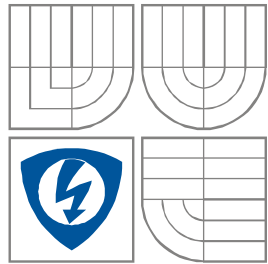


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELEKTROTECHNOLOGY

NÁVRH SCINTILAČNÍHO DETEKTORU S JEDNOU CLONKOU PRO ENVIROMENTÁLNÍ ELEKTRONOVÝ RASTROVACÍ MIKROSKOP

CONSTRUCTION SCINTILLATION DETECTOR WITH ONE APERTURE FOR
ENVIRONMENTAL SCANNING ELECTRON MICROSCOPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VÍT PŘICHYSTAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MAXA, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Vít Přichystal

ID: 125610

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

**Návrh scintilačního detektoru s jednou clonkou pro enviromentální elektronový
rastrovací mikroskop**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte základy elektronové mikroskopie, základy problematiky proudění plynů v nízkých tlacích a proudění otvory malých dimenzí oddělující oblasti s velkými tlakovými spády. Seznamte se se systémy SolidWorks, FloSimulation, Fluent. V systému SolidWorks vymodelujte 3D model detektoru s jednou clonkou v různých variantách a proveďte analýzu a následnou optimalizaci podle požadavků na funkci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 29.5.2014

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

Práce se věnuje návrhu scintilačního detektoru s jednou clonkou pro enviromentální rastrovací elektronový mikroskop. Na začátku práce je úvod do mikroskopie. Dále je práce zaměřena na popis EREM (ESEM) mikroskopu a scintilačního detektoru. Následná kapitola se věnuje dynamice proudění. Jsou uvedeny druhy proudění a matematický popis proudění. Další kapitola je o použitém softwaru a jeho způsobu výpočtu proudění. Dále je uveden návrh clonky a způsob odsávání prostoru detektoru. Je popsáno a porovnáno několik typů řešení scintilačního detektoru s jednou clonkou. Poslední kapitolou je závěr, ve kterém je práce shrnuta.

Klíčová slova

clonka, deflektor, EREM, ESEM, FlowSimulation, scintilační detektor, SolidWorks

Abstract

The thesis is focused on the design of a scintillation detector with one screen for environmental scanning electron microscope. At the beginning of the work is an introduction to microscopy. Further work is focused on the description of ESEM microscope and a scintillation detector. The following chapter is devoted to the dynamics of flow. They list the types of flow and mathematical description of equations. The next chapter is about using the software and the way of solution of flow. In the following chapter describes a proposal of the diaphragm and extraction method of the detector area. They are described some of type aperture. The last chapter is the conclusion, where the work is summarized.

Keywords

deflector, ESEM, FlowSimulation,, scintillation detector, screen, SolidWorks

Bibliografická citace:

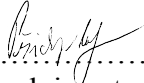
PŘICHYSTAL, V. Návrh scintilačního detektoru s jednou clonkou pro enviromentální elektronový rastrovací mikroskop. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 62 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Návrh scintilačního detektoru s jednou clonkou pro enviromentální elektronový rastrovací mikroskop 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

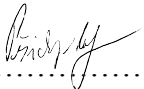
V Brně dne: **26.května 2014**

.....

.....
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 mé diplomové práce.

V Brně dne: **26. května 2014**


.....
podpis autora

Obsah

1 Úvod.....	12
2 Mikroskopie.....	12
2.1 Historie elektronového mikroskopu.....	12
2.2 Výhody elektronového mikroskopu.....	13
2.3 Rozdělení elektronových mikroskopů.....	13
2.3.1 Transmisní elektronová mikroskopie.....	14
2.3.2 Skenovací elektronová mikroskopie.....	14
2.3.3 Emisní elektronová mikroskopie.....	15
2.3.4 Zrcadlová elektronová mikroskopie.....	15
2.3.5 Iontová mikroskopie.....	16
3 ESEM.....	16
3.1 Zdroj elektronů.....	17
3.2 Elektromagnetické čočky.....	19
3.3 Skenovací obvod.....	19
3.4 Stolek vzorku.....	19
3.5 Zesilovač a zobrazovací soustava.....	20
4 Scintilační detektor.....	20
4.1 Historie scintilačního detektoru.....	20
4.2 Použití scintilačního detektoru v mikroskopii (ESEM).....	21
5 Dynamika proudění.....	23
5.1 Laminární proudění.....	23
5.2 Turbulentní proudění.....	23
5.3 Proudění v nízkých tlacích.....	24
5.3.1 Charakteristika oblastí vakua.....	24
5.3.2 Molekulární proudění.....	26
5.3.3 Efúzní proudění.....	26
5.4 Modelování dynamiky tekutin.....	27
5.4.1 Rovnice kontinuity.....	27
5.4.2 Eulerovy rovnice hydrodynamiky.....	27
5.4.3 Bernoulliho rovnice.....	28
5.4.4 Navierova – Stokesova rovnice.....	29

6 Použitý software.....	30
6.1 SolidWorks.....	30
6.2 SolidWorks FlowSimulation.....	31
6.3 Metoda konečných objemů.....	31
6.3.1 Diskretizační způsoby.....	32
6.3.2 Síť.....	32
7 První návrhy.....	34
7.1 Elektronový mikroskop AQUASEM II.....	34
7.2 Návrh jedné clonky s kuželovým deflektorem.....	35
7.2.1 Okrajové podmínky.....	35
7.2.2 Navrhovaná clonka č. 1.....	36
7.2.3 Počáteční podmínky.....	36
7.2.4 Nastavení sítě.....	36
7.2.5 Výpočty návrhu se zadním sáním.....	37
7.2.6 Výpočty návrhu s bočním sáním.....	41
8 Další návrhy používající boční sání.....	45
8.1 Porovnání clonek jednotlivých průměrů.....	45
8.2 Porovnání dle tvaru deflektoru.....	51
9 Závěr.....	57

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Zobrazení vzniklých signálů po dopadu paprsku elektronů [12].....	14
Obr. 3.1: Schéma skenovacího elektronového mikroskopu [4].....	16
Obr. 3.2: Zjednodušené znázornění prostoru komory a oddělovacích komor ESEM.....	17
Obr. 3.3: Wolframová katoda[4].....	18
Obr. 3.4: Katoda LaB6 [4].....	18
Obr. 3.5: Autoemisní tryska [4].....	18
Obr. 4.1: Schéma fotonásobiče [6].....	21
Obr. 4.2: Schéma scintilačního detektoru [6].....	21
Obr. 4.3: Zobrazení dvouclonkového detektoru sekundárních elektronů pro ESEM se simulací drah sekundárních elektronů (E1 - excitační elektroda, E2 - vychylovací elektroda, C1 - 1. clonka, C2 - 2. druhá clonka, PMT - fotonásobič (photomultiplier tube) [12].....	22
Obr. 5.1: Dělení vakua dle změn vlastností plynů [12].....	25
Obr. 6.1: Výpočetní síť a její zjemnění.....	33
Obr. 7.1: Enviromentální rastrovací elektronový mikroskop AQUASEM II.....	34
Obr. 7.2: Dráha elektronů a tlaky jednotlivých částí mikroskopu.....	35
Obr. 7.3: Návrh clonky č. 1 s kuželovým deflektorem.....	36
Obr. 7.4: Nastavená síť v programu FlowSimulation.....	37
Obr. 7.5: Detektor se zadním sáním.....	38
Obr. 7.6: Rozložení rychlosti proudění v detektoru (zadní sání).....	40
Obr. 7.7: Rozložení tlaku v detektoru (zadní sání).....	40
Obr. 7.8: Zobrazení vektorů proudění v detektoru (zadní sání).....	41
Obr. 7.9: Detektor s bočním sáním.....	42
Obr. 7.10: Nastavená síť pro případ bočního sání.....	42
Obr. 7.11: Rozložení rychlosti v detektoru (boční sání).....	44
Obr. 7.12: Rozložení tlaku v detektoru (boční sání).....	44
Obr. 7.13: Zobrazení vektorů rychlosti v detektoru (boční sání).....	45
Obr. 8.1: Jednoduchá clonka s kuželovitým deflektorem.....	46
Obr. 8.2: Průběh tlaku v detektoru s deflektorem a clonkou o průměru 1,0 mm.....	48
Obr. 8.3: Průběh tlaku v detektoru s deflektorem a clonkou o průměru 0,8 mm.....	48
Obr. 8.4: Průběh tlaku v detektoru s deflektorem a clonkou o průměru 0,6 mm.....	49

Obr. 8.5: Průběh rychlosti v detektoru s deflektorem a clonkou o průměru 1,0 mm.....	49
Obr. 8.6: Průběh rychlosti v detektoru s deflektorem a clonkou o průměru 0,8 mm.....	50
Obr. 8.7: Průběh rychlosti v detektoru s deflektorem a clonkou o průměru 0,6 mm.....	50
Obr. 8.8: Deflektor tvaru T.....	51
Obr. 8.9: „Kulovitý“ deflektor značený indexy kk.....	52
Obr. 8.10: Průběh tlaku v detektoru s deflektorem tvaru T.....	54
Obr. 8.11: Průběh tlaků v detektoru s "kulovitým" deflektorem.....	54
Obr. 8.12: Průběh rychlostí v detektoru s deflektorem tvaru T.....	55
Obr. 8.13: Průběh rychlosti v detektoru s "kulovitým" deflektorem.....	55

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Srovnání vlastností jednotlivých zdrojů elektronů [4].....	18
Tabulka 8.1: Průměrné a minimální hodnoty tlaků pro různé velikosti otvorů.....	47
Tabulka 8.2: Průměrné a minimální hodnoty tlaků pro různé tvary deflektorů.....	53

Seznam grafů

Graf 7.1. Průběh tlaku na dráze sekundárních elektronů (zadní sání).....	39
Graf 7.2. Průběh Machova čísla na dráze sekundárních elektronů (zadní sání).....	39
Graf 7.3: Průběh tlaku na dráze sekundárních elektronů (boční sání).....	43
Graf 7.4: Průběh Machova čísla na dráze sekundárních elektronů (boční sání).....	43
Graf 8.1: Průběh tlaků jednotlivých u deflektorů a clonek s otvory 1,0; 0,8; 0,6 mm.....	46
Graf 8.2: Hodnoty Machova čísla pro otvory 1,0; 0,8; 0,6 mm.....	47
Graf 8.3: Průběh tlaků u jednotlivých deflektorů.....	52
Graf 8.4: Průběhy rychlostí u jednotlivých deflektorů.....	53
Graf 8.5: Průměrné hodnoty tlaků na dráze sek. elektronů uvedených clonek s deflektory.....	56
Graf 8.6: Hodnoty tlaků u scintilátoru uvedených clonek s deflektory.....	56

1 ÚVOD

Moderní výpočetní technika posouvá vývoj velmi dopředu díky možným simulacím. To bude využito i v této práci. Díky EPD – elektronické definici výrobku, která definuje výrobek celkově v elektronické podobě, můžeme navrhnout několik návrhů a otestovat je, aniž by byla způsobena materiálová újma. Pomocí 3D CAD systémů můžeme navrhnout design výrobku. Pomocí simulačních programů, jako je například FlowSimulation, který je součástí SolidWorks, můžeme otestovat i funkčnost výrobku za definovaných podmínek.

2 MIKROSKOPIE

2.1 Historie elektronového mikroskopu

Elektronová mikroskopie je metoda umožňující studium mikrostruktury zkoumaných objektů. [4]

Vývoj elektronového mikroskopu se skládá z mnoha předchozích objevů, které vznikaly postupně. Jedním ze základních stavebních kamenů elektronového mikroskopu je elektron. Ten byl objeven J.J. Thomsonem v roce 1897. Dalším kamenem do této mozaiky bylo potvrzení objevu vlnového charakteru rychle letících částic - Luis de Broglie 1925. Jev byl dále potvrzen roku 1927 pomocí elektronové difrakce dvěma nezávislými týmy Davissona s Germerem a Thomsona s Reidem. Další objev, který se používá nejen v elektronové mikroskopii, je vychylování elektronového paprsku elektromagnetickým polem, jež byl popsán v práci H. Busche roku 1926. Na začátku třicátých let minulého století byl zkonstruován první mikroskop díky Knollovi a Ruskovi. První komerčně prodávaný transmisní elektronový mikroskop byl vyroben firmou Siemens a Halske v roce 1939. Skenovací elektronový mikroskop měl o něco delší cestu. V roce 1938 vznikl díky německému fyzikovi M. von Ardennemu princip skenovacího elektronového mikroskopu. Ten byl poprvé sestaven americkým vědcem Zworykinem, jenž také vynalezl fotonásobič, který je použitý k zobrazení sekundárních elektronů. Ve stejné době se v Anglii konstrukcí skenovacího elektronového mikroskopu zabývala skupina vědeckých pracovníků pod vedením C.W. Oatleyho. Cambridge Scientific začala tento typ mikroskopu komerčně vyrábět roku 1965 a k jeho výrobě byly použity poznatky právě týmu, který vedl Oatley. Vrcholem mikroskopů jsou pak mikroskopy zkonstruované v USA a Japonsku na konci osmdesátých let, které umožnily spatřit atom. [5]

2.2 Výhody elektronového mikroskopu

Rozlišovací schopnost chápeme jako minimální vzdálenost dvou bodů, které vnímáme ještě jako body samostatné. Body, které jsou od sebe vzdáleny kratší délkou, nám splývají v jeden objekt. Zdravé oko je schopno ze vzdálenosti 25 cm rozlišit dva body vzdálené 0,2 mm. Hodnota 0,2 mm je tedy rozlišovací schopnost lidského oka. Tento parametr je také důležitý pro zjištění zvětšení mikroskopu. Takzvané užitečné zvětšení mikroskopu můžeme spočítat ze vzorce:

$$Z = \frac{R_{\text{oka}}}{R_{\text{mikroskopu}}}; [-] \quad (2.1)$$

kde: Z – je užitečné zvětšení

R_{oka} – rozlišení oka

$R_{\text{mikroskopu}}$ – rozlišení mikroskopu

Pro příklad uvedu transmisní elektronový mikroskop JEOL JEM - 1010 (urychlovací napětí $U = 40 - 100$ kV), který dosahuje rozlišení $R_{\text{mikroskopu}} = 0,4\text{nm}$, což odpovídá užitečnému zvětšení $Z = 625000$. [4]

Optický mikroskop, jehož konstrukce pochází už z 16. století, byl v době vzniku elektronového mikroskopu dávno na vrcholu svého maximálního přiblížení. [5] Další přiblížení nebylo možné a proto se vývoj ubíral jinými cestami. Pojďme se podívat, proč nebylo možné zvětšit rozlišovací přiblížení optického mikroskopu a tím i jeho celkové zvětšení. Samotné čočky použité v mikroskopu nejsou zhotoveny z ideálně průhledného skla, a proto dochází k úbytku světla během jeho letu tubusem. To znemožňuje použití velikého množství čoček. Jak bylo zjištěno, toto není jediné omezení optických mikroskopů. Optický mikroskop ke svému zobrazení používá viditelné světlo, které má určitou vlnovou délku $400\text{ nm} - 700\text{ nm}$, což je limitující pro zvětšení. Moderní mikroskop tedy umožňuje oku rozlišit objekty asi $0,2\text{ }\mu\text{m}$ vzdálené, což odpovídá přiblížení asi 1000-krát. Další zdokonalení za pomoci modrého světla (tedy záření s menší vlnovou délkou), ponoření pozorovaného materiálu a ústí optického tubusu vedlo k malému zlepšení, ale jen málo pod 100 nm . [12]

2.3 Rozdělení elektronových mikroskopů

Elektronové mikroskopy můžeme rozdělit do několika typů podle způsobu získávání obrazu. A to na:

- transmisní elektronovou mikroskopii (TEM)
- skenovací elektronovou mikroskopii (SEM)
- emisní elektronovou mikroskopii
- zrcadlovou elektronovou mikroskopii

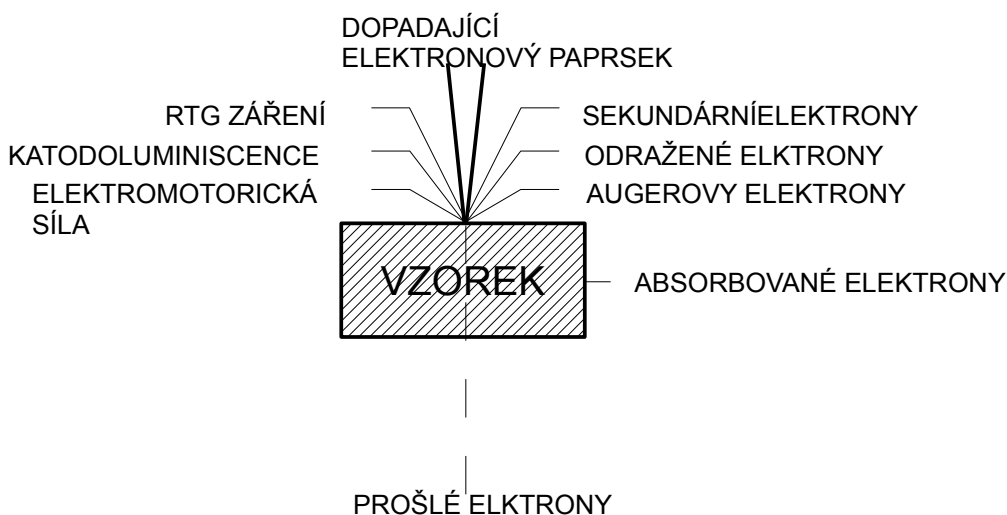
- iontovou mikroskopií

2.3.1 Transmisní elektronová mikroskopie

TEM využívá k zobrazení obrazu fluorescenční stínítko, na které dopadá svazek elektronů. Svazek elektronů prochází přímo vzorkem a prošlé elektrony dopadají na stínítko. Zvětšení výsledného obrazu je pomocí elektronové optické soustavy. Výhodou TEMu je velké zvětšení – tisíce až stotisícinásobné a velká rozlišovací schopnost. Díky transmisnímu elektronovému mikroskopu mohlo lidstvo poprvé spatřit atom, viry nebo bakterie. Pozorovaný vzorek je ve vakuu. Nevýhodou mikroskopu je omezená tloušťka pozorovaného materiálu (asi 0,1 – 5 μm) a s tím spojená složitější příprava vzorku. [8]

2.3.2 Skenovací elektronová mikroskopie

Skenovací elektronový mikroskop získává obraz pomocí detektoru, který detekuje sekundární elektrony. Elektronový svazek je zaostřen a vychylován, postupně skenuje zkoumaný povrch. Dopadem elektronů na povrch vzorku dochází k interakci a následné elektrony pozorujeme. Mohou to být sekundární elektrony, tedy elektrony vyražené z materiálu, zpětně odražené elektrony od povrchu, augerovy elektrony a případně prošlé elektrony. Dále vzniká katodoluminiscence, elektromotorická síla a RTG záření, toto může být využíváno k podrobné analýze vzorku, jako je například prvková analýza. Vzniklé signály jsou na obrázku 2.1. Abychom získali požadovaný obraz, např. o struktuře povrchu, o jeho fyzikálních vlastnostech nebo o jeho složení, je potřeba zvolit vhodný detektor signálu. O něm bude pojednáno později. [12]



Obr. 2.1: Zobrazení vzniklých signálů po dopadu paprsku elektronů [12]

Tento typ pozorování má tu výhodu, že příprava vzorku je oproti metodě TEM jednoduchá. V některých případech, kdy není ve vzorku obsažena těkavá látka (např. voda), můžeme vložit vzorek bez jakékoliv přípravy. Velikost vzorku je omezena pouze velikostí komory, což je další klad. Tato metoda má však i své nevýhody. Vzorek, který chceme pozorovat, musí být vodivý, jinak se při pozorování vzorek nabije. Tento problém se řeší vodivým povlakem vzorku. Povlak má tloušťku asi 10 nm. Vzorek je samozřejmě jako celá komora ve vakuu.

Pozorování ve vakuu znemožňuje pozorování některých vzorků ve svém normálním stavu, to je s vlhkostí za normálního tlaku. Proto byl vyvinut nový typ založený na stejném principu, tzv. enviromentální skenovací elektronový mikroskop (ESEM). Rozdíl oproti klasickému skenovacímu mikroskopu je ten, že je v pozorovací komoře, kde je umístěn vzorek, vysoký tlak až 1500-2000 Pa. Tato dvě místa s velkým rozdílem tlaku jsou oddělena pomocí diferenciallyně čerpané komory, kde je tlak asi 30 Pa. Diferenciallyně čerpaná komora je oddělena od ostatních prostředí dvěma clonkami s malým otvorem pro elektronový svazek. [12]

2.3.3 Emisní elektronová mikroskopie

Emisní elektronový mikroskop nemá zvláštní elektronovou trysku, ale jako zdroj elektronů se využívá přímo vzorek. K vzniku elektronů se využívá buď termoemise nebo autoemise. U termoemise mikroskopů se využívá tepla k emisi elektronů, jak vyplývá z názvu. Metoda je využívána ke studiu kovových fází, rekrystalizace, růstu zrn a fázových transformací v tuhé fázi. Autoemisní elektronový mikroskop je využíván k měření výstupní práce materiálu, dále ke studiu procesů adsorbce atomů plynu a oxidace povrchu, měření povrchového napětí čistého materiálu, měření aktivační energie povrchové difuze.[8]

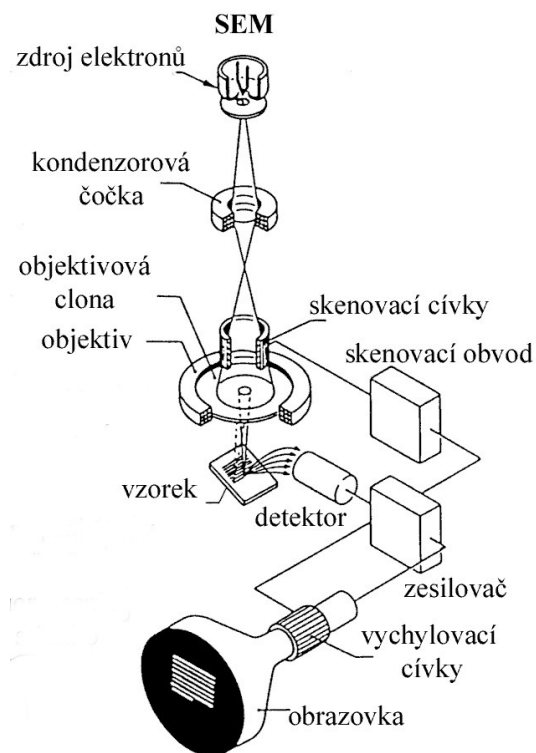
2.3.4 Zrcadlová elektronová mikroskopie

Základní princip tohoto typu je ten, že na vzorku je o několik desetin větší záporný potenciál než je urychlovací napětí. Napětí způsobí, že se blížíci se elektrony odrážejí od ekvipotenciálních ploch těsně nad vzorkem. Vzorek je tedy jakési zrcadlo pro elektronový svazek. Odražené elektrony jsou zachycovány na fluorescenčním stínítku, kde vzniká obraz povrchu vzorku. Metoda se používá k frézování elektronovým svazkem, ke studiu činnosti integrovaných obvodů, studiu změn výstupní práce v důsledku difuze kovů nebo příměsí, ke zviditelnění magnetických, feroelektrických domén. [8]

2.3.5 Iontová mikroskopie

V tomto typu je vzorek tvaru drátu o průměru asi 0,1 mm připevněn na vysoké kladné napětí, vzorek musí být elektrochemicky zešpičatěn. Chlazení vzorku je většinou realizováno kapalným dusíkem. Vzorek je umístěn ve vakuové komoře na jejímž dnu je fluorescenční stínítko. Konstrukce je tedy jednoduchá, ale jsou kladeny velké nároky na čistotu vzorku a kvalitu vakua. Iontový mikroskop slouží k pozorování jednotlivých atomů krystalové mřížky na povrchu vzorku, dále ke studiu vakancí, rozložení atomů v dislokačním jádře, strukturních hranic zrn a rozložení jednotlivých příměsí na jejich hranicích. [8]

3 ESEM



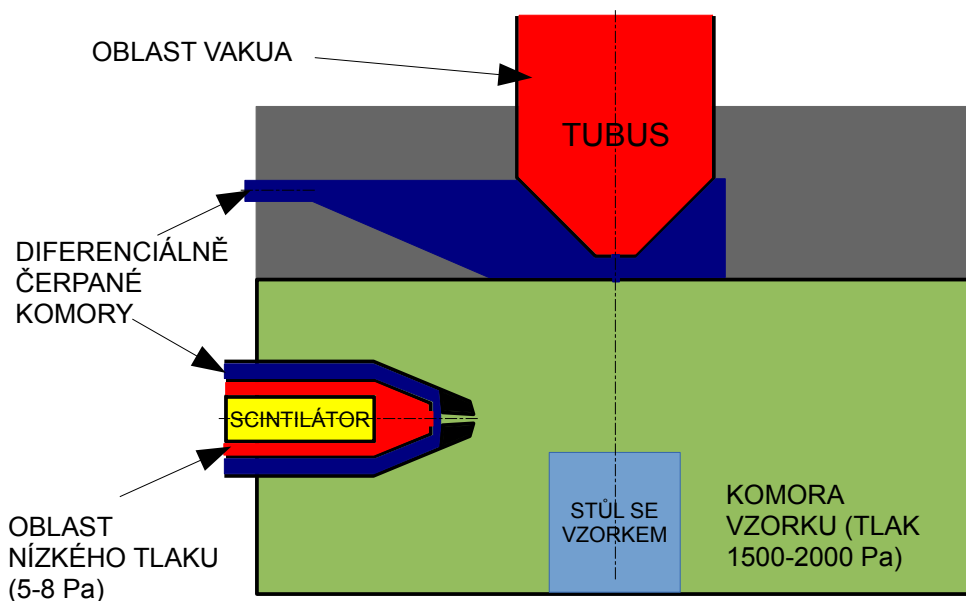
Obr. 3.1: Schéma skenovacího elektronového mikroskopu [4]

V této práci se zaměříme na enviromentální skenovací elektronový mikroskop (někdy též enviromentální rastrovací elektronový mikroskop - EREM), protože úkolem práce je návrh scintilačního detektoru s jednou clonkou pro tento mikroskop. ESEM je zkonstruován pro pozorování problematických vzorků, které ve svém přirozeném stavu obsahují vodu. Je to trend poslední doby v mikroskopii. Základní schéma SEM, ze kterého vychází ESEM, je na obr. 3.1. Mikroskop se tedy skládá z těchto základních částí:

- zdroj elektronů
- elektromagnetické čočky
- skenovací obvod
- stůl vzorku
- detektor
- zesilovač
- zobrazovací soustava

Jednotlivé prvky budou popsány níže, hlavní zaměření bude na scintilační detektor.

Hlavní rozdíl mezi SEM a ESEM je v oblasti komory, kde jsou diferenciálně čerpané komory. První odděluje prostor tubusu a komory vzorku, druhá odděluje prostor scintilátoru a komory vzorku. Velmi zjednodušeně to ukazuje obrázek 3.2.



Obr. 3.2: Zjednodušené znázornění prostoru komory a oddělovacích komor ESEM

3.1 Zdroj elektronů

Zdrojem elektronů může být jakýkoliv materiál, který zahřejeme na vysokou teplotu. Zahřátím získají elektrony takovou energii, aby mohly překonat přirozenou energetickou bariéru a uniknout do prostoru. Úniková rychlost elektronu závisí přímo úměrně na jeho náboji e a výstupní energii daného kovu E a nepřímo úměrně na jeho hmotnosti m . Daný vztah je znázorněn v následující rovnici:

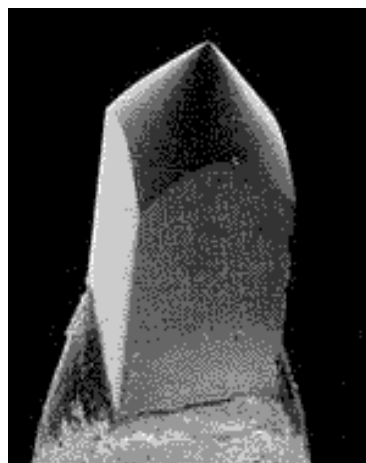
$$v = \sqrt{\frac{2eE}{m}}; [ms^{-1}] \quad (3.1)$$

Jako vhodný materiál pro zdroj elektronů se často používá wolframové vlákno. To je vhodné díky své nízké výstupní energii (4,5 eV) a díky malým nárokům na vakuum. Wolframová tryska je na obrázku 3.3. Výborným termoemisním zdrojem elektronů je také katoda z LaB6, tato však vyžaduje výrazně lepší vakuum. Katoda LaB6 je zobrazena na obr. 3.4. Neomezeným zdrojem elektronů je pak autoemisní tryska s velkým výkonem. Elektrony jsou emitovány ze studeného wolframového vlákna, které je však vyleptáno do ostrého hrotu s poloměrem 60-200nm (obrázek 3.5). Naproti trysce

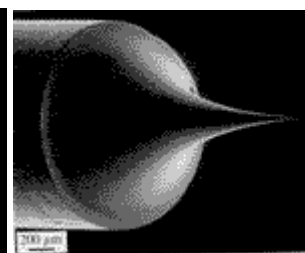
je umístěna elektroda s kladným napětím 5 kV, které vytrhává elektrony z povrchu hrotu díky velké intenzitě elektrického pole (108 V/cm). Nevýhodou této trysky je požadavek na vysoké vakuum (10^{-6} - 10^{-8} Pa). Srovnání vlastností jednotlivých zdrojů elektronů je v tabulce 3.1.



Obr. 3.3: Wolframová katoda[4]



Obr. 3.4: Katoda LaB6 [4]



Obr. 3.5: Autoemisní tryska [4]

Vlastnosti	žhavená wolframová katoda	žhavená LaB6 katoda	autoemisní tryska
průměr hrotu	200 μm	20 μm	0,1 μm
provozní teplota	2859 K	1850 K	okolí
proud svazku	5×10^{-12} A	8×10^{-11} A	10^{-8} A
průměr svazku	9 mm	5 mm	1-2 nm
požadované vakuum	10^{-5} mm Hg	10^{-7} mm Hg	10^{-10} mm Hg
životnost	35 h	250 h	neomezená
výstupní energie materiálu E	4,5 eV	1,0 eV	4,5 eV
bod tání materiálu	3653 K	2000 K	3653 K

Tabulka 3.1: Srovnání vlastností jednotlivých zdrojů elektronů [4]

Kladené nároky na elektronový paprsek je koherentnost, aby vycházel z jednoho místa, aby elektrony měly stejnou energii a aby se jejich vlna nacházela ve stejné fázi. Takovým požadavkům se přibližujeme pomocí tzv. Wehneltova válce, který je připojen na záporné napětí a díky tomu se okolo hrotu katody vytvoří oblak elektronů a ty jsou dále odsávány k anodě. Jedná se vlastně o první elektrostatickou čočku mikroskopu. [4]

3.2 Elektromagnetické čočky

Vlastnosti objektivu jsou velmi důležité pro výsledný obraz. Proto je kladen velký důraz na kvalitu elektromagnetických čoček objektivu. Ty jsou tvořeny velmi přesně navinutými cívkami, na kterých je velmi přesné napětí. Jako každé čočky trpí i elektromagnetické čočky některými vadami.

1. sférická vada – ta je způsobena jiným vychýlením elektronů, které procházejí dále od optické osy čočky než elektrony procházející jejím středem; omezuje se pomocí clony
2. chromatická vada – je způsobena rozdílnou rychlostí procházejících elektronů nebo kolísáním urychlovacího napětí; omezuje se maximální stabilizací urychlovacího napětí
3. osový astigmatismus – je způsoben asymetrií čočky díky nehomogenitě materiálu, nepřesnému zpracování nebo nečistotám na clonách; je korigován magnetickým polem astigmátoru

[4], [5]

3.3 Skenovací obvod

Skenovací obvod má za úkol skenovat paprskem povrch tak, aby nebylo vynecháno žádné místo. Skenování probíhá tak, že je paprsek primárních elektronů vychylován ve dvou na sebe kolmých osách. V každém směru jsou dvě cívky, které vychylují paprsek. Dvojice cívek je tam i z toho důvodu, aby byly eliminovány optické vady. Napájení vychylovacích cívek je ze zdroje pilovitého napětí, které zajišťuje skenování po řádcích. Budicí obvod, který se stará o skenování obrazu, je synchronizován s obvodem zobrazovací soustavy. [4] Stejně jako se řádkuje vzorek, tak se řádkuje i výsledný obraz.

3.4 Stolek vzorku

V komoře vzorku je umístěn stolek, na kterém je držák pro vzorky. Stolek je pohyblivý a díky němu je umožněno pohybovat se vzorkem nebo ho naklánět tak, abychom dosáhli požadované pozice pro pozorování. Ovládání stolku se většinou provádí pomocí joysticku. [5]

3.5 Zesilovač a zobrazovací soustava

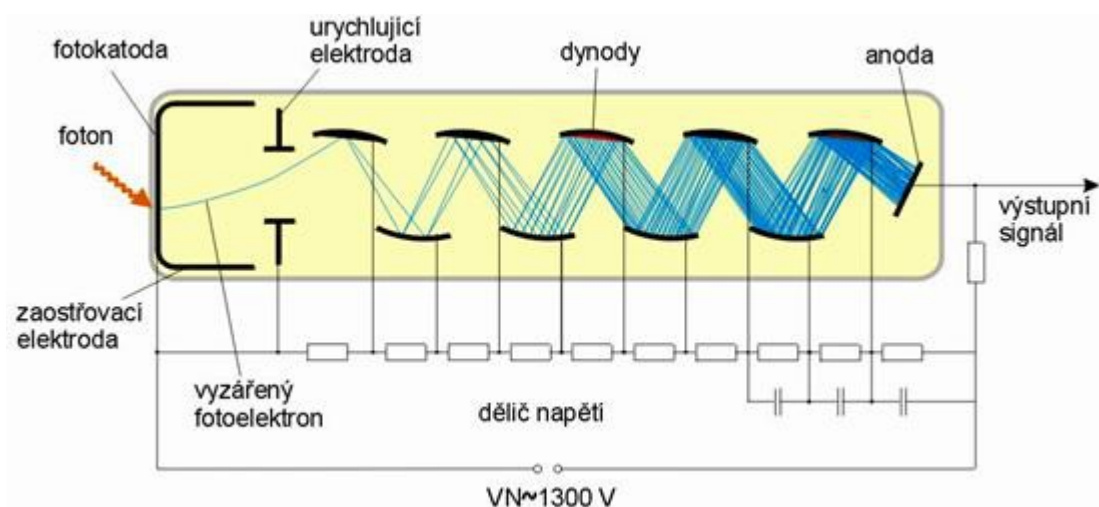
První zesílení signálu je provedeno ještě v samotném detektoru. Toto zesílení se děje pomocí fotonásobiče, ten bude popsán níže v rámci detektoru, kterému je věnována samostatná kapitola. Další zesílení signálu je pomocí zesilovače, který signál uzpůsobí pro zobrazení danou zobrazovací soustavou. Jak již bylo napsáno dříve, je soustava synchronizována se skenovacím obvodem tak, aby vznikl správný obraz. Dříve se zobrazení realizovalo pomocí klasických monitorů, jak je schematicky znázorněno na obr. 3.1. Dnes je obraz kompletně zpracováván pomocí počítače za softwarové podpory dodávané výrobcem mikroskopu.

4 SCINTILAČNÍ DETEKTOR

Scintilačnímu detektoru je věnována samostatná kapitola, protože to je jádro zájmu pozdější práce.

4.1 Historie scintilačního detektoru

Scintilační detektor je zařízení pro převod energie ionizujícího záření na energii fotonů, které se nacházejí v rozmezí viditelného až ultrafialového spektra. První scintilační detektor byl objeven v roce 1903 britským fyzikem a chemikem Williamem Crookesem. Jeho takzvaný spintariskop byl tvořen stínítkem, které bylo pokryto fluorescenční vrstvou ZnS. Dopadající částice vytvoří na stínítku scintilace. Tyto scintilace byly pozorovány lupou v temné místnosti osobou s výborným zrakem. [6] I přes velkou náročnost této metody byla tato využívána a slavila úspěchy (Regener určil náboj částice α s chybou menší než 0,375% současné tabulkové hodnoty). [13] Po vynalezení ionizační komory, která detekuje počet částic, se od způsobu pozorování zrakem ustoupilo. Návrat k scintilační metodě umožnil až vynález fotonásobiče, ten je na obr. 4.1. Skládá se z fotokatody, na které dopadající foton způsobí emisi elektronů. Elektrony jsou dále urychleny a dopadají na dynodu, zde dochází k sekundární emisi elektronů a proud elektronů je tak postupně zesílen. Zesílený tok elektronů dopadá na anodu, odkud je odváděn výstupní signál. [6]



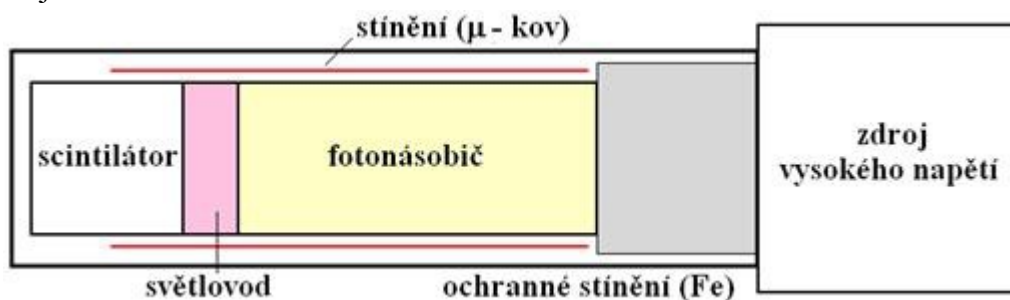
Obr. 4.1: Schéma fotonásobiče [6]

Fotonásobič je tedy součástí scintilačního detektoru. Jednoduché schéma scintilačního detektoru je na obr. 4.2. Na vstupu je scintilátor, ze kterého vzniklé scintilace vstupují přes světlovod do fotonásobiče.

Scintilátory mohou být:

1. organické – Zde scintilace vzniká při přechodu volných elektronů v molekule. Nejčastěji jsou z aromatizovaných uhlovodíků.
2. anorganické – Jedná se o krystaly halogenidů obsahující aktivační příměsi. Tento materiál má pásovou strukturu.

Ve fotonásobiči se signál zesílí pomocí vysokého napětí. Převedený signál je dále zpracováván. Na uvedeném obrázku 4.2 je základní schéma, ale princip je stejný jako u složitějších scintilačních detektorů.



Obr. 4.2: Schéma scintilačního detektoru [6]

4.2 Použití scintilačního detektoru v mikroskopii (ESEM)

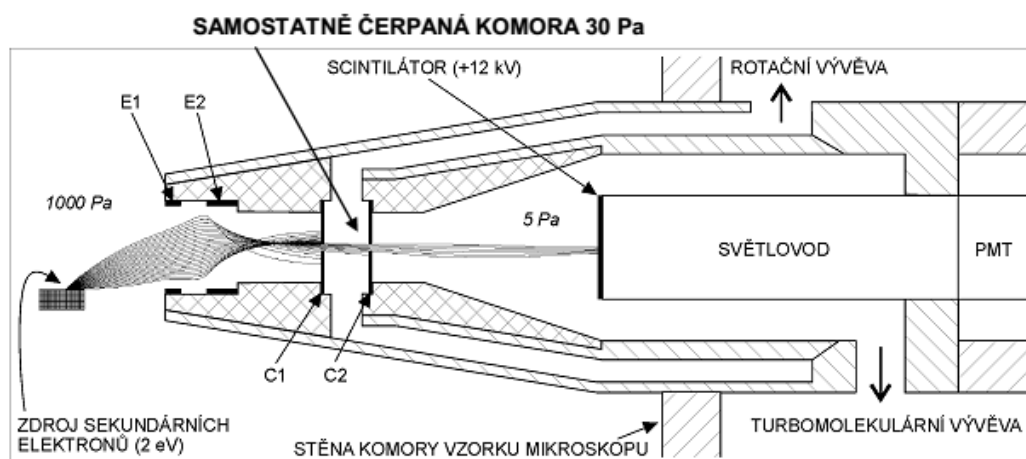
Jak bylo popsáno v kapitole 2.3.2, vzniká při dopadu elektronů na vzorek mnoho signálů. Jednotlivé signály nesou rozdílné informace o zkoumaném vzorku. Proto je důležité ujasnit si, které informace nás zajímají a na základě toho určit správný detektor.

Detektor je pak podle svého typu umístěn v komoře. Základní typy používaných detektorů jsou:

- detektor zpětně odražených elektronů
- detektor rentgenového záření (EDS detector)
- detektor sekundárních vzorků

My se zaměříme na poslední jmenovaný.

V enviromentálních skenovacích mikroskopech se běžně používá detektor sekundárních elektronů se dvěma clonkami. Tyto clonky oddělují prostředí komory vzorku s tlakem 1500-2000 Pa od prostředí scintilátoru, kde je tlak 5-8 Pa. Nízký tlak u scintilátoru je z důvodu potřeby vysokého napětí na scintilátoru (asi 12 kV). Vysoké napětí umožňuje dosáhnout scintilací (urychluje elektrony vstupující k scintilátoru na takovou energetickou úroveň, která způsobí scintilace) a zároveň nízký tlak zabrání vzniku výbojů v plynu. Mezi clonkami je samostatně čerpaná komora s tlakem 30 Pa. Popisovaný detektor je zobrazen na obr. 4.3. Na obrázku je vidět i dráha elektronů, která prochází přes dvě clonky. Úkolem diplomové práce bude najít takový vhodný tvar clonky, který zajistí, že bude stačit pouze jedna clonka. Hlavní problém detektoru s jednou clonkou je, že není mezi dvěma prostředími (komorou a scintilátorem) samostatně čerpaná komora, a to klade velké nároky na tuto jednu clonku. Tím, že odpadne jedna překážka v dráze elektronů, bude více detekovaných elektronů a tedy i lepší, ostřejší obraz a ve výsledku i větší výsledné zvětšení. [12]



Obr. 4.3: Zobrazení dvouclonkového detektoru sekundárních elektronů pro ESEM se simulací drah sekundárních elektronů (E1 - excitační elektroda, E2 - vychylovací elektroda, C1 - 1. clonka, C2 - 2. druhá clonka, PMT - fotonásobič (photomultiplier tube) [12]

5 DYNAMIKA PROUDĚNÍ

Práce bude analyzovat proudění v okolí clonky. Z těchto důvodů je nutné uvést a popsat možné druhy proudění.

