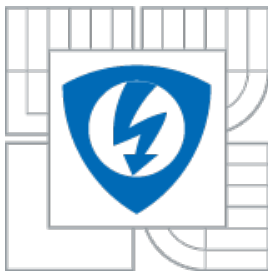




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

## OPTIMALIZACE TVARU ČERPÁNÍ DIFERENCIÁLNĚ ČERPANÉ KOMORY PRO NOVOU KONCEPCI ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU

OPTIMIZING THE SHAPE OF THE PUMPING CHAMBERS DIFFERENTIALLY PUMPED CHAMBER FOR A  
NEW CONCEPT OF THE ELECTRON MICROSCOPE.

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Ondřej Polách

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. Ondřej Polách

**ID:** 119576

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Optimalizace tvaru čerpání diferenciálně čerpané komory pro novou koncepci elektronového mikroskopu**

## 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 nové koncepce diferenciálně čerpané komory a proveďte analýzu první varianty. Na jejím základě nalezněte optimální tvar sacích kanálů snižující rušivé vlivy na odsávání plynu z prostoru průchodu 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:**

Předkládaná práce se zabývá problematikou elektronové mikroskopie především environmentální elektronovou mikroskopií. Hlavním úkolem práce bude návrh optimálního tvaru diferenciallyně čerpané komory, oddělující tlakový rozdíl mezi tubusem a komorou vzorku pro novou koncepci elektronového mikroskopu. Pomocí systému Ansys Fluent bude analyzováno čerpání plynu. Následně podle získaných výsledků bude modifikován tvar diferenciallyní komory tak aby bylo dosaženo co nejnižšího tlaku plynu na dráze elektronového svazku.

## **Abstract:**

The present work deals with electron microscopy, electron microscopy primarily environmental. The main task of the work will draft the optimal shape of the differentially pumped chamber, dividing the pressure difference between tube and chamber with sample for a new concept of an electron microscope. By ANSYS Fluent will be analyzed pumping gas. Subsequently, according to the results obtained will be a modified form of the differential Chamber and to achieve the lowest gas pressure on the track of the electron beam.

## **Klíčová slova:**

Elektronová mikroskopie, diferenciallyně čerpaná komora, EREM, Ansys Fluent, clona, elektronový svazek, deflektor.

## **Keywords:**

Electron microscopy , differentially pumped chamber , ESEM , Ansys Fluent , aperture, electron beam, deflector.

## Bibliografická citace:

POLÁCH, O. *Optimalizace tvaru čerpání diferenciálně čerpané komory pro novou koncepci elektronového mikroskopu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 76 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D..

## Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma „**Optimalizace tvaru čerpání diferenciálně čerpané komory pro novou koncepci elektronového mikroskopu**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 28. května 2015

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

## Obsah

1	Historie elektronové mikroskopie .....	8
2	Elektronová mikroskopie .....	9
2.1	Transmisní elektronová mikroskopie (TEM) .....	10
2.2	Rastrovací elektronový mikroskop (SEM) .....	12
2.2.1	Konstrukce rastrovacího elektronového mikroskopu.....	12
2.3	Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie.....	14
2.4	EREM typu AQUASEM .....	15
2.5	Elektronová tryska – zdroj elektronů.....	16
2.6	Vakuový systém .....	17
3	Proudění tekutin .....	18
3.1	Rozdělení proudění.....	19
3.1.1	Laminární proudění .....	19
3.1.2	Turbulentní proudění.....	20
3.2	Vakuum .....	21
3.2.1	Získávání vakua.....	21
3.2.2	Proudění plynu vakuovým prostředím .....	22
3.2.3	Molekulární proudění .....	22
3.2.4	Efúzní proudění .....	23
3.3	Nestlačitelné a stlačitelné proudění .....	24
3.4	Základní rovnice popisující proudění v diferenciálně čerpané komoře. ....	27
3.5	Srážky molekul, střední volná dráha .....	28
3.6	Střední volná dráha přenosové jevy.....	31
3.7	Rozptylové režimy svazku primárních elektronů .....	32
3.8	Kritické proudění .....	33
3.8.1	Teplotní parabola.....	33
3.8.2	Tlaková hora.....	34
3.8.3	Hugoniotův teorém.....	36
4	Diferenciálně čerpaná komora.....	37
5	Výpočetní systém použitý v práci .....	41
5.1	Ansys fluent.....	41
5.2	Metoda konečných objemů.....	42
5.3	Stěnová funkce .....	44
6	Popis navržených koncepcí .....	45
6.1	První varianta.....	45
6.2	Druhá varianta .....	46

6.3	Třetí varianta.....	47
6.4	Čtvrtá varianta .....	48
6.5	Pátá varianta .....	50
7	Nastavení okrajových podmínek.....	51
8	Vyhodnocení jednotlivých koncepcí.....	52
8.1	Vyhodnocení výsledků první varianty.....	53
8.1.1	Grafické vyhodnocení rychlosti plynu .....	53
8.1.2	Grafické vyhodnocení tlaku plynu .....	54
8.1.3	Grafické vyhodnocení stěnové funkce .....	55
8.1.4	Vyhodnocení závislost tlaku a rychlosti proudění na dráze primárního svazku	56
8.2	Vyhodnocení výsledků druhé varianty.....	56
8.2.1	Grafické vyhodnocení rychlosti plynu .....	56
8.2.2	Grafické vyhodnocení tlaku plynu .....	58
8.2.3	Grafické vyhodnocení stěnové funkce .....	59
8.2.4	Vyhodnocení závislost tlaku a rychlosti proudění na dráze primárního svazku	59
8.3	Vyhodnocení výsledků třetí varianty.....	59
8.3.1	Grafické vyhodnocení rychlosti plynu .....	60
8.3.2	Grafické vyhodnocení tlaku plynu .....	61
8.3.3	Grafické vyhodnocení stěnové funkce .....	62
8.3.4	Vyhodnocení závislost tlaku a rychlosti proudění na dráze primárního svazku	63
8.4	Vyhodnocení výsledků čtvrté varianty.....	63
8.4.1	Grafické vyhodnocení rychlosti plynu .....	63
8.4.2	Grafické vyhodnocení tlaku plynu .....	65
8.4.3	Grafické vyhodnocení stěnové funkce .....	66
8.4.4	Vyhodnocení závislost tlaku a rychlosti proudění na dráze primárního svazku	66
8.5	Vyhodnocení výsledků páté varianty .....	67
8.5.1	Grafické vyhodnocení rychlosti plynu .....	67
8.5.2	Grafické vyhodnocení tlaku plynu .....	68
8.5.3	Grafické vyhodnocení stěnové funkce .....	69
8.5.4	Vyhodnocení závislost tlaku a rychlosti proudění na dráze primárního svazku	70
9	Souhrnné výsledky .....	71
10	Závěr.....	74
11	Seznam použité literatury .....	76

# Úvod

Elektronové mikroskopy mají dnes zastoupení v mnoha vědních a průmyslových oborech. Vědní disciplína, která se zabývá tímto oborem, se nazývá elektronová mikroskopie. Tato technologie umožňuje zkoumání hmoty s mnohem větší rozlišovací schopností než klasické optické mikroskopy. Tato vlastnost je dosažena využitím zaostřeného svazku urychlených elektronů namísto světelného paprsku.

První elektronový transmisní elektronový (TEM) mikroskop byl sestaven v roce 1932. Další zásadním krokem ve vývoji elektronových mikroskopů bylo sestavení rastrovacího elektronového mikroskopu (REM). Avšak oba tyto typy měli nevýhodu a to sledování organických vzorků při jejich přirozeném tlaku. Problematické bylo sledování vzorků, které obsahovali větší nebo menší množství vody (například živé organismy, tkáně). Proto musely vzorky projít složitým procesem přípravy. Bylo nutné například vzorky sušit, pokovovat atd.

Z těchto důvodů byl vynalezen environmentální rastrovací mikroskop (EREM), který vychází z technologie rastrovacího elektronového mikroskopu. Tento mikroskop přinesl možnost zkoumání vzorků při tlaku v komoře vzorku až do 2 kPa, tedy i vzorky obsahující vodu a nevodivé vzorky bez jejich pokovení. Zásadní konstrukční částí u tohoto typu mikroskopů je diferenciálně čerpaná komora, která odděluje tubus mikroskopu o tlaku  $10^{-3}$  Pa a komoru vzorku, kde může dosahovat tlak až 2000 Pa.

Tato diplomová práce se v první části zabývá teoretickým úvodem do problematiky elektronové mikroskopie, teorie proudění plynů, základní rovnice popisující proudění plynů. Následně je popsána problematika environmentální rastrovací mikroskopie a popis mikroskopu typu AQUASEM. Dále představení výpočetního programu ANSYS Fluent, který je využit pro výpočty v oblasti proudění plynu.

Následně bude představeno 5 navržených koncepcí diferenciálně čerpané komory, kde bude analyzována rychlost a tlak v oblasti průchodu primárního elektronového svazku i v celé diferenciální komoře. V závěru diplomové práce bude vyhodnocení jednotlivých variant a následně výběr nejvhodnější varianty, která nejlépe eliminuje rušivé vlivy při čerpání plynu v oblasti elektronového svazku.

# 1 Historie elektronové mikroskopie

Elektronový mikroskop bývá označen jako vynález 20. století. K jeho sestrojení avšak nestačila jedna geniální myšlenka, ale cesta k němu vedla přes postupné skládání objevů mnoha badatelů ve spojení s rozvíjejícím se technologickým pokrokem. Základním kamenem byl objev elektronu, který popsal J.J.Thompson v roce 1897. Dalším krokem, který vedl do mirosvěta a nanosvěta, byl publikován v roce 1925 Luisem de Brogliem, že rychle letící částice mají nejen korpuskulární, ale i vlnový charakter jako například viditelné světlo. Důležitou roli na cestě k elektronovému mikroskopu sehráli práce H. Buscha v roce 1926, které se zabývaly analogií ve vychylování elektronového svazku pomocí magnetických polí solenoidů [1].

Konkrétní myšlenka zkonstruovat transmisní elektronový mikroskop vznikla na Vysoké škole technické v Berlíně v týmu vedeném Maxem Knollem a Ernstem Ruskou. První mikroskop zkonstruoval tento tým na počátku třicátých let a v roce 1932 se v článku Knolla a Rusky objevily první fotografie z elektronového mikroskopu a popis konstrukce elektromagnetické čočky. Až v roce 1986 dostal Ruska za konstrukci elektronového mikroskopu Nobelovu cenu [1].

Cesta skenovacího (rastrovacího) mikroskopu na svět byla poněkud složitější a zdlouhavější. V roce 1938 německý fyzik M. von Ardenne popsal teoreticky i prakticky princip rastrování u transmisního elektronového mikroskopu. Vlastní skenovací elektronový mikroskop poprvé sestrojil americký vědec Zworikyn, která vynalezl fotonásobič a použil jej k detekci sekundárních elektronů. Ve stejné době v Anglii skupina vedená C. W. Oatleyem pracovala také na vývoji SEMu, kde výsledky jejich práce byly použity na výrobu komerční verze firmou Cambridge Scientific Instruments v roce 1965 [1].

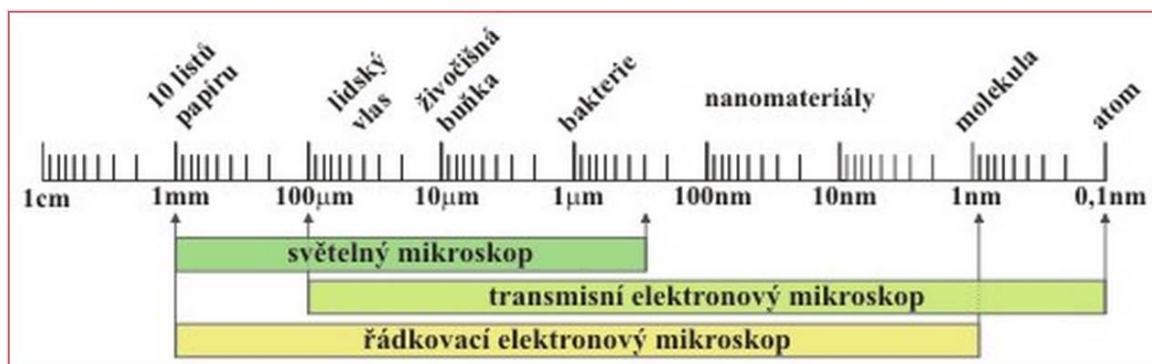
Výrobou a vývojem elektronových mikroskopů nejrůznější konstrukce se zabývají firmy JEOL, FEI, Tescan. Bývalé Československo dokázalo držet se světem v oblasti vývoje a výroby elektronových mikroskopů. V Ústavu přístrojové techniky v Brně se konstrukcí elektronových mikroskopů zabývala od šedesátých let skupina vedená A. Drahošem a A. Delongem. Brno si tuto tradici drží do současnosti i když v podobě nových firem (Delong instruments a Tescan) [1,3].



## 2 Elektronová mikroskopie

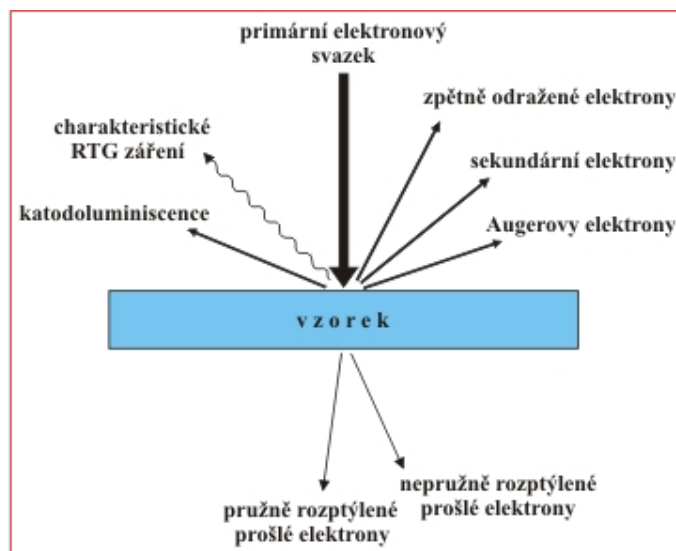
Elektronová mikroskopie je důležitá a čím dál častěji používaná technika zkoumání hmoty s velmi širokým využitím např. materiálových, biomedicínských vědách atd.

Pod pojmem mikroskop si mnozí představí optický přístroj, který využívá viditelného světla pro pozorování vzorků. Elektronové mikroskopy patří také mezi optické přístroje, které však využívají urychlený elektronový svazek místo světelného svazku a k zaostření používají elektromagnetické čočky místo skleněných. Díky interakci elektronů s atmosférou, která by ovlivňovala dráhu letu elektronů, musí být pozorovaný vzorek i svazek elektronů ve vakuu. Jednou z hlavních charakteristik je mezní rozlišovací schopnost, jenž je úměrná vlnové délce použitého zařízení. Svazek elektronů s podstatně kratší vlnovou délkou (0,01-0,001 nm), než má viditelné světlo (400-700 nm), je schopen dosáhnout mnohem vyššího rozlišení. Typická hodnota objektů, která je možná sledovat pomocí elektronových mikroskopů je znázorněna na obrázku 1. Pro srovnání je uveden i rozsah optického mikroskopu [2].



Obrázek 2.1: Typická velikost objektů, které lze pozorovat elektronovým mikroskopem [2].

Lze říci, že elektronové mikroskopy patří mezi nejvšestrannější zařízení pro pohled do mikrosvěta a nanosvěta, a to nejen v oblasti materiálového výzkumu. Mohou poskytovat komplexní informace o struktuře, krystalografii, chemickém složení, ale i dalších vlastnostech zkoumaného materiálu. Záleží na tom, jakou informaci vycházející z interakce elektronového svazku se zkoumaným vzorkem. Například při zkoumání chemického složení vzorku, musí mít mikroskop nainstalován detektor charakteristického rentgenového záření. Při dopadu elektronového svazku na povrch zkoumaného vzorku se uvolňuje jak rentgenové záření tak mnoho dalších signálů, ze kterých lze zjišťovat další informace o vzorku (viz obrázek 2) [2].

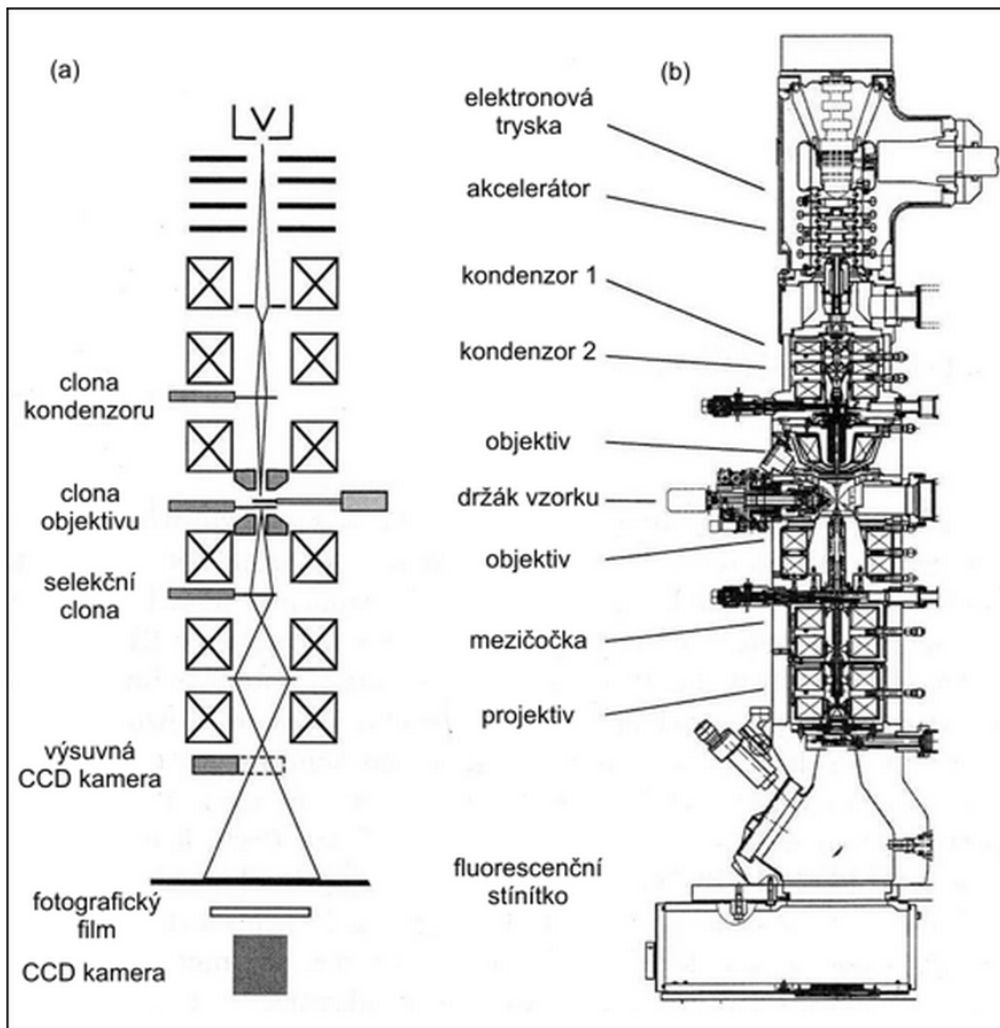


Obrázek 2.2: Signály vzniklé při dopadu elektronového svazku [2].

## 2.1 Transmisní elektronová mikroskopie (TEM)

Transmisní elektronový mikroskop je složité technické zařízení, které umožňuje sledování vzorků do tloušťky 100 nm při vysokém zvětšení a s velkou rozlišovací schopností. Lze jej považovat za analogii světelného mikroskopu. Avšak světelný zdroj je zde nahrazen zdrojem elektronů (elektronovým dělem), skleněné čočky jsou nahrazeny čočkami elektromagnetickými a místo okulárů je použito fluorescenční stínítko. Celá dráha elektronů od jejich emise až po stínítko musí být ve vakuu z důvodu absorpce elektronů molekulami vzduch a jejich možnou kontaminaci jednotlivých částí mikroskopu. Výstupní obraz vzniká průchodem elektronů zkoumaným vzorkem. Urychlovací napětí elektronů je v rozmezí (100-400 kV). Po průchodu elektronů vzorkem je obraz zvětšen a zaostřen pomocí čoček na objektivu. Dále se objeví na obrazovce, fotografickém filmu, nebo je dále detekován senzory [3,4].

Transmisní elektronový mikroskop se skládá ze čtyř nejdůležitějších částí: tubusu s elektronovou optikou, vakuového systému, elektroniky zajišťující napájení čoček, zaostřování a vychylování elektronového svazku a zdroj vysokého napětí pro elektronové dělo. Nedílnou součástí elektronového mikroskopu je software, který má každý výrobce svůj vlastní [3,4].



Obrázek 2.3: Schéma a řez elektronového transmisního mikroskopu[5].

## 2.2 Rastrovací elektronový mikroskop (SEM)

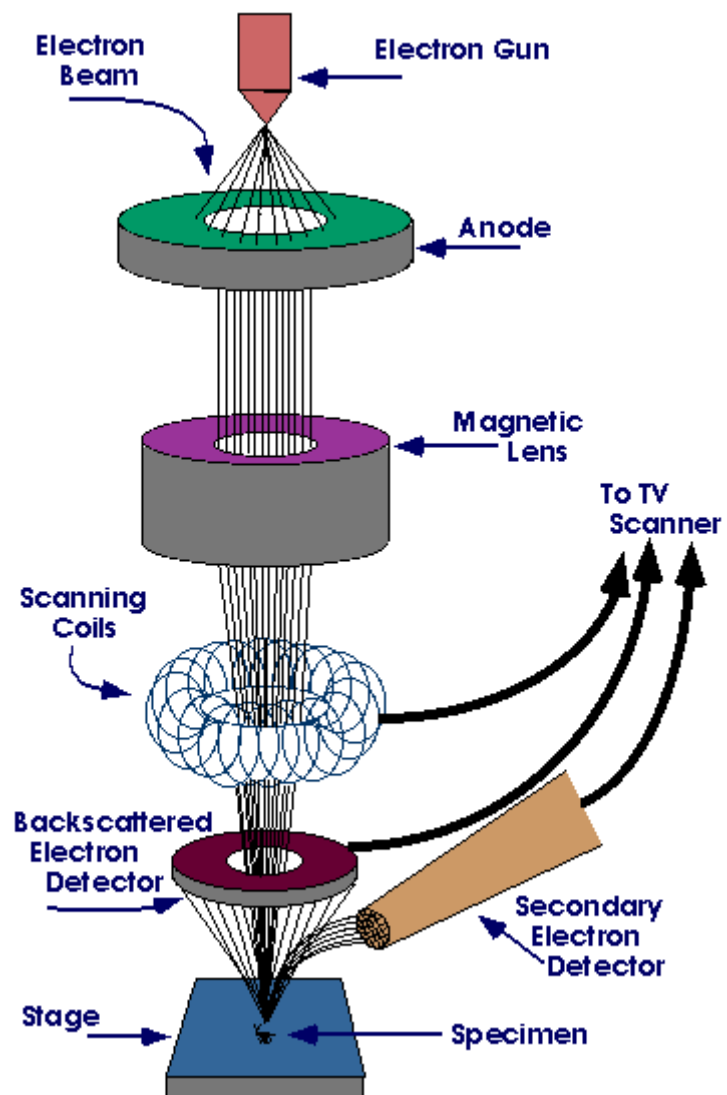
Rastrovací (skenovací) elektronový mikroskop dále jen SEM je určen ke sledování povrchů materiálů. Jedná se opět o obdobu světelného mikroskopu, kde světelné paprsky jsou nahrazeny svazkem elektronů. Obraz je zde tvořen sekundárními nebo odraženými elektrony zachycenými pomocí detektorů. Výhodou tohoto systému je generování dalších signálů při interakci elektronového svazku se vzorkem viz obrázek 2. Při detekci těchto signálů je možné určit například prvkové složení vzorku a při srovnání s vhodným standardem je možné určit i kvantitativní zastoupení prvků[1,4].

### 2.2.1 Konstrukce rastrovacího elektronového mikroskopu

Ve srovnání s TEM má rastrovací elektronový mikroskop má o polovinu kratší tubus. To je způsobeno tím, že u SEM se detekují signály, které uvolní svazek elektronů nad povrchem preparátu. Proto není potřeba soustavy čoček, které u TEM tvoří zobrazovací systém pod úrovní samotného vzorku. Místo toho jsou u SEM instalovány detektory sekundárních a odražených elektronů a elektronikou na zesílení a zpracování signálu a vytvoření obrazu [1].

Zjednodušené schéma je na obrázku 4. Zdrojem elektronů je v horní části tubusu stejně jakou u TEM nejčastěji používané přímo žhavené wolframové vlákno. Z důvodu požadavku vyššího emisního proudu u SEM, je potřeba při každém zapnutí mikroskopu zkontrolovat vystředění katody a žhavit ji přesně do nasyceného stavu. Rozlišovací schopnost u SEM do značné míry závisí na průměru zaostřeného primárního svazku dopadajícího na povrch vzorku a průměr svazku je zase ovlivněn průměrem katody. Proto se rozlišovací schopnost u SEM využívající wolframovou přímo žhavenou katodou pohybuje mezi 10 až 15nm. V současné době se využívají přístroje využívající autoemisní trysku. Autoemisní tryska má mnohem menší průměr hrotu a větší emisi elektronu, proto umožňuje dosáhnout rozlišovací schopnosti pod 1 nm. Elektrony jsou urychleny potenciálem mezi katodou a anodou, která má ve svém středu otvor ve tvaru kruhu, kde protéká svazek elektronů do soustavy elektromagnetických čoček. V SEM se používá pro zkoumání vzorků urychlovací napětí do 30 kV. Úroveň urychlovacího napětí závisí na typu preparátu, požadovaném zvětšení a do jaké míry se nabíjí povrch zkoumaného vzorku. Snižováním urychlovacího napětí je možné do jisté míry eliminovat nepříznivé efekty, na druhé straně se zvyšují chromatická a sférická vada čoček, což vede ke snížení rozlišovací schopnosti mikroskopu[1].

Elektromagnetickými čočkami zkoncentrovaný paprsek primárních elektronů je před dopadem na povrch vzorku rozpořbován vychylovacími cívkami tak, že pokryje řádky – rastruje – malou plochou. Zároveň s primárním svazkem elektronů rastruje i paprsek tvořící obraz na obrazovkách mikroskopu[1].



Obrázek 2.4: Zjednodušené schéma konstrukce SEM [6].

## 2.3 Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie

Vzorky pro běžnou rastrovací elektronovou mikroskopii musí splňovat následující kritéria: musí být čisté, suché, elektricky vodivé a musí odolat podmínkám vakua.

Z tohoto důvodu byl vyvinut environmentální rastrovací elektronový mikroskop (EREM), který umožňuje sledování vzorků, které nevyhovují klasické REM. Mezi tyto vzorky patří například tkaniny, kosmetické přípravky, tuky a emulze. Základní konstrukce EREM je stejná jako u REM. Rozdíl v konstrukci je pouze v oddělení vakuového prostředí uvnitř tubusu mikroskopu od prostředí zkoumaného vzorku s vyšším tlakem pomocí diferenciallyně čerpané komory[7].

Environmentální rastrovací elektronový mikroskop přináší tedy možnost sledovat přírodní vzorky v podmínkách vysokého tlaku plynu, až 3kPa ve kterém se povrch nevodivého preparátu nenabíjí, ale dokonce lze vzorek udržet vlhký. Mikroskopy ESEM jsou schopny pracovat i ve vakuu pod  $10^{-3}$  Pa. Tento pracovní tlak odpovídá klasickému rastrovacímu elektronovému mikroskopu[7].

Dosahuje-li tlak plynu v komoře vzorku environmentálního rastrovacího mikroskopu vyšších hodnot, začne docházet k zvýšenému počtu srážek elektronů primárního svazku s molekulami a atomy plynu, což způsobí rozptyl primárního elektronového svazku. Zvyšující se tlak plynu, pracovní vzdálenost a snižující se urychlovací napětí způsobí zvětšení průměru primárního elektronového svazku, což je nežádoucí jev, který způsobí zhoršení rozlišovací schopnosti mikroskopu[7].

Při tlaku vyšším než 200 Pa uvnitř komory vzorku se neprojevuje povrchový záporný náboj na ionizačních vzorcích způsobený ionizačními srážkami atomů a molekul plynu s elektrony, protože je tento náboj kompenzován kladnými srážkovými ionty. Tento proces umožňuje sledování elektricky nevodivých vzorků bez nutnosti úpravy jejich povrchů elektricky vodivou vrstvou. Je-li tlak nejlépe vodních par v komoře vzorku vyšší než 611 Pa (při teplotě 0 °C), lze pozorovat vzorky obsahující větší nebo menší množství vody bez jejich vyschnutí a nebo zhroucení jejich struktury[7].

## 2.4 EREM typu AQUASEM

Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie se stala trendem v elektronové mikroskopii posledních let. Otevřela novou oblast mikroskopických metod, která umožňuje získávat informace o povrchové struktuře preparátů obsahujících vodu. Výhodou je zkoumání vzorků v jejich přirozeném stavu, bez jakékoliv úpravy před pozorováním. Prostřednictvím EREM typu AQUASEM lze pozorovat měkkých tkání, dynamické děje a reakce probíhající v plynném prostředí a při tlaku vyšším než je tlak nasycených vodních par. Tato metoda našla své uplatnění v oblasti medicíny, biologie, fytoologie, ekologie ale i v dalších oborech.

Nová konstrukce EREM zdokonaluje elektronově optické části tubusu, pro stopu primárního elektronového svazku v jednotkách nanometrů, na vylepšeném návrhu diferenciálně čerpané komory, která umožní dosáhnout většího zorného pole při zmenšené pracovní vzdálenosti a na efektivnějším čerpacím systému včetně aperturních clon oddělujících tlakové spády. V tubusu mikroskopu je vakuum o tlaku  $10^{-3}$  Pa, naopak v komoře vzorku může být až 2 kPa. V diferenciálně čerpané komoře je tlak 30 Pa. Mikroskop umožňuje záznam obrazu vzorků v několika různých kontrastních módech a to díky kombinovanému detekčnímu systému signálních elektronů. Jedinou součástí je monokrystalický detektor zpětně odražených elektronů obsahující krystal YAG nové generace. Krystal vytváří nosnou část pro elektrodový systém ionizačního detektoru, který pracuje principu srážkového mechanismu mezi signálními elektrony a molekulami plynu. Zároveň vytváří tlak oddělující clonu. Změnou napětí připojeného na elektrodách lze dosáhnout změnou kontrastu obrazu vzorku.

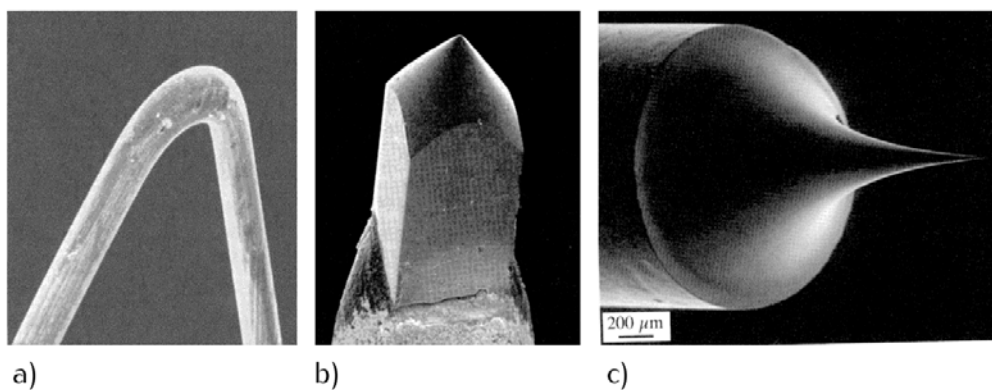
Mikroskop obsahuje zařízení, které je schopno chlazení vzorků až na  $-30^{\circ}\text{C}$  a také zařízení regulaci vodních par v komoře vzorku. Pomocí cyklického zavodňování vzorku pomocí vodní injekce v komoře vzorku se omezuje destrukce měkkých tkání během procesu čerpání komory. Mikroskop může pracovat za zvýšeného tlaku i ve vakuu v komoře vzorku. Ve vakuu dosahuje mikroskop rozlišení 4 nm a zvětšení až 300 000 [7].

## 2.5 Elektronová tryska – zdroj elektronů

Každý elektron je v atomu vázán jistou výstupní energií. Aby byl tento elektron z vazby uvolněn, musí mu být dodána energie, která je vyšší než jeho výstupní energie. Toto lze zajistit těmito způsoby:

1. **Sekundární emise** – studené kovové vlákno se bombarduje urychlenými ionty, které nárazem uvolňují elektrony z povrchu katody. Tento způsob se dnes již nevyužívá.
2. **Termoemise** – zahříváme-li katodu, zvyšujeme její vnitřní energii. Překročí-li teplota katody jistou mezní teplotu, dochází následně k uvolňování elektronů z jejího povrchu. Tento způsob je často využíván.
3. **Autoemise** – proti studenému kovovému vláknu, odleptanému do tvaru hrotu, umístíme elektrodu s vysokým kladným napětím. V okolí hrotu vzniká silné elektrické pole, které vytrhává velké množství elektronů z jejího povrchu. Nevýhodou tohoto způsobu je požadována přítomnost velmi vysokého vakua  $10^{-6}$  až  $10^{-7}$  Pa.

Zdroje elektronů jsou v elektronovém mikroskopu nazývána elektronická tryska (elektronové dělo). Elektronové dělo se skládá z katody, tzv. Wehneltova a anody. Jako katoda se velmi často používá wolframové vlákno, které je přímo žhavené na teplotu  $2800^{\circ}\text{C}$ . V posledních letech se začali využívat jiné zdroje elektronů, a to elektronová tryska na bázi hexaboridu lanthanu (LaB6) která emituje 10krát více elektronů než wolframová tryska zahřátá na stejnou teplotu. Dalším zástupcem je tryska emitující elektrony vlivem elektrického pole (field emission gun – FEG). V tomto případě jsou elektrony vysávány s velmi ostrého hrotu silným elektrickým polem. S FEG lze docílit až tisícinásobné elektronové hustoty [3].



Obrázek 2.5: Katody elektronových mikroskopů: a) wolframová, b) LaB6, c) autoemisní [3].



## 2.6 Vakuový systém

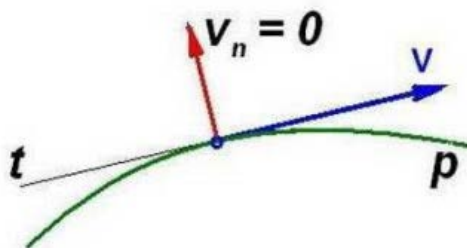
Vnitřní prostor tubusu, ve kterém se pohybují elektrony, musí být vakuovaný. A to z těchto důvodů:

1. Elektronová tryska musí být izolována vakuem, protože vzduch není dostačující izolant. Vzniká nebezpečí elektrického výboje mezi katodou a anodou trysky.
2. Vzduch obsahuje molekuly a uhlovodíky, které způsobují kontaminaci tubusu i vzorku.

Hlavní důvod čerpání prostoru tubusu je snaha eliminovat náhodné srážky urychlených primárních elektronů s molekulami vzduchu, které by vedly ke změnám energie a trajektorii pohybu. Pro dosažení pracovního vakua (minimálně  $10^{-3}$  až  $10^{-5}$  Pa) musí být mikroskop vybaven dostatečně výkonnými vývěvami. Nejčastěji se používají: rotační, difúzní, iontové a turbomolekulární vývěvy. Rotační olejová vývěva se používá pro předčerpání zavzdušněného vnitřního prostoru mikroskopu, tato vývěva je schopna snížit tlak přibližně na  $10^{-1}$  Pa. Po dosažení této hodnoty se zapíná difúzní vývěva, která odpařováním a zpětnou kondenzací speciálního oleje je schopna snížit tlak na  $10^{-3}$  Pa. Prostor elektronové trysky vyžaduje nejvyšší stupeň vakua až  $10^{-7}$  Pa a je ho dosahováno pomocí iontových vývěv [1,3].

### 3 Proudění tekutin

Proudění tekutin se vyšetřuje v prostoru, rovině nebo po křivce a to jako sledování pohybu dané částice kapaliny jako hmotného bodu, nebo se sleduje celý proud v určitém časovém okamžiku. Dráha neboli trajektorie je dána obecně čarou, kterou probíhá částice tekutiny. Za ustáleného proudění se dráhy částic nemění v čase, zatím co u neustáleného proudění mohou být v každém časovém okamžiku odlišné [8].



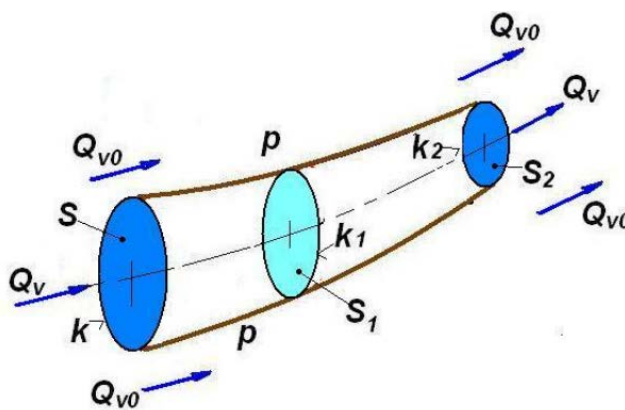
Obrázek 3.1: Proudnice proudění [8].

Proudnice p viz obrázek 6 jsou obálkou vektorů rychlostí a jejich tečny dávají směr vektoru rychlosti. U neustáleného proudění vytvářejí proudnice různé částice a nejsou stejné s dráhami částic. U ustáleného proudění se rychlost s časem nemění, z toho důvodu mají proudnice stále stejný tvar a jsou totožné s dráhami částic.

Proudová trubice je tvořena svazkem proudnic, které prochází zvolenou uzavřenou křivkou k. Plášť proudové trubice má stejné vlastnosti jako proudnice.

Protože je směr rychlostí dán tečnami k proudnicím, je v každém bodě pláště proudové trubice normálová složka rychlosti nulová. Z toho důvodu nemůže žádná částice projít proudovou trubicí. Proudová trubice rozděluje prostorové proudové pole na dvě části.

Jednu část tvoří vnitřek trubice proudové trubice. Částice tekutiny nemohou přetékat z jedné části proudového pole do druhého, a proto platí, že všechny částice protékají průřezem S proudové trubice, musí protékat libovolnými průřezy S1, S2 stejné proudové trubice. Jestliže se průřez proudové trubice blíží nule, vznikne proudové vlákno. Proudová trubice představuje pomyslné potrubí [8].



Obrázek 3.2: Proudová trubice[8].

### 3.1 Rozdělení proudění

Proudění kapalin lze rozdělit podle několika hledisek:

#### A. Podle fyzikálních vlastností kapalin

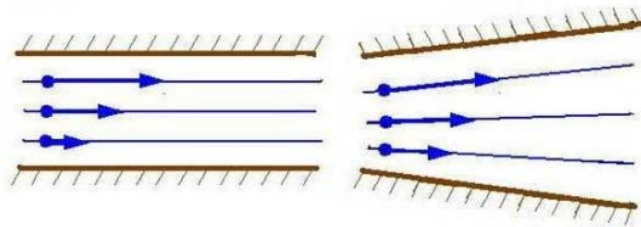
1. Proudění ideální kapaliny
  - a) Potencionální proudění (nevířivé) – částice se pohybují přímočaře nebo křivočaře po dráhách tak, že vůči pozorovateli se neotáčejí kolem své osy
  - b) vířivé proudění – částice se vůči pozorovateli natáčejí kolem vlastních os.
2. Proudění skutečných (vazkých)kapalin
  - a) Laminární proudění – částice se pohybují ve vrstvách (deskách), aniž se přemísťují do průřezu.
  - b) Turbulentní proudění – částice mají kromě postupné rychlosti turbulentní (flukтуаční) rychlost, již se přemísťují do průřezu.

#### B. Podle kinematického hlediska

1. Podle závislosti na čase
  - a) proudění ustálené (stacionární) – je nezávislé na čase
  - b) neustálené proudění (nestacionární) - veličiny jsou závislé na čase [8].

#### 3.1.1 Laminární proudění

Laminární proudění je v podstatě jednodušší než turbulentní, jedná se o proudění rovnoměrné, uspořádané, kde vektory rychlosti jsou rovnoběžné s osou potrubí. V technické praxi se vyskytuje tam, kde malé průtokové kanály, větší viskozita kapaliny a malé průtokové rychlosti. Rychlostní profil laminárního proudění je rotační paraboloid, proto je rychlost tekutiny největší uprostřed a naopak nejmenší u stěny potrubí. Částice se pohybují ve vrstvách a nemísí se mezi sebou. Hydraulický odpor pohybu je lineárně závislý na rychlosti proudění [8].



Obrázek 3.3: Laminární proudění [8].

### 3.1.2 Turbulentní proudění

Turbulentní proudění obsahuje turbulentní víry různé velikosti. Velikost největších vírů je dána rozměry oblasti, ve které proudí tekutina, protože v oblasti nemůže vzniknout vír větší než daná oblast. Nejmenší velikost víru je dána fyzikálními vlastnostmi tekutiny například viskozitou. Velké víry obsahují energii, která se postupně rozpadá na menší, do doby, kdy dosáhne nejmenší možné velikosti. Tento kaskádní proces je ukončen disipací energie nejmenších víru na teplo.

Turbulentní režim proudění se vyznačuje náhodným charakterem. Veličiny jako například rychlost, tlak, teplota atd. jsou charakterizovány při turbulentním proudění zcela náhodně v závislosti na čase a na prostorových souřadnicích  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Tyto veličiny je tedy nutné chápat jako náhodné veličiny a při jejich matematickém popisu použít statistické metody [8,9].

Přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním bylo experimentálně zjištěno pomocí Reynoldsova pokusu a udává tzv. Reynoldsovo kritérium. Číslo  $Re$  je definováno následovně:

$$Re = \frac{V_s d}{\nu} \quad (3.1)$$

kde

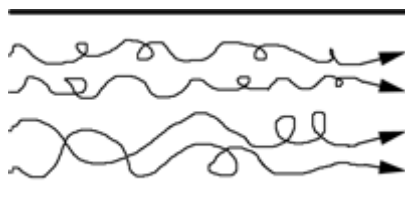
$V_s$  je střední rychlost kapaliny v potrubí [ $\text{ms}^{-1}$ ],

$d$  je průměr potrubí [m],

$\nu$  je kinematická viskozita

Kritická hodnota Reynoldsova čísla potrubí kruhového průřezu je  $Re_{krit.} = 2320$ . Pro  $Re$  menší nebo rovno  $Re_{krit.}$  se jedná o laminární proudění. Pro  $Re$  větší než  $Re_{krit.}$  se jedná o turbulentní proudění. Při přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním přechází proudění do tzv. přechodné oblasti, kde se mohou vyskytovat oba druhy proudění.

Rychlost ve středu proudění je nižší, než u proudění laminárního. Hydraulický odpor pohybu je lineárně závislý na druhé mocnině rychlosti proudění [8,9].



Obrázek 3.4: Turbulentní proudění [10].

## 3.2 Vakuum

Vakuum je ve fyzice a technice označováno jako prostor, v němž je tlak plynu výrazně nižší běžný atmosférický tlak okolí. Přesnější definice používaná v teoretické fyzice zní: Vakuum je stav systému s nejnižší možnou energií. K vymezení vakua se obvykle používají jednotky tlaku. Absolutní vakuum, které vyhovuje pouze teoretické definici, by odpovídala nulová hodnota.

V ideálním případě je vakuum takový fyzikální stav, v němž není přítomná žádná částice, a to jak hmoty, tak záření. Jedná se tedy o prostor, který neobsahuje hmotu, ale může obsahovat pole (magnetické, elektrické, gravitační). Takové vakuum se zjednodušeně označuje jako dokonalé vakuum.

Ve skutečnosti vakuum není nikdy prázdné. Podle kvantové teorie pole ve vakuu probíhají kvantově-mechanické fluktuace a neustále vznikají a zanikají páry částic a antičástic. Tyto kvantové jevy souvisí s principem neurčitosti [11].

### Rozdělení vakua:

- Technické vakuum: 10 kPa
- Primární vakuum:  $100 - 10^{-2}$  Pa
- Vysoké vakuum:  $10^{-3} - 10^{-6}$  Pa
- Ultra vysoké vakuum:  $10^{-7} - 10^{-10}$  Pa
- Extrémně vysoké vakuum:  $10^{-11} - 10^{-13}$  Pa

### 3.2.1 Získávání vakua

Zařízení, které se používá pro získání vakua, se nazývá vývěva, kterou lze v zásadě považovat za otvor o ploše  $S$  do prostoru s nižším tlakem. Základní veličinou charakterizující vývěvu je čerpací rychlost (pumping speed)  $S_0$ , která udává objem plynu čerpaný za určitou dobu [11].

$$S_0 = \frac{V}{t} \quad (3.2)$$

### Principy čerpání:

- a) Stlačování a expanse plynů (pístové, rotační, Rootovy vývěvy)
- b) Tření v důsledku viskozity plynů (parní a vodní tryskové)
- c) Tření v důsledku difuze (parní difuzní vývěvy)
- d) Třením za molekulárních podmínek (molekulární, turbomolekulární vývěvy)
- e) Čerpání v důsledku ionizace.

## Rozdělení vývěv:

- a) Adsorbční - kryokondenzační, getrové, kryosorbční
- b) Transportní
  - Mechanické
    - Pístové – membránová, Sprenglerova, Toeplerova
    - Rotační – rotační olejová, Rootsova
  - Hybnostní – vodní, difúzní, molekulární, iontová

### 3.2.2 Proudění plynu vakuovým prostředím

Pro definici proudu plynu lze použít upravený Ohmův zákon pro proudění plynu potrubím. Odpor potrubí je definován podobně jako v elektrotechnice a to:

$$Z = \frac{p_1 - p_2}{q} \quad (3.3)$$

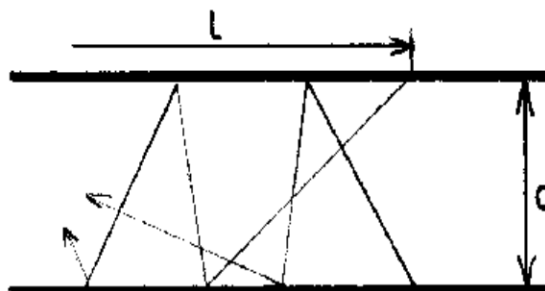
$q$ .....objemový proud plynu

Rozdíl tlaků  $p_1 - p_2$  představuje rozdíl tlaku plynu před a za trubici. Rozdíl musí být kladný, tedy  $p_1$  musí být větší než  $p_2$ . Převrácená hodnota odporu potrubí je vodivost [10]:

$$C = \frac{q}{p_1 - p_2} \quad (3.4)$$

### 3.2.3 Molekulární proudění

Molekulární proudění lze uvažovat u trubic, kde jejich délka je větší než její průměr. Střední volná dráha letu musí být větší než průměr potrubí. Mechanismus molekulárního proudění je znázorněn na obrázku 10. Je zřejmé, že pro splnění molekulárního proudění musí být  $d \ll l$ . Pro běžné rozměry trubic odpovídá tomuto kritériu tlak menší než 1 Pa. Molekulární vodivost není závislá na tlaku v trubici, ale je určena pouze rozměry trubice [9].

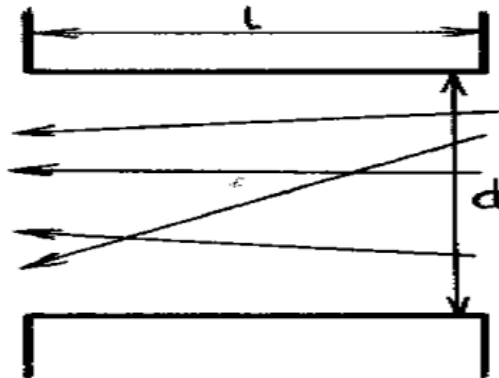


Obrázek 3.5: Model pohybu plynu při molekulárním proudění [9]

### 3.2.4 Efúzní proudění

Efúzní proudění nastává u velmi krátkého potrubí, jehož délka je mnohem menší než průměr potrubí. Střední volná dráha musí být přitom větší než průměr potrubí. V praxi se jedná o vakuovou vodivost otvoru. Mechanismus efúzního proudění je na obrázku 11. Většina molekul projde bez srážky s potrubím.

Efúzní vodivost je závislá na tlaku v potrubí a lineárně roste s průřezem trubice [9].



Obrázek 3.6: Model pohybu plynu při efúzním proudění [9]

### 3.3 Nestlačitelné a stlačitelné proudění

Proudění skutečných kapalin můžeme klasifikovat jako stlačitelné nebo nestlačitelné proudění. Pro případ proudění tekutiny jako hodnocení stlačitelnosti využijeme Machovo číslo  $M$ , definováno vztahem [7]:

$$M = \frac{v}{c} \quad (3.5)$$

kde  $v$  je rychlost tekutiny,  $c$  je rychlost zvuku.

Pro rychlost zvuku v ideálním plynu platí následující vztah:

$$c = \sqrt{\kappa RT} \quad (3.6)$$

kde  $T$  je teplota plynu,  $R$  je všeobecná plynová konstanta a  $\kappa$  je Poissonova konstanta, která udává poměr měrných tepelných kapacit za konstantního tlaku a objem, platí:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.7)$$

Proudění se považuje prakticky za nestlačitelné, když se neprojeví změna hustoty plynu na probíhající proudění, pokud platí pro hodnotu Machova čísla vhodně zvolená nerovnost:

$$M \leq (0,2 - 0,3) \quad (3.8)$$

V případě, že je splněna nerovnost lze považovat i proudění plynu za proudění nestlačitelné kapaliny. Hustota plynu  $\rho$  je při výpočtu považována na konstantní a je určena z počátečních podmínek [13].

V případě, že není splněna rovnost, je proudění plynu považováno za proudění stlačitelné kapaliny. Hustota plynu  $\rho$  je při výpočtu proměnná odpovídá rovnici stavu ideálního plynu ve tvaru:

$$p = R\rho T \quad (3.9)$$

Proudění stlačitelné tekutiny může být klasifikováno jako podzvukové nebo nadzvukové proudění. Rozhodujícím kritériem je hodnota Machova čísla  $M$ . Kritického proudění, je dosaženo při hodnotě Machova čísla  $M_{kr} = 1$ .



V případě, že se jedná o spojitě jednorozměrné proudění ideálního plynu v trubici proměnného průřezu  $A$ , platí pro určovací veličiny stavu proudu tekutiny rychlost  $v$ , tlak  $p$ , hustota  $\rho$  a teplota  $T$ , parametrické závislosti na Machově čísle  $M$  a Poissonově konstantě  $\kappa$ .

$$\frac{A}{A_{kr}} = \frac{1}{M} \left[ \frac{2}{\kappa + 1} \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} \quad (3.10)$$

$$\frac{v}{v_{kr}} = \frac{M}{\left[ \frac{2}{\kappa + 1} \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.11)$$

$$\frac{p}{p_{kr}} = \frac{1}{\left[ \frac{2}{\kappa + 1} \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}} \quad (3.12)$$

$$\frac{\rho}{\rho_{kr}} = \frac{1}{\left[ \frac{2}{\kappa + 1} \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{1}{\kappa - 1}}} \quad (3.13)$$

$$\frac{T}{T_{kr}} = \frac{1}{\left[ \frac{2}{\kappa + 1} \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]} \quad (3.14)$$

Při uvažovaném jednorozměrném spojitěm proudění v trubici proměnného průřezu definujeme následující tři charakteristické stavy proudění [7]:

- Stav celkový (zbrzdění)  $v_0=0$ ,  $p_0$ ,  $\rho_0$ ,  $T_0$ ,  $M_0 = 0$
- Stav kritický  $v_{kr}$ ,  $p_{kr}$ ,  $\rho_{kr}$ ,  $T_{kr}$ ,  $M_{kr} = 1$
- Stav mezní  $v_m$ ,  $p_m = 0$ ,  $\rho_m = 0$ ,  $T_m = 0$ ,  $M_m = \infty$ .

Z rozboru charakteristických stavů proudění plynou významné poměry charakteristických veličin v celkovém stavu, kritickém stavu a mezním stavu:

$$\frac{p_0}{p_{kr}} = \left( \frac{\kappa + 1}{2} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (3.15)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_{kr}} = \left(\frac{\kappa + 1}{2}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (3.16)$$

$$\frac{T_0}{T_{kr}} = \frac{\kappa + 1}{2} \quad (3.17)$$

$$\frac{v_m}{v_{kr}} = \left(\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.18)$$

Z rozboru rovnic, které popisují jednorozměrné spojitě proudění ideálního plynu v trubici proměnného průřezu, vyplývá následující závěr: „Zmenšování průtočného průřezu přivede proudící plyn k jeho kritickému stavu, naopak zvětšování průtočného průřezu proudící plyn od jeho kritického stavu oddaluje“.

Pro dosažení nadzvukového proudění v trubici proměnného průřezu je tedy potřeba v podzvukovém proudu nejprve průřez trubice zmenšovat a při dosažení kritického stavu proudění začít průřez trubice zvětšovat, tak aby bylo dosaženo v trubici nadzvukového proudění [13].

V případě konvergentní dýzy (pouze zužující-se trubice) je možné na výstupu z dýzy dosáhnout snížení tlaku v proudu plynu jen na hodnotu kritického tlaku. Pokud je dle okrajových podmínek k dispozici vyšší tlakový spád, nastává v oblasti za výstupem v minimálním průřezu neřízená expanze v rozšiřujícím se paprsku proudu plynu a to z kritického tlaku na tlak okolního prostředí (plní se okrajová tlaková podmínka) [7], [13].

### 3.4 Základní rovnice popisující proudění v diferenciálně čerpané komoře.

Pro řešení zadání byl zvolen simulační program Ansys Fluent, který pracuje se třemi následujícími parciálními diferenciálními rovnicemi, doplněnými o stavovou rovnici. V tomto případě jde o trojrozměrný typ proudění stačitelné vazké tekutiny s přívodem tepla [13].

Tři základní rovnice jsou tyto: zákon zachování hmotnosti, zákon zachování pohybu a zákon zachování energie doplněný o stavovou rovnici.

Rovnice spojitosti, vyjadřující zákon zachování hmotnosti má tvar:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad , \quad \text{index } i = 1,2,3 \quad (3.19)$$

Stokes – Navierova rovnice, která vyjadřuje aplikovanou Newtonovu větu o změně hybnosti má tvar:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad , \quad \text{index } j = 1,2,3 \quad (3.20)$$

Rovnice energie, vyjadřující zákon zachování energii pro stlačitelnou tekutiny nabývá tvaru:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} (E + p) = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad (3.21)$$

$$E = e + \frac{v^2}{2}$$

Rovnice stavu, vztahující určovací veličiny stavu tekutiny, pro uvažovaný ideální plyn, má tvar:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (3.22)$$

Kde,  $u$  je rychlost tekutiny,  $p$  je tlak tekutiny,  $\rho$  je hustota tekutiny,  $T$  je teplota tekutiny,  $e$  je vnitřní energie,  $S_i$  jsou vnější hmotnostní síly působící na jednotku hmotnosti (např. odstředivá, tíhová),  $Q_H$  je odvod nebo přívod tepla vztažený na jednotku objemu,  $q_i$  je difusní tok tepla,  $\tau_{ik}$  je tensor vazkých napětí a  $ij$  jsou indexy u veličin udávající sumaci podle tří směrů souřadnic (Einsteinova sumace) [13].

### 3.5 Srážky molekul, střední volná dráha

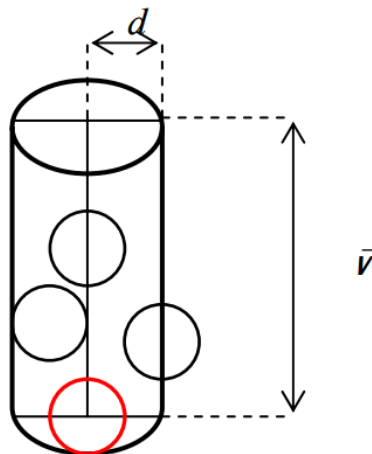
V této kapitole bude uvedena problematika týkající se srážek molekul. Je zde uváděna, protože v diferenciallyně čerpané komoře dochází ke srážkám molekul čerpaného plynu s elektrony primárního svazku. To je také jedním z kritérií vyhodnocení výsledků prováděné simulace proudění pomocí systému Ansys. Pomocí těchto simulací bude optimalizován tvar diferenciallyně čerpané komory tak, aby docházelo k co možná nejnížšímu počtu srážek elektronů primárního svazku a molekulami čerpaného plynu[12].

Pro zjištění srážky jedné molekuly s ostatními molekulami stejného druhu za jednotku času  $z_A$  použijeme následující představu:

- Molekuly představují koule o průměru  $d$  – tzv. efektivní srážkový průměr,
- srážka = jakýkoliv dotyk molekul,
- pouze vybraná molekula se pohybuje, ostatní jsou v klidu.

Za jednotku času urazí molekula průměrnou dráhu  $v$ , a narazí do všech molekul, které budou ve válci o poloměru  $d$  a výšce  $v$  viz. obrázek 12. [12].

$$z_A = \pi d^2 v \frac{N}{V} \quad (3.23)$$



Obrázek 3.7: Znázornění molekuly ve válci.

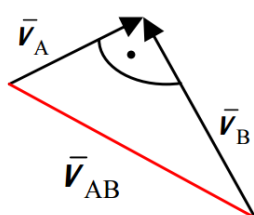
Zpřesnění: všechny molekuly se pohybují. Střední aritmetickou rychlost je třeba nahradit vzájemnou střední rychlostí.

Vzájemná střední rychlost dvou rozdílných částic A a B  $v_{AB}$ :

Částice se srážejí pod různými úhly z intervalu  $0 - 180^\circ$ , jako střední hodnotu lze uvažovat úhel  $90^\circ$ . Pro střední vzájemnou rychlost následně platí:

$$\bar{v}_{AB} = \sqrt{\bar{v}_A^2 + \bar{v}_B^2} \quad (3.24)$$

$$\bar{v}_{AB} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi} + \frac{8kT}{\pi} \left( \frac{1}{m_A} + \frac{1}{m_B} \right)} \quad (3.25)$$



Obrázek 3.8: Znázornění výpočtu vzájemné rychlosti.

Definujeme-li tzv. redukovanou hmotnost  $\mu$  dvou částic A a B, které se navzájem sráží vztahem:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_A} + \frac{1}{m_B} \quad (3.26)$$

dostaneme pro jejich střední vzájemnou rychlost vztah formálně shodný se vztahem pro střední aritmetickou rychlost jedné částice,

$$v_{AB} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi\mu}} \quad (3.27)$$

který se v případě srážky dvou shodných částic A zjednoduší:

$$\bar{v}_{AA} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_A}} \sqrt{2} \quad (3.28)$$

$$\bar{v}_{AA} = \bar{v} \sqrt{2} \quad (3.29)$$

Následně počet srážek jedné molekuly s ostatními molekulami stejného druhu za jednotku času bude [12]:

$$z_A = \pi d^2 \bar{v} \sqrt{2} \frac{N}{V} \quad (3.30)$$

Vzájemné srážky všech molekul stejného druhu za jednotku času v jednotce objemu  $z_{AA}$ :

$$z_{AA} = \frac{1}{2} \frac{N}{V} z_A \quad (3.31)$$

$$z_{AA} = \frac{\sqrt{2}}{2} \pi d^2 \bar{v} \left( \frac{N}{V} \right)^2 \quad (3.32)$$

Vzájemné srážky molekul A s molekulami B za jednotku času v jednotce objemu  $z_{AB}$ :

$$z_{AB} = \frac{N_A}{V} z_A \quad (3.33)$$

kde  $z_A$  představuje počet srážek jedné molekuly A s ostatními molekulami B, ke kterým dojde za jednotku času.

$$z_{AB} = \frac{N_A N_B}{V} \pi d_{AB}^2 \bar{v}_{AB} \quad (3.34)$$

$$d_{AB} = \frac{d_A + d_B}{2} \quad (3.35)$$

Střední volná dráha  $l$  je průměrná dráha, kterou urazí částice mezi dvěma srážkami.

$$l = \frac{\bar{v}}{z_A} \quad (3.36)$$

$$l = \frac{1}{\frac{N}{V} \pi d^2 \sqrt{2}} \quad (3.37)$$

**Z uvedených vztahů platí, že:**

- Střední volná dráha částice je nepřímo úměrná počtu částic v jednotce objemu – tedy tlaku plynu.
- Střední volná dráha není závislá na teplotě [12].

### 3.6 Střední volná dráha přenosové jevy

Z přechozích teoretických úvah lze říci, že určitá molekula v plynu koná složitý pohyb. Při srážkách s ostatními molekulami se mění jejich rychlosti i jejich směry. Mezi dvěma srážkami se částice pohybuje rovnoměrně, přímočaře a urazí určitou dráhu. Tuto dráhu lze nazvat jako volná dráha. Tyto dráhy mohou mít obecně různé velikosti, jejich průměrná hodnota je střední volná dráha  $l$  [15].

Prvním předpokladem je, že všechny molekuly jsou v klidu, kromě sledované molekuly. Nejprve zjistíme jaký průměrný počet srážek  $z$  molekula dosáhne za jednotku času. Střední doba pohybu mezi srážkami je rovna převrácené hodnotě průměrného počtu srážek. Dle modelu ideálního plynu předpokládáme, že částice má kulový tvar s průměrem  $d$ , a za jednu sekundu průměrně urazí dráhu, která je číselně rovna její průměrné rychlosti  $v_s$ . Během svojí dráhy se srazí se všemi molekulami, jejichž středy leží uvnitř válce o poloměru  $d$  a výšce  $v_s$ . Jelikož v jednotce objemu plynu se nachází  $n_0$  molekul, tak ve válci je jich  $N = n_0\pi v_s d^2$ . Tedy počet srážek za jednu sekundu je roven  $z = n_0\pi v_s d^2$  [15].

Kdyby bylo uvažováno i se změnou směru rychlosti molekuly, která může nastat při srážce, tak by byl uvažovaný válec mnohokrát zalomený, ale jeho parametry jako je objem a počet molekul by zůstaly zachovány. Pro střední volnou dráhu platí vztah:

$$\langle l \rangle = \frac{v_s}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\pi d^2 n_0} \quad (3.38)$$

Uvážíme-li i pohyb ostatních molekul, platí pro střední volnou dráhu přesnější vztah:

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n_0} \quad (3.39)$$

Střední volná dráha molekul plynu je tedy nepřímo úměrná koncentraci molekul  $n_0$  a při definovaném množství a typu plynu také tlaku plynu  $p$ :

$$p = \frac{1}{3} n_0 m_m v_k^2 \quad (3.40)$$

Z předchozích teoretických úvah plyne, že závislost tlaku na pravděpodobnosti množství srážek molekul čerpaného plynu z diferenciálně čerpané komory s elektrony primárního elektronového svazku má lineární průběh. Díky lineárnímu průběhu lze tedy průměrný tlak čerpaného plynu na dráze primárního svazku elektronů považovat jako jedno z kritérií výběru nejvhodnější varianty diferenciálně čerpané komory [15].

### 3.7 Rozptylové režimy svazku primárních elektronů

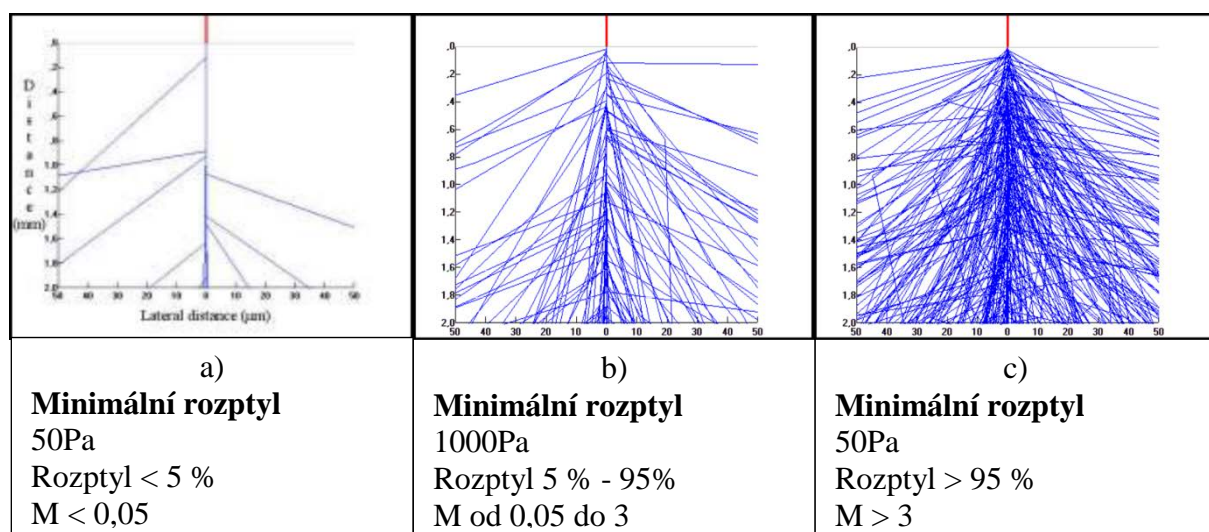
Závislost rozptylu na počtu interakcí elektronů primárního svazku šířících se plynným prostředím, je definováno průměrným počtem srážek připadající na jeden elektron, označovaným  $M$ . Z této veličiny, lze odvodit tři základní rozptylové režimy viz. obrázek 14 [7].

Režim minimálního rozptylu nastává, když  $M$  nabývá hodnot v rozmezí od 0 do 0,05. Rovná-li se  $M$  hodnotě 0,05 znamená to, že 5% elektronů mělo kolizi při průchodu prostředím s vyšším tlakem. Tento režim bývá využíván především při zkoumání předmětů běžnou rastrovací elektronovou mikroskopií, kde se hodnota  $M$  téměř rovná nule, proto je rozptyl elektronového svazku minimální viz. obrázek 14a.

Nabývá-li  $M$  hodnot větší jak 3 jedná se o tzv. režim úplného rozptylu obr. 14c. V tomto režimu se elektrony, které prochází plynným prostředím, sráží s atomy a molekulami s více jak 95%, což je pro elektronovou mikroskopií nevhovující.

Režim častého rozptylu obr. 14b je kompromis mezi dvěma již uvedenými režimy, zde  $M$  nabývá hodnot v rozmezí 0,05 do 3.

Z výše uvedeného plyne, že důležitým kritériem při vyhodnocování výsledků simulace proudění plynů bude požadavek na co nejkratší dráhu elektronového svazku v oblasti vyššího tlaku. Neboli aby byl zajištěn co možná nejrychleji nejnižší tlak v oblasti průchodu primárního elektronového svazku [7].



Obrázek 3.9: Rozptylové režimy elektronového svazku [7].



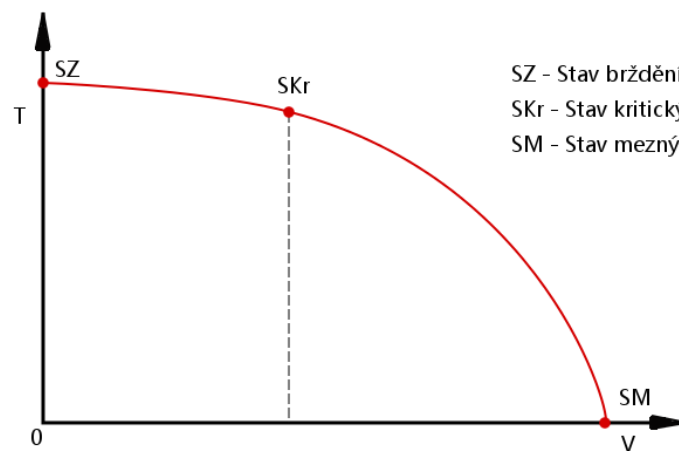
### 3.8 Kritické proudění

Tato kapitola je zde uvedena z důvodu, že v případě čerpání diferenciální komory jde o proudění přes clonky malých dimensí. Při proudění přes tyto clonky dochází k tzv. kritickému proudění. K tomuto jevu dochází díky výraznému rozdílu tlaků na obou stranách clonky a také rychlosti čerpání. Rychlost proudění přes clonky roste úměrně s rozdílem tlaků na obou stranách clonky, avšak toto platí jen do chvíle, kdy rychlost proudění plynu skrz clonku dosáhne rychlosti 1 Mach. Jakmile rychlost přesáhne tuto mezní hodnotu, dochází k tzv. kritickému proudění. Platí, že maximální množství plynu projde clonkou právě při rychlosti proudění plynu 1 Mach [14].

#### 3.8.1 Teplotní parabola

Závislost teploty na rychlosti proudění vyplývá z rovnice energie a nazývá se tzv. teplotní parabola [17].

$$e = \frac{v^2}{2} + c_p T = c_p T_0 \quad (3.41)$$

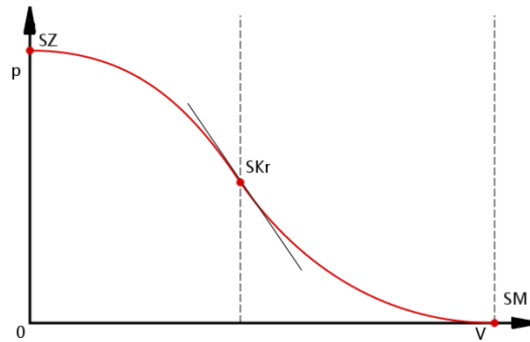


Obrázek 3.10: Teplotní parabola

### 3.8.2 Tlaková hora

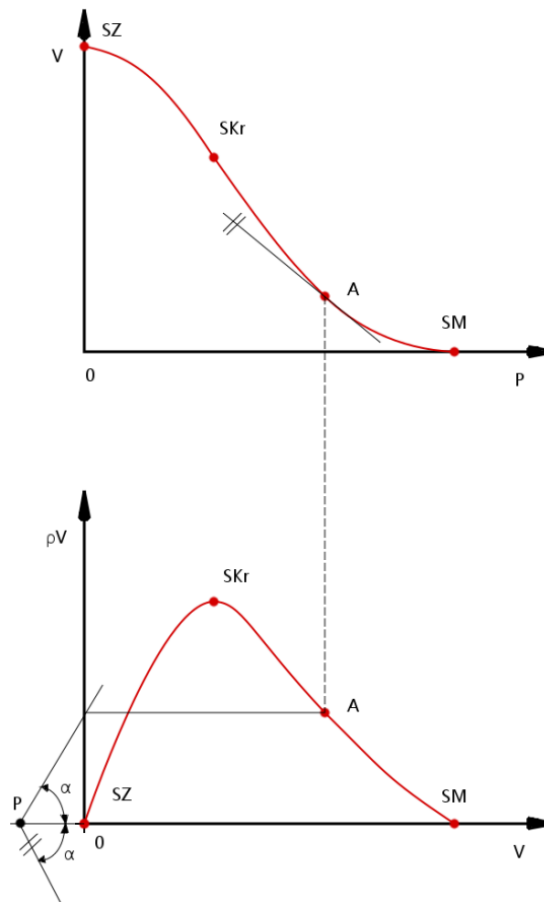
Závislost tlaku na rychlosti tzv. tlaková hora vyplývá z Bernoulliho rovnice [17] :

$$e = \frac{v^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_0}{\rho_0} \left( \frac{p}{p_0} \right) = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_0}{\rho_0} \quad (3.42)$$



Obrázek 3.11: Tlaková hora

Derivací tlakové hory je závislost hustoty proudu  $\rho v$  na rychlosti  $v$ .

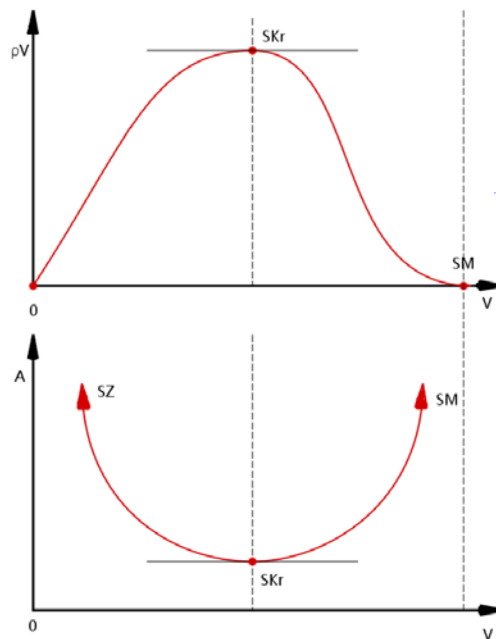


Obrázek 3.12: Derivace tlakové hory

### Z uvedených teoretických poznatků vyplývá důležitý závěr:

Hustota proudu nabývá své maximální hodnoty, když proudění dosáhne kritického stavu. Průtočný průřez je v tomto kritickém stavu minimální.

Ze základních výpočtových rovnic vyplývá, že přechod z podzvukového do nadzvukového proudění plynu přes kritický stav lze dosáhnout pouze zmenšováním průtočného průřezu do stavu kritického a následně zvětšováním průtočného průřezu po dosažení kritického stavu proudění. Tohoto teoretického předpokladu využívá tzv. Lavalova dýza [17].



Obrázek 3.13: Závislost hustoty proudu na průtočném průřezu

Díky předchozím skutečnostem jsou definovány tři stavy proudění [7]:

- Stav celkový, stav zbrzdění, rychlost  $v = 0$ ,
- Stav kritický, kdy hustota proudu  $\rho_v$  dosahuje maxima v minimálním průtočném průřezu  $A$ ,
- Stav mezní, kdy rychlost plynu dosahuje maxima, proudění do vakua  $p = 0$ ,  $\rho = 0$ , a  $T = 0$ .

### 3.8.3 Hugoniotův teorém

Závislost mezi Machovým číslem  $M$  a průtočným průřezem  $A$  proudícího plynu vyjadřuje Hugoniotův teorém [16].

Hugoniotův teorém bez uvažování tření:

$$\frac{dA}{A} + \frac{dc}{c}(1 - M^2) = 0 \quad (3.43)$$

Kde  $A$  ( $\text{m}^2$ ) je průtočný průřez.

Tento teorém popisuje, že změna rychlosti proudění a průtočného průřezu závisí na Machově čísle následovně:

- **$M < 1$  Podzvukové proudění** – Zvýšení rychlosti proudění je možné dosáhnout zmenšením průtočného průřezu a naopak.
- **$M = 1$  Proudění na úrovni rychlosti zvuku** – Oblast kde dosáhne proudění rychlosti zvuku je extrémem funkce změny průřezu trubice. Jak již bylo řečeno, proudění dosáhne rychlosti zvuku pouze zmenšováním průtočného průřezu, jedná se tedy o nejužší místo. Při této rychlosti platí, že tepelný pohyb molekul plynu je roven rychlosti proudění a z toho důvodu se nemůže žádná molekula z druhé strany již vrátit před průřez.
- **$M > 1$  Nadzvukové proudění** – Rychlost proudění roste při zvětšování průtočného průřezu. Chování nadzvukového proudění je opak podzvukového proudění [16].

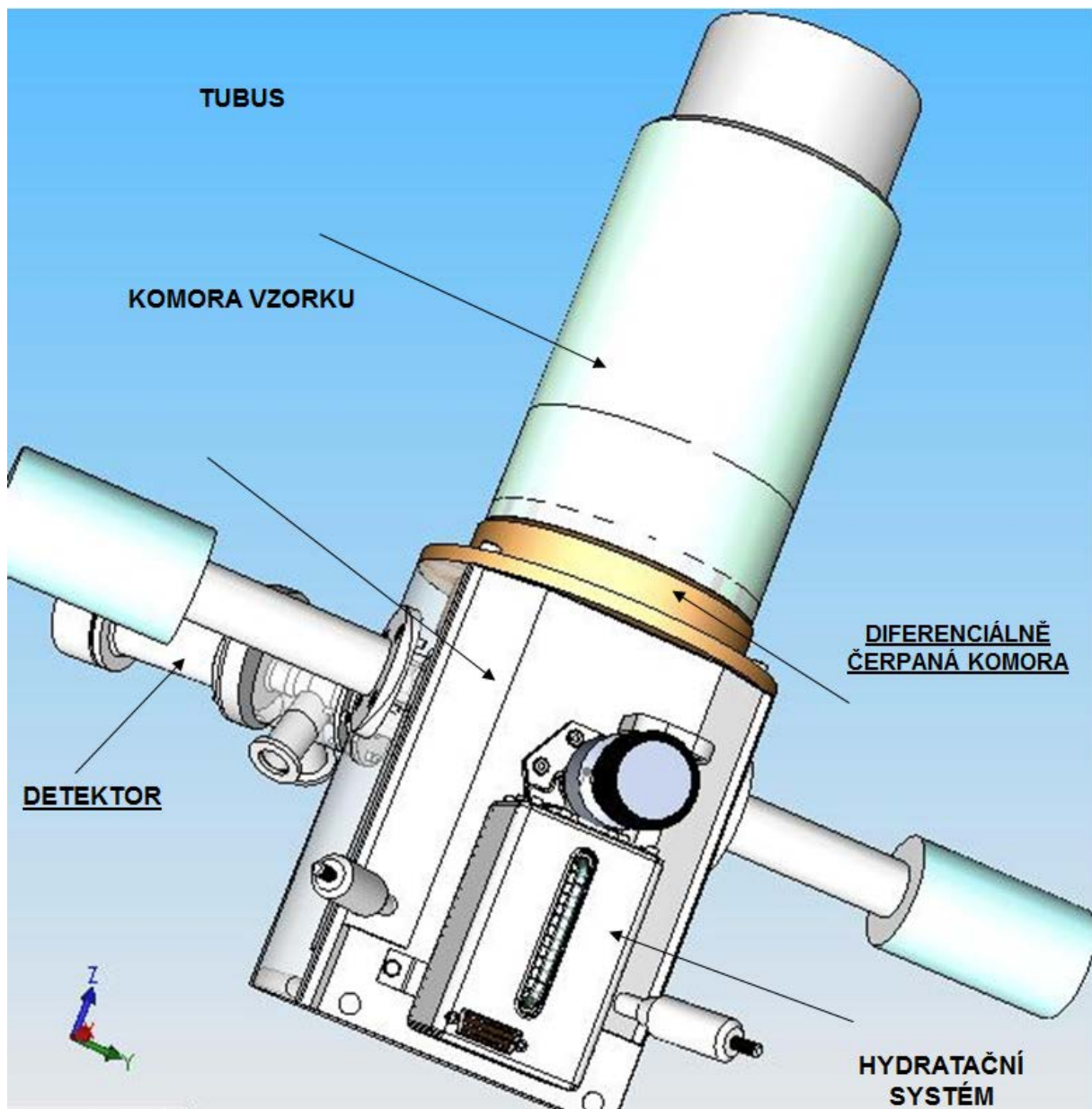
## 4 Diferenciálně čerpaná komora

Jak již bylo zmíněno, diferenciálně čerpaná komora představuje samostatně čerpanou komoru (cca 30 Pa). Jejím úkolem je oddělit prostředí velmi nízkého tlaku v tubusu (cca 0,1 Pa ale i  $10^{-3}$  -  $10^{-9}$  Pa podle typu katody) a prostředí vyššího tlaku (1500 až 2000 Pa) v komoře vzorku.

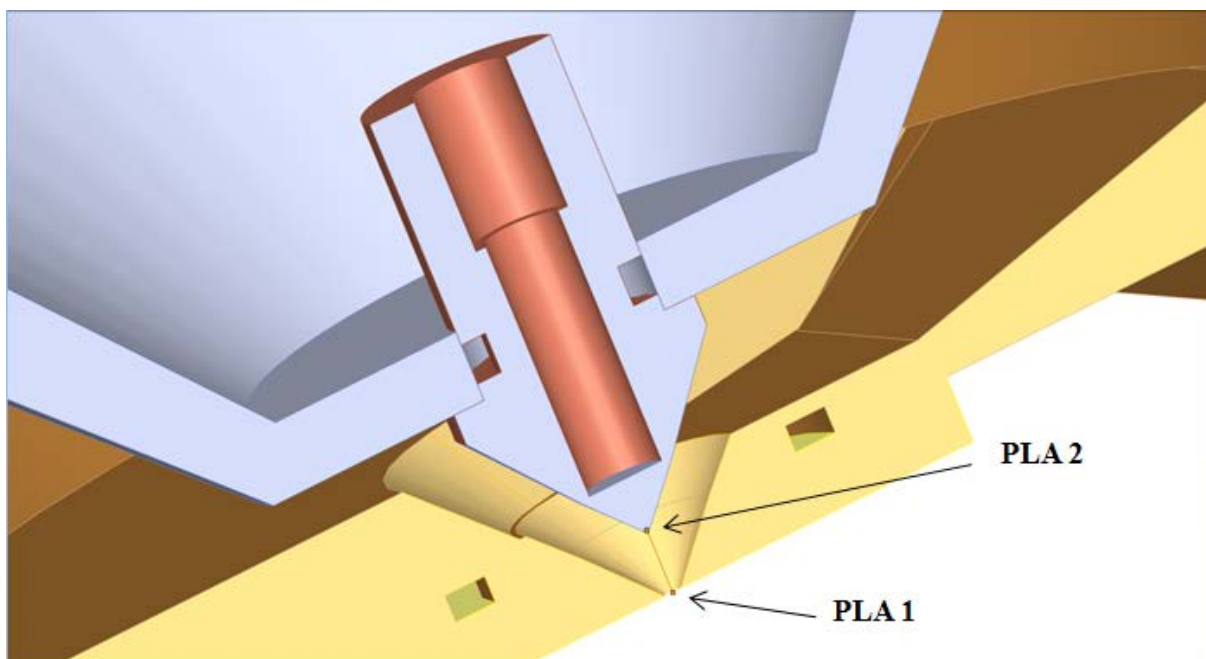
Díky vysokému tlaku uvnitř komory vzorku elektronového rastrovacího mikroskopu, jsou vyžadovány specifické požadavky na konstrukci mikroskopu a také na jeho čerpací systém. Návrh konstrukčních částí, zejména diferenciálně čerpané komory musí splňovat náročné požadavky na účinné čerpání jejího vnitřního prostoru a minimalizace tlaku v něm. Tyto konstrukční nároky jsou kompenzovány širokou škálou možností využití mikroskopu, jak v prostředí vakua, tak i v prostředí zvýšeného tlaku [7].

Systém diferenciálně čerpané komory obsahuje dvě tlak omezující clony (PLA1 a PLA2) a účinný systém čerpání. Clony obsahují otvory o průměru řádově desítek až stovek mikrometrů, které účinně omezují proudění plynů mezi tubusem a komorou vzorku. Zároveň musí clony umožnit průchod elektronů primárního elektronového svazku od jejich zdroje až na povrch vzorku [7].

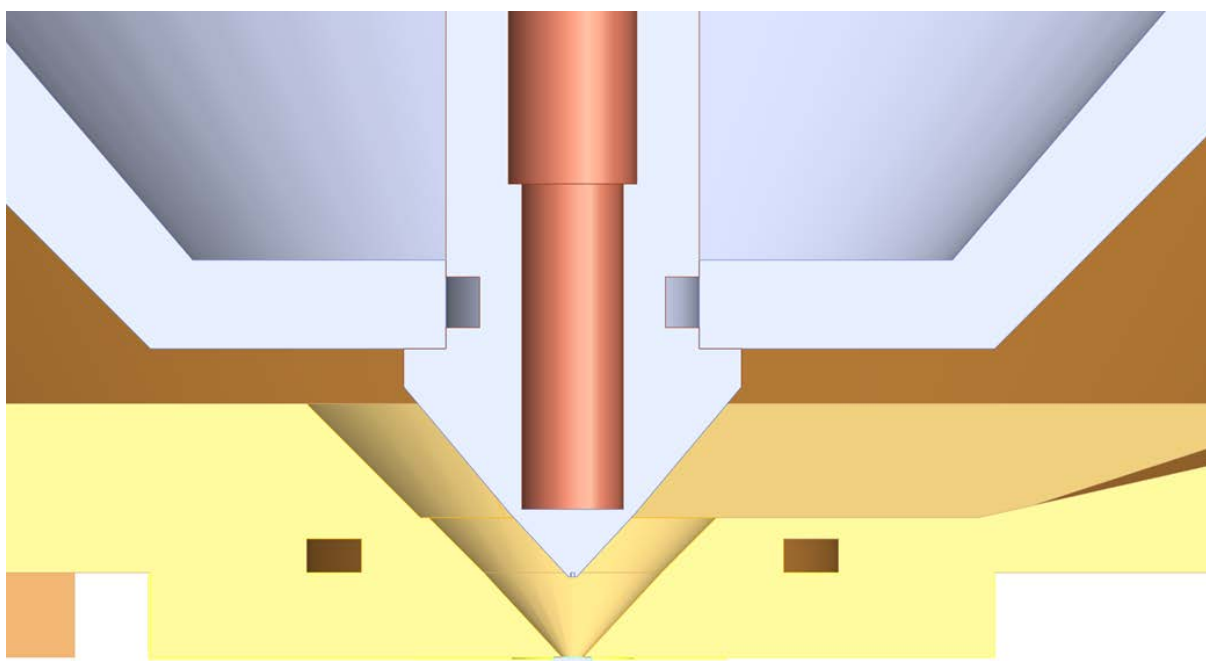
Díky vysokému tlaku plynu uvnitř komory vzorku EREM dochází ke zvýšenému počtu interakcí elektronů s molekulami a atomy plynu, což způsobuje rozptyl elektronového svazku. Tento rozptyl roste se zvyšujícím se tlakem a středním atomovým číslem plynu, s pracovní vzdáleností a se snižujícím se urychlovacím napětím primárního svazku. Zvětšení rozptylu svazku způsobí zvětšení průměru stopy primárního svazku, což způsobí zhoršení poměru signál – šum v detekovaném signálu. V konečném výsledku může dojít ke zhoršení rozlišovací schopnosti mikroskopu [7].



Obrázek 4.1: Environmentální rastrovací mikroskop



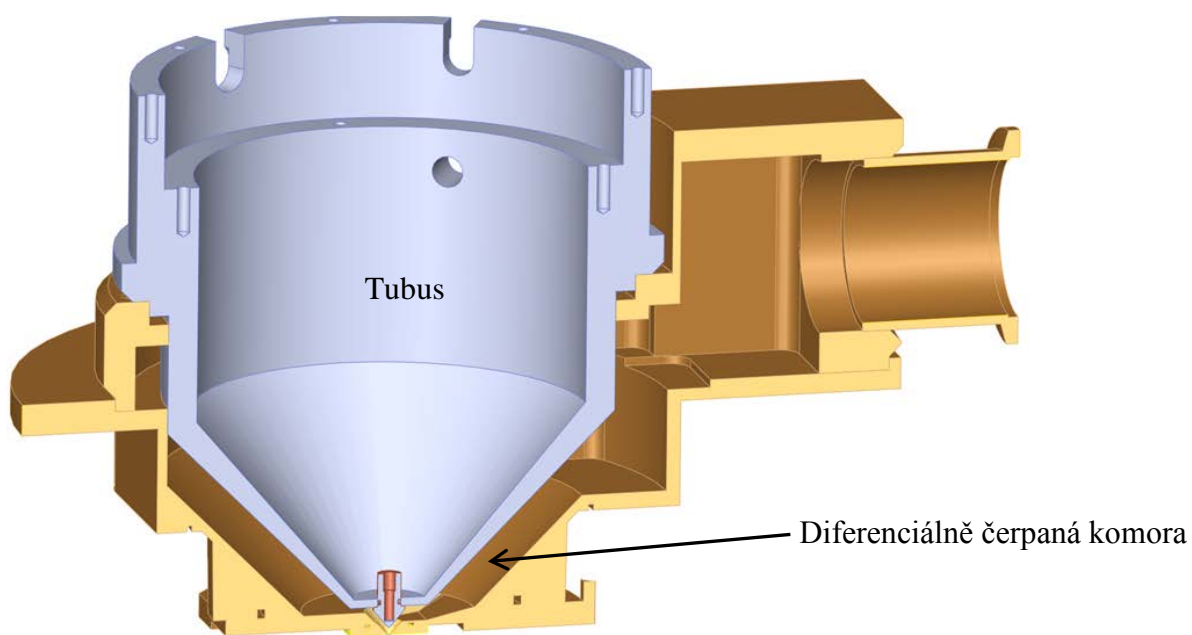
Obrázek 4.2: Detail řezu diferenciálně čerpané komory s vyznačením clony PLA1 a PLA2.



Obrázek 4.3: Kolmý řez diferenciální komorou

Rozměry clonek: PLA1 – průměr 0,5 mm

PLA2 – průměr 0,1mm



Obrázek 4.4: Řez tubusem a diferenciálně čerpanou komorou



# 5 Výpočetní systém použitý v práci

## 5.1 Ansys fluent

ANSYS Fluent je velice kvalitní software, který je využíván pro CFD simulace, ale má také mnohé využití v oblasti fyzikálních a také chemických modelů úloh [17]:

- Laminární a turbulentní proudění,
- Nestlačitelné a stlačitelné tekutiny,
- Sdílení tepla konvencí, vedením a sáláním,
- Umožňuje modelování chemických reakcí až po heterogenní chemické reakce při spalování uhlí, olejů, plynů apod.,
- Vícefázové proudění se sdílením tepla a hmoty pro kombinaci fází kapalina-plyn, tekutina-pevná fáze, dále také interakce mezi tekutinou a pevnou fází, a další úlohy.

Fyzikální modely společně s jejich kombinacemi umožňují pokrýt téměř celé spektrum průmyslových potřeb, počínaje prouděním vzduchu přes křídla letadel, spalování fosilních paliv v pecích, dále probublávání kolon pro simulaci toků na ropných plošinách, simulace toku krve cévami k simulacím průběhu chlazení elektronických součástek. Průmyslové potřeby vyžadují také používání multifyzikálních simulací, to těchto simulací patří např. rozložení teplot uvnitř stěny a tlaku na stěně vypočítané CFD výpočtem je převedeno do pevnostní analýzy ve FEM programu ANSYS Mechanical [17].

Program ANSYS je využíván po celém světě. Své uplatnění našel u malých firem až po velké mezinárodní firmy, které využívají těchto simulací pro návrhové a optimalizační fáze vývoje svých produktů. Tento software je využíván i jako kontrolní a ověřovací nástroj různých zařízení.

Pro zkrácení doby výpočtu software umožňuje využití paralelizaci úloh na více procesorech nebo jádrech. Pokud je nabídka modelů nedostačující, je zde možná implementace vlastních modelů pomocí uživatelsky definovaných funkcí. Interaktivní nastavení řešiče, vlastní řešení a vyhodnocování získaných výsledků v programu ANSYS Fluent přináší možnost kdykoli pozastavit výpočet, zhodnotit výsledky, změnit nebo upravit nastavení a následně pokračovat ve výpočtu [17].

Zpracování vypočtených výsledků, tvorbu vyhodnocovacích šablon pro přenos mezi výpočty, srovnání více variant současně lze provádět v programu ANSYS CFD-Post. Srovnávané úlohy se mohou lišit v geometrii modelu, v nastavení hustoty výpočetní sítě, typu modelů nebo v okrajových podmínkách.

Společná platforma ANSYS Workbench umožňuje sdílení CAD modelů s obousměrným propojením se všemi známými CAD systémy. Pro vytvoření geometrie je možné využít program ANSYS Design Modeler, která následně umožňuje modifikaci CAD modelů nebo celkovou tvorbu geometrického modelu.

Platforma ANSYS Workbench přináší možnost sdílení dat a vypočtených výsledků mezi jednotlivými programy firmy ANSYS a to pomocí jednoduchého linkování kliknutím a přetažením pomocí myši na potřebnou aplikaci. Toto velice usnadňuje použití hlavně pro multifyzikální simulace [17].

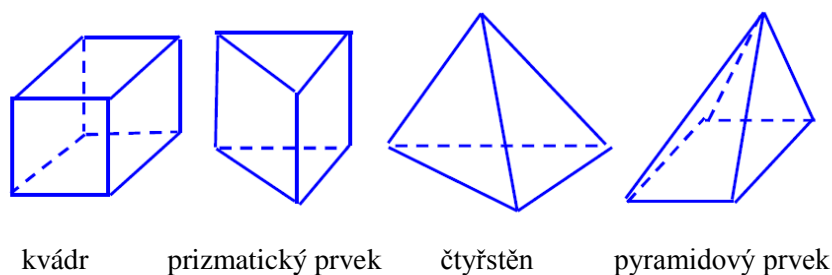
Program ANSYS CFD-Post je společný nástroj pro vyhodnocování získaných výsledků CFD řešičů, který obsahuje vše nutné pro vizualizaci a analýzu výsledků dynamiky tekutin. CFD-Post poskytuje vizualizaci proudění pomocí kontur a vektorů ve vybraném místě výpočetní oblasti. Pro opětovné vyhodnocení stejných nebo podobných úloh je zde možnost vytvoření šablony, které jsou mezi úlohami přenositelné.

Software ANSYS Fluent je v dnešní době nejpoužívanější program pro CFD analýzy a to z díky jeho flexibilitě výpočetních sítí, kompletnosti fyzikálních modelů a uživatelské přívětivosti je schopen rychlého a efektivního nasazení [17].

## 5.2 Metoda konečných objemů

Metoda konečných objemů je numerická metoda, která je založena na vytvoření systému nepřekrývajících se elementů, konečných počtů objemů. Výpočet probíhá přes stěny vytvořených elementů. Tuto metodu využívá program ANSYS Fluent.

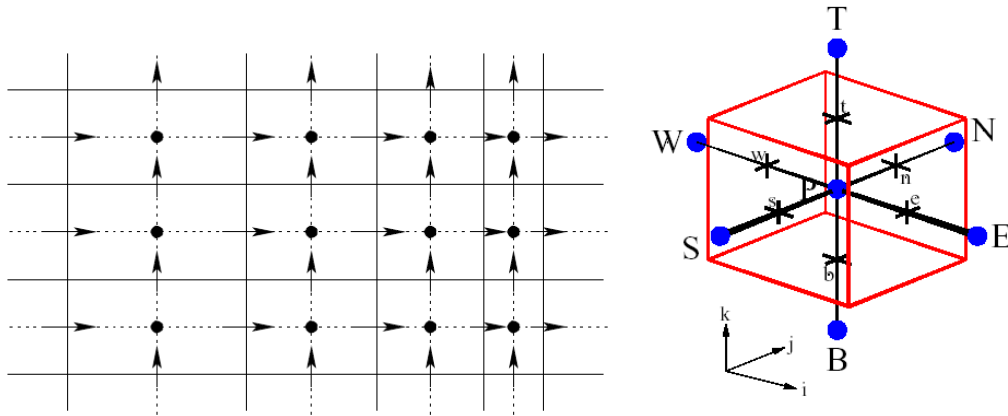
Původně byla metoda založena na konečných objemech krychlí nebo kvádrů. Síť vytvořená pomocí těchto šestistěnnů se nazývá strukturovaná síť. V posledních letech se začal prosazovat nový náhled na toto téma, kdy se vytváří tzv. nestrukturovaná síť. Zde je elementem s konečným objemem 3D kvádr, čtyřstěn, prizmatický prvek a pyramidový prvek, jehož výhody byly potvrzeny ve výpočtech pružnosti, která byly řešeny metodou konečných objemů [17].



Obrázek 5.1: Prvky metody konečných objemů [17].

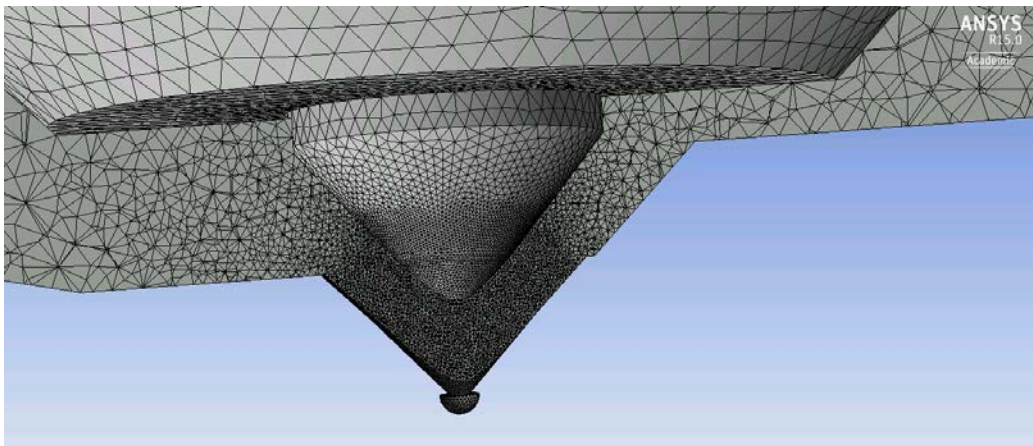
Výhodou je, že prvky na obrázku 5.1 se mohou kombinovat, tím je dosaženo optimální rozložení sítě.

Výpočet probíhá v jednotlivých cyklech tzv. iteracemi (obr. 5.2). Nastavené okrajové podmínky působí na sousedící buňky sítě a v celé výpočetní oblasti probíhá tímto vlivem změna. Výpočet probíhá podle zvolených rovnic do konce výpočtu, kde probíhá kontrola konvergence. Pokud došlo ke změně sledovaných hodnot během cyklu, tak se cyklus opakuje do chvíle ustálení sledovaných hodnot [17].



Obrázek 5.2: Výpočetní síť a schéma lokální diskretizace [13].

Příklad nastavení výpočetní sítě u varianty č. 1. Výpočetní síť u dalších variant byla nastavená analogicky. Zjemnění sítě bylo provedeno v oblasti zúžení kanálů a v místech, kde byly zvýšené nároky na přesnost výpočtu např. okolí primárního elektronového svazku.



Obrázek 5.3: Nastavení hustoty sítě u první varianty

### 5.3 Stěnová funkce

V blízkém okolí stěny se rychlost proudění prudce mění. Pro rychlost platí:

$$U = \frac{U}{U_\tau}, U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}} \quad (5.1)$$

Stěnová funkce  $y^+$  je bezrozměrná funkce a má následující tvar:

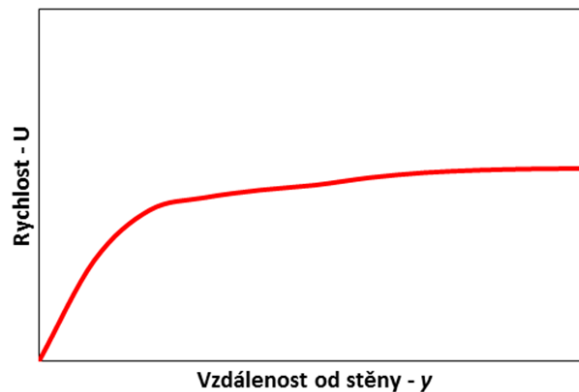
$$y^+ = y \frac{U_\tau}{\nu} \quad (5.2)$$

Pomocí hodnoty stěnové funkce  $y^+$  lze vyhodnotit vhodnost zvoleného turbulentního modelu.

Obecně platí, že model:

- $k-\varepsilon$  - vhodně popisuje stav turbulencí a proudění v prostoru v proudu,
- $k-\omega$  – je vhodný pro popis stavů turbulencí a proudění v blízkosti stěny.

Model SST je hybridní dvourovnicový model, který má snahu spojit výhody výše zmíněných základních dvourovnicových modelů  $k-\varepsilon$  a  $k-\omega$ . V modelu SST jsou tyto modely propojeny následovně: model SST funguje jako  $k-\omega$  v blízkosti stěn a jako model  $k-\varepsilon$  ve volném prostoru. Model SST je tedy vhodným kompromisem mezi oběma modely. Podmínkou ovšem je, aby stěnová funkce nabývala hodnoty menší jak 1 [17].



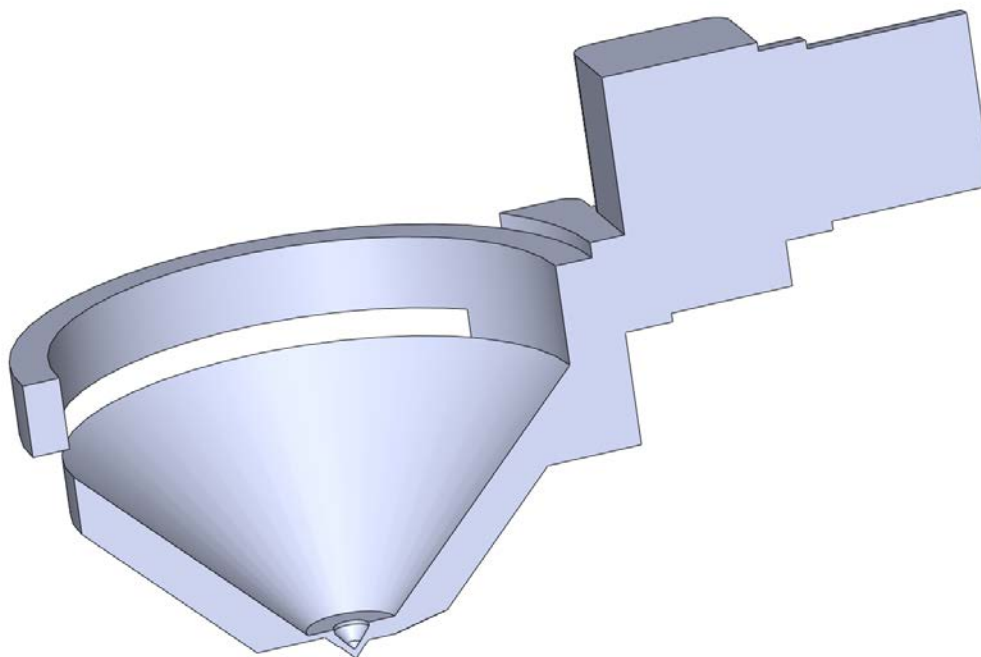
Obrázek 5.4: Závislost proudu u stěny

## 6 Popis navržených koncepcí

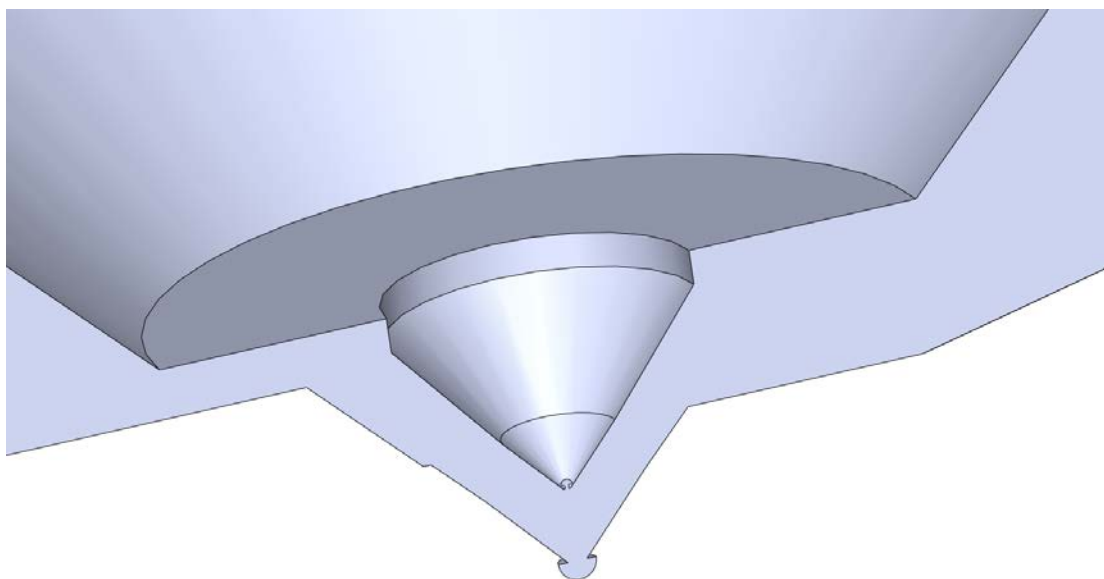
V této kapitole budou představeny geometrické modely jednotlivých navržených koncepcí diferenciálně čerpané komory. V této práci bude představeno celkem 5 variant, které se liší geometrickými rozměry i systémem čerpacích kanálů. Varianty č. 1, 2, 3 využívají čerpání plynu kolem deflektoru a spodní kuželové části tubusu v rozsahu  $360^\circ$ , naopak varianta č. 4 využívá čerpání kolem deflektoru v rozsahu  $360^\circ$ , ale kolem spodní části tubusu již jen v omezené úhlové výseči otevřené směrem k výstupu plynu. Varianta 5. využívá pouze omezenou úhlovou výseč jako sací kanál i v prostoru kolem deflektoru.

### 6.1 První varianta

První tzv. kuželová varianta, která je zobrazena na následujících obrázcích. Jak již bylo řečeno, využívá odsávání oblasti primárního elektronového svazku v rozsahu  $360^\circ$  nejen v oblasti kolem deflektoru, ale i v oblasti spodního kuželového tvaru tubusu.



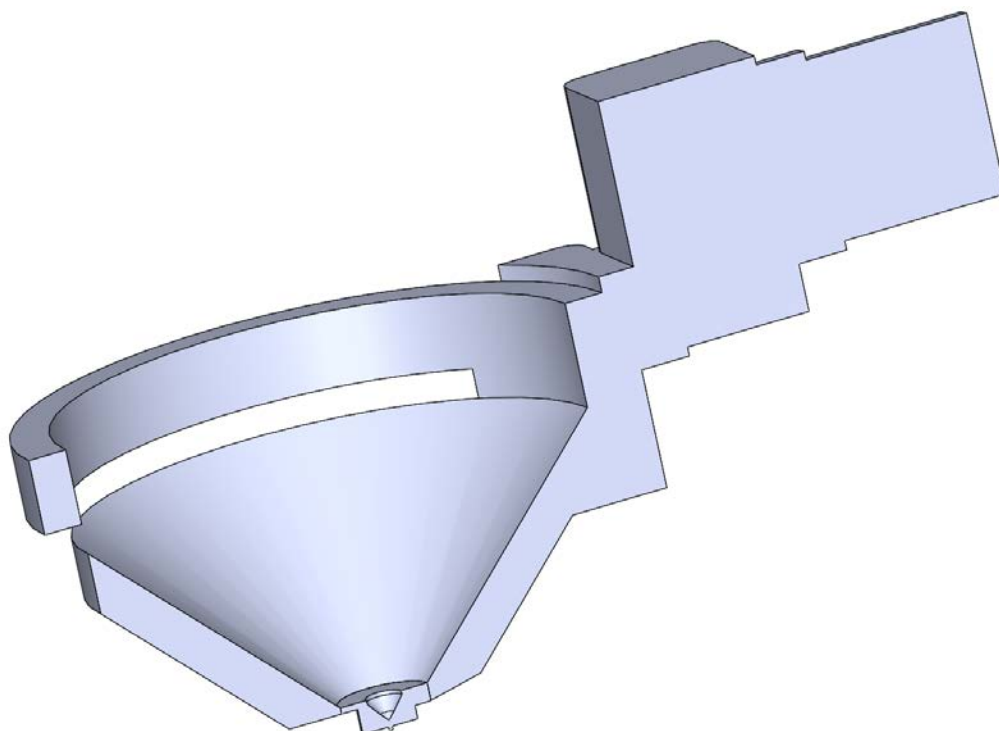
Obrázek 6.1: Řez modelem první varianty



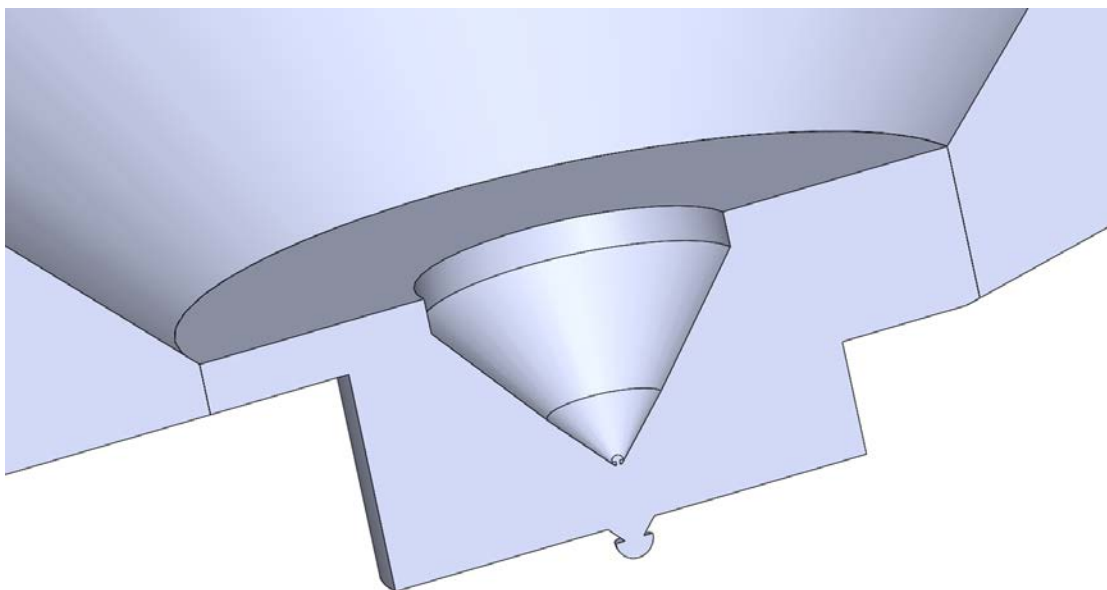
Obrázek 6.2: Detail řezu první varianty

## 6.2 Druhá varianta

Druhá varianta tzv. otevřená varianta, která má spodní část diferenciálně čerpané komory ve tvaru válce, na rozdíl od první varianty, kde spodní část je ve tvaru kužele.



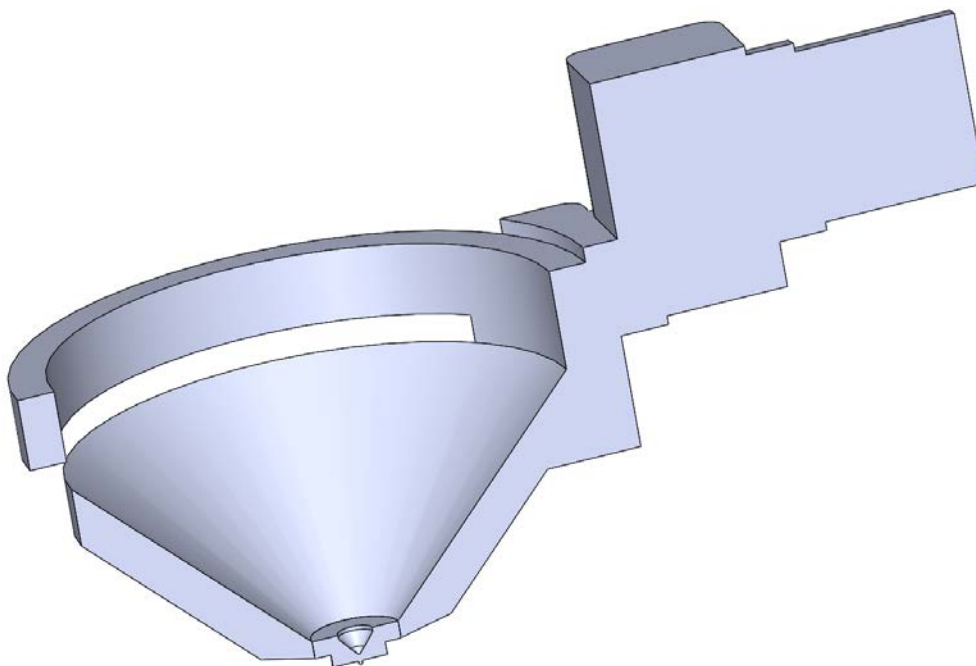
Obrázek 6.3: Řez modelem druhé varianty



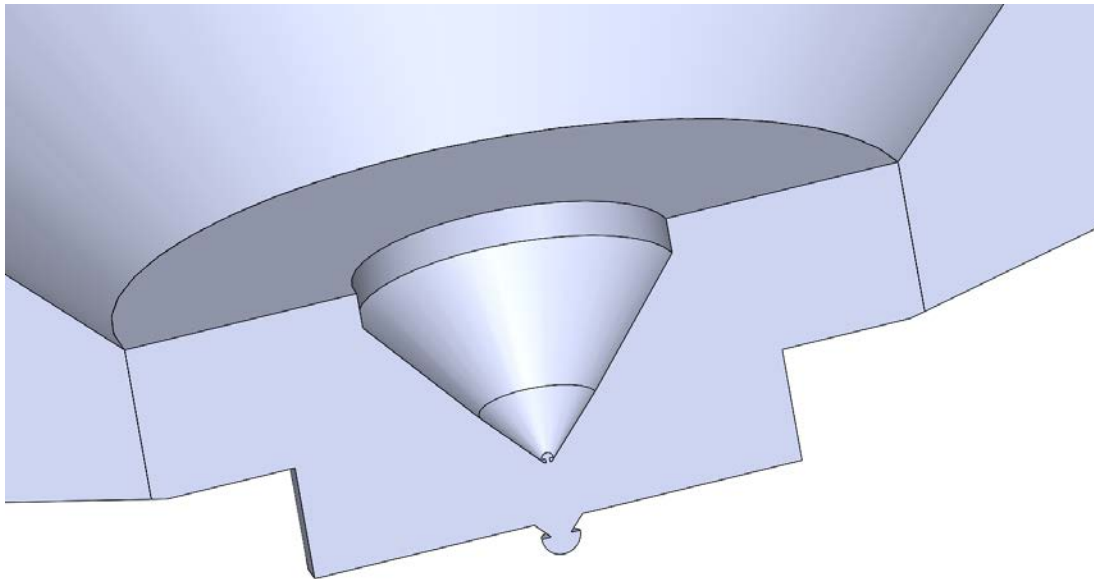
Obrázek 6.4: Detail řezu druhé varianty

### 6.3 Třetí varianta

Třetí varianta vychází z koncepce druhé varianty. Má stejný tvar spodní části diferenciálně čerpané komory, avšak má stejnou výšku sacího kanálu ve tvaru prstence kolem deflektoru.



