil jsem se o co největší využití kvádrů, pokud to šlo, a kde nešlo, vyplnil jsem síť automatickými čtyřstěny. Pro výpočet jsem používal dva modely turbulence,  $k-\varepsilon$  a  $k-\omega$ -SST (modifikovaná verze modelu  $k-\omega$ ). Modelu  $k-\omega$ -SST jsem musel vytvořit odlišnou síť, jelikož je náchylnější na kvalitní síť u stěn. Síť pro model  $k-\varepsilon$ , viz Obr. 45, Obr. 46 a Obr. 47, pro model  $k-\omega$ -SST viz Obr. 48, Obr. 49 a Obr. 50.

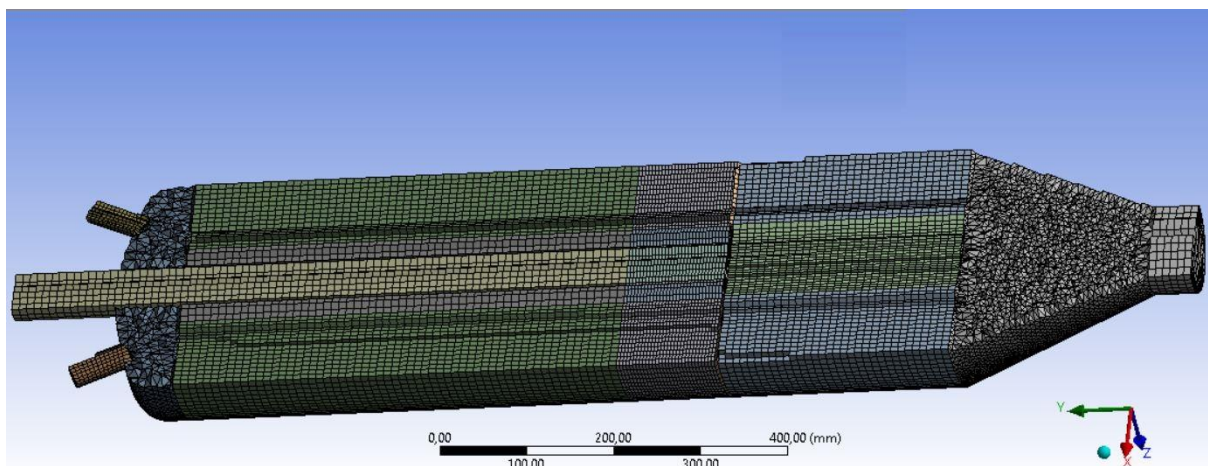
Sítě pro k-ε:



Obr. 45. Vytvořená síť – 2D varianta pro model turbulence k-ε

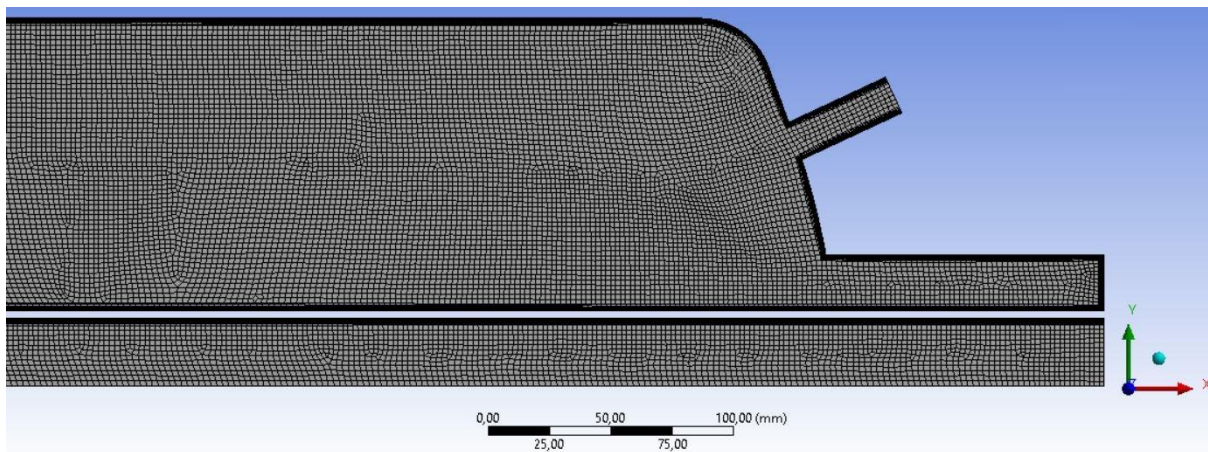


Obr. 46. Vytvořená síť - varianta A pro model turbulence k-ε

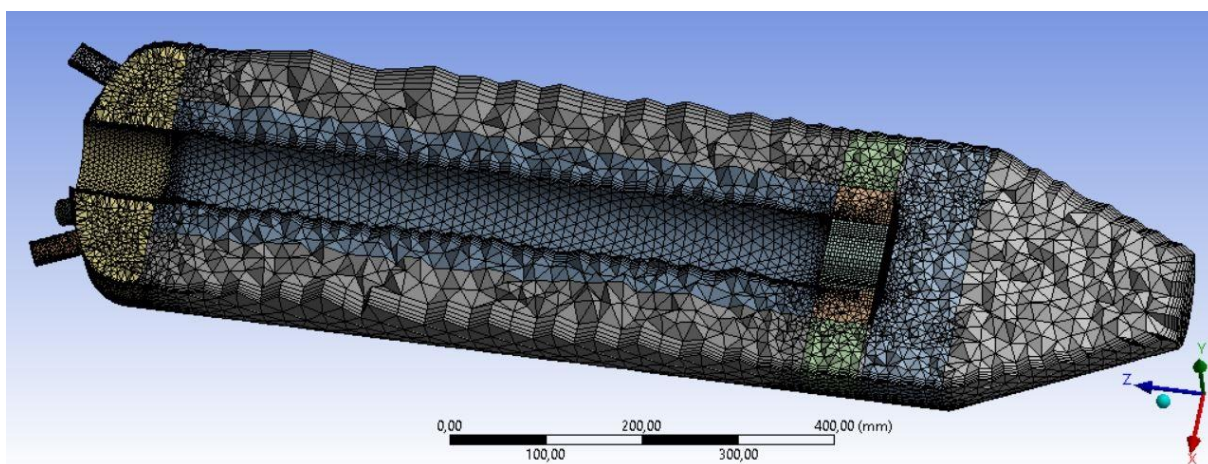


Obr. 47. Vytvořená síť - varianta B pro model turbulence k-ε

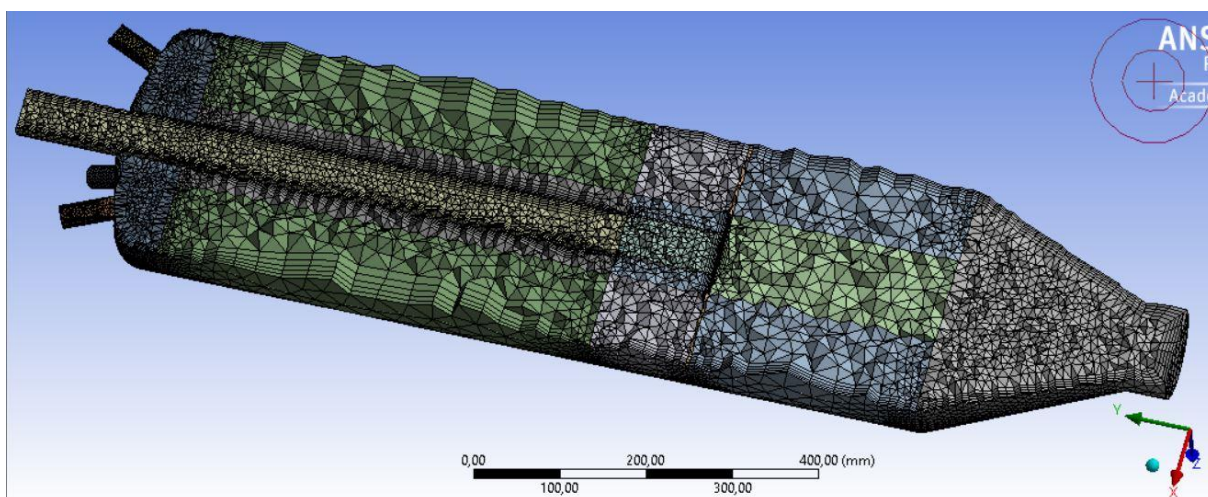
Sítě pro k- $\omega$ -SST:



Obr. 48. Vytvořená síť - 2D varianta pro model k- $\omega$ -SST – detail



Obr. 49. Vytvořená síť - varianta A pro model turbulence k- $\omega$ -SST



Obr. 50. Vytvořená síť - varianta B pro model turbulence k- $\omega$ -SST

## 5.3 Nastavení parametrů výpočtu

### 5.3.1 Materiál

Změna teploty v průběhu usazování se neuvažuje, proto jsem ponechal standartní přednastavený materiál, tedy hliník. Jako kapalina byla nastavena voda, jelikož její viskozitě se přibližují používané kapaliny v provozních teplotách.

### 5.3.2 Okrajové podmínky

Počáteční a okrajové podmínky byly nastaveny následovně:

Vstup (Inlet) byl nastaven jako Velocity inlet se vstupní rychlostí  $u_1=0,229$  [m.s<sup>-1</sup>].

Výstupy (4x) jako Pressure outlet. Tlak byl ponechán na výchozí nastavení – 0 [Pa]. Tato hodnota je ovšem relativní tlak vzhledem k provoznímu (atmosférickému) tlaku – 101 325 Pa.

Dalším omezením bylo definování stěn, a to jak obvodových tak rozptylového plechu a vstupního potrubí.

### 5.3.3 Počet iterací

Pro relevantní výpočet jsem nastavil 1500 iterací, abychom s jistotou mohli sledovat postup konvergence v průběhu výpočtu, viz kapitola 5.4.

Po nastavení parametrů proudění jsem spustil výpočet. Použité modely (k-ε a k-ω-SST) jsou vždy uvedeny u každého obrázku.

## 5.4 Sledování průběhu - residua

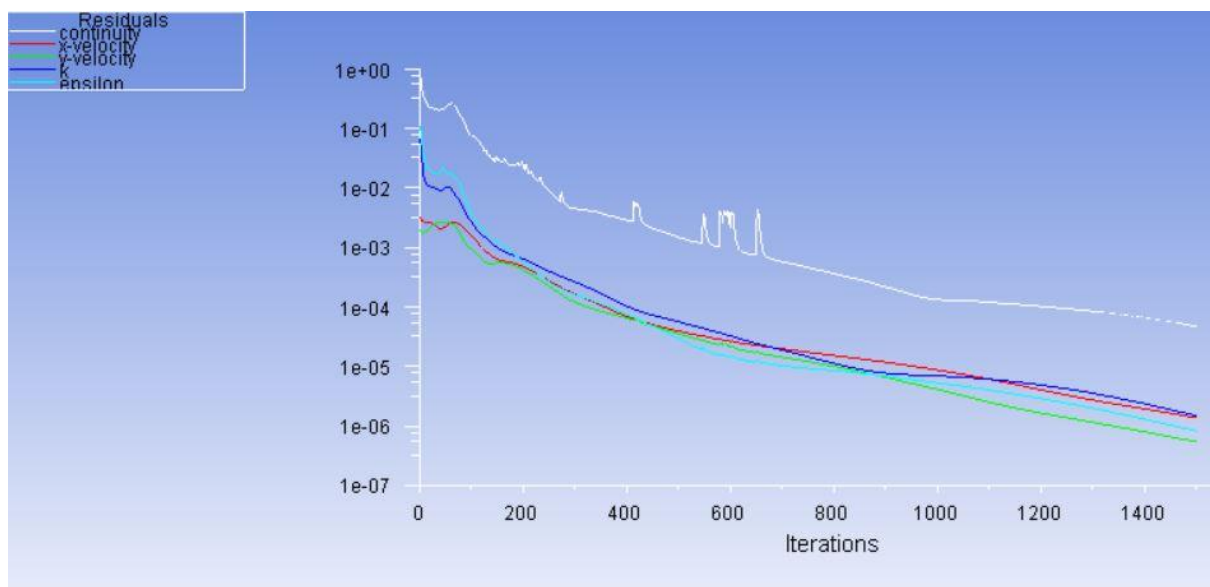
Při výpočtu v prostředí programu Ansys Fluent je dobré sledovat průběh residuí. Jelikož se snažíme získat konvergentní řešení, sledováním si ušetříme spoustu času. Právě residua jsou mírou konvergence. Ty jsou vyhodnocovány v průběhu výpočtu pro každou veličinu v každém kroku iterace a zanášeny do grafu. Žádoucím průběhem je klesající tendence. Jakmile residua začnou kmitat, je dobré upravit podmínky výpočtu, zvolit správný model proudění nebo zkontrolovat počáteční podmínky. Jakmile nám tedy průběh residuí začne vykazovat větší výchyly, nebo začne stoupat, je dobré výpočet zastavit a upravit podmínky. Konvergence je ovlivněna mnoha různými faktory. Uvádím jen počáteční odhad, počet buněk, kvalita síť nebo relaxační faktor. Díky těmto faktorům můžeme rychlost konvergence do jisté míry taky urychlit nebo zpomalit. Pěkný průběh jsem získal při výpočtu 2D varianty.



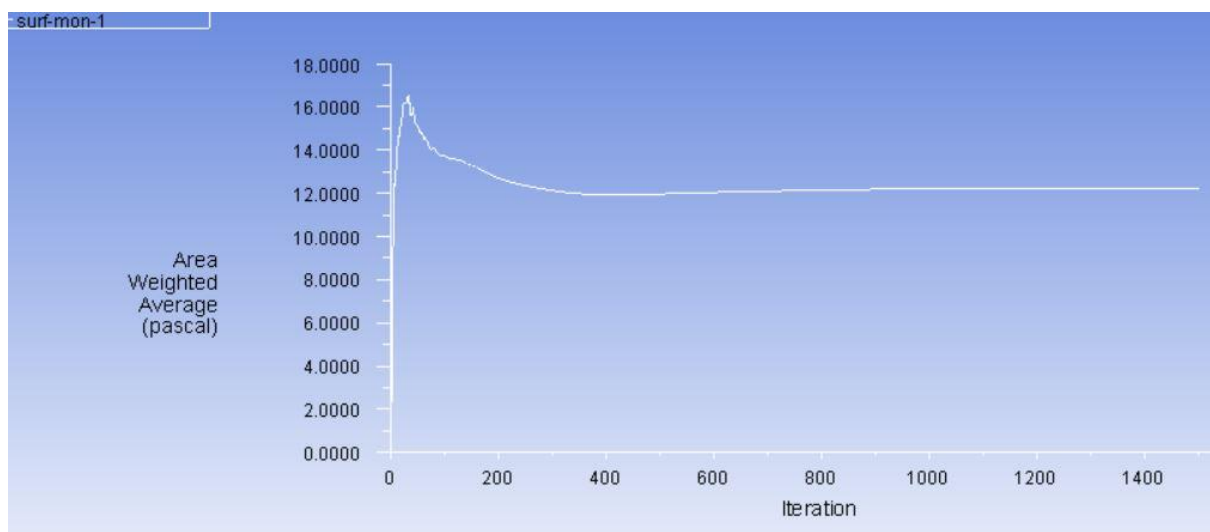
Pro lepší přehlednost rozdělím výpočet na variantu 2D, A a B.

### 5.4.1 Varianta 2D

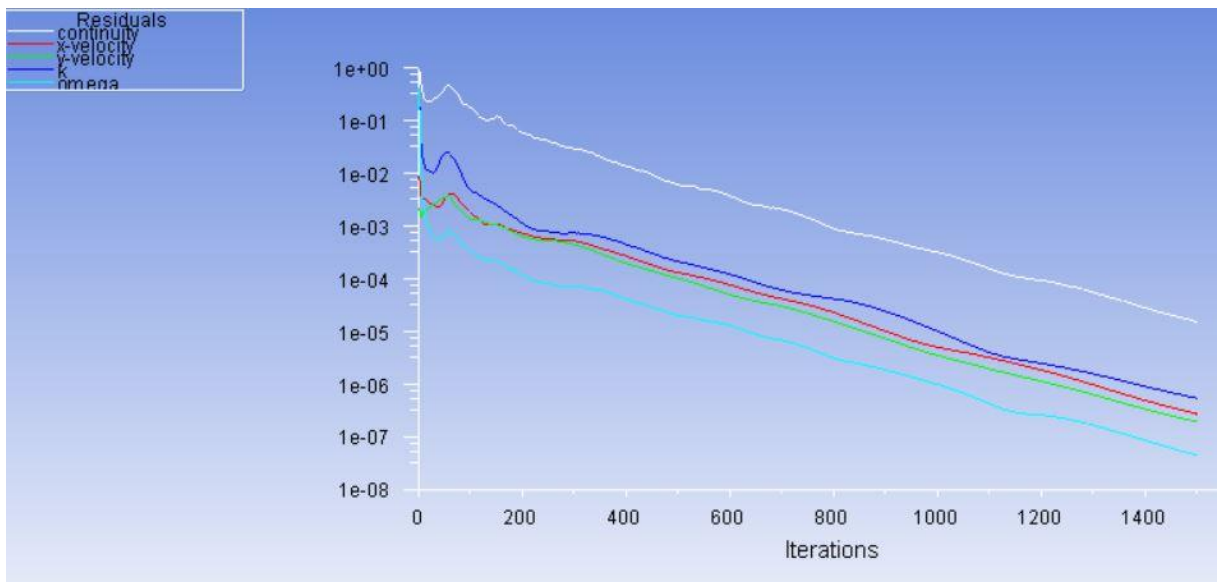
Průběh 2D varianty byl poměrně pěkný, residua klesala, včetně kontinuity.



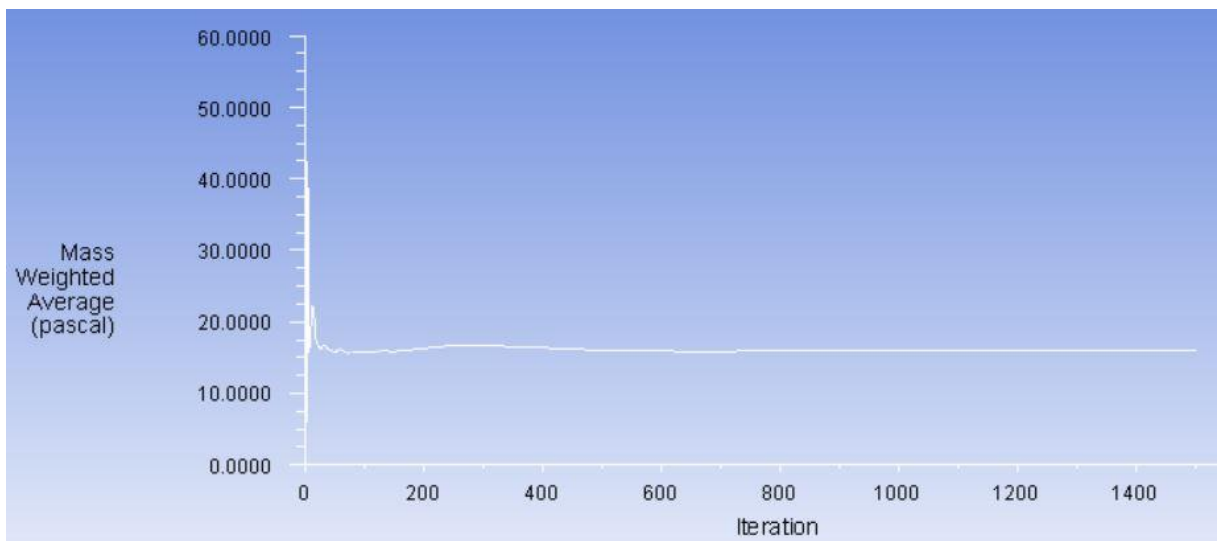
Obr. 51. 2D varianta - residua – model turbulence k-ε



Obr. 52. 2D varianta - průběh tlaku při výpočtu – model turbulence k-ε



Obr. 53. 2D varianta - residua – model turbulence k- $\omega$ -SST

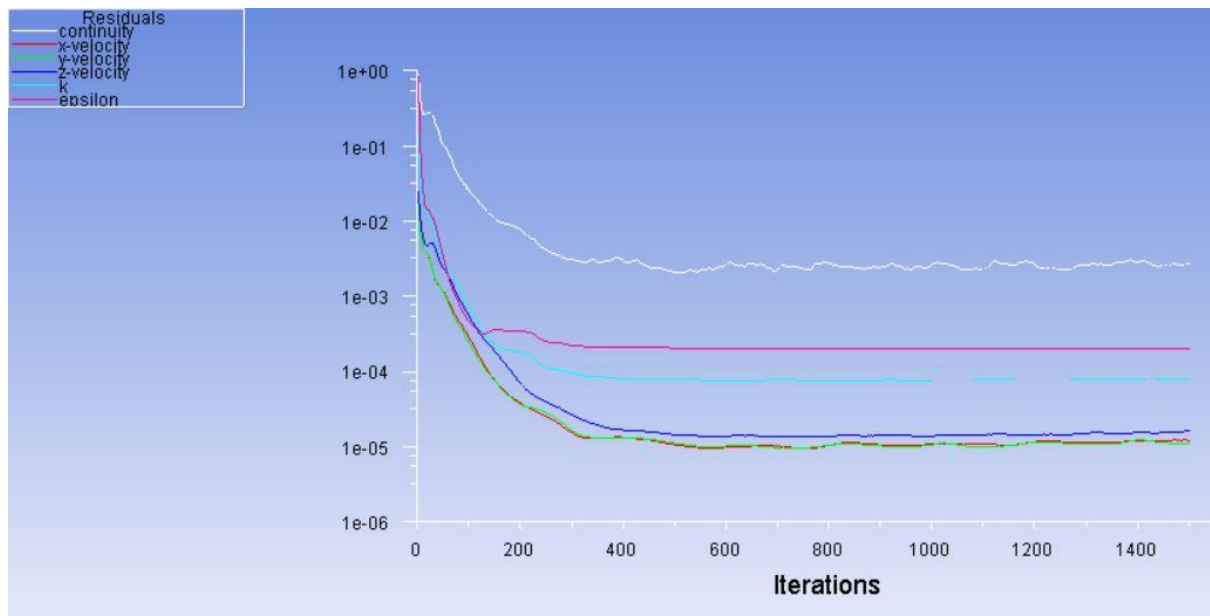


Obr. 54. 2D varianta - průběh tlaku při výpočtu – model turbulence k- $\omega$ -SST

### 5.4.2 Varianta A

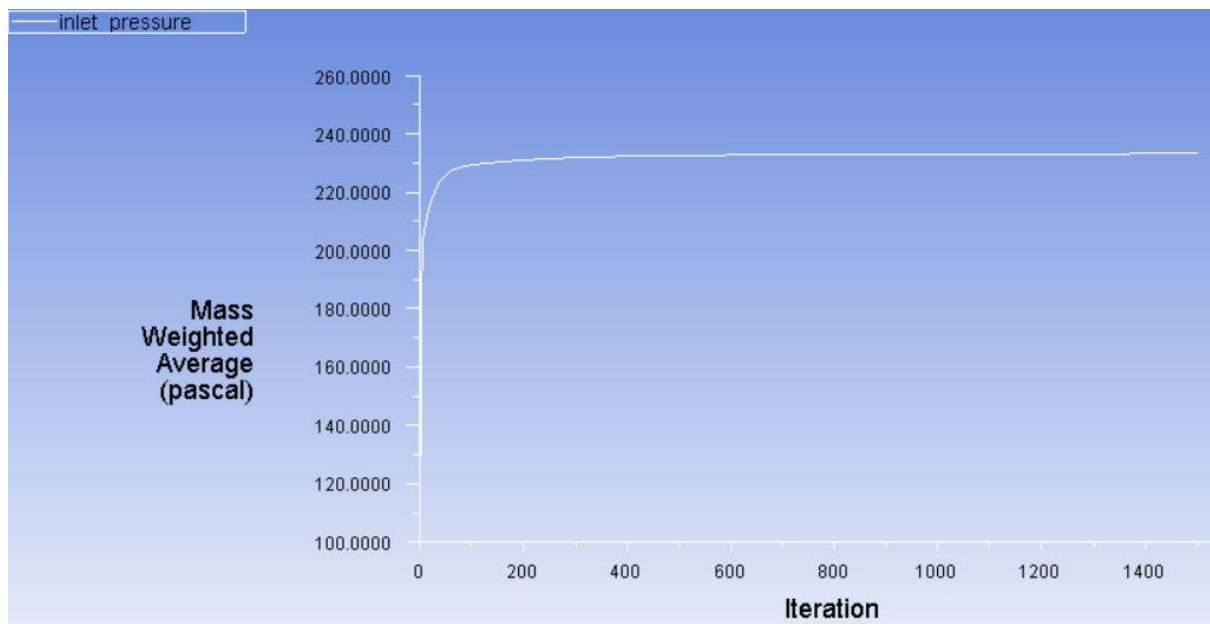
Připomínám, že varianta A je 3D verze, kde se vnitřní uspořádání trochu liší od finální verze B.

k-ε



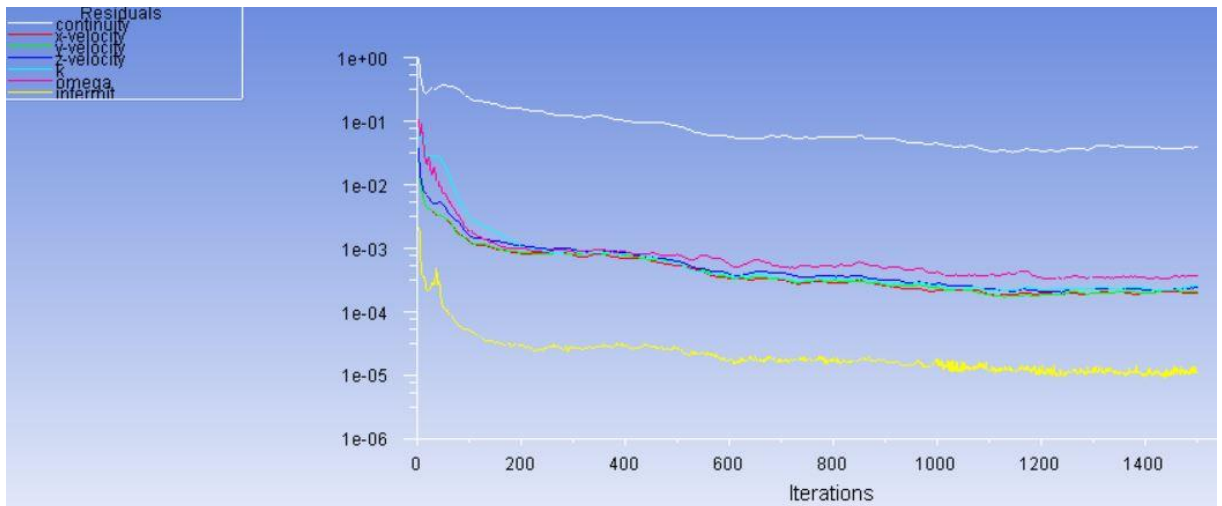
Obr. 55. 3D varianta A - residua – model turbulence k-ε

Průběh tlaku při výpočtu



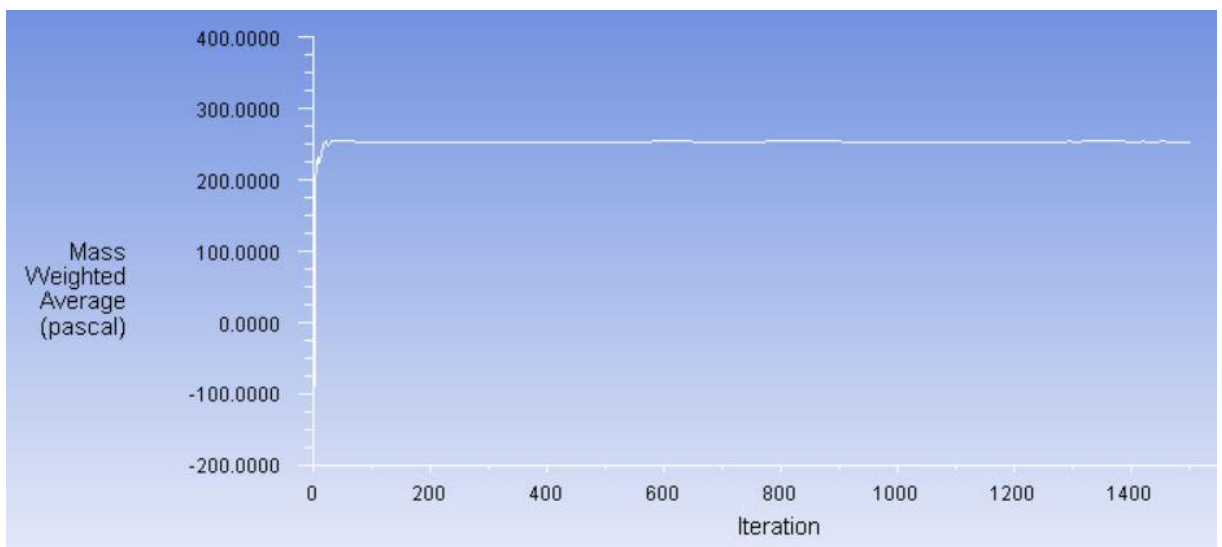
Obr. 56. 3D varianta A - průběh tlaku při výpočtu – model turbulence k-ε

## k- $\omega$ -SST



Obr. 57. 3D varianta A - residua – model turbulence k- $\omega$ -SST-intermittency