Směr proudění je vždy dán dle rozložení tlaku. Tekutina proudí vždy od místa s vyšším tlakem k místu, kde je tlak nižší. Proudění můžeme rozdělit na dva hlavní typy:

- laminární proudění (lat. lamina = vrstva, tedy vrstevnaté proudění)
- turbulentní proudění (lat. turbulentus = neuspořádaný, tedy vírové proudění)

5.1 Laminární proudění

Laminární proudění je tedy rovnoměrné, uspořádané, kde vektory rychlosti směřují rovnoběžně s osou potrubí. V průřezu potrubím vrcholy těchto vektorů představují parabolu, to je, že největší rychlost je uprostřed a u stěn je nejmenší. Částice procházejí v drahách souběžných a nemísí se mezi sebou. Drsnost povrchu potrubí velmi ovlivňuje ztráty v potrubí. [10]

5.2 Turbulentní proudění

Turbulentní proudění se vyznačuje svojí nestálostí a chaotickým pohybem. Skládá se z jednotlivých vírů různých průměrů. Přejít mezi laminárním a turbulentním prouděním udává Reynoldsovo kritérium. Bylo určeno experimentálně a platí pro jednorozměrné proudění v potrubí. Číslo Re je definováno jako:

$$Re = \frac{v_s d}{\nu} \quad , \quad (5.1)$$

kde

v_s je střední rychlost v potrubí [ms^{-1}],

d značí průměr potrubí [m]

a ν je kinematická viskozita.

Kritická hodnota pro potrubí kruhového průřezu je $Re_{\text{krit}} = 2320$, ta je hranicí pro turbulentní a laminární proudění. Pokud je $Re \geq Re_{\text{krit}}$, jedná se o proudění turbulentní. Jestliže je hodnota $Re \leq Re_{\text{krit}}$, je proudění laminární. Přejít mezi laminárním a turbulentním prouděním není zcela náhlý, ale proudění přechází z laminárního proudění do takzvané přechodné oblasti. Zde se mohou vyskytovat oba druhy proudění, avšak laminární proudění se může náhle při jakémkoliv popudu z vnějšku změnit na proudění turbulentní.

Při turbulentním pohybu se tedy částice mezi sebou mísí a hodnoty tlaku a rychlosti jsou proměnné. Rychlost u středu proudění je nižší než při proudění laminárním. Bylo

zjištěno experimentem, že i při turbulentním proudění se vyskytuje vrstva s prouděním laminárním. Vrstva bývá nazývána laminární podvrstvou a nachází se vždy u stěn potrubí nebo u stěn obtékaného tělesa. Její tloušťka je do několika desetin milimetrů. Hned za touto vrstvou se nachází přechodová vrstva mezi laminárním a turbulentním pohybem. [10], [12]

5.3 Proudění v nízkých tlacích

Je uvedeno dělení vakua a některé změny vlastností tekutin při proudění v nízkých tlacích. V systémech kromě laminárního a turbulentního proudění existuje i proudění molekulární a efúzní. Nastávají právě při proudění plynů za sníženého tlaku.

5.3.1 Charakteristika oblastí vakua

O vakuu mluvíme tehdy, je-li v místě pro atomy a molekuly nepropustném podtlak menší než 100 Pa. Vakuum se dělí dle určitých zvyklostí na jednotlivé stupně. Dělení není dáno normou, ale v běžné praxi se s ním setkáváme. Tyto stupně jsou:

- nízké vakuum (asi do 0,1 Pa)
- vysoké vakuum (do 10^{-4} Pa)
- ultravakuum (od 10^{-6} Pa)

Tedy prostředí s menším počtem molekul než za normálního stavu nazýváme vakuum. Pojem ideální vakuum má představovat naprostou vzduchoprázdnotu bez jediné částice. Takový stav není v praxi dosažitelný. Ve vakuové technice se používají tlaky v rozsahu asi šestnácti řádů. Ve vakuu mohou nastávat v různých oblastech určité odlišnosti fyzikálních jevů v závislosti na tlaku okolí. Jednotlivé odlišnosti mají své příčiny a jsou to:

- změna viskozity
- velikost střední volné dráhy
- změna druhu proudění plynu

Změny viskozity i změny proudění ukazují, že při tlaku 0,133 Pa dochází k zásadním změnám vlastností plynu, viz obr. 5.1. Do tohoto mezního tlaku můžeme pozorovat stálost viskozity, dále nastává lineární pokles s tlakem. A obráceně čerpací vodivost potrubí je do hodnoty 0,133 Pa stálá (molekulární proudění), s vyšším tlakem nastává změna typu proudění a zároveň se mění i vodivost potrubí. Střední dráha molekul s klesajícím tlakem roste a při tlaku asi 0,133 Pa již přesahuje rozměry D běžných vakuových potrubí. Za tohoto stavu platí $1/D > 1$.

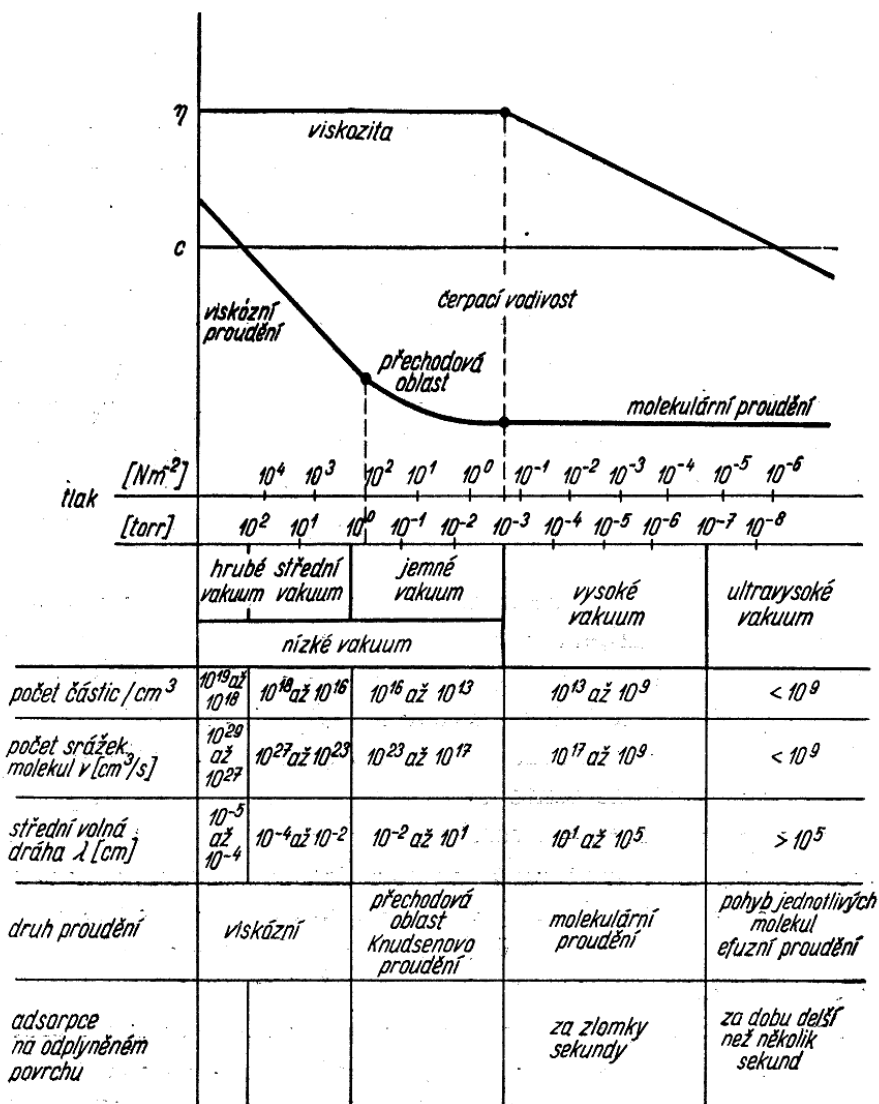
Tlak 0,133 Pa můžeme tedy považovat za jakousi hranici mezi nízkým a vysokým vakuem.

Nízké vakuum můžeme dále dělit na:

- hrubé vakuum
- střední vakuum
- jemné vakuum

Vakuum jemné je v oblasti 133,3 Pa – 0,133 Pa, vyšší tlaky (tedy 133,3 – 13 332 Pa) nazýváme vakuem středním a vakuum hrubé je v rozmezí 13 332 – 101 325 Pa. V oblasti hrubého a středního vakua je proudění laminární.

Vysoké vakuum se vyznačuje prouděním molekulárním a nachází se v rozsahu asi 0,133 – 0,0000133 Pa. Této oblasti se běžně dosahuje pomocí vysokovakuových zařízení. V těchto tlacích je kladen velký důraz na zpracování vnitřních stěn, protože je více molekul vázáno právě na stěny než v čerpaném prostoru.



Obr. 5.1: Dělení vakua dle změn vlastností plynů [12]

Oblast pod 0,0000133 Pa nazýváme ultravysoké vakuum. To je charakterizováno tím, že molekulární proudění přechází v proudění samostatných molekul, tedy efúzní proudění.

Dle kinetické teorie plynů je tlak v nádobě způsoben nárazy jednotlivých molekul nebo atomů do stěn nádoby. Čím menší je tlak, tím je v nádobě obsaženo méně molekul nebo atomů plynu.

Vakuum je tedy velmi důležité pro správnou funkci některých přístrojů jako jsou právě elektronové mikroskopy, rtg. spektrometry, přístroje určené pro analýzu povrchu, urychlovače částic a některé typy obrazovek. V těchto přístrojích se pohybují částice jako je foton, elektron, iont a atom po poměrně dlouhých drahách. Délka těchto drah je různá – od centimetrů v mikroskopech, přes desítky centimetrů v obrazovkách, až po kilometrové vzdálenosti v urychlovačích částic. Každá srážka s molekulou plynu má pak za následek ztrátu energie, rozptyl částic.

Druhým důležitým jevem je znečištění preparátu a částí přístrojů, které jsou ve styku s částicemi. Kontaminace vzniká rozkladem zejména uhlovodíků v přístroji. Dalším zdrojem může být sorpce na povrchu zkoumané látky, která může absolutně znehodnotit měření, tomu se snažíme předejít.

Dalším rizikem je vznik oxidací a hydratace významných komponent jako jsou žhavená vlákna, krystaly a na vzduchu nestálé materiály.

Vakuum je nezbytné pro pohyb částic primárního zdroje i pro pohyb analyzovaného signálu beze srážek s molekulami prostředí, ve kterém se dráha těchto částic nachází.
[12]

5.3.2 Molekulární proudění

Střední volná dráha částic proudění se prodlužuje, pokud je snižován celkový tlak v systému. Střední volná dráha dosahuje rozměrů shodných jako jsou rozměry potrubí. Molekuly se pohybují samostatně a nenarážejí na sebe. Molekuly se tedy vzájemně neovlivňují. Srážky molekul probíhají pouze na stěny potrubí.

Podobně jako při přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním dochází i ke vzniku přechodové oblasti při přechodu mezi laminárním a molekulárním prouděním. Přechodová oblast se neřídí ani zákony laminárního proudění ani proudění molekulárního, nýbrž zde platí obecný vztah, který byl vyjádřen Knudsenem. Tato přechodová oblast bývá také někdy nazývána jako Knudsenovo proudění.[12]

5.3.3 Efúzní proudění

Pokud budeme dále snižovat tlak v systému, dostaneme se do oblasti ultra vysokého vakua, kde jsou rozdíly tlaků v potrubí zanedbatelné. Střední volná dráha částic je tak

velká, že přesahuje rozměry celého systému. Proudění za těchto podmínek je nazýváno efúzním prouděním. Vodivost potrubí nezáleží na tlaku v potrubí, stejně jako u molekulárního proudění, a navíc nezáleží už ani na jeho délce.[12]

5.4 Modelování dynamiky tekutin

Modelování tekutin se řídí třemi základními zákony:

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

[9]

5.4.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity nám říká, že při změně rychlosti, průřezu a hustoty tekutiny se nezmění hmotnost kapaliny. Proto je také někdy nazývána rovnicí zachování hmoty. Pro jednorozměrné proudění platí tato rovnice:

$$\frac{\delta(\rho v)}{\delta x} + \frac{\delta \rho}{\delta t} = 0 \quad , \quad (5.2)$$

kde

ρ je hustota tekutiny [kg m^{-3}],

v je rychlost [ms^{-1}],

x je dráha [m]

a t je čas [s].

Obdobně rovnice kontinuity pro třírozměrné neustálené proudění:

$$\frac{\delta(\rho v_x)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v_y)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho v_z)}{\delta z} + \frac{\delta \rho}{\delta t} = 0 \quad (5.3)$$

5.4.2 Eulerovy rovnice hydrodynamiky

V trojrozměrném prostoru můžeme chování, tedy dynamiku, tekutin popsat pomocí pohybových rovnic:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\delta v_x}{\delta t} + v_x \frac{\delta v_x}{\delta x} + v_y \frac{\delta v_x}{\delta y} + v_z \frac{\delta v_x}{\delta z} \right) &= \rho a_x - \frac{\delta p}{\delta x} \\ \rho \left(\frac{\delta v_y}{\delta t} + v_x \frac{\delta v_y}{\delta x} + v_y \frac{\delta v_y}{\delta y} + v_z \frac{\delta v_y}{\delta z} \right) &= \rho a_y - \frac{\delta p}{\delta y} \\ \rho \left(\frac{\delta v_z}{\delta t} + v_x \frac{\delta v_z}{\delta x} + v_y \frac{\delta v_z}{\delta y} + v_z \frac{\delta v_z}{\delta z} \right) &= \rho a_z - \frac{\delta p}{\delta z} \end{aligned} \quad , \quad (5.4)$$

kde máme pět neznámých:

ρ je hustota kapaliny [kg m^{-3}]

p je tlak kapaliny [Pa]

v_x, v_y a v_z jsou složky rychlosti v daném směru [ms^{-1}].

K vyřešení potřebujeme znát pět rovnic. Tři jsou právě Eulerovy rovnice, další rovnicí je rovnice kontinuity a stavová rovnice:

$$pV = NkT = nRT \quad , \quad (5.5)$$

kde:

p je tlak [Pa],

V je objem [m^3],

N je počet částic [-],

k je Boltzmannova konstanta [J K^{-1}],

T je teplota [K],

n je látkové množství [mol]

a R je molární plynová konstanta $R = N_A k$ [$\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$].

Tato stavová rovnice platí pro ideální plyny.

U reálných plynů je potřeba uvažovat, že jednotlivé molekuly plynu na sebe vzájemně působí a mají určitý objem. Stavová rovnice reálného plynu je tedy:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT \quad , \quad (5.6)$$

kde a a b jsou konstanty závislé na druhu plynu

a V_m je molární objem [$\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$].

Dále je nutné znát a určit okrajové podmínky systému, abychom mohly danou soustavu rovnic řešit.

Integrace Eulerovy rovnice je velmi obtížná a časově náročná, proto se řeší numericky. Je to nelineární parciální diferenciální rovnice 1. řádu a slouží například k odvození Bernoulliho rovnice.

[9]

5.4.3 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování mechanické energie ideální kapaliny a je vyjádřena takto:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} \quad , \quad (5.7)$$

kde

h_1 a h_2 jsou polohové výšky částice [m],

p_1 a p_2 jsou tlaky [Pa],

u_1 a u_2 jsou bodové rychlosti [m s^{-1}],
 ρ je hustota proudící tekutiny [kg m^{-3}]
a g je gravitační zrychlení [ms^{-2}].

Bernoulliho rovnice pro ustálené proudění tedy říká, že pro všechny průřezy proudového vlákna je součet polohové, tlakové a rychlostní složky stálý. Pro skutečné kapaliny, kde se vyskytují ztráty musíme tuto rovnici upravit takto:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_z, \quad (5.8)$$

kde jsme nahradili bodovou rychlost u průřezovou rychlostí v . Nerovnoměrné rozdělení rychlosti v v profilu zohledňuje Coriolisovo číslo α , které vyjadřuje podíl mezi skutečnou kinetickou energií a kinetickou energií vyjádřenou z průřezové rychlosti. Díky třením o stěny se část energie přemění převážně na teplo a to vyjadřuje ztrátový činitel h_z . [10]

5.4.4 Navierova – Stokesova rovnice

Navierova – Stokesova rovnice vyjadřuje rovnováhu několika sil působících na elementární objem při proudění skutečné tekutiny. Tyto síly jsou:

- setrvačné síly
- plošné síly
 - tlakové síly (normálové napětí)
 - viskózní síly (tečné napětí)
- hmotnostní nebo objemové síly
 - gravitační síla
 - odstředivá síla
 - elektromagnetická síla
 - atd...

Jednotlivá podbarvení odpovídají významu rovnic.

$$\frac{\delta(\rho v_i)}{\delta t} + v_j \frac{\delta(\rho v_i)}{\delta x_j} = -\frac{\delta p}{\delta x_i} + \eta \frac{\delta^2 v_i}{\delta x_j^2} + \eta \frac{1}{3} \frac{\delta}{\delta x_i} \left(\frac{\delta v_j}{\delta x_j} \right) + \rho a_i + F_i, \quad (5.9)$$

kde

ρ je hustota proudící tekutiny [kg m^{-3}],

t je čas [s],

v je rychlost [ms^{-1}],

p je tlak [Pa],

x je dráha [m],

η je dynamická viskozita [Nsm^{-2}],

a je zrychlení [ms^{-2}]

F je síla [N].

Indexy i a j jsou složky jednotlivých směrů (os x , y , z).

Rovnici lze zjednodušit pro nestlačitelné tekutiny takto:

$$\rho \frac{\delta(v_i)}{\delta t} + \rho v_j \frac{\delta(v_i)}{\delta x_j} = -\frac{\delta p}{\delta x_i} + \eta \frac{\delta^2 v_i}{\delta x_j^2} + \rho a_i + F_i, \quad (5.10)$$

protože ρ je konstantní a tedy výraz $\frac{\delta v_j}{\delta x_j} = 0$

[9]

6 POUŽITÝ SOFTWARE

K této práci je používán software SolidWorks a jeho začleněná součást SolidWorks FlowSimulation. Licence vlastní Ústav elektrotechnologie VUT v Brně.

6.1 SolidWorks

SolidWorks je 3D modelovací program. Nabízí výkonné objemové i plošné modelování. Je postaven na jádře Parasolid®, které umožňuje modelování velmi rozsáhlých sestav a také automatické generování výkresů jednotlivých součástí. Výkresy pak slouží jako technická dokumentace ve výrobě. Otevřená architektura umožňuje rozšíření programu o další funkce s využitím např. Visual Basicu. Díky internetu lze také pomocí SolidWorksu komunikovat mezi jednotlivými konstruktéry pracujícími na jedné sestavě, kteří mohou být na různých částech světa. SolidWorks se ovládá velmi intuitivně a proto se základní konstruování v programu lze naučit relativně v krátkém čase. Změny provedené na dílu sestavy se samozřejmě promítnou v celé sestavě i ve výkresech. Výhodou SolidWorksu je také jeho dobrý výkon i na běžném hardware, nevyžaduje tedy žádné pracovní stanice. Kompletní česká lokalizace programu přispívá k jeho použití v našich končinách.

SolidWorks obsahuje zdarma integrované překladače pro všechny současné standardní formáty používané v oblasti CAD: CGR (CATIA® graphics), HCG (CATIA highly compressed graphics), Pro/ENGINEER®, IPT (Autodesk Inventor®), Mechanical Desktop, Unigraphics®, PAR (SolidEdge®), CADKEY®, IGES, STEP, Parasolid®, SAT (ACIS®), VDA-FS, VRML, STL, DWG, DXF™, TIFF, JPG, PDF, Viewpoint, RealityWave, HSF(Hoops). Modul pro inteligentní import (FeatureWorks) modelům přiděluje 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. Z Pro/ENGINEERa se načítají modely a sestavy s historií a všemi parametry. [11]

6.2 SolidWorks FlowSimulation

FlowSimulation je samostatný software, který je plně integrovaný v SolidWorks. Je určen k analýzám proudění plynů a kapalin různých typů a k výpočtům přenosu tepla. Díky intuitivnímu ovládní je vhodný pro ty, kteří potřebují analyzovat dané proudění, ale nejsou úplnými odborníky na simulaci proudění. FlowSimulation automaticky rozeznává vnitřní objem těles, kde prochází dané proudění, dále zahrnuje sledování částic a vizualizaci profilu toku. Program vnitřní objem rozdělí pomocí sítě na několik konečných pod-objemů, ve kterých probíhá výpočet rychlosti, směru proudění, tlaku nebo teploty, atd... Síť lze samozřejmě upravovat a zjemňovat podle konstrukce vnitřních prostor. Díky integraci v SolidWorks je velmi snadné na základě vypočítaných hodnot proudění změnit tvar, či velikost vnitřního objemu, kde proudění probíhá. To je užitečné při návrhu nejvhodnějšího tvaru a jeho testování za určitých podmínek (vstupní tlak, rychlost, teplota, atd...).