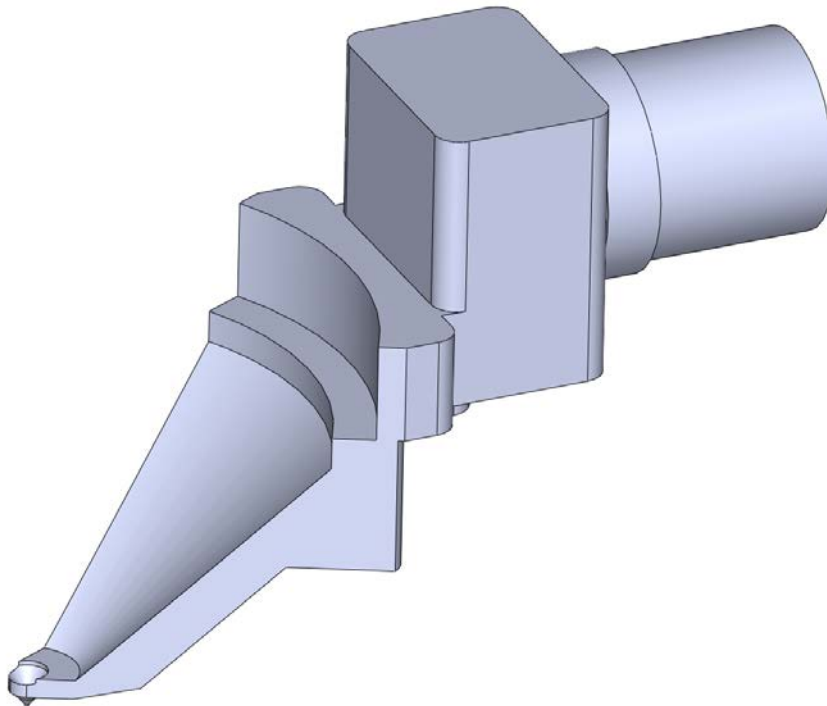
Obrázek 6.5: Řez modelem třetí varianty



Obrázek 6.6: Detail řezu třetí varianty

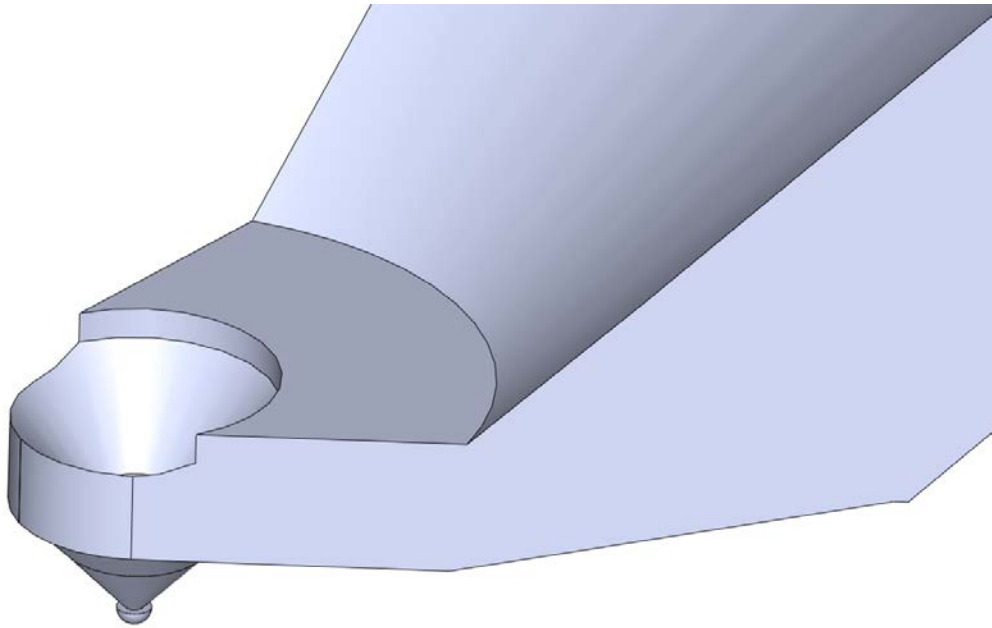
#### 6.4 Čtvrtá varianta

Tato varianta se od předchozích liší v tom, že nevyužívá kuželový prostor spodní části tubusu v rozsahu  $360^\circ$ , ale využívá pouze úhlovou výseč, která je otevřená směrem k výstupu. Spodní část diferenciálně čerpané komory má kuželový tvar stejně jako první navrhovaná varianta. Prostor kolem deflektoru je odsáván v celém rozsahu kolem své osy, tedy v rozsahu  $360^\circ$ .

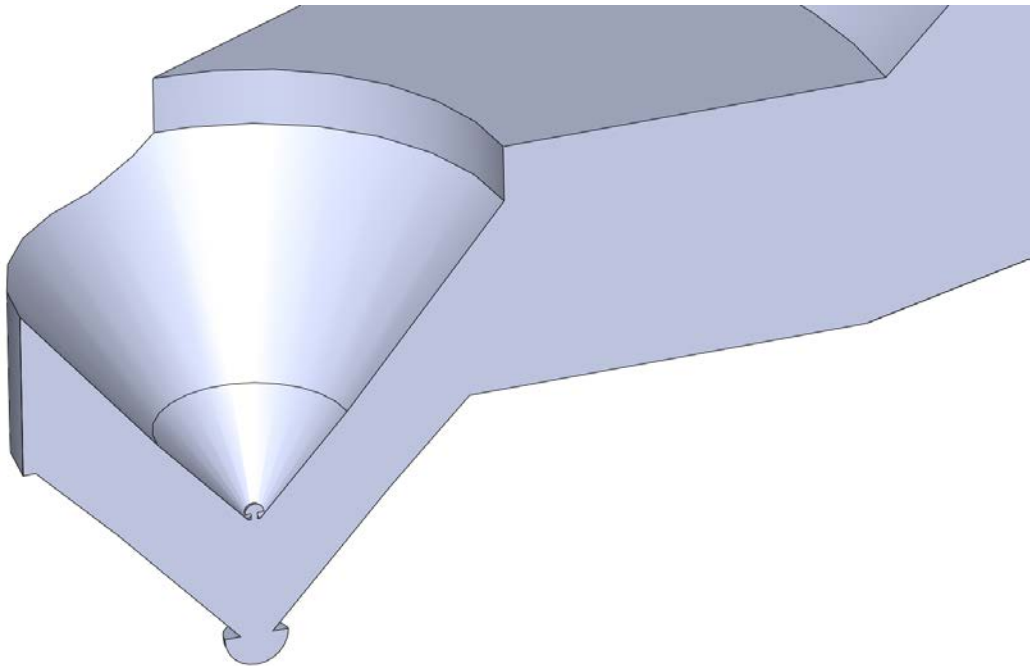


Obrázek 6.7: Celkový geometrický model čtvrté varianty





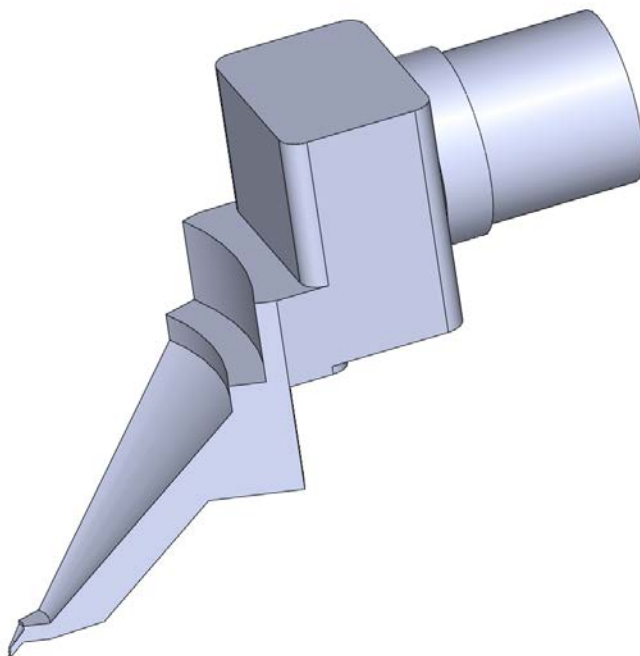
**Obrázek 6.8: Detail modelu čtvrté varianty**



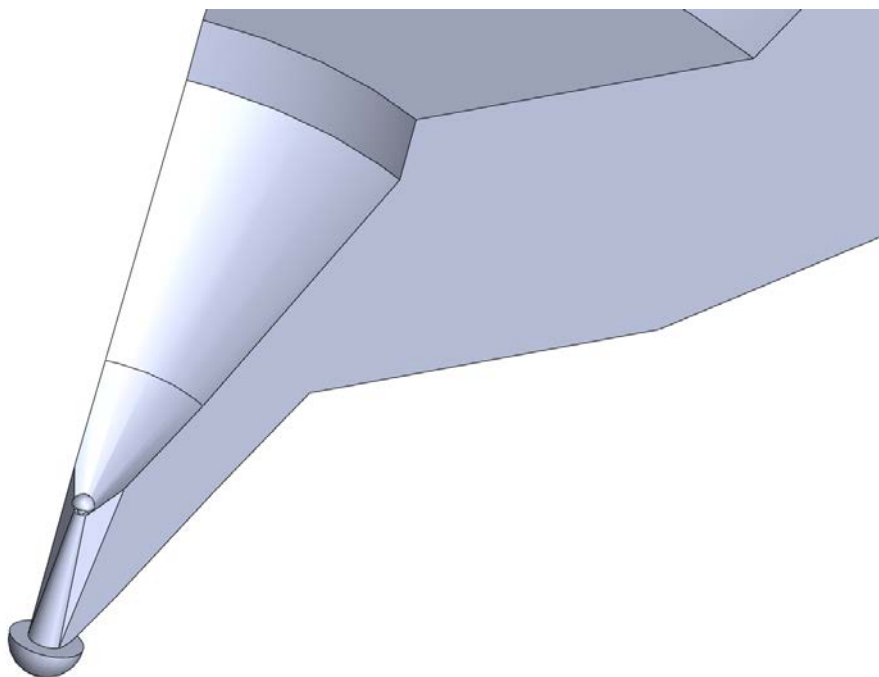
**Obrázek 6.9: Řez modelu čtvrté varianty**

## 6.5 Pátá varianta

Tato varianta jako jediná odsává plyn z prostoru kolem deflektoru jen v omezené úhlové výseči. Z toho vyplývá, že tato varianta má nejmenší objem diferenciálně čerpané komory.



Obrázek 6.10: Celkový geometrický model páté varianty



Obrázek 6.11: Detail geometrického modelu páté varianty

## 7 Nastavení okrajových podmínek

Nastavení okrajových podmínek musí odpovídat funkci diferenciálně čerpané komoře. Tyto podmínky následně limitují, neboli dávají určitý rozměr pro vstupní nebo naopak výstupní otvory. Diferenciálně čerpaná komora obsahuje celkem tři otvory a to jsou následující:

- **Přechod mezi tubusem a diferenciálně čerpanou komorou** – tento přechod prochází skrz clonku PLA2 obr. 4.2. Tedy první okrajová podmínka je tlak uvnitř tubusu elektronového mikroskopu, který je **0,01 Pa**.
- **Přechod komory vzorku do diferenciálně čerpané komory** – tento přechod prochází skrz clonku PLA1 obr. 4.2 V tomto případě počítáno s tlakem uvnitř komory vzorku **1000 Pa**.
- **Čerpací hrdlo** – tímto otvorem je čerpán plyn pomocí rotační vývěvy Lavat čerpací rychlostí  $25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Hodnota čerpací rychlosti byla přepočtena pomocí průřezu na rychlost  **$5,55 \text{ ms}^{-1}$** .

## 8 Vyhodnocení jednotlivých koncepcí

Tato kapitola prezentuje získané výsledky, které byly spočítány programem ANSYS Fluent. Zde získané výsledky budou sloužit jako rozhodující faktor pro výběr nejvhodnější koncepce diferenciálně čerpané komory. Jsou zde zobrazeny grafické výsledky všech pěti variant.

U každé varianty je vždy znázorněno rozložení rychlostí a to v celé diferenciálně čerpané komoře, ale i detailněji v oblasti kolem primárního elektronového svazku. Pro podrobnější zkoumání např. směru rychlosti jsou zde společně s barevnými konturami zobrazeny i vektory rychlosti.

Zkoumání pouze rychlosti by nebylo dostatečným rozhodujícím faktorem, proto je zde zkoumán i tlak uvnitř diferenciálně čerpané komory. Jeden z důvodů je také, že na dráze primárního elektronového svazku by měl být co možná nejmenší tlak, aby nedocházelo ke srážkám molekul čerpaného plynu a elektrony primárního svazku. Proto je zde zobrazeno jak rozložení tlaku v celé komoře, tak i mnohem důležitější část a to oblast průchodu primárního elektronového svazku.

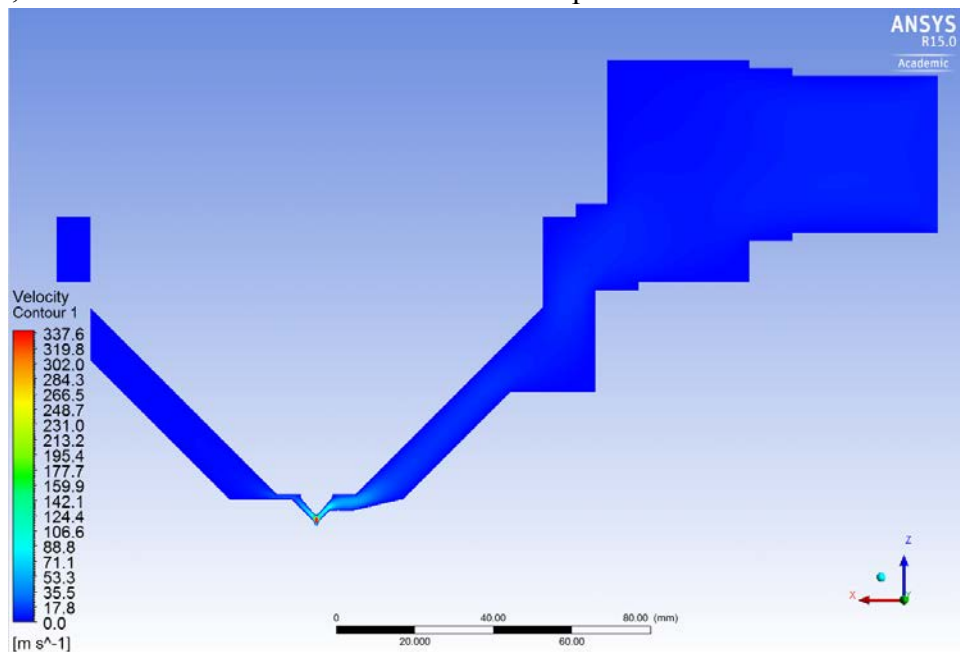
Dále je zde grafické znázornění hodnoty stěnové funkce pro jednotlivé varianty, která vyjadřuje vhodnost zvoleného turbulentního modelu, jak je popsáno v kapitole 5.3.

Na závěr každé varianty je graficky zobrazena závislost tlaku a rychlosti proudění na dráze primárního svazku. Tento graf vypovídá o vzájemném vztahu velikostí rychlosti a tlaku v určitém místě na dráze primárního svazku. Primární svazek má hodnotu 0 mm na rozhraní clonky PLA1 a hodnotu 1,9 mm u clonky PLA2 obr. 4.2. Stupnice je tedy vedena proti směru pohybu elektronů primárního svazku.

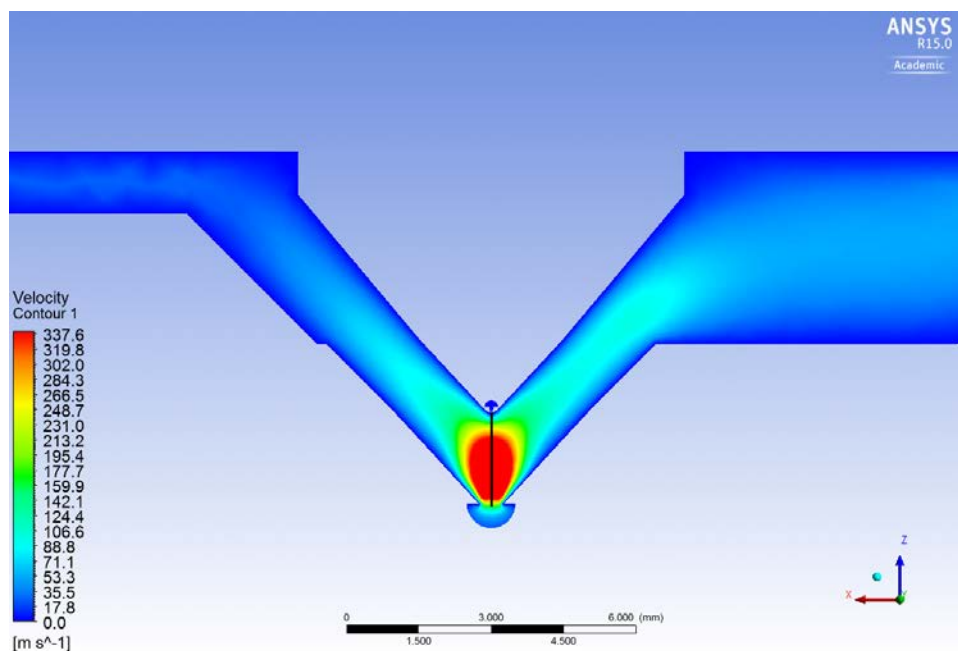
## 8.1 Vyhodnocení výsledků první varianty

### 8.1.1 Grafické vyhodnocení rychlosti plynu

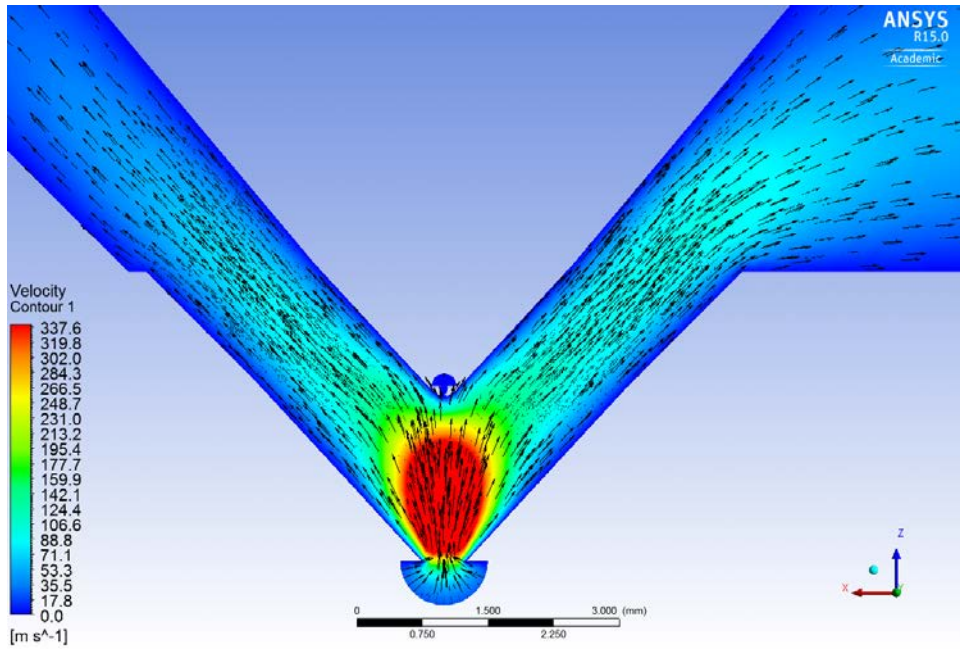
Na obrázcích viz. níže je zobrazeno barevné rozložení kontur rychlosti. Červená oblast znamená, že v této oblasti dochází k nadzvukovému proudění.



Obrázek 8.1: Grafické rozložení rychlosti plynu pomocí kontur diferenciálně čerpané komory

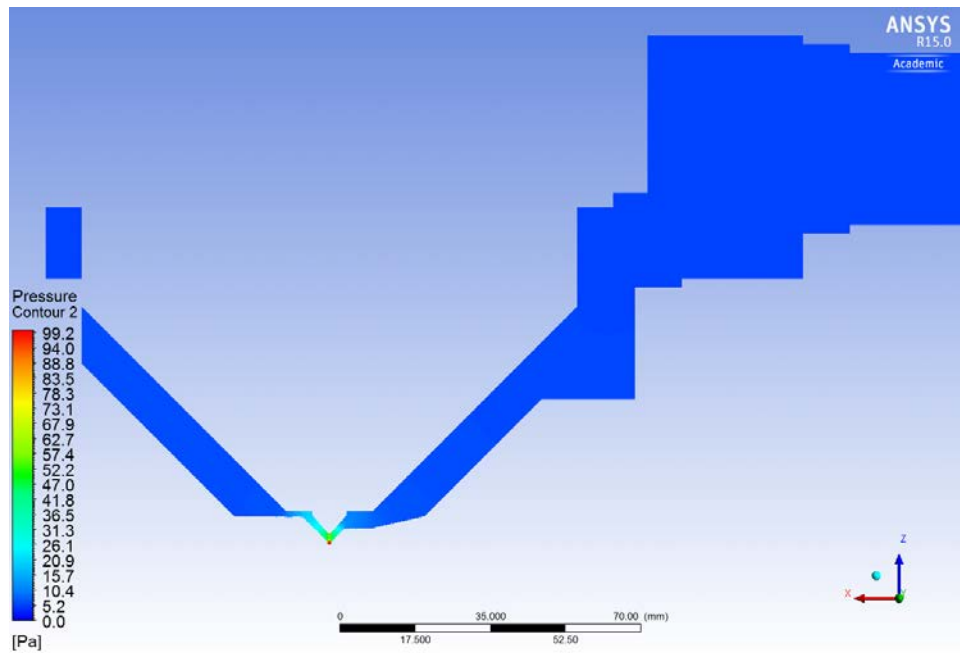


Obrázek 8.2: Detail rozložení rychlosti plynu s vyznačením primárního svazku

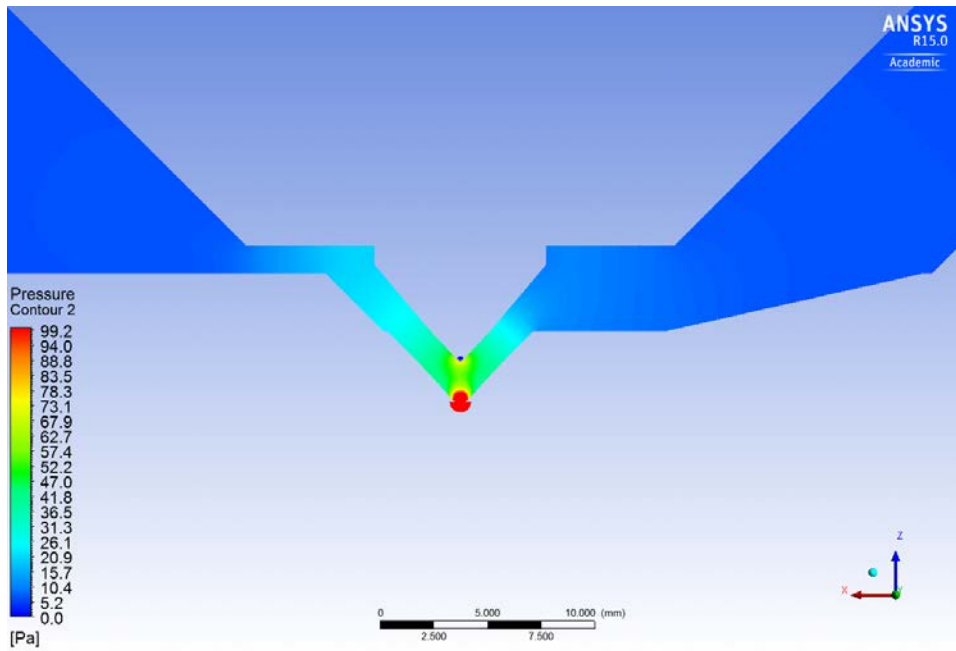


Obrázek 8.3 Rozložení vektorů rychlosti první varianty

### 8.1.2 Grafické vyhodnocení tlaku plynu

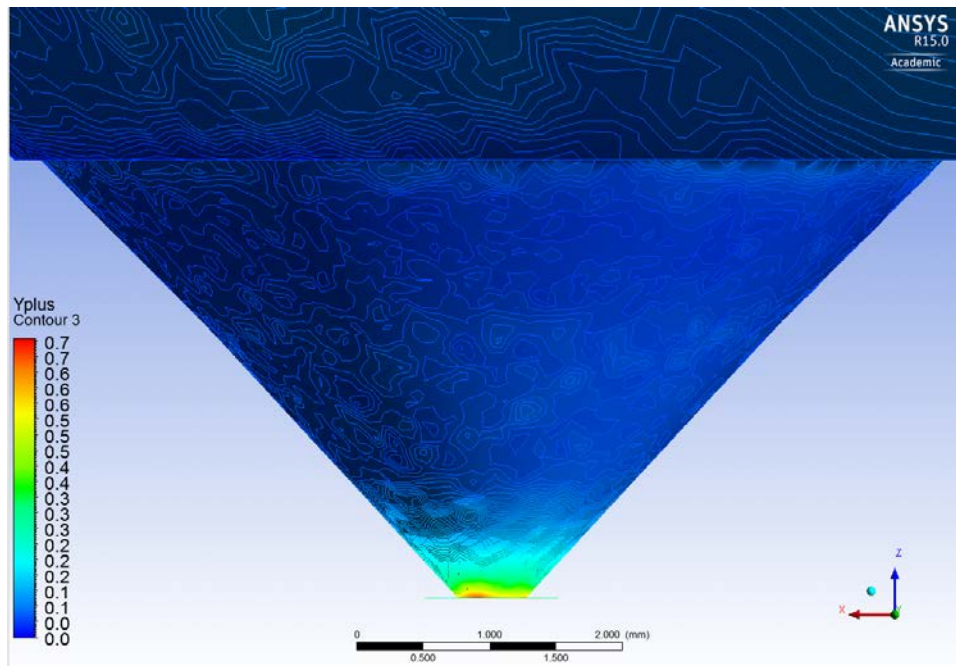


Obrázek 8.4: Rozložení tlaku plynu v diferenciální komoře



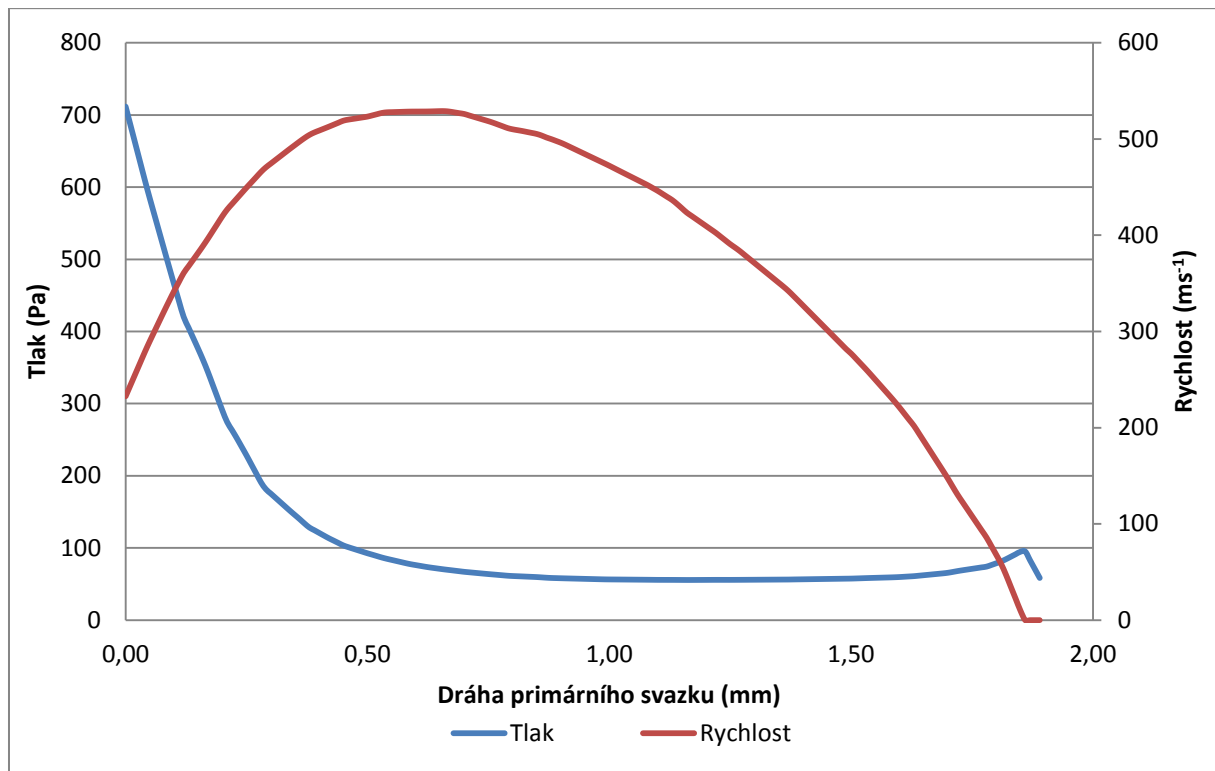
Obrázek 8.5: Detail rozložení tlaků v oblasti elektronového svazku

