



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## VLIV ÚHLU DÝZY NA ROZLOŽENÍ TLAKU PLYNU V DÝZE PODLE PRANDTLOVY TEORIE

INFLUENCE OF NOZZLE ANGLE ON GAS PRESSURE DISTRIBUTION IN THE NOZZLE ACCORDING TO PRANDTL'S THEORY

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petra Dostalová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavla Šabacká

BRNO 2022

# Diplomová práce

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

Ústav elektrotechnologie

**Studentka:** Bc. Petra Dostalová

**ID:** 186111

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vliv úhlu dýzy na rozložení tlaku plynu v dýze podle Prandtlovy teorie

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s problematikou čerpání diferenciallyně čerpané komory v environmentálním rastrovacím elektronovém mikroskopu. Nastudujte problematiku řízeného proudění plynu v dýze při kritickém proudění v režimu nadzvukového proudu a jeho vliv na průchod elektronového svazku. Zjistěte vliv úhlu dýzy na rozložení tlaku plynu v dýze podle Prandtlovy teorie a připravte model dýzy v daných variantách úhlu s ohledem na její použití v experimentální komoře čerpání.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

<https://www.transformacni-technologie.cz/>

Škorpík, J. Proudění plynů a par tryskami, Transformační technologie. Brno, 2006.

Dejč, M. J. Technická dynamika plynů. SNTL, 1967

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 25.5.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Pavla Šabacká

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá problematikou rozložení tlaku v dýze při čerpání diferencially čerpané komory environmentálního elektronového mikroskopu a vhodného návrhu této dýzy s ohledem na Prandtlovu teorii.

V teoretické části je popsána mikroskopie obecně. Poté se práce zabývá konkrétně environmentální rastrovací elektronovou mikroskopií s problematikou jejího vakuového systému, výpočetními programy a studií, ze které práce vychází.

## **Klíčová slova**

Elektronová mikroskopie, environmentální rastrovací elektronový mikroskop, Ansys Fluent, diferencially čerpaná komora, statický tlak, Lavalova dýza

## **Abstract**

The thesis is focused on issue pressure distribution in the nozzle while pumping the differential pumped chambre of an environmental scanning microscope. The main task of the thesis is to find suitable design of this nozzle respect to Prandtl's theory.

In the theoretical part, there are presented microscopy as science. Afterwards the thesis is focused on environmental scanning electron microscopy and its problem and vacuum system, computer program used for preparation of simulation and study that the experimental part is based on.

## **Keywords**

Electron microscopy, Environmental scanning electron microscope, Ansys Fluent, Differentially pumped chambre, Static pressure, Laval nozzle

## **Bibliografická citace**

DOSTