

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

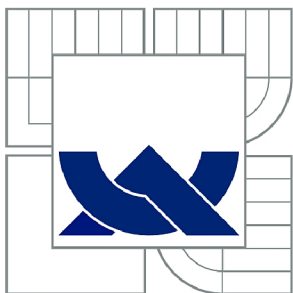
ANALÝZA TVARU SACÍCH KANÁLŮ SOUČASNÉ KONCEPCE  
DIFERENCIÁLNĚ ČERPANÉ KOMORY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

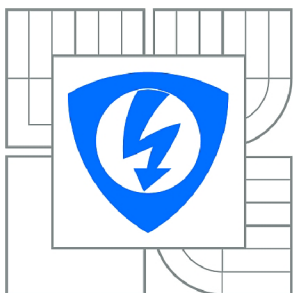
Bc. MICHAL BÍLEK

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

## ANALÝZA TVARU SACÍCH KANÁLŮ SOUČASNÉ KONCEPCE DIFERENCIÁLNĚ ČERPANÉ KOMORY

ANALYSIS OF THE SHAPE OF THE INTAKE PORTS OF THE CURRENT CONCEPT  
DIFFERENTIALLY PUMPED CHAMBER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAL BÍLEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MAXA, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektrotechnická výroba a management**

**Student:** Bc. Michal Bílek

**ID:** 125369

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Analýza tvaru sacích kanálů současné koncepce diferenciálně čerpané komory**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte základy elektronové mikroskopie a základy problematiky proudění plynů v nízkých tlacích a proudění otvory malých dimenzí oddělující oblasti s velkými tlakovými spády. Seznamte se se systémy SolidWorks a Fluent. V systému SolidWorks vymodelujte 3D model diferenciálně čerpané komory se současnou koncepcí ohniskové vzdálenosti a proveďte analýzu této varianty. Na jejím základě navrhnete optimalizaci s ohledem na vliv proudění plynu na rozptyl primárního svazku elektronů.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 10.2.2015

**Termín odevzdání:** 28.5.2015

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá analýzou tvaru sacích kanálů diferencially čerpané komory u současné koncepce. První část této práce nás uvádí do problematiky mikroskopie, následně se zaměřuje na mikroskopy typu ESEM a zahrnuje také popis dynamiky proudění a popis matematický. V dalších kapitolách je popsán software SolidWorks, v němž je vytvořen model kanálu diferencially čerpané komory a program Ansys Fluent sloužící k analýzám. V Druhé části práce jsou popsány navrhované koncepty a výsledky jejich simulací. Závěrem práce jsou tyto výsledky analyzovány a vyhodnoceny.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Elektronová mikroskopie, Environmentální rastrovací elektronový mikroskop, SolidWorks, ANSYS Fluent, Diferencially čerpaná komora

## **ABSTRACT**

This master's thesis discusses the analysis of the shape of the intake ports of differentially pumped chamber for the current concept. The first part is an introduction to the microscopy issue, then it is focused on ESEM microscopes and it also includes a description of the Flow dynamics and a mathematical description. In the following chapters the software Solid Works, where the model of differentially pumped chamber is created, and the software Ansys Fluent, which is used for analysis, are described. The second part concerns the proposed concepts and the results of their simulations. At the end of the work the results are analyzed and evaluated.

## **KEYWORDS**

Electron microscopy, Environmental scanning electron mikroskope, SolidWorks, ANSYS Fluent, Differentially Pumped chamber

BÍLEK, Michal *Analýza tvaru sacích kanálů současné koncepce diferencially čerpané komory*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 80 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Analýza tvaru sacích kanálů současné koncepce diferenciálně čerpané komory“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

Úvod	12
<b>1 Elektronová mikroskopie</b>	<b>13</b>
<b>2 Rozlišovací schopnost</b>	<b>14</b>
<b>3 Rozdělení elektronových mikroskopů</b>	<b>15</b>
3.1 Transmisní elektronový mikroskop ( <i>TEM</i> ) . . . . .	15
3.2 Skenovací elektronový mikroskop . . . . .	16
3.3 Emisní elektronová mikroskopie . . . . .	17
3.4 Zrcadlová elektronová mikroskopie . . . . .	17
3.5 Iontová mikroskopie . . . . .	18
<b>4 ESEM</b>	<b>19</b>
4.1 Zdroj elektronů . . . . .	20
4.2 Elektromagnetická čočka . . . . .	20
4.3 Skenovací obvod . . . . .	20
4.4 Stolek vzorku . . . . .	20
4.5 Zesilovač a zobrazovací soustava . . . . .	21
4.6 Scintilační detektor . . . . .	21
<b>5 Diferenciálně čerpaná komora</b>	<b>22</b>
5.1 Vakuový systém . . . . .	22
<b>6 Dynamika proudění</b>	<b>23</b>
6.1 Laminární proudění . . . . .	23
6.2 Turbulentní proudění . . . . .	23
6.3 Modelování dynamiky tekutin . . . . .	24
6.3.1 Rovnice kontinuity . . . . .	24
6.3.2 Eulerovy rovnice hydrodynamiky . . . . .	25
6.3.3 Stavová rovnice . . . . .	25
6.3.4 Bernoulliho rovnice . . . . .	26
6.3.5 Navierova – Stockeova rovnice . . . . .	27
<b>7 Použitý software</b>	<b>28</b>
7.1 SolidWorks . . . . .	28
7.2 ANSYS Fluent . . . . .	29
<b>8 Metoda konečných objemů</b>	<b>30</b>

<b>9</b>	<b>Výpočetní síť</b>	<b>31</b>
<b>10</b>	<b>Popis problematiky návrhu</b>	<b>33</b>
<b>11</b>	<b>Popis koncepcí</b>	<b>34</b>
<b>12</b>	<b>Srovnání výsledků koncepcí</b>	<b>40</b>
12.1	Vyhodnocení tlaku . . . . .	40
12.2	Vyhodnocení rychlosti . . . . .	41
<b>13</b>	<b>Výsledky navrhovaných koncepcí</b>	<b>43</b>
13.1	Návrh první koncepce . . . . .	43
13.1.1	Počáteční podmínky . . . . .	43
13.1.2	Nastavení sítě . . . . .	43
13.1.3	Výpočty . . . . .	45
13.1.4	Vyhodnocení výsledků simulace . . . . .	49
13.2	Návrh druhé koncepce - bez prstence . . . . .	49
13.2.1	Nastavení sítě . . . . .	49
13.2.2	Výpočty . . . . .	50
13.2.3	Vyhodnocení výsledků simulace . . . . .	54
13.3	Návrh třetí koncepce - Válcový tvar . . . . .	54
13.3.1	Nastavení sítě . . . . .	55
13.3.2	Výpočty . . . . .	55
13.3.3	Vyhodnocení výsledků simulace . . . . .	59
13.4	Návrh čtvrté koncepce - zúžený tvar . . . . .	59
13.4.1	Nastavení sítě . . . . .	60
13.4.2	Výpočty . . . . .	60
13.4.3	Vyhodnocení výsledků simulace . . . . .	64
13.5	Návrh páté koncepce - rozšířený tvar . . . . .	64
13.5.1	Nastavení sítě . . . . .	65
13.5.2	Výpočty . . . . .	65
13.5.3	Vyhodnocení výsledků simulace . . . . .	69
13.6	Návrh šesté koncepce - rozevřený válec . . . . .	69
13.6.1	Nastavení sítě . . . . .	69
13.6.2	Výpočty . . . . .	71
13.6.3	Vyhodnocení výsledků simulace . . . . .	75
<b>14</b>	<b>Závěr</b>	<b>76</b>
	<b>Literatura</b>	<b>77</b>

Seznam symbolů, veličin a zkratk	79
Seznam příloh	80

# SEZNAM OBRÁZKŮ

3.1	Princip mikroskopu typu TEM; [8]	15
3.2	Paprsky vzniklé po dopadu elektronů; [2]	16
4.1	Konstrukce skanovacího elektronového mikroskopu [8]	19
5.1	Komora diferenciálního čerpání [10]	22
8.1	Princip výpočetní sítě [14]	30
9.1	Příklad nastavení sítě	31
10.1	Řez modelem elektronového mikroskopu AQUASEM II [5]	33
11.1	Stávající model diferenciálně čerpané komory	34
11.2	Návrh druhé koncepce bez prstence	35
11.3	Návrh druhé koncepce bez prstence v řezu	35
11.4	Návrh třetí koncepce válcového tvaru	36
11.5	Návrh třetí koncepce válcového tvaru v řezu - detail	36
11.6	Návrh čtvrté koncepce válcového tvaru zúženého k výstupu, v pravé části obrázku pohled na komoru shora	37
11.7	Návrh čtvrté koncepce válcového tvaru zúženého k výstupu - detail	37
11.8	Návrh páté koncepce rozšířeného válcového tvaru	38
11.9	Návrh páté koncepce rozšířeného válcového tvaru - detail	38
11.10	Návrh šesté koncepce rozevřeného válce	39
11.11	Návrh šesté koncepce rozevřeného válce - detail	39
12.1	Průměrný tlak v diferenciálně čerpané komoře na dráze primárního svazku	40
12.2	Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházejícího diferenciálně čerpanou komorou	41
12.3	Průměrná rychlost v diferenciálně čerpané komoře na dráze primárního svazku	42
12.4	Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházejícího diferenciálně čerpanou komorou	42
13.1	Stávající model diferenciálně čerpané komory	43
13.2	Nastavená síť u stávající konstrukce	44
13.3	Nastavená síť u stávající konstrukce - detail na oblast clonek	44
13.4	Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře	45
13.5	Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře - Detail	46
13.6	Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře	46
13.7	Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail	47
13.8	Zobrazení vektorů proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail	47
13.9	Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.	48

13.10	Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciallyně čerpanou komorou . . . . .	48
13.11	Stávající model diferenciallyně čerpané komory . . . . .	49
13.12	Nastavená síť - detail na oblast clonek . . . . .	50
13.13	Rozložení tlaku v diferenciallyně čerpané komoře . . . . .	50
13.14	Rozložení tlaku v diferenciallyně čerpané komoře - Detail . . . . .	51
13.15	Rozložení rychlosti proudění v diferenciallyně čerpané komoře . . . . .	51
13.16	Rozložení rychlosti proudění v diferenciallyně čerpané komoře - Detail .	52
13.17	Zobrazení vektorů proudění v diferenciallyně čerpané komoře - Detail .	52
13.18	Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházející diferenciallyně čerpanou komorou. . . . .	53
13.19	Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciallyně čerpanou komorou. . . . .	53
13.20	Stávající model diferenciallyně čerpané komory . . . . .	54
13.21	Nastavená síť - detail na oblast clonek . . . . .	55
13.22	Rozložení tlaku v diferenciallyně čerpané komoře . . . . .	55
13.23	Rozložení tlaku v diferenciallyně čerpané komoře - Detail . . . . .	56
13.24	Rozložení rychlosti proudění v diferenciallyně čerpané komoře . . . . .	56
13.25	Rozložení rychlosti proudění v diferenciallyně čerpané komoře - Detail .	57
13.26	Zobrazení vektorů proudění v diferenciallyně čerpané komoře - Detail .	57
13.27	Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházející diferenciallyně čerpanou komorou. . . . .	58
13.28	Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciallyně čerpanou komorou. . . . .	58
13.29	Stávající model diferenciallyně čerpané komory . . . . .	59
13.30	Nastavená síť - detail na oblast clonek . . . . .	60
13.31	Rozložení tlaku v diferenciallyně čerpané komoře . . . . .	60
13.32	Rozložení tlaku v diferenciallyně čerpané komoře - Detail . . . . .	61
13.33	Rozložení rychlosti proudění v diferenciallyně čerpané komoře . . . . .	61
13.34	Rozložení rychlosti proudění v diferenciallyně čerpané komoře - Detail .	62
13.35	Zobrazení vektorů proudění v diferenciallyně čerpané komoře - Detail .	62
13.36	Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházející diferenciallyně čerpanou komorou. . . . .	63
13.37	Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciallyně čerpanou komorou. . . . .	63
13.38	Stávající model diferenciallyně čerpané komory . . . . .	64
13.39	Nastavená síť - detail na oblast clonek . . . . .	65
13.40	Rozložení tlaku v diferenciallyně čerpané komoře . . . . .	65
13.41	Rozložení tlaku v diferenciallyně čerpané komoře - Detail . . . . .	66

13.42Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře . . . . .	66
13.43Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail .	67
13.44Zobrazení vektorů proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail .	67
13.45Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházející diferenci- álně čerpanou komorou. . . . .	68
13.46Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou. . . . .	68
13.47Návrh šesté koncepce rozevřeného válce . . . . .	69
13.48Nastavení sítě v oblasti clonek . . . . .	70
13.49Nastavení sítě v oblasti rozevřeného válce u clonky PLA1 . . . . .	70
13.50Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře . . . . .	71
13.51Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře - Detail . . . . .	71
13.52Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře . . . . .	72
13.53Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail .	72
13.54Zobrazení vektorů proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail .	73
13.55Zobrazení vektorů proudění v diferenciálně čerpané komoře - v levé části - oblast clonky PLA1, v pravé části - oblast clonky PLA2 . . . . .	73
13.56Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházející diferenci- álně čerpanou komorou. . . . .	74
13.57Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou. . . . .	74



# ÚVOD

Díky velkému a rychlému rozvoji výpočetní techniky je možné posouvat dopředu i vývoj v oblasti mikroskopie. Máme možnost modelování 3D objemových těles, na kterých lze provádět matematicko-fyzikální analýzu. Lze tak vytvořit několik různých návrhů řešení a na základě výsledků analýz vybrat optimální řešení.

Pro řešení dané problematiky je nutné seznámit se s principy, na kterých fungují dnešní mikroskopy. Z tohoto důvodu se první část práce zabývá právě seznámením s mikroskopií. Poněvadž se práce zabývá analýzou proudění sacích kanálů diferenciallyně čerpané komory, jsou v další části práce popsány druhy proudění, které mohou nastat. Pro návrh i řešení problému bude využit software SolidWorks, v němž bude vytvořen model kanálu diferenciallyně čerpané komory a software AnsysFluent pro řešení analýzy proudění.

# 1 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE

Už pouhý význam slova mikroskopie, který je odvozen z řeckých slov mikros (malý) a skopeo (pozorovat), sám o sobě hodně vypovídá. Elektronová mikroskopie je tedy metoda, jež umožňuje studovat mikrostruktury zkoumaných objektů.

Historie vývoje elektronového mikroskopu se však skládá z řady dílčích objevů a technologického pokroku. Jako základní pilíř elektronové mikroskopie je objev elektronu, který byl popsán J.J. Thompsonem v roce 1897 při jeho studiu elektrické vodivosti plynů. Za další krok by se dalo považovat zjištění publikované Luisem de Broglieem v roce 1925, který zjistil, že rychle letící částice mají vlnový charakter. O dva roky později v roce 1927 se tento objev potvrdil při výzkumu elektronové difrakce, který prováděli na sobě nezávislé týmy Davissona s Germerem a Thomsona s Reidem, ten dokazoval vlnovou povahu elektronů. Neméně důležitým objevem bylo vychylování elektronového paprsku elektromagnetickým polem. Tento objev popisuje práce H. Busche z roku 1926, jež se zabývá analogií ve vychylování paprsku elektronů pomocí magnetických polí solenoidů a světla skleněnou čočkou.

První mikroskop byl zkonstruován Panem Knollem a Ruskou v roce 1932. Komerční výroba transmisních elektronových mikroskopů započala v roce 1939 firmami Siemens a Halske. Tyto modely mikroskopů měly rozlišovací schopnost 10 nm. V roce 1938 německý fyzik M. von Ardenne popsal princip rastrování u transmisního elektronového mikroskopu. Skenovací elektronový mikroskop následně sestrojil americký vědec Zworikyn, který stojí za vynálezem fotonásobiče, jehož použil k detekci sekundárních elektronů. V Anglii se skupina vědců vedená C. W. Oatleyem zabývala nezávisle na Zworikyho výzkumu konstrukcí skenovacího elektronového mikroskopu. Jejich práce dále posloužila v roce 1965 ke komerční výrobě firmou Cambridge Scientific Instruments. Vrcholem v oboru mikroskopie bylo sestrojení dvou 3MV transmisních elektronových mikroskopů, které se nacházejí v USA a Japonsku a díky kterým mohl člověk poprvé spatřit atom. [1] [2]

## 2 ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST

Rozlišovací schopnost je taková vzdálenost dvou bodů ležících vedle sebe, které lze ještě rozeznat jako oddělené. Lidské oko může rozeznávat ze vzdálenosti 25 cm dva body, které jsou od sebe vzdálené 0,2 mm. Optický mikroskop má zvětšení až 1000x, člověku tak umožňuje rozlišit objekty vzdálené od sebe 0,0002 mm. Optické mikroskopy jsou však omezeny vlnovou délkou světla, které se používá pro osvětlení zkoumaného objektu. Jakmile bylo zjištěno, že urychlené elektrony ve vakuu se chovají jako světlo a mají vlnovou délku zhruba 100 000 x menší než světlo, byl sestaven první elektronový mikroskop. Skleněné čočky v něm byly nahrazeny čočkami elektromagnetickými. V současné době se v laboratořích využívají převážně transmisní elektronové mikroskopy, které dosahují rozlišovací schopnosti v řádu desetin nm. Úkolem zvětšování u mikroskopu je zvyšovat počet informací o pozorovaném vzorku, který oko nemůže rozlišit. Může však dojít i k tomu, že zvětšení překročí rozlišovací schopnost mikroskopu. To znamená, že počet informací díky zvětšení již neroste. Zvětšení u elektronového mikroskopu je udáváno jako užitečné zvětšení, které je poměrem rozlišovací schopnosti oka a maximální rozlišovací schopnosti mikroskopu. [3]

$$Z = \frac{\sigma_o}{\sigma_m} \quad (2.1)$$

Kde:

$Z$  – užitečné zvětšení

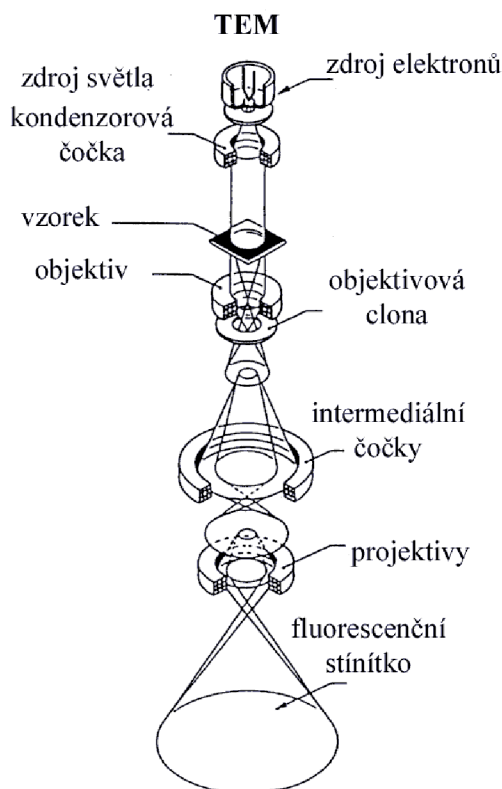
$\sigma_o$  – rozlišovací schopnost oka

$\sigma_m$  – maximální rozlišovací schopnost mikroskopu

## 3 ROZDĚLENÍ ELEKTRONOVÝCH MIKROSKOPŮ

### 3.1 Transmisní elektronový mikroskop (*TEM*)

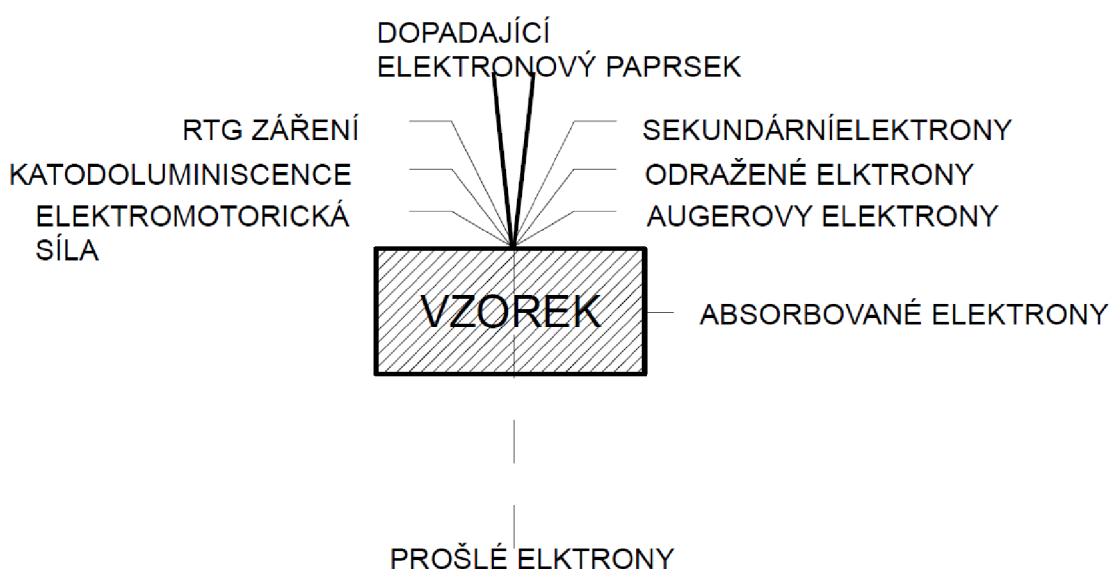
Princip mikroskopu typu TEM je zobrazen na obrázku 3.1. Tento typ mikroskopu umožňuje pozorovat vzorek do tloušťky 100nm při vysokém zvětšení a s velkou rozlišovací schopností. Elektronový mikroskop funguje na podobném principu jako mikroskop světelný s tím rozdílem, že místo viditelného světla používá elektrony. Zdrojem elektronů bývá wolframové vlákno, které je ve vakuu žhaveno. Skleněné čočky jsou nahrazeny magnetickými a projekční plocha je nahrazena fluorescenčním stínítkem, na které dopadá svazek elektronů. Na tomto místě dopadu elektronu dochází k vyzařování světla. Výsledný obraz je zvětšován pomocí elektronové optické soustavy. Pozorovaný vzorek se nachází ve vakuu a musí být dostatečně tenký, aby jím mohly elektrony proniknout. Tloušťka vzorku je tak jednou z nevýhod tohoto mikroskopu, protože příprava vzorků je v některých případech složitá. Další nevýhoda spočívá v tom, že lze u vzorku sledovat pouze vnitřní strukturu, nikoliv povrchovou. [4] [5]



Obr. 3.1: Princip mikroskopu typu TEM; [8]

## 3.2 Skenovací elektronový mikroskop

Skenovací (*rastrovací*) elektronový mikroskop (*SEM*) slouží k zobrazení povrchu vzorků. K získání zvětšeného obrazu dochází pomocí detektoru, který detekuje sekundární elektrony. Ostře fokusovaný svazek elektronů dopadá bod po bodu a řádek po řádku na zkoumaný vzorek, kde dochází k fyzikální interakci mezi vzorkem a dopadajícím elektronem. Z této integrace vzniká signál, který se sleduje. Může se jednat o sekundární elektrony, to jsou elektrony vyzářené z materiálu, zpětně odražené elektrony od povrchu, augerovy elektrony nebo elektrony, které prošly vzorkem. Také dochází ke vzniku elektromotorické síly, katodoluminiscence a RTG záření, čehož je využíváno například při prvkové analýze. Lze také určit i kvantitativní zastoupení jednotlivých prvků. Tyto vznikající signály jsou zobrazeny na obrázku 3.2



Obr. 3.2: Paprsky vzniklé po dopadu elektronů; [2]

Princip je takový, že elektrony, které jsou emitované wolframovou katodou, jsou urychleny kladným napětím na anodě a vytvoří tak primární svazek, jenž je elektromagnetickými čočkami ostře fokusován na povrch vzorku. Vychylovací cívky rádkového systému následně bod po bodu řádkují daný prostor vzorku. S pohybem primárního elektronového svazku je synchronizován pohyb elektronového svazku obrazovky mikroskopu. Jas obrazovky je dán intenzitou signálu ze snímacího detektoru. Kontrast je tedy vytvářen jako rozdíl intenzity signálu v jednotlivých bodech dopadu primárního svazku. Podle typu detektoru lze také získat informace o povrchové topografii, chemickém složení a o některých dalších fyzikálních vlastnostech daného vzorku. Na obrázku 4.1 je znázorněn princip konstrukce SEM. [5]

Tato metoda má výhodu, že je jednoduché připravit vzorek. Musí však splňovat některá kritéria, například na povrchu by se neměly nacházet cizorodé částice, jako je prach, musí být stabilní ve vakuu a vzorek musí být vodivý, nebo se při pozorování nabije. Pokud je vzorek nevodivý, natáhne se na něj tenká vrstvička kovu s dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí. Povlak má tloušťku asi 10 nm.

Ne všechny vzorky se však dají pozorovat ve vakuu ve svém normálním stavu, vlhkosti za normálního tlaku. A právě proto byl sestaven typ mikroskopu, který je založen na podobném principu, liší se však tím, že v pozorovací komoře je vysoký tlak 1500 až 2000 Pa. Pozorovací komora je oddělena od zbytku zařízení pomocí diferenciálně čerpané komory, kde se tlak pohybuje okolo 30 Pa. Diferenciálně čerpaná komora je oddělena dvěma clonkami s malým otvorem pro elektronový svazek. Tento typ se jmenuje environmentální skenovací elektronový mikroskop (*ESEM*). Podrobnějším principem ESEM se tato práce bude zabývat v dalších kapitolách. [2] [6]

### 3.3 Emisní elektronová mikroskopie

Jako zdroj primárních elektronů slouží vzorek ne elektronová tryska, jak bylo u předchozích typů mikroskopů. Využívají se termoemise, autoemise elektronů nebo fotoemise, kdy je vzorek ozařován ultrafialovým zářením. Termoemisní elektronové mikroskopy se využívají ke studiu kovových fází, růstu zrn a studiu rekrystalizace. Autoemisní elektronové mikroskopy se používají při studiu procesů adsorpce atomů plynů a oxidaci povrchu, pozorování tuhých látek, měření aktivační energie povrchové difuze nebo měření povrchového napětí čistých materiálů. [7]

### 3.4 Zrcadlová elektronová mikroskopie

Využívá se při pozorování tuhých látek. Vzorek není emitován elektrony, ani na něj elektrony nedopadají. Princip je takový, že svazek urychlených elektronů vstoupí do pole elektrostatického zrcadla, kde je na elektrodě zrcadla záporný potenciál. To způsobí odražení elektronů od ekvipotenciálních ploch těsně před elektrodou zrcadla, která je tvořena zkoumaným vzorkem. Odražené elektrony po průchodu elektronovými čočkami vytvoří na fluorescenčním stínítku obraz povrchu zkoumaného vzorku. Využívá se například pro zviditelnění magnetických domén nebo studiu činnosti integrovaných obvodů. [7]

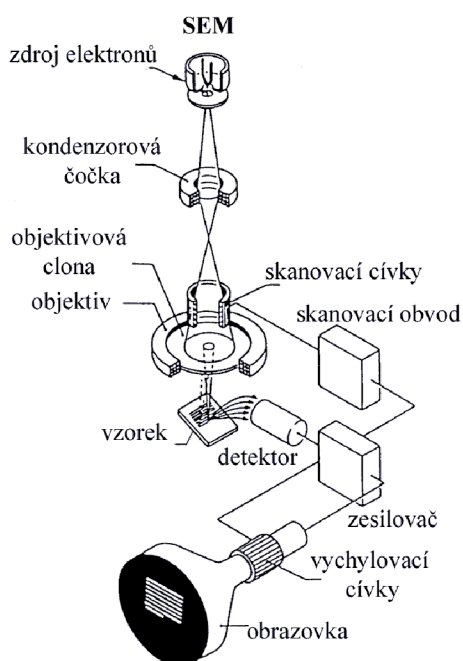
## 3.5 Iontová mikroskopie

Mikroskop je tvořen pracovní komorou, která je vakuově těsněná a dno této komory je opatřeno uzemněným fluorescenčním stínítkem. Tato metoda vyžaduje velkou čistotu povrchu vzorku. Vzorek je elektrochemicky zašpičatěn a připojen ke kladnému pólu vysokého napětí. Vzorek musí být chlazen, většinou se používá tekutý dusík. Tato metoda slouží k pozorování jednotlivých atomů v krystalové mřížce na povrchu vzorku. [7]

## 4 ESEM

V této práci se zaměříme na environmentální skenovací mikroskop (*ESEM*), protože práce se zabývá analýzou tvaru sacích kanálů diferenciálně čerpané komory v tomto typu mikroskopu. Mikroskop je konstruován pro pozorování vzorků, které v přirozeném stavu obsahují vodu. Jde o poslední stádium mikroskopu, který vychází z typu SEM. Typ ESEM se od typu SEM liší pouze oddělením vakuového prostředí v tubusu mikroskopu od prostředí komory vzorku s vyšším tlakem pomocí diferenciálně čerpané komory. Díky tomu lze pozorovat i vzorky, jakými jsou bavlněné tkaniny, tuky, emulze a další.

Environmentální skenovací elektronová mikroskopie umožňuje zkoumat vzorky při vysokém tlaku plynů, jenž může dosahovat až 3000 Pa (pro srovnání v klasickém mikroskopu typu SEM je tlak pod 0,001Pa). Negativem vysokého tlaku plynu v komoře se vzorkem je, že dochází ke zvýšenému počtu interakcí elektronů s molekulami a atomy plynu. Z tohoto důvodu dochází k rozptylu primárního elektronového svazku. Rozptyl primárních elektronů roste s rostoucím tlakem plynů, rostoucí pracovní vzdáleností nebo s klesajícím urychlovacím napětím svazku. Dochází tak ke zvětšování průměru stopy primárního elektronového svazku a tedy ke zhoršení rozlišovací schopnosti mikroskopu. Konstrukce mikroskopu ESEM se příliš neliší od konstrukce SEM. Základní uspořádání je na obrázku 4.1 a skládá se z:



- Zdroj elektronů,
- Elektromagnetické čočky,
- Skenovací obvod,
- Stůl vzorku,
- Detektor,
- Zesilovač,
- Zobrazovací soustava.

Obr. 4.1: Konstrukce skanovacího elektronového mikroskopu [8]



## 4.1 Zdroj elektronů

Zdrojem je každý materiál, který můžeme zahřát na vysokou teplotu. Zahříváním získávají elektrony energii potřebnou k překonání přirozené bariéry. Nejčastěji používaným materiálem pro zdroj elektronů je wolframové vlákno, které se používá kvůli své nízké vstupní energii (4,5 eV) a nízkým nárokům na vakuum. Druhým nejčastěji používaným materiálem je katoda LaB6. Neomezený zdroj elektronů představuje autoemisní tryska kde jsou elektrony emitovány ze studeného wolframového vlákna ve tvaru ostrého hrotu. Naproti trysce je umístěna elektroda s kladným napětím 5 kV, díky které jsou elektrony vytrženy z povrchu hrotu.

Elektronový paprsek musí být koherentní. To znamená, že paprsek vychází z jednoho místa, a to z důvodu stejné energie elektronu.

## 4.2 Elektromagnetická čočka

Elektromagnetické čočky jsou tvořeny přesně navinutými cívkami s přesným napětím. Čočky mají zásadní vliv na kvalitu výsledného obrazu, ale může u nich docházet k některým vadám.

- sférická vada - elektrony jsou vychýleny, procházejí dále od optické osy čočky než elektrony procházející jejím středem
- chromatická vada - procházející elektrony mají rozdílnou rychlost nebo kolísá urychlovací napětí
- osový astigmatismus - jedná se o asymetrii čočky v důsledku nehomogenity materiálu nebo nečistotám na clonkách

## 4.3 Skenovací obvod

Skenovací obvod, jak už je z názvu patrné, skenuje povrch vzorku. Paprsek primárních elektronů je vychylován pomocí dvojice cívek ve dvou na sebe kolmých osách. Vychylovací cívky jsou napájeny napětím pilovitého charakteru, aby docházelo ke skenování po řádcích. Skenování je propojeno se zobrazovacím obvodem, a tak dochází k vytváření výsledného obrazu.

## 4.4 Stolek vzorku

Vzorek je umístěn v držáku, který se nachází v komoře vzorku. Z důvodu usnadnění zaměřování je stolek pohyblivý a lze jej ovládat pomocí joysticku.

## 4.5 Zesilovač a zobrazovací soustava

Signál je zesílen poprvé ještě v scintilačním detektoru pomocí fotonásobiče. Pro zobrazení se signál zesiluje přímo podle potřeb zobrazovací soustavy. V minulosti se využívalo zobrazování přímo na obrazovku v podobném principu jako u televize. Dnes je celý obraz zpracováván počítačově pomocí softwaru od výrobce mikroskopu.

## 4.6 Scintilační detektor

Scintilační detektor slouží k převodu energie ionizujícího záření na energii fotonů, kterou lze zobrazovat, jelikož se nachází v rozmezí viditelného až ultrafialového spektra. Při dopadu elektronů na vzorek dochází ke vzniku mnoha signálů, které obsahují různé informace o zkoumaném vzorku. Ne všechny signály jsou pro nás důležité. Podle důležitosti se volí typ detektoru. Tři základní typy detektoru jsou:

- Detektor zpětně odražených elektronů
- Detektor rentgenového záření (EDS detector)
- Detektor sekundárních elektronů

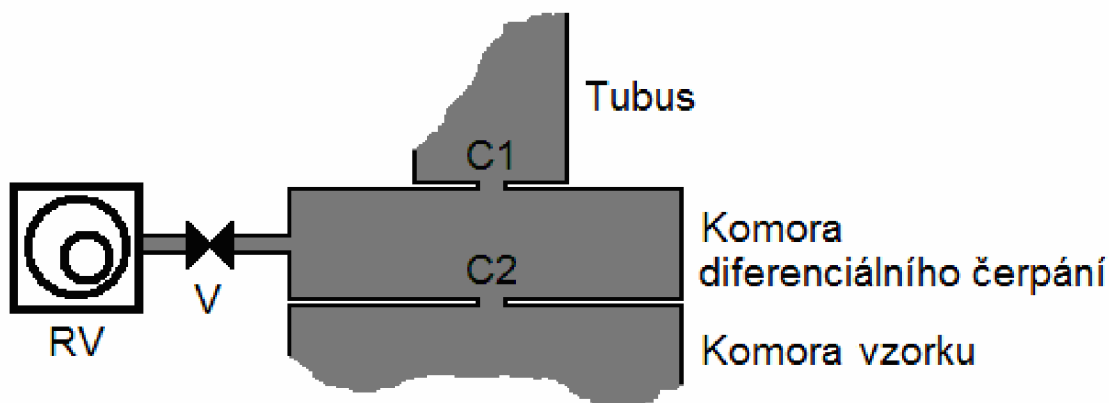
U environmentálního skenovacího mikroskopu se nejčastěji používá detektor sekundárních elektronů se dvěma clonkami. Tyto clonky mají za úkol oddělit prostředí komory vzorku o tlaku 1500 – 2000Pa od prostředí se scintilátorem, kde je tlak 5 - 8Pa. U scintilátoru musí být tlak nízký z důvodu vysokého napětí (kolem 12 kV) na detektoru. [9]

## 5 DIFERENCIÁLNĚ ČERPANÁ KOMORA

Návrhy změn diferenciálně čerpané komory, které jsou řešeny v této práci, mají pomoci dosáhnout zvětšení zorného pole při menší pracovní vzdálenosti a účinnějšímu systému čerpání. Princip spočívá v tom, že se vzorkem můžeme pracovat při tlaku 2000Pa. V tubusu mikroskopu je vakuum, které je odděleno pomocí diferenciálně čerpané komory s tlakem 30Pa.

### 5.1 Vakuový systém

Tlak v jednotlivých částech mikroskopu je jedna z nejdůležitějších konstrukčních podmínek na mikroskop typu ESEM. Dvoustupňový systém diferenciálního čerpání pro mikroskop ESEM je zobrazen na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Komora diferenciálního čerpání [10]

Vakuový systém je složen z tubusu a komory vzorku. Tubus mikroskopu je přečerpáván rotační vývěvou a následně se pomocí difuzní vývěvy vytváří požadovaný tlak na takovou hodnotu, aby přímo žhavená wolframová katoda mohla správně fungovat. Mezi tubusem a komorou vzorku se nachází komora diferenciálního čerpání, která je oddělena pomocí dvojice clonek C1 a C2. Tato komora mezi dvojicí clonek je neustále čerpána rotační vývěvou. Clonky jsou konstruovány s malými otvory většinou v rozmezí 0.6 až 1 mm, zabraňují rychlému vyrovnávání tlaku mezi tubusem a komorou vzorku. Vakuová clonka C2 také plní funkci aperturní clonky projekční čočky mikroskopu. Z důvodu požadavků velké těsnosti dochází ke zmenšování průměrů otvorů clonek. Při navrhování clonek je potřeba brát v potaz požadavky elektronové optiky u clonky C2 a snižování zorného pole mikroskopu u clonky C1.[10]

## 6 DYNAMIKA PROUDĚNÍ

Jelikož se práce zabývá analýzou proudění sacích kanálů diferenciálně čerpané komory, je důležité popsat, které druhy proudění mohou nastat. Proudění a jeho směr bývá vždy určen tlakem. Tekutina proudí z místa vyššího tlaku do místa s nižším tlakem. Proudění je pohyb tekutiny, kdy se tekutina pohybuje neuspořádaným pohybem ve směru proudění.

Podle fyzikálních vlastností se proudění dělí na:

- proudění ideální kapaliny, která je dokonale nestlačitelná a bez vnitřního tření
- proudění vazké kapaliny se zohledněním vnitřního tření
- proudění nestlačitelné kapaliny, která má konstantní hustotu
- proudění stlačitelné kapaliny, kdy je její hustota závislá na tlaku

Typ proudění můžeme rozdělit na dva hlavní:

- laminární proudění (uspořádané)
- turbulentní proudění (neuspořádané)

### 6.1 Laminární proudění

U laminárního proudění se částice pohybují ve vrstvách a jejich pohyb je uspořádaný. Vektory rychlosti směřují rovnoběžně s osou kanálu. V průřezu potrubím představují vrcholy vektorů parabolu, to znamená, že největší rychlost je uprostřed a nejmenší je u stěn.

### 6.2 Turbulentní proudění

Turbulentní proudění je způsobováno komplikovanou interakcí mezi viskózními a setrvačnými členy v momentových rovnicích. Jde o proudění s chaotickým pohybem částic, které vzniká při vysokých Reynoldsových číslech ( $Re \gg 1$ ). Přechod mezi prouděním laminárním a turbulentním udává Reynoldsovo kritérium. Reynoldsovo kritérium bylo určeno experimentálně a je definováno pro jednorozměrné proudění v potrubí.

$$Re = \frac{v_s d}{\nu} \quad (6.1)$$

Kde:

$Re$  – Reynoldsovo číslo

$v_s$  – střední rychlost v potrubí [ $m s^{-1}$ ]

$d$  – průměr potrubí [ $m$ ]

$\nu$  – kinematičká viskozita

Hranicí mezi laminárním a turbulentním prouděním je kritická hodnota  $Re_{krit} = 2320$ . Pokud je  $Re \geq Re_{krit}$ , jde o proudění turbulentní. Pokud je  $Re \leq Re_{krit}$ , jde o proudění laminární. [11]

## 6.3 Modelování dynamiky tekutin

Výpočty byly řešeny v programu ANSYS Fluent. Tento program řeší systém tří parciálních diferenciálních rovnic, které jsou doplněny o stavovou rovnici. Jedná se o trojrozměrný typ proudění stlačitelné, vazké tekutiny a s převodem tepla. K našemu řešení je nutné znát pět rovnic. Tři Eulerovy rovnice, rovnici kontinuity a stavovou rovnici. Modelování tekutiny se řídí třemi základními zákony:

- zákonem zachování hmoty (rovnice kontinuity)
- zákonem zachování hybnosti (Eulerovy rovnice)
- zákonem zachování energie (Bernoulliho rovnice)

### 6.3.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity (někdy také rovnice spojitosti) vyjadřuje obecný fyzikální zákon o zachování hmotnosti. Tato rovnice říká, že při změně rychlosti, průřezu a hustoty tekutiny se nezmění hmotnost kapaliny. Pokud budeme uvažovat o jednorozměrném neustáleném proudění stlačitelné tekutiny proudovou trubicí s proměnným průřezem, bude platit rovnice:

$$\frac{\delta(\rho v)}{\delta x} + \frac{\delta \rho}{\delta t} = 0 \quad (6.2)$$

Kde:

$\rho$  – hustota tekutiny [ $kgm^{-3}$ ]

$v$  – rychlost [ $ms^{-1}$ ]

$x$  – dráha [ $m$ ]

$t$  – čas [ $s$ ]

Pro odvození rovnice kontinuity třírozměrného neustáleného proudění se vytkne v proudovém poli tekutiny oblast ve tvaru hranolu. Hranolem protéká tekutina rychlostí, jež má složky ve směru souřadných os  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Následným odvozováním se pak získá obecná rovnice kontinuity pro neustálené prostorové proudění stlačitelné tekutiny:

$$\frac{\delta(\rho v_x)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v_y)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho v_z)}{\delta z} + \frac{\delta \rho}{\delta t} = 0 \quad (6.3)$$

### 6.3.2 Eulerovy rovnice hydrodynamiky

Eulerova rovnice hydrodynamiky vyjadřuje rovnováhu sil hmotnostních, které na tekutinu působí z vnějšku, tlakových sil, které působí v tekutině a setrvačných sil od pohybu částic tekutiny. Dynamiku tekutiny v trojrozměrném prostoru můžeme popsat pohybovými rovnicemi:[11] [2]

$$\begin{aligned}\rho \left( \frac{\delta v_x}{\delta t} + v_x \frac{\delta v_x}{\delta x} + v_y \frac{\delta v_x}{\delta y} + v_z \frac{\delta v_x}{\delta z} \right) &= \rho a_x - \frac{\delta p}{\delta x} \\ \rho \left( \frac{\delta v_y}{\delta t} + v_x \frac{\delta v_y}{\delta x} + v_y \frac{\delta v_y}{\delta y} + v_z \frac{\delta v_y}{\delta z} \right) &= \rho a_y - \frac{\delta p}{\delta y} \\ \rho \left( \frac{\delta v_z}{\delta t} + v_x \frac{\delta v_z}{\delta x} + v_y \frac{\delta v_z}{\delta y} + v_z \frac{\delta v_z}{\delta z} \right) &= \rho a_z - \frac{\delta p}{\delta z}\end{aligned}\tag{6.4}$$

Kde:

$\rho$  – hustota kapaliny [ $kgm^{-3}$ ]

$p$  – tlak kapaliny [ $Pa$ ]

$v_x, v_y, v_z$  – rychlost v daném směru [ $ms^{-1}$ ]

Eulerova rovnice hydrodynamiky je nelineární parciální diferenciální rovnice 1. řádu, její integrace je obtížná i časově náročná, řeší se numericky. Eulerova rovnice hydrodynamiky slouží k odvození Bernoulliho rovnice.

### 6.3.3 Stavová rovnice

Stavová rovnice vyjadřuje korekci mezi tlakem, hustotou a teplotou tekutiny. Pro ideální plyny ji lze vyjádřit takto:

$$pV = NkT = nRT\tag{6.5}$$

Kde:

$P$  – tlak [ $Pa$ ]

$V$  – objem [ $m^{-3}$ ]

$N$  – počet částic [–]

$k$  – Boltzmannova konstanta [ $JK^{-1}$ ]

$T$  – teplota [ $K$ ]

$n$  – látkové množství [ $mol$ ]

$R$  – molární plynová konstanta  $R = N_A k$  [ $JK^{-1}mol^{-1}$ ]

Stavová rovnice pro reálné plyny:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right) * (V_m - b) = RT \quad (6.6)$$

Kde:

a,b – konstanty závislé na druhu plynu

$V_m$  – molární objem [ $m^3 mol^{-1}$ ]

Aby bylo možné soustavu rovnic řešit, je nutné znát okrajové podmínky systému.

### 6.3.4 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny. Pro ideální kapaliny ji můžeme vyjádřit takto:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (6.7)$$

Kde:

$h_1, h_2$  – polohové výšky částice [ $m$ ]

$p_1, p_2$  – tlaky [ $Pa$ ]

$u_1, u_2$  – bodové rychlosti [ $ms^{-1}$ ]

$\rho$  – hustota proudící tekutiny [ $kgm^{-3}$ ]

$g$  – gravitační zrychlení [ $ms^{-2}$ ]

Upravená rovnice pro reálné kapaliny:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_z \quad (6.8)$$

Kde:

$v$  – průřezová rychlost [ $ms^{-1}$ ]

$\alpha$  – Coriolisovo číslo

$h_z$  – Ztrátový činitel tepla

Coriolisovo číslo kompenzuje nerovnoměrné rozdělení rychlostí v profilu. Součtem všech energií, kinetické, tlakové a polohové je celková mechanická energie kapaliny, která je v každém průřezu jedné a téže trubice konstantní.

### 6.3.5 Navierova – Stockeova rovnice

Rovnováha sil při proudění skutečné tekutiny je vyjádřena Navierovými-Stokesovými rovnicemi.

$$\underbrace{\frac{\delta(\rho v_i)}{\delta t} + v_j \frac{\delta(\rho v_i)}{\delta x_j}}_1 = - \underbrace{\frac{\delta p}{\delta x_i}}_2 + \underbrace{\eta \frac{\delta^2 v_i}{\delta x_j^2} + \eta \frac{1}{3} \frac{\delta}{\delta x_i} \left( \frac{\delta v_j}{\delta x_j} \right)}_3 + \underbrace{\rho a_i}_4 + \underbrace{F_i}_5 \quad (6.9)$$

Síly působící na elementární objem při proudění skutečné tekutiny:

1. setrvačné síly

Plošné síly:

2. tlakové síly

3. viskózní síly

Hmotnostní a objemové síly:

4. gravitační síla

5. odstředivé, elektromagnetické a další síly

Kde:

$\rho$  – hustota proudící tekutiny [ $kgm^{-3}$ ]

$t$  – čas [ $s$ ]

$v$  – rychlost [ $ms^{-1}$ ]

$p$  – tlak [ $Pa$ ]

$x$  – dráha [ $m$ ]

$\eta$  – dynamická viskozita [ $Nsm^{-2}$ ]

$a$  – zrychlení [ $ms^{-2}$ ]

$F$  – síla [ $N$ ]

Indexy  $i$  a  $j$  jsou složky jednotlivých směrů os (x,y,z) [11] [2]



## 7 POUŽITÝ SOFTWARE

Práce se zabývá Analýzou tvaru sacích kanálů diferenciálně čerpané komory, přesněji řečeno problematikou rozevření kužele, ale i tvarováním dílčích částí komory od clonek až po výstupní odsávací trubici. Dále se zabývá změnami výsledného tlaku v oblasti průchodu primárního svazku elektronů diferenciálně čerpanou komorou pro environmentální rastrovací elektronový mikroskop. Model konstrukce diferenciálně čerpané komory je vytvořen v programu SolidWorks, simulace budou provedeny v programu ANSYS Fluent.

### 7.1 SolidWorks

SolidWorks je program sloužící pro 3D modelování. Je postaven na základech systému Parasolid®, který umožňuje vytváření složitých sestav a automatické generování výkresu jednotlivých částí i celých sestav. Jedna z předností programu SolidWorks spočívá v intuitivním ovládní, jeho základy si tedy osvojíme relativně rychle. Další předností je dosažení dobrého výkonu i na zařízeních s běžným hardwarem.

Pro kreslení má k dispozici od základních až po specializované nástroje, například elementární nástroje ke konstrukci objemových těles a ploch, nástroje pro analýzu (vzdálenost, úkos, úhlová odchylka a další), produktivní nástroje (vytvoření pole, zrcadlení prvků, podpora přechodu ze 2D do 3D, knihovny materiálů a další). Program také obsahuje specializované typy nástrojů například pro plechové díly nebo svařování.

Program SolidWorks umožňuje pohodlné a rychlé tvoření složitých sestav pomocí jednotlivých dílů a funkce vazeb, modelování v sestavě a pokročilé kinematice. SolidWorks obsahuje integrované překladače pro všechny současné standardní formáty používané v oblasti CAD: SAT (ACIS), VDA-FS, VRML, STL, DWG, *DXF<sup>TM</sup>*, TIFF, JPG, PDF, Viewpoint a mnoha dalších. Modul pro inteligentní import (FeatureWorks) přiděluje modelům prvky, parametry a historii. Výkresy ve formátu AutoCAD se v SolidWorks využívají přímo včetně hladin, barev a typů čar. Stejně tak lze na výkresech SolidWorks bez převodu pokračovat v AutoCADu.[12]

SolidWorks nabízí tyto hlavní výhody:

- komplexní řešení pro strojírenský sektor, 3D design, hi-tech, architekturu, projekce, kreslení ve 3D atd.
- intuitivní, snadné a vizuálně přehledné ovládní postavené na Windows, nejlepší na trhu CAD systémů

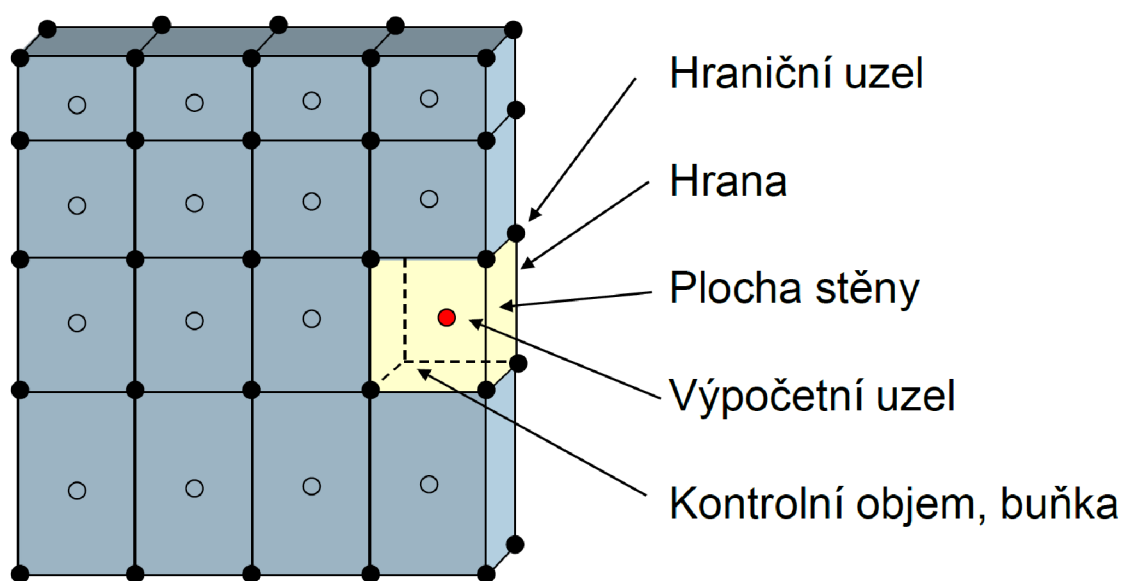
- 100% asociace mezi díly, sestavami a výkresy - všechna data jsou vždy správná a aktuální
- speciální technologie pro práci s velkými sestavami a zejména pro generování výkresů velkých sestav
- standardně velice vysoký výkon i na běžném hardwaru - pro SolidWorks
- kompletní česká lokalizace

## 7.2 ANSYS Fluent

Program Fluent slouží k analýzám a řešení problematiky přenosu tepla, proudění, spalování nebo chemickým reakcím. Obsahuje nástroje, jež umožňují vytvářet výpočetní oblasti na základě geometrických dat, která získávají z CAD systému. Ansys Fluent dokáže řešit úlohy s vnitřním a vnějším obtékáním nebo laminárním a turbulentním prouděním. Velkou výhodou je možnost osově symetrických 2D výpočtů, to znamená využít přímo 2D typy prvků a úlohu řešit s menším počtem rovnic. [13]

## 8 METODA KONEČNÝCH OBJEMŮ

Metoda konečných objemů vznikla začátkem 70. let, ale největší rozmach zaznamenala v 80. letech. Využívá se v mechanice tekutin, to znamená při pohybu materiálu přes pevně zadaný objem. Tato metoda pracuje na principu rozdělení výpočetní oblasti na konečný počet malých kontrolních objemů. Tyto oblasti se rozdělují pomocí sítě (grid, mesh). Využíváme základní rovnice (kontinuity, pohybové, energie, transportní a další), jež popisují spojité prostředí a jsou diskretizovány do soustavy algebraických rovnic. Pro dané kontrolní objemy použijeme integrální tvar rovnic, ve kterých vhodným způsobem aproximujeme jednotlivé členy.



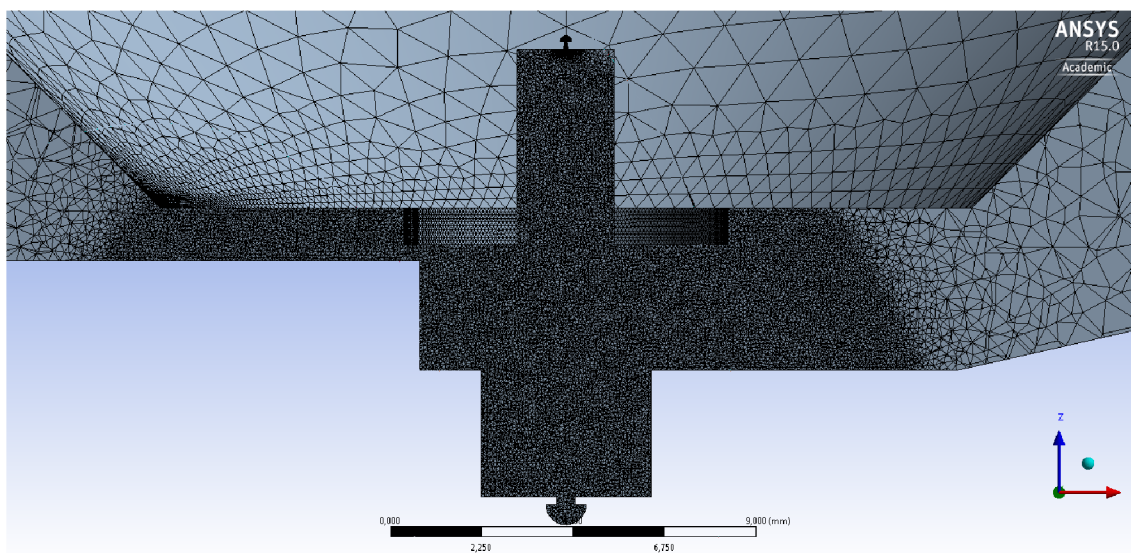
Obr. 8.1: Princip výpočetní sítě [14]

Ve středu kontrolních objemů jsou hodnoty složek rychlosti a skalárních veličin, hodnoty na hranicích kontrolního objemu se získávají interpolací. Tok přes hranice kontrolního objemu je integrálním součtem přes čtyři nebo šest ploch tohoto objemu. Systém pracuje s vnitřním objemem prvku a výsledek je přenesen přes jeho stěnu. [14]

## 9 VÝPOČETNÍ SÍŤ

Při použití metody konečných objemů je řešený objekt rozdělen sítí na konečný počet objemů. Sítí tedy rozdělí výpočetní oblast na vzájemně navazující buňky. Vytvořená sítí má zásadní vliv na rychlost konvergence, přesnost výpočtu a časovou náročnost výpočtů. Kvalitní sítí musí mít správnou hustotu a v oblasti mezních vrstev u pevných stěn musí být zhuštěná. Nastavení sítí je tedy velice důležité a nelze jej podceňovat. Na obrázku 9.1 je znázorněna výpočetní sítí. Rozdělením výpočetní oblasti na konečný počet objemů dojde k přeměnění oblasti spojité na oblast diskrétní. Diskrétní oblast je taková oblast, kde se nachází systém diskrétních bodů, které obsahují fyzikální parametry popisující stav či vlastnosti daného objemu. Prostor je rozdělen základní sítí (největší čtverce). V místech kde je předpoklad složitějšího proudění, případně oblast, která nás extrémně zajímá, je třeba adekvátně zjemnit sítí.

Zjemněním sítí se do určité míry zjemnění dosahuje přesnějších výsledků. Zjemnění lze nastavit až do devátého stupně. Pravidlo čím jemnější sítí, tím přesnější výsledek platí do určité úrovně, poté i při dalším zjemňování zůstává výsledek stejný, je tedy nutné mít sítí nastavenou právě do této míry jemnosti. Platí, že čím jemnější sítí nastavíme, tím je výpočet delší.



Obr. 9.1: Příklad nastavení sítí

Pro každou buňku se vypočítá numerickými metodami diferenciální rovnice. Hodnota je vypočtena pro výpočetní uzel, který se nachází ve středu buňky. Hodnoty na stěnách buňky se získávají interpolací vypočtených hodnot.

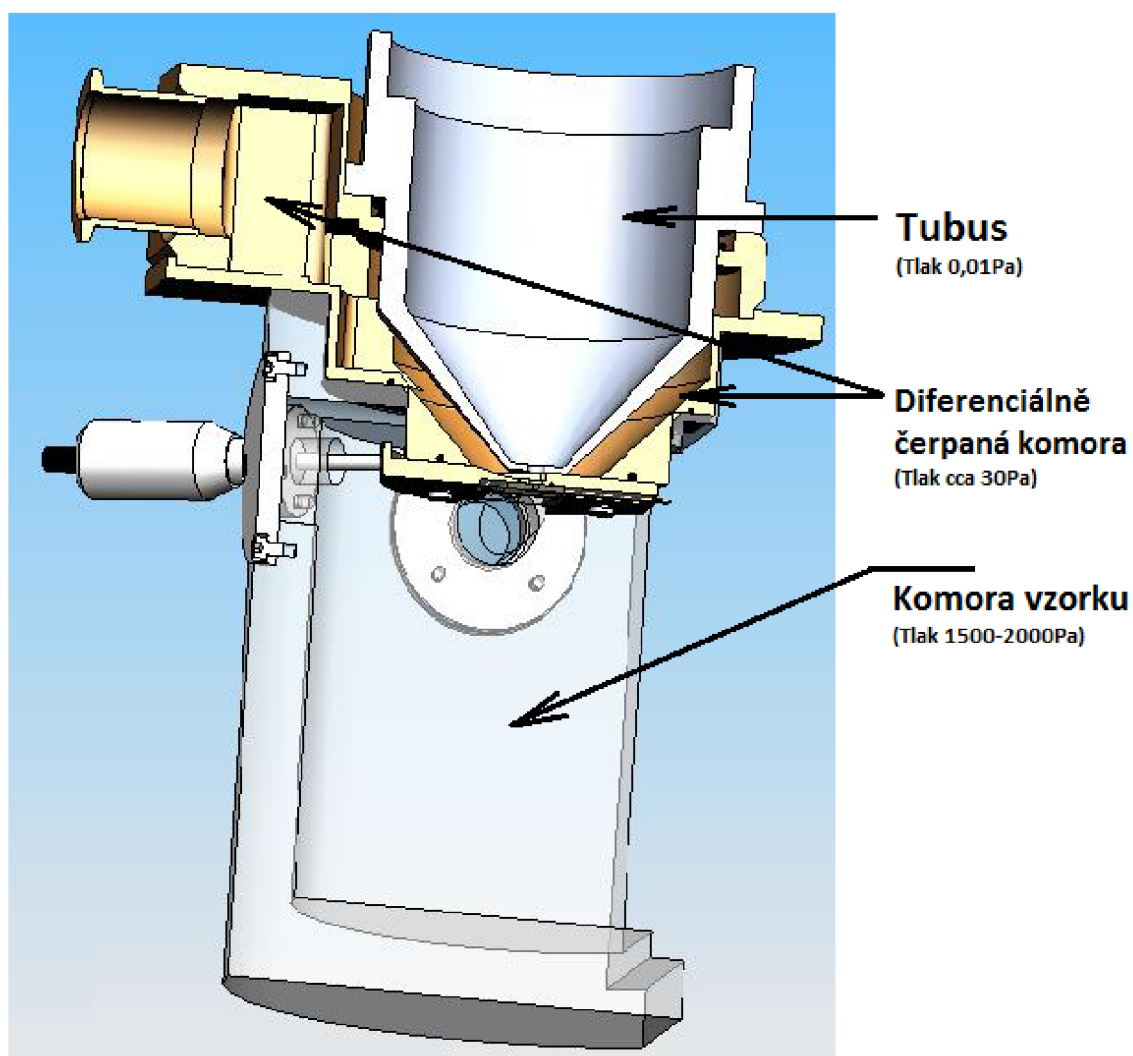
Možnosti interpolací:

- Protiproudá interpolace 1. řádu – Předpokládá se, že hodnota na stěně je rovna hodnotě v centru buňky ležící vlevo (proti proudu).
- Protiproudá interpolace 2. řádu – Určuje hodnotu na stěně z hodnot v centrech dvou buněk ležící vlevo (proti proudu).
- Centrální diference - Určuje hodnotu na stěně pomocí lineární interpolace mezi hodnotami ve středu sousedících buněk.
- Protiproudá kvadratická interpolace - Kvadratická křivka je aproximována ze dvou uzlů ležících proti proudu a jednoho uzlu, který leží po proudu.