### 8.1.3 Grafické vyhodnocení stěnové funkce



Obrázek 8.6: Rozložení stěnové funkce

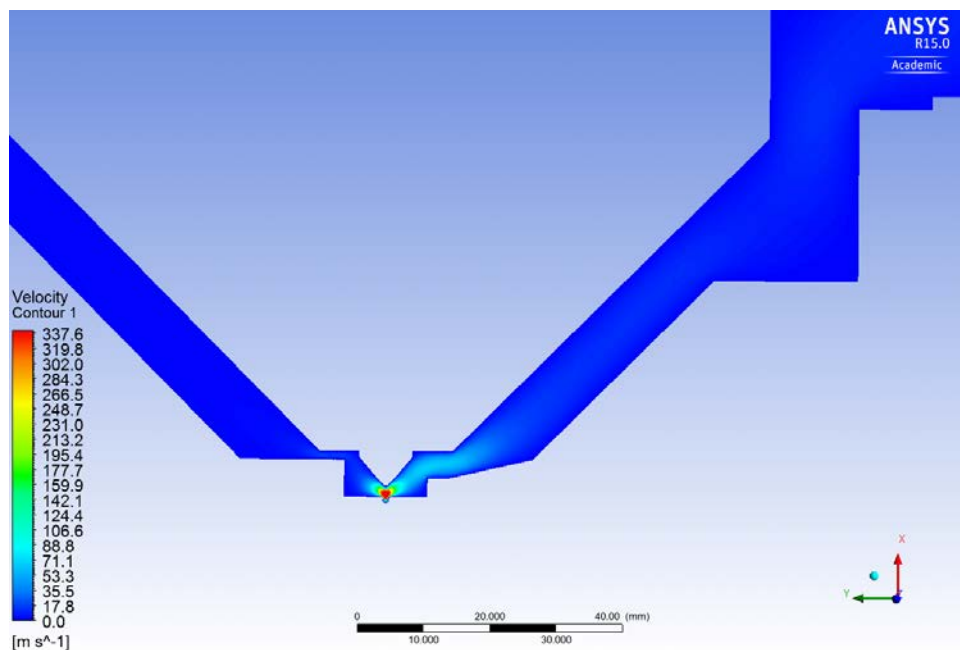
### 8.1.4 Vyhodnocení závislosti tlaku a rychlosti proudění na dráze primárního svazku



Obrázek 8.7: Závislost rychlosti a tlaku na dráze primárního svazku

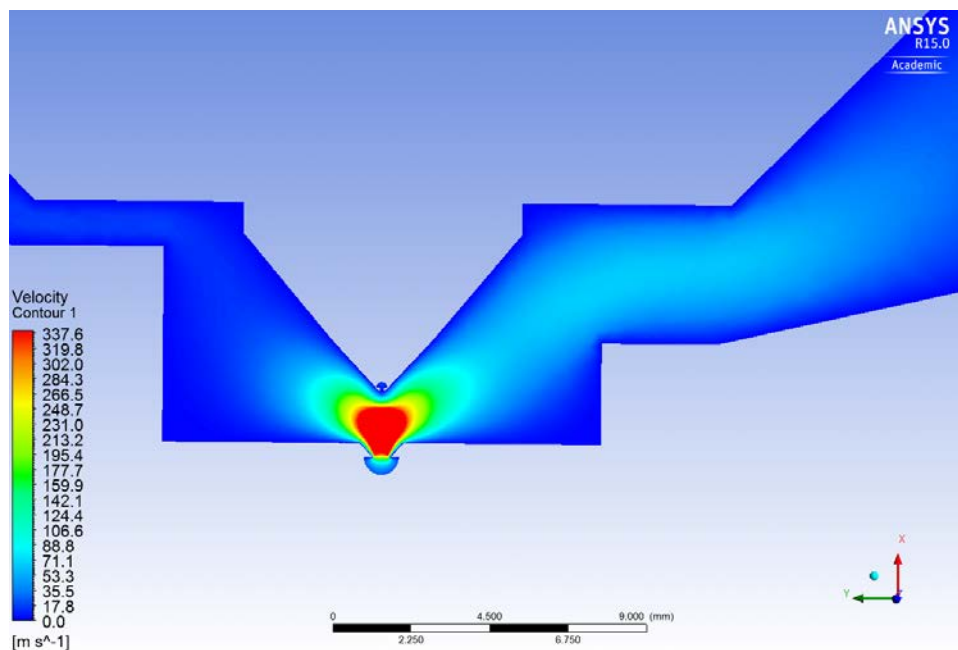
## 8.2 Vyhodnocení výsledků druhé varianty

### 8.2.1 Grafické vyhodnocení rychlosti plynu

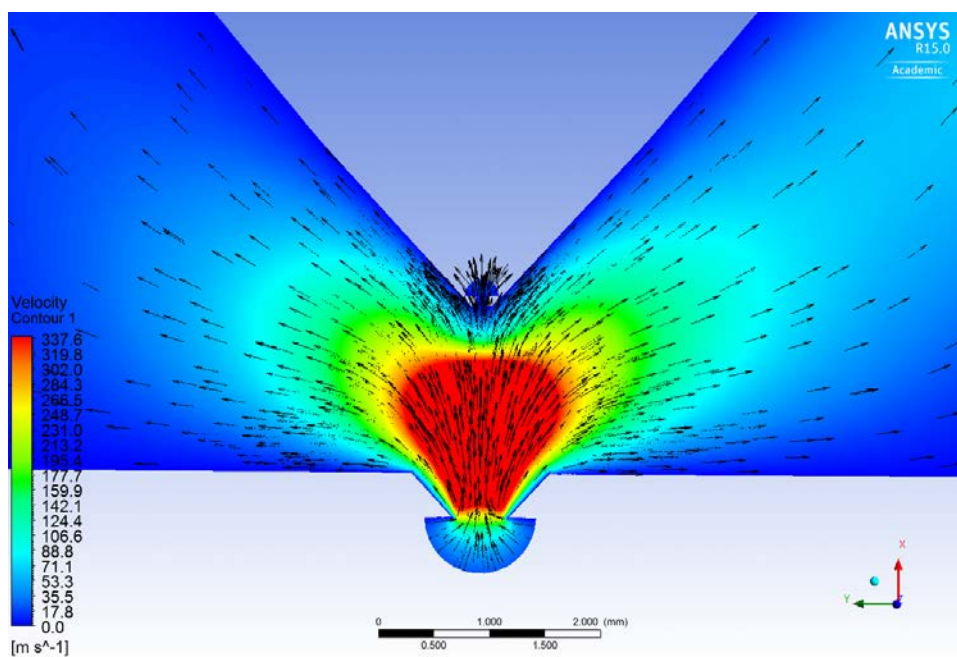


Obrázek 8.8: Rozložení rychlosti plynu v diferenciální komoře



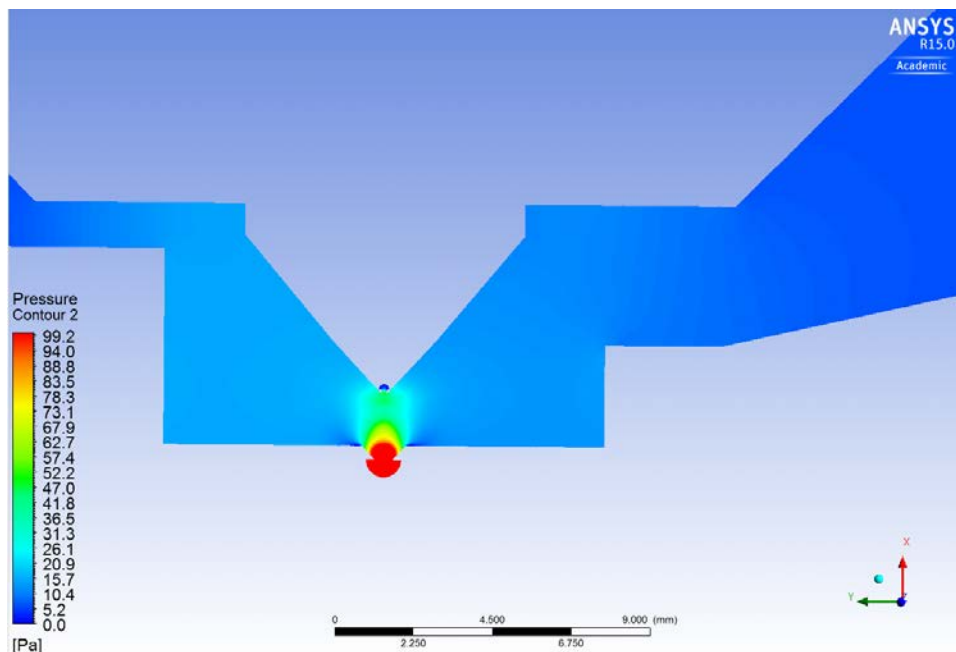


Obrázek 8.9: Detail rozložení rychlostí v oblasti elektronového svazku

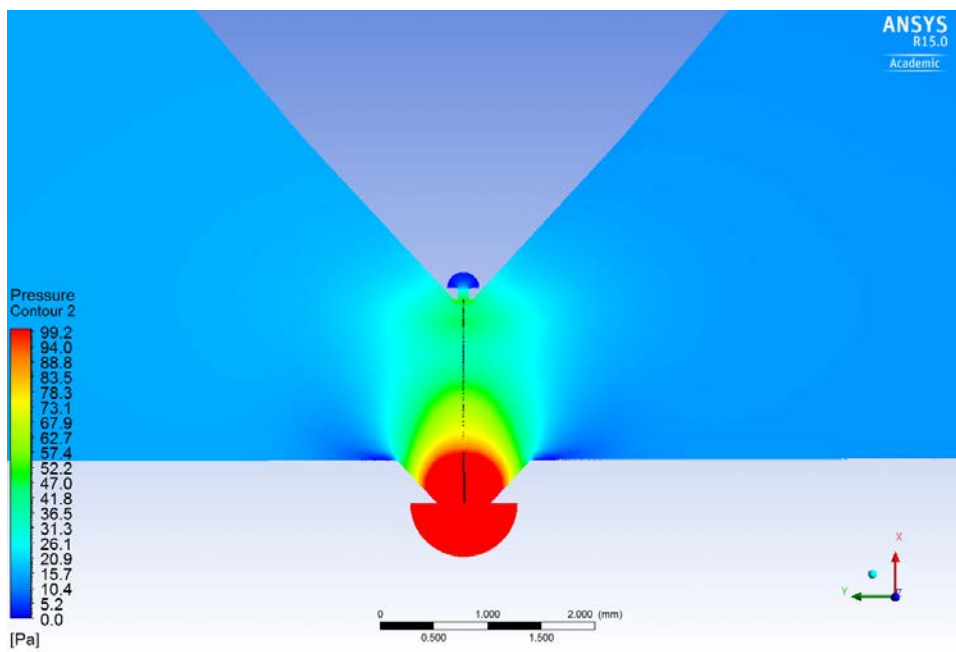


Obrázek 8.10: Rozložení vektorů rychlosti druhé varianty

## 8.2.2 Grafické vyhodnocení tlaku plynu

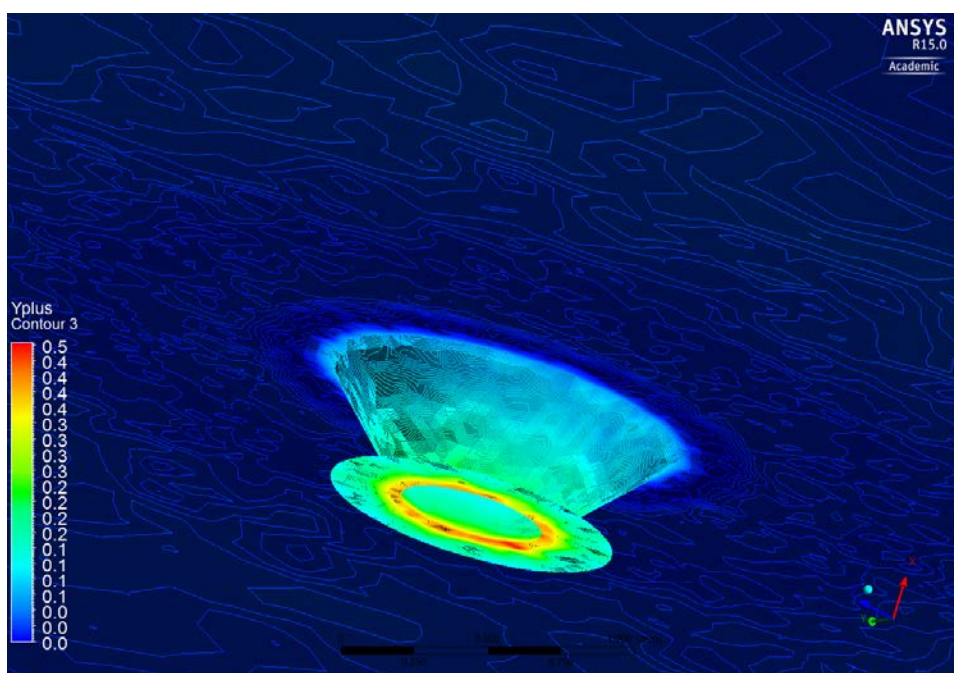


Obrázek 8.11: Rozložení tlaku v diferenciální komoře



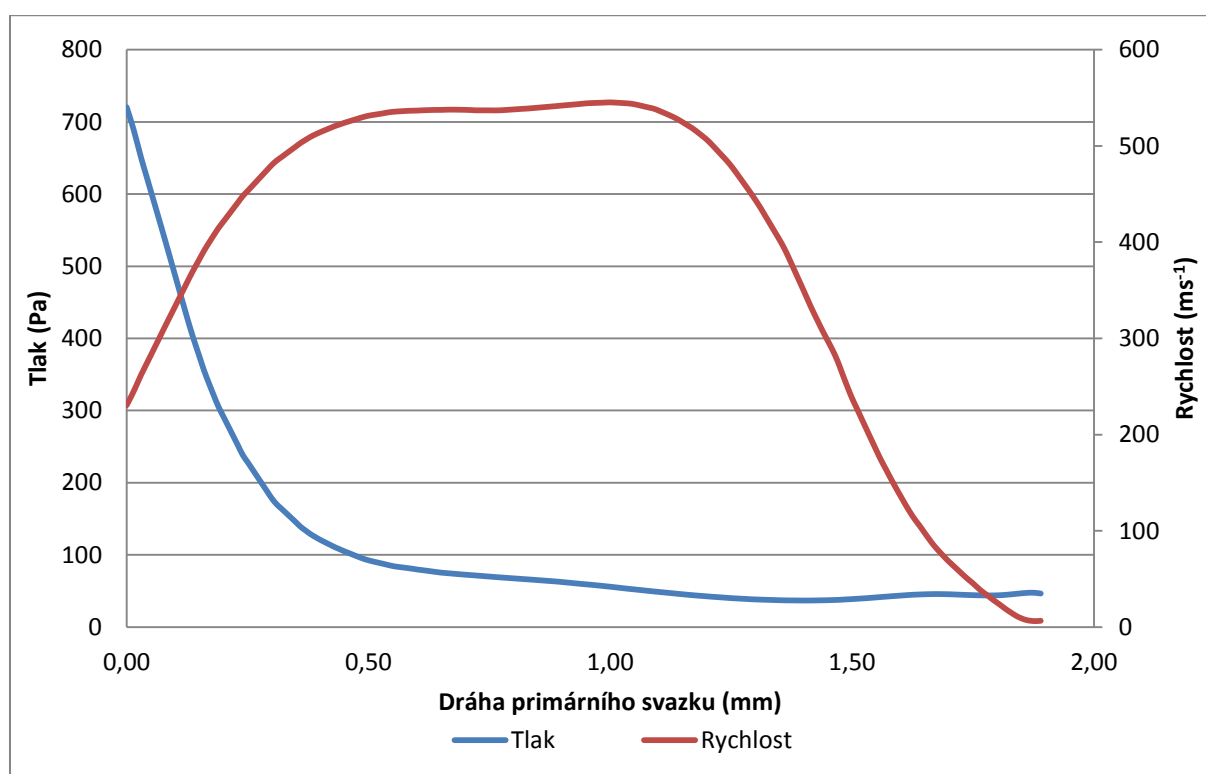
Obrázek 8.12: Detail rozložení tlaků v oblasti elektronového svazku

### 8.2.3 Grafické vyhodnocení stěnové funkce



Obrázek 8.13: Rozložení stěnové funkce

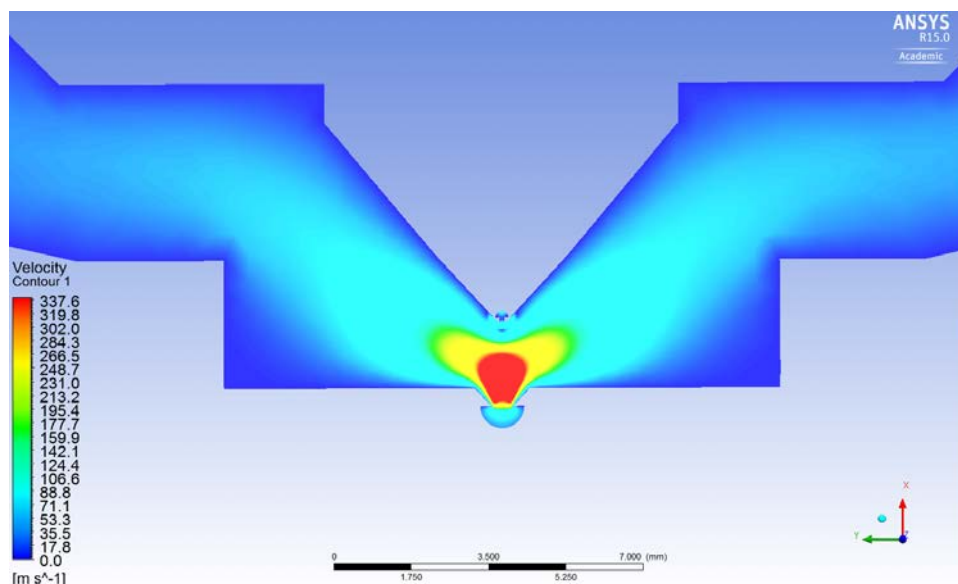
### 8.2.4 Vyhodnocení závislost tlaku a rychlosti proudění na dráze primárního svazku



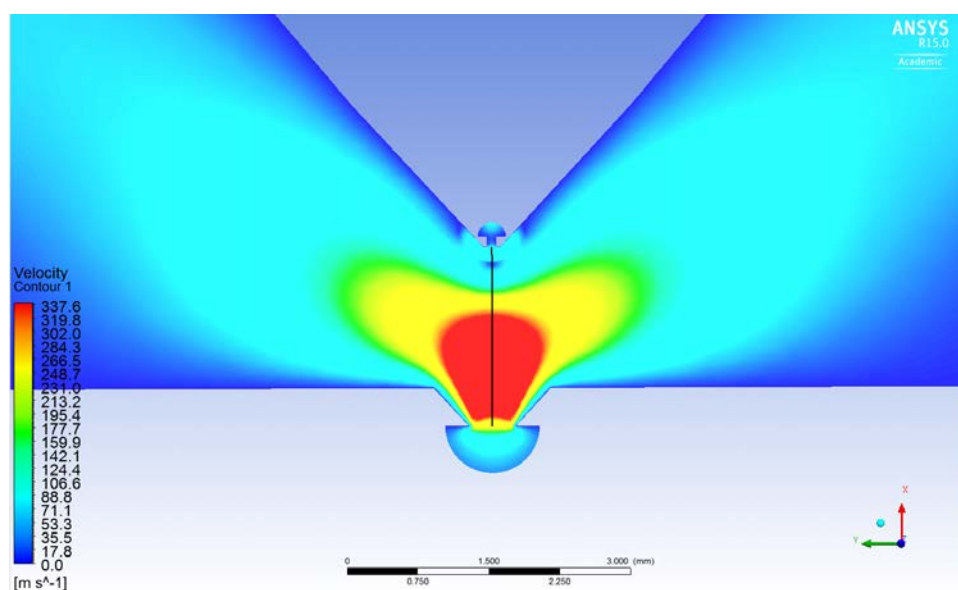
Obrázek 8.14: Závislost rychlosti a tlaku na dráze primárního svazku

## 8.3 Vyhodnocení výsledků třetí varianty

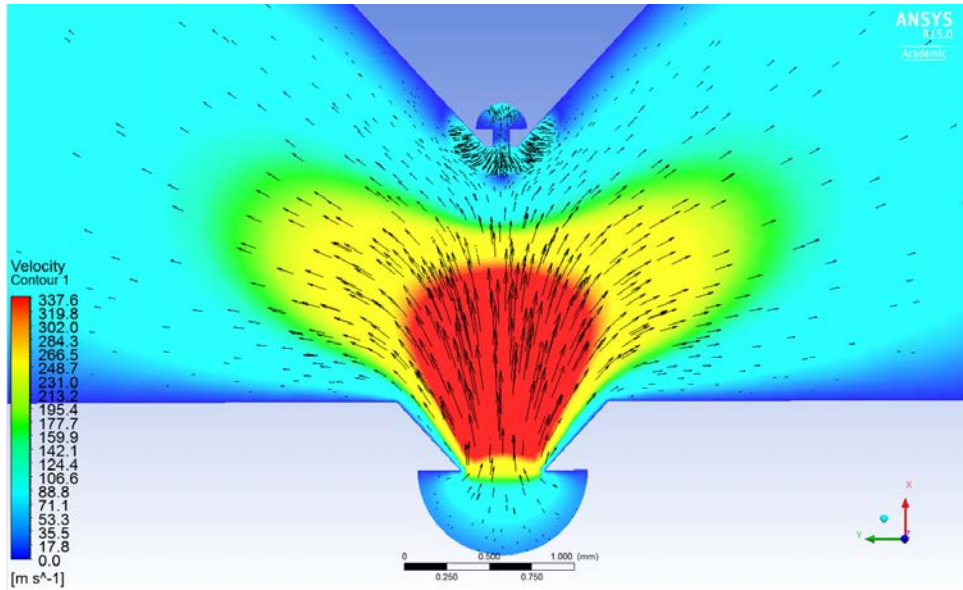
### 8.3.1 Grafické vyhodnocení rychlosti plynu



Obrázek 8.15: Rozložení rychlosti plynu v diferenciální komoře

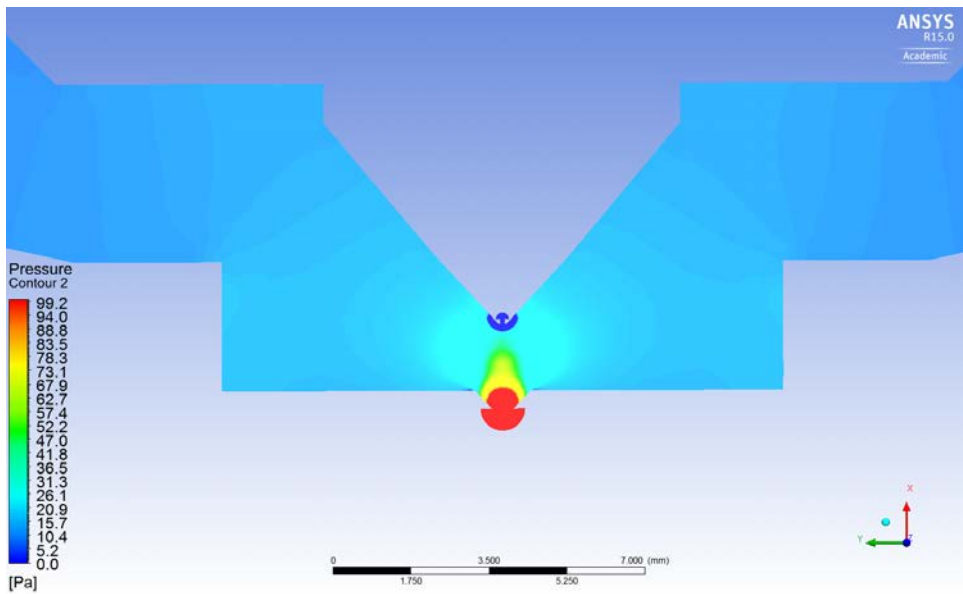


Obrázek 8.16: Detail rozložení rychlosti v oblasti elektronového svazku

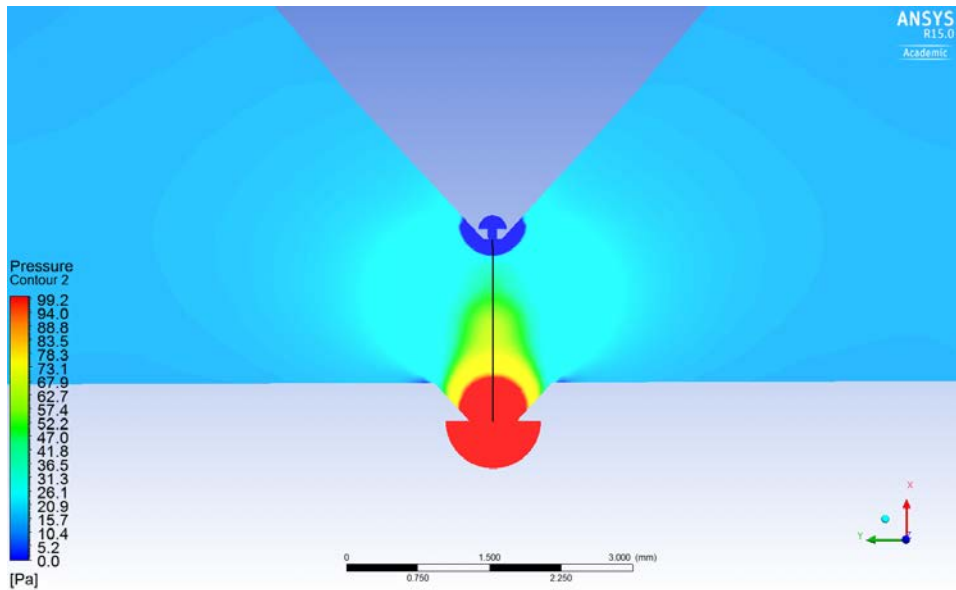


Obrázek 8.17: Rozložení vektoru rychlosti třetí varianty

### 8.3.2 Grafické vyhodnocení tlaku plynu

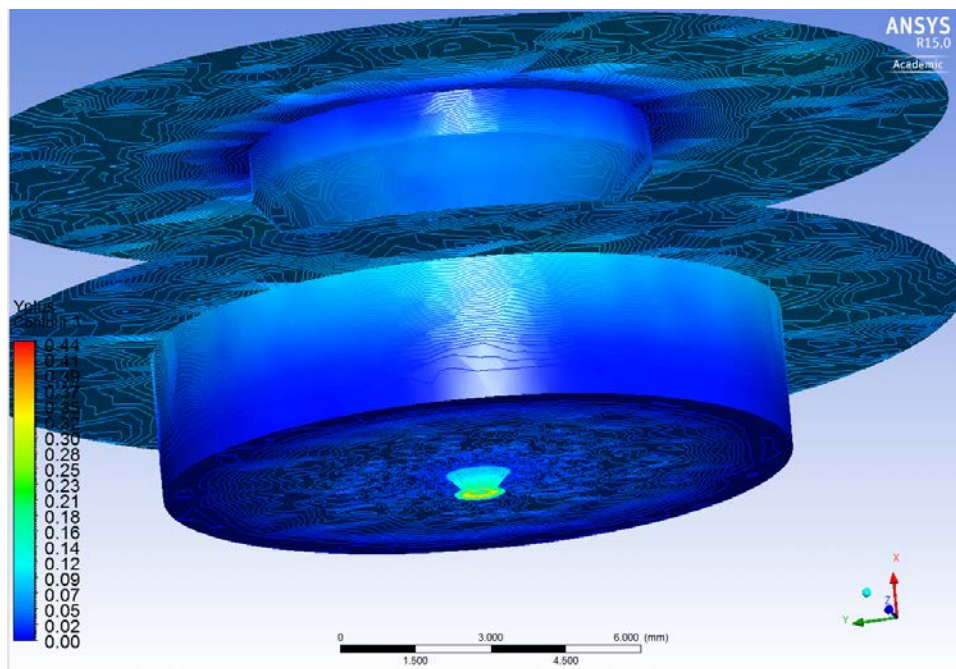


Obrázek 8.18: Rozložení tlaku v diferenciální komoře



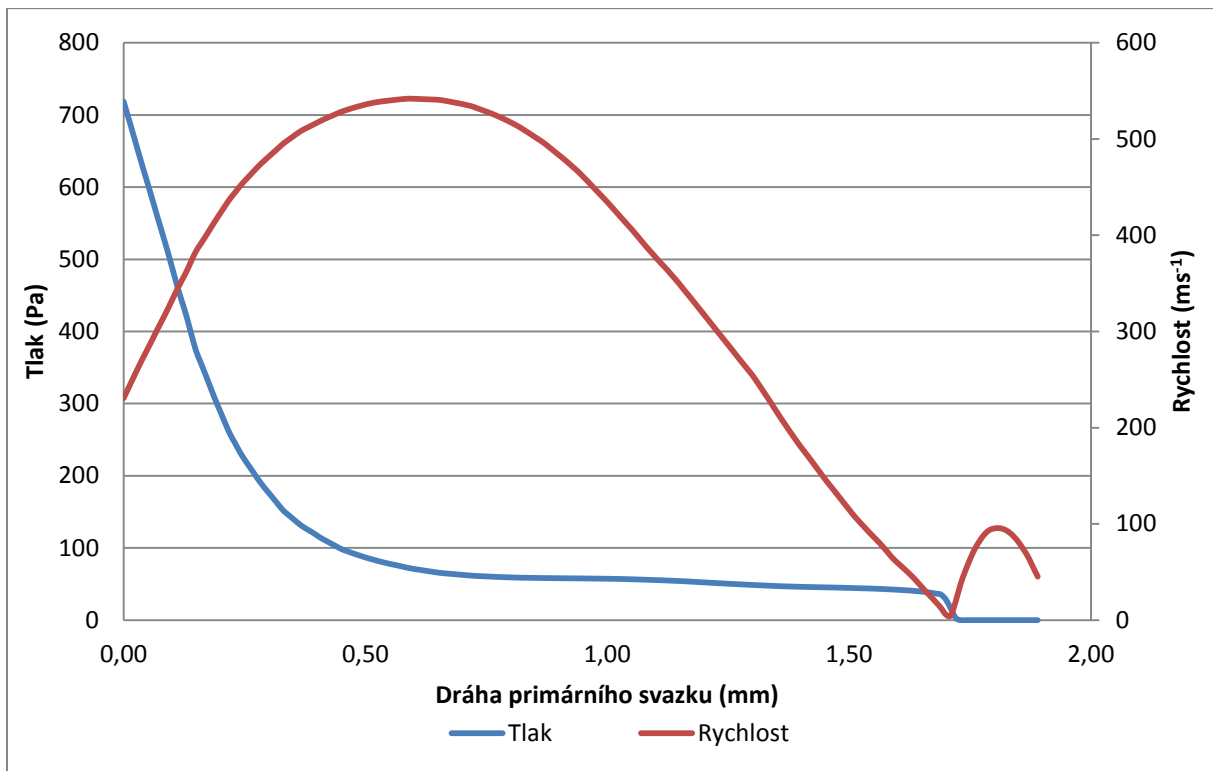
Obrázek 8.19: Detail rozložení tlaků v oblasti elektronového svazku