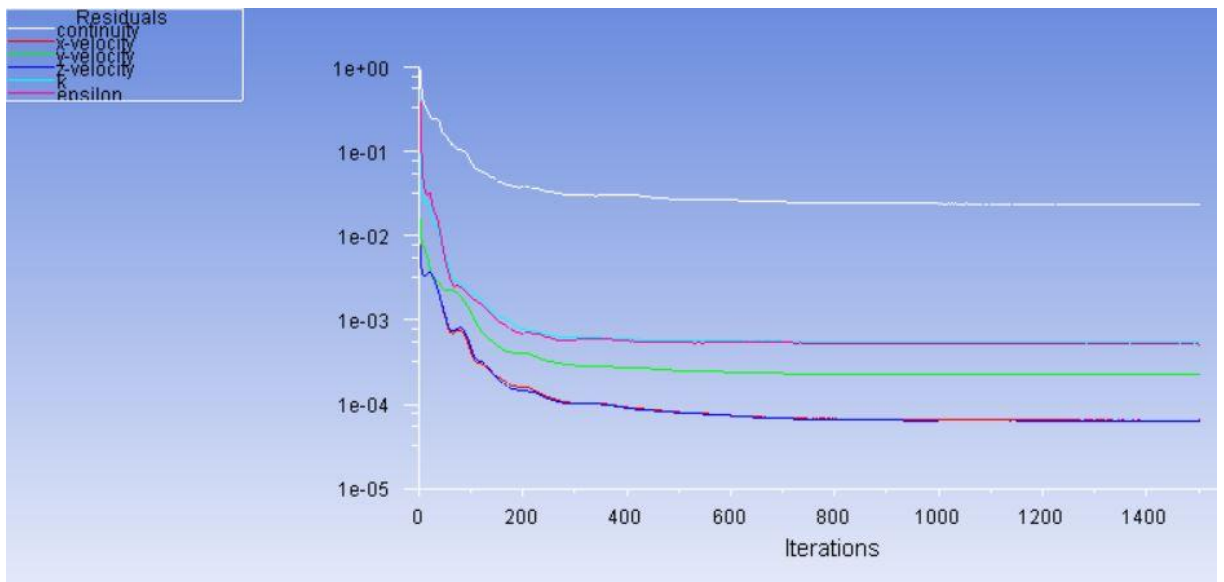
### Průběh tlaku při výpočtu



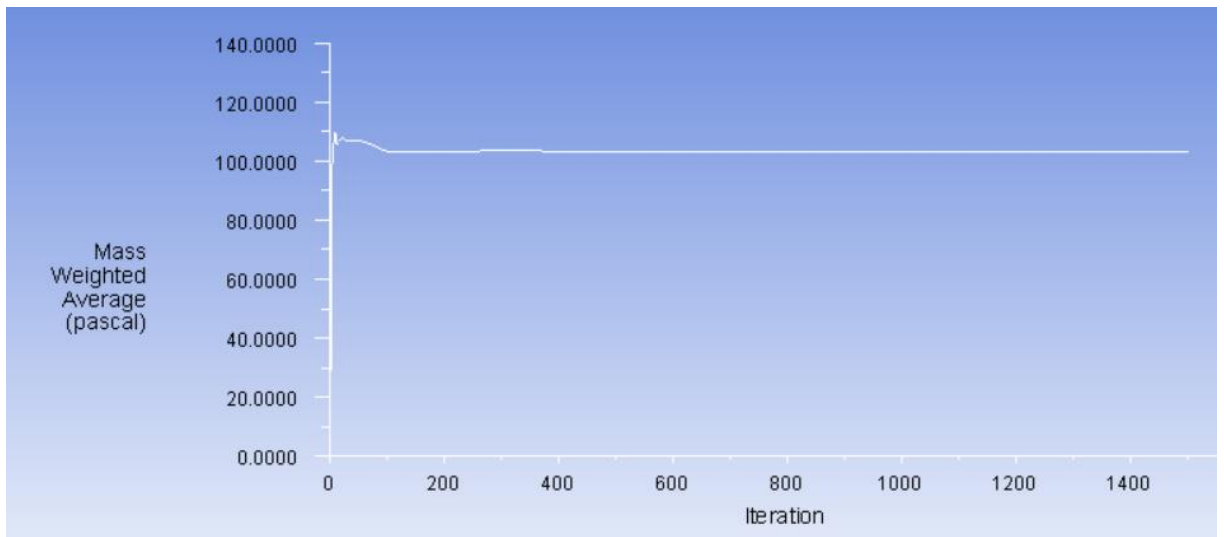
Obr. 58. 3D varianta A - průběh tlaku při výpočtu – model turbulence k- $\omega$ -SST

### 5.4.3 Varianta B

I pro tuto variantu jsem zvolil stejné modely jako pro variantu A. Průběhy residuí na následujících obrázcích.

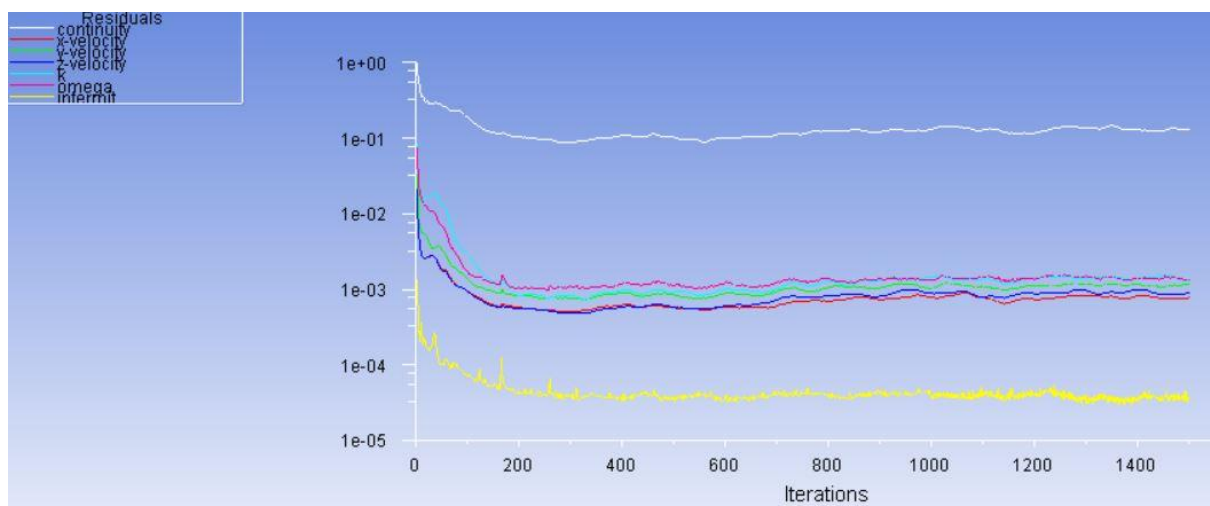


Obr. 59. 3D varianta B - residua – model turbulence k-ε



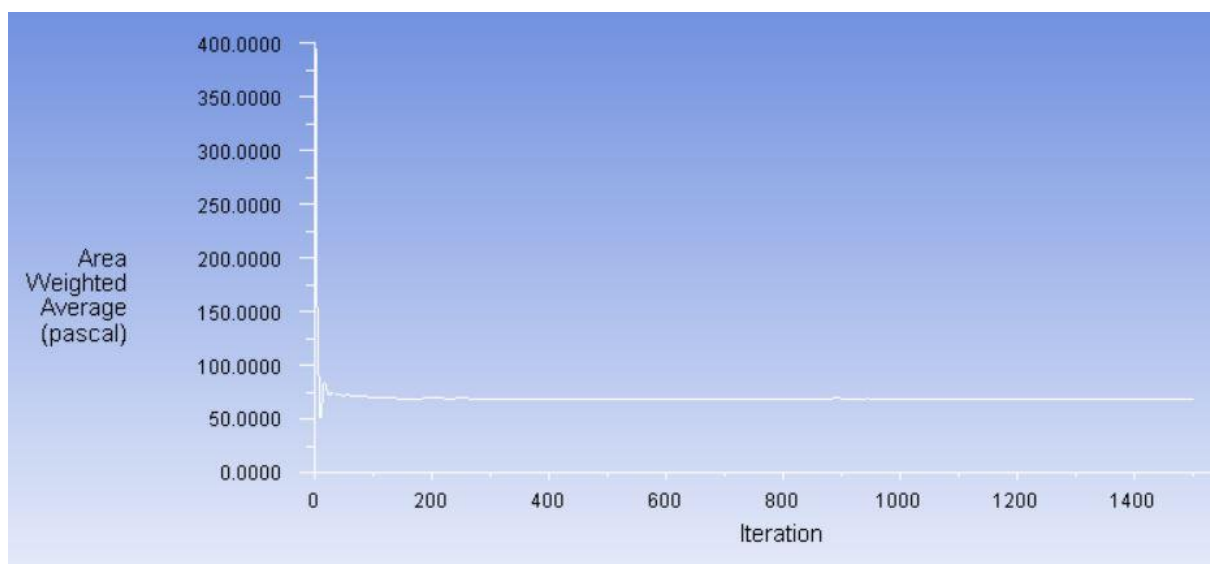
Obr. 60. 3D varianta B - průběh tlaku při výpočtu – model turbulence k-ε

## k- $\omega$ -SST



Obr. 61. 3D varianta B - residua – model turbulence k- $\omega$ -SST

### Průběh tlaku při výpočtu



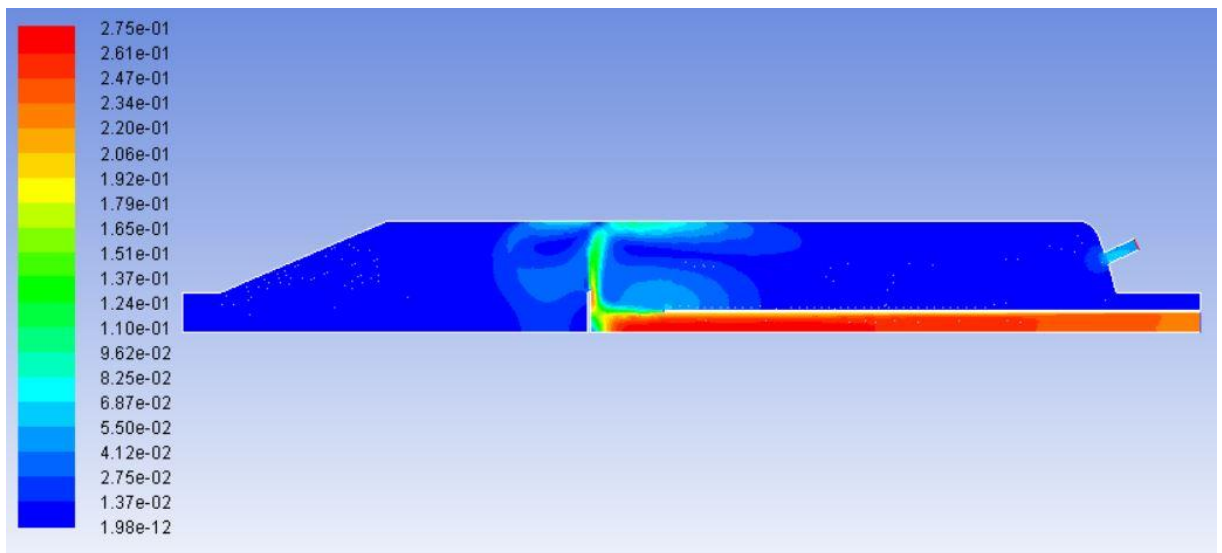
Obr. 62. 3D varianta B - průběh tlaku při výpočtu – model turbulence k- $\omega$ -SST

## 5.5 Vyhodnocení simulace

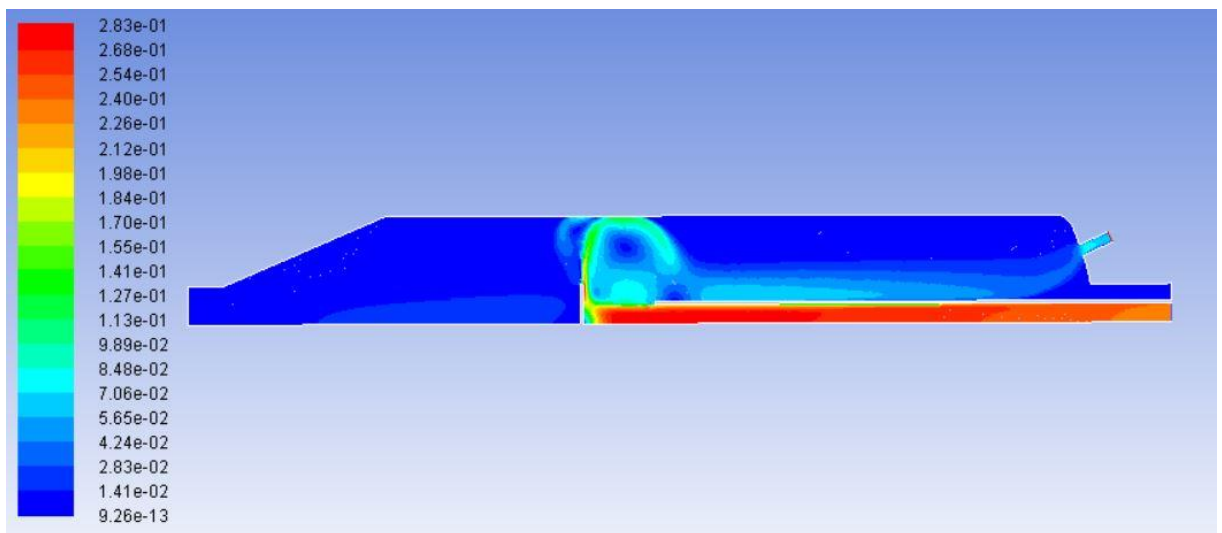
Fluent umožňuje nastavení vykreslení obrovského množství výsledných grafů, průběhů, či grafických výstupů rozložení poměrů v zařízení. Pro tento případ postačí grafické vykreslení rozložení rychlostí, graf závislosti rychlosti na souřadnici a výpočet tlakové ztráty.

### 5.5.1 Varianta 2D

Rozložení rychlostí viz Obr. 63 a Obr. 64. Řez byl veden osou symetrie.



Obr. 63. Varianta 2D - rozložení rychlostí model k-ε



Obr. 64. Varianta 2D - rozložení rychlostí model k-ω-SST

Pro zjištění vzestupné rychlosti jsem nejprve definoval pracovní čáru (viz Obr. 65 a Obr. 66), podél které sleduji vývoj rychlosti.

Options		Type	Number of Points
<input type="checkbox"/> Line Tool <input type="button" value="Reset"/>		Line	10
End Points			
x0 (m)	0.1	x1 (m)	0.1
y0 (m)	0.1	y1 (m)	0.1
z0 (m)	0.18	z1 (m)	1.25
<input type="button" value="Select Points with Mouse"/>			
New Surface Name			
aline			
<input type="button" value="Create"/>		<input type="button" value="Manage..."/>	<input type="button" value="Close"/>
<input type="button" value="Help"/>			

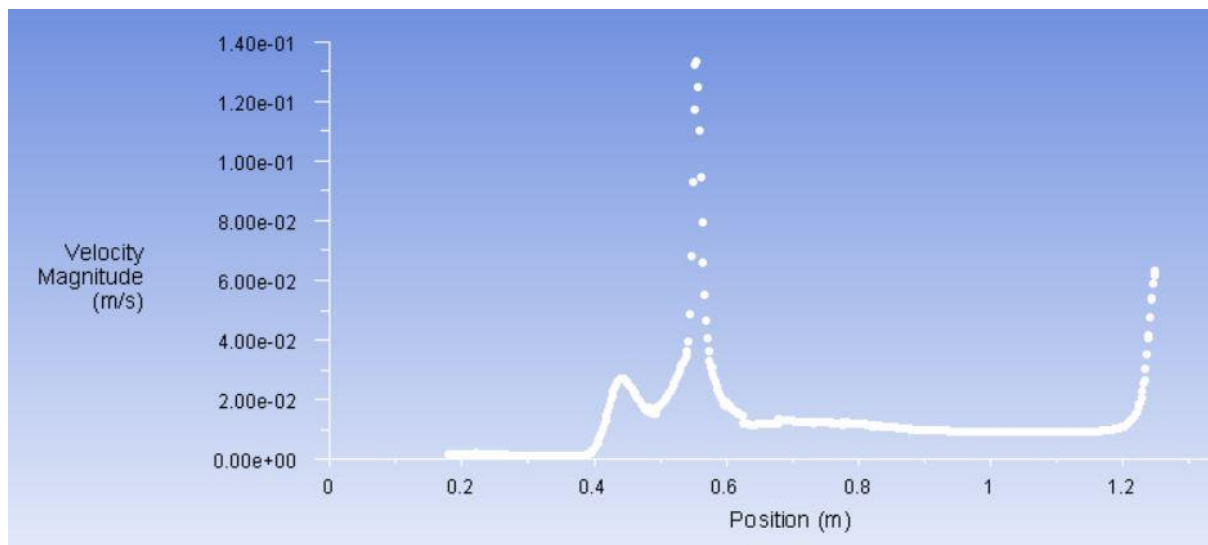
Obr. 65. Souřadnice pracovní čáry



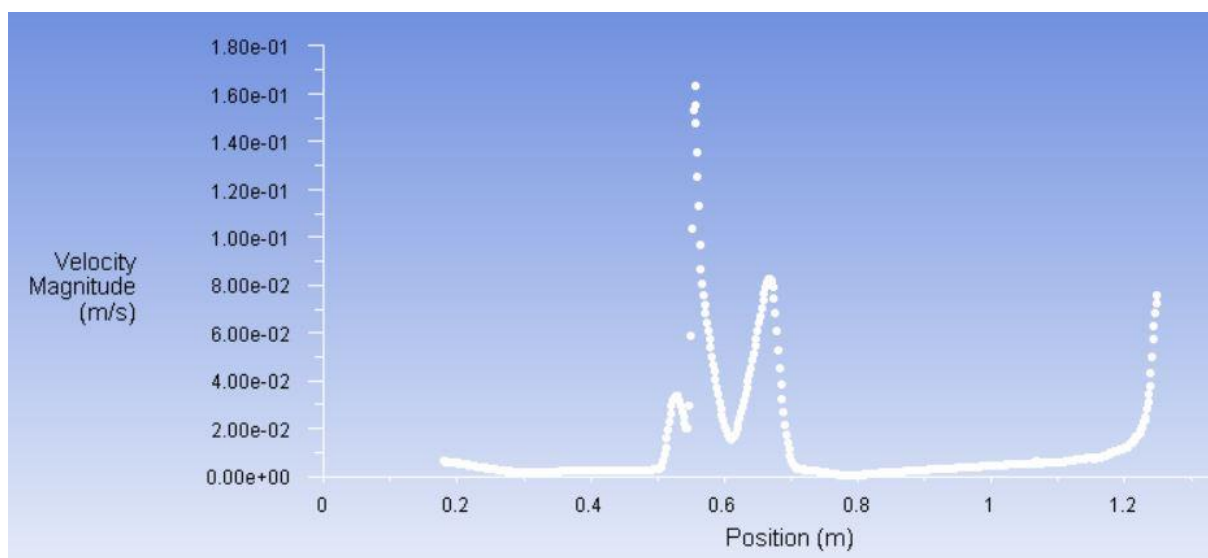
Obr. 66. Pracovní čára



Grafy závislosti vzestupné rychlosti na souřadnici z:



Obr. 67. Varianta 2D - závislost rychlosti na souřadnici - model k- $\epsilon$



Obr. 68. Varianta 2D - závislost rychlosti na souřadnici z - model k- $\omega$ -SST

Tlaková ztráta:

Area-Weighted Average Static Pressure	(pascal)
inlet	12.221185

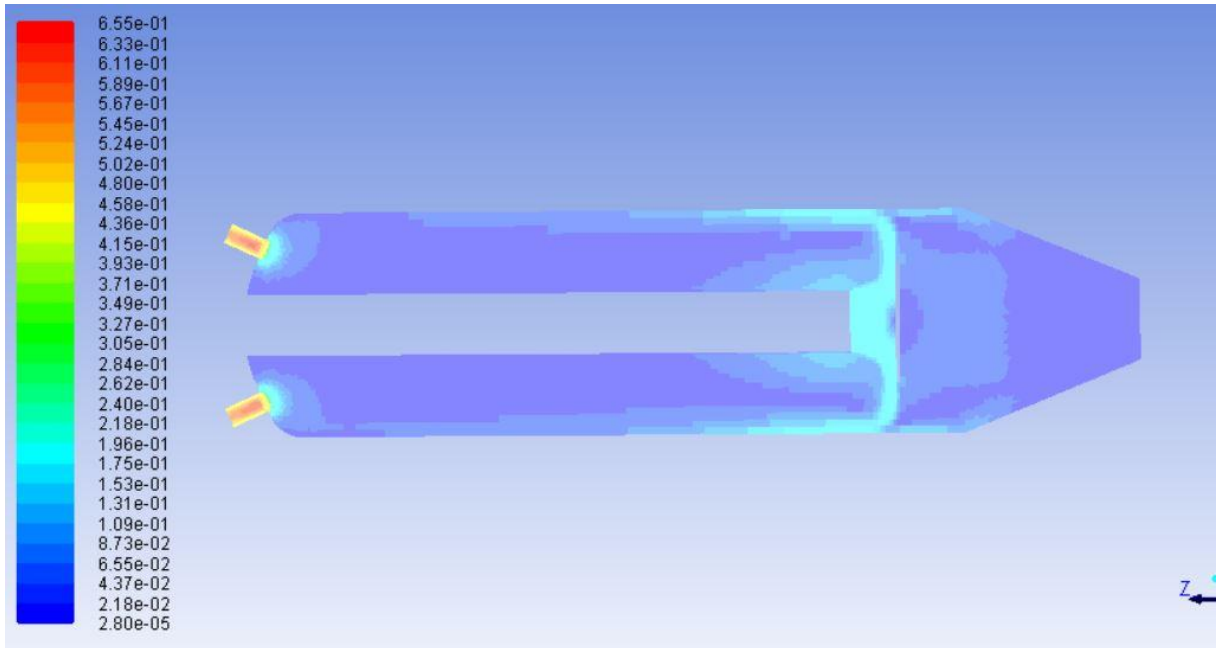
Obr. 69. Varianta 2D - tlaková ztráta - model k- $\epsilon$

Area-Weighted Average Static Pressure	(pascal)
inlet	16.079115

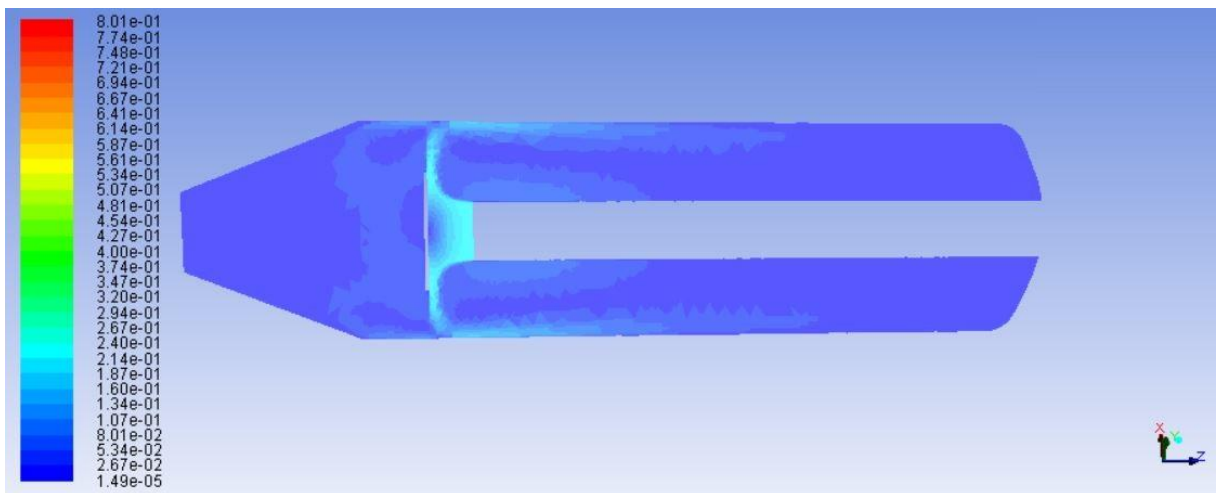
Obr. 70. Varianta 2D - tlaková ztráta - model k- $\omega$ -SST

### 5.5.2 Varianta A:

Rozložení rychlostí viz a. Řez byl veden osou symetrie.



Obr. 71. Varianta A - rozložení rychlostí model k- $\epsilon$



Obr. 72. Varianta A - rozložení rychlostí model k- $\omega$ -SST

Pro zjištění vzestupné rychlosti jsem opět definoval pracovní čáru. Její souřadnice viz Obr. 73 a Obr. 74.

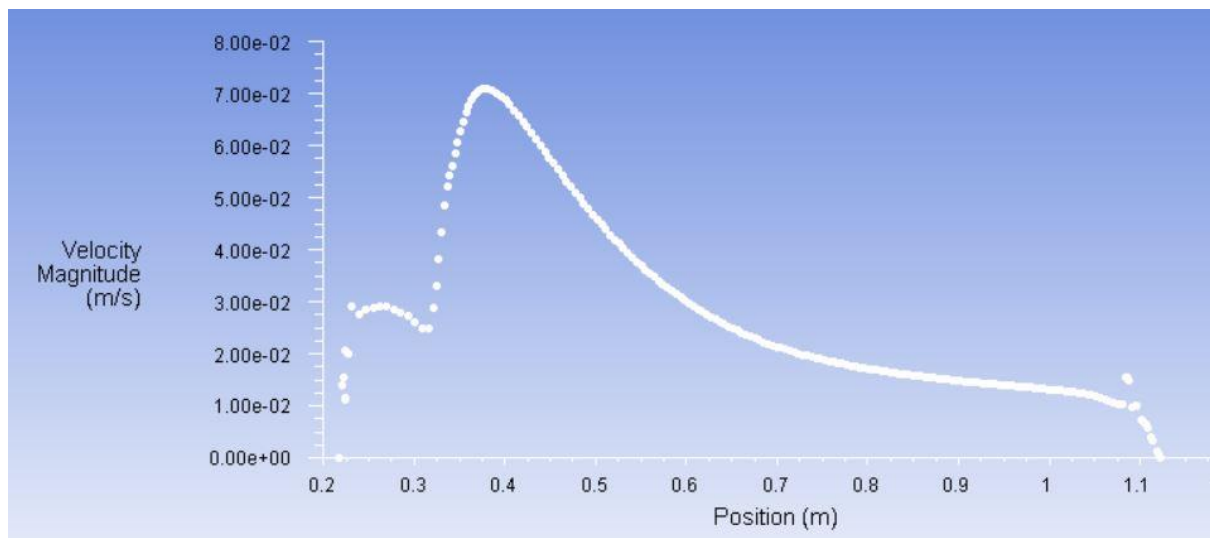
Options		Type	Number of Points
<input type="checkbox"/> Line Tool <input type="button" value="Reset"/>		Line	10
End Points			
x0 (m)	0.1	x1 (m)	0.1
y0 (m)	0.1	y1 (m)	0.1
z0 (m)	0.18	z1 (m)	1.25
<input type="button" value="Select Points with Mouse"/>			
New Surface Name			
aline			
<input type="button" value="Create"/>		<input type="button" value="Manage..."/>	<input type="button" value="Close"/>
<input type="button" value="Help"/>			

Obr. 73. Souřadnice pracovní čáry

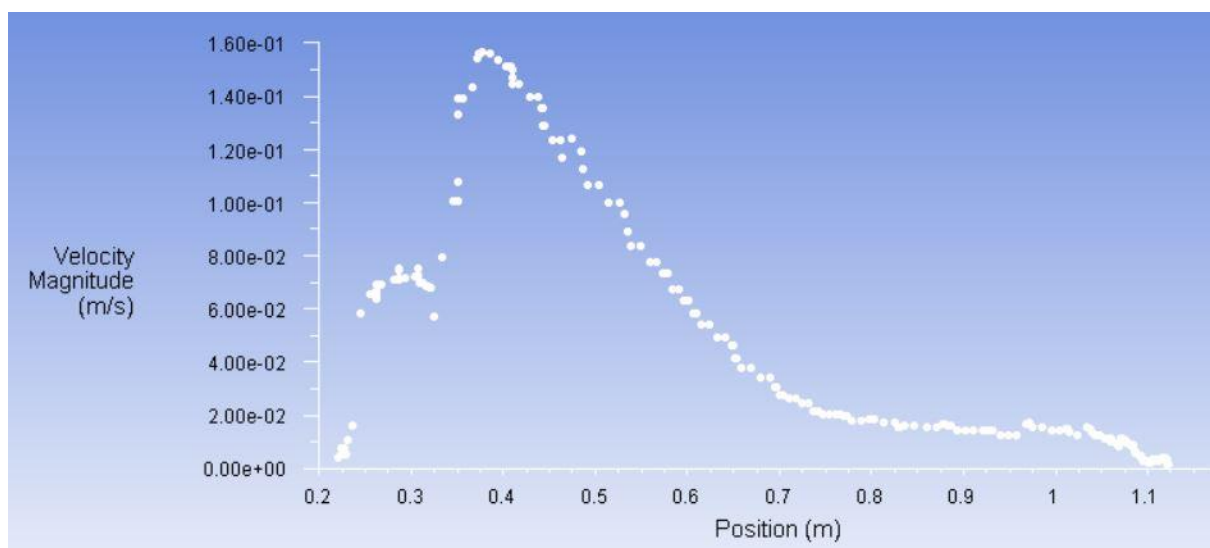


Obr. 74. Pracovní čára

Grafy závislosti vzestupné rychlosti na souřadnici z:



Obr. 75. Varianta A - závislost rychlosti na souřadnici - model k-ε



Obr. 76. Varianta A - závislost rychlosti na souřadnici - model k-ω-SST

Tlaková ztráta:

Area-Weighted Average Static Pressure	(pascal)
inlet	233.57162

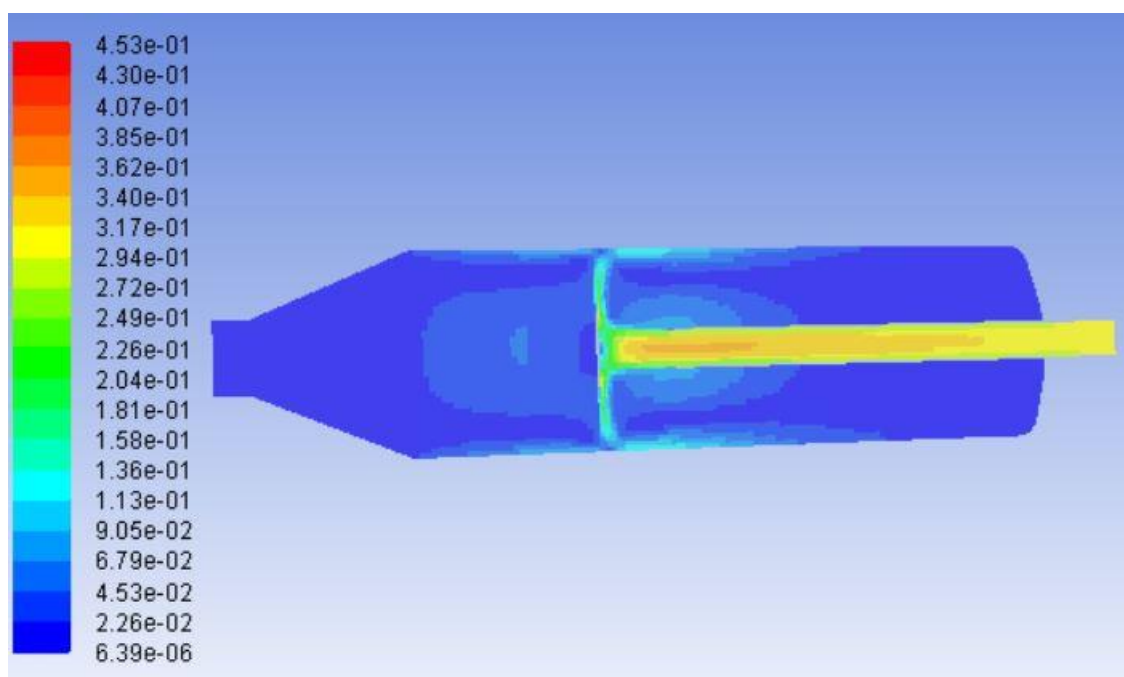
Obr. 77. Varianta A - tlaková ztráta - model k-ε

Area-Weighted Average Static Pressure	(pascal)
inlet	253.71367

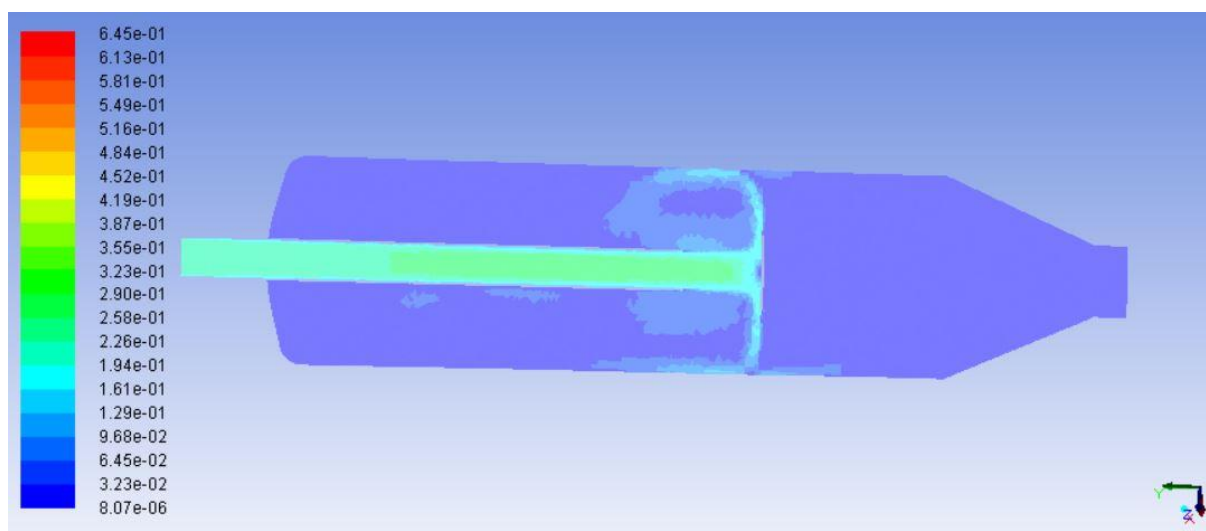
Obr. 78. Varianta A - tlaková ztráta - model k- $\omega$ -SST

### 5.5.3 Varianta B

Rozložení rychlostí



Obr. 79. Varianta B - rozložení rychlostí model k- $\epsilon$



Obr. 80. Varianta B - rozložení rychlostí model k- $\omega$ -SST

Pro zjištění vzestupné rychlosti jsem opět definoval pracovní čáru. Její souřadnice jsem ponechal stejné jako u předchozí varianty, pouze pootočené (mají jiný souřadnicový systém).