## 10 POPIS PROBLEMATIKY NÁVRHU

Práce se zabývá problematikou tvaru diferenciálně čerpané komory pro enviromentální rastrovací mikroskop. Úkolem je vytvořit konstrukci diferenciálně čerpané komory, kde je v dráze letících elektronů, co nejnižší tlak a hustota plynu. Tak, aby docházelo k co nejmenšímu počtu srážek elektronů s molekulami plynu a tedy jejich rozptylu.

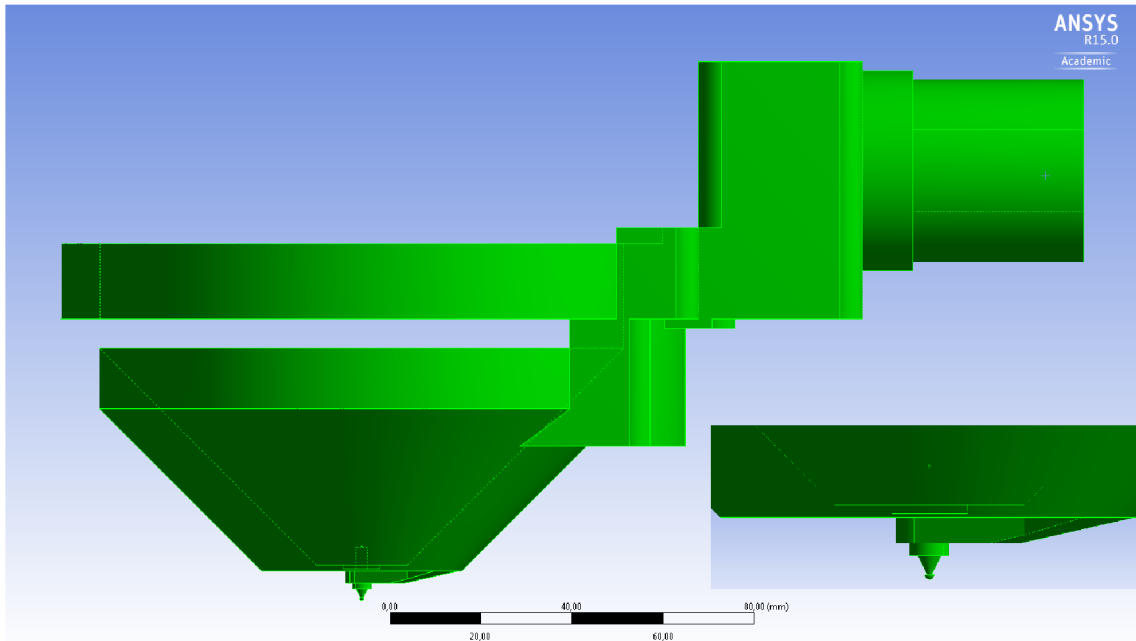
Na obrázku 10.1 je řez části mikroskopu s popisem jednotlivých částí. Návrh řeší tedy problematiku elektronového svazku, který nemůže procházet plynným prostředím, kde dochází ke srážkám s molekulami vzduchu, jež elektrony rozptylují. Proto je část tubusu s tlakem  $0,01Pa$  oddělená diferenciálně čerpanou komorou s tlakem  $30Pa$  od komory vzorku s tlakem až  $2000Pa$  [5].



Obr. 10.1: Řez modelem elektronového mikroskopu AQUASEM II [5]

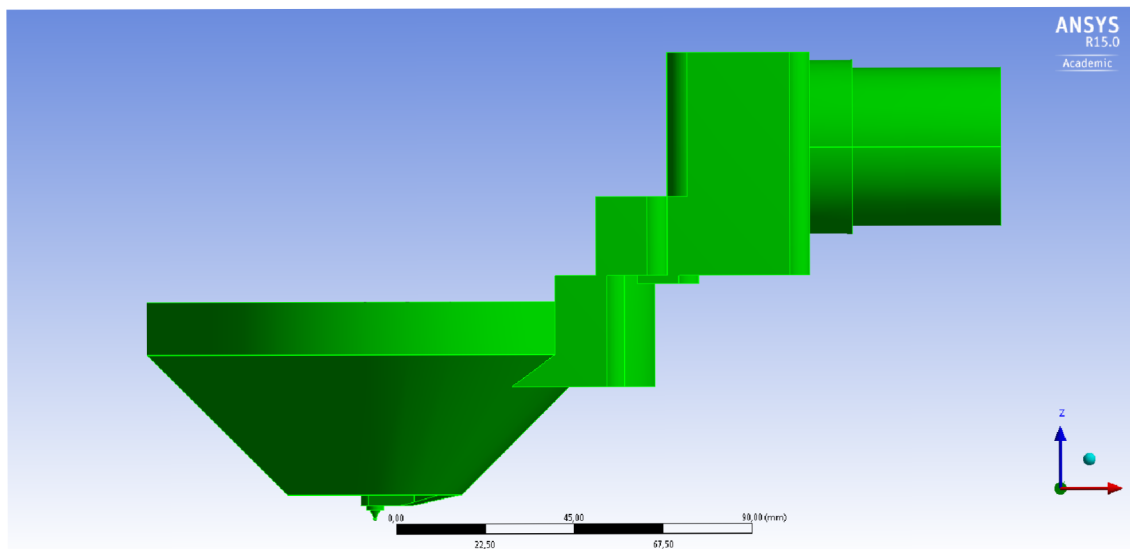
## 11 POPIS KONCEPCÍ

V této kapitole je souhrn tvarů koncepcí diferenciálně čerpané komory, které byly simulovány. Na obrázku 11.1 je model se stávajícím tvarem komory, který nám poslouží jako vzor při vyhodnocování výsledků zbylých simulací.

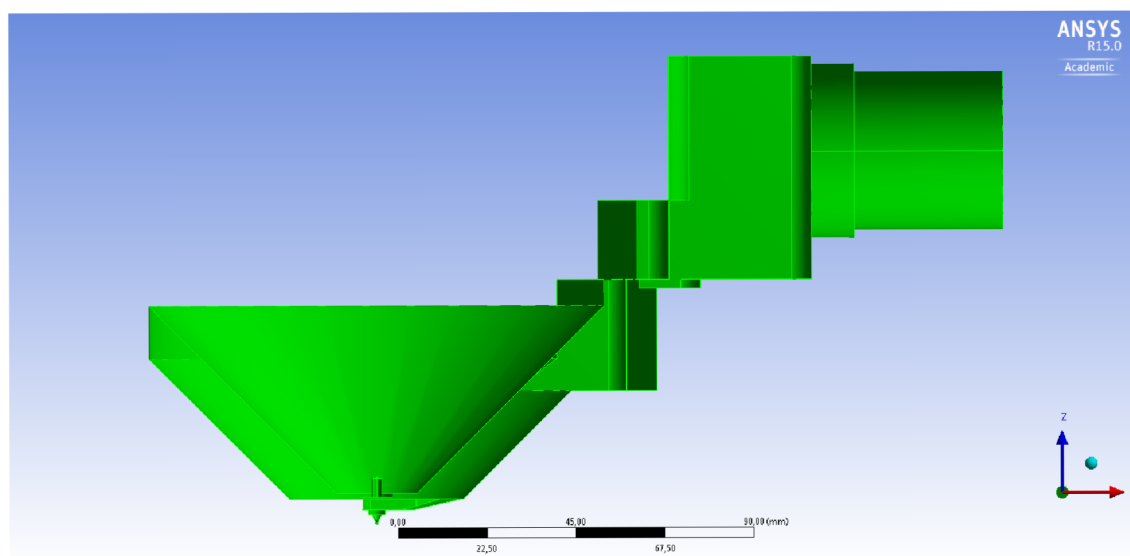


Obr. 11.1: Stávající model diferenciálně čerpané komory

Návrh druhé koncepce, obrázek 11.2 se konstrukčně liší od první koncepce odebráním prstence v horní části diferenciálně čerpané komory. Na následujícím obrázku 11.3 je pak zobrazen řez touto koncepcí.



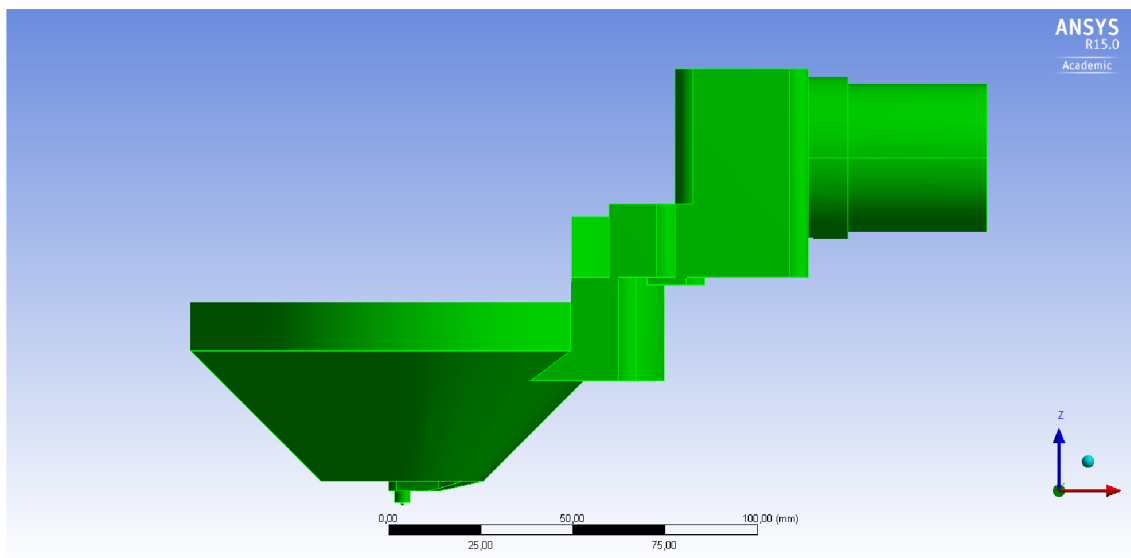
Obr. 11.2: Návrh druhé koncepce bez prstence



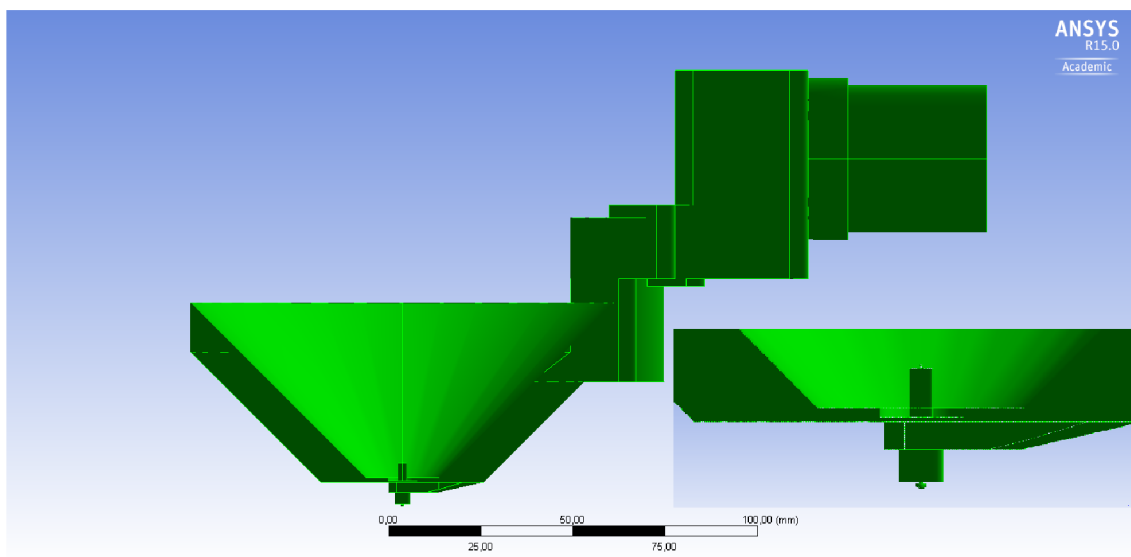
Obr. 11.3: Návrh druhé koncepce bez prstence v řezu



Třetí koncepce 11.4 má mezi clonkami komor valcový tvar. Detailněji je tento tvar zobrazen na obrázku 11.5.

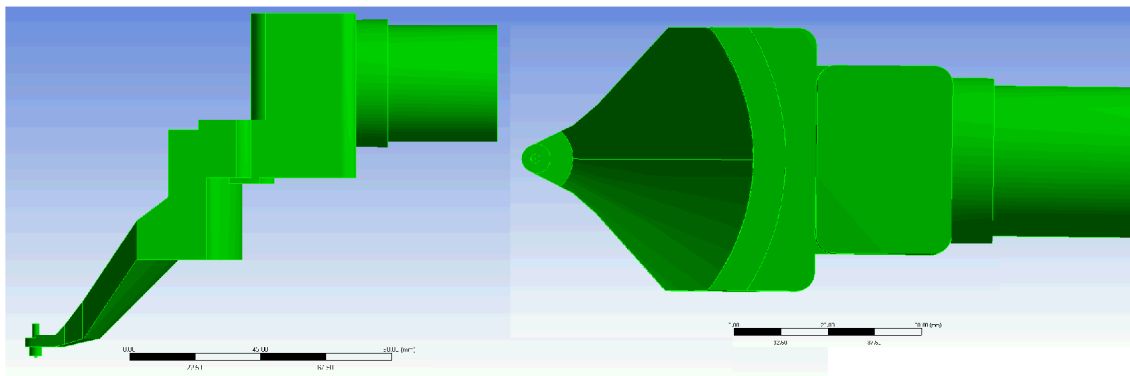


Obr. 11.4: Návrh třetí koncepce válcového tvaru

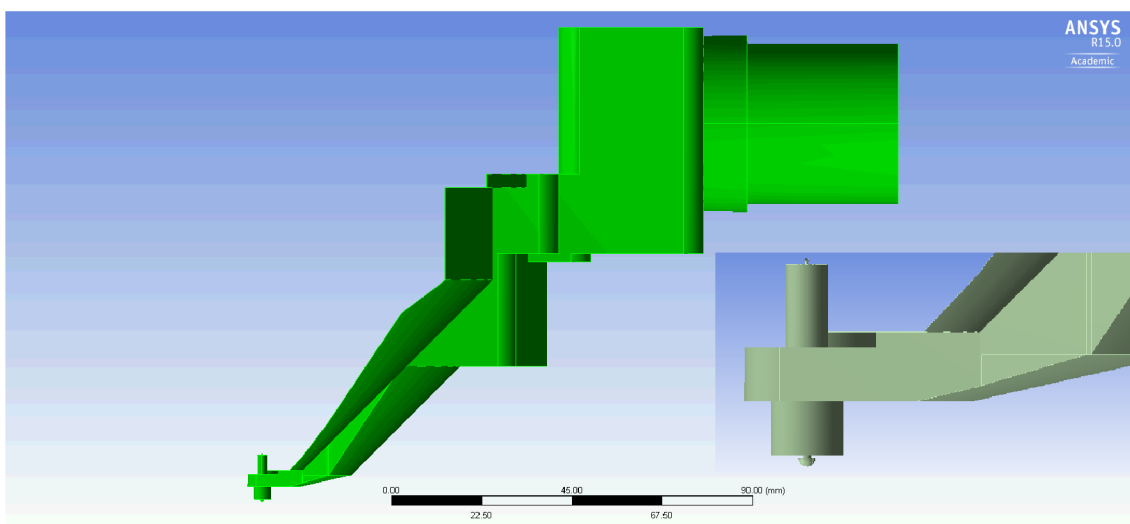


Obr. 11.5: Návrh třetí koncepce válcového tvaru v řezu - detail

Konstrukční provedení čtvrté varianty 11.6 se opírá o válcový tvar z předchozí verze s tím rozdílem, že diferenciálně čerpaná komora byla značně zmenšená a vytvarována směrem k výstupu. Řez touto konstrukcí je zobrazen na obrázku 11.7.

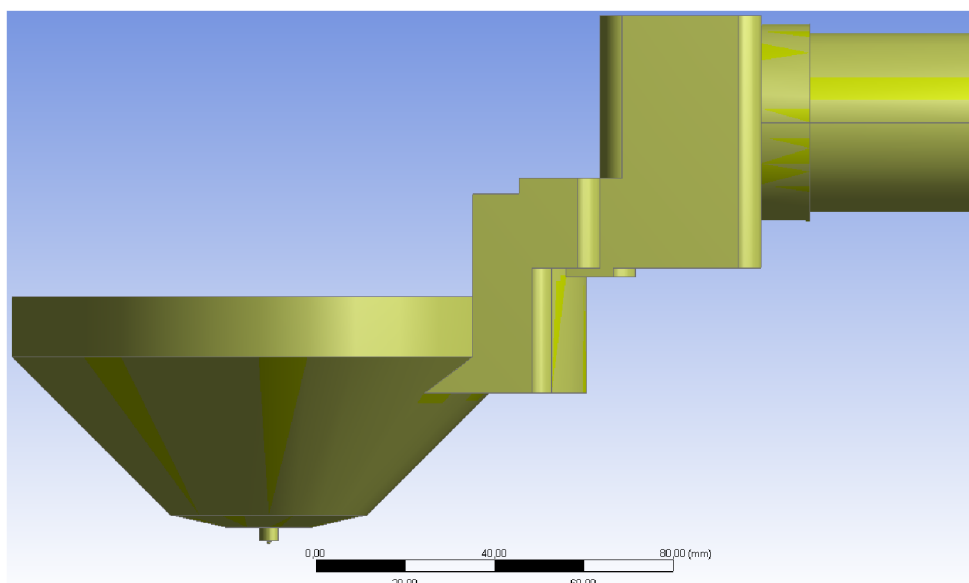


Obr. 11.6: Návrh čtvrté koncepce válcového tvaru zúženého k výstupu, v pravé části obrázku pohled na komoru shora

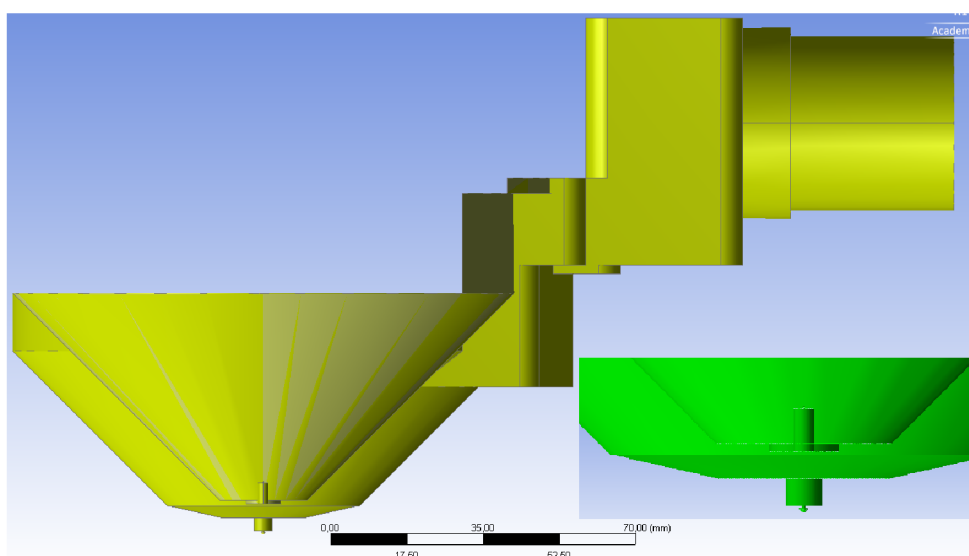


Obr. 11.7: Návrh čtvrté koncepce válcového tvaru zúženého k výstupu - detail

Pátá varianta 11.8 by se dala nazvat opakem varianty čtvrté, kdy je tvar komory v dolní části co nejvíce rozšířen, jak je patrné z detailního pohledu 11.9.

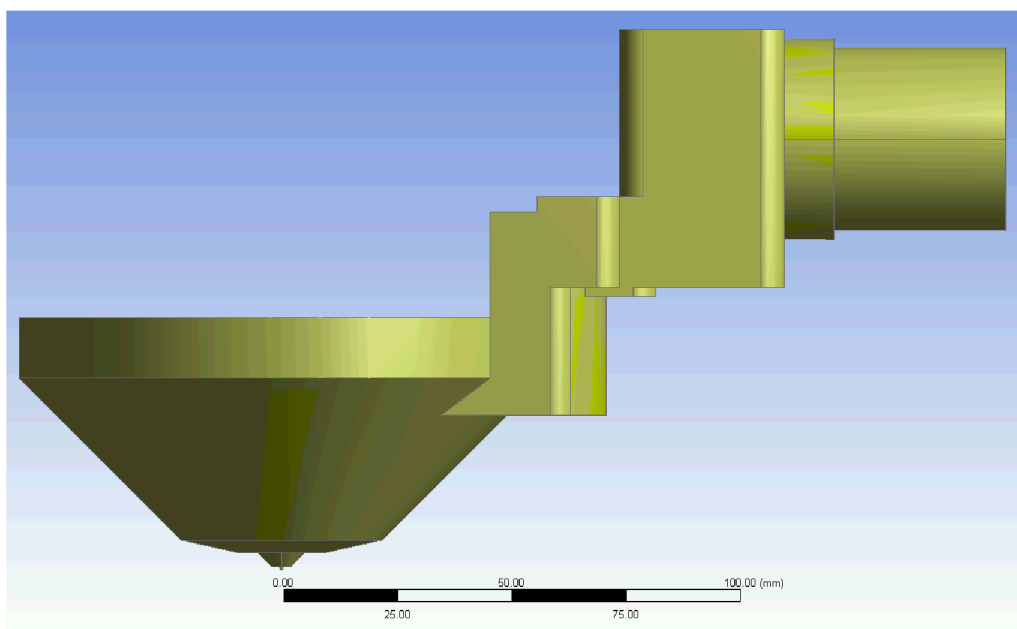


Obr. 11.8: Návrh páté koncepce rozšířeného válcového tvaru

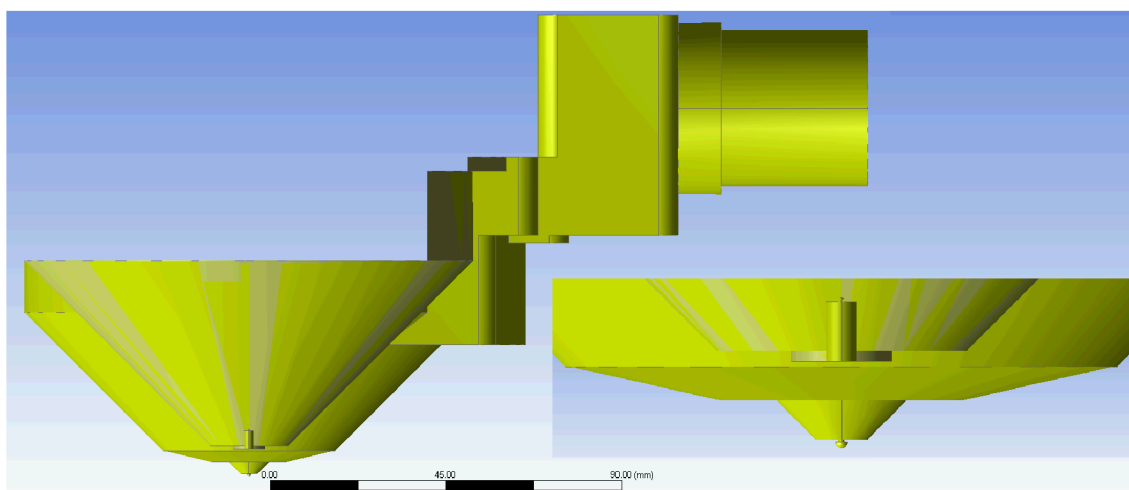


Obr. 11.9: Návrh páté koncepce rozšířeného válcového tvaru - detail

Šestá koncepce 11.10 vychází z páté varianty rozšířeného tvaru, vylepšeného o rozevření válce v oblasti clonky PLA1, která je mezi diferenciálně čerpanou komorou a komorou vzorku pod úhlem  $45^\circ$ , jak vidíme na obrázku 11.11. Větší rozšíření v této oblasti už není možné z důvodu omezení geometrie současné koncepce mikroskopu.



Obr. 11.10: Návrh šesté koncepce rozevřeného válce



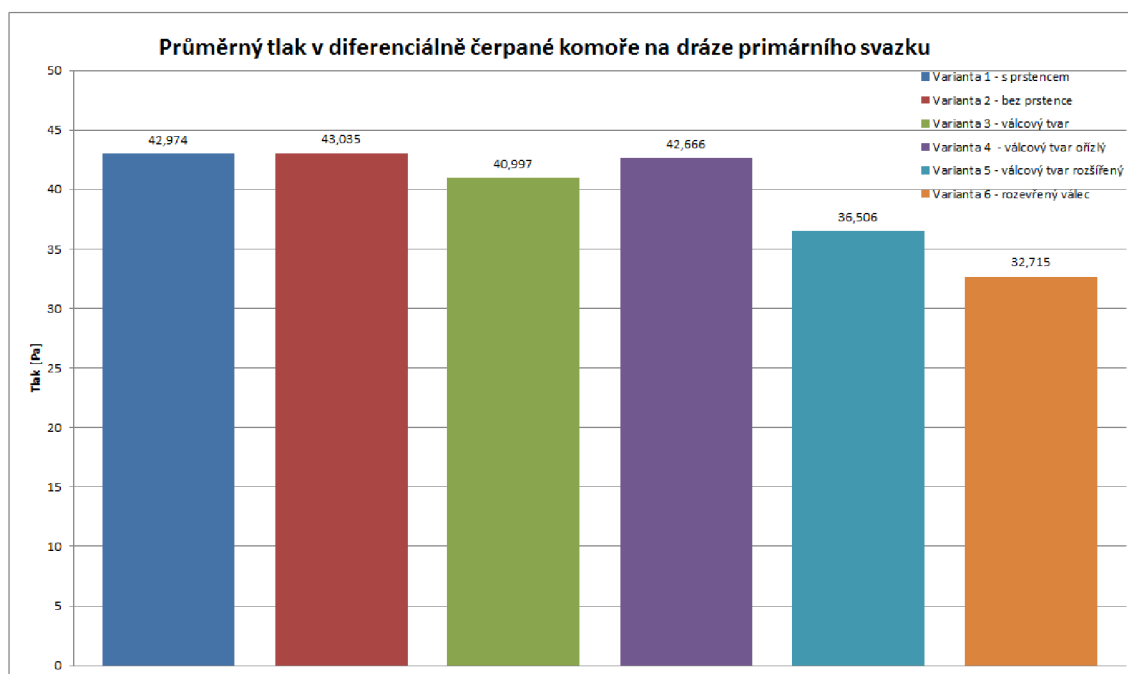
Obr. 11.11: Návrh šesté koncepce rozevřeného válce - detail

## 12 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ KONCEPCÍ

Tato kapitola se zabývá vyhodnocením všech koncepcí a jejich vzájemným porovnáním. Výsledky hodnotíme pomocí dvou kritérií. Prvním kritériem je hodnota tlaku v dráze primárního svazku v diferenciálně čerpané komoře, poněvadž platí, že čím nižší tlak, tím menší pravděpodobnost srážky elektronu s molekulami vzduchu. Druhým kritériem je průběh rychlosti a její průměrná hodnota na dráze primárního svazku procházejícího komorou.

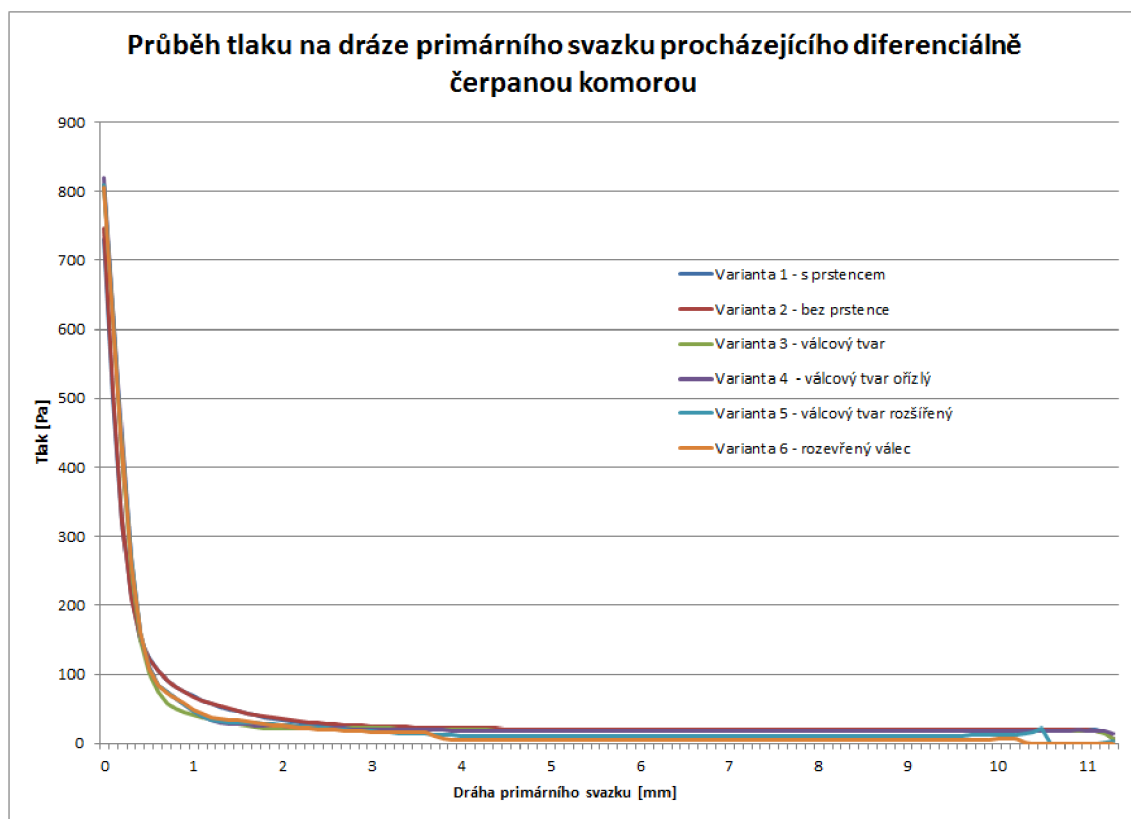
### 12.1 Vyhodnocení tlaku

Všechny varianty jsou vzájemně porovnány v grafu 12.1, na kterém je vyneseno průměrné tlak na dráze primárního svazku. Z výsledků je zřejmé, že nejnižší hodnoty průměrného tlaku vykazují koncepce, které jsou válcového tvaru. Jako nejlepší varianta vyšla varianta šestá, jež vychází z páté varianty rozšířeného tvaru, vylepšená o rozevření válce pod úhlem  $45^\circ$  v oblasti clonky PLA1, která je mezi diferenciálně čerpanou komorou a komorou vzorku. Důvod spočívá v tom, že v této oblasti dochází k nadzvukovému proudění plynu, které způsobuje v tomto prostoru vznik nižšího tlaku. Průměrný tlak dosáhl hodnoty 32,7 Pa, to znamená zhruba o 10 Pa nižší, než v první variantě zobrazující stávající koncepci.