### 8.3.3 Grafické vyhodnocení stěnové funkce



Obrázek 8.20: Rozložení stěnové funkce

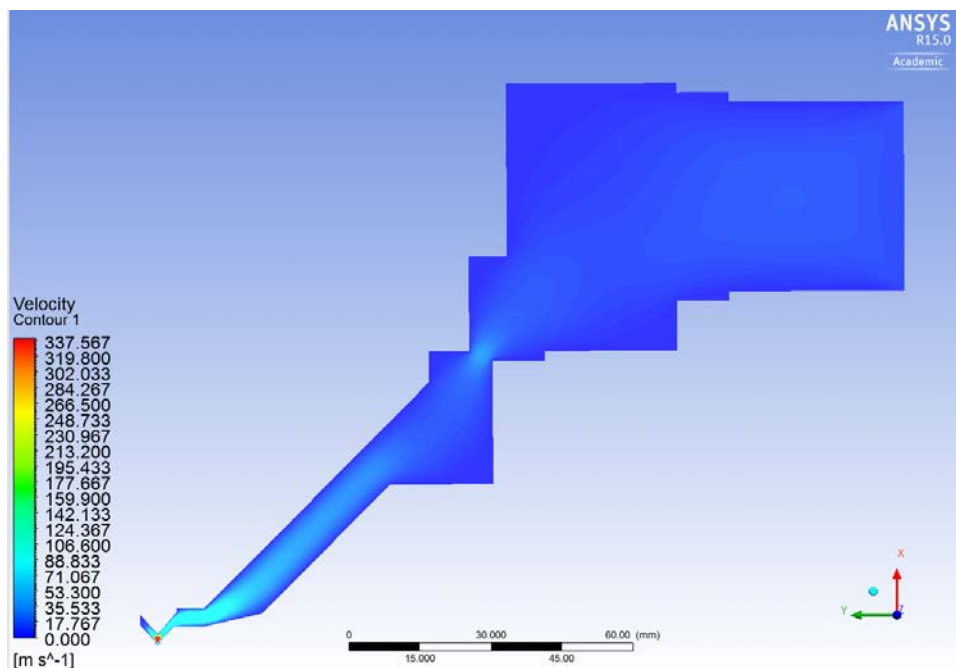
### 8.3.4 Vyhodnocení závislosti tlaku a rychlosti proudění na dráze primárního svazku



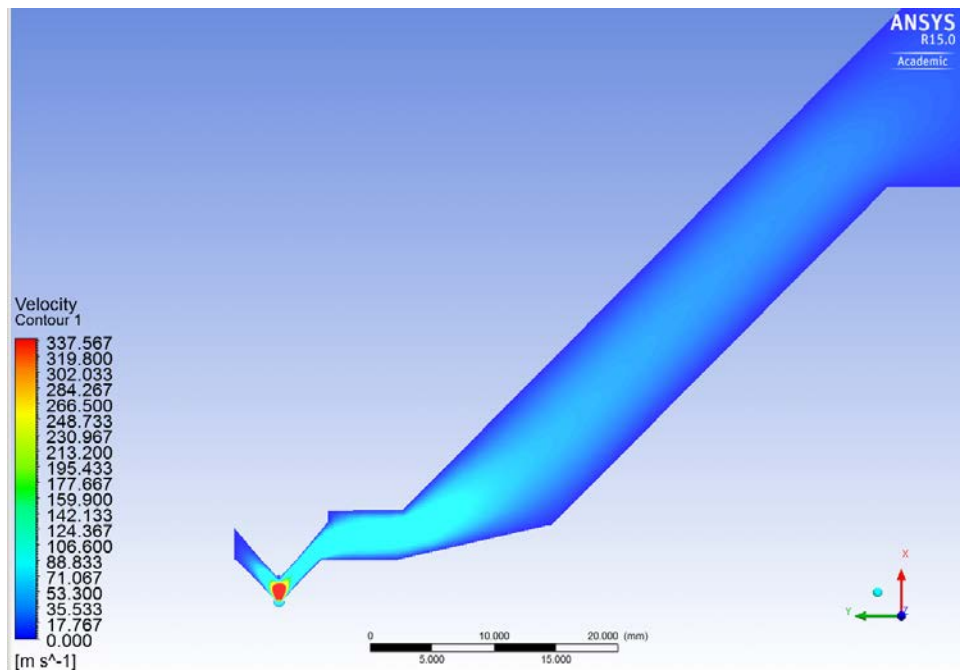
Obrázek 8.21: Závislost rychlosti a tlaku na dráze primárního svazku

## 8.4 Vyhodnocení výsledků čtvrté varianty

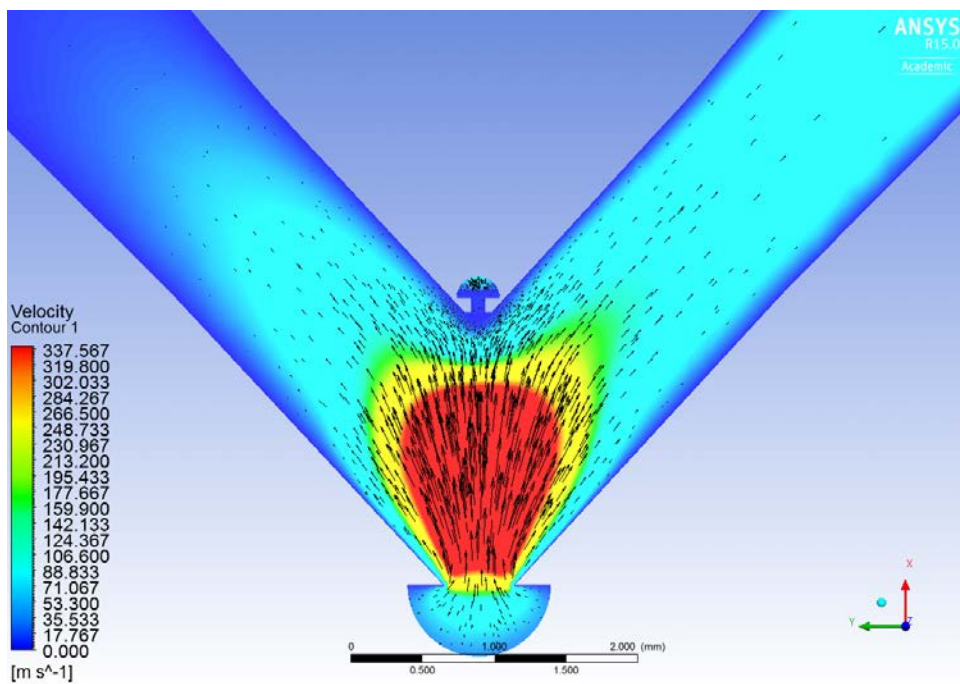
### 8.4.1 Grafické vyhodnocení rychlosti plynu



Obrázek 8.22: Rozložení rychlosti plynu v diferenciální komoře



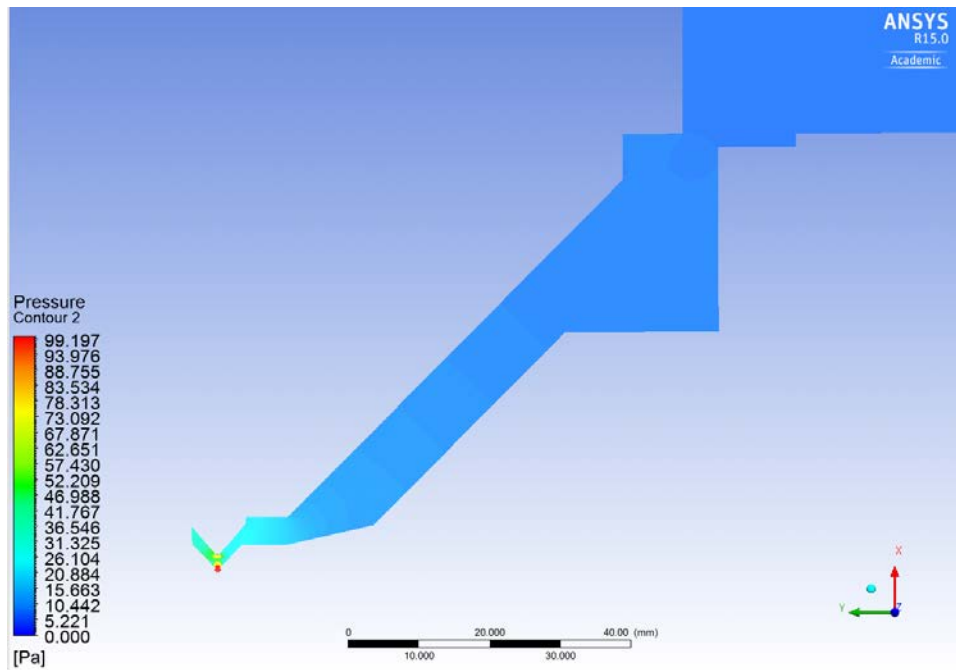
Obrázek 8.23: Detail rozložení rychlosti plynu v diferenciální komoře



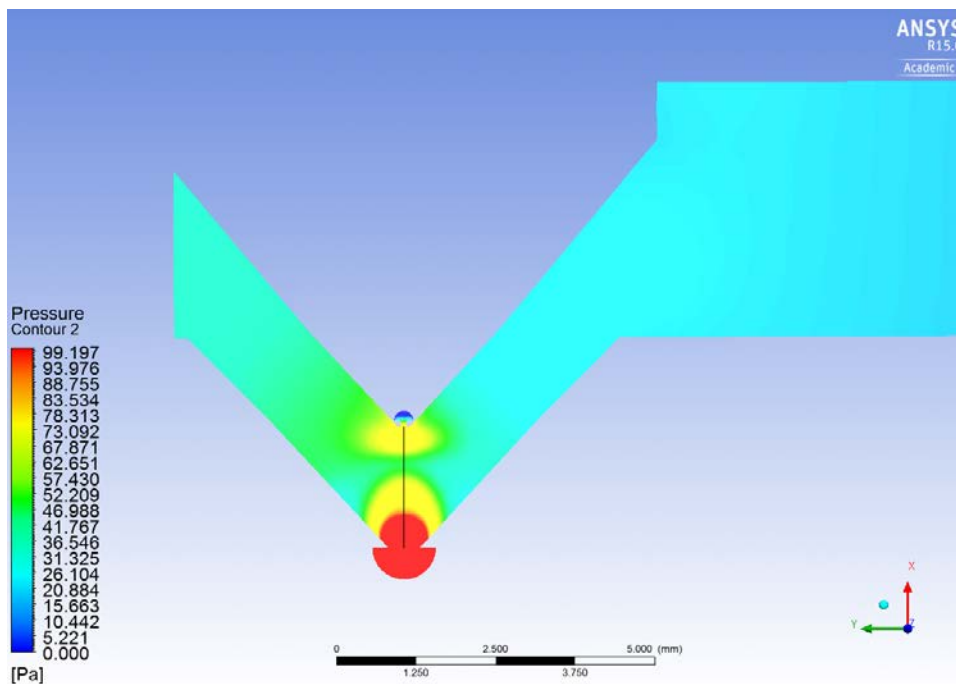
Obrázek 8.24: Rozložení vektoru rychlosti čtvrté varianty



## 8.4.2 Grafické vyhodnocení tlaku plynu

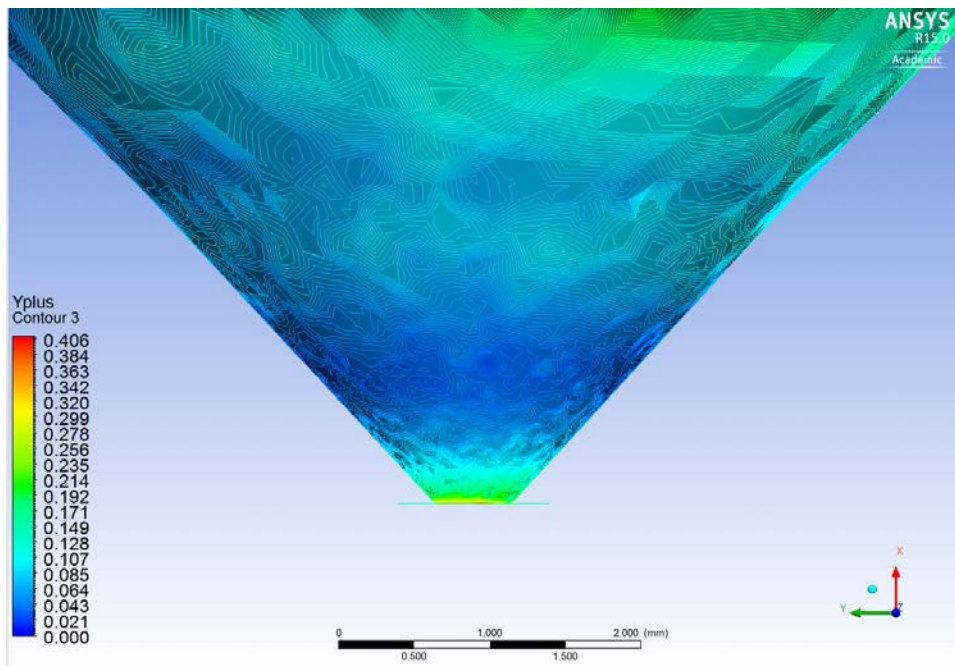


Obrázek 8.25: Rozložení tlaku v diferenciální komoře



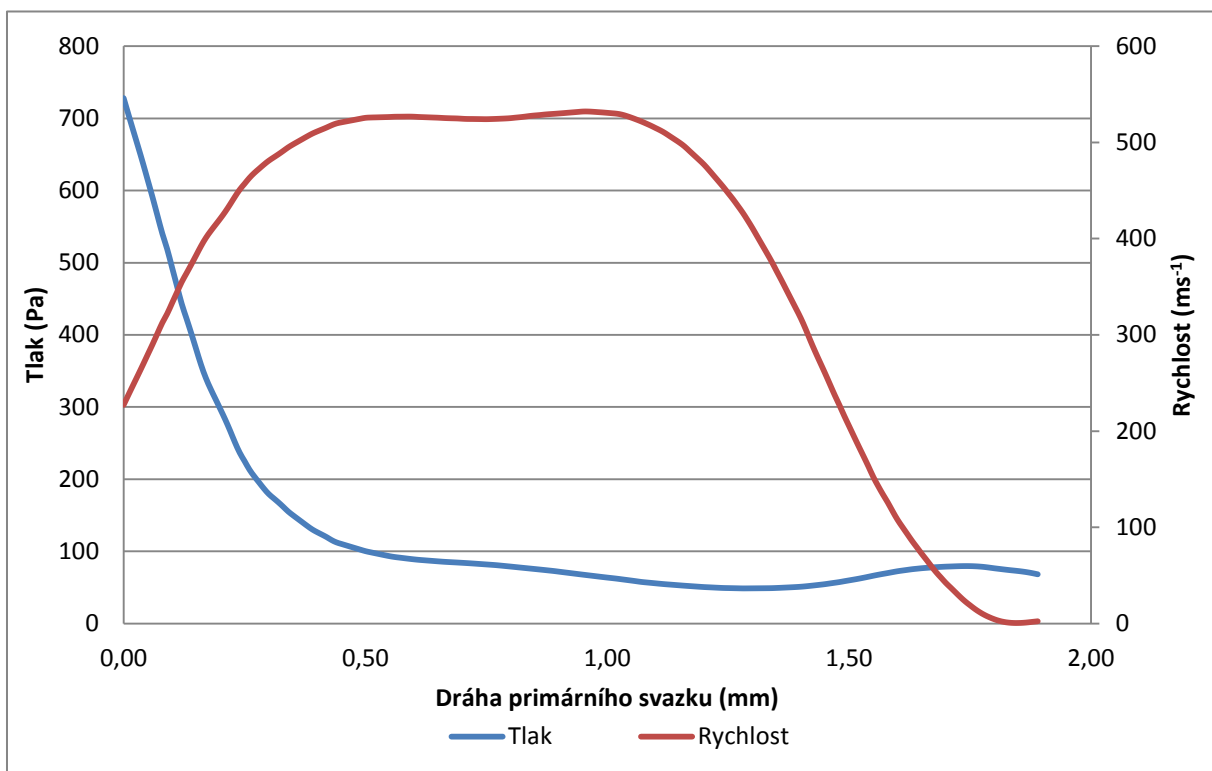
Obrázek 8.26: Detail rozložení tlaků v oblasti elektronového svazku

### 8.4.3 Grafické vyhodnocení stěnové funkce



Obrázek 8.27: Rozložení stěnové funkce

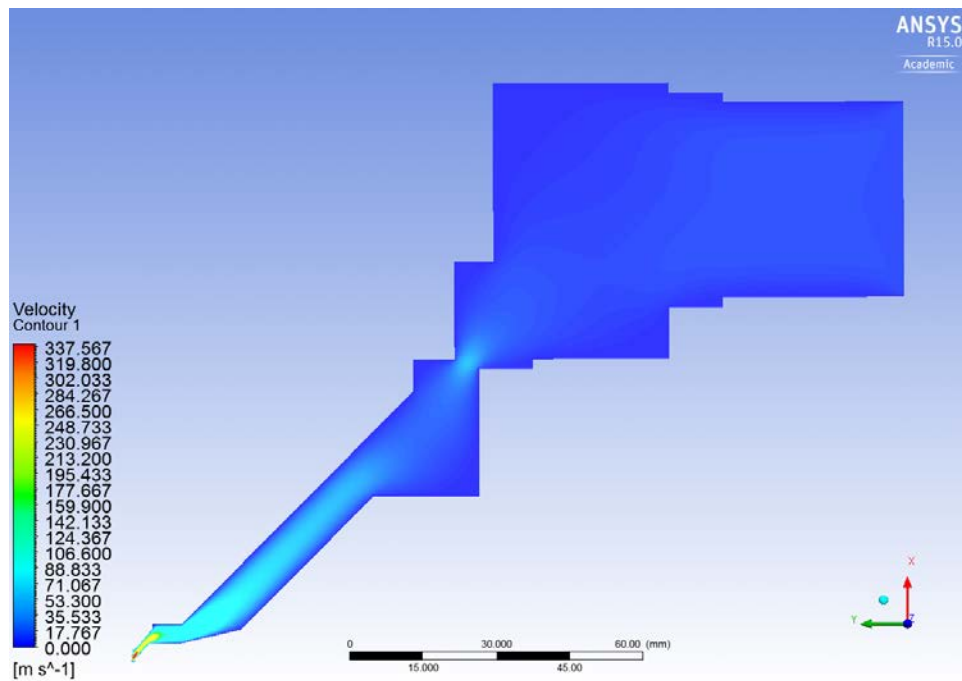
### 8.4.4 Vyhodnocení závislosti tlaku a rychlosti proudění na dráze primárního svazku



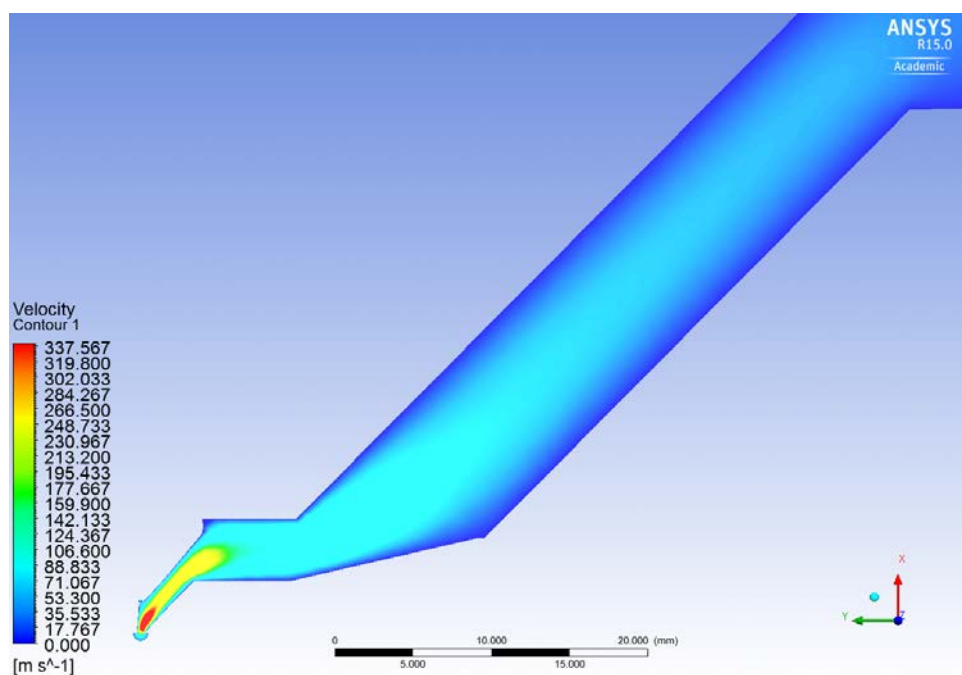
Obrázek 8.28: Závislost rychlosti a tlaku na dráze primárního svazku

## 8.5 Vyhodnocení výsledků páté varianty

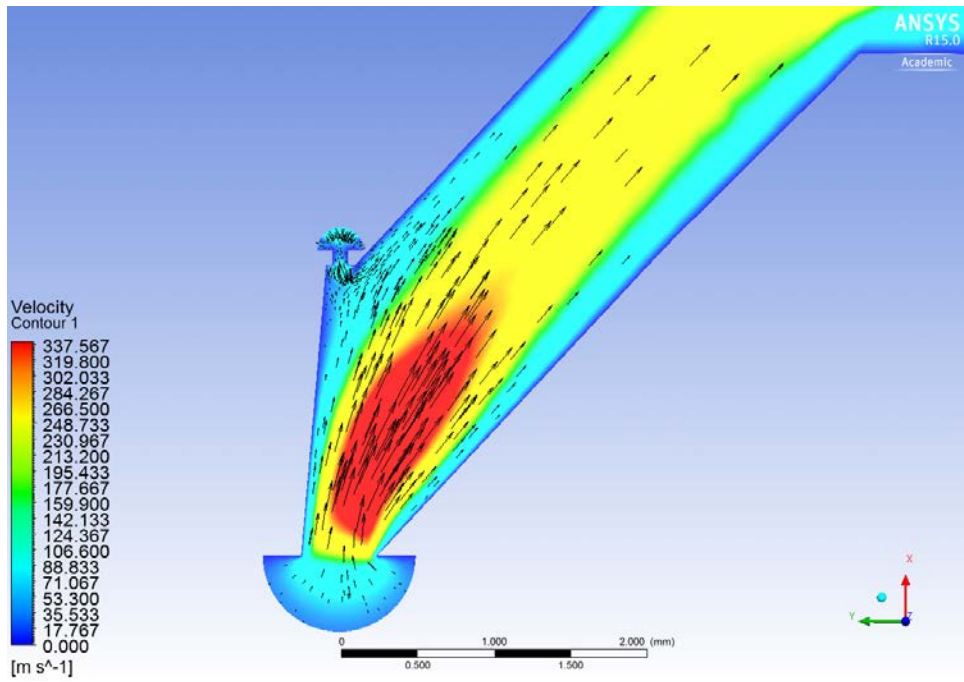
### 8.5.1 Grafické vyhodnocení rychlosti plynu