Options		Type	Number of Points
<input type="checkbox"/> Line Tool		Line	10
Reset			

End Points			
x0 (m)	0.1	x1 (m)	0.1
y0 (m)	0.1	y1 (m)	0.1
z0 (m)	0.18	z1 (m)	1.25

Select Points with Mouse

New Surface Name  
aline

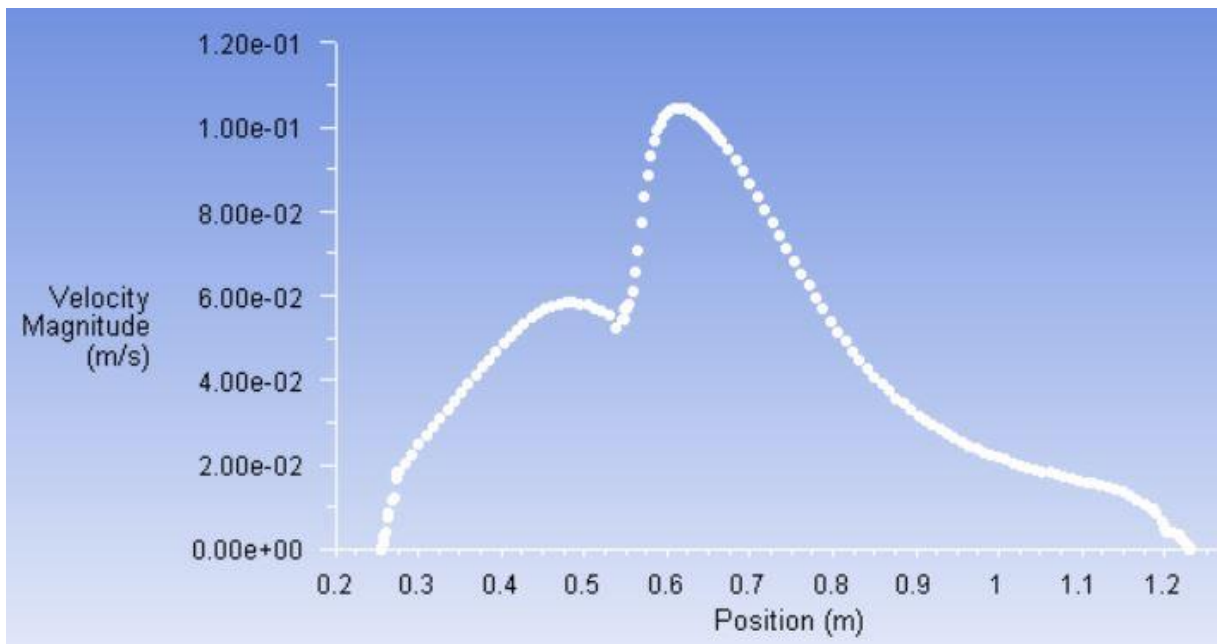
Create   Manage...   Close   Help

Obr. 81. Souřadnice pracovní čáry

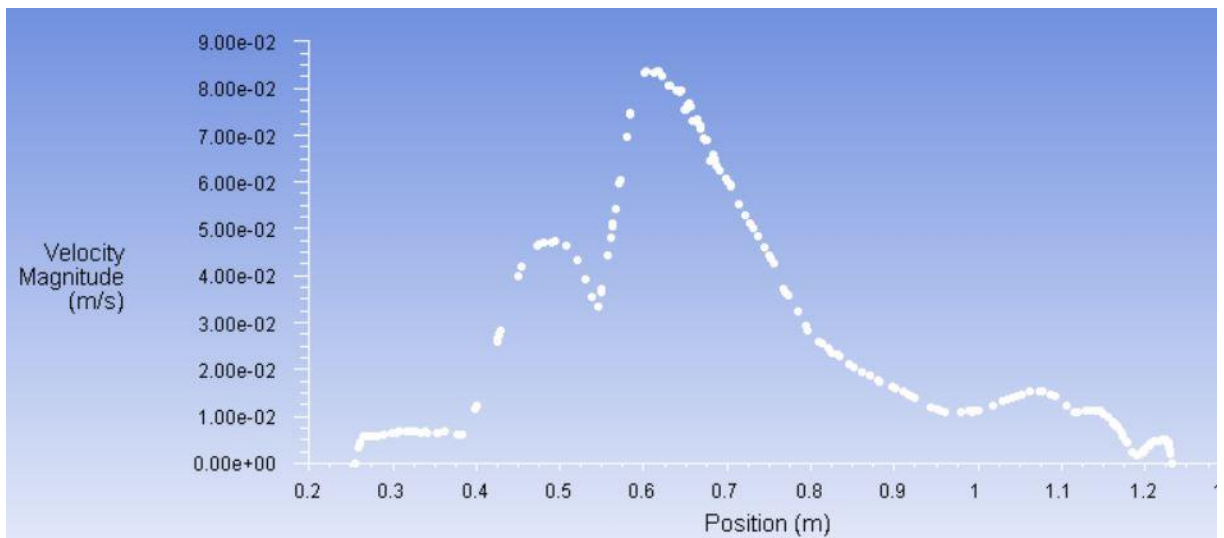


Obr. 82. Pracovní čára

Grafy závislosti vzestupné rychlosti na souřadnici y:



Obr. 83. Varianta B - závislost rychlosti na souřadnici - model k-ε



Obr. 84. Varianta B - závislost rychlosti na souřadnici - model k-ω-SST

Tlaková ztráta:

<b>Area-Weighted Average Static Pressure</b>	<b>(pascal)</b>
-----	-----
<b>inlet</b>	<b>103.37426</b>

Obr. 85. Varianta B - tlaková ztráta - model k-ε

Area-Weighted Average Static Pressure	(pascal)
inlet	68.317486

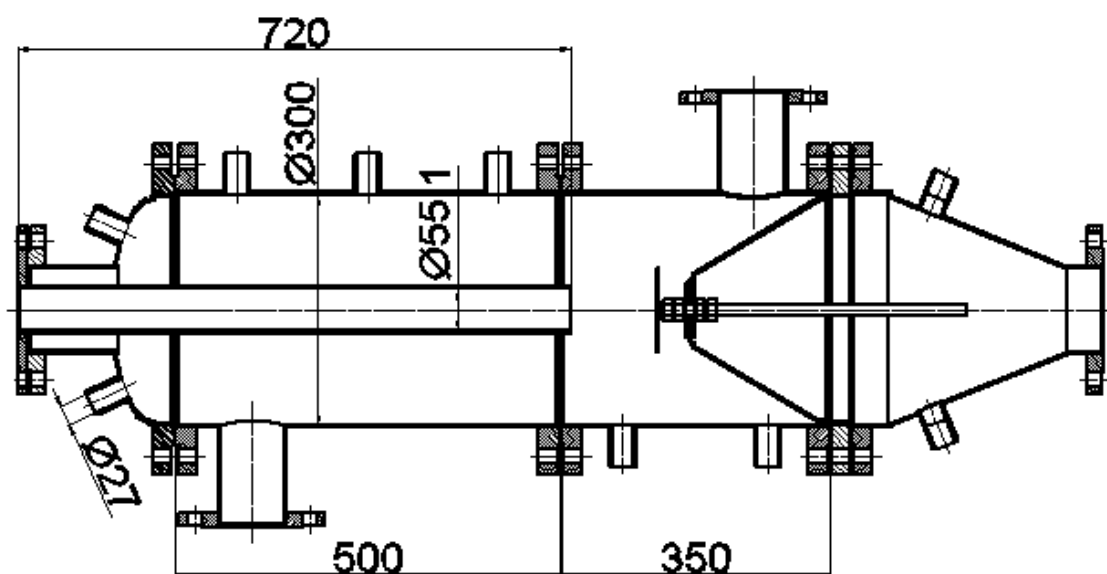
Obr. 86. Varianta B - tlaková ztráta - model k- $\omega$ -SST

Pro zjištění, zda jsme Ansys Fluent dobře nastavili, potřebujeme výsledky porovnat výpočtem hodnoty, kterou můžeme analyticky poměrně dobře spočítat. Jako taková hodnota se přímo nabízí velikost tlakové ztráty a vzestupná rychlost proudění kapaliny.

## 5.6 Analytické řešení

### 5.6.1 Zjednodušené analytické řešení tlakové ztráty

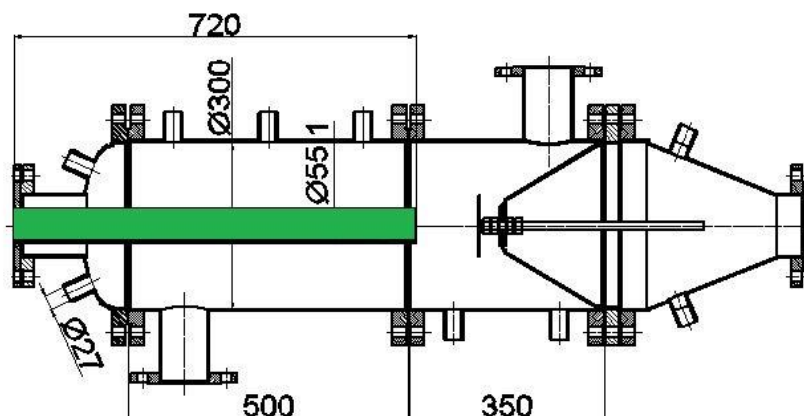
Nejprve si rozdělím zařízení na několik částí, viz Rozdělení zařízení na segmenty. Pro každou část si zvlášť spočítám místní ztráty. Celková ztráta se pak rovná součtu všech dílčích ztrát.



Obr. 87. Rozdělení zařízení na segmenty



Zelená oblast – oblast trubky nátoku.



Obr. 88. Označení oblasti výpočtu

Nejprve je potřeba spočítat Reynoldsovo číslo kvůli zjištění, ve které oblasti proudění se nacházíme, podle rovnice

$$Re = \frac{\bar{u} \cdot d_e \cdot \rho}{\mu} \quad (5.3)$$

$$Re = \frac{0,229 \cdot 0,0551 \cdot 995}{0,001} = 12555.$$

→ Turbulentní oblast – součinitel hydraulického tření:

$$k^* = \frac{k_{stř}}{d} = \frac{0,07}{55,1} = 0,00127$$

$$\lambda = \left\{ 2 \cdot \log \left[ 0,27k^* + \left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2} \quad (5.4)$$

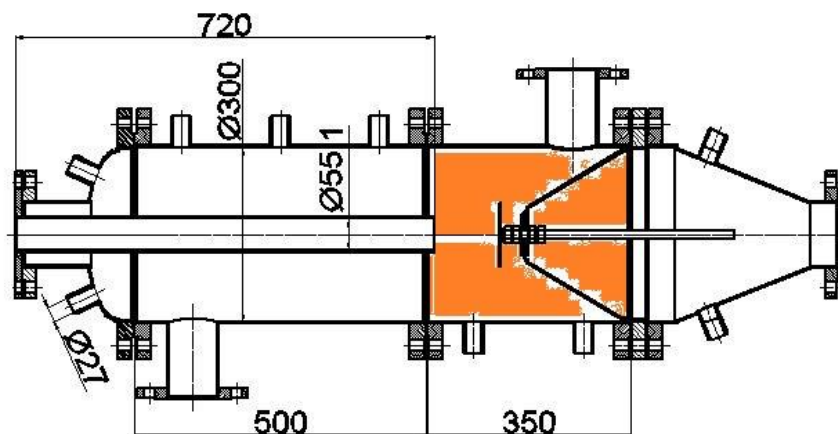
$$\lambda = \left\{ 2 \cdot \log \left[ 0,27 \cdot 0,00127 + \left( \frac{7}{12\,555} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2} = 0,252 [-]$$

$$e_z = \lambda \frac{l_e \bar{u}^2}{d} \quad (5.5)$$

$$e_z = 0,252 \frac{0,72}{0,0551} \frac{0,229^2}{2} = 0,0863 [J \cdot kg^{-1}]$$

$$\Delta p = e_z \cdot \rho = 0,0863 \cdot 995 = 85,893 [Pa]$$

## Oranžová oblast



Obr. 89. Označení oblasti výpočtu

$$Re = \frac{0,008 \cdot 0,3 \cdot 995}{0,001} = 2388$$

→ přechodová oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním – součinitel hydraulického tření:

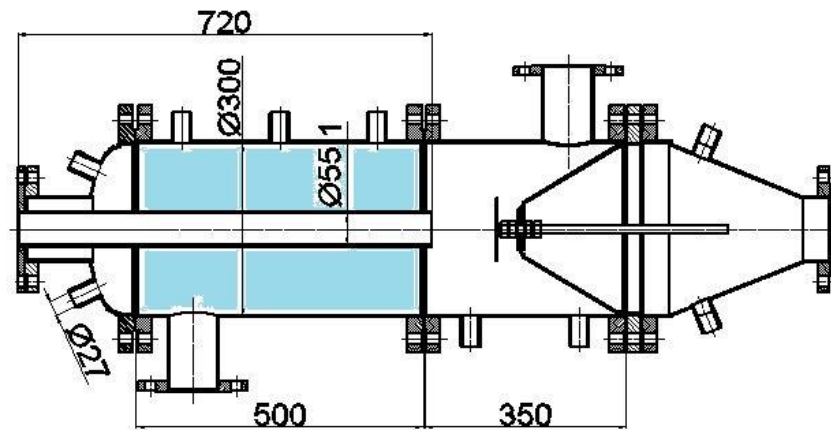
$$k^* = \frac{k_{stř}}{d} = \frac{0,07}{300} = 0,00023$$

$$\lambda = \left\{ 2 \cdot \log \left[ 0,27 \cdot 0,00023 + \left( \frac{7}{2388} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2} = 0,387 [-]$$

$$e_z = 0,387 \frac{0,35 \cdot 0,008^2}{0,3 \cdot 2} = 1,44 \cdot 10^{-5} [J \cdot kg^{-1}]$$

$$\Delta p = e_z \cdot \rho = 1,44 \cdot 10^{-5} \cdot 995 = 0,014 [Pa]$$

Modrá oblast



Obr. 90. Označení oblasti výpočtu

$$Re = \frac{0,008 \cdot (0,3 - 0,0603) \cdot 995}{0,001} = 1908$$

→ Laminární oblast – součinitel hydraulického tření podle:

$$\lambda = \frac{A}{Re} = \frac{92,372}{1908} = 0,0484 [-]$$

Kde A pro mezikruží:

$$A = 64 \frac{(1 - \alpha)^2}{1 + \alpha^2 + \frac{1 - \alpha^2}{\ln \alpha}} \quad (5.6)$$

$$A = 64 \frac{(1 - 0,201)^2}{1 + 0,201^2 + \frac{1 - 0,201^2}{0,201}} = 92,372 [-]$$