Obr. 12.1: Průměrný tlak v diferenciálně čerpané komoře na dráze primárního svazku

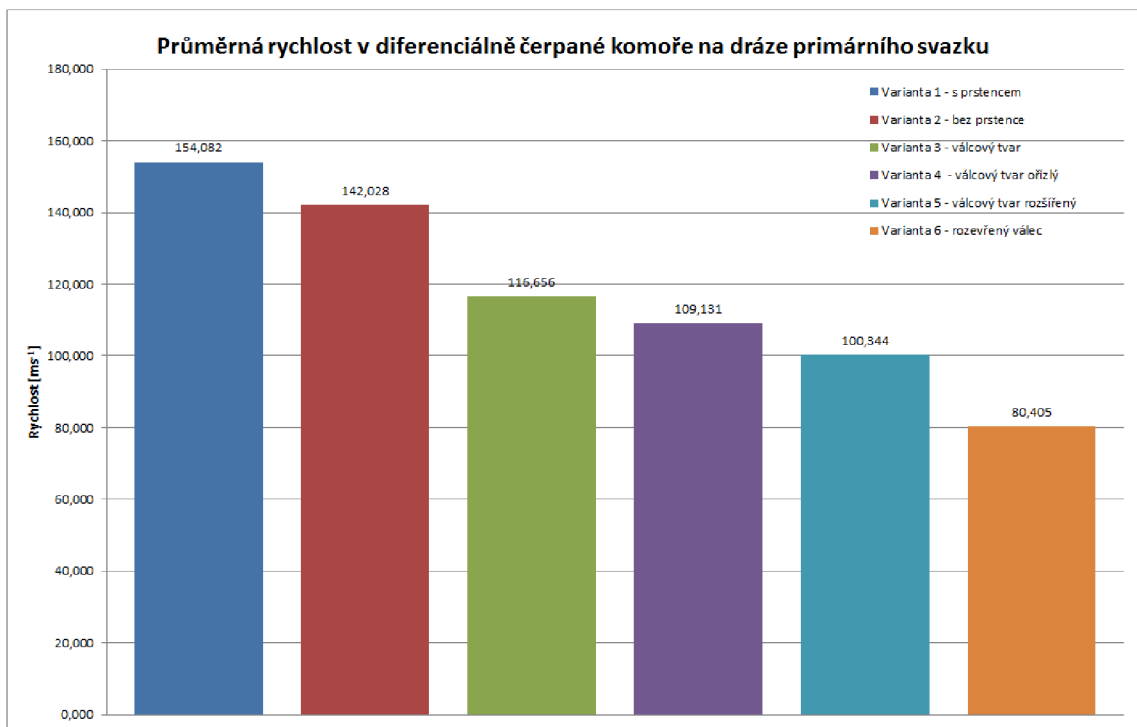
V grafu 12.2 je zobrazen průběh tlaku na dráze primárního svazku procházejícího diferenciálně čerpanou komorou, kde je patrné, že u variant s válcovým tvarem, jenž je rozšiřován, dochází k tlakovému spádu k nižším hodnotám, než ve zbylých variantách.



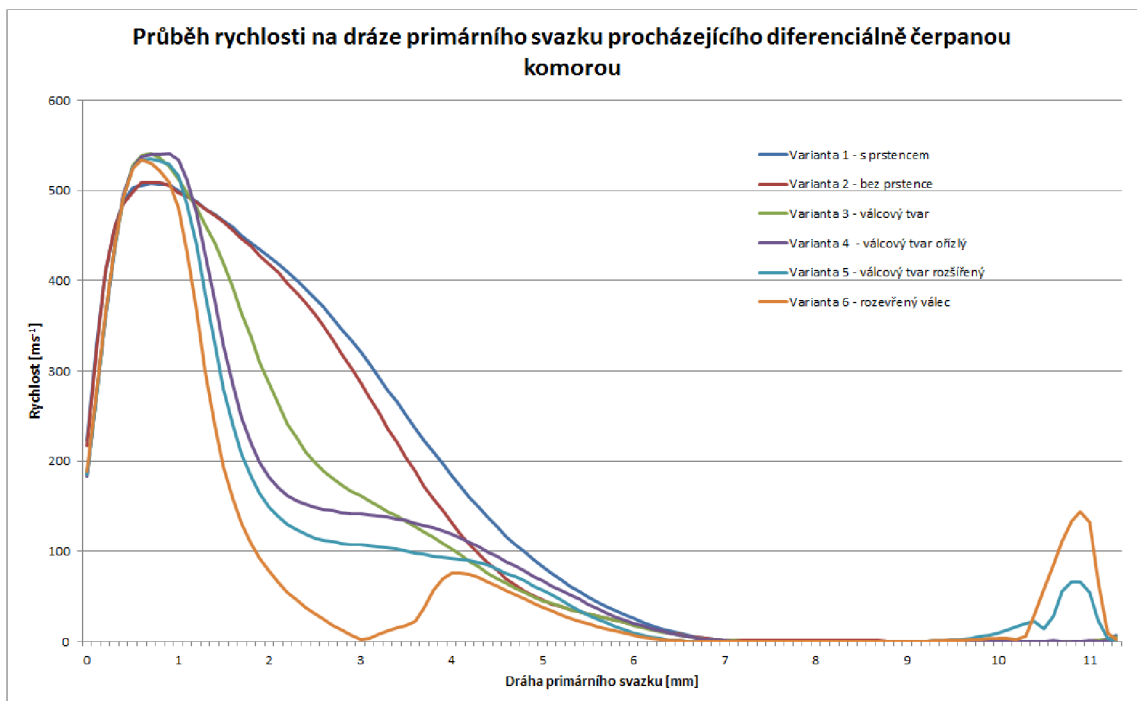
Obr. 12.2: Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházejícího diferenciálně čerpanou komorou

## 12.2 Vyhodnocení rychlosti

Jak bylo zmíněno na začátku kapitoly, druhým posuzovaným kritériem je průběh rychlosti a její průměrná hodnota na dráze primárního svazku. V grafu 12.3 ze zobrazené průměrné rychlosti je patrné, že čím více rozevřená varianta je, tím nižší hodnota průměrného tlaku byla dosažena. O proti první variantě současné koncepce komory vykazuje varianta šestá (rozevřený válec) skoro o polovinu nižší průměrnou rychlost. Na dalším grafu 12.4 je zobrazen průběh rychlosti na dráze primárního svazku. Zde si můžeme všimnout rozdílu v ustalování rychlostí u první dvojice variant a v ustálení rychlostí u variant rozšířeného válce. Je patrné, že čím je varianta více rozšířená, tím dříve dojde ke snižování rychlosti.



Obr. 12.3: Průměrná rychlost v diferenciálně čerpané komoře na dráze primárního svazku

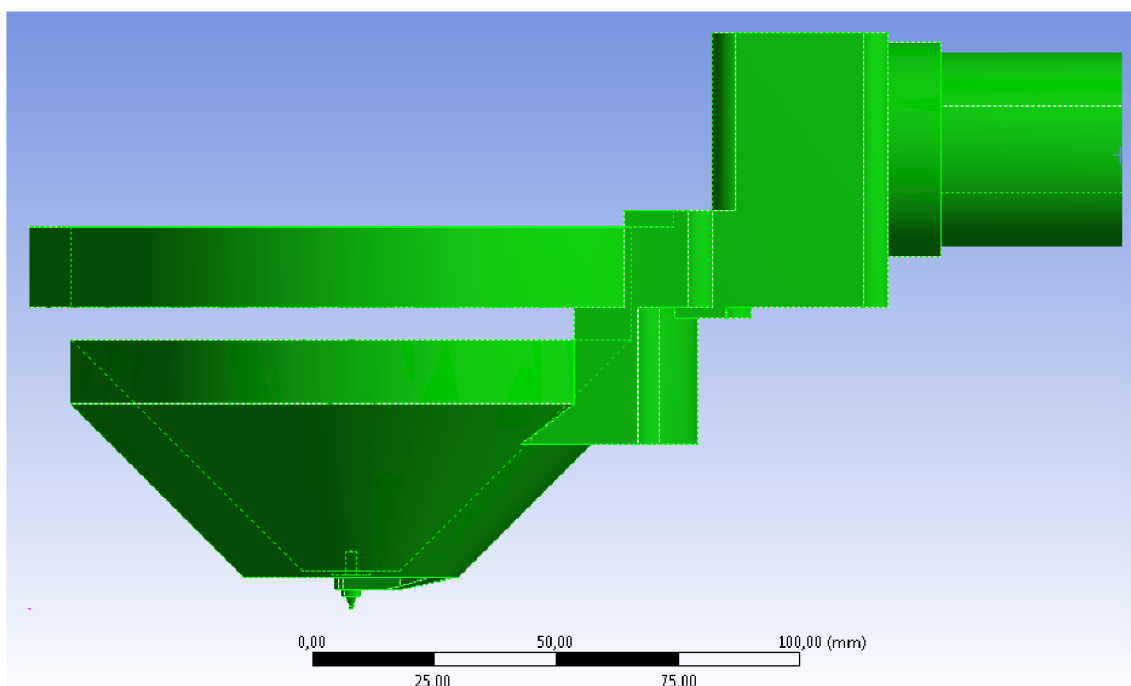


Obr. 12.4: Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházejícího diferenciálně čerpanou komorou

## 13 VÝSLEDKY NAVRHOVANÝCH KONCEPCÍ

### 13.1 Návrh první koncepce

Při hledání optimálního návrhu konstrukce bylo důležité přizpůsobit se rozměrově a tvarově omezením, která vycházela ze stávající konstrukce diferenciálně čerpané komory. Na obrázku 13.1 je zobrazen model stávající konstrukce komory. Tento model poslouží jako vzor, se kterým budou nové koncepty porovnávány.



Obr. 13.1: Stávající model diferenciálně čerpané komory

#### 13.1.1 Počáteční podmínky

Jako počáteční podmínky byly nastaveny hodnoty tlaku v prostoru simulace. Hodnoty tlaku jsou rovny tlaku, jenž je na okrajové podmínce, simulující tlak v komoře vzorku. Počáteční podmínky byly pro všechny simulace nastaveny stejně a nejsou pro to uváděny jednotlivě u každé simulace.

#### 13.1.2 Nastavení sítě

Základ pro správný výpočet simulace představuje správně nastavená síť.

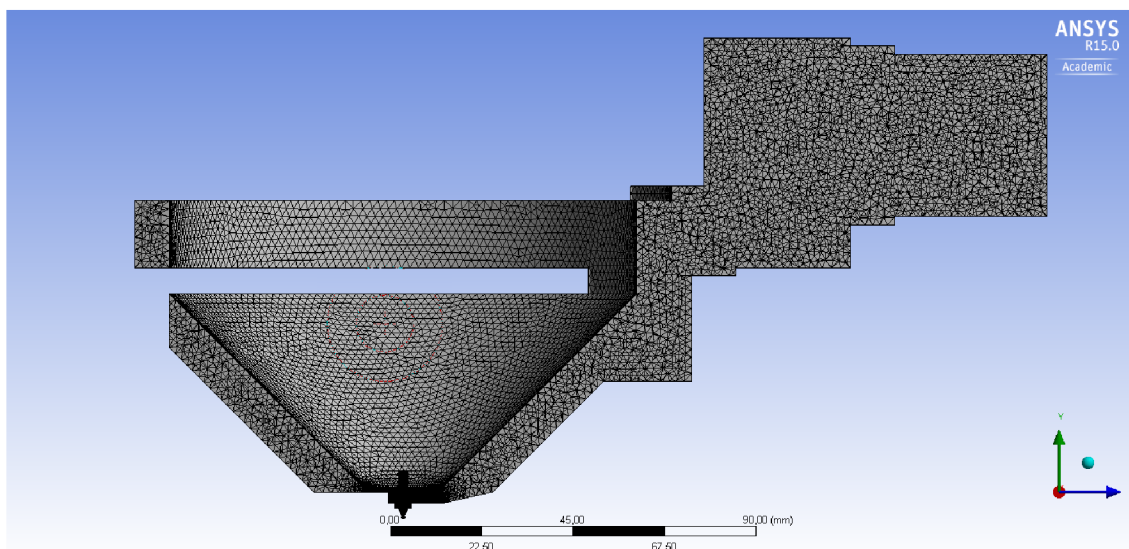
Nastavení sítě v ANSYSU:

- *Body Sizing* na celé těleso s nastavením velikosti prvku  $2mm$ .

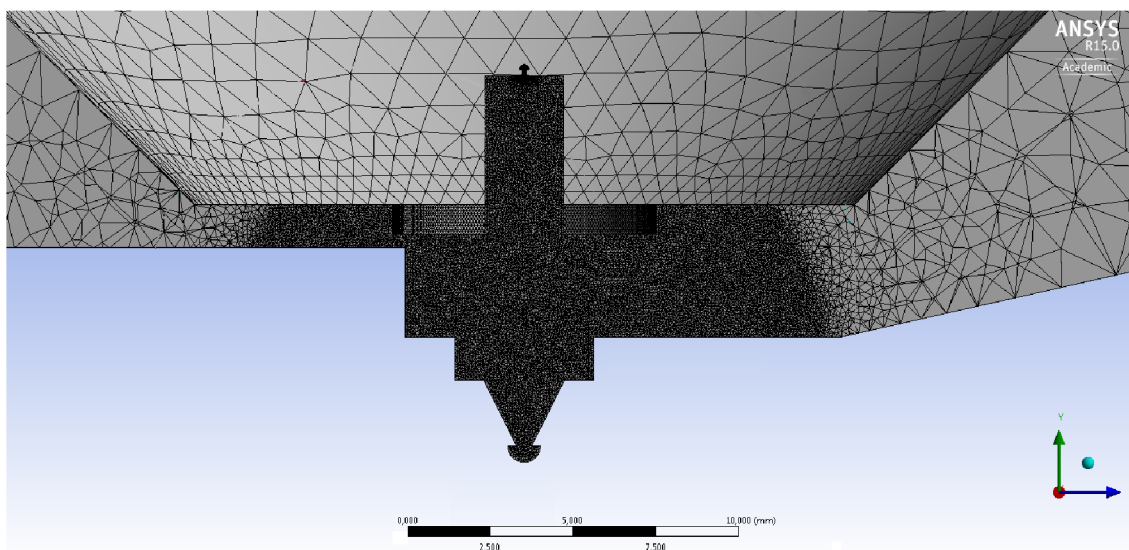


- Pro clonku mezi diferenciálně čerpanou komorou a tubusem PLA 2 s nastavením *Sphere radius: 0.21mm* a velikostí prvku: *0.02mm*.
- Pro clonku PLA 1 mezi diferenciálně čerpanou komorou a komorou vzorku s nastavením *Sphere radius: 9mm* a velikostí prvku: *0.1mm*.

Nastavení sítě je zobrazeno na obrázku 13.2 v detailnějším pohledu, dále na obrázku 13.3, kde vidíme oblast clonek. Zde je síť velmi jemná z důvodu nadzvukového proudění, kde je průchod primárního svazku elektronů.



Obr. 13.2: Nastavená síť u stávající konstrukce



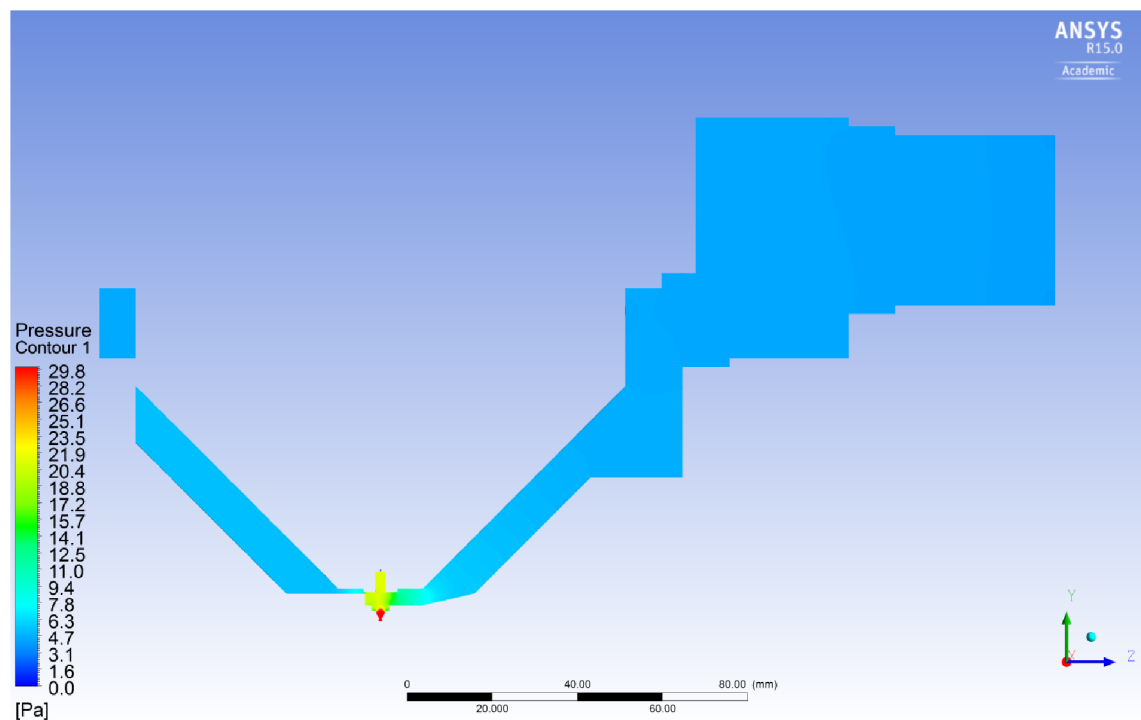
Obr. 13.3: Nastavená síť u stávající konstrukce - detail na oblast clonek

### 13.1.3 Výpočty

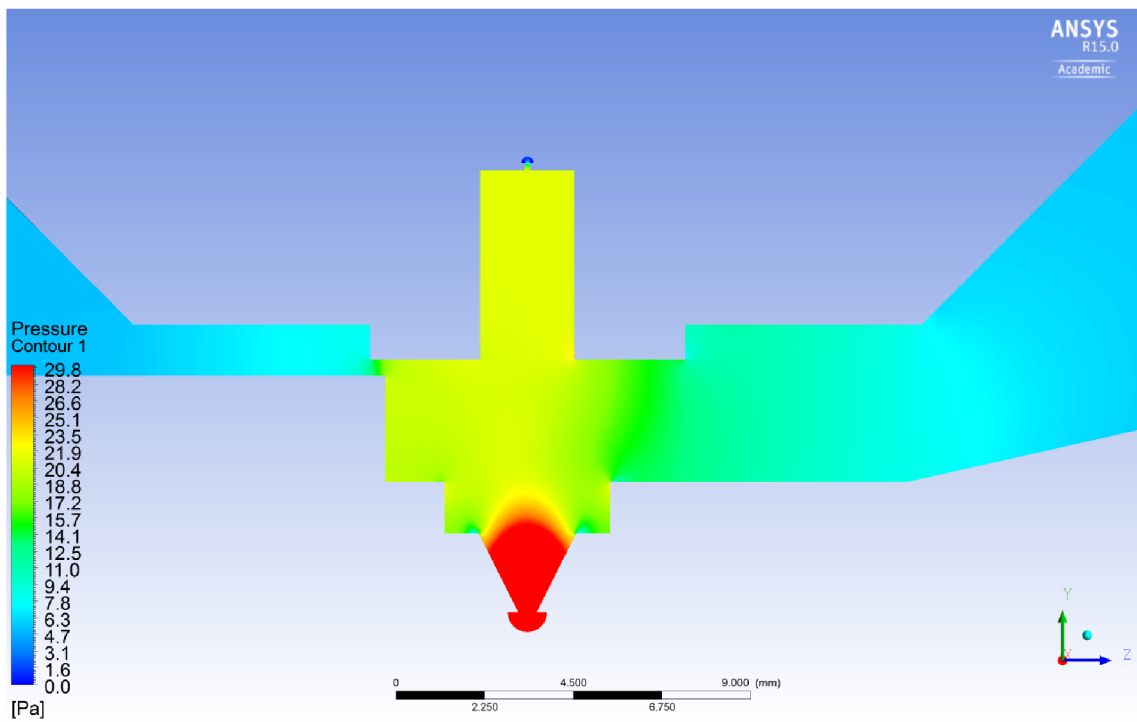
Z výpočtů byly vyhodnocovány tyto veličiny:

- Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.
- Průběh rychlosti (Machova čísla) na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.
- Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře.
- Rozložení rychlosti v diferenciálně čerpané komoře.
- Vznik turbulencí v diferenciálně čerpané komoře.

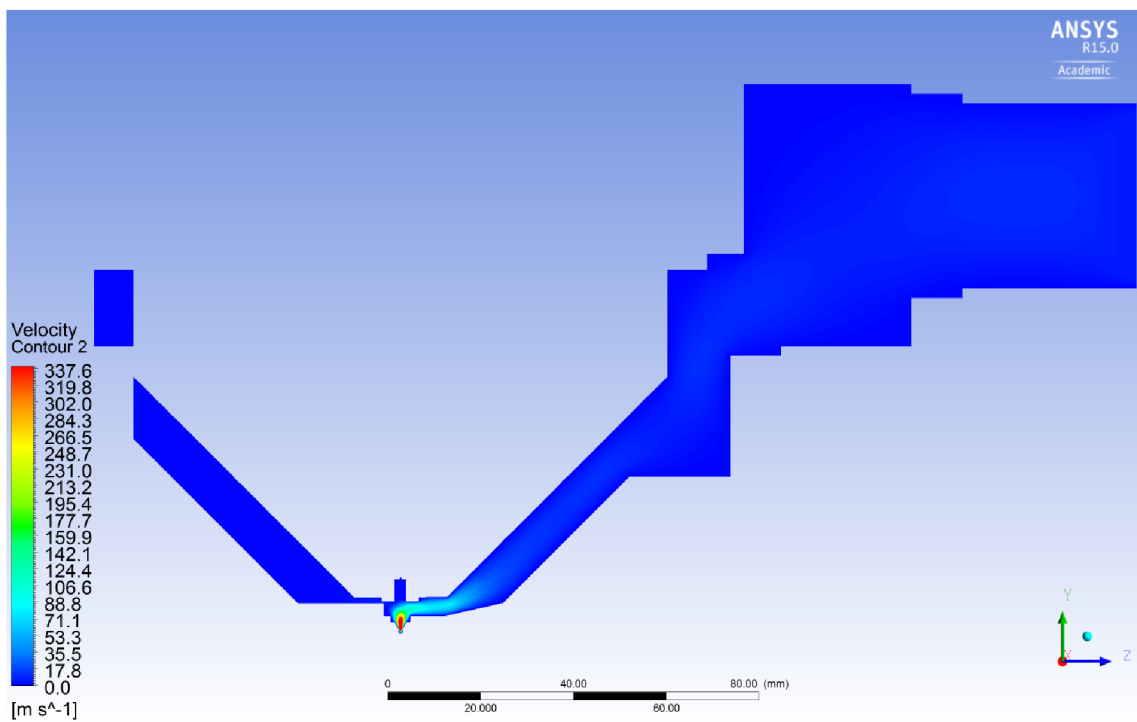
Sledováno bylo okolí elektronového paprsku.



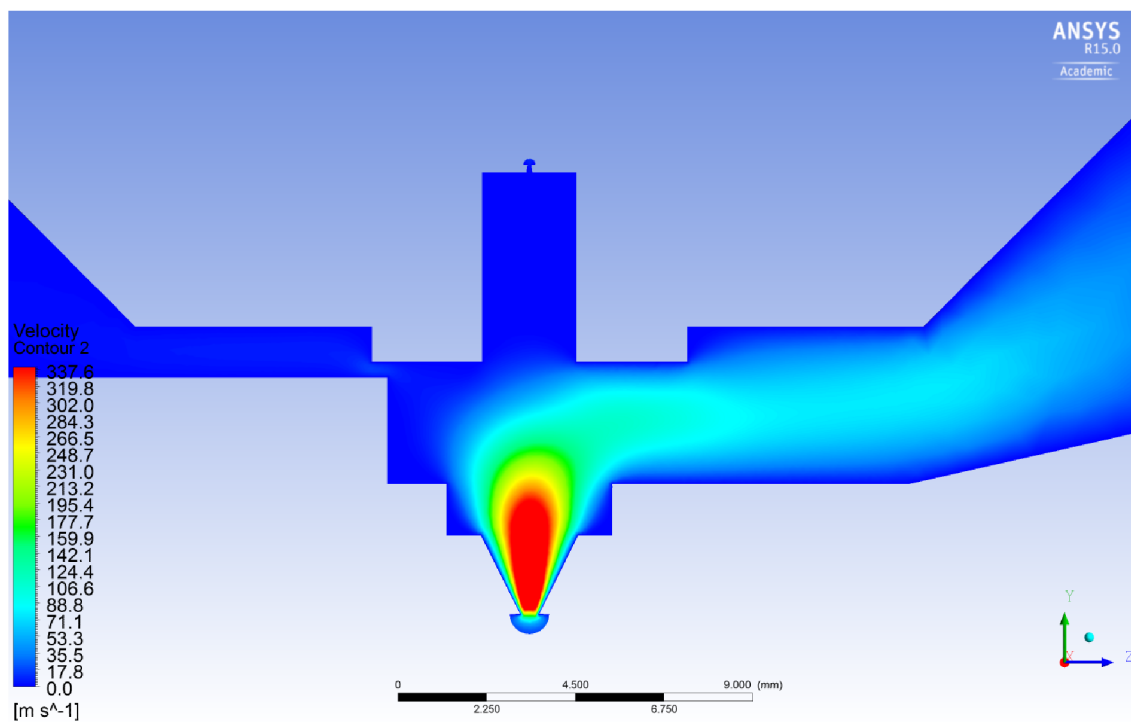
Obr. 13.4: Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře



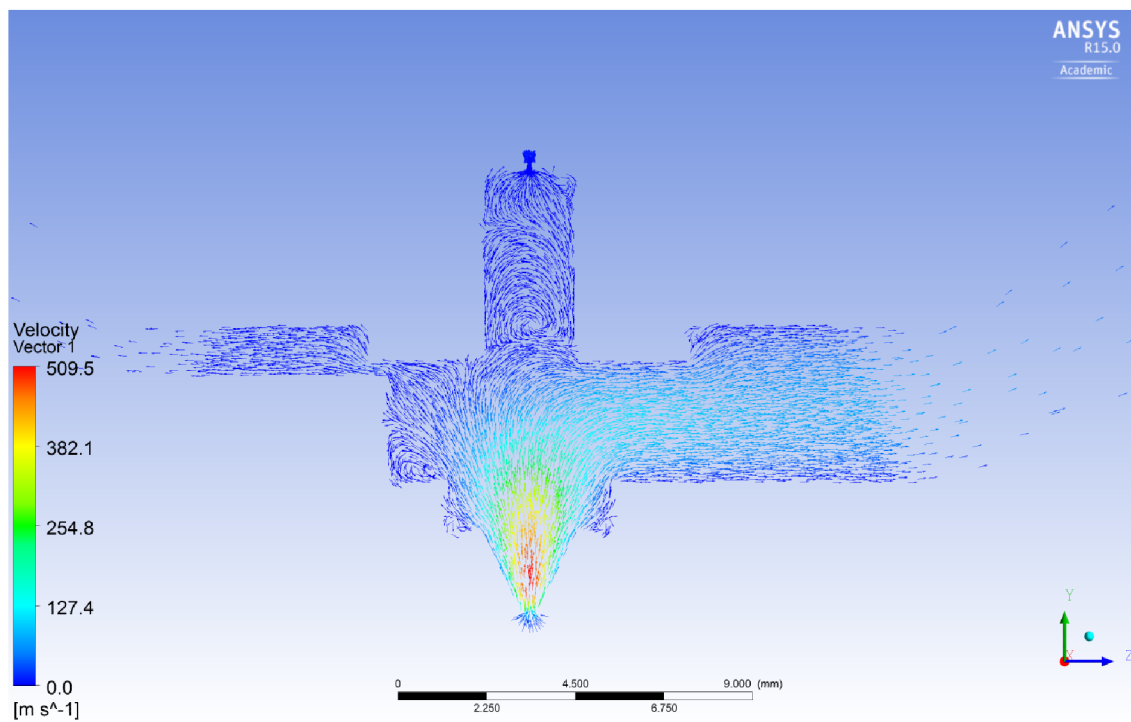
Obr. 13.5: Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře - Detail



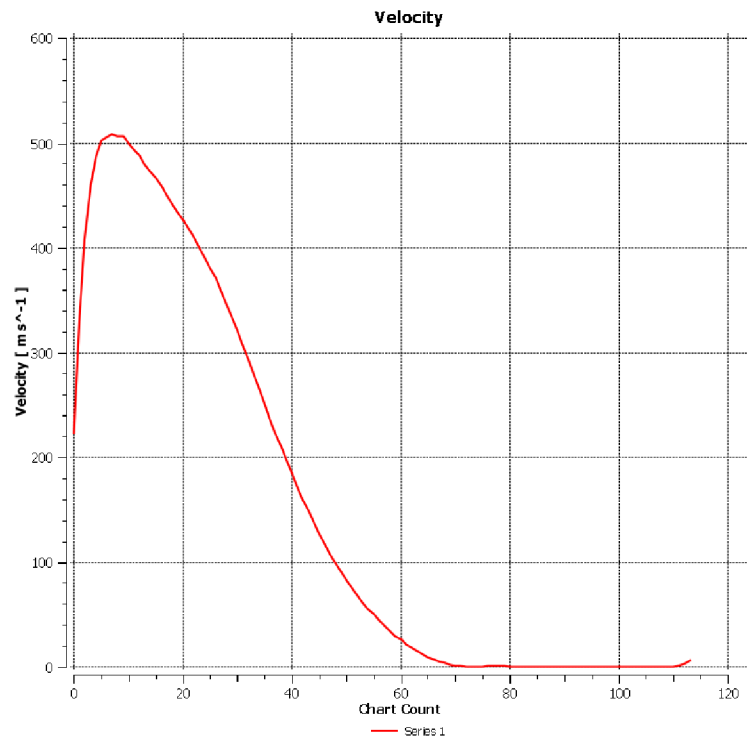
Obr. 13.6: Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře



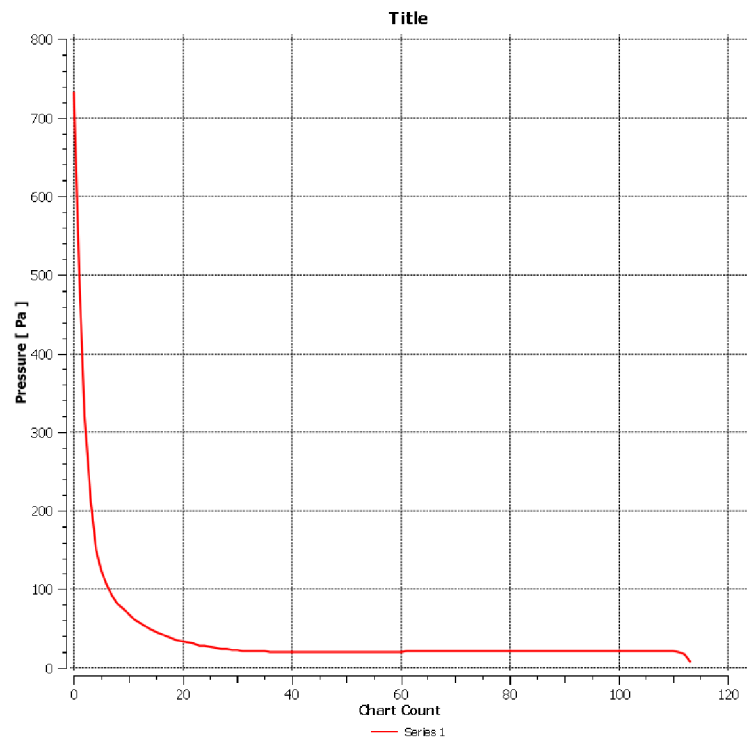
Obr. 13.7: Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail



Obr. 13.8: Zobrazení vektorů proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail



Obr. 13.9: Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.