Možnosti programu:

- nestlačitelné a stlačitelné, podzvukové i nadzvukové proudění kapalin a plynů
- laminární a turbulentní proudění podle modelu
- vnitřní a vnější proudění
- přenos tepla kondukcí, konvekcí (přirozená, nucená) a radiací
- stacionární a nestacionární proudění
- zahrnutí drsnosti stěn
- nahrazení části modelů porézními médii
- model Rotace
- newtonovské kapaliny jako je např. krev nebo pasta
- zooming – detailní výpočet vybrané části s okrajovými podmínkami určeným výpočtem na zjednodušeném komplexním modelu

[11], [12]

6.3 Metoda konečných objemů

Podívejme se na metody řešení simulace dynamiky tekutin (CFD) pomocí představeného programu. Model systému dodržuje zákony uvedené v kap. 5.4, který následně řeší numerickými metodami. Pro řešení je nutné definovat vstupní a okrajové podmínky zkoumaného systému. Takový způsob simulace v praxi velmi šetří náklady a

také čas na vývoj nových řešení a produktů. Výhodou je rychlost řešení. Některé výpočty mohou zabrat i desítky hodin, ale v porovnání s výrobou prototypu a jeho testováním je výpočetní čas mnohonásobně kratší. V některých případech je dokonce reálné testování nebezpečné až nereálné (výbuchy, požáry, atd...). Záleží na daném softwaru, jak dokáže simulovaný model přiblížit skutečnosti, aby byl výsledek simulace později odzkoušen i na reálném modelu.

6.3.1 Diskretizační způsoby

Řešíme-li nějaký model, je nutné jej určitým způsobem diskretizovat (rozdělit na menší dílky), abychom získali podrobnější pohled na dění uvnitř modelu. Existuje několik způsobů diskretizace, kde je každý vhodný pro specifický případ. Jsou to metody:

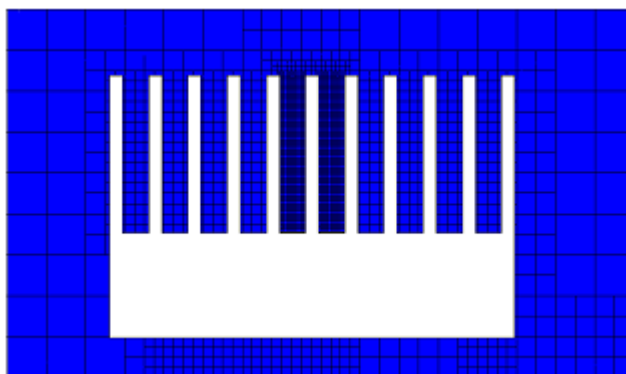
- **Metoda sítí – Finite difference method**
 - patří k prvním metodám pro diskretizaci parciálních diferenciálních rovnic
 - je využívána aproximace v uzlových bodech
 - řeší diferenciální tvar rovnic
 - používá ji asi 5 % komerčních programů
- **Metoda konečných objemů – Finite volume method**
 - řeší integrální tvar rovnic
 - je využívána aproximace toků přes hranice definovaného objemu
 - používá ji asi 80 % komerčních programů
- **Metoda konečných prvků – Finite element method**
 - vychází z metody konečných objemů, ale výsledek je aproximován po částech lineární funkcí
 - vhodná pro výpočty pevnosti, nehodí se pro turbulentní proudění
 - používá ji asi 15 % komerčních programů

Nás nejvíce zajímá Metoda konečných prvků, protože je používána programem FlowSimulation.

6.3.2 Sít'

Při použití metody konečných objemů je řešený objekt nejdříve rozdělen sítí na konečný počet prvků. Celková hrubost a lokální zjemnění sítě mají zásadní vliv na relevantní výsledky, ale zároveň i na výpočetní čas. To jsou důvody, proč nepodceňovat nastavení výpočetní sítě. Na obr. 6.1 je vidět jednoduchá výpočetní síť. Nejdříve je celý ohraničený prostor rozdělen základní sítí (největší čtverce), dále je zkoumáno, zda se nachází v jednotlivých buňkách objekt, či hrana. Dle velikosti objektu jsou základní buňky děleny na dalších osm buněk (v 3D prostoru). Obdobným způsobem se

jednotlivými stupni zjemňuje výsledná síť, záleží na nastaveném stupni zjemnění. Zjemnění lze nastavit až do devátého stupně. Nastavení sítě má dalších několik možností a úprav, jako je zohlednění zakřivení, minimální velikost jedné buňky, maximální velikost jedné buňky, atd...



Obr. 6.1: Výpočetní síť a její zjemnění

[2]

V každé buňce se tedy vypočítává diferenciální rovnice numerickými metodami. Hodnoty se počítají pro střed buňky, tzv. výpočetní uzel. Hodnoty na stěnách (hranicích objemu) jsou získávány interpolací vypočtených hodnot. Existuje několik interpolačních schémat:

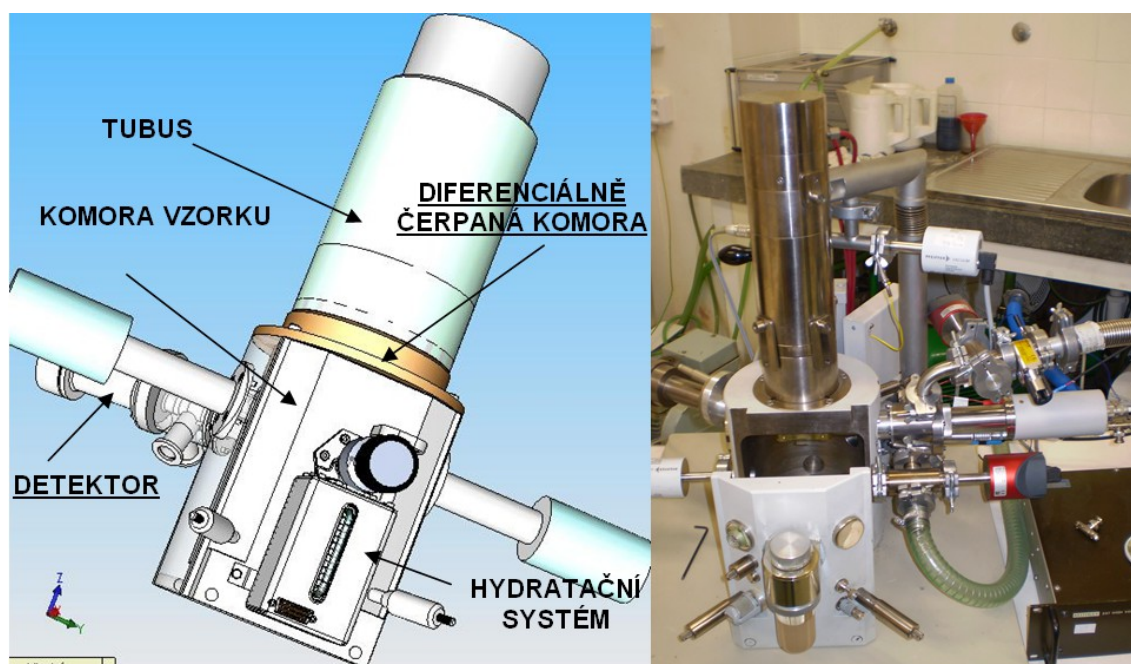
- protiproudá interpolace 1. řádu
 - hodnota na stěně je stejná jako v centru buňky ležící proti proudu (vlevo od stěny)
- protiproudá interpolace 2. řádu
 - hodnota na stěně je určena ze dvou center ležících proti proudu (vlevo od stěny)
- centrální interpolace
 - hodnota na stěně je určena lineární interpolací dvou sousedních vypočtených hodnot (není vhodná pro vířivé proudění)
- protiproudá interpolace
 - hodnota na stěně je určena kvadratickou aproximací dvou bodů ležících proti proudu a jednoho bodu po proudu

[1]

7 PRVNÍ NÁVRHY

7.1 Elektronový mikroskop AQUASEM II

V prvních návrzích bude naším odrazovým můstkem již existující funkční mikroskop AQUASEM II, který používá detektor se dvěma clonkami. Mikroskop je používán na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR. Uvedený mikroskop a jeho model je uveden na obrázku 7.1 níže.



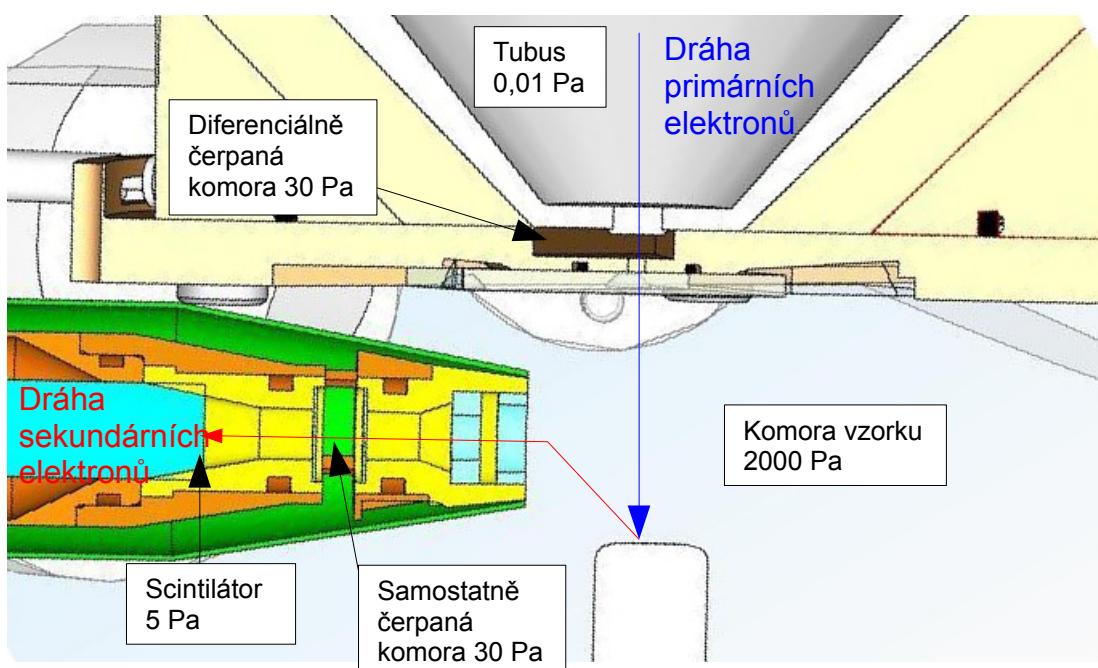
Obr. 7.1: Enviromentální rastrovací elektronový mikroskop AQUASEM II

[12]

Konstrukční řešení mikroskopu AQUASEM II je takové, že větší část dráhy elektronů je ve vakuu tubusu. V komoře vzorku je tlak až 2000 Pa. Jednotlivá prostředí nelze hermeticky oddělit, protože elektrony neprojdou pevným materiálem. Prostor jsou oddělena dvěma clonkami s malým otvorem. Prostor mezi clonkami se nazývá diferenciálně čerpaná komora. Má samostatné čerpání na tlak 30 Pa.

Podobně je to vyřešeno i v oblasti scintilátoru, který je vsunutý do komory vzorku. Tam jsou umístěny také dvě clonky a mezi nimi samostatně čerpaná komora o tlaku 30 Pa. Přímě v prostoru scintilátoru je povolený tlak maximálně 8 Pa. Je to z toho důvodu, že na scintilátoru je velké napětí (asi 12 kV) kvůli urychlení elektronů tak, aby vyvolaly scintilace. U tak velkého napětí dochází za normálního tlaku k výbojům, proto je tlak snížen až na 5 – 8 Pa.

Paprsek elektronů tedy prochází tubusem s tlakem asi 0,01 Pa. Dále prochází tlakem 30 Pa v diferenciálně čerpané komoře a vstupuje do komory vzorku s tlakem 2000 Pa. Dopadá na vzorek, kde dochází k interakci a vzniklé sekundární elektrony jsou přitahovány k detektoru. Paprsek sekundárních elektronů prochází tedy tlakem 2000 Pa v komoře vzorku, pokračuje samostatně čerpanou komorou mezi clonkami detektoru s tlakem 30 Pa. V poslední fázi prochází prostorem scintilátoru s tlakem 5 – 8 Pa, kde dochází k scintilacím. Popsaná dráha je znázorněna na modelu mikroskopu v obrázku 7.2. Clonky v scintilátoru jsou otvory o průměru 0,6 mm.



Obr. 7.2: Dráha elektronů a tlaky jednotlivých částí mikroskopu

[12]

7.2 Návrh jedné clonky s kuželovým deflektorem

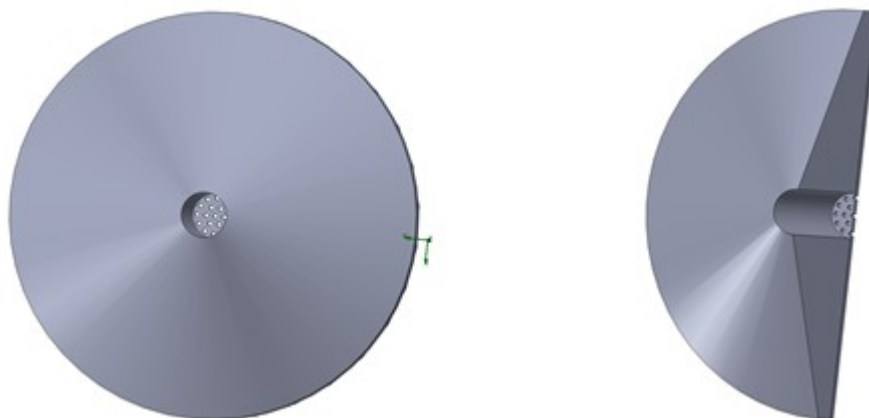
7.2.1 Okrajové podmínky

Pro první návrhy vycházíme z předchozího mikroskopu, který upravíme na jednoclonkový. Máme jasně dané podmínky:

- 5 Pa u scintilátoru
- vstupní tlak 1000 Pa
- rotační vývěva, která čerpá prostor mezi clonkou a prostorem s tlakem 1000 Pa, má objemové čerpání $0,001 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

- turbomolekulární vývěva čerpající prostor mezi clonkou a scintilátorem má rychlost čerpání $0,01 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

7.2.2 Navrhovaná clonka č. 1



Obr. 7.3: Návrh clonky č. 1 s kuželovým deflektorem

Na obrázku 7.3 je zobrazen návrh clonky č. 1, který v testování, jehož výsledky budou uvedeny níže, splňoval okrajové podmínky. Samotná clonka je tvaru sítě s malými otvory. Deflektor je kuželovitého tvaru. Prostředí s velkým rozdílem tlaků, jako je v tomto případě, mají velký spád a dochází k velkým rychlostem proudění. Deflektor má za úkol snížit rychlost před clonkou tak, aby byla splněna podmínka konečného tlaku 5 Pa.

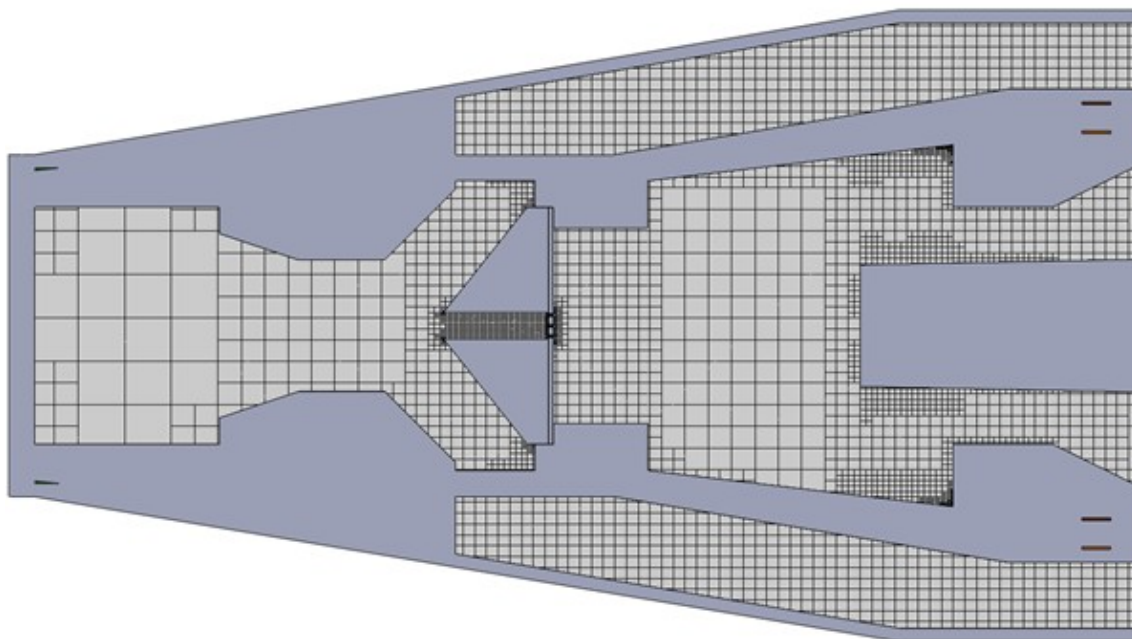
7.2.3 Počáteční podmínky

Mezi počáteční podmínky patří nastavení počáteční hodnoty tlaku ve zkoumaném prostoru. V našem případě pro urychlení výpočtu nepoužíváme hodnotu atmosférického tlaku, ale protože předpokládáme, že tlak ve zkoumané oblasti nebude přesahovat 1000 Pa, výpočet spouštíme s nastavenou hodnotou 1000 Pa. Na stěny systému nastavujeme adiabatickou změnu, nepředpokládá se výměna tepla s okolím. Nastavenou tekutinou je vzduch. Počáteční teplota systému byla nastavena jako pokojová teplota.

7.2.4 Nastavení sítě

Jednou ze základních podmínek správného výpočtu metodou konečných objemů v oblasti proudění plynů je, aby ve zkoumaném tvaru ve všech proměnných průřezech bylo nastaveno minimálně pět buněk.

Než dojde k tomuto nastavení, je třeba připomenout, že program umožňuje u symetrických tvarů nastavit výpočet počítající s touto symetrií a počítanou oblast tedy zasíťovat pouze z jedné poloviny. Nastavenou síť zobrazuje obr. 7.4.



Obr. 7.4: Nastavená síť v programu FlowSimulation

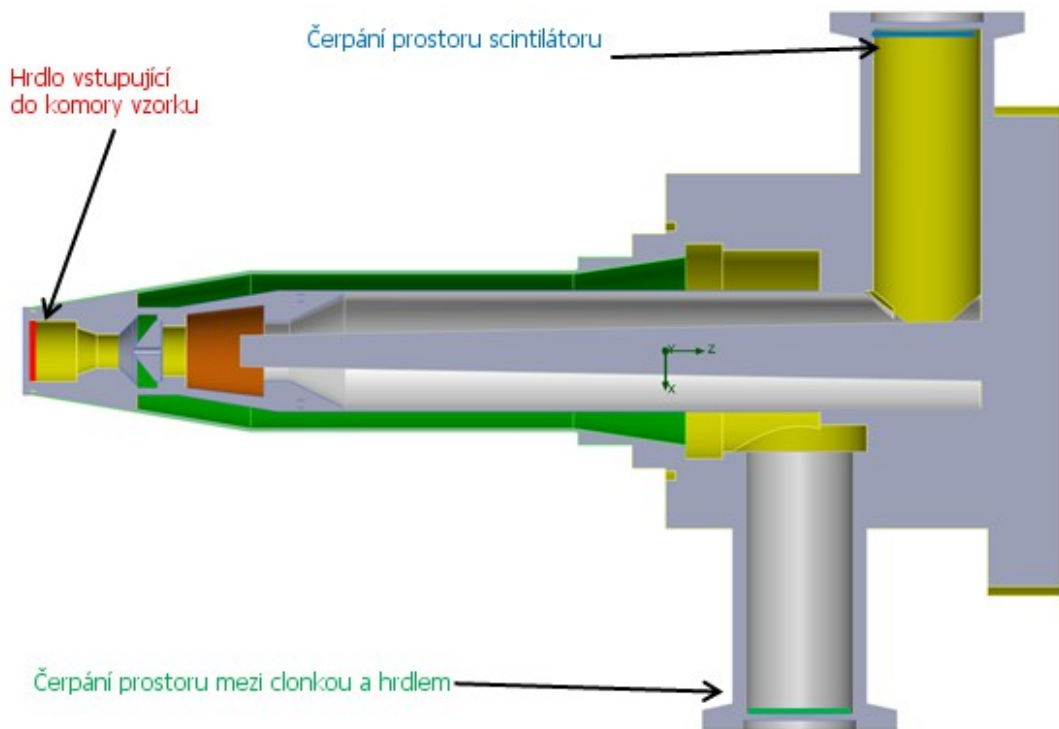
7.2.5 Výpočty návrhu se zadním sáním

První z měřených variant je varianta se zadním sáním, kde je scintilátor čerpán ze zadní části, jak ukazuje obrázek 7.6.