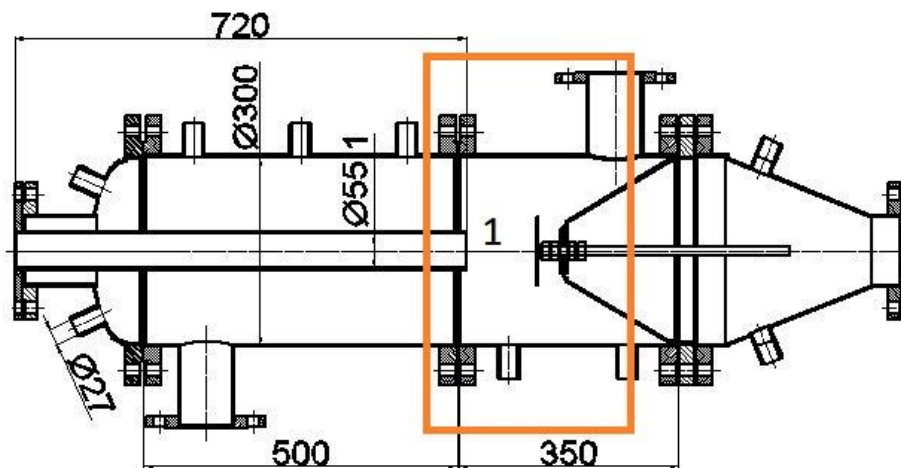
$$\alpha = \frac{d_1}{d_2} \quad (5.7)$$

$$\alpha = \frac{0,0603}{0,3} = 0,201$$

$$e_z = 0,0484 \cdot \frac{0,5}{0,3 - 0,0603} \frac{0,008^2}{2} = 3,232 \cdot 10^{-6} [J \cdot kg^{-1}]$$

$$\Delta p = e_z \cdot \rho = 3,232 \cdot 10^{-6} \cdot 995 = 0,00322 [Pa]$$

Místo 1, náhlé rozšíření – ztrátový součinitel:



Obr. 91. Označení oblasti výpočtu

$$\zeta = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad (5.8)$$

$$\zeta = \left(1 - \frac{\frac{\pi \cdot d_1^2}{2}}{\frac{\pi \cdot d_2^2}{2}}\right)^2 = \left(1 - \frac{\frac{\pi \cdot 0,0551^2}{2}}{\frac{\pi \cdot 0,3^2}{2}}\right)^2 = 0,934$$

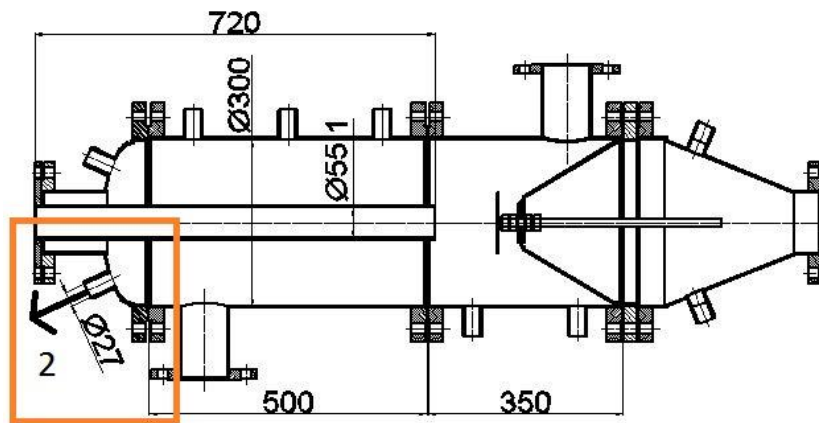
Ztráta způsobená místním odporem:

$$e_z = \zeta \frac{\bar{u}^2}{2} \quad (5.9)$$

$$e_z = 0,934 \frac{0,229^2}{2} = 0,0245 \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

$$\Delta p = e_z \cdot \rho = 0,0245 \cdot 995 = 24,359 \text{ [Pa]}$$

Místo 2, řešeno jako případ náhlého zúžení



Obr. 92. Označení oblasti výpočtu

$$\zeta = 0,5 \left( 1 - \frac{S_2}{S_1} \right) \quad (5.10)$$

$$\zeta = 0,5 \left( 1 - \frac{4 \cdot \frac{\pi \cdot d_3^2}{2}}{\frac{\pi \cdot d_1^2}{2} - \frac{\pi \cdot d^2}{2}} \right) = 0,5 \left( 1 - \frac{4 \cdot \frac{\pi \cdot 27^2}{2}}{\frac{\pi \cdot 0,3^2}{2} - \frac{\pi \cdot 0,0551^2}{2}} \right) = 0,483$$

$$e_z = 0,483 \frac{0,239^2}{2} = 0,0127 \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

$$\Delta p = e_z \cdot \rho = 0,0127 \cdot 995 = 12,607 \text{ [Pa]}$$

Výsledná tlaková ztráta

$$\Delta p = \sum \Delta p \quad (5.11)$$

$$\Delta p = 85,893 + 0,014 + 0,00322 + 24,359 + 12,607 = 122,877 \text{ [Pa]}$$

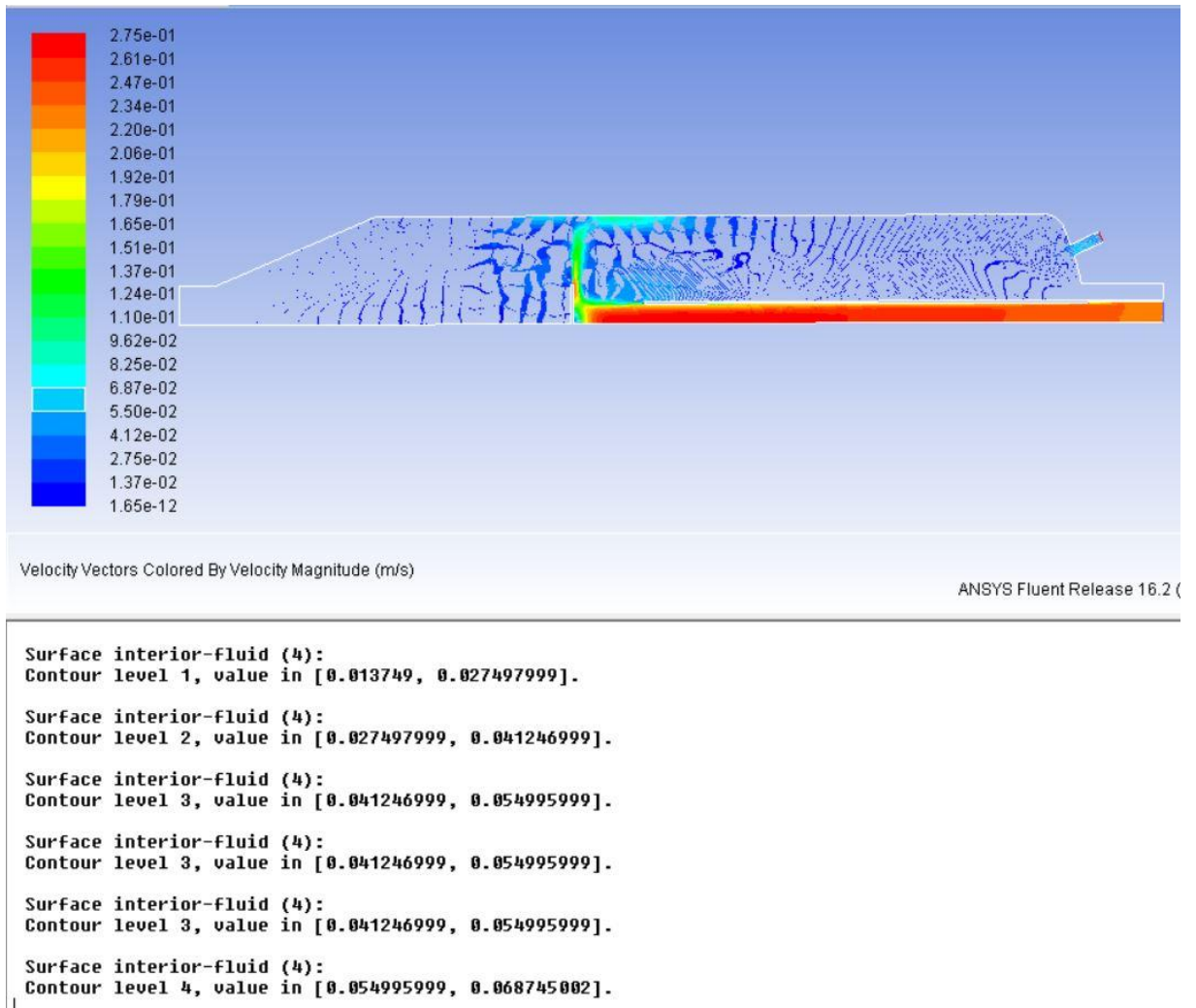
Tato tlaková ztráta byla vypočítána opravdu velmi zjednodušeně, ale rozdíl oproti reálným podmínkám by neměl být řádový.

## 5.7 Porovnání výsledků z numerického a analytického výpočtu

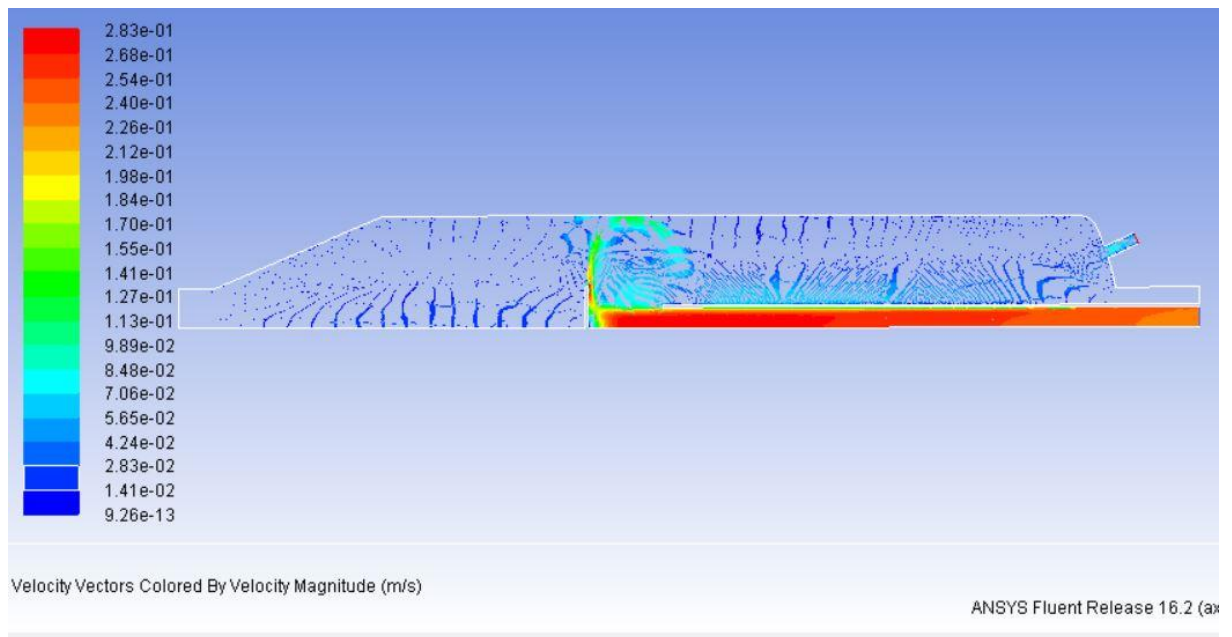
**Vzestupná rychlost ve válcové části:**

Požadavek rychlost proudění ve válcové části byl maximálně  $u_2=0,008$  m/s, vyšší rychlost by mohla způsobit unášení částic vzhůru. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny hodnoty vektorů rychlosti pro oba modely, pro všechny varianty.

## 2D varianta



Obr. 93. 2D varianta - vektory rychlostí model k-ε



Surface interior-Fluid (4):  
 Contour level 4, value in [0.056508001, 0.070635997].

Surface interior-Fluid (4):  
 Contour level 4, value in [0.056508001, 0.070635997].

Surface interior-Fluid (4):  
 Contour level 2, value in [0.028254, 0.042381].

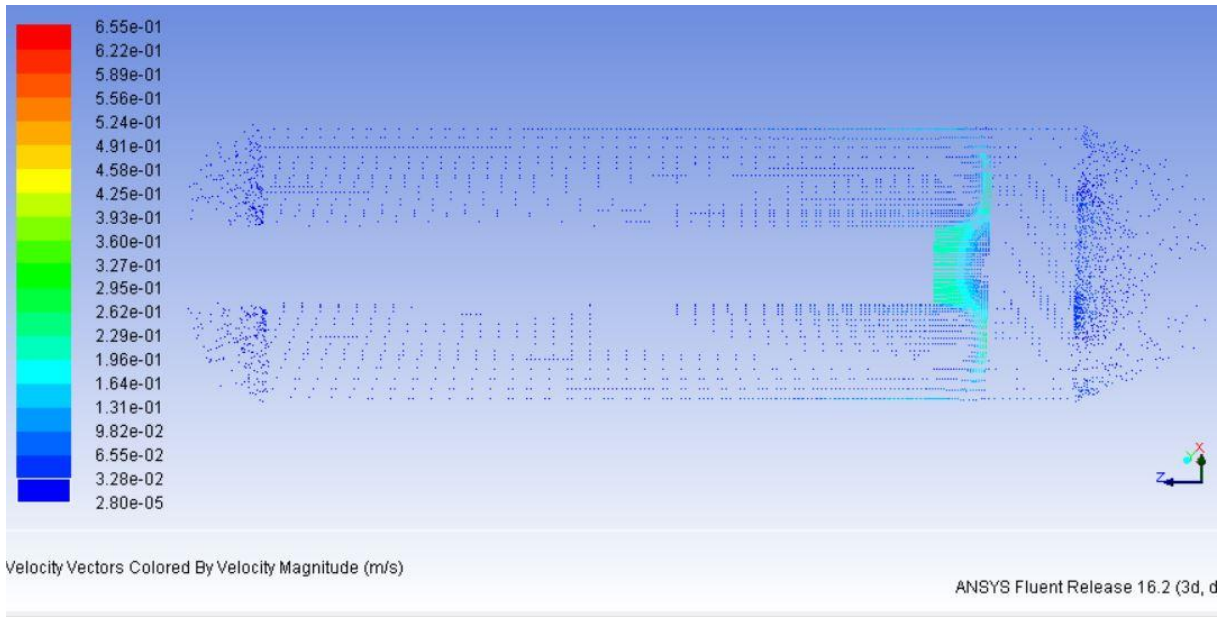
Surface interior-Fluid (4):  
 Contour level 4, value in [0.056508001, 0.070635997].

Surface interior-Fluid (4):  
 Contour level 1, value in [0.014127, 0.028254].

Surface interior-Fluid (4):  
 Contour level 1, value in [0.014127, 0.028254].

Obr. 94. 2D varianta - vektory rychlostí model k- $\omega$ -SST

### 3D varianta A



Surface aplane-20 (20):  
Contour level 0, value in [2.8e-05, 0.032752].

Surface aplane-20 (20):  
Contour level 1, value in [0.032752, 0.065476].