Obr. 13.10: Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou

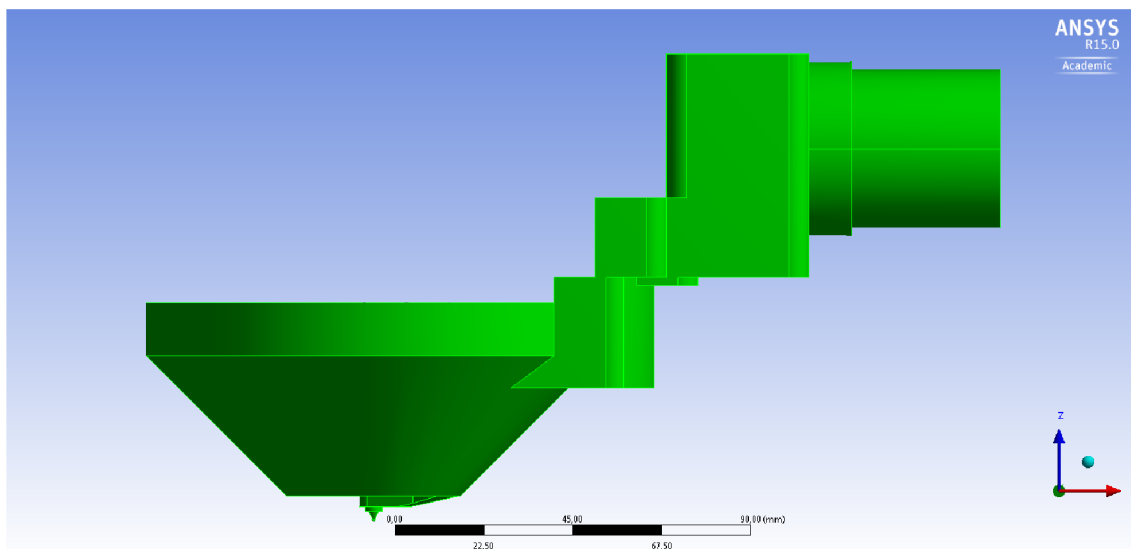
### 13.1.4 Vyhodnocení výsledků simulace

Z obrázku 13.7 je patrné, že vlivem velkého tlakového spádu mezi komorou vzorku ( $1000Pa$ ) a diferenciálně čerpanou komorou ( $30Pa$ ) dochází v clonce PLA 1 ke kritickému proudění a za clonkou PLA 1 vzniká oblast nadzvukového proudění s hodnotou Machova čísla okolo 1,5Ma.

Na obrázku 13.8 je zřejmé, že vlivem tvaru vzniká v oblasti konce kuželového tvaru turbulence.

## 13.2 Návrh druhé koncepce - bez prstence

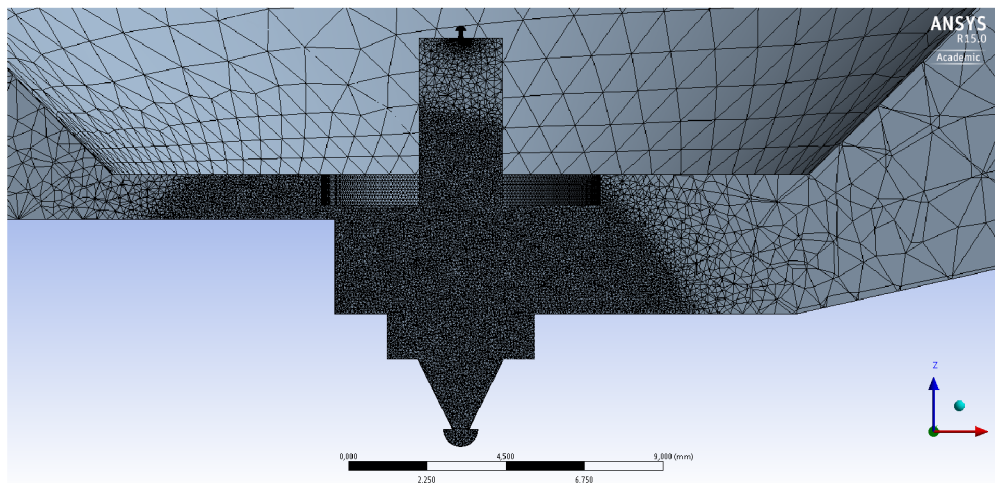
Druhá koncepce 13.11 se snažila zjednodušit tvar komory, byl proto odstraněn prstenec z horní části. Tato varianta měla zjistit, zda prstenec ve stávající verzi má nějaký vliv na tlak nebo proudění.



Obr. 13.11: Stávající model diferenciálně čerpané komory

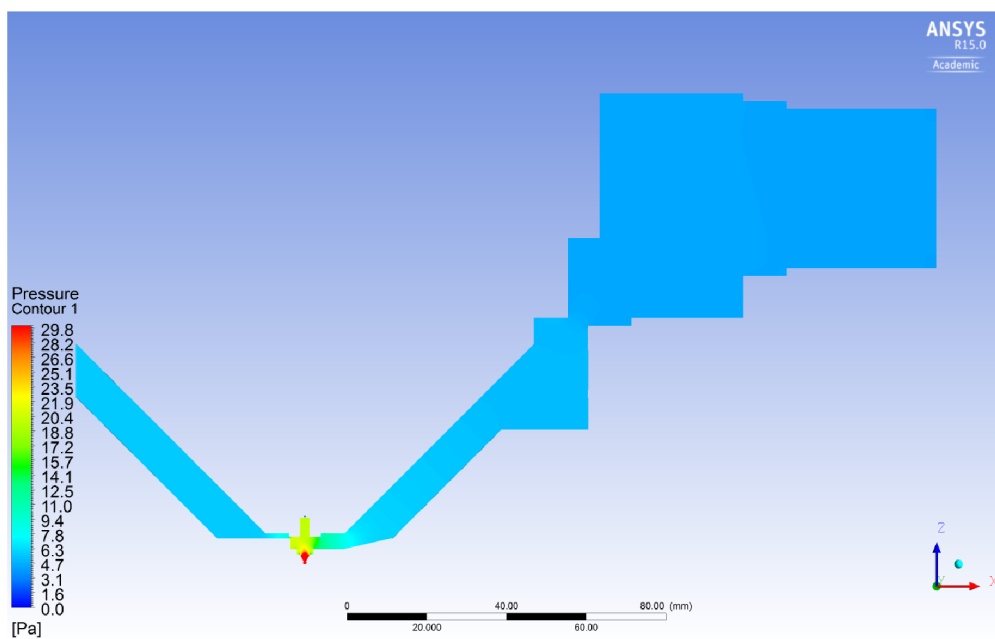
### 13.2.1 Nastavení sítě

Nastavování sítě se u jednotlivých koncepcí příliš nemění od nastavení z první varianty, proto v dalších kapitolách bude zobrazována síť pouze jako detailní pohled na oblast clonek, kde dochází ke zjemňování v závislosti na tvaru. Síť v oblasti clonek u druhé varianty (bez prstence) vidíme na obrázku 13.12. Zde je síť velmi jemná z důvodu nadzvukového proudění. Zjemněná síť musí zasahovat i na levou hranu, kde je komora zúžená.

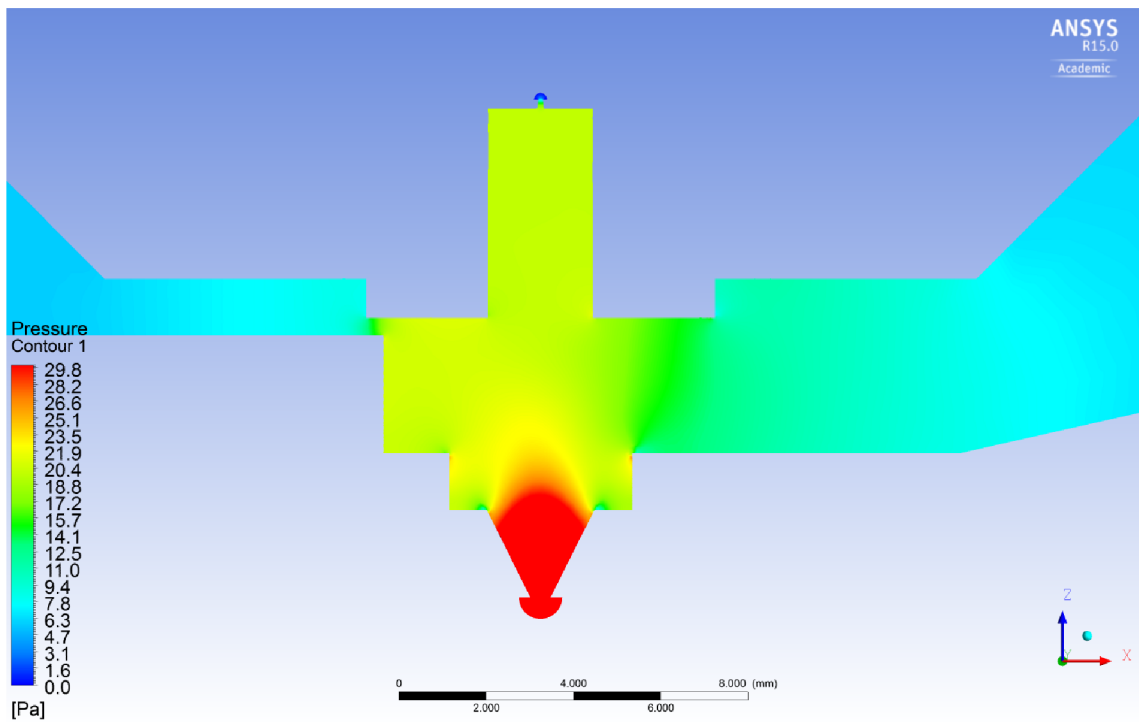


Obr. 13.12: Nastavená síť - detail na oblast clonek

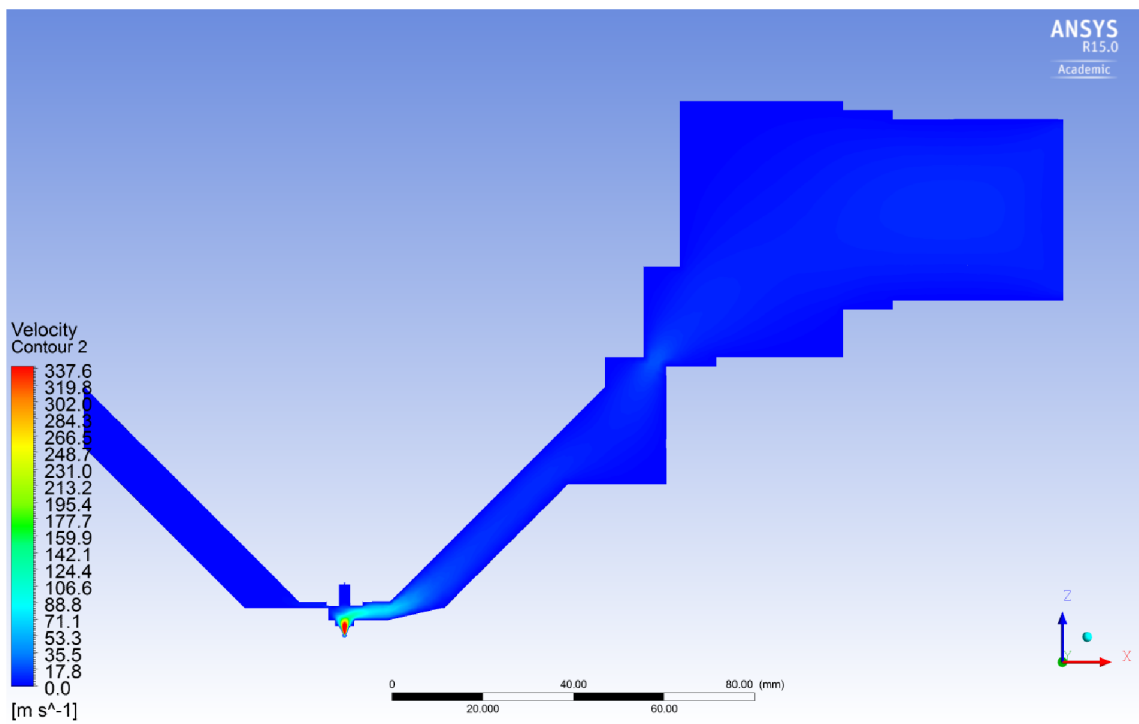
### 13.2.2 Výpočty



Obr. 13.13: Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře

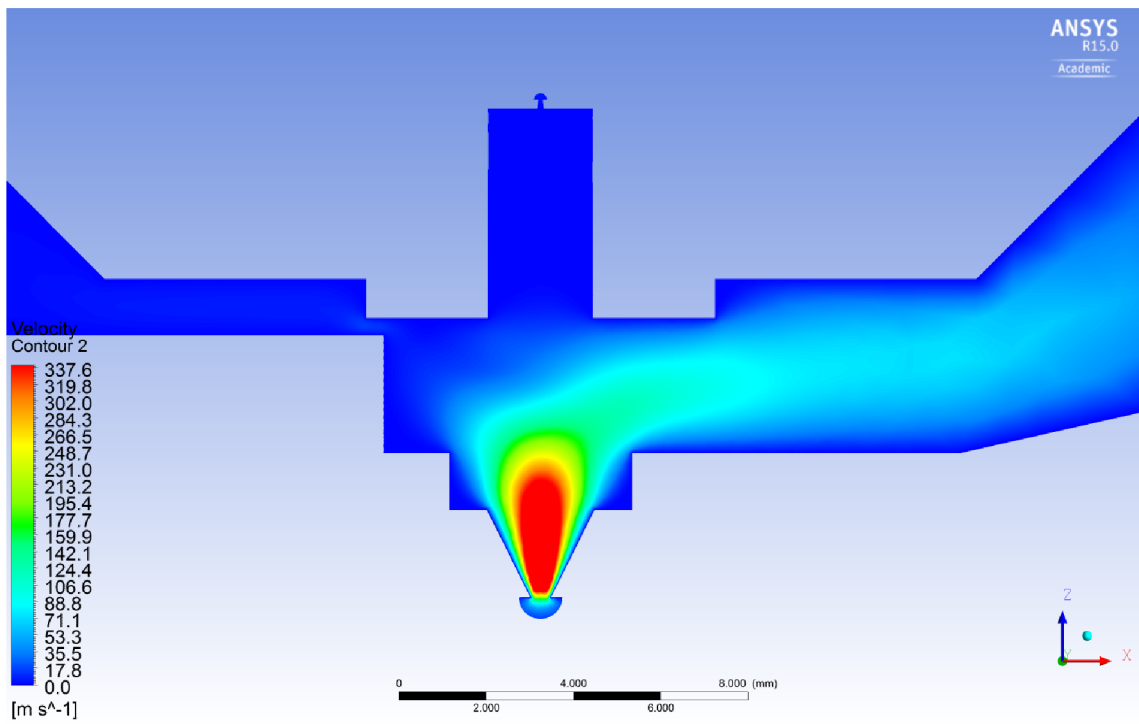


Obr. 13.14: Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře - Detail

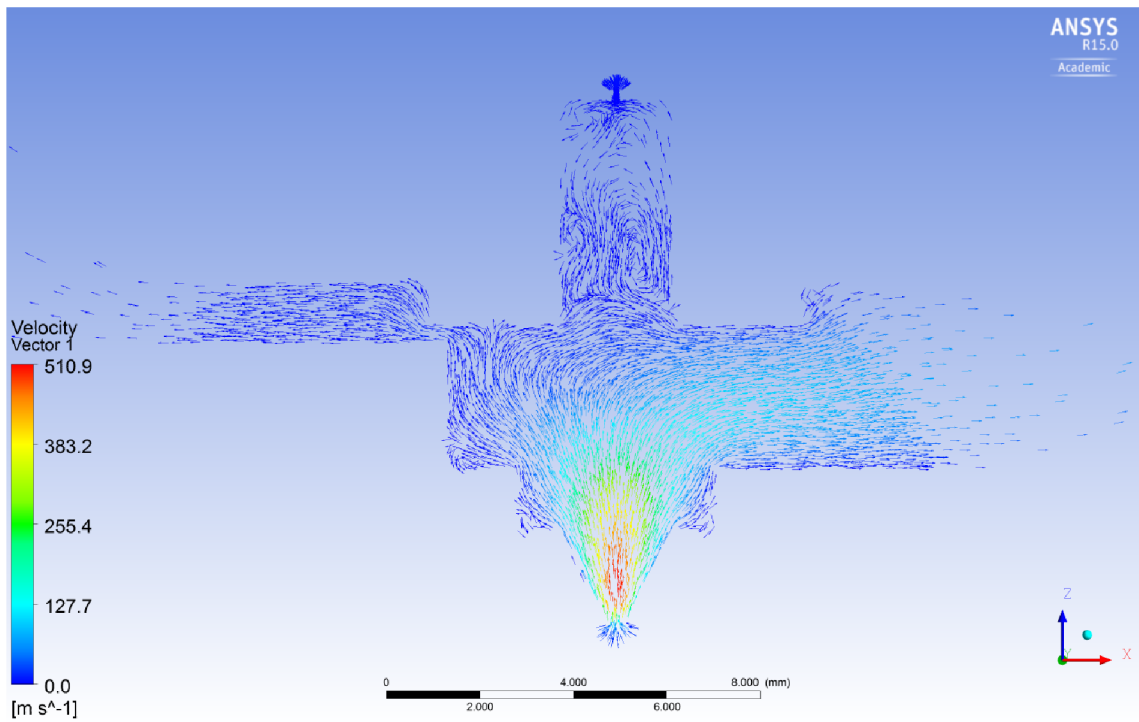


Obr. 13.15: Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře

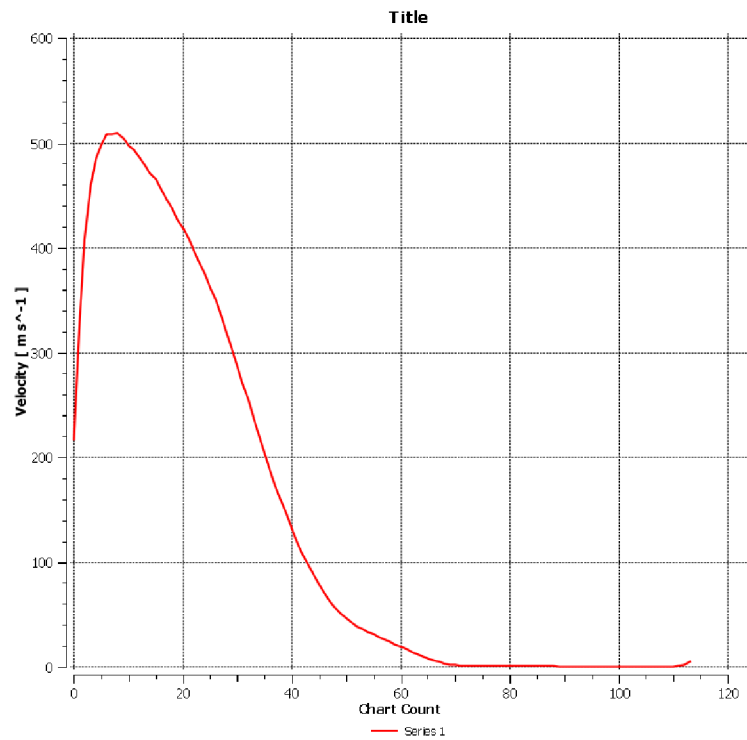




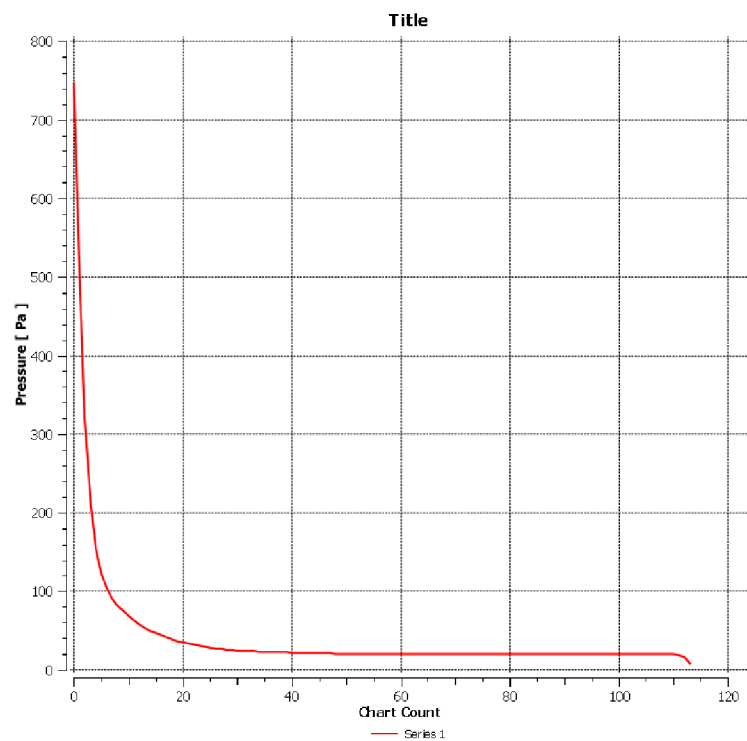
Obr. 13.16: Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail



Obr. 13.17: Zobrazení vektorů proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail



Obr. 13.18: Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.



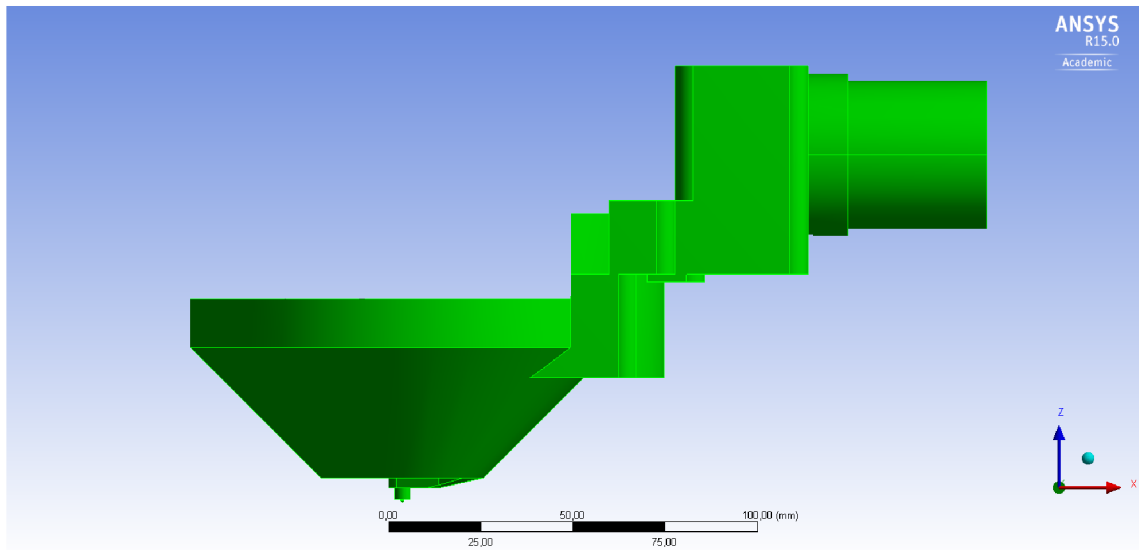
Obr. 13.19: Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.

### 13.2.3 Vyhodnocení výsledků simulace

Z výsledků simulací je zřejmé, že odstranění prstence nemělo na výsledné hodnoty skoro žádný, nebo pouze nepatrný vliv. Protože však návrh zjednodušil konstrukci diferenciálně čerpané komory a vykazoval o trochu lepší výsledky než první stávající koncepce, byl prstenec odbourán i v dalších simulacích.

## 13.3 Návrh třetí koncepce - Válcový tvar

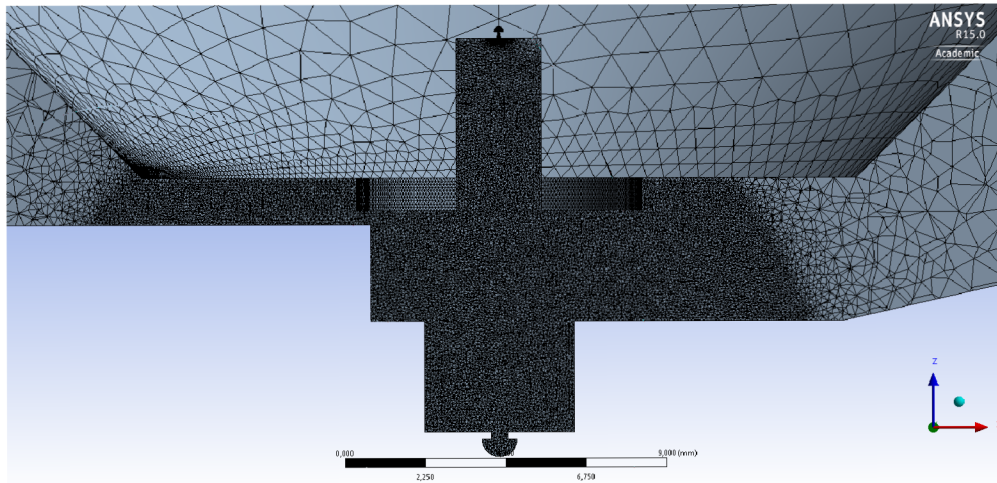
Třetí varianta komory 13.20 se snaží o rozšíření v oblasti clonek, má proto mezi clonkou PLA 1 a PLA 2 válcový tvar. A jak již bylo popsáno ve zhodnocení výsledků z druhé varianty, neobsahuje ani prstenec.