Byl proveden výpočet sledovaných veličin:

- průběh tlaku v detektoru
- průběh rychlosti toku, sledování Machova čísla
- průběh hmotnostního toku na otvorech včetně čerpacích otvorů
- průběh teploty v detektoru

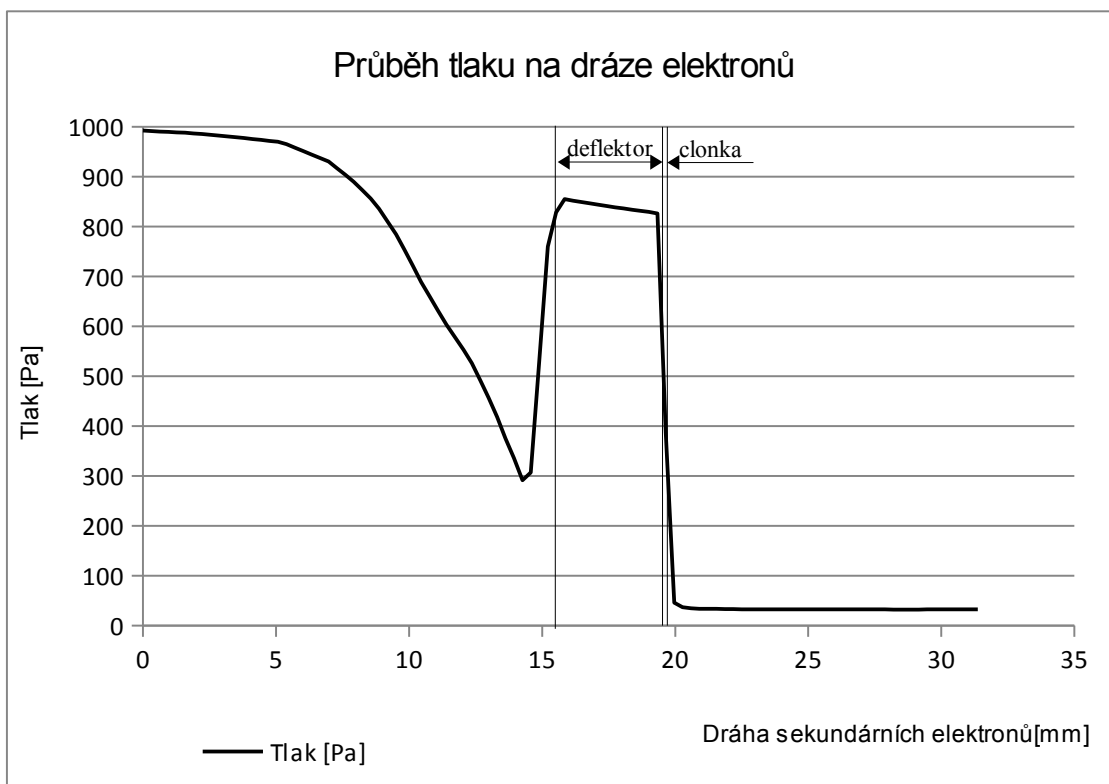
Sledováno bylo okolí elektronového paprsku v detektoru



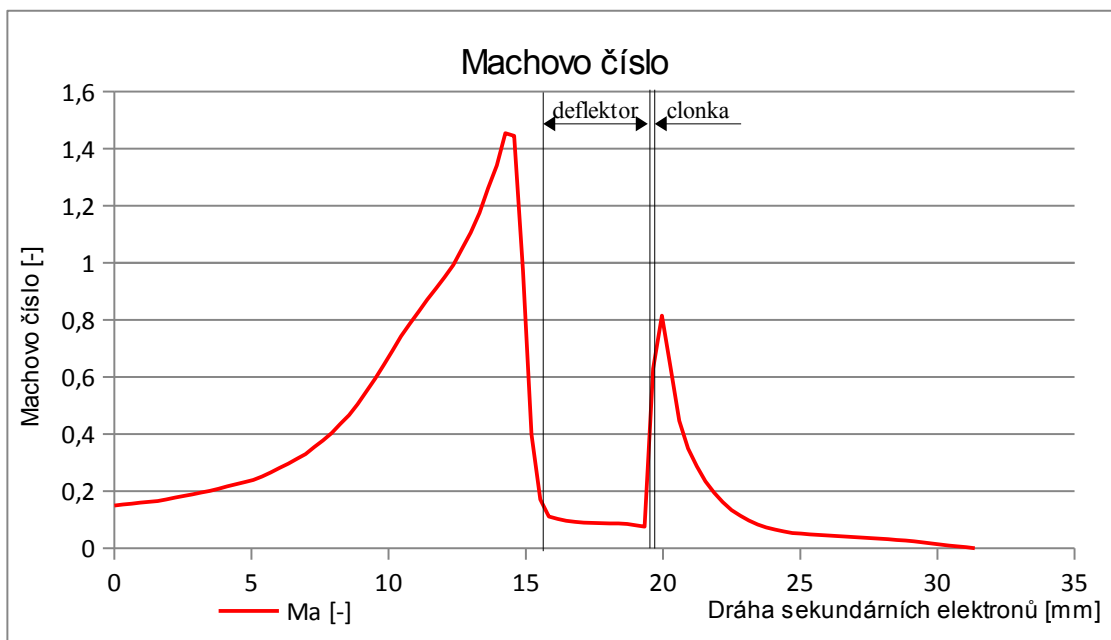
Obr. 7.5: Detektor se zadním sáním

Graf 7.1 popisuje průběh tlaku a rychlosti proudění (Machova čísla) na této dráze. Průběh tlaku nás zajímá vzhledem ke zmíněnému poměru – čím vyšší tlak, tím vyšší rozptyl sekundárních elektronů díky srážkám.

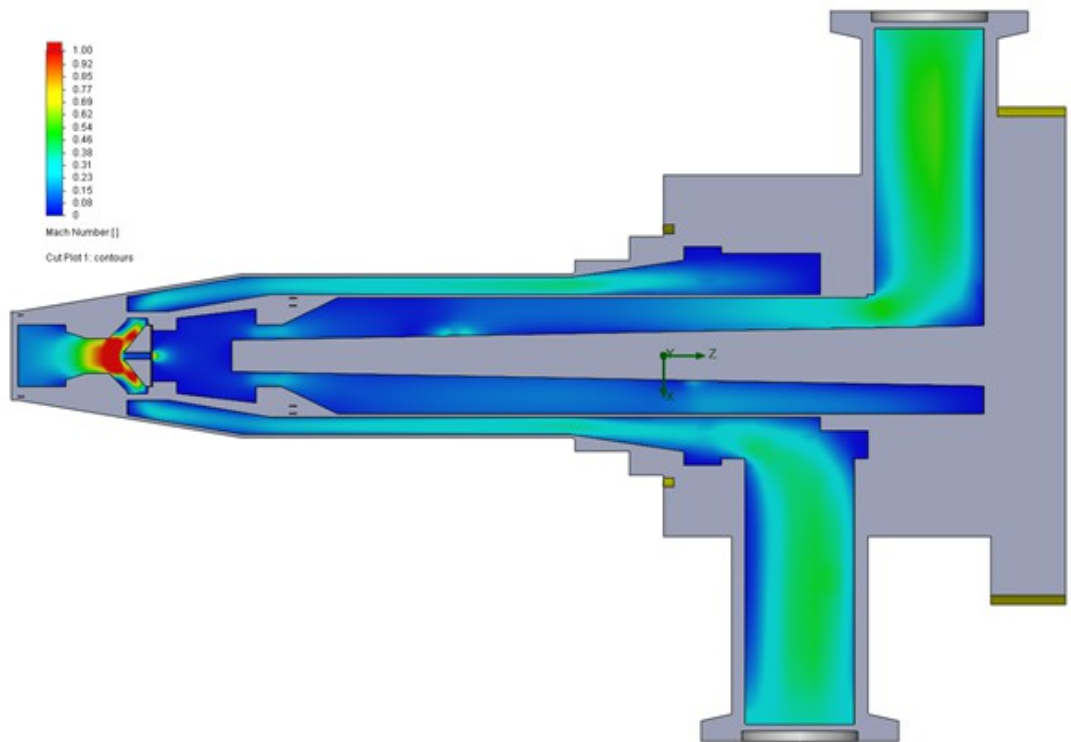
Průběh Machova čísla umožňuje poznat způsob proudění clonkou. V grafu 7.1 je patrné, že v oblasti prvního zúžení dochází k rychlosti v hodnotě Machova čísla – rychlosti zvuku. Toto splňuje fyzikální podmínku, že na hraně malého otvoru oddělujícího dvě oblasti s velkým rozdílem tlaků dochází k tzv. kritickému proudění. Proto za touto clonkou nastává nejprve rozšíření paprsku v nadzvukovém proudě plynu až do okamžiku, kdy nastává přechod paprsku do podzvukového proudění. Odčerpávání kuželovým deflektorem umožnilo snížit proudění směrem ke clonce tak, že poměr tlaků před sítkou a za ní nedovolí, aby došlo ke kritickému proudění, a tedy za sítkou již nedochází k nadzvukovému proudění. Toto je patrné z obr. 7.6.



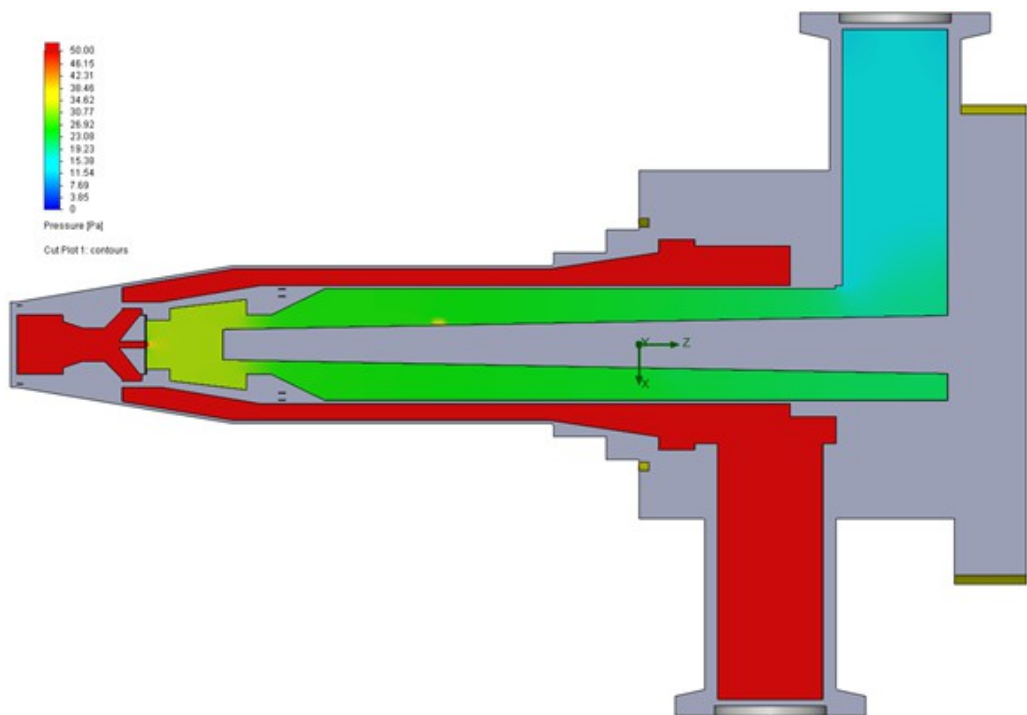
Graf 7.1. Průběh tlaku na dráze sekundárních elektronů (zadní sání)



Graf 7.2. Průběh Machova čísla na dráze sekundárních elektronů (zadní sání)

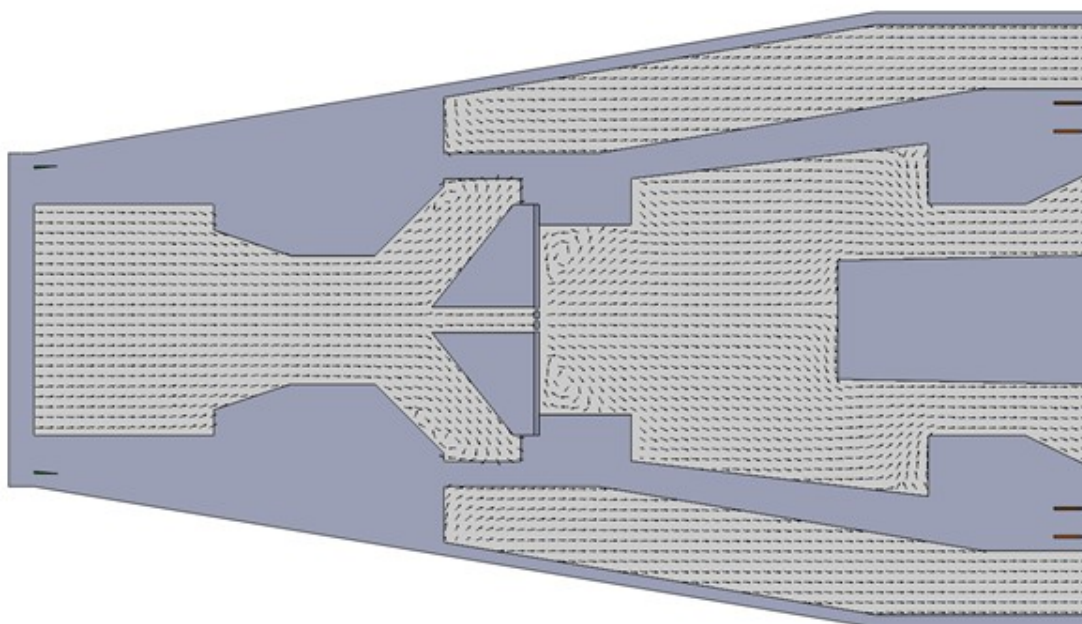


Obr. 7.6: Rozložení rychlosti proudění v detektoru (zadní sání)
 Tlakové rozložení v detektoru je zobrazeno na dalším obrázku 7.7.



Obr. 7.7: Rozložení tlaku v detektoru (zadní sání)

Díky softwarovým možnostem můžeme také vyhodnotit vektory proudění, a tedy rozeznat způsob proudění ve zkoumaných částech detektoru. Vektory jsou zobrazeny na obr. 7.8, zde můžeme vidět, že víry vznikají za clonkou v rozích, ale dráha elektronového paprsku se pohybuje laminárně.

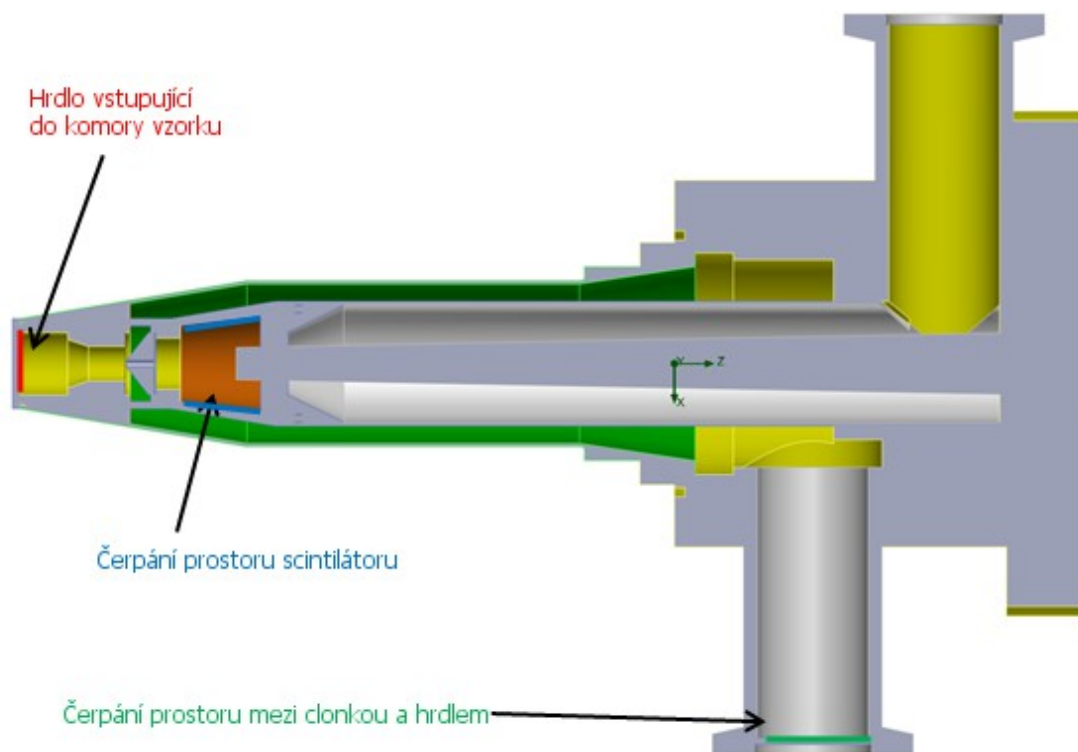


Obr. 7.8: Zobrazení vektorů proudění v detektoru (zadní sání)

Tato zkoumaná varianta není od splnění okrajových podmínek daleko, ale bohužel nevyhovuje požadavku na tlak v okolí scintilátoru, kde je při tomto řešení stále tlak 30 Pa.

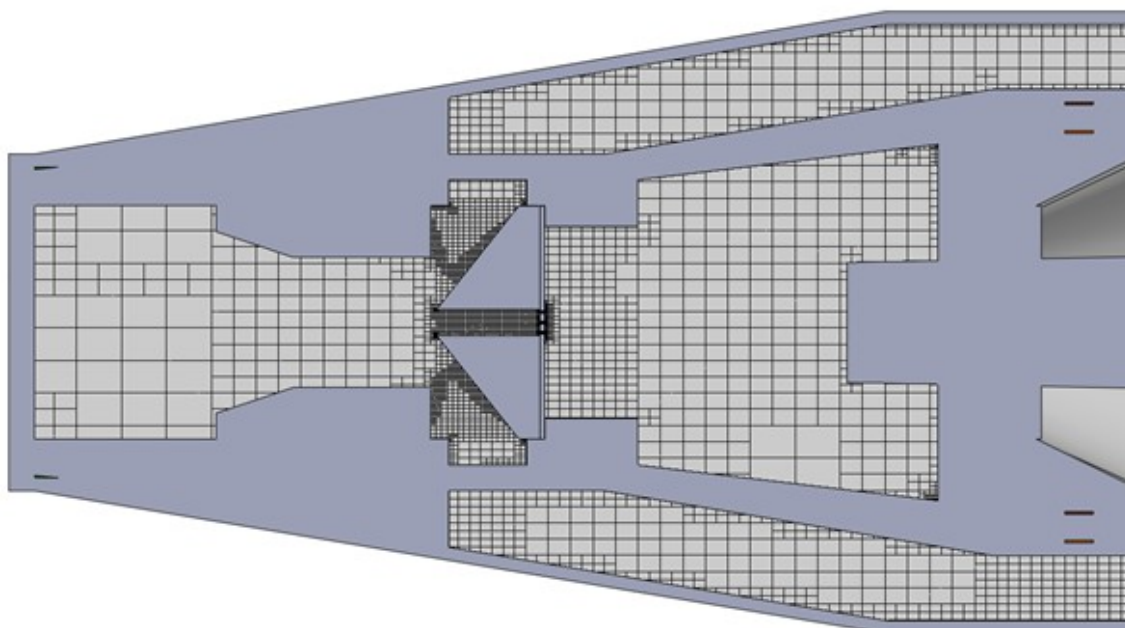
7.2.6 Výpočty návrhu s bočním sáním

Navržená clonka s deflektorem zůstává stejná. Měníme jen odčerpávání prostoru mezi scintilátorem a clonkou, které prostor čerpá nyní přímo z bočních stran, jak ilustruje obrázek 7.9. Původní prostor čerpání za scintilátorem je v tomto případě zaslepen.



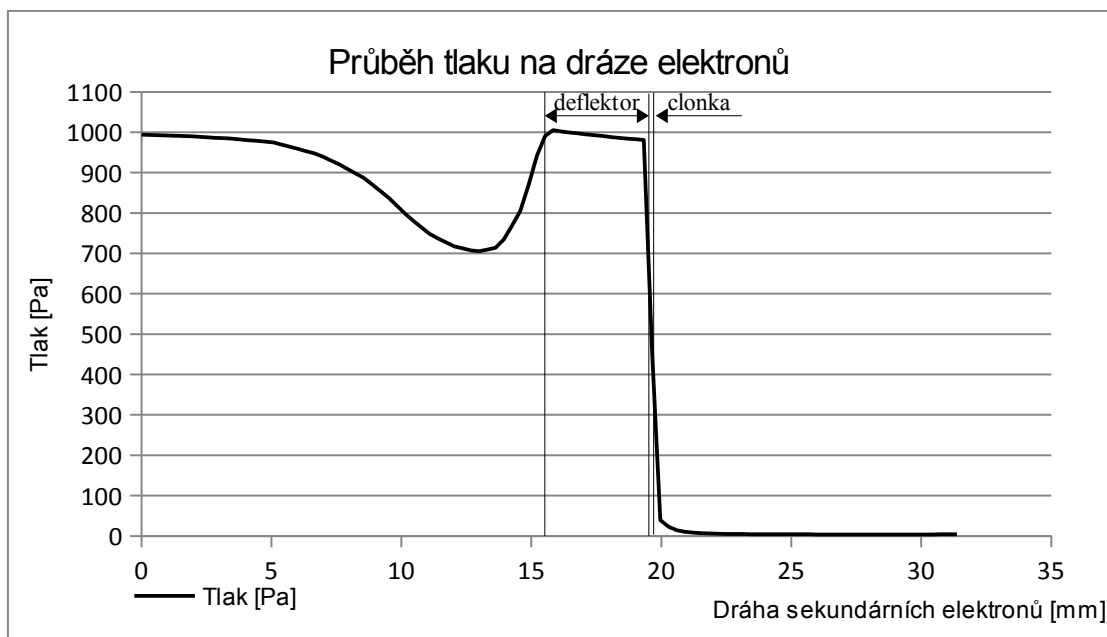
Obr. 7.9: Detektor s bočním sáním

Okrajové podmínky jsou stejné. Navržená výpočtová síť je volena stejným kritériem, tedy minimálně pět buněk na průřez, viz obr. 7.10.

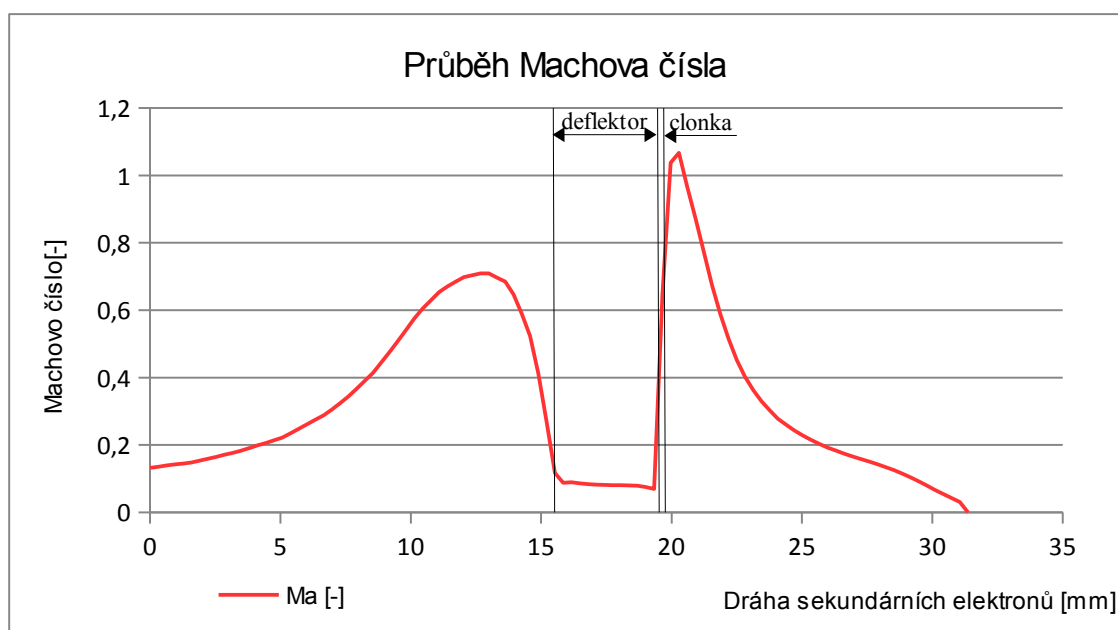


Obr. 7.10: Nastavená síť pro případ bočního sání

Použitím této varianty dostáváme odlišný průběh tlaku na dráze sekundárních elektronů, který ovšem vyhovuje okrajovým podmínkám. Naměřené hodnoty ukazuje graf 7.3. Průběh Machova čísla je na grafu 7.4. Je patrné, že je Machovo číslo překročeno těsně za clonkou, nicméně tlaková podmínka u scintilátoru je splněna. Dosažený tlak je 3,6 Pa.

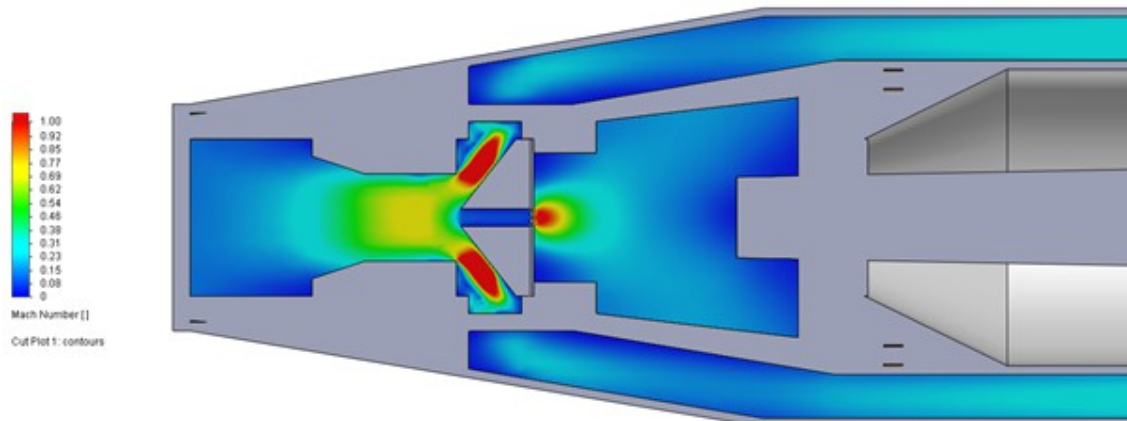


Graf 7.3: Průběh tlaku na dráze sekundárních elektronů (boční sání)



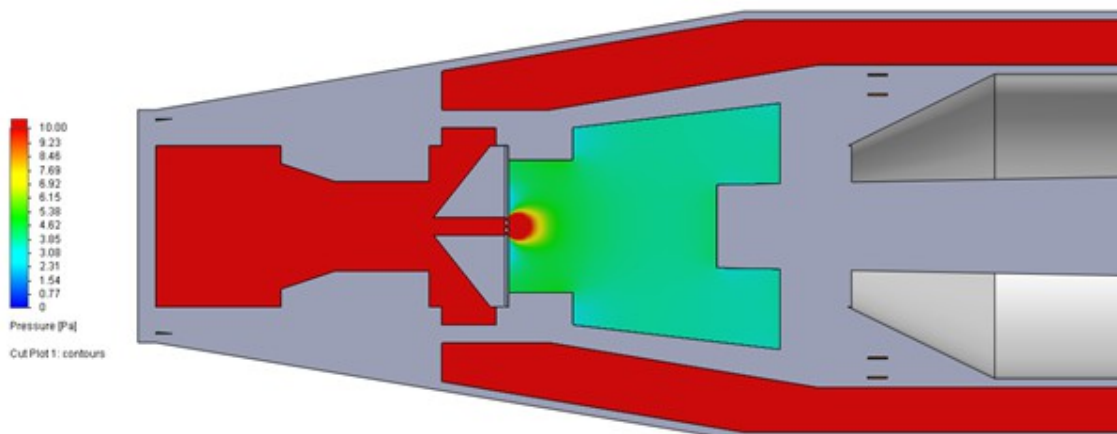
Graf 7.4: Průběh Machova čísla na dráze sekundárních elektronů (boční sání)

Na dalším obrázku je zobrazeno rozložení rychlosti v detektoru, viz obr. 7.11.



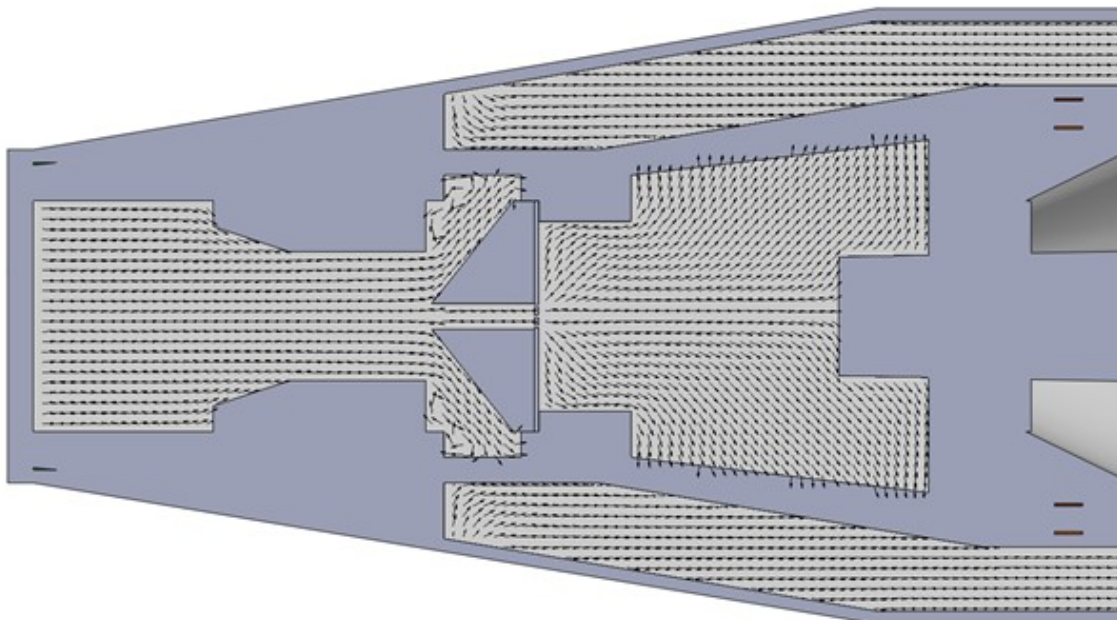
Obr. 7.11: Rozložení rychlosti v detektoru (boční sání)

Rozložení tlaku v detektoru ukazuje obr. 7.12, kde je patrná vyšší rychlost za clonkou.



Obr. 7.12: Rozložení tlaku v detektoru (boční sání)

Poslední obrázek 7.13 ukazuje vektory rychlosti proudění. V tomto řešení dochází k turbulencím pouze před deflektorem. Řešení se síťovou clonkou a kuželovým deflektorem a s bočním sáním již splňuje okrajové podmínky, avšak jeho reálné použití by nebylo zcela vhodné, proto by se další práce měla věnovat vhodnějšímu návrhu.



Obr. 7.13: Zobrazení vektorů rychlosti v detektoru (boční sání)

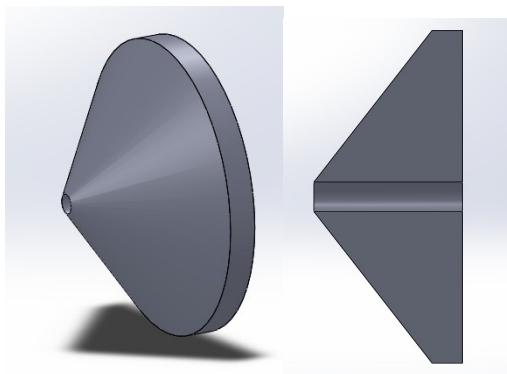
8 DALŠÍ NÁVRHY POUŽÍVAJÍCÍ BOČNÍ SÁNÍ

Navrhovaná clonka tvaru síťky sice splňuje zadané podmínky, ale ukázalo se, že pro prostupnost elektronů není zvláště vhodná. Další návrhy budou tedy pro jednodušší clonky. Co však využijeme z předchozích simulací, je konstrukce s bočním sáním, která dosahuje výrazně lepších výsledků. Bylo provedeno několik návrhů a simulací, zde však jsou uvedeny ty zásadní výsledky.

8.1 Porovnání clonek jednotlivých průměrů

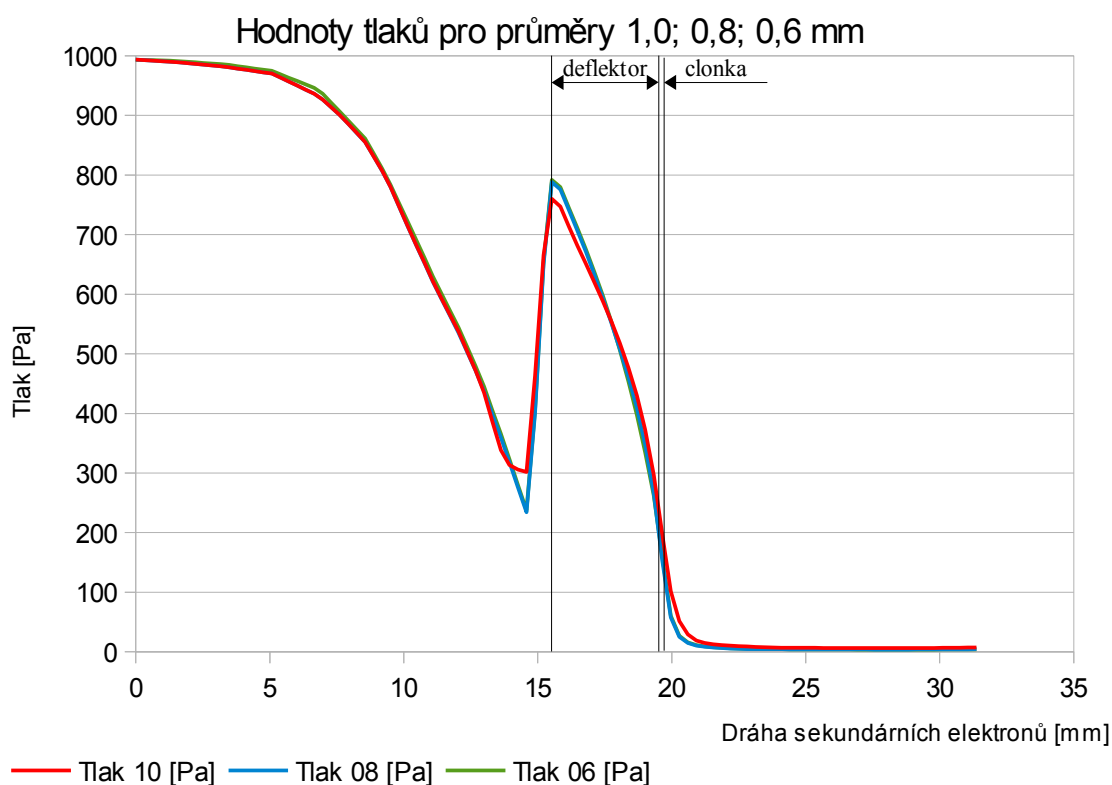
V dalším řešení se zaměříme na clonky jednoduchého otvoru. Deflektor bude tvarově stejný jako v předchozím případě, jen se budou měnit jednotlivé průměry otvorů.

Vstupní podmínky jsou stejné jako v předchozím případě. Na obr. 8.1 je vidět testovaný deflektor s clonkou. Sledované průměry otvorů byly: 1,0 mm, 0,8 mm a 0,6 mm.



Obr. 8.1: Jednoduchá clonka s kuželovitým deflektorem

Zvolená síť byla generována za stejných podmínek, tedy minimálně pět buněk v nejužším místě. Graf 8.1 ukazuje srovnání průběhů tlaků tohoto tvaru clonky o různých průměrech.



Graf 8.1: Průběh tlaků u jednotlivých deflektorů a clonek s otvory 1,0; 0,8; 0,6 mm

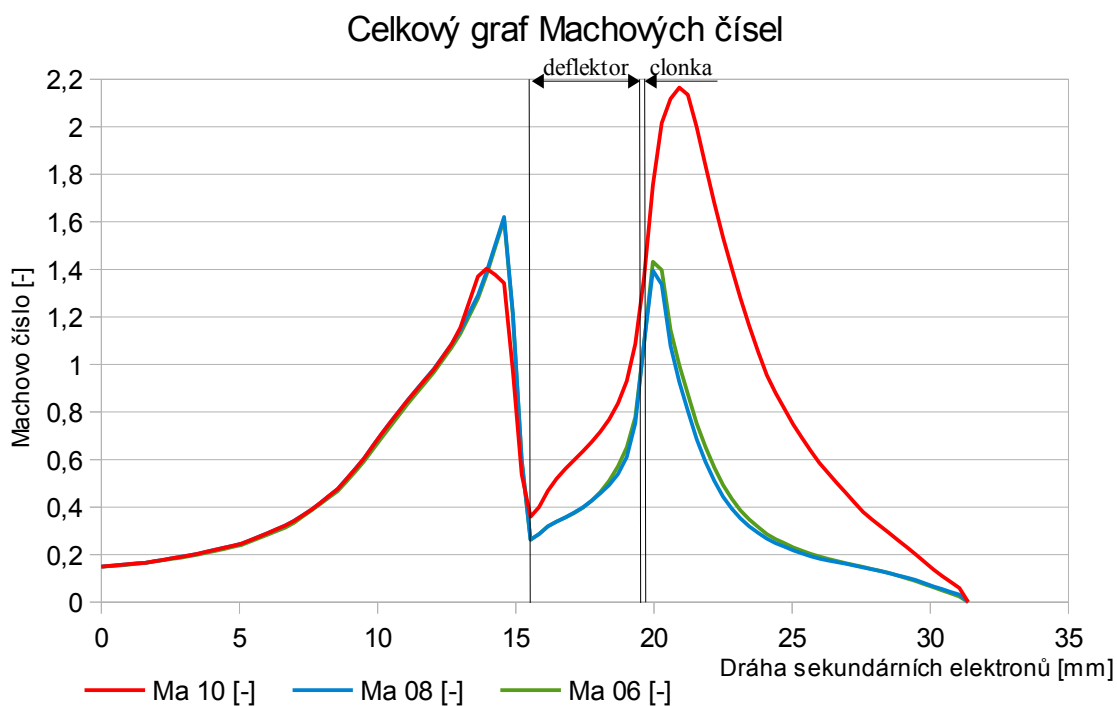
Z grafu 8.1 je patrné, že průběhy pro otvory 0,8 a 0,6 mm jsou si podobné. Průběh pro otvor 1,0 mm nemá takové výkyvy, ale konečná hodnota je vyšší než u dalších

průběhů. Minimální hodnota, tedy hodnota u scintilátoru, a průměrná hodnota na dráze sekundárních elektronů jsou uvedeny v tabulce 8.1.

	Tlak ₁₀ [Pa]	Tlak ₀₈ [Pa]	Tlak ₀₆ [Pa]
Tlak u scintilátoru	7,39	4,34	4,24
Průměr	466,05	462,65	465,35

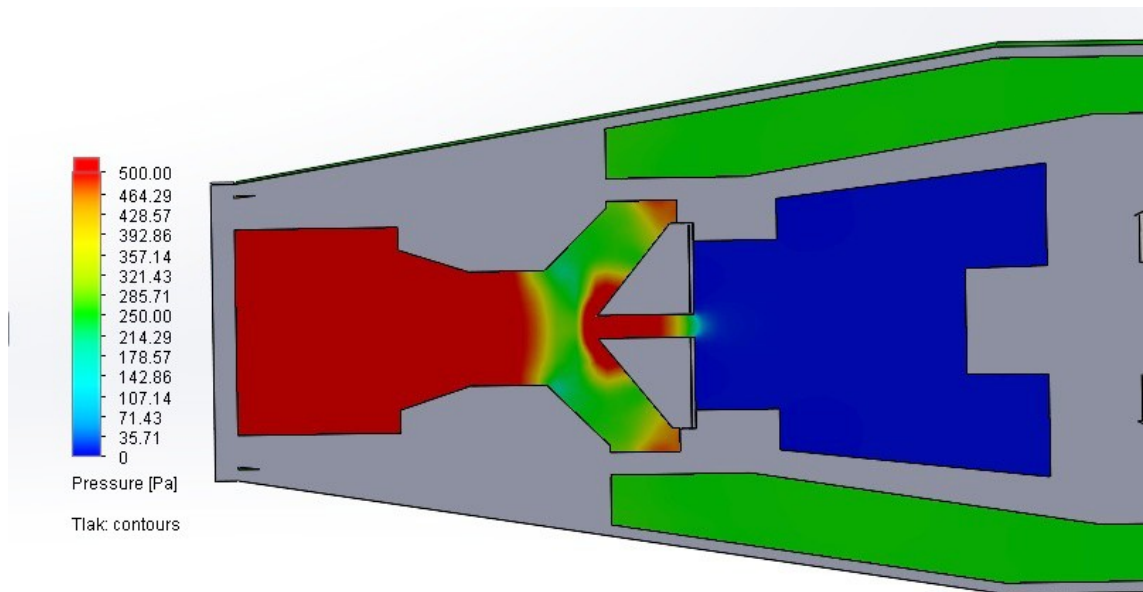
Tabulka 8.1: Průměrné a minimální hodnoty tlaků pro různé velikosti otvorů

Průběhy rychlostí a tedy i sledování Machova čísla zobrazuje graf 8.2. Můžeme vidět opět podobné hodnoty pro průměry 0,8 a 0,6 mm. Simulace ukazuje u otvoru 1,0 mm velký nárůst rychlosti v oblasti za clonkou.

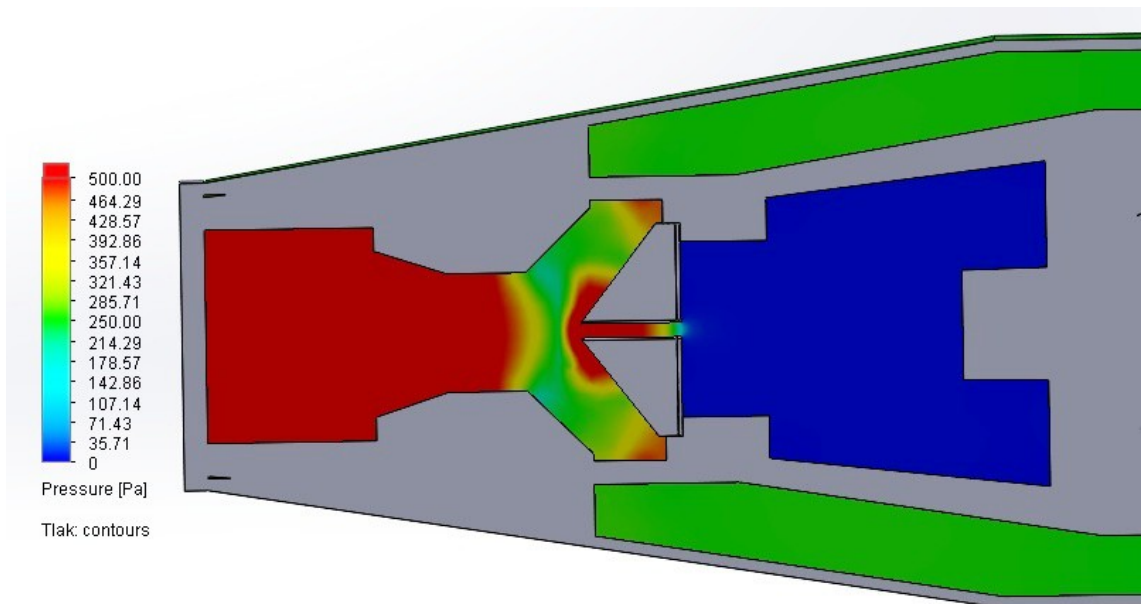


Graf 8.2: Hodnoty Machova čísla pro otvory 1,0; 0,8; 0,6 mm

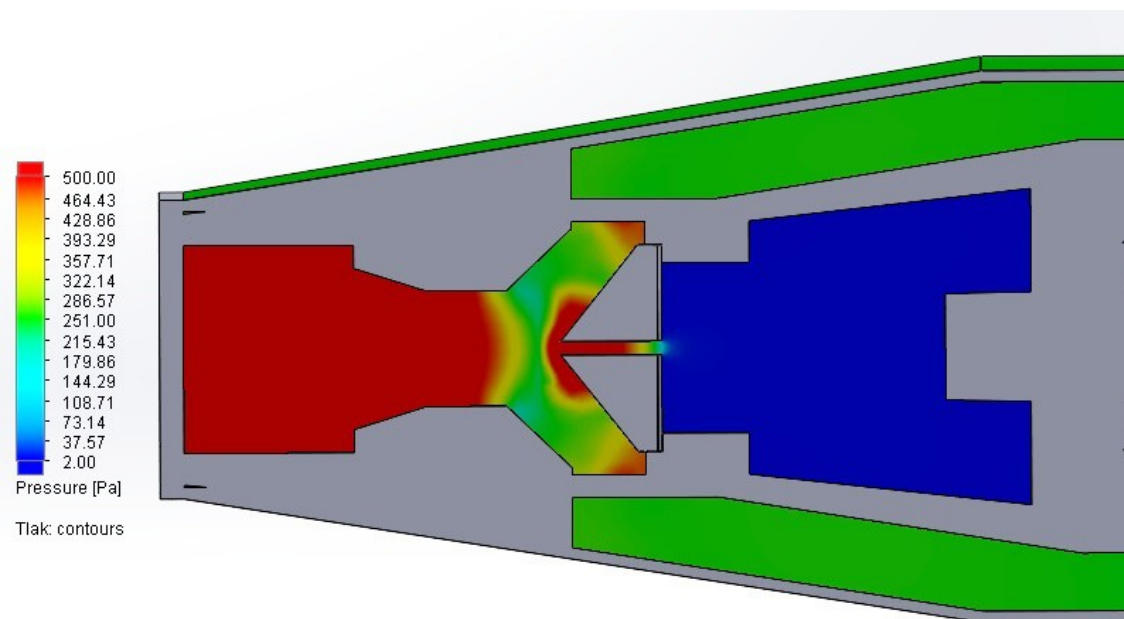
Grafické znázornění průběhu tlaku je na obrázcích 8.2, 8.3, 8.4. Tlak je u vstupu 1000 Pa, pro vhodnější grafické znázornění v kritických místech detektoru je stupnice posunuta a končí červenou barvou na 500 Pa.



Obr. 8.2: Průběh tlaku v detektoru s deflektorem a clonkou o průměru 1,0 mm

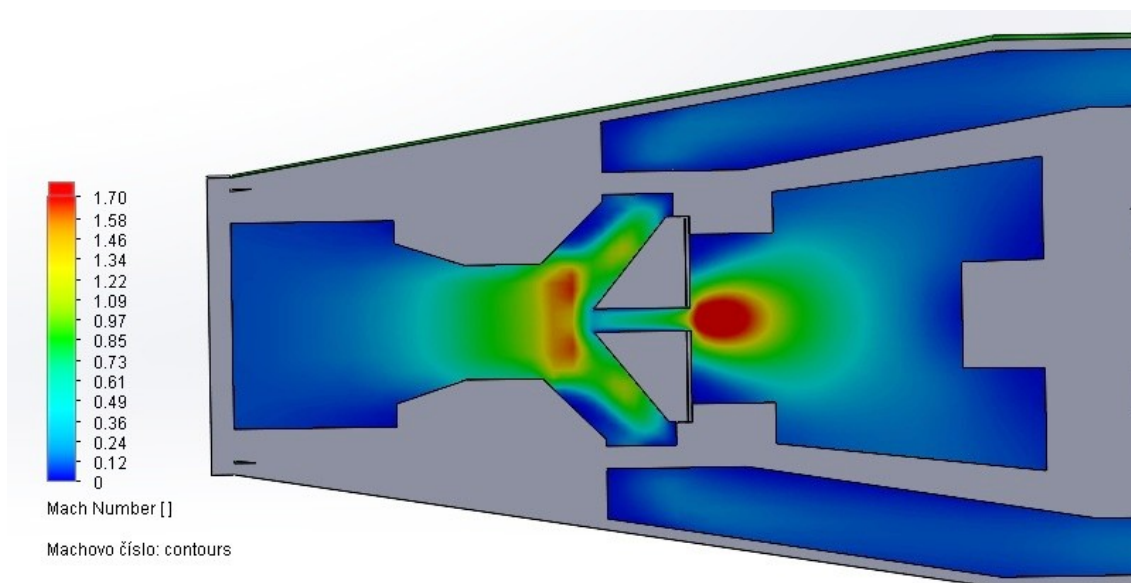


Obr. 8.3: Průběh tlaku v detektoru s deflektorem a clonkou o průměru 0,8 mm

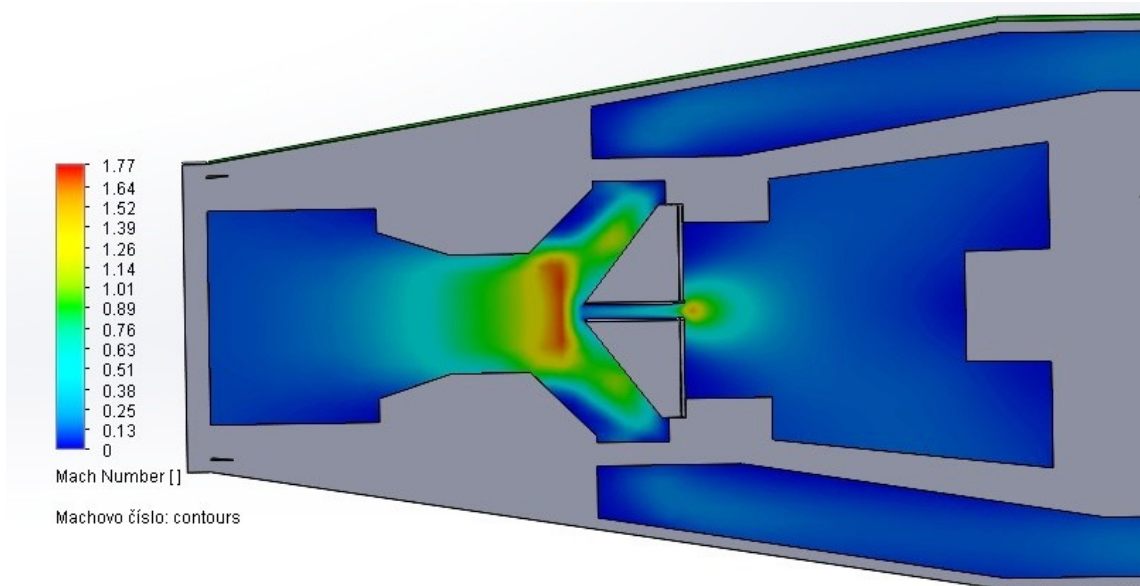


Obr. 8.4: Průběh tlaku v detektoru s deflektorem a clonkou o průměru 0,6 mm

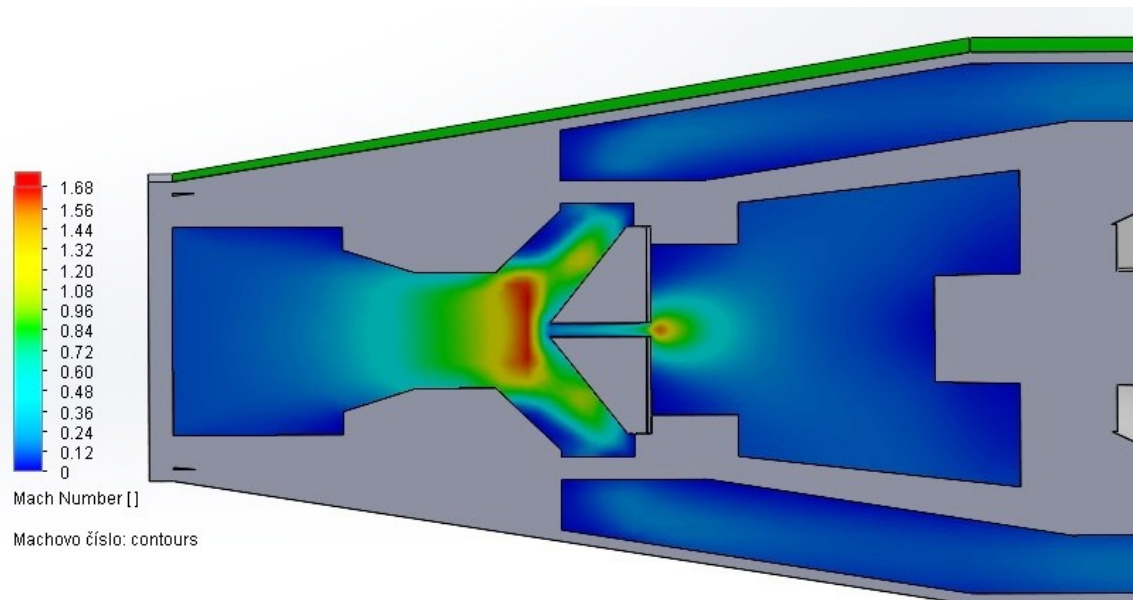
Grafické znázornění rychlosti proudění a Machova čísla je na obrázcích 8.5, 8.6, 8.7.



Obr. 8.5: Průběh rychlosti v detektoru s deflektorem a clonkou o průměru 1,0 mm



Obr. 8.6: Průběh rychlosti v detektoru s deflektorem a clonkou o průměru 0,8 mm



Obr. 8.7: Průběh rychlosti v detektoru s deflektorem a clonkou o průměru 0,6 mm

Z uvedených obrázků je vidět, že otvor 1,0 mm je opravdu velký. Průměry 0,8 a 0,6 jsou si podobné. U průměru 0,6 mm máme nižší hodnotu u scintilátoru, avšak u průměru 0,8 mm máme nižší průměrnou hodnotu tlaku na dráze elektronů, což je také

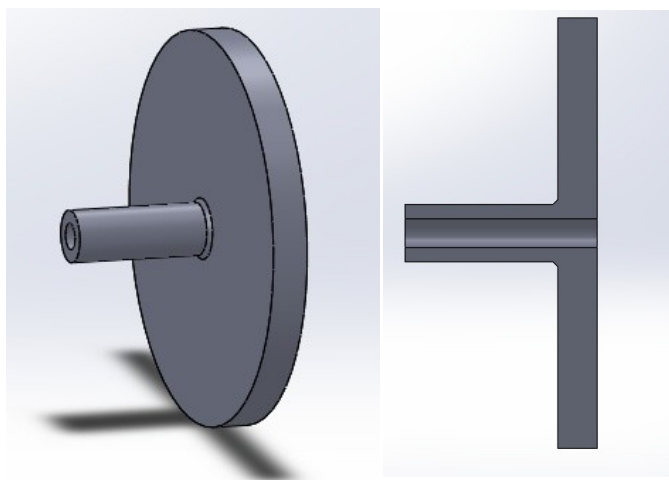
důležitý faktor. Čím nižší tlak, tím menší počet srážek s molekulami plynu, a tedy ostřejší obraz. Další zmenšování otvoru není také úplně vhodné, protože se zmenšuje prostor pro paprsek elektronů, proto se zkusíme v dalších návrzích upnout na tvar deflektoru.

8.2 Porovnání dle tvaru deflektoru

Deflektor svým tvarem velmi ovlivňuje proudění před sebou i za sebou, proto zkusíme porovnat několik tvarů deflektoru. Otvor deflektoru a clonky bude 0,6 mm, až na poslední navrhovaný deflektor, který má proměnný průměr otvoru.

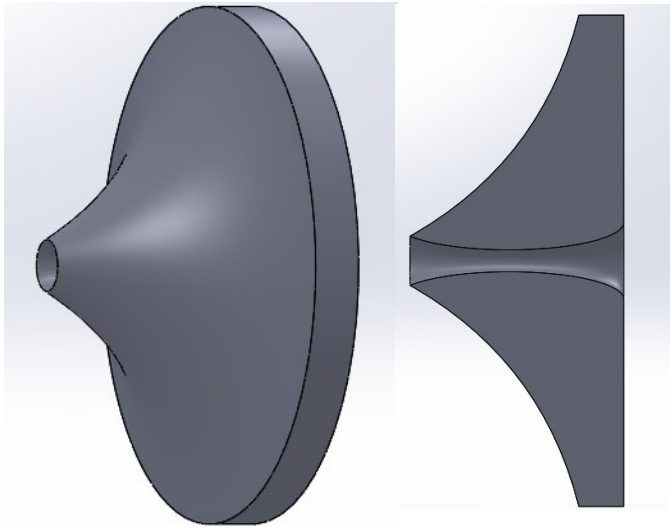
První v porovnání je již z předchozí simulace kuželovitý deflektor, viz obr. 8.1. Průběh tlaků a rychlostí je znázorněn na obrázcích 8.4 a 8.7.

Druhým v porovnání je deflektor, jehož průřez je tvaru T, proto budou jeho hodnoty značeny indexem T. Deflektor je zobrazen na obrázku 8.8.



Obr. 8.8: Deflektor tvaru T

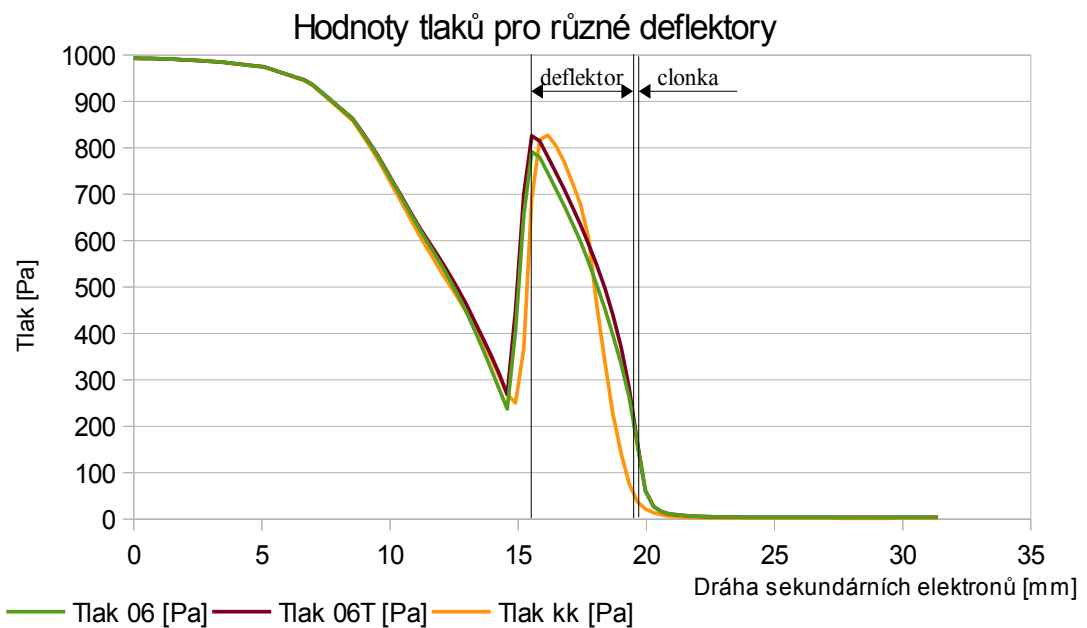
Třetí deflektor je na konstrukci nejsložitější. Vnější strana, která ústí do hrdla detektoru, opisuje tvar části obrácené paraboly. Otvor je vytvářen pomocí rotující obrácené elipsy. Otvor má na vstupu průměr 0,9 mm, v nejužší části je šířka 0,4 mm a na konci, kde vstupuje deflektor do prostoru před scintilátorem, je průměr 1,4 mm. Díky této konstrukci je sloučena clonka a deflektor v jeden celek. Deflektor je značen indexy kk a pro jednoduchost jej označujeme jako „kulovitý“ deflektor, i když to není zcela přesný popis jeho tvaru. Pro konkrétní představu je deflektor zobrazen na obrázku 8.9.



Obr. 8.9: „Kulovitý“ deflektor značený indexy kk

Vstupní podmínky byly voleny stejně, jako v předchozích případech. Stejně tak byl kladen důraz na vhodnou výpočetní síť. U třetího deflektoru nedostačovalo klasické nastavení, protože se musely zohlednit kulaté tvary, které nejsou běžně zahrnuty při zjemňování.

Porovnání průběhu tlaků u jednotlivých deflektorů ukazuje graf 8.3.



Graf 8.3: Průběh tlaků u jednotlivých deflektorů

Před ústím do prostoru scintilátoru nejrychleji klesá tlak při použití třetího kulovitého deflektoru kk. Důležitá čísla, jako je hodnota tlaku u scintilátoru a průměrná hodnota tlaku na dráze elektronů, jsou shrnuta v tabulce 8.2.

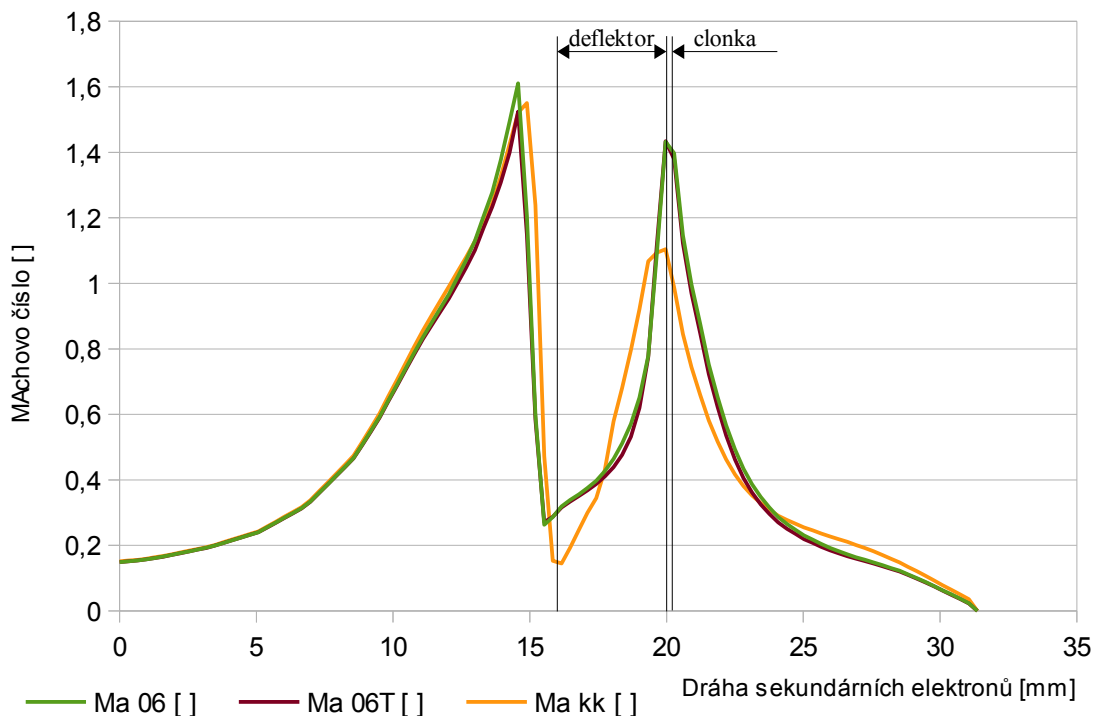
	Тlak ₀₆ [Pa]	Тlak _{06T} [Pa]	Тlak _{kk} [Pa]
Tlak u scintilátoru	4,24	4,32	2,35
Průměr	465,35	473,24	455,20

Tabulka 8.2: Průměrné a minimální hodnoty tlaků pro různé tvary deflektorů

Z tabulky 8.2 vyplývá, že deflektor ve tvaru T byl z hlediska průběhů tlaků špatnou uličkou v tomto bádání, protože má z těchto tří deflektorů nejvyšší hodnotu tlaku u scintilátoru a zároveň i nejvyšší hodnotu průměrného tlaku na dráze sekundárních elektronů. Naopak třetí „kulovitý“ deflektor je z hlediska průběhu tlaku nejvýhodnější, má nejnižší hodnotu tlaku u scintilátoru – 2,35 Pa, zároveň i nejnižší průměrný tlak na dráze elektronového paprsku – 455,2 Pa.

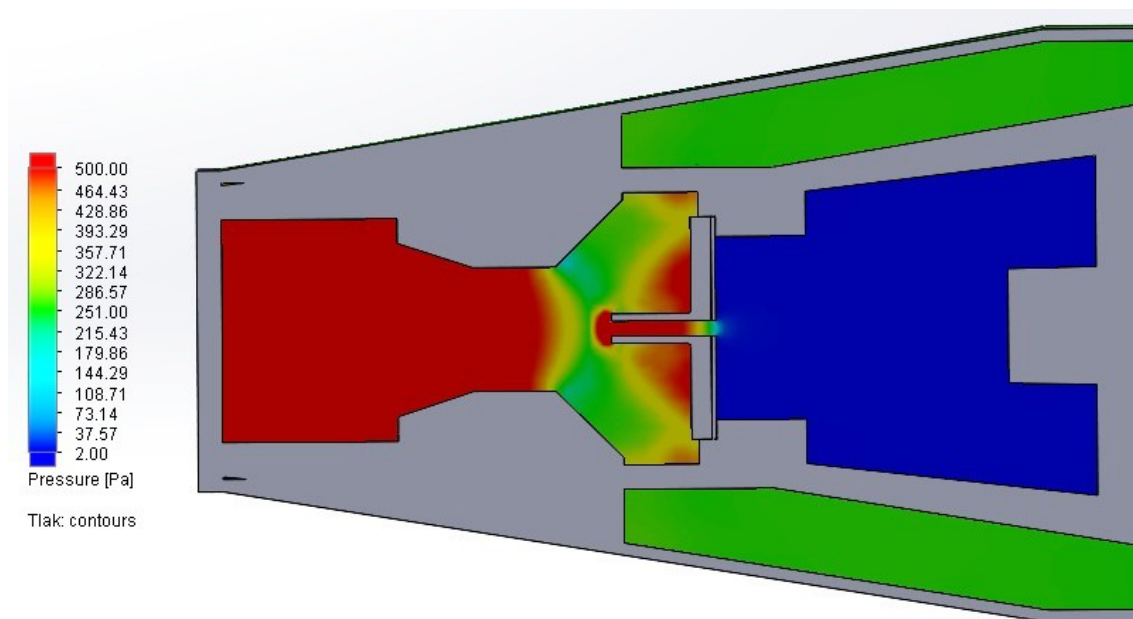
Průběh rychlostí v detektoru za použití jednotlivých deflektorů je v grafu 8.4. Ukazuje se, že při použití deflektoru třetího typu jsou změny rychlosti nejmírnější v porovnání s ostatními typy. To je díky hladším hranám u ústí deflektoru.

Průběhy rychlostí s hodnotami Machova čísla při použití deflektorů různých tvarů



Graf 8.4: Průběhy rychlostí u jednotlivých deflektorů

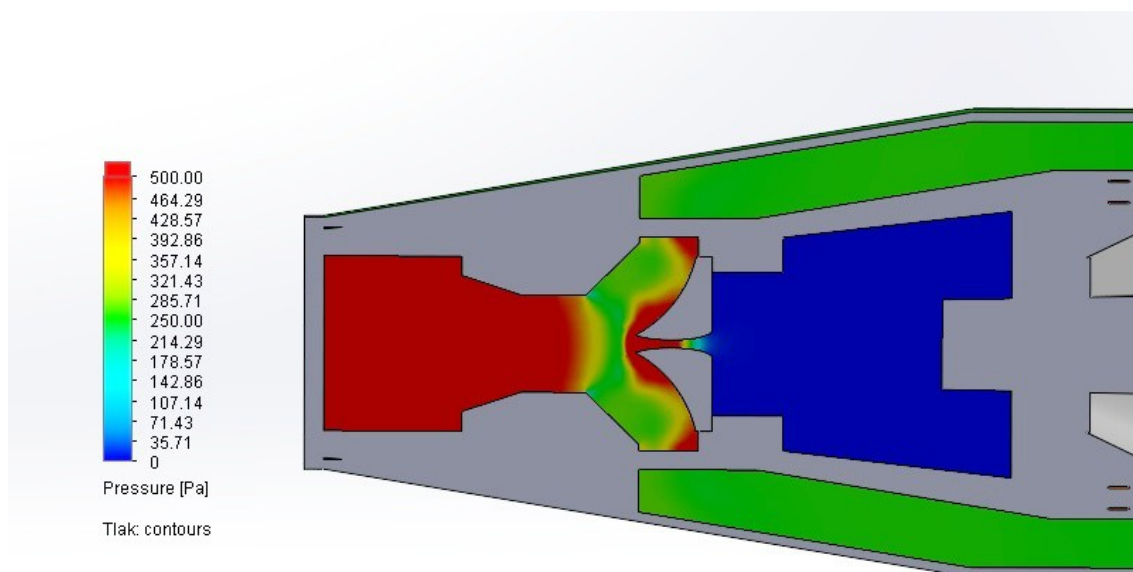
Celkovou situaci průběhu tlaku v detektoru s deflektorem tvaru T ilustruje obrázek 8.10. Můžeme pozorovat zvýšení tlaku v oblasti hrdla deflektoru, jako u ostatních typů, zároveň však vidíme zvýšený tlak na „podstavu“ deflektoru, což znamená zbytečné namáhání v této oblasti.



Obr. 8.10: Průběh tlaku v detektoru s deflektorem tvaru T

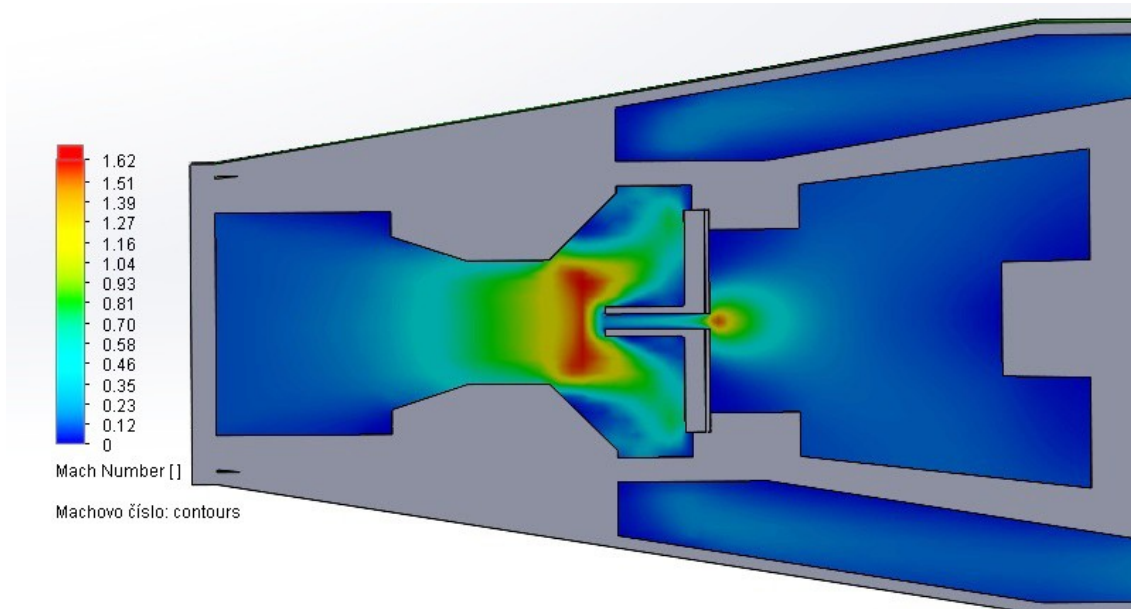
Průběh tlaků v detektoru s „kulovitým“ deflektorem je znázorněno na obr. 8.11. Na tomto obrázku vidíme zvýšený tlak v oblasti hrdla deflektoru, ale zároveň je vidět pokles tlaku už v deflektoru. To je díky rozšiřování tvaru otvoru.

Pro porovnání s průběhem tlaků v detektoru s kuželovitým deflektorem viz obr. 8.4.



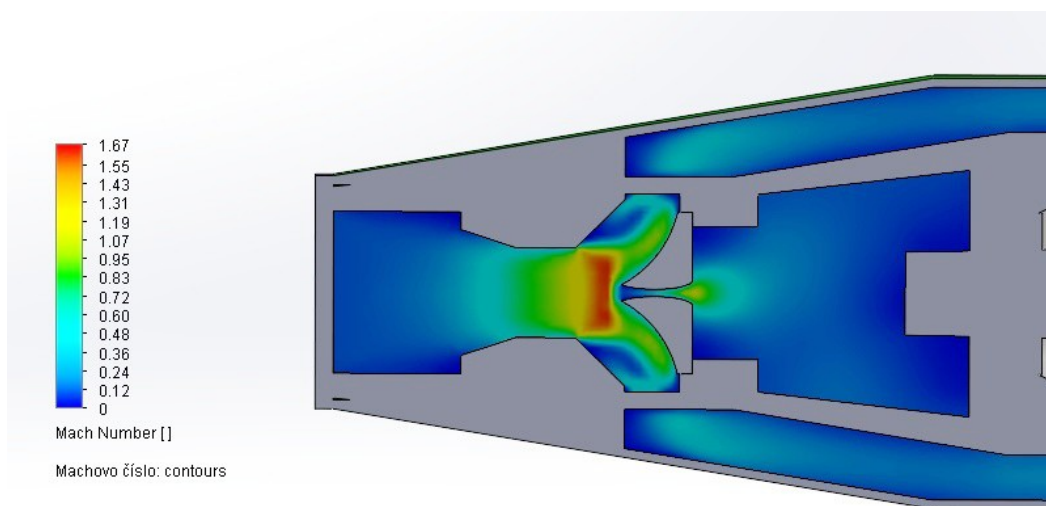
Obr. 8.11: Průběh tlaků v detektoru s "kulovitým" deflektorem

Na obrázku 8.12 je znázorněn průběh rychlosti v detektoru s deflektorem tvaru T.



Obr. 8.12: Průběh rychlosti v detektoru s deflektorem tvaru T

Podobně obr. 8.13 ukazuje průběh rychlosti v detektoru s „kulovitým“ deflektorem. Opět můžeme porovnat s průběhem rychlosti při použití kuželovitého deflektoru na obr. 8.7.

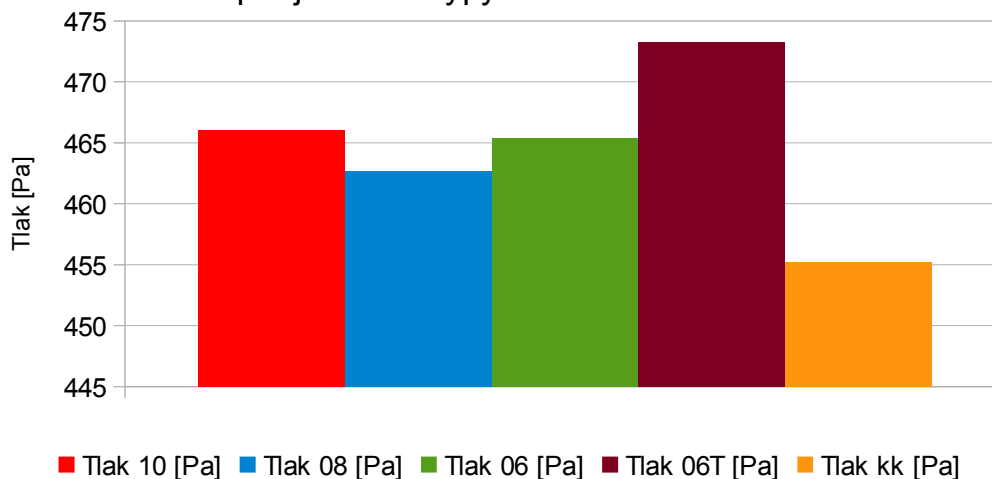


Obr. 8.13: Průběh rychlosti v detektoru s "kulovitým" deflektorem

V této kapitole jsou porovnány různé tvary deflektorů a jejich vliv na chování proudění v detektoru. Zásadní hodnoty uvedených clonek a typů deflektorů jsou pro přehlednost shrnuty v grafu 8.5 a 8.6. V prvním z grafů (8.5) je porovnán průměrný tlak

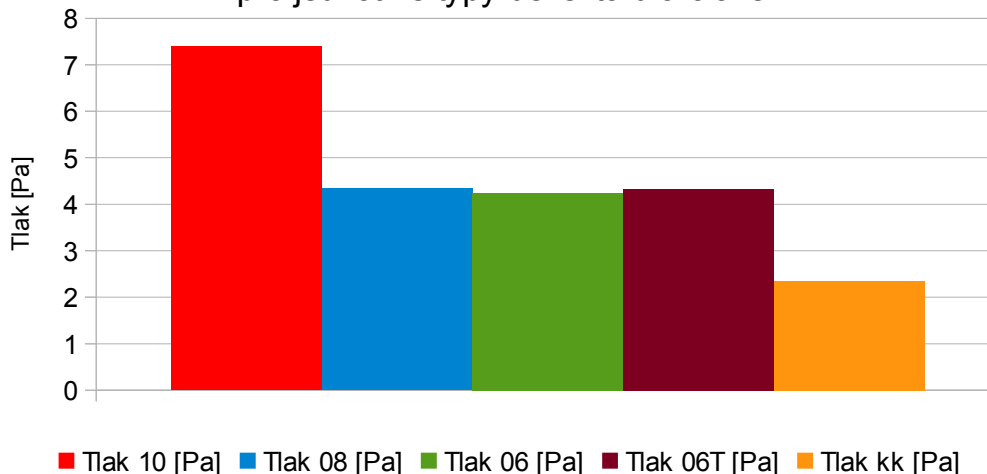
na dráze elektronů jednotlivých typů a v druhém grafu (8.6) vidíme hodnoty tlaků u scintilátoru, které vyhovují podmínce 5 – 8 Pa. Nejlépe se jeví poslední uváděný typ deflektoru, který má obě hodnoty nejnižší. Grafy vycházejí z tabulek 8.1 a 8.2.

Graf porovnání průměrných tlaků na dráze sekundárních elektronů pro jednotlivé typy deflektorů a clonek



Graf 8.5: Průměrné hodnoty tlaků na dráze sek. elektronů uvedených clonek s deflektory

Graf porovnání tlaků u scintilátoru pro jednotlivé typy deflektorů a clonek



Graf 8.6: Hodnoty tlaků u scintilátoru uvedených clonek s deflektory

9 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá návrhem scintilačního detektoru s jednou clonkou. Řeší a simuluje chování různých velikostí a tvarů clonek a jejich deflektorů.

V úvodu práce byl uveden stručný historický úvod do světa mikroskopie. Dále byly uvedeny hlavní části skenovacího mikroskopu SEM a ESEM s větším zaměřením přímo na scintilační detektor sekundárních elektronů, jehož clonku budeme řešit v diplomové práci.

V projektu je také popsáno proudění tekutin jak za normálních tlaků, kde se převážně objevuje proudění laminární a turbulentní, tak i v prostředí vakua, kde dochází ke změně na proudění molekulární a efúzní. Jsou uvedeny zákony zachování hmoty, hybnosti a energie, které matematicky popisují chování proudění tekutin.

Dále je uveden popis použitého softwaru SolidWorks a SolidWorks FlowSimulation, který je použitý při řešení práce. Jsou uvedeny možnosti a některé funkce programu, které se vztahují k problému. Popsán je návrh výpočetní sítě a způsob řešení simulace toků pomocí tohoto softwaru.

Kapitola 7 se zabývá prvními návrhy detektoru s jednou clonkou, které se opírají o již existující mikroskop se dvěma clonkami. Byla navržena clonka tvaru síťky s kuželovitým deflektorem. Hlavním přínosem této kapitoly je porovnání druhu odsávání u scintilátoru. Simulace ukazuje výhodnější výsledky bočního sání oproti sání zadnímu.

Boční sání je dále využito v kapitole 8, kde jsou porovnány různé velikosti otvorů clonek. Ve skutečnosti bylo provedeno několik návrhů, v diplomové práci jsou však prezentovány ty zásadní typy. Simulace ukázala dle předpokladu nižší tlak u scintilátoru při použití clonky s menším průměrem 0,6 mm, než při použití clonky s otvorem 0,8 mm. Zajímavé je, že clonka s vyšším průměrem (0,8 mm) má nižší hodnotu průměrného tlaku na dráze sekundárních elektronů, než užší clonka. To je způsobeno vyšším nadzvukovým prouděním, kde v oblasti velkých rychlostí dochází ke snížení tlaku. Hodnoty jsou shrnuty v tab. 8.1. Další návrhy byly zaměřeny na tvar deflektoru. Z těchto porovnání dosahuje nejlepších výsledků „kulovitý“ deflektor, viz obr. 8.9. Nejdůležitější čísla jsou shrnuta v tabulce 8.2, kde hodnoty tlaku u scintilátoru dosahují 2,35 Pa a jeho průměrná hodnota je 455,2 Pa. Porovnání tlaků u scintilátoru uvedených návrhů shrnuje graf 8.6 a graf 8.5 shrnuje porovnání průměrných hodnot tlaků. Celkový pohled do detektoru s „kulovitým“ deflektorem ilustrují obrázky 8.11 a 8.13. Nevýhodou tohoto deflektoru je konstrukční složitost oproti ostatním navrhovaným.

V našem případě jsme ověřili velký přínos simulačních programů, jako je SolidWorks FlowSimulation, které jsou velmi nápomocné při návrhu nových řešení.

Navrhovaný prototyp můžeme nejdříve otestovat v programu, který pracuje se zadaným modelem. Jakmile vyhovuje simulaci, můžeme daný projekt zrealizovat a, pokud je to možné, vyzkoušet na reálném modelu.

V příloze 1 je uvedena celková tabulka naměřených hodnot z kap. 8 pro doplnění informací.

Zkratky

BE – backscattered electron (zpětně odražené)

CAD – computer aided design (počítačová podpora návrhu)

CAE – computer aided engineering (počítačová podpora inženýrských prací)

CFD – computational fluid dynamic (počítačová dynamika tekutin)

EDS – energy dispersive spectroscopy (energieově disperzní spektrum)

EREM – enviromentální rastrovací elektronový mikroskop

ESEM – environmental scanning electron microscope (enviromentální skenovací elektronový mikroskop)

PMT – photo multiplier tube (fotonásobič)

SE – secondary electrons (sekundární elektrony)

SEM – scanning electron microscope (skenovací elektronový mikroskop)

TEM – transmission electron microscopy (transmisní elektronový mikroskop)

Seznam použitých veličin

a	[ms ⁻²]	zrychlení
c	[ms ⁻¹]	rychlost světla
d	[m]	průměr potrubí
e	[C]	náboj elektronu
E	[eV]	výstupní energie
F	[N]	síla
g	[ms ⁻²]	gravitační zrychlení
h	[J]	ztrátový činitel
h ₁ , h ₂	[m]	polohové výšky
k	[JK ⁻¹]	Boltzmannova konstanta
m	[kg]	hmotnost
N	[-]	počet částic
n	[mol]	látkové množství
p, p ₁ , p ₂	[Pa]	tlak
R	[JK ⁻¹ mol ⁻¹]	molární plynová konstanta
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
R _{mikroskopu}	[mm]	rozišení mikroskopu
R _{oka}	[mm]	rozišení oka
t	[s]	čas
T	[K]	termodynamická teplota
V	[m ³]	objem
v, v _x , u _x	[ms ⁻¹]	rychlost
V _m	[m ³ mol ⁻¹]	molární objem
x, y, z	[m]	dráha ve směru os
Z	[-]	užitečné zvětšení
α	[-]	Coriolisovo číslo
η	[Nsm ⁻²]	dynamická viskozita
ν	[m ² s ⁻¹]	kinematická viskozita
ρ	[kg m ⁻³]	hustota tekutiny

Literatura

- [1] BAKKER, André. *The Colorful Fluid Mixing Gallery* [online]. 2012 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://bakker.org/>
- [2] BS SOLID WORKS. *Solving Engineering Tasks: SolidWorks Flow Simulation 2013*. Waltham, Massachusetts, USA, 2013.
- [3] *Citace.com* [online]. 2011 [cit. 2013-11-19]. Dostupné z: www.citace.com
- [4] *Elektronová mikroskopie* [online]. 1999 [cit. 2013-11-14]. Dostupné z: http://www.paru.cas.cz/lem/bak/1_1.htm
- [5] *Elektronová mikroskopie pro biology* [online]. 2001 [cit. 2013-11-14]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/1.0.html>
- [6] *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 - 2013 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [7] HAFNER, Bob. *Energy Dispersive Spectroscopy on the SEM: A Primer*. Minnesota, 2007. Dostupné z: http://www.charfac.umn.edu/instruments/eds_on_sem_primer.pdf. Skriptum. University of Minnesota.
- [8] HAVLÍČEK, Svatopluk, Josef JIRÁK a Zdenka ROZSÍVALOVÁ. *Diagnostika a zkušebnictví*. Brno, 2002. Skriptum. VUT.
- [9] JANALÍK, Jaroslav. *HYDRODYNAMIKA A HYDRODYNAMICKÉ STROJE*. Ostrava, 2008. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-HYDRODYNAMIKA_A_HYDRODYNAMICKÉ_STROJE.pdf. Skriptum. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [10] JANDORA, Jan, Vlastimil STARA a Miloš STARÝ. *Hydraulika a hydrologie*. Brno: CERM, 2011, 186 s. ISBN 978-80-7204-739-0.
- [11] JAŠEK, M. *Analýza komory diferenciálního čerpání EREM pomocí systému Cosmos Floworks-diplomová práce*. Brno, 2009. 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Maxa, Ph.D, FEKT VUT v Brně
- [12] MAXA, Jiří. *Analýza proudění plynu v zařízeních elektronového mikroskopu*. Brno, 19.7.2008. Habilitační práce. Univerzita obrany.
- [13] *Scintilační detektory* [online]. České Budějovice 2002, 2012 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Scintilacni%20detektory.pdf>

Seznam příloh

Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot

Příloha 2: CD s elektronickou verzí diplomové práce