Obrázek 8.29: Rozložení rychlosti plynu v diferenciální komoře

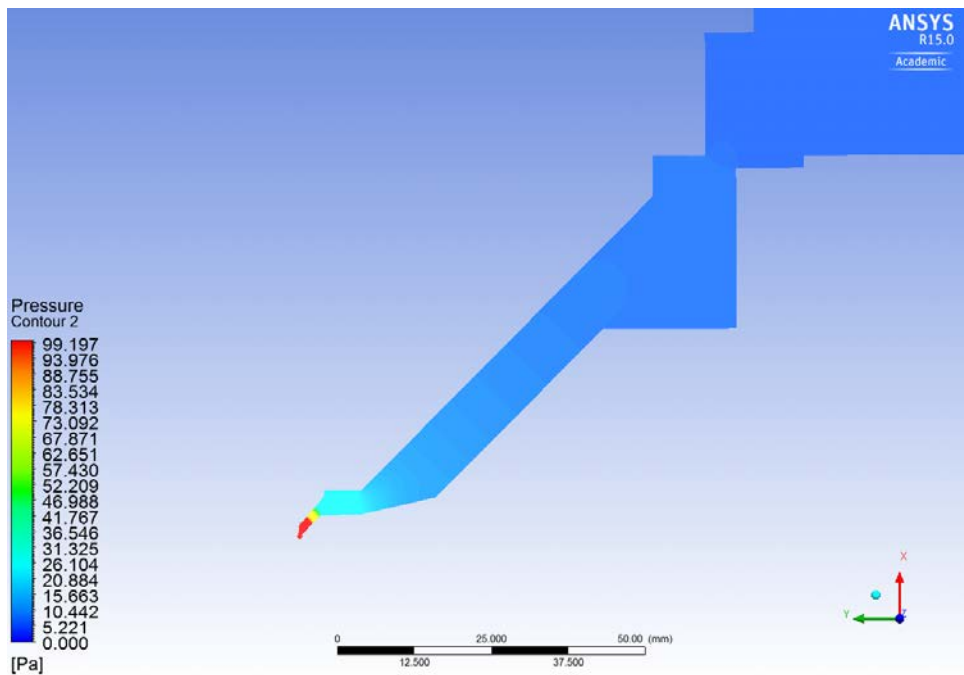


Obrázek 8.30: Detail rozložení rychlosti plynu v diferenciální komoře

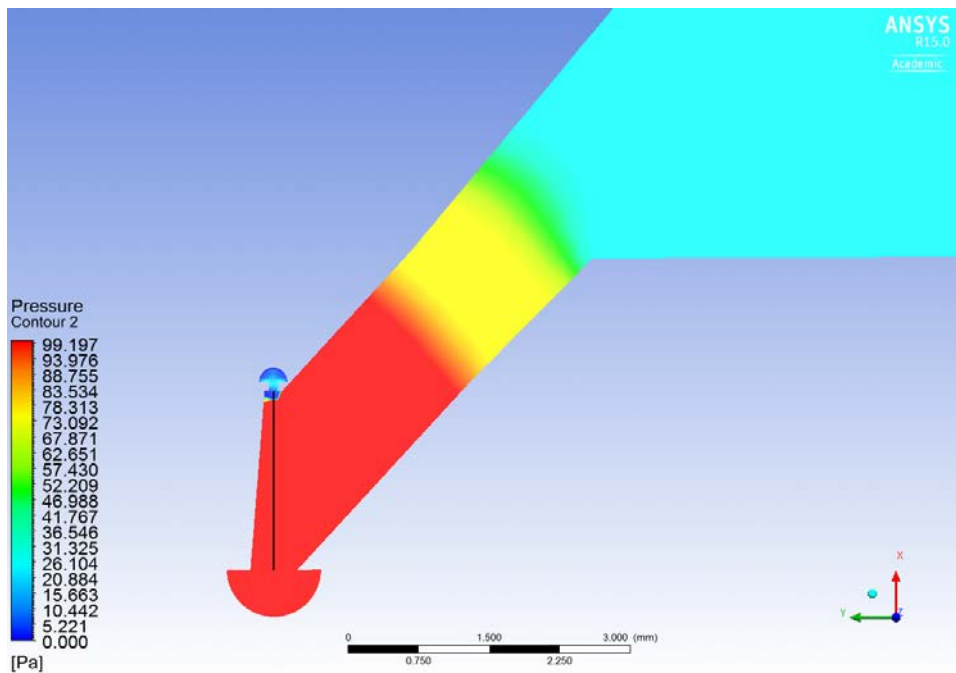


Obrázek 8.31: Rozložení vektoru rychlosti páte varianty

## 8.5.2 Grafické vyhodnocení tlaku plynu

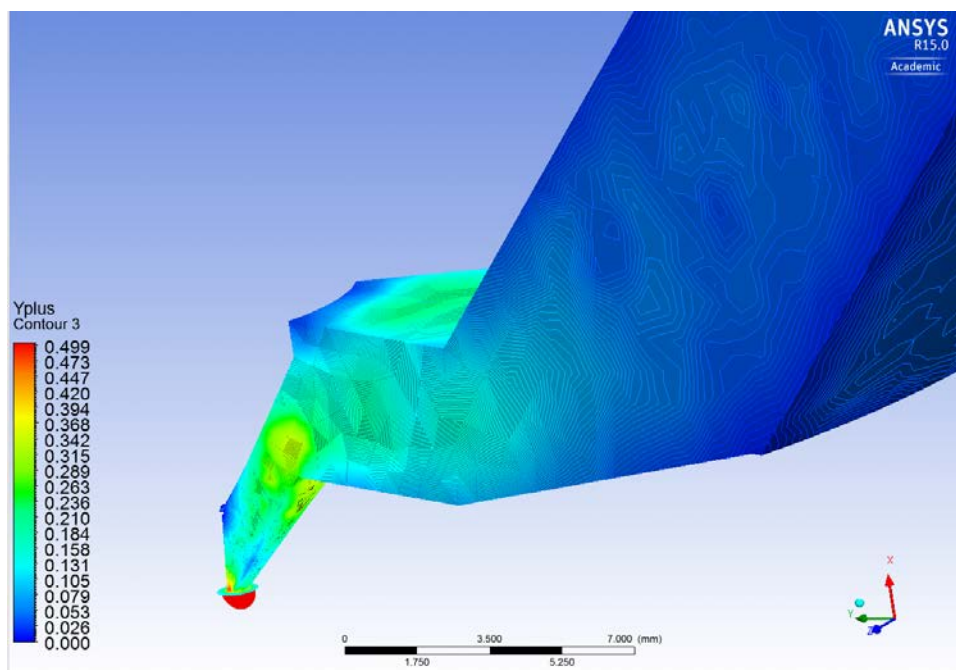


Obrázek 8.32: Rozložení tlaku v diferenciální komoře



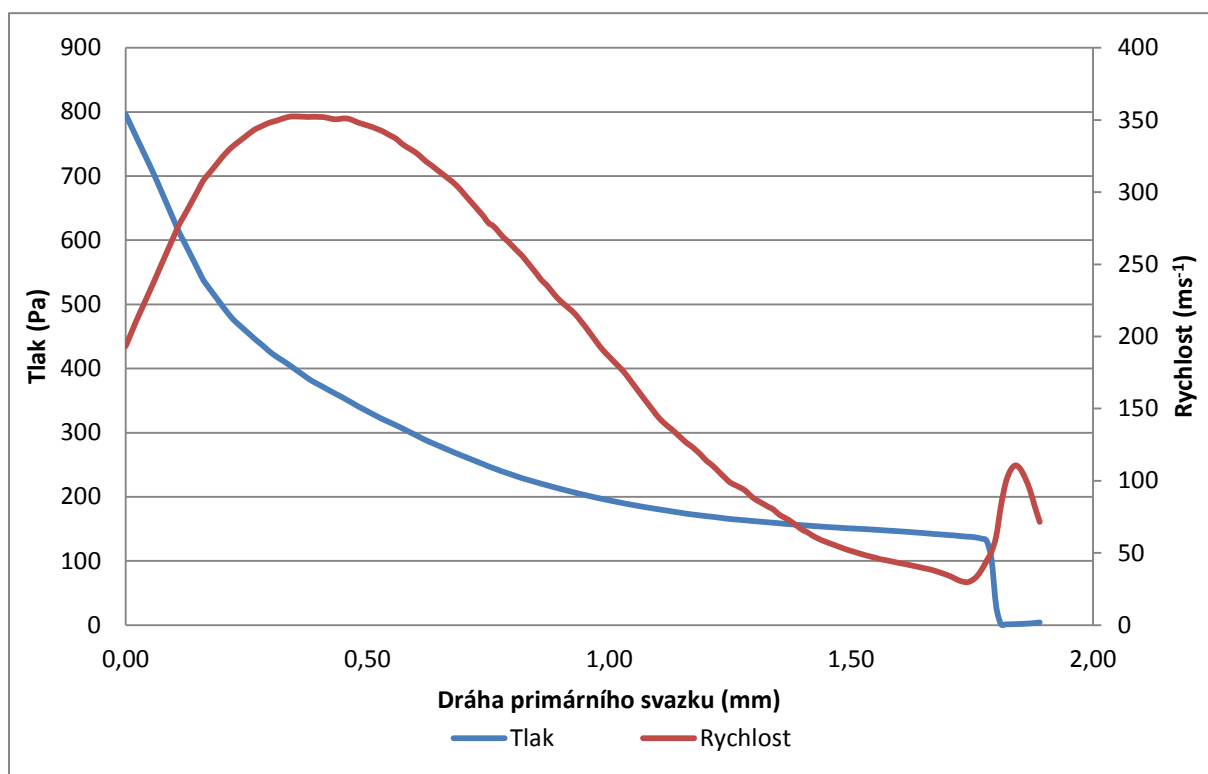
Obrázek 8.33: Detail rozložení tlaků v oblasti elektronového svazku

### 8.5.3 Grafické vyhodnocení stěnové funkce



Obrázek 8.34: Rozložení stěnové funkce

#### 8.5.4 Vyhodnocení závislost tlaku a rychlosti proudění na dráze primárního svazku



Obrázek 8.35: Závislost rychlosti a tlaku na dráze primárního svazku

## 9 Souhrnné výsledky

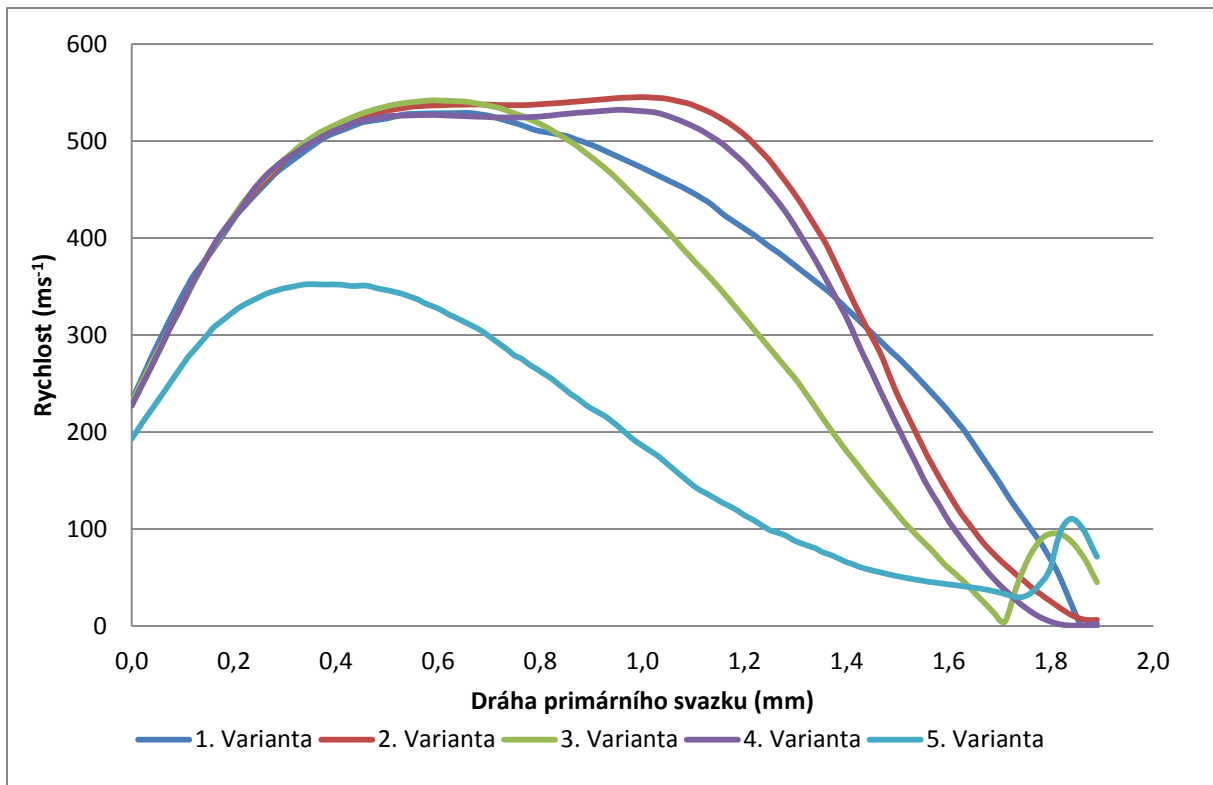
Tato kapitola vyhodnocuje grafické výsledky na dráze primárního svazku elektronů. Dráha primárního svazku, která prochází diferenciálně čerpanou komorou, má délku 1,9 mm.

Na obrázku 9.1 je znázorněn průběh rychlosti na dráze elektronového svazku pro jednotlivé varianty. Z grafu lze vidět, že nejnižší rychlosti byly dosaženy u varianty č. 5, naopak nejvyšší rychlosti dosahovala varianta č. 2. Varianty č. 1, 2 a 4 opustí nadzvukové proudění téměř ve stejném bodě a to 1,4 mm od clonky PLA1. Varianta číslo 5 dosáhne nadzvukového proudění v nejkratším intervalu a to 0,29 mm. U varianty 3. dojde k přechodu z oblasti nadzvukového proudění v bodě 1,16 mm od clonky PLA1.

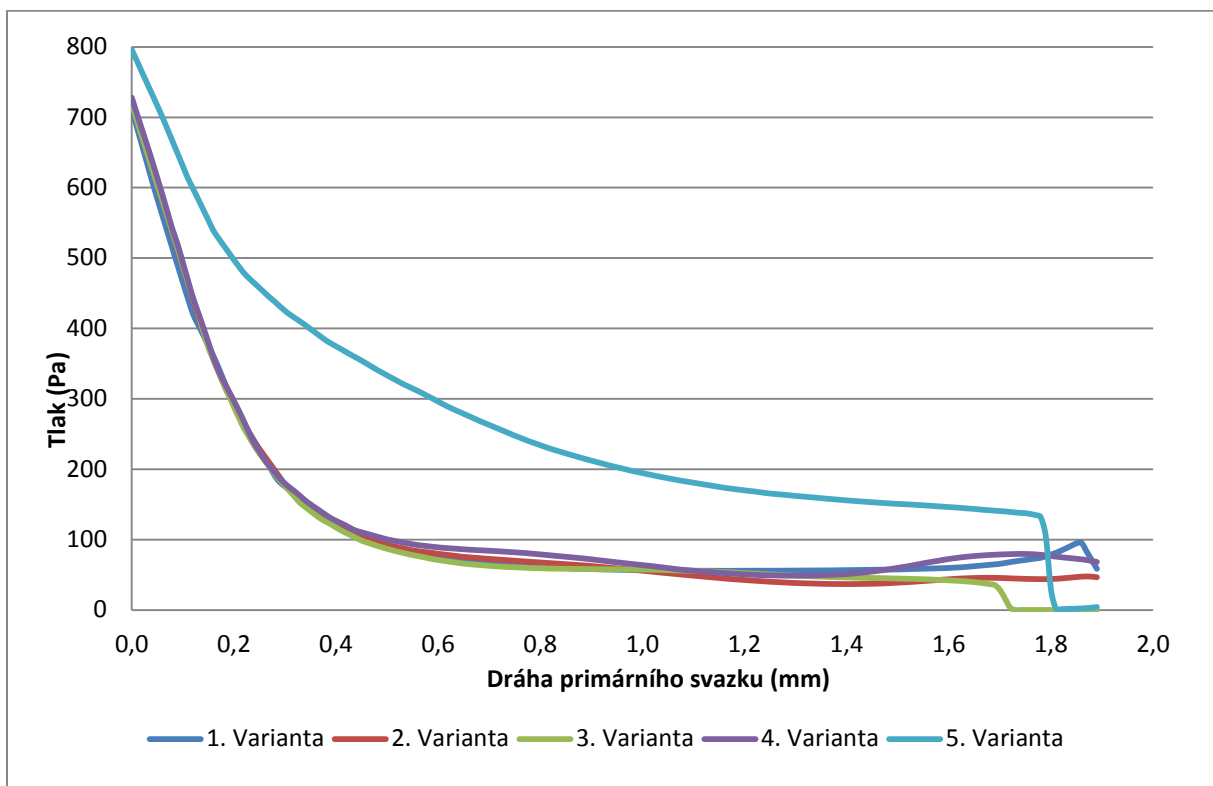
Graf na obrázku 9.2 zobrazuje rozložení tlaků jednotlivých variant na dráze primárního svazku. Z grafu lze vyhodnotit nejvhodnější variantu, která splňuje podmínku co možná nejnižšího tlaku v oblasti průchodu svazku. Jako nejvýhodnější varianta se jeví koncepce č. 3. Tuto skutečnost potvrzuje i graf 9.4, kde je ve sloupcovém grafu zobrazen průměrný tlak na dráze elektronového svazku.

Obrázek 9.3 představuje průměrné hodnoty rychlosti plynu, které byly dosaženy na dráze primárního svazku pro všechny zkoumané koncepce. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1. Nevyšší průměrné hodnoty rychlosti dosáhla varianta č. 2 a to  $390,6 \text{ ms}^{-1}$ , naopak nejnižší hodnoty  $195,01 \text{ ms}^{-1}$  je dosaženo u varianty 5.

V následujícím sloupcovém grafu obrázek 9.4 jsou průměrné hodnoty tlaku na dráze svazku. Na první pohled lze vidět, nejnižší hodnoty 113,2 Pa je dosaženo u varianty 3. Avšak o 5,08 Pa vyšší hodnoty je dosaženo u varianty 2. Nejméně vhodná varianta, která nesplňuje požadavek nízkého tlaku v dráze elektronů je koncepce č. 5, kde průměrný tlak dosahovat hodnoty 266,1 Pa.

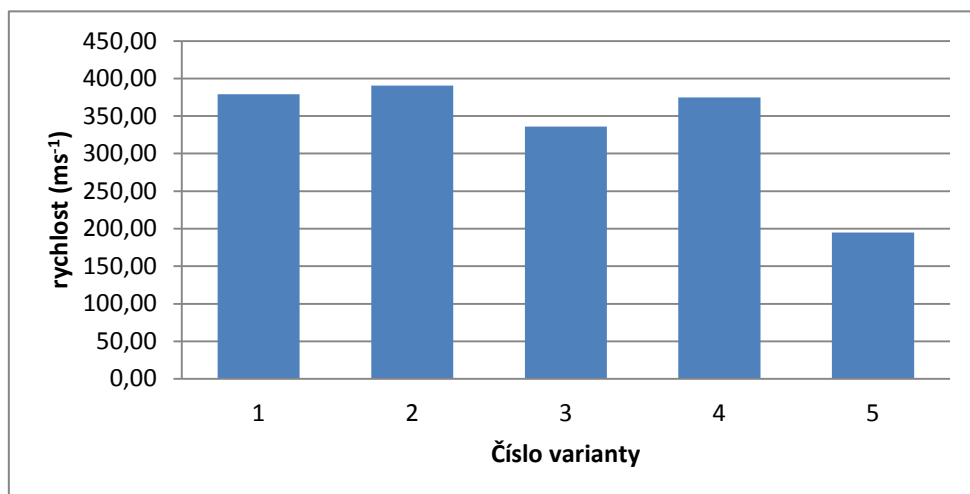


Obrázek 9.1: Rozložení rychlosti plynu na dráze primárního svazku

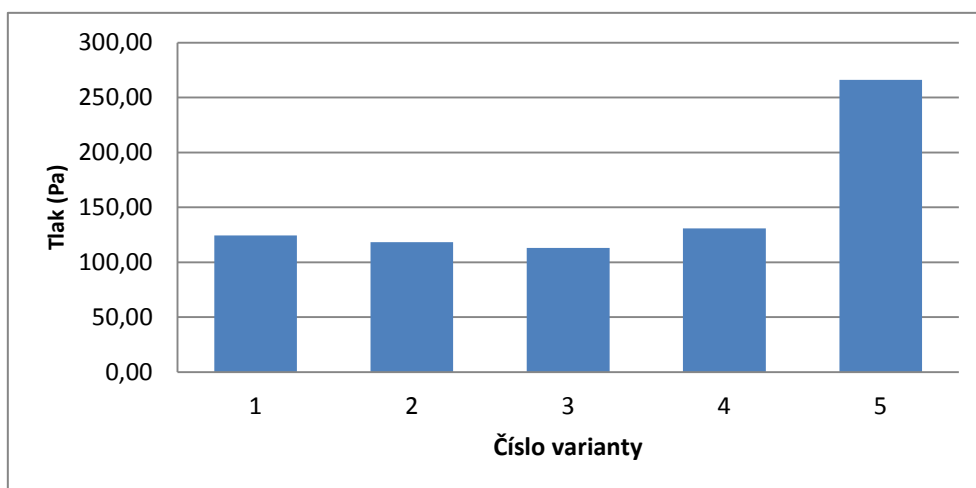


Obrázek 9.2: Rozložení tlaku plynu na dráze primárního svazku





Obrázek 9.3: Průměrné hodnoty rychlosti plynu na dráze primárního svazku



Obrázek 9.4: Průměrné hodnoty tlaku plynu na dráze primárního svazku

Tabulka 9.1. Naměřené průměrné hodnoty rychlosti a tlaku plynu

Číslo varianty	1	2	3	4	5
Průměrná rychlost (ms <sup>-1</sup> )	378,87	390,63	335,95	374,98	195,01
Průměrný tlak (Pa)	124,43	118,28	113,20	130,99	266,07

Tabulka 9.2: Dráha svazku pod 50 Pa.

Číslo varianty	1	2	3	4	5
Dráha primárního svazku (mm)	0,00	0,81	0,63	0,17	0,00

V tabulce 9.2 jsou hodnoty dráhy primárního svazku, které se nacházely v oblasti tzv. minimálního rozptylu tedy pod 50 Pa.

# 10 Závěr

Tato práce se zaměřuje na problematiku elektronové mikroskopie, především environmentální elektronovou mikroskopii, u níž je analyzována diferenciálně čerpaná komora, která odděluje tlakový rozdíl mezi tubusem a komorou vzorku.

Teoretická část práce se nejprve zabývá stručným popisem historie elektronové mikroskopie. Dále je zde popsán princip jednotlivých typů elektronových mikroskopů (TEM, REM, EREM) a jejich vybraných důležitých součástí. Z důvodu přítomnosti vakua v tubusu mikroskopu je zde teoreticky popsána teorie vakua a jeho získávání pomocí vývěv. Protože je diferenciální komora čerpána na tlak 30 Pa, vzniká uvnitř systému proudění, proto práce obsahuje popis jednotlivých druhů proudění. Proudění za normálních tlaků (laminární a turbulentní) i proudění za sníženého tlaku v oblasti vakua, kdy se proudění mění na molekulární a efúzní. V dalších kapitolách jsou teoreticky popsány rovnice popisující proudění v řešeném projektu včetně kritického proudění. Na závěr teoretické části je popsán systém ANSYS Fluent.

Pro praktickou část práce je popsán systém diferenciálně čerpané komory a její funkce. Následně na obrázku 4.1 je zobrazen model environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu s popisem jednotlivých částí. Na obrázcích 4.2 a 4.3 je řez diferenciálně čerpanou komorou i s clonou PLA1 a PLA2.

Jako výpočetní software byl zvolen ANSYS fluent. A to z důvodu jeho světového prvenství v CFD simulacích. Pro modifikaci geometrických modelů byl využit program pro 3D modelování SolidWorks.

V kapitole č. 6 jsou popsány jednotlivé navržené koncepce diferenciálně čerpané komory. Bylo navrženo celkem pět koncepcí lišících se geometrickými rozměry i systémem čerpacích kanálů. Jednotlivé varianty byly modifikovány na základě výsledků přechodí koncepce. Avšak všechny varianty jsou pro novou koncepci elektronového mikroskopu, kde je využíván deflektor ve spodní části tubusu clona PLA2 a je výrazně zkrácená dráha svazku elektronů procházející diferenciální komorou ve srovnání se stávající variantou, která je v elektronovém mikroskopu využívána.

Grafické rozložení tlaků a rychlosti v komoře pro každou variantu je v kapitole 7. Dále je zde vždy znázorněno rozložení stěnové funkce  $y^+$  a grafická závislost tlaků a rychlostí proudění v závislosti na dráze primárního svazku.

Cílem práce bylo nalezení nejvhodnější varianty diferenciálně čerpané komory, která co možná nejvíce splňuje hlavní požadavek a to dosažení co nejmenšího tlaku plynu v oblasti průchodu primárního elektronového svazku, tak aby docházelo k co nejmenšímu počtu srážek elektronů s molekulami vzduchu. Dalším kritériem bylo zkoumání rychlosti proudění, protože rychlost v nadzvukovém proudění velice ovlivňuje tlak a charakter proudění. Poslední

kritérium bylo, aby elektronový svazek procházel oblastí tzv. minimálního rozptylu tedy do 50 Pa po co možná nejdelší dráze (tabulka 9.2).

Pomocí analýz bylo prokázáno, nejvýhodnější tvar diferenciálně čerpané komory je, když je oblast pod deflektorem více otevřená ve tvaru válce, kde dochází k větší expanzi plynu v oblasti proudění nad 1 Mach jako například u variant č. 2 a 3.

Na závěr lze konstatovat, že nejvhodnější varianta je číslo 3 a to z důvodu dosažení nejnižšího průměrného tlaku 113,2 Pa na dráze primárního svazku. Vhodná je i varianta č. 2, kde průměrný tlak dosáhl hodnoty 118,28 Pa. Naopak nevhodná je varianta č. 5 kde průměrný tlak byl 266,07.

# 11 Seznam použité literatury

- [1] NEBESÁŘOVÁ, Jana. Elektronová mikroskopie pro biology. [online]. 2002. vyd. [cit. 2014-12-11]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/1.0.html>
- [2] JÄGER, A. a V. GÄRTNEROVÁ. Elektronovým mikroskopem do nitra materiálu. [online]. [cit. 2014-12-9]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>
- [3] ŠAFÁŘOVÁ, Klára, Roman KUBÍNEK a Milan VŮJTEK. Elektronová mikroskopie. [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/elmikro.pdf>
- [4] ZÍTKA, Ondřej. Moderní nanotechnologie na počátku 21. století: kolekce učebních textů projektu OPVK NANOTEAM. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013, 221 s. ISBN 978-80-214-4802-5.
- [5] KARLÍK, Miroslav. Úvod do transmisní elektronové mikroskopie. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 321 s. ISBN 978-80-01-04729-3.
- [6] Laboratoř elektronové mikroskopie. [online]. [cit. 2014-12-11]. Dostupné z: <http://barrande.nm.cz/index.php?p=6>
- [7] MAXA, J. Analýza proudění plynů v zařízeních elektronového mikroskopu. Vysoké učení technické v Brně, 2008. 182 stran
- [8] Mechanika tekutin. JANALÍK, Jaroslav a Pavel ŠTÁVA. [online]. [cit. 2014-12-3]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>
- [9] Vakuová technika. BOUŠEK, Jaroslav. [online]. 2011. vyd. [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/metmel/studijni-pomucky/METMEL\\_29\\_SL\\_MVAF\\_Vakuova\\_technika.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/metmel/studijni-pomucky/METMEL_29_SL_MVAF_Vakuova_technika.pdf)
- [10] Proudění tekutin. [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=54656b7574696e79h&key=281](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=54656b7574696e79h&key=281)
- [11] ERBEN, Milan. [online]. Katedra obecné a anorganické chemie Fakulta chemicko-technologická Univerzita Pardubice. 2008 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.upce.cz/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf>
- [12] SRÁŽKY MOLEKUL, STŘEDNÍ VOLNÁ DRÁHA [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: [http://web.natur.cuni.cz/~zuskova/ktp\\_2\\_so.pdf](http://web.natur.cuni.cz/~zuskova/ktp_2_so.pdf)
- [13] VYROUBAL, P. Srovnání vlivu tvaru konvergentní a Lavalovy dýzy v clonkách detektoru na výsledný tlak na dráze sekundárních elektronů pomocí systému CAE. Brno, 2011. 93 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D. FEKT VUT v Brně.

- [14]NOŽIČKA, Jiří. Mechanika tekutin. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 165 s. ISBN 80-01-02865-8
- [15]TOMÁŠEK, M. Analýza rozložení tlaků ve variantě detektoru SE se třemi clonkami pomocí CAE. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií 2012. 85s. Vedoucí diplomové práce  
doc. Ing Jiří Maxa, Ph.d
- [16]HLADKÝ, D. Analýza proudění plynu v diferenciálně čerpané komoře v závislosti na tvaru vstupní trysky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2014. 59 s., bez příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.
- [17]MAXA, J. VYROUBAL ,P. NEĎELA, V. Řízení a správa dat. Vysoké učení technické v Brně, 2012. 241 stran

## Seznam symbolů

$c$	(m.s <sup>-1</sup> )	rychlost zvuku
$d$	(m)	průměr potrubí
$e$	(J)	vnitřní energie
$ij$	-	Indexy u veličin udávají sumaci dle tří směrů souřadnic (Einsteinova sumace)
$k$	(J)	kinetická energie
$l$	(m)	střední volná dráha
$M$	-	Machovo číslo
$p$	(Pa)	statický tlak
$R$	-	všeobecná plynová konstanta
$Re$	-	Reynoldsovo číslo
$T$	(K)	teplota plynu
$v, u$	(m.s <sup>-1</sup> )	rychlost tekutiny
$v_s$	(m.s <sup>-1</sup> )	střední rychlost v potrubí
$\kappa$	-	Poisonova konstanta
$\rho$	(kg.m <sup>-3</sup> )	hustota plynu
$\varepsilon$	(m.s <sup>-1</sup> )	rychlost disipace
$z$	-	průměrný počet srážek
$n_0$	-	koncentrace molekul
$x$	-	počet srážek
$q$	(m <sup>3</sup> )	objemový tok plynu
$A$	(m <sup>2</sup> )	průtočný průřez
$y^+$	-	stěnová funkce