Obr. 13.20: Stávající model diferenciálně čerpané komory

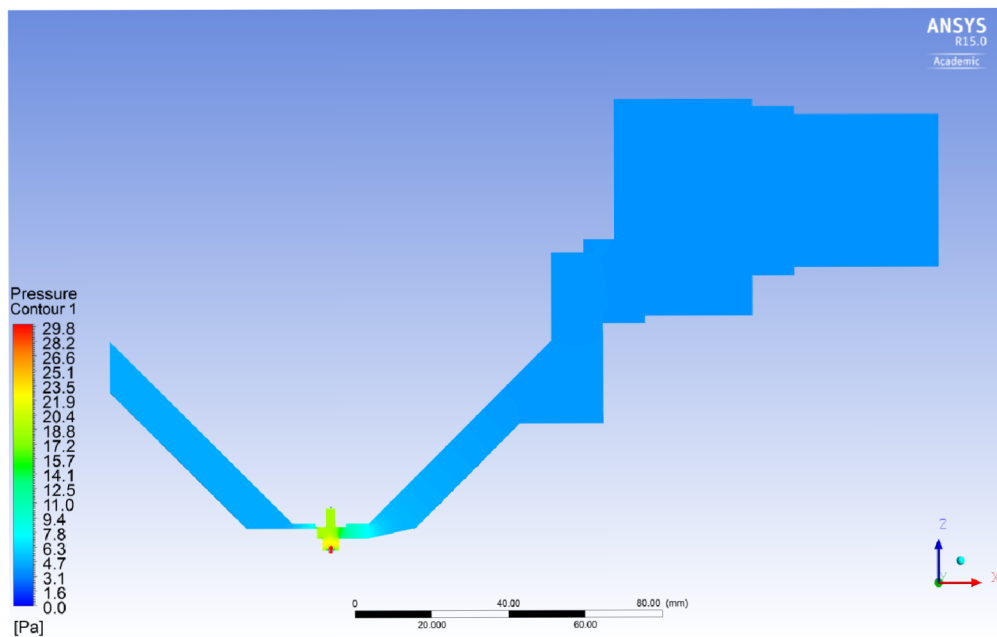
### 13.3.1 Nastavení sítě

Sít je zjemněná zejména v oblasti clonky PLA1 13.21 mezi komorou vzorku a diferenciálně čerpanou komorou, kde došlo ke změně tvaru na tvar válcový.

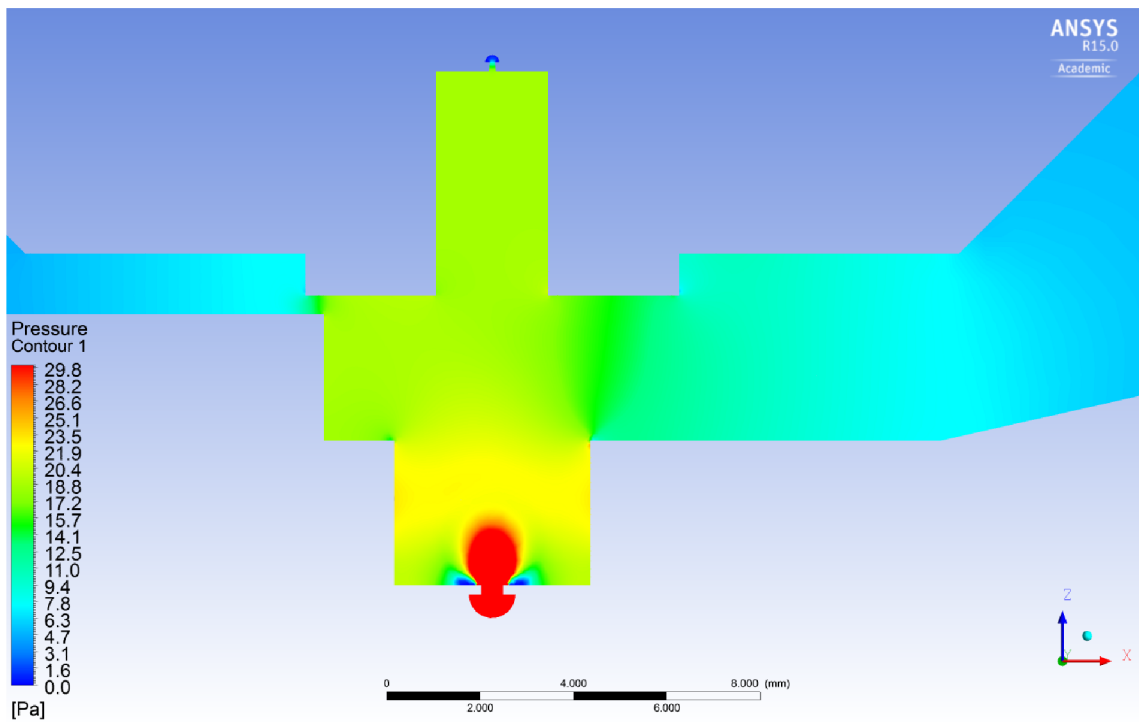


Obr. 13.21: Nastavená sít - detail na oblast clonek

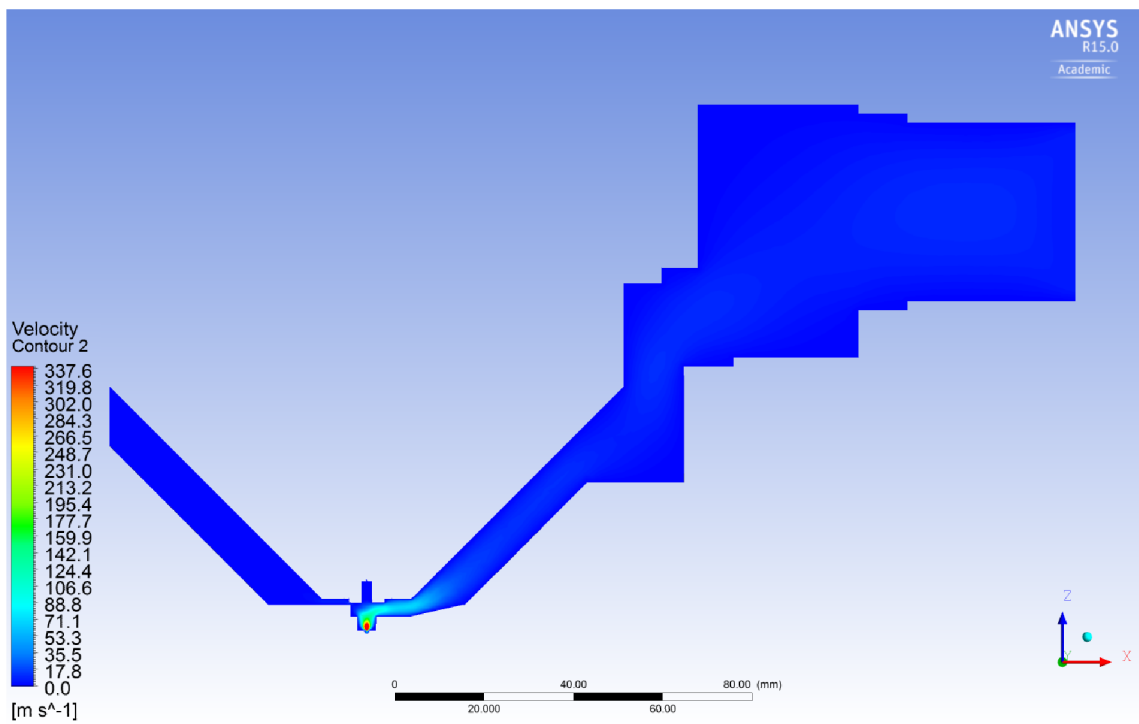
### 13.3.2 Výpočty



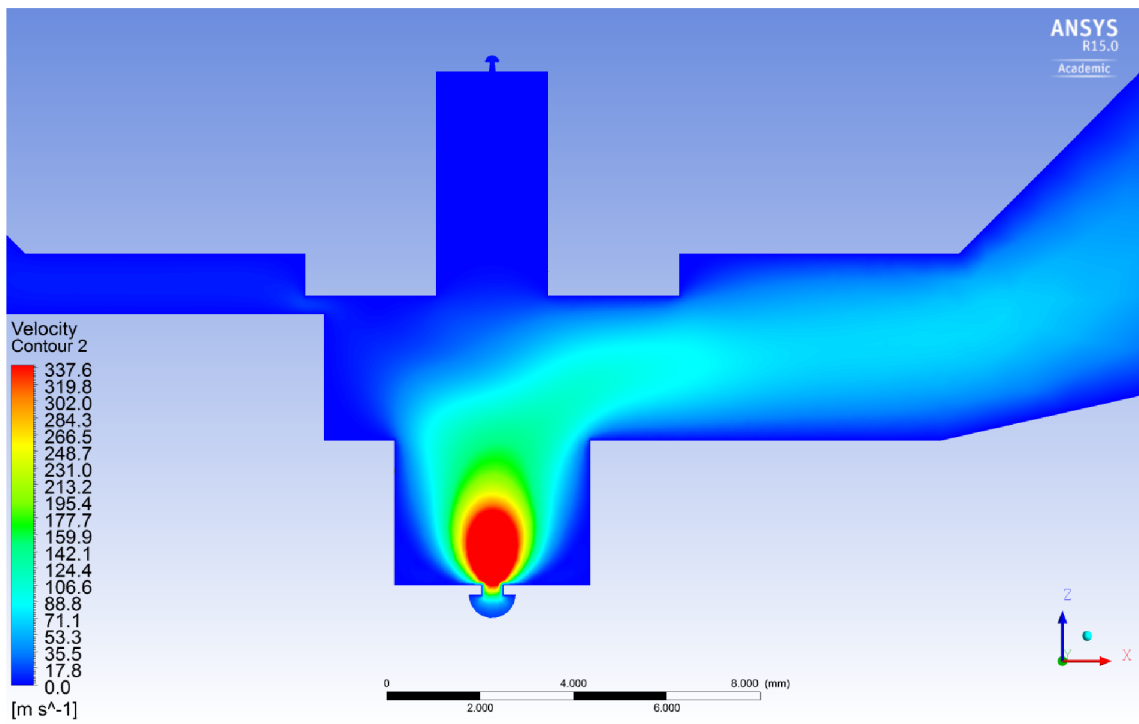
Obr. 13.22: Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře



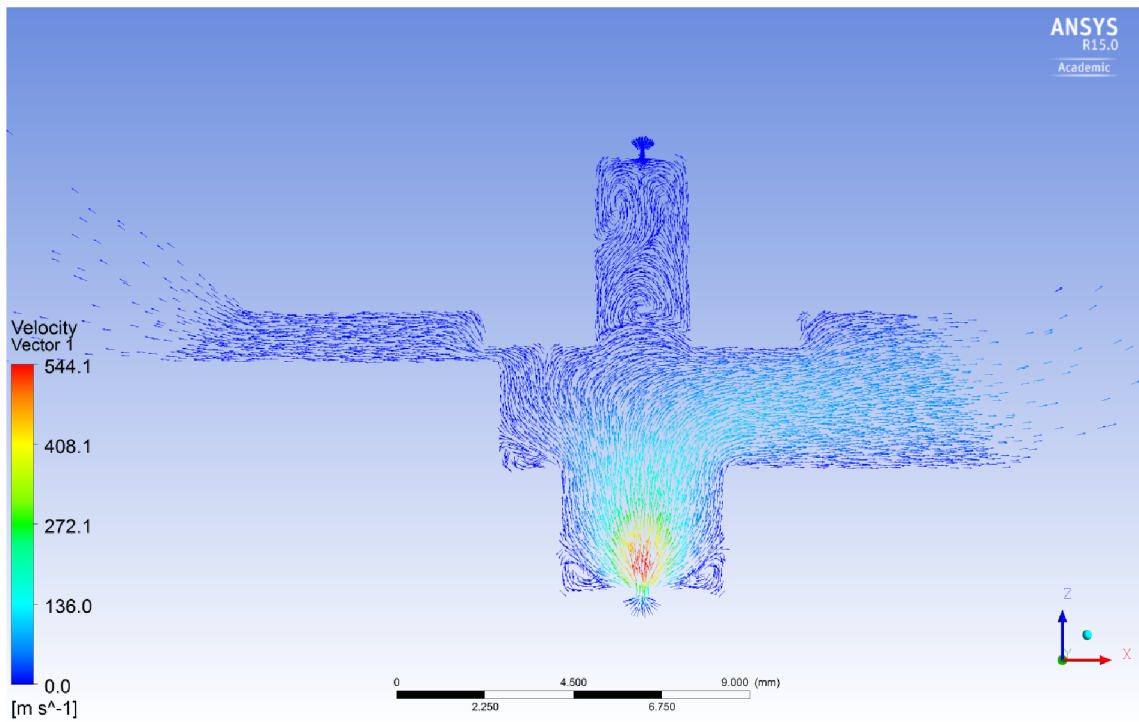
Obr. 13.23: Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře - Detail



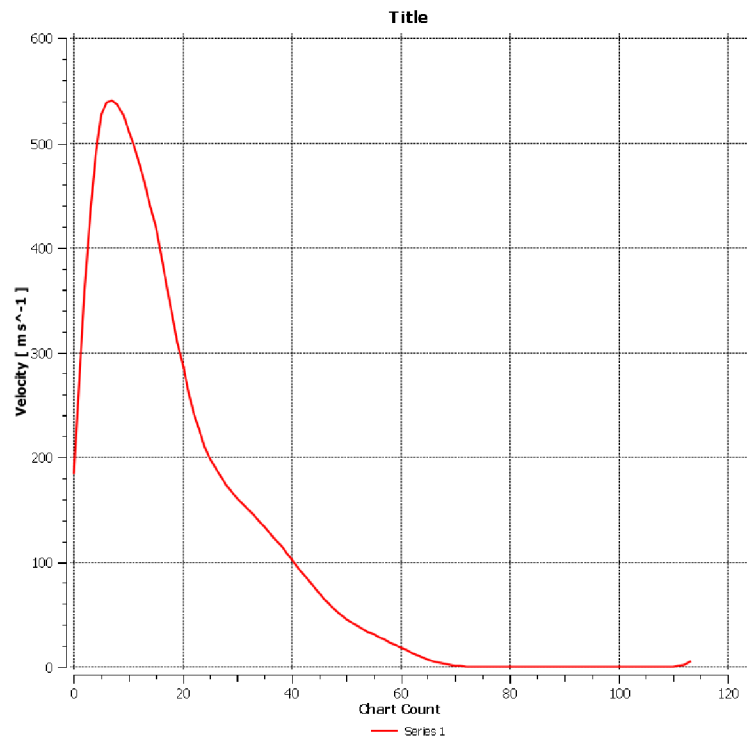
Obr. 13.24: Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře



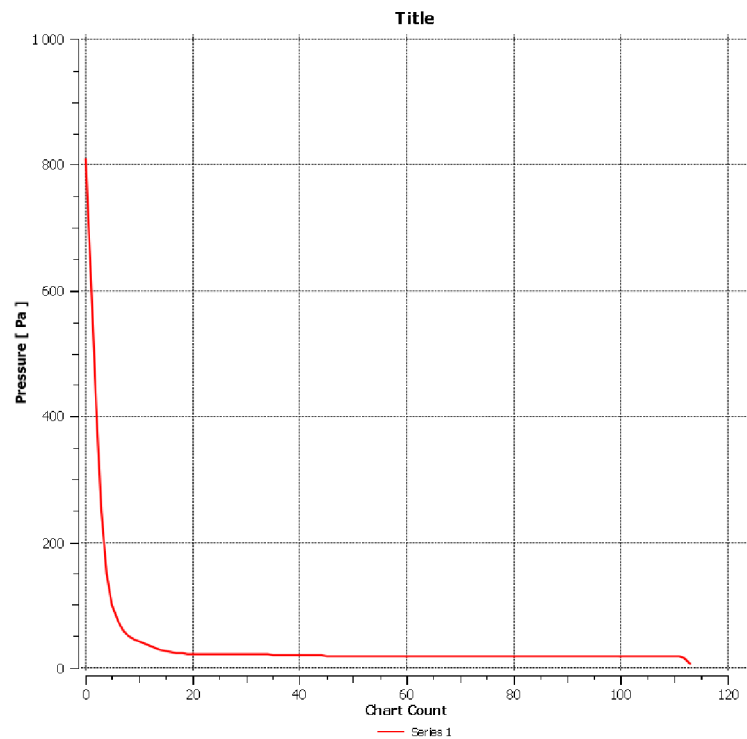
Obr. 13.25: Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail



Obr. 13.26: Zobrazení vektorů proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail



Obr. 13.27: Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.



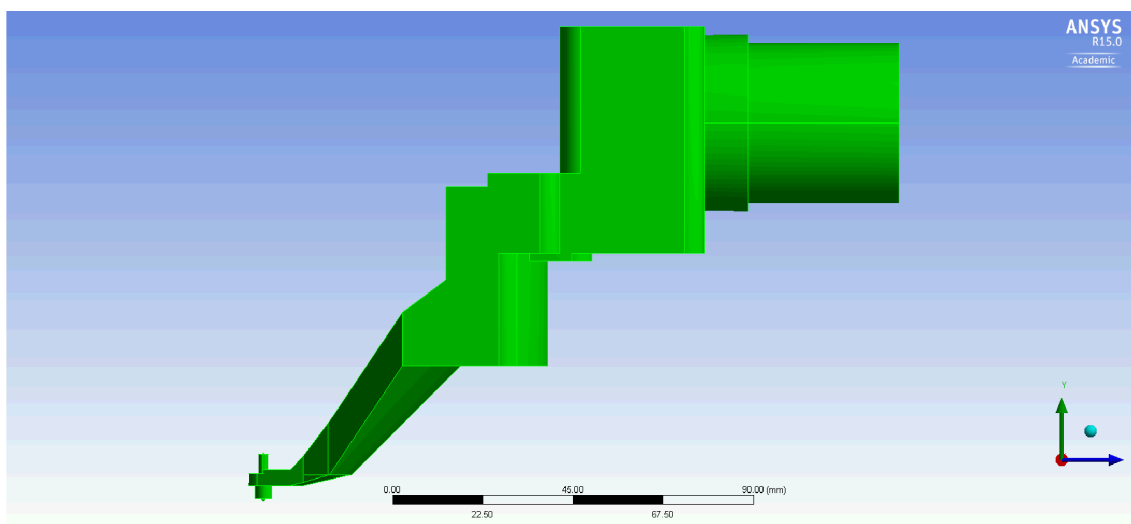
Obr. 13.28: Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.

### 13.3.3 Vyhodnocení výsledků simulace

Důsledkem rozšíření části mezi clonkami vzniká rozšířený kužel nadzvukového proudění, který způsobuje rychlejší pokles tlaku na dráze primárního svazku, což je výhodné. Průměrný tlak i rychlost na dráze primárního svazku prochazejícího diferenciálně čerpanou komorou byl nižší než u předchozích variant a proto byl u dalších koncepcí válcový tvar ponechán.

### 13.4 Návrh čtvrté koncepce - zúžený tvar

Čtvrtá varianta 13.29 se pokusila o další konstrukční zjednodušení celé koncepce komory. Tvar komory byl proto vytvarován zúženým směrem k výstupu.

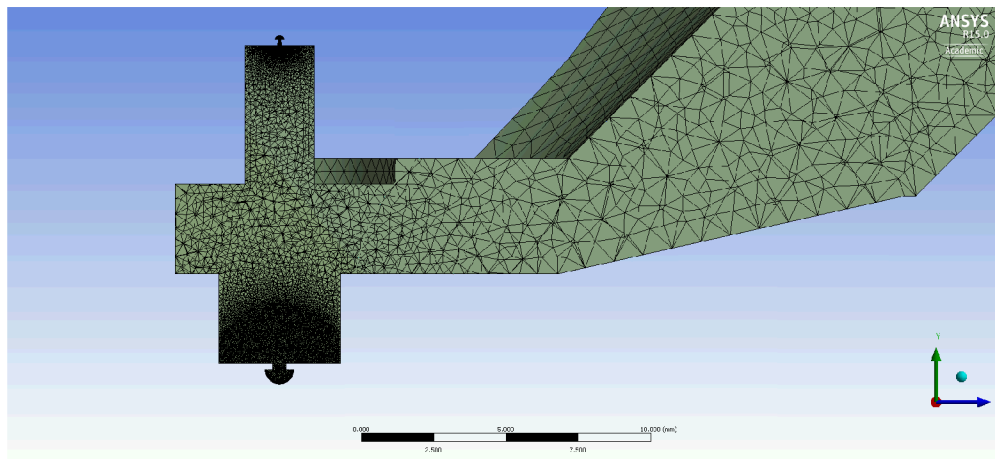


Obr. 13.29: Stávající model diferenciálně čerpané komory



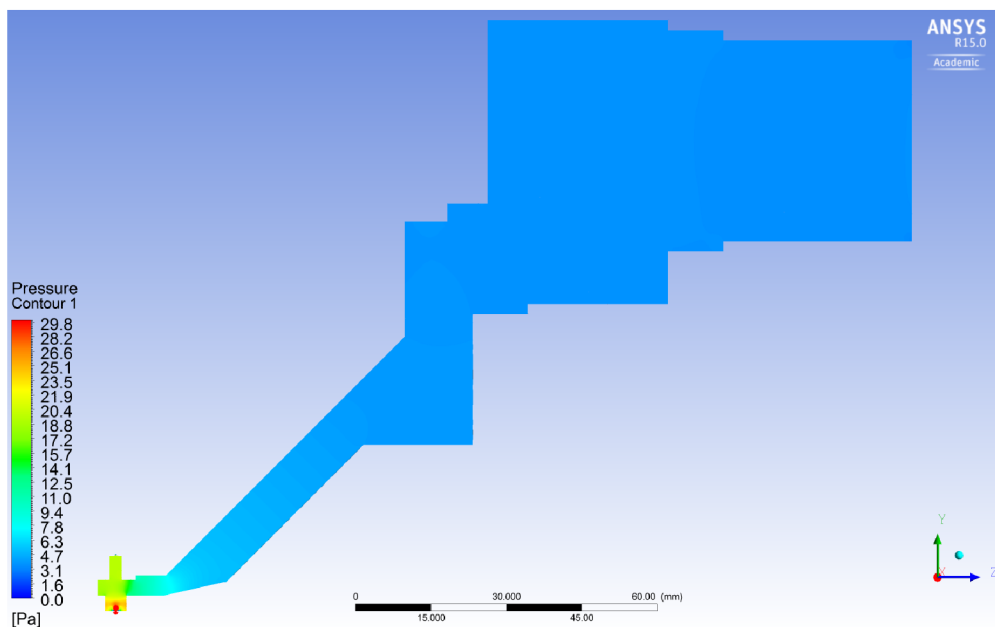
### 13.4.1 Nastavení sítě

Na obrázku 13.30 je zobrazená síť v oblasti mezi clonkami PLA1 a PLA2, kde dochází k nadzvukovému proudění.

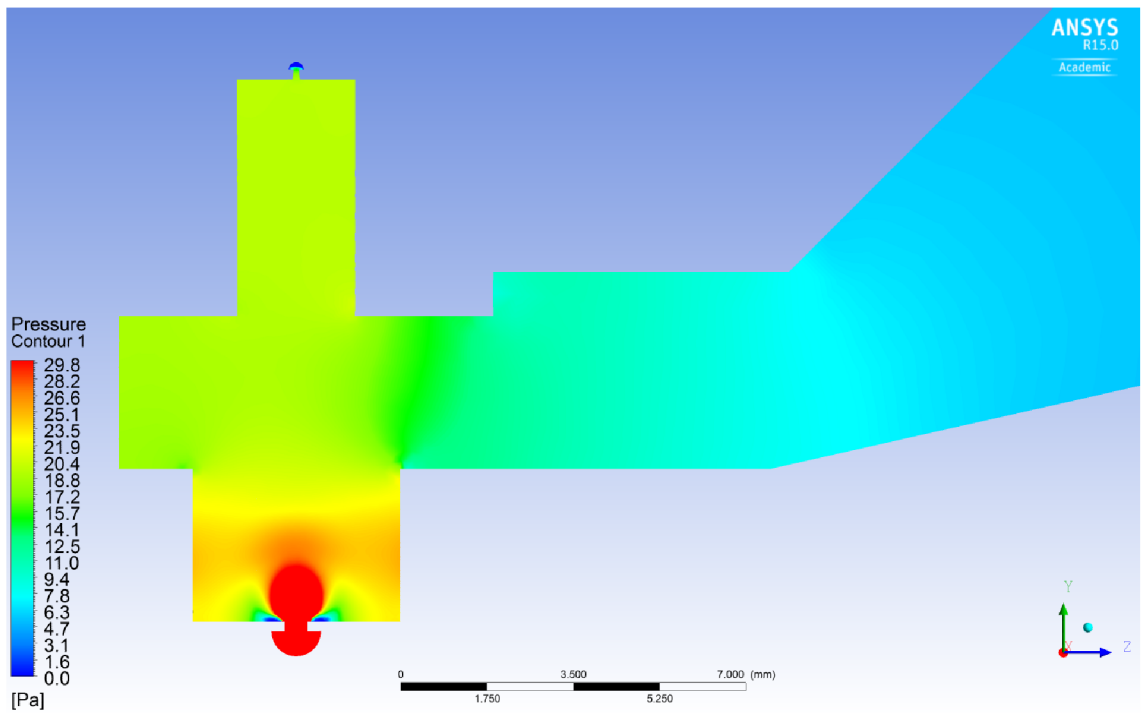


Obr. 13.30: Nastavená síť - detail na oblast clonek

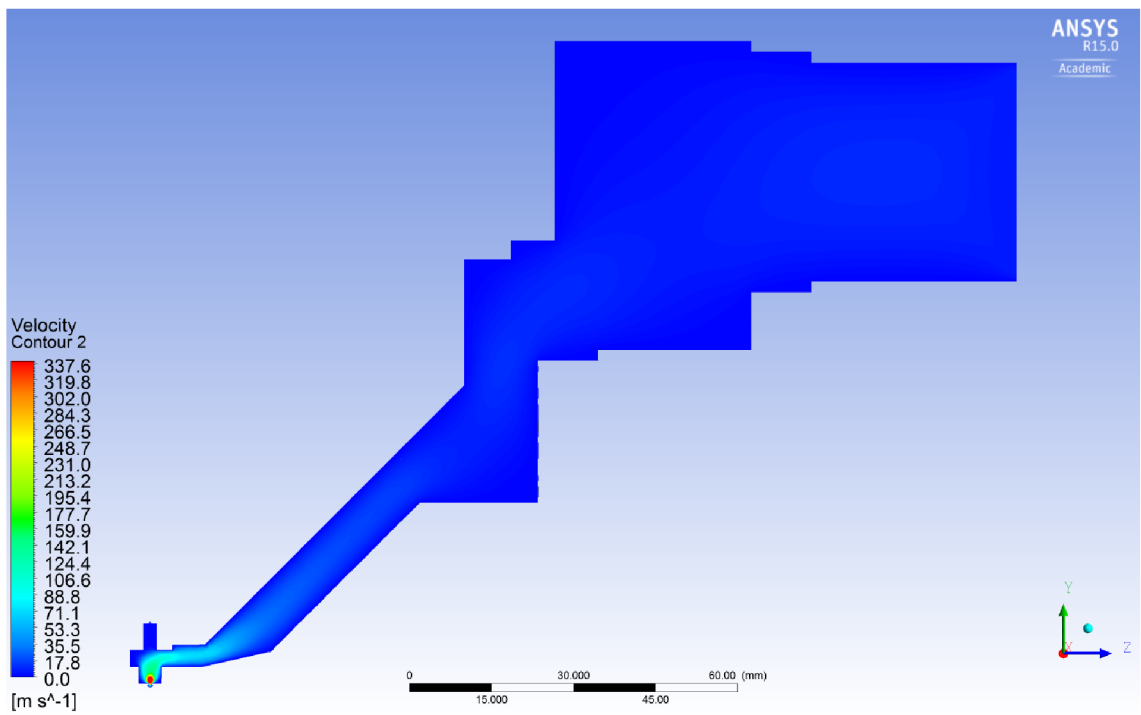
### 13.4.2 Výpočty



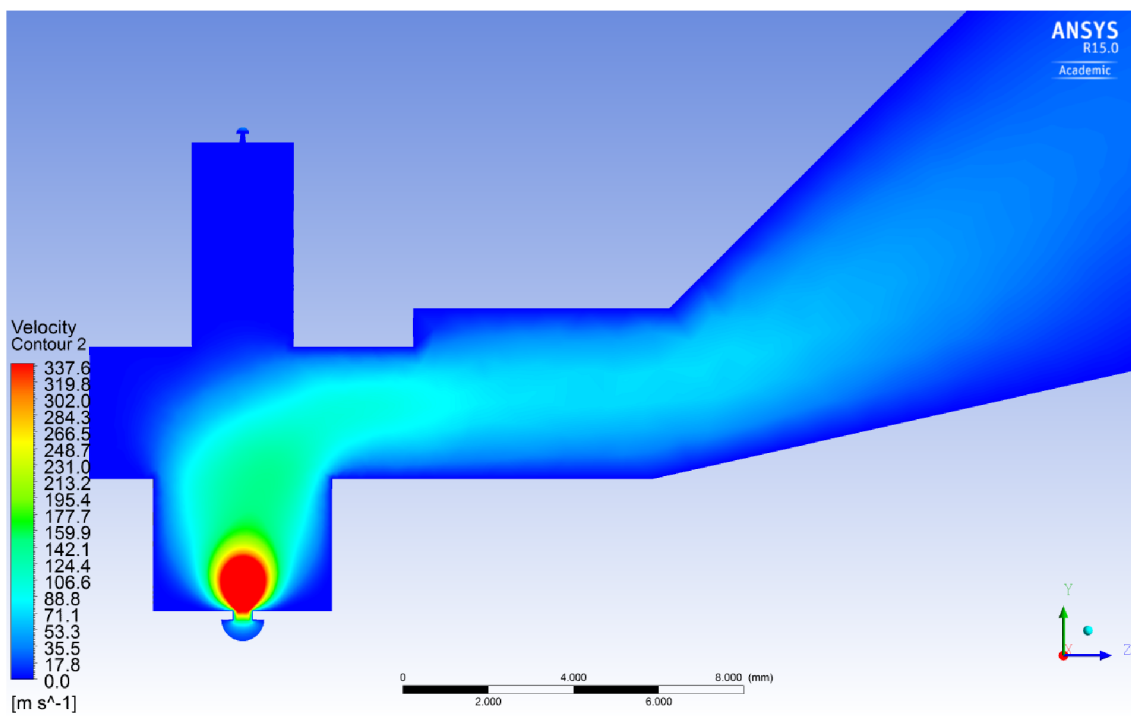
Obr. 13.31: Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře



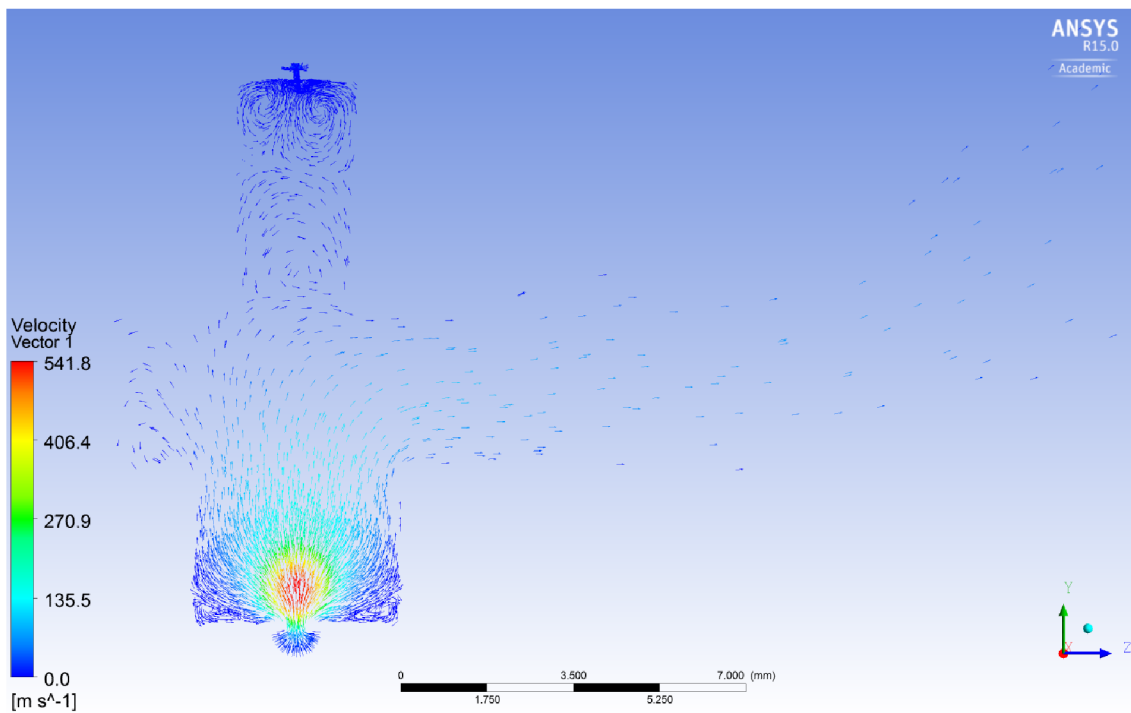
Obr. 13.32: Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře - Detail



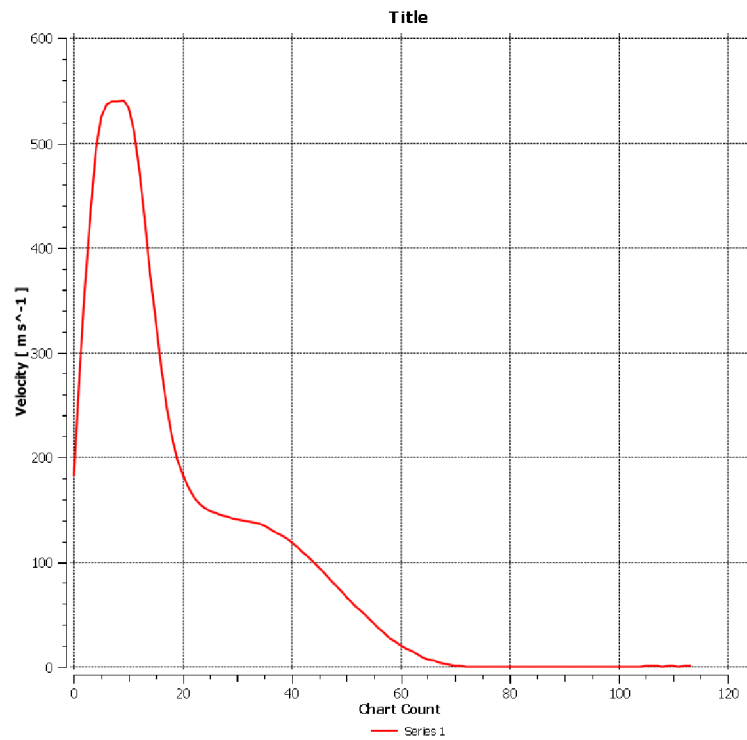
Obr. 13.33: Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře



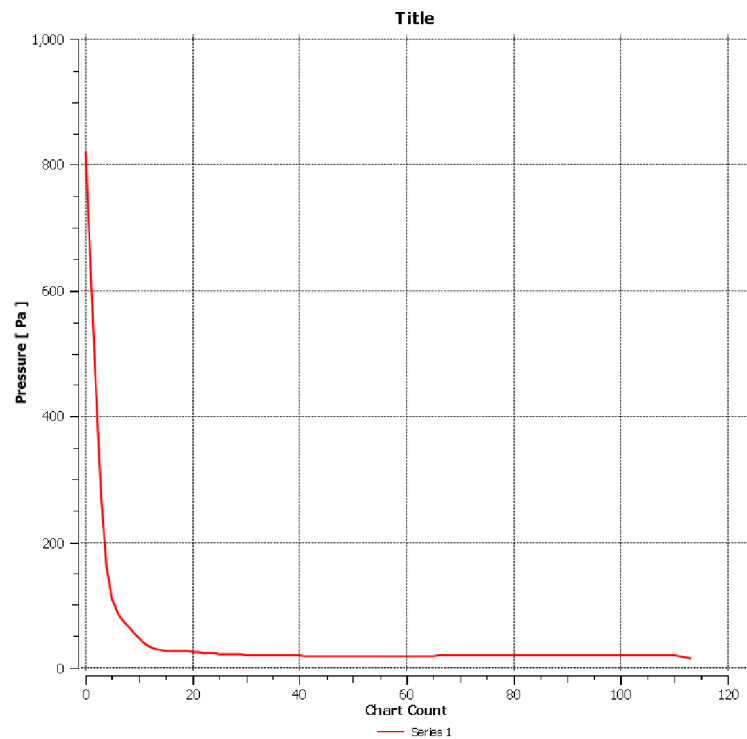
Obr. 13.34: Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail



Obr. 13.35: Zobrazení vektorů proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail



Obr. 13.36: Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.



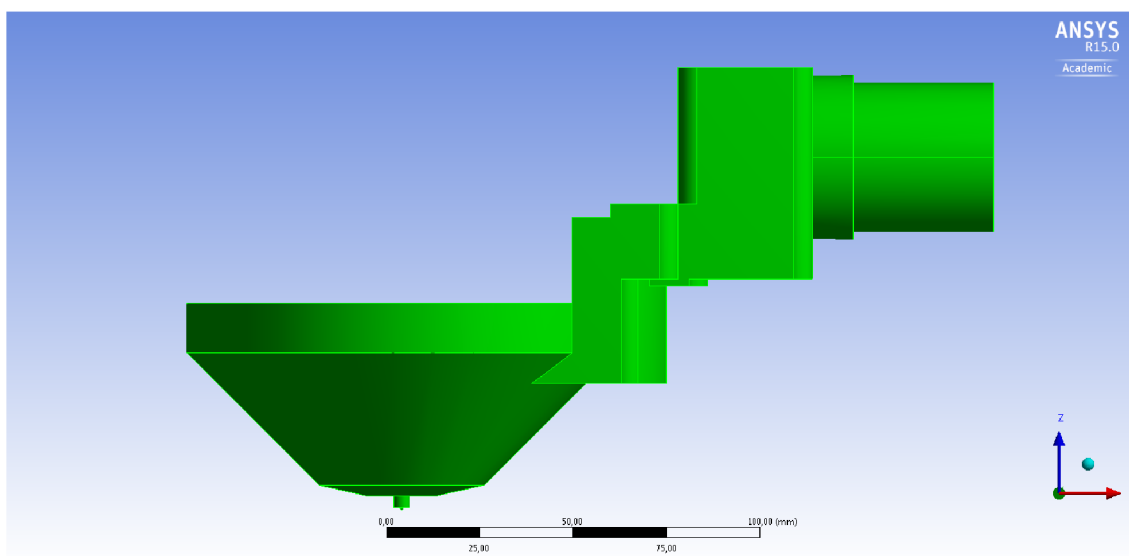
Obr. 13.37: Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.

### 13.4.3 Vyhodnocení výsledků simulace

Zúžení sacího profilu podle výsledků omezilo vznikající rozšířený kužel nadzvukového proudění, jenž způsobuje rychlejší pokles tlaku na dráze primárního svazku, což v našem případě není výhodné.

## 13.5 Návrh páte koncepce - rozšířený tvar

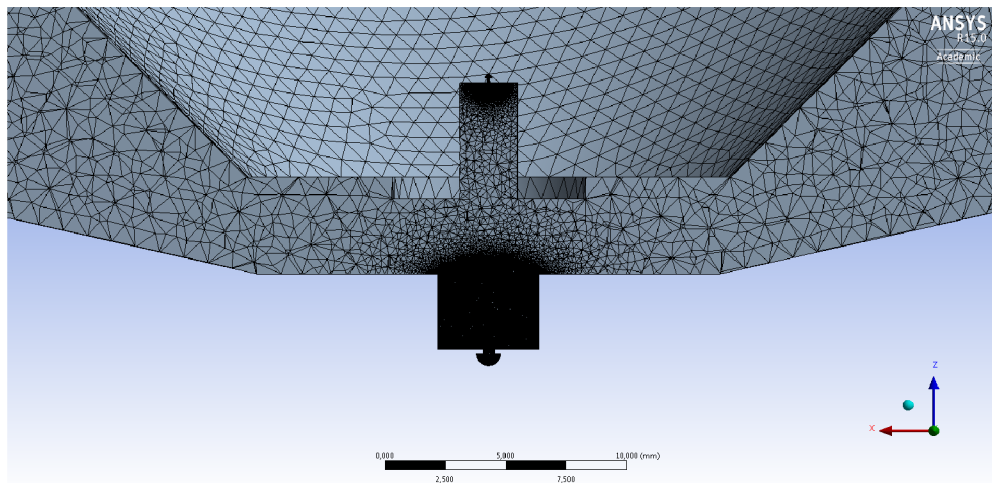
Z výsledků předchozí varianty je patrné, že se vyplácí rozevřít spodní část nad clonkou PLA 1 a nemít zúžený prostor kolem čerpaného místa. Z tohoto důvodu byla volena varianta vycházející z válcového tvaru, která nebyla ořezána, ale naopak rozšířena 13.38.



Obr. 13.38: Stávající model diferenciálně čerpané komory

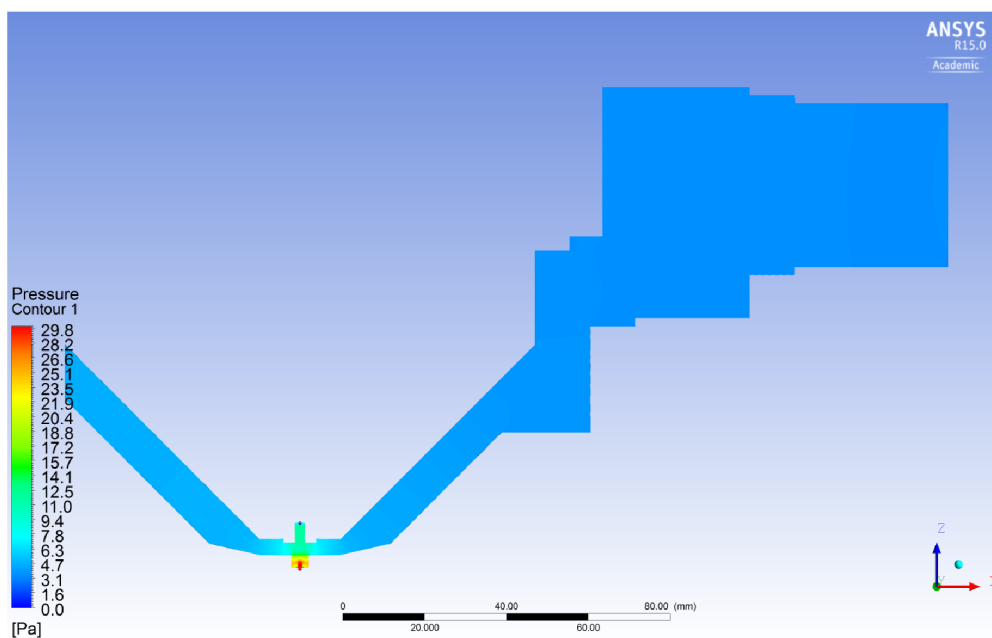
### 13.5.1 Nastavení sítě

Nastavení sítě je zobrazeno na obrázku 13.39, kde je detailnější pohled na rozšíření tvaru ve spodní části komory v oblasti clonek.

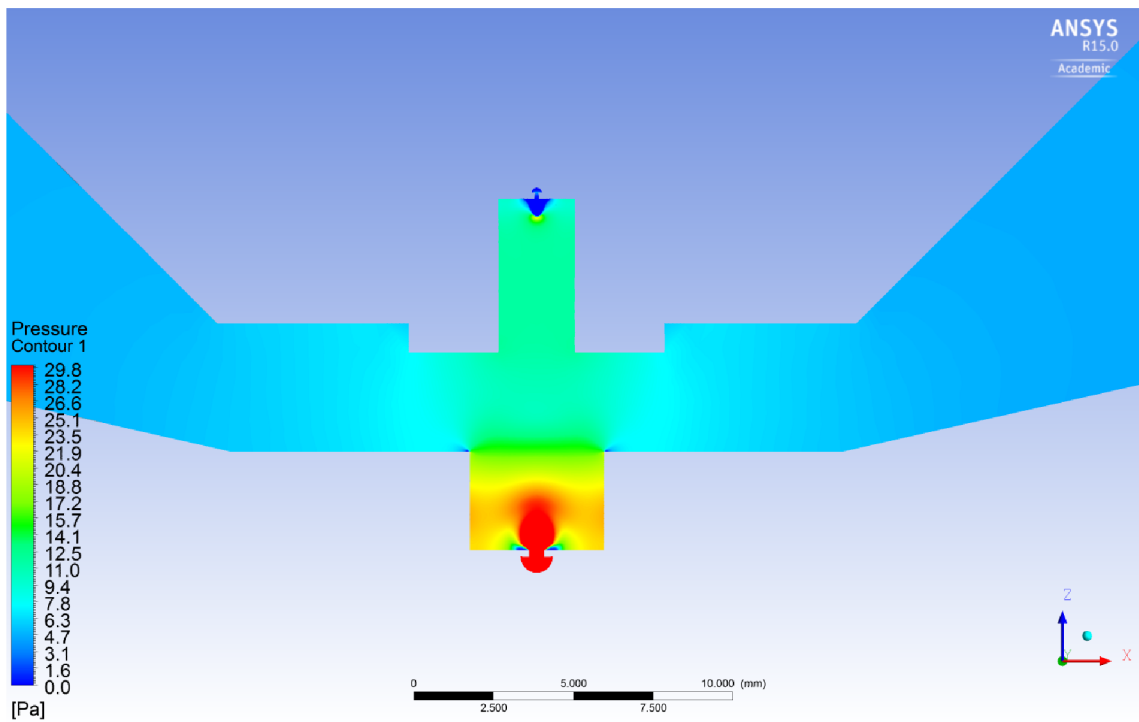


Obr. 13.39: Nastavená síť - detail na oblast clonek

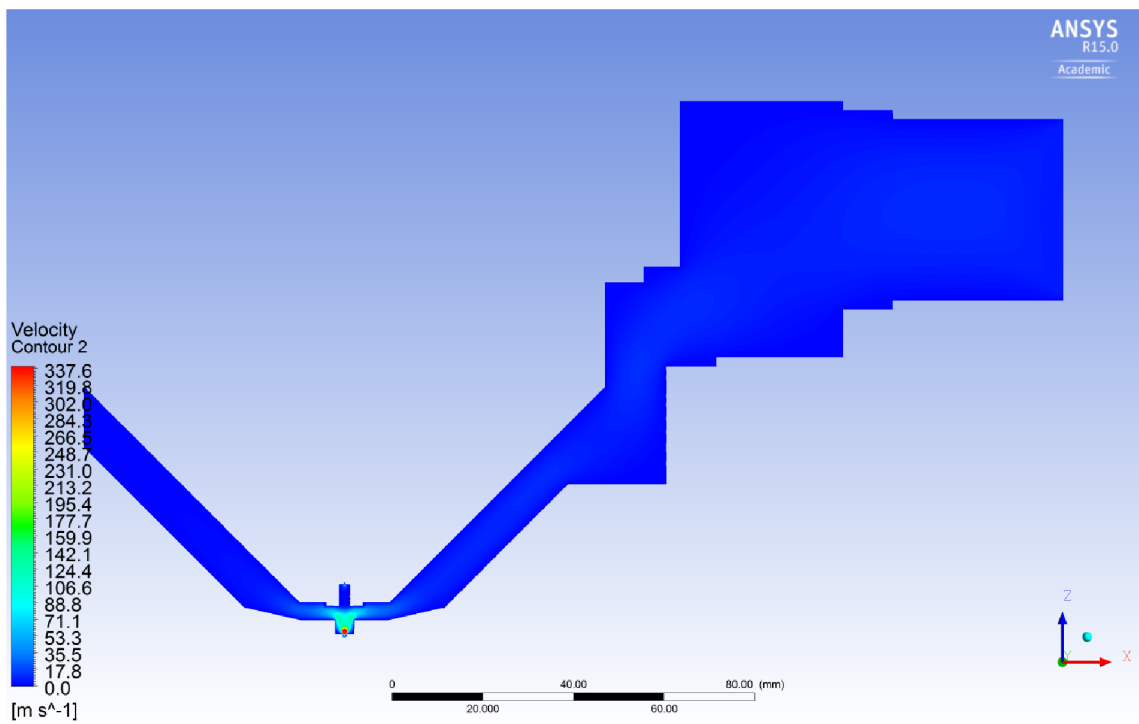
### 13.5.2 Výpočty



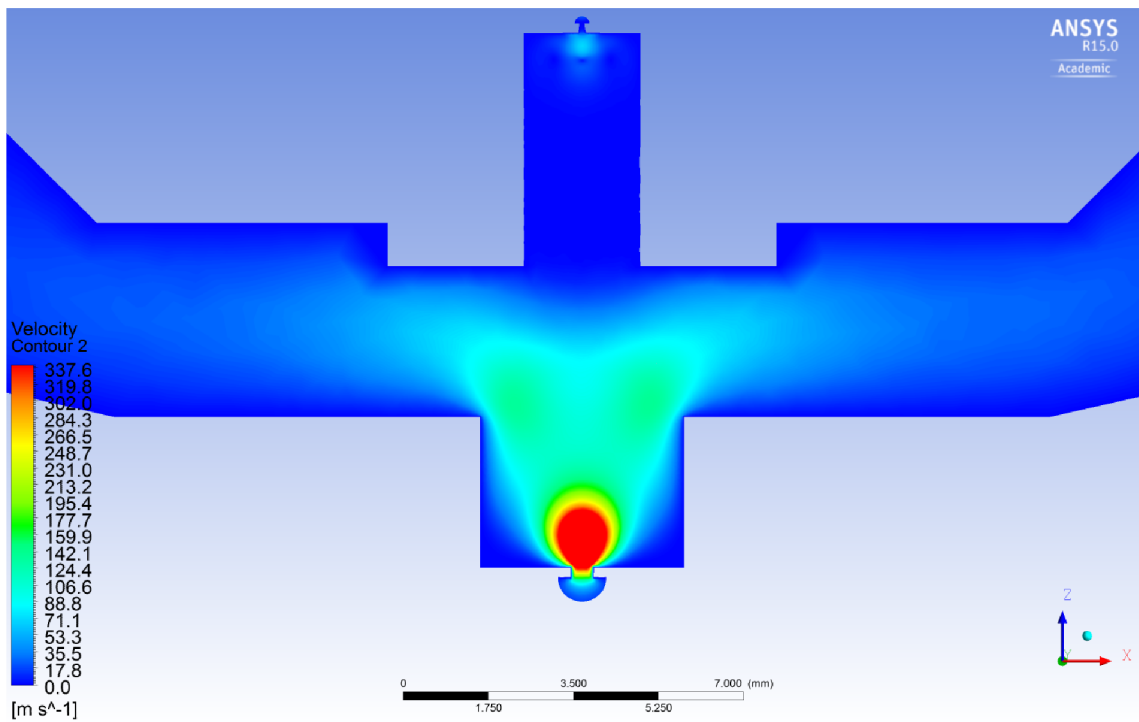
Obr. 13.40: Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře



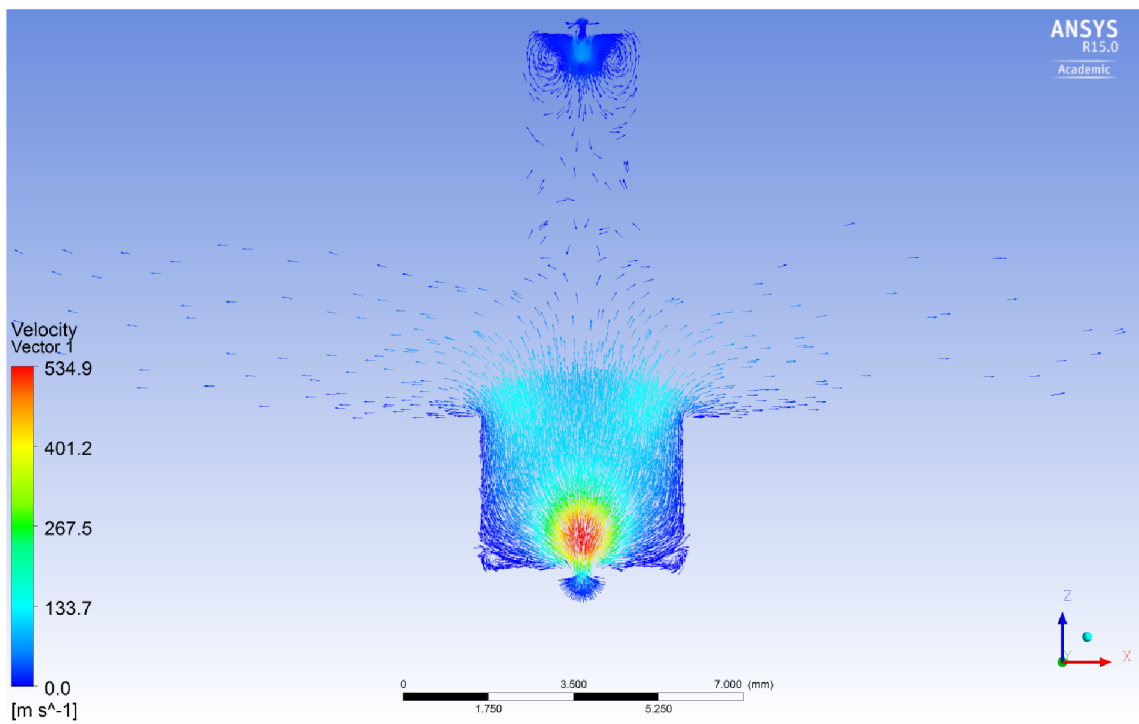
Obr. 13.41: Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře - Detail



Obr. 13.42: Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře

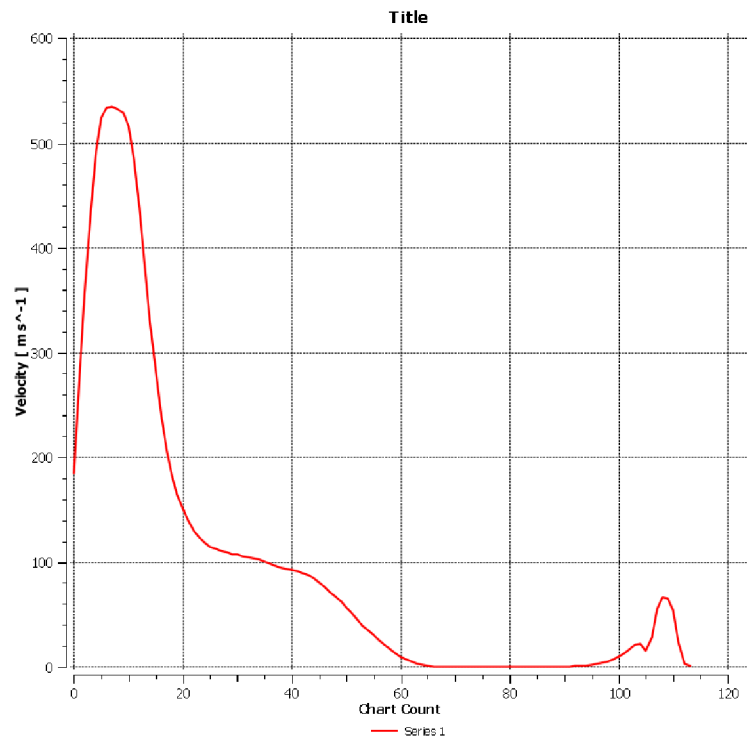


Obr. 13.43: Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail

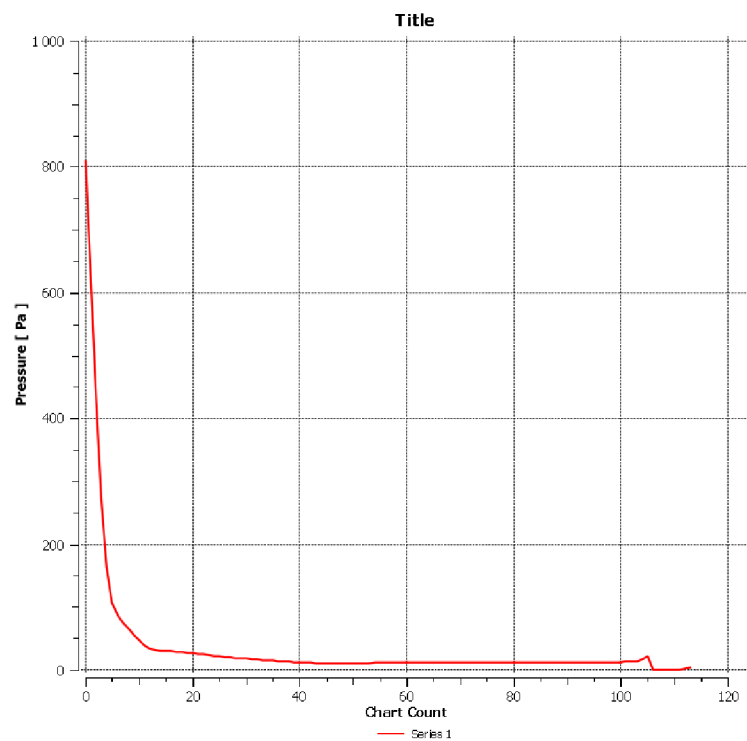


Obr. 13.44: Zobrazení vektorů proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail





Obr. 13.45: Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.



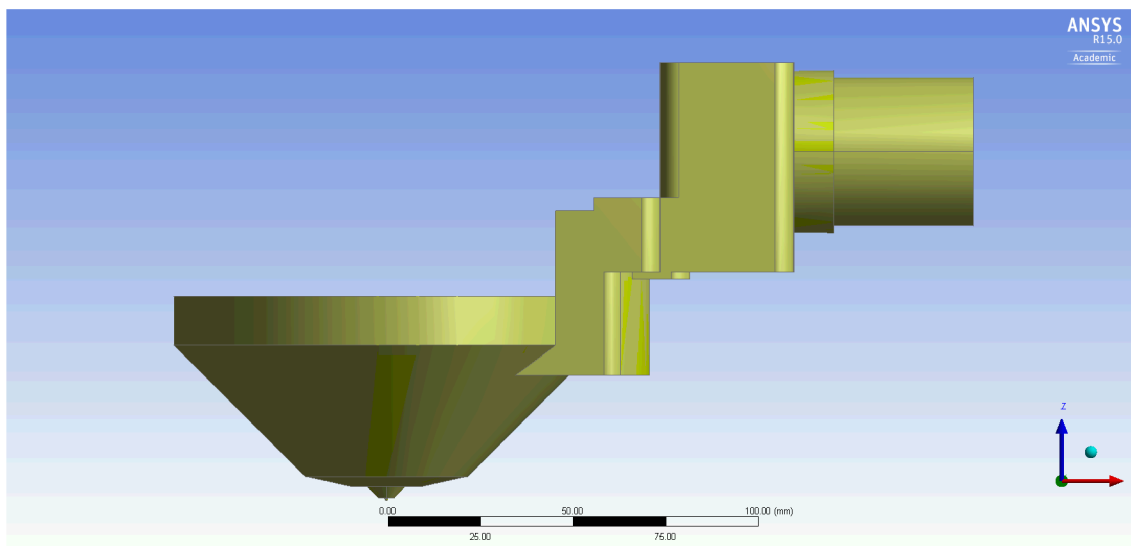
Obr. 13.46: Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.

### 13.5.3 Vyhodnocení výsledků simulace

Jak lze vidět z dosažených výsledků páté simulace, jeví se rozšířená varianta velice slibně. Průměrný tlak v komoře na dráze primárního svazku je menší skoro o jednu třetinu a také průměrná rychlost na dráze primárního svazku je nejmenší ze všech předchozích variant. V další variantě se pokusíme válec ještě více rozevřít.