Surface aplane-20 (20):  
Contour level 1, value in [0.032752, 0.065476].

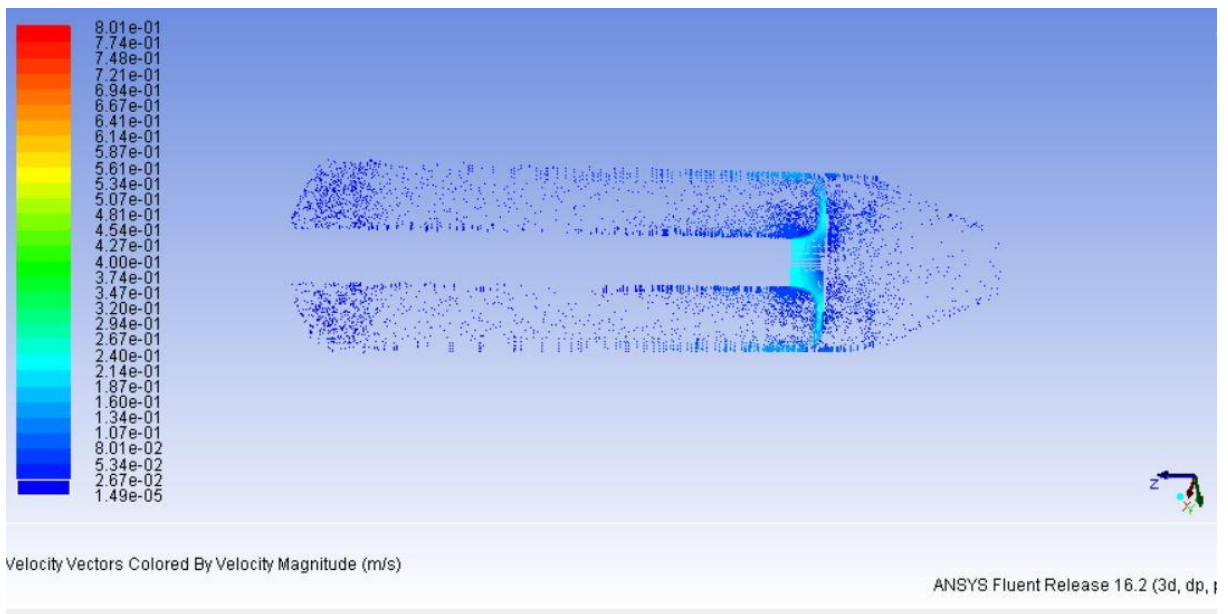
Surface aplane-20 (20):  
Contour level 1, value in [0.032752, 0.065476].

Surface aplane-20 (20):  
Contour level 0, value in [2.8e-05, 0.032752].

Surface aplane-20 (20):  
Contour level 0, value in [2.8e-05, 0.032752].

Obr. 95. Varianta A - vektory rychlosti model k-ε





```

Surface aplane (21):
Contour level 0, value in [1.5e-05, 0.026712].

Surface aplane (21):
Contour level 0, value in [1.5e-05, 0.026712].

Surface aplane (21):
Contour level 1, value in [0.026712, 0.053410001].

Surface aplane (21):
Contour level 1, value in [0.026712, 0.053410001].

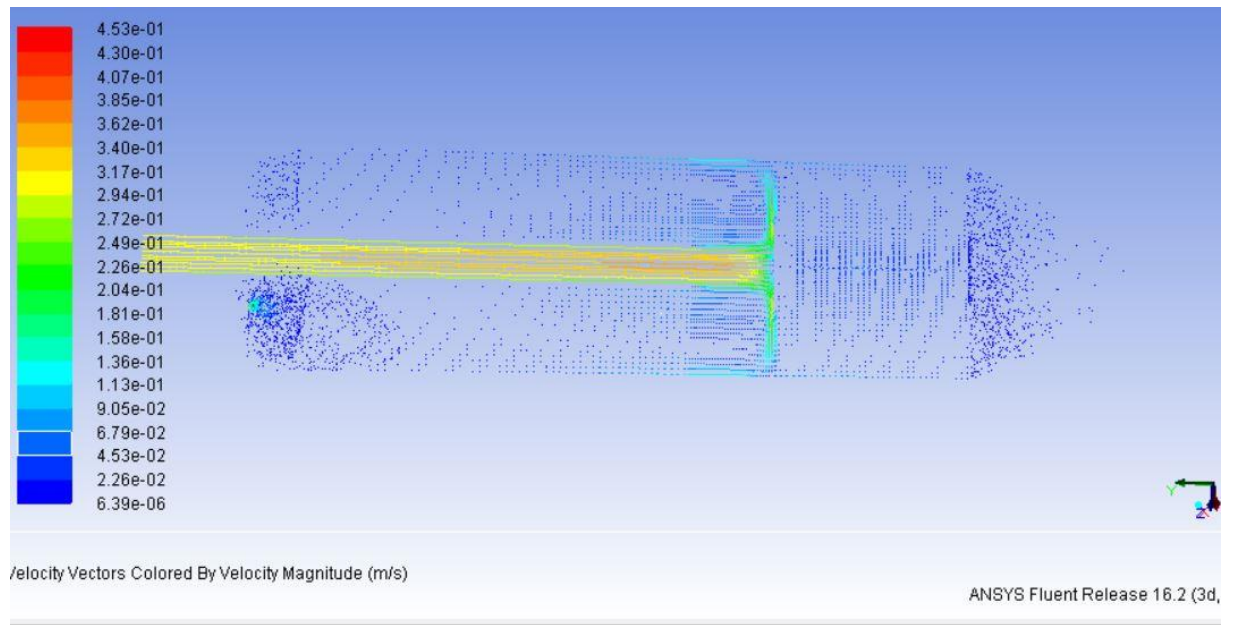
Surface aplane (21):
Contour level 0, value in [1.5e-05, 0.026712].

Surface aplane (21):
Contour level 0, value in [1.5e-05, 0.026712].

```

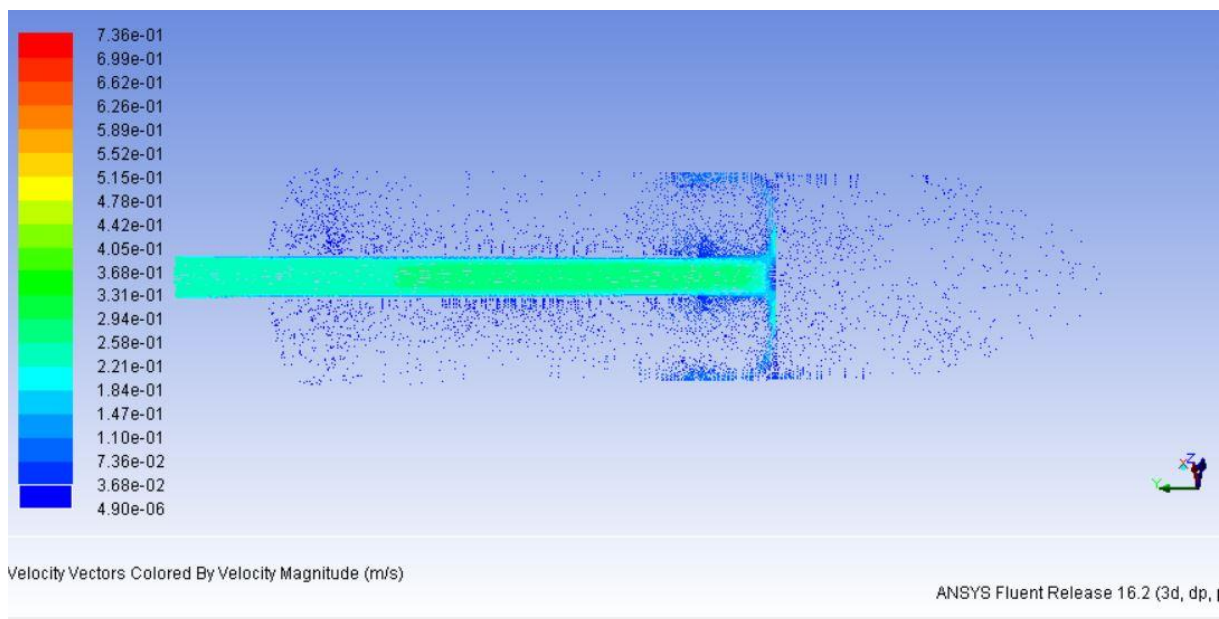
Obr. 96. Varianta A - vektory rychlostí model k- $\omega$ -SST

### 3D varianta B



```
Surface plane-23 (23):  
Contour level 0, value in [6.0000002e-06, 0.022639999].  
  
Surface plane-23 (23):  
Contour level 0, value in [6.0000002e-06, 0.022639999].  
  
Surface plane-23 (23):  
Contour level 1, value in [0.022639999, 0.045274001].  
  
Surface plane-23 (23):  
Contour level 1, value in [0.022639999, 0.045274001].  
  
Surface plane-23 (23):  
Contour level 1, value in [0.022639999, 0.045274001].  
  
Surface plane-23 (23):  
Contour level 2, value in [0.045274001, 0.067907996].
```

Obr. 97. Varianta B - vektory rychlostí model k-ε



```

Surface aplane (15):
Contour level 1, value in [0.036805, 0.073605001].

Surface aplane (15):
Contour level 1, value in [0.036805, 0.073605001].

Surface aplane (15):
Contour level 0, value in [4.9999999e-06, 0.036805].

Surface aplane (15):
Contour level 1, value in [0.036805, 0.073605001].

Surface aplane (15):
Contour level 0, value in [4.9999999e-06, 0.036805].

Surface aplane (15):
Contour level 0, value in [4.9999999e-06, 0.036805].

```

Obr. 98. Varianta B - vektory rychlostí model k- $\omega$ -SST

## 5.8 Porovnání tlakové ztráty:

Tabulka 4 - Porovnání tlakové ztráty

	Analytické řešení	2D - k- $\epsilon$	2D -k- $\omega$ - SST	A - k- $\epsilon$	A - k- $\omega$ - SST	B - k- $\epsilon$	B - k- $\omega$ -SST
Tlak. Ztráta [Pa]	122,877	12,221	16,079	233,572	253,714	103,374	68,318

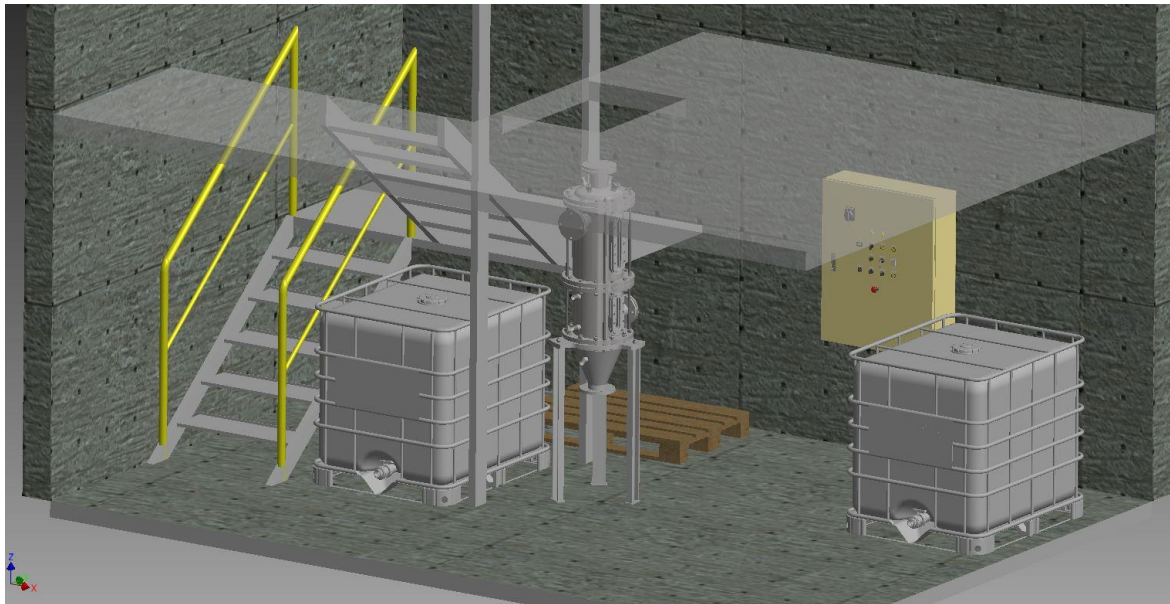
## 5.9 Diskuse výsledků analytického a numerického řešení

Pomocí programu Ansys Fluent jsem provedl simulaci proudění a ověřil porovnáním se zjednodušeným analytickým řešením. Pro porovnání výsledků simulace všech variant

modelů byly zvoleny hodnoty tlakové ztráty a vzestupné rychlosti v usazovací části zařízení. Pro porovnání hodnot tlakové ztráty slouží Tabulka 4 - Porovnání tlakové ztráty. Jak zde můžeme vidět, výsledky se od analytického řešení odlišují. Nejvíce se přibližuje hodnota varianty B při zvoleném modelu proudění  $k-\varepsilon$ . Jelikož je však analytické řešení velmi zjednodušené, jsou výsledky až na 2D variantu poměrně uspokojivé, a modely jsou v podstatě použitelné. Na přesnost výpočtu má totiž velký vliv kvalita sítě, správné nastavení hodnot výpočtového modelu a v neposlední řadě počet buněk. Co se týče vzestupné rychlosti, limitující velikostí byla hodnota  $u_2=0,008$  m/s. Jak jsem uvedl na obrázcích v kapitole 0, této rychlosti nebylo v žádném modelu dosaženo. Hlavním cílem této simulace bylo dokázat reálnost tohoto způsobu separace v navrženém zařízení, což se porovnáním tlakové ztráty a vzestupné rychlosti prokázalo. Hodnoty uvedené v Tabulce 4 nebudou shodné s následnými experimenty, jelikož byla úloha z časových důvodů řešena velmi zjednodušeně oproti navrženému variabilnímu zařízení.

## 6. Instalace zařízení v prostorách laboratoře ústavu

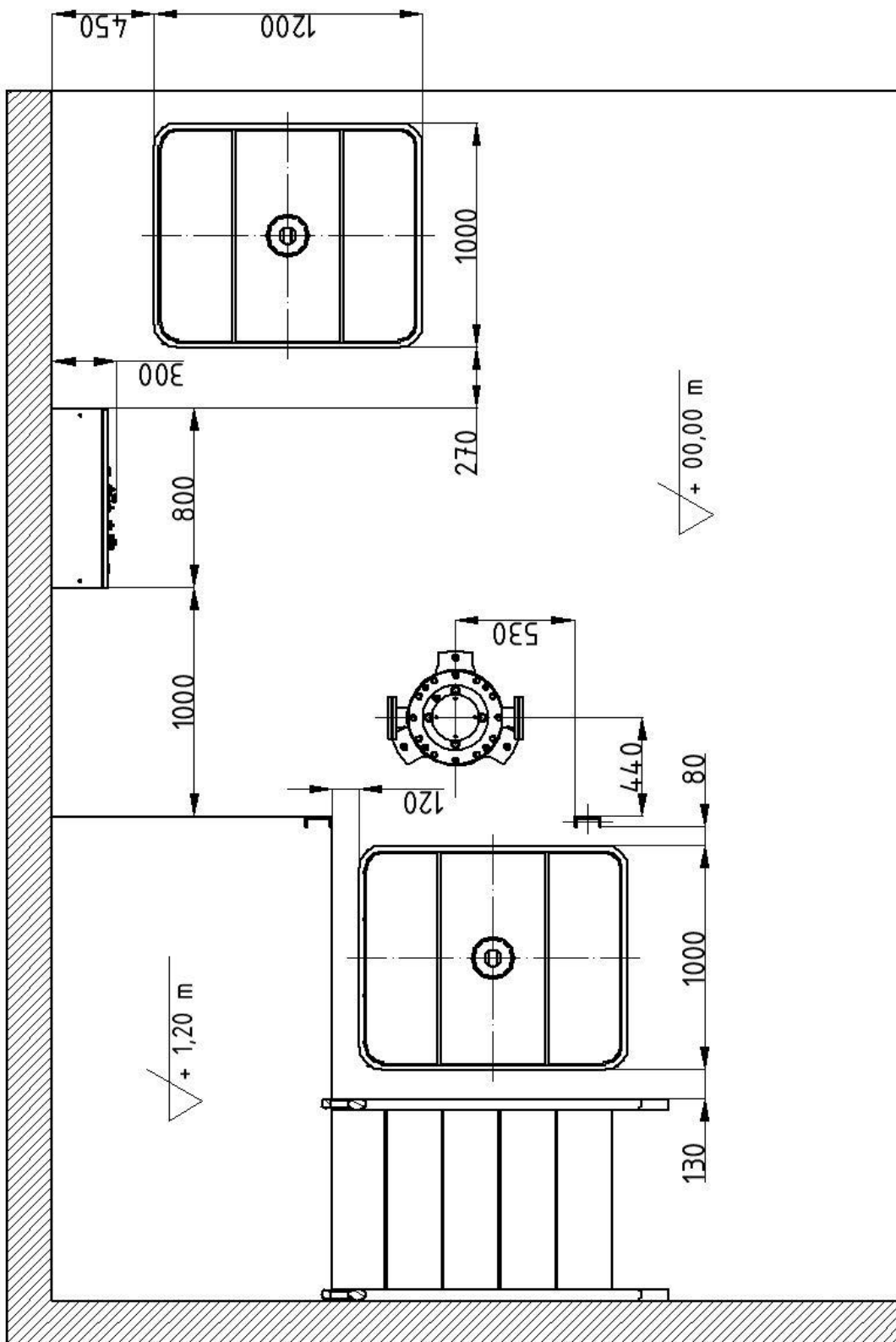
Umístění separátoru do prostor laboratoře ústavu bylo vybráno s ohledem na výšku zařízení a potřeby umístění dvou přečerpávacích nádrží IBC, každá o objemu 1 m<sup>3</sup>. Pro představu jsem virtuálně jednotku rozmístil do prostoru laboratoře.



Obr. 99. Dispozice prostoru laboratoře s rozmístěnými komponenty



Obr. 100. Dispozice prostoru laboratoře - půldorys



Obr. 101. Dispozice v laboratoři a návrh umístění komponent

## 7. Závěr

Dle zadání jsem provedl analýzu problému separace malých částic z kapaliny. Navrhl jsem variabilní zařízení, které má sloužit jako laboratorní jednotka, na které se může otestovat hned několik konfigurací.

V první řadě jsem prověřil možnosti separace a vytvořil řadě konstrukce možných řešení pro zadaný problém a jejich porovnání. Zaměřil jsem se především na gravitační usazovány, odstředivky, vírové odlučovače, a možnosti filtrace. Inspiroval jsem se aktuálními možnostmi k vytvoření návrhů ke konzultaci.

Po diskuzi jsem vytvořil koncepční návrhy pro varianty – gravitační separátor, nučová filtrace, separace pomocí filtru a separace pomocí svíčkového filtru. Kvůli potřebě vytvořit ze separátoru jsem provedl nezbytné výpočty podle normy ČSN 690010-1.1.

Na základě výpočtů jsem vytvořil 3D model zařízení a následně výrobní výkresy uvedené v příloze. Společnost Monts podle nich vyrobila veškeré části separátoru pro všechny varianty viz obrázky v kapitole 4.4 Výkresová dokumentace. Podle normy byla provedena i tlaková zkouška zařízení, která dopadla úspěšně, jak je možné vidět na Obr. 32.

K variantě – gravitační usazovák jsem vytvořil simulaci v software společnost Ansys a ověřil její reálnost porovnáním se zjednodušenými výpočty.

Nakonec jsem provedl návrh instalace celé separační jednotky v prostorách laboratoře ústavu procesní a zpracovatelské techniky viz kapitola 6. Instalace zařízení v prostorách laboratoře ústavu.

## 8. Seznam obrázků

Obr. 1. Rozložení velikosti koksových částic [16] .....	3
Obr. 2. Celková odlučivost polydisperzní suspenze koksových částic a quenchového oleje v závislosti na ploše usazováku a průtoku suspenze [16].....	4
Obr. 3. Celková odlučivost polydisperzní suspenze koksových částic a quenchového oleje v závislosti na ploše usazováku a průtoku suspenze $69 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ [16] .....	4
Obr. 4. Provádění experimentu - stanovení propustnosti vrstvy částic [16].....	5
Obr. 5. Závislost tlakové ztráty na mimovrstvové rychlosti a výšce usazené porézní vrstvy částic koksu [16].....	6
Obr. 6. Průběh usazování [15] .....	7
Obr. 7. Princip kontinuálního usazování v usazovací nádrži [15] .....	8
Obr. 8. Usazovák - lapač písku [1] .....	8
Obr. 9. Gravitační způsob usazování - Oil separator for a welder [12].....	9
Obr. 10. Princip talířové odstředivky – usazovací princip [14].....	10
Obr. 11. Schéma usazovací odstředivky se šnekovým vyprazdňováním [14].....	10
Obr. 12. Filtrační odstředivka s pulsačním vyprazdňováním [14] .....	11
Obr. 13. Princip funkce hydrocyklonu [15].....	12
Obr. 14. Princip koláčové filtrace [15] .....	12
Obr. 15. Svíčkový filtr [1] .....	13
Obr. 16. Pásový filtr [1].....	14
Obr. 17. Filtrace s použitím šneku [15] .....	14
Obr. 18. Princip membránových procesů [15].....	15
Obr. 19. Membránový modul [13].....	15
Obr. 20. Aplikace membránových procesů dle velikosti separovaných částic [13].....	16
Obr. 21. Základní schéma zařízení .....	18
Obr. 22. Technologické schéma .....	20
Obr. 23. Analýza zatížení .....	21
Obr. 24. Zatížení válcové skořepiny .....	25
Obr. 25. Zatížení kuželové skořepiny .....	28
Obr. 26. Spojení kuželové a válcové skořepiny s výztužným prstencem.....	30
Obr. 27. Zatížení klenutého dna.....	33
Obr. 28. Zobrazení oblasti výpočtu .....	34
Obr. 29. Zatížení vzpěry .....	42
Obr. 30. Zatížení nohy separátoru .....	44
Obr. 31. Tlaková zkouška- zatížení .....	45



Obr. 32. Tlaková zkouška .....	45
Obr. 33. 3D model z programu Autodesk Inventor 2014 .....	46
Obr. 34. Vyrobený separátor v prostorách firmy Monts.....	47
Obr. 35. Sestavený separátor .....	47
Obr. 36. Konfigurace - gravitační usazovák .....	48
Obr. 37. Konfigurace - separace pomocí filtru .....	49
Obr. 38. Konfigurace - svíчковý filtr .....	50
Obr. 39. Konfigurace - filtrace skrz nuč .....	51
Obr. 40. Základní schéma zařízení v konfiguraci gravitačního usazováku .....	52
Obr. 41. Struktura nastavení prostředí Workbench .....	55
Obr. 42. Tvorba 2D modelu.....	56
Obr. 43. Tvorba geometrie – model A.....	56
Obr. 44. Tvorba geometrie - model B.....	57
Obr. 45. Vytvořená síť – 2D varianta pro model turbulence k-ε.....	58
Obr. 46. Vytvořená síť - varianta A pro model turbulence k-ε.....	58
Obr. 47. Vytvořená síť - varianta B pro model turbulence k-ε.....	58
Obr. 48. Vytvořená síť - 2D varianta pro model k-ω-SST – detail .....	59
Obr. 49. Vytvořená síť - varianta A pro model turbulence k-ω-SST .....	59
Obr. 50. Vytvořená síť - varianta B pro model turbulence k-ω-SST.....	59
Obr. 51. 2D varianta - residua – model turbulence k-ε.....	61
Obr. 52. 2D varianta - průběh tlaku při výpočtu – model turbulence k-ε.....	61
Obr. 53. 2D varianta - residua – model turbulence k-ω-SST .....	62
Obr. 54. 2D varianta - průběh tlaku při výpočtu – model turbulence k-ω-SST.....	62
Obr. 55. 3D varianta A - residua – model turbulence k-ε.....	63
Obr. 56. 3D varianta A - průběh tlaku při výpočtu – model turbulence k-ε.....	63
Obr. 57. 3D varianta A - residua – model turbulence k-ω-SST-intermittency .....	64
Obr. 58. 3D varianta A - průběh tlaku při výpočtu – model turbulence k-ω-SST.....	64
Obr. 59. 3D varianta B - residua – model turbulence k-ε.....	65
Obr. 60. 3D varianta B - průběh tlaku při výpočtu – model turbulence k-ε.....	65
Obr. 61. 3D varianta B - residua – model turbulence k-ω-SST.....	66
Obr. 62. 3D varianta B - průběh tlaku při výpočtu – model turbulence k-ω-SST.....	66
Obr. 63. Varianta 2D - rozložení rychlostí model k-ε .....	67
Obr. 64. Varianta 2D - rozložení rychlostí model k-ω-SST .....	67
Obr. 65. Souřadnice pracovní čáry .....	68
Obr. 66. Pracovní čára .....	68

Obr. 67. Varianta 2D - závislost rychlosti na souřadnici - model $k-\varepsilon$ .....	69
Obr. 68. Varianta 2D - závislost rychlosti na souřadnici z - model $k-\omega$ -SST.....	69
Obr. 69. Varianta 2D - tlaková ztráta - model $k-\varepsilon$ .....	69
Obr. 70. Varianta 2D - tlaková ztráta - model $k-\omega$ -SST .....	70
Obr. 71. Varianta A - rozložení rychlostí model $k-\varepsilon$ .....	70
Obr. 72. Varianta A - rozložení rychlostí model $k-\omega$ -SST .....	70
Obr. 73. Souřadnice pracovní čáry .....	71
Obr. 74. Pracovní čára .....	71
Obr. 75. Varianta A - závislost rychlosti na souřadnici - model $k-\varepsilon$ .....	72
Obr. 76. Varianta A - závislost rychlosti na souřadnici - model $k-\omega$ -SST .....	72
Obr. 77. Varianta A - tlaková ztráta - model $k-\varepsilon$ .....	72
Obr. 78. Varianta A - tlaková ztráta - model $k-\omega$ -SST .....	73
Obr. 79. Varianta B - rozložení rychlostí model $k-\varepsilon$ .....	73
Obr. 80. Varianta B - rozložení rychlostí model $k-\omega$ -SST .....	73
Obr. 81. Souřadnice pracovní čáry .....	74
Obr. 82. Pracovní čára .....	74
Obr. 83. Varianta B - závislost rychlosti na souřadnici - model $k-\varepsilon$ .....	75
Obr. 84. Varianta B - závislost rychlosti na souřadnici - model $k-\omega$ -SST .....	75
Obr. 85. Varianta B - tlaková ztráta - model $k-\varepsilon$ .....	75
Obr. 86. Varianta B - tlaková ztráta - model $k-\omega$ -SST .....	76
Obr. 87. Rozdělení zařízení na segmenty .....	76
Obr. 88. Označení oblasti výpočtu.....	77
Obr. 89. Označení oblasti výpočtu.....	78
Obr. 90. Označení oblasti výpočtu.....	79
Obr. 91. Označení oblasti výpočtu.....	80
Obr. 92. Označení oblasti výpočtu.....	81
Obr. 93. 2D varianta - vektory rychlostí model $k-\varepsilon$ .....	82
Obr. 94. 2D varianta - vektory rychlostí model $k-\omega$ -SST.....	83
Obr. 95. Varianta A - vektory rychlostí model $k-\varepsilon$ .....	84
Obr. 96. Varianta A - vektory rychlostí model $k-\omega$ -SST.....	85
Obr. 97. Varianta B - vektory rychlostí model $k-\varepsilon$ .....	86
Obr. 98. Varianta B - vektory rychlostí model $k-\omega$ -SST .....	87
Obr. 99. Dispozice prostoru laboratoře s rozmístěnými komponenty .....	89
Obr. 100. Dispozice prostoru laboratoře - půldorys .....	89
Obr. 101. Dispozice v laboratoři a návrh umístění komponent .....	90

## **9. Seznam tabulek**

Tabulka 1 - Usazovací rychlosti částic [16].....	5
Tabulka 2 - Přehled materiálových vlastností použitého materiálu.....	22
Tabulka 3 - Přehled součinitelů bezpečnosti .....	36
Tabulka 4 - Porovnání tlakové ztráty.....	87

## 10. Literatura

- [1] F. Rieger, V. Novák a T. Jirout, Hydromechanické procesy I., Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2007, p. 209.
- [2] J. Nožička, Mechanika tekutin, Praha: Nakladatelství ČVUT, České vysoké učení technické v Praze, 2004, p. 165.
- [3] M. Kozubková, Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX, Ostrava: Vysoká škola Báňská-Technická univerzita Ostrava, 2008, p. 153.
- [4] „Usazování,“ [Online]. Available: <http://homen.vsb.cz/~vec05/PI/ZPI/zpiopory/05%20usazovani.pdf>. [Přístup získán 30 01 2016].
- [5] J. Příhoda a P. Louda, Matematické modelování turbulentního proudění, Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007.
- [6] J. Citavý a J. Nožička, Proudění vazkých tekutin, Tenké smykové vrstvy, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004.
- [7] M. Kozubková, S. Drábková a P. Štáva, Matematické modely nestlačitelného a stlačitelného proudění, Metoda konečných objemů, Ostrava: Technická Univerzita Ostrava, 1999.
- [8] T. Blejchař, „Turbulence, Modelování proudění CFX, učební text, Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava,“ [Online]. Available: [http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence\\_ESF\\_v4.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence_ESF_v4.pdf). [Přístup získán 9 6 2016].
- [9] „Turbulence examples,“ 2 10 2014. [Online]. Available: [http://users.math.yale.edu/public\\_html/People/frame/Fractals/Aut14/MultifracExs/Turb.html](http://users.math.yale.edu/public_html/People/frame/Fractals/Aut14/MultifracExs/Turb.html). [Přístup získán 20 6 2016].
- [10] „Saban sanat,“ [Online]. Available: <http://www.sabansanat.com/>. [Přístup získán 21 04 2016].
- [11] D. Yuk-Kwan Ngan, R. Addison Sanborn, L. E. Stein a G. J. Raul, „Wetted wall vapor/liquid separator“. USA Patent US6376732 B1, 23 4 2000.
- [12] H. A. Bankstahl a J. Glitter, „Oil separator for a welder“. Patent US 7044999 B2, 16 05 2006.
- [13] P. Dítl, Difúzně separační pochody, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008.

- [14] F. Rieger, V. Novák a T. Jirout, Hydromechanické procesy II, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2007.
- [15] A. de Haan a H. Bosch, Industrial separation processes: fundamentals, Berlin: De Gruyter, 2013.
- [16] *Firemní podklady - Intecha, spol. s r. o..*

## **11. Seznam příloh**

P1 – Procesní schéma laboratorní jednotky

P02 – Seznam použitých symbolů, hodnot a tabulka výsledků

P03 – Výkres sestavy separátoru

P04 - Výkres nohy separátoru

P05 - Výkres vstupů

P06 – Výkres stavitelné překážky

P07 - Výkres vzpěr

P08 – Výkres příruby pro připevnění filtru

P09 – Výkres pomocné příruby pro připevnění filtru

P10 – Výkres příruby pro připevnění svíčkového filtru

P11 – Výkres pomocné příruby pro připevnění svíčkového filtru

P12 – Výkres příruby pro připevnění síta pro konfigurace nuč

P13 – Výkres plechu pro upevnění síta

P14 – Výkres konzole pro upevnění míchací sestavy na IBC zásobník

P15 – Aparátové listy