## 13.6 Návrh šesté koncepce - rozevřený válec

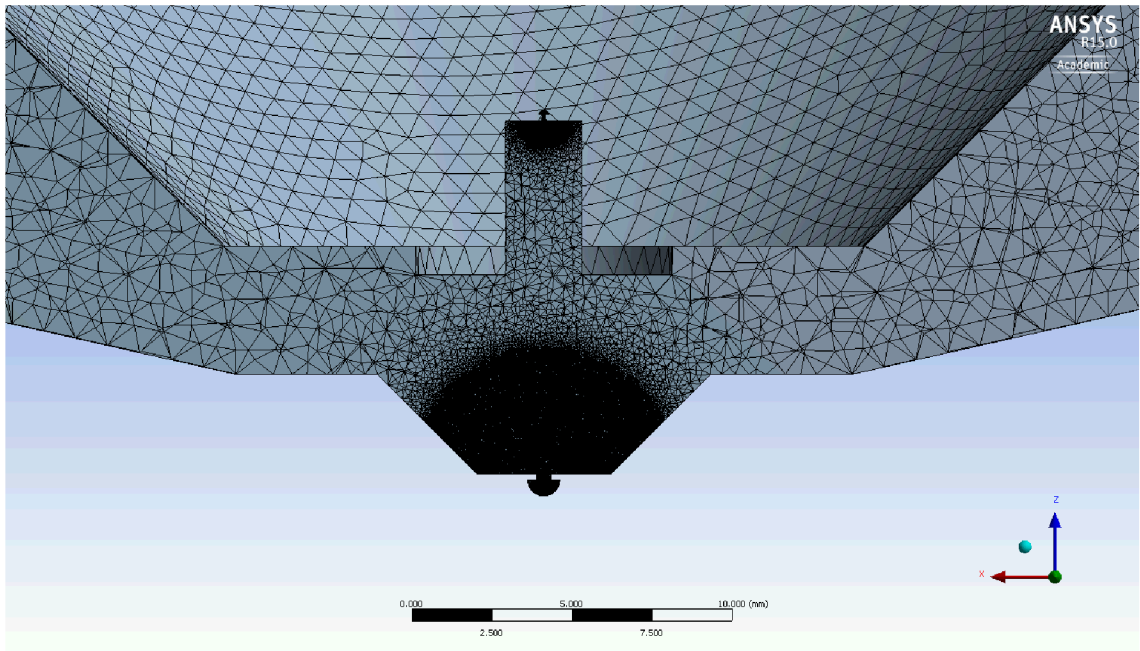
Šestá koncepce je poslední, vytvořená na základě všech předchozích koncepcí. Tato varianta tedy nemá prstenec, jenž byl odstraněn ve druhé koncepci. V oblasti clonky PLA1, která je mezi diferenciallyně čerpanou komorou a komorou vzorku, je použita rozšířená varianta z páté koncepce. Oproti této koncepci je však válec u clonky PLA1 rozšířen pod úhlem  $45^\circ$ . Výsledný tvar koncepce je zobrazen na obrázku 13.47.



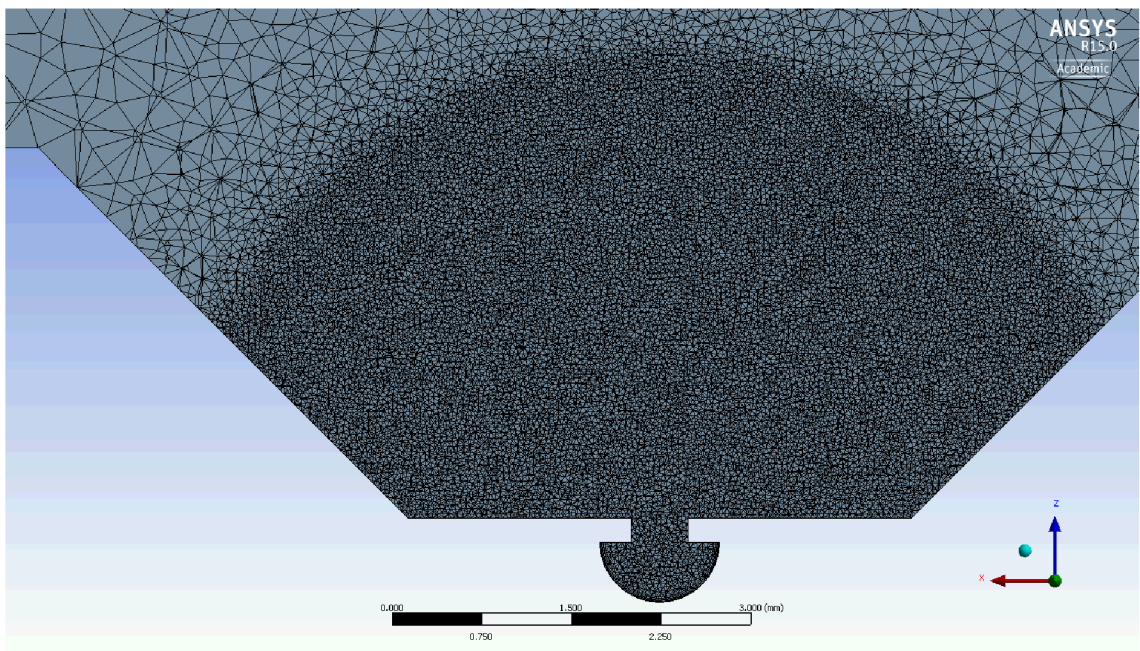
Obr. 13.47: Návrh šesté koncepce rozevřeného válce

### 13.6.1 Nastavení sítě

Na obrázku 13.48 je zobrazená oblast clonek, kde je síť velmi jemná z důvodu nadzvukového proudění. Na obrázku 13.49 pak vidíme detailnější pohled na clonku PLA1 v rozevřeném válci.

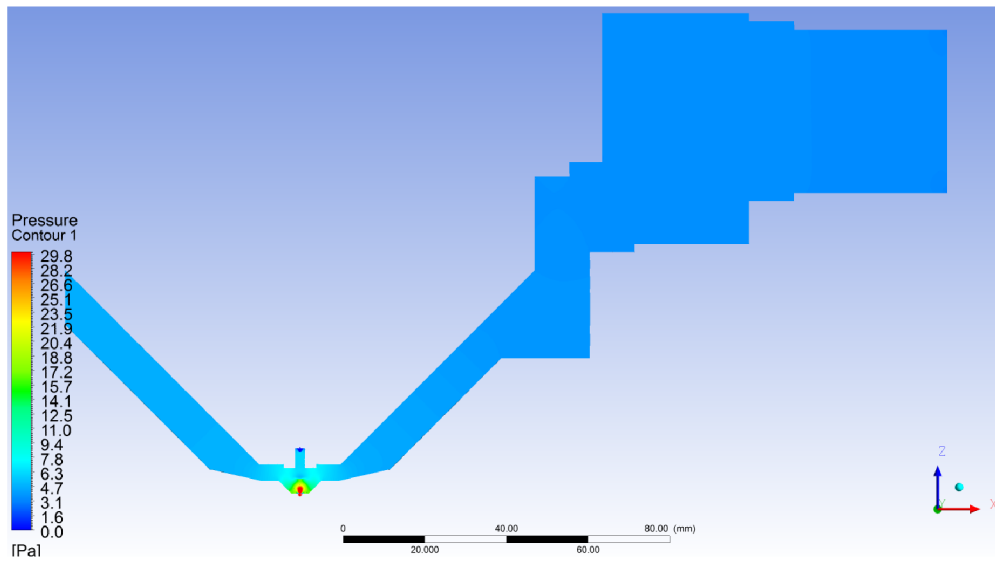


Obr. 13.48: Nastavení sítě v oblasti clonek

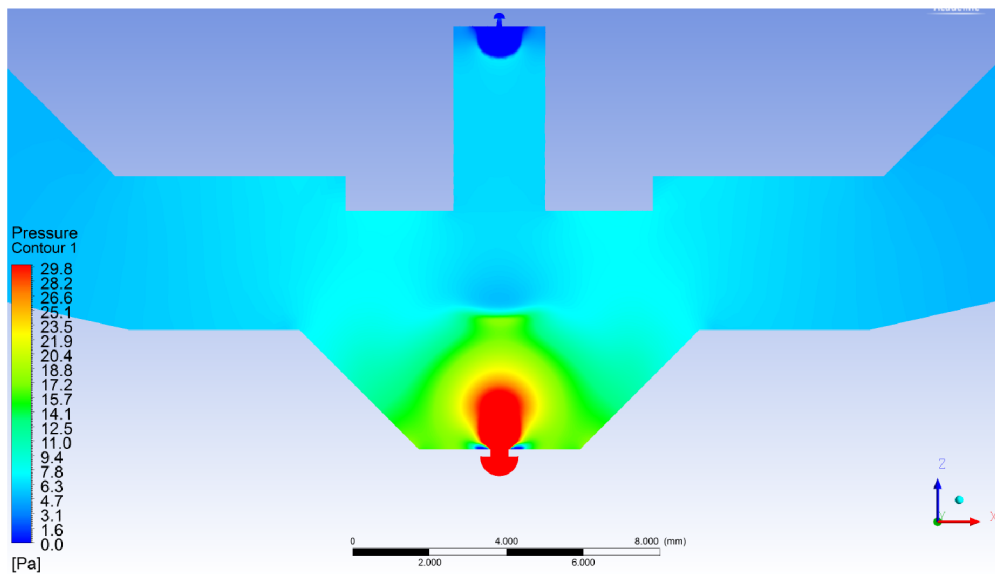


Obr. 13.49: Nastavení sítě v oblasti rozevřeného válce u clonky PLA1

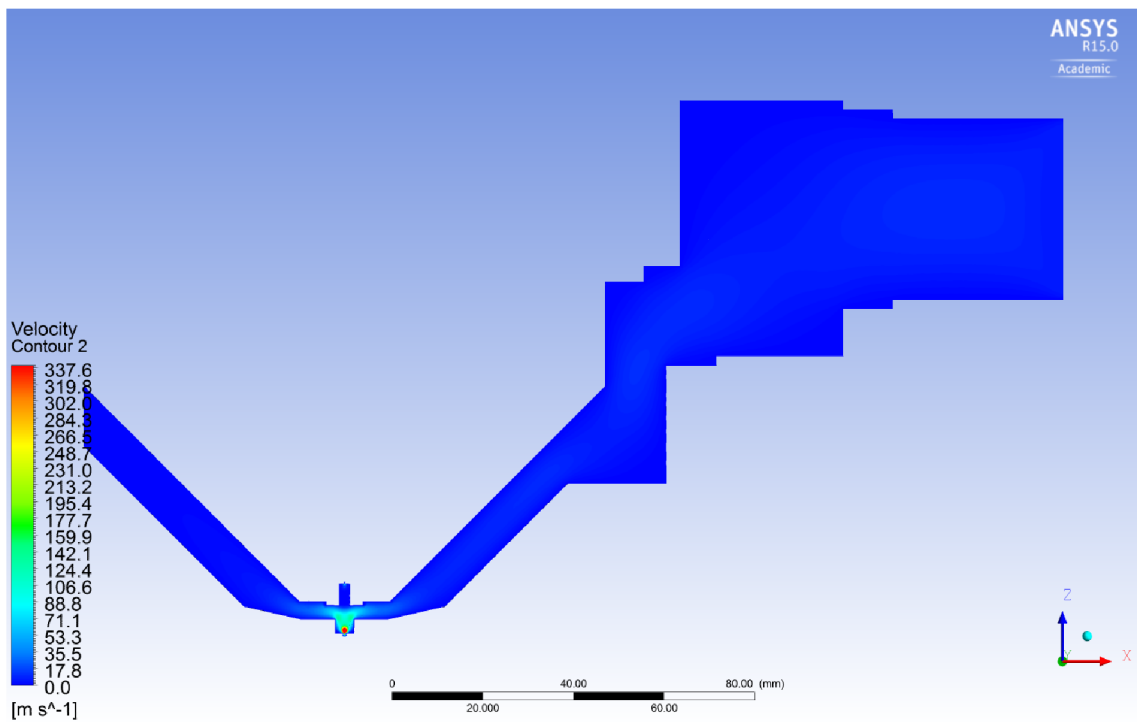
## 13.6.2 Výpočty



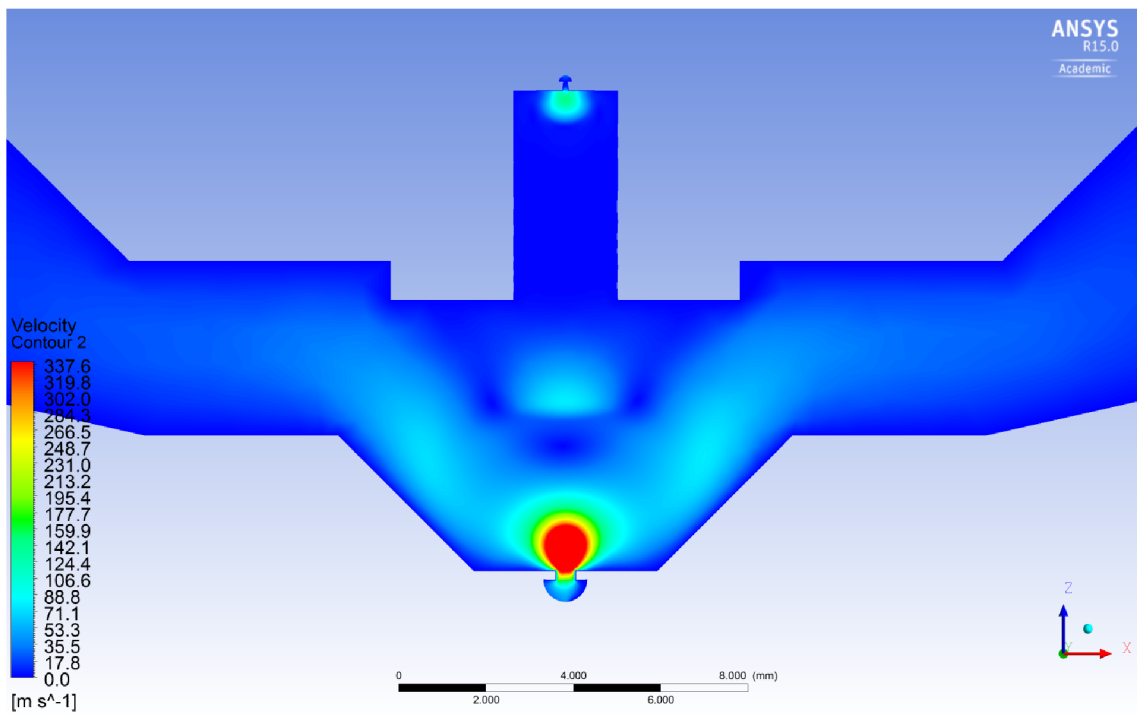
Obr. 13.50: Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře



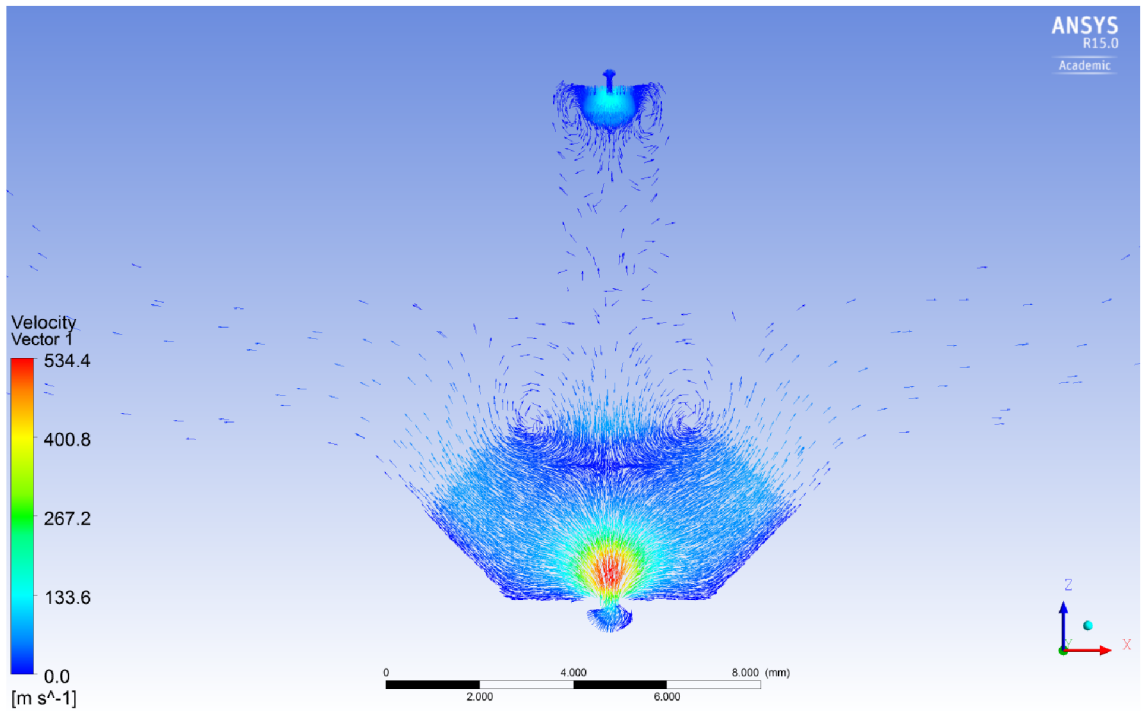
Obr. 13.51: Rozložení tlaku v diferenciálně čerpané komoře - Detail



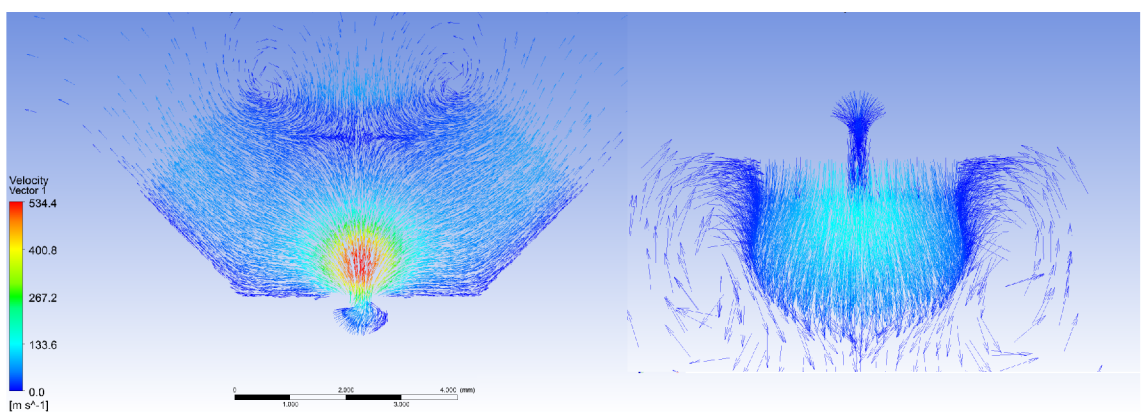
Obr. 13.52: Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře



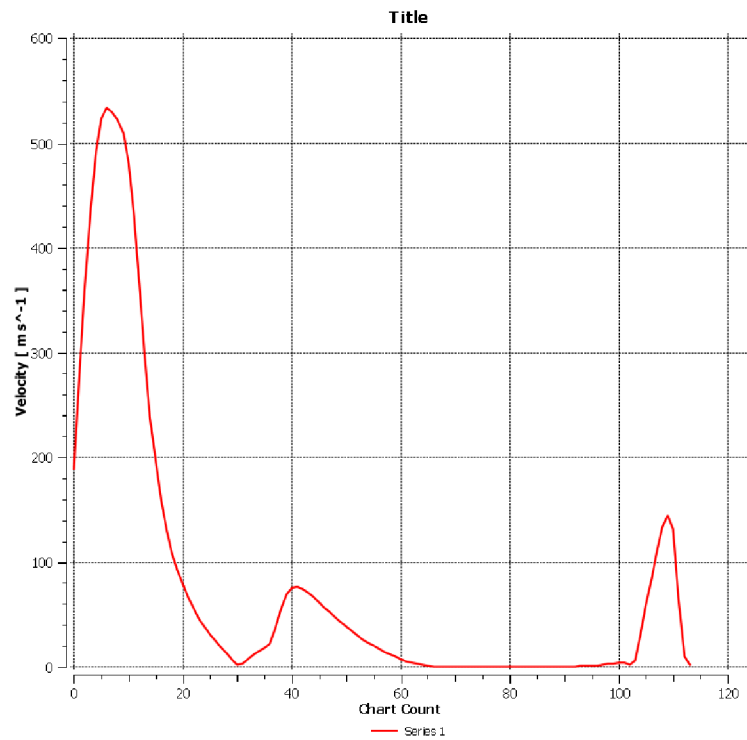
Obr. 13.53: Rozložení rychlosti proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail



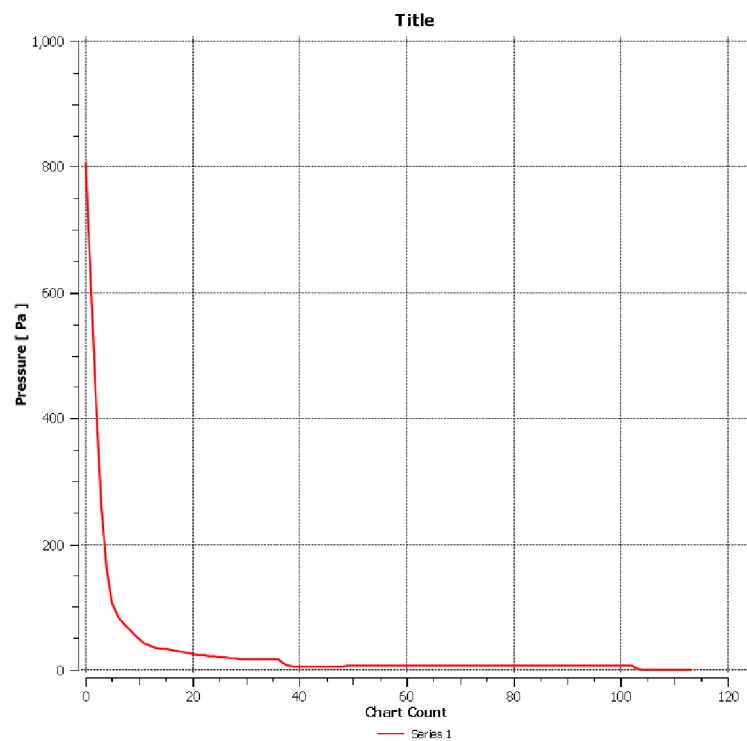
Obr. 13.54: Zobrazení vektorů proudění v diferenciálně čerpané komoře - Detail



Obr. 13.55: Zobrazení vektorů proudění v diferenciálně čerpané komoře - v levé části - oblast clonky PLA1, v pravé části - oblast clonky PLA2



Obr. 13.56: Průběh rychlosti na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.



Obr. 13.57: Průběh tlaku na dráze primárního svazku procházející diferenciálně čerpanou komorou.

### 13.6.3 Vyhodnocení výsledků simulace

Z dosažených výsledků šesté simulace se jeví rozšířená varianta s rozevřeným válcem v oblasti clonky PLA1 jako nejvhodnější. Tato varianta má válec rozevřený pod úhlem  $45^\circ$ , dochází tak ke snížení průměrného tlaku až na hodnotu 32,7Pa, což je nejnižší dosažená hodnota. Na obrázku vektorů proudění 13.54 je vidět, že nedochází k vytváření tak znatelných vírů jako u předchozích variant. To je způsobeno vznikem nadzvukového proudění, díky kterému dochází k rychlejšímu poklesu tlaku na dráze primárního svazku.



## 14 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá analýzou tvaru sacích kanálů diferenciálně čerpané komory.

První část této práce pojednává o základech elektronové mikroskopie. V úvodu celé práce jsme se krátce seznámili s historií mikroskopie a hlavními částmi mikroskopu typu SEM a ESEM. V práci jsou dále popsány základy proudění tekutin jak za normálních tlaků, kde se objevuje proudění laminární a turbulentní, tak při vakuu, kde je proudění molekulární a efúzní. V další kapitole jsme se věnovali základním zákonům o zachování hmoty, hybnosti a energie, které matematicky dokazují chování proudění. V části práce jsme se také obeznámili se systémy SolidWorks a Fluent. Systém SolidWorks sloužil k vymodelování 3D modelu nové koncepce diferenciálně čerpané komory. A pomocí systému Fluent byly provedeny analýzy.

Ve druhé části práce nalezneme kapitolu *Popis koncepcí*, která se zamýšlí nad navrhovanými koncepcemi. Je zde uvedeno šest variant tvaru diferenciálně čerpané komory, které byly navrhovány na základě výsledků jednotlivých simulací. Jednotlivé koncepty vycházejí z varianty číslo jedna, což je model stávajícího provedení komory. V oblasti clonky PLA1, která se nachází mezi komorou vzorku a diferenciálně čerpanou komorou, už není možné oblast více rozšiřovat, než je rozšířená ve variantě šesté, neboť jsme omezeni geometrickým tvarem současné koncepce komory vzorků. V další kapitole *Srovnání výsledků koncepcí* jsou vzájemně porovnávány všechny navrhované koncepce. Výsledky byly hodnoceny pomocí dvou kritérií. Prvním kritériem je hodnota tlaku v dráze primárního svazku v diferenciálně čerpané komoře, protože platí, čím nižší tlak, tím menší pravděpodobnost srážky elektronu s molekulami vzduchu. Druhým kritériem je průběh rychlosti a její průměrná hodnota na dráze primárního svazku procházejícího komorou, neboť rychlost v oblasti nadzvukového proudění výrazně charakterizuje průběh tlaku a celkový charakter proudění.

Z výsledků vyplynulo, že nejnižší hodnoty průměrného tlaku vykazují koncepce, které jsou válcového tvaru. Za nejlepší variantu považuji variantu šestou, která vycházela z páté varianty rozšířeného tvaru vylepšená o rozevření válce pod úhlem  $45^\circ$  v oblasti clonky PLA1, jež je mezi diferenciálně čerpanou komorou a komorou vzorku. Důvodem je, že v této oblasti dochází k nadzvukovému proudění plynu, které způsobuje v tomto prostoru vznik nižšího tlaku. Průměrný tlak dosáhl hodnoty 32,7Pa a je tak zhruba o 10Pa nižší než v případě první varianty stávající koncepce.

Závěrem práce jsou zobrazeny jednotlivé výsledky všech simulací, jež zobrazují rozložení tlaku s detailním pohledem na oblast clonek, rozložení rychlosti proudění s detailním pohledem na oblast clonek, dále znázorňující zobrazení vektorů proudění a grafy zobrazující průběhy rychlostí a tlaků na dráze primárního svazku v diferenciálně čerpané komoře.

## LITERATURA

- [1] Elektronová mikroskopie pro biology. NEBESÁŘOVÁ, Jana. *Elektronová mikroskopie pro biology: Trocha historie* [online]. 2001 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <<http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/1.0.html>>
- [2] PŘICHYSTAL, Vít. *NÁVRH SCINTILAČNÍHO DETEKTORU S JEDNOU CLONKOU PRO ENVIROMENTÁLNÍ ELEKTRONOVÝ RASTROVACÍ MIKROSKOP*. Brno, 2014. 62 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. JIŘÍ MAXA, Ph.D.
- [3] Elektronová mikroskopie. *Elektronová mikroskopie: Zvětšení* [online]. [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <[http://www.paru.cas.cz/lem/bak/1\\_4.htm](http://www.paru.cas.cz/lem/bak/1_4.htm)>
- [4] Elektronová mikroskopie. *Elektronová mikroskopie: Zobrazovací systém – TEM* [online]. [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <[http://www.paru.cas.cz/lem/bak/3\\_5.htm](http://www.paru.cas.cz/lem/bak/3_5.htm)>
- [5] HLAVATÁ, Pavla. *Návrh tvaru diferenciálně čerpané komory pro EREM*. Brno, 2014. 72 s. Klasické a španělské gymnázium, Brno-Bystrc, Vejrostova 2.
- [6] SKENOVACÍ (RASTROVACÍ) ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE: Workshop: Mikroskopické techniky SEM a TEM. In: ŠAFÁŘOVÁ, Klára. *SKENOVACÍ (RASTROVACÍ) ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE* [online]. [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <[http://nanosystemy.upol.cz/upload/18/safarova\\_sem.pdf](http://nanosystemy.upol.cz/upload/18/safarova_sem.pdf)>
- [7] HAVLÍČEK, Svatopluk, Josef JIRÁK a Zdenka ROZSÍVALOVÁ. *Diagnostika a zkušebnictví*. Brno, 2002. Skriptum. VUT
- [8] Elektronová mikroskopie pro biology. NEBESÁŘOVÁ, Jana. *Elektronová mikroskopie pro biology: Konstrukce mikroskopu* [online]. 2001 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <<http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/7.1.html#2>>
- [9] MAXA, Jiří. *Analýza proudění plynu v zařízeních elektronového mikroskopu*. Brno, 19.7.2008. Habilitační práce. Univerzita obrany.
- [10] KOZELSKÝ, A. *Scintilační detektor sekundárních elektronů pro REM pracující při vyšším tlaku v komoře vzorku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. JOSEF JIRÁK, CSc.
- [11] JANALÍK, Jaroslav. *HYDRODYNAMIKA A HYDRODYNAMICKÉ STROJE* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2014-12-02]. 190 s. Dostupné z: <<http://www.>

338.vsb.cz/PDF/Janalik-HYDRODYNAMIKAHYDRODYNAMICKESTROJE.pdf>  
Skripta. VŠB - TU Ostrava, Fakulta strojní.

- [12] NOVOTNÝ, Marek. *VYHODNOCENÍ VLIVU TVARU OTVORŮ CLONEK NA VÝSLEDNÝ TLAK NA DRÁZE SEKUNDÁRNÍCH ELEKTRONŮ V DETEKTORU POMOCÍ SYSTÉMU CAE*. Brno, 2011. 55 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. JIŘÍ MAXA, Ph.D.
- [13] HLADKÝ, David. *ANALÝZA PROUDĚNÍ PLYNU V DIFERENCIÁLNĚ ČERPANÉ KOMOŘE V ZÁVISLOSTI NA TVARU VSTUPNÍ TRYSKY*. Brno, 2014. 63 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. JIŘÍ MAXA, Ph.D.
- [14] STRUČOVSKÝ, Aleš. *Analýza rozložení teplotního profilu v pájecí peci pomocí systémů CAE*. Brno, 2013. 68 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$Z$	užitečné zvětšení
$\sigma_o$	rozlišovací schopnost oka
$\sigma_m$	maximální rozlišovací schopnost mikroskopu
$TEM$	Transmisní elektronový mikroskop
$SEM$	Skenovací elektronový mikroskop
$ESEM$	Environmentální skenovací elektronový mikroskop
$Re$	Reynoldsovo číslo
$Re_{krit}$	Reynoldsovo číslo – kritická hodnota
$v_s$	Střední rychlost v potrubí
$d$	Průměr potrubí
$\nu$	Kinematická viskozita
$\rho$	Hustota tekutiny
$x$	Dráha
$t$	Čas
$p$	Tlak
$v_x, v_y, v_z$	Rychlost v daném směru
$P$	Tlak
$V$	Objem
$N$	Počet částic
$k$	Boltzmannova konstanta
$T$	Teplota
$n$	Látkové množství
$R$	Molární plynová konstanta

# SEZNAM PŘÍLOH

Seznam příloh na CD-ROM:

- 1) DP\_Bilek\_Michal.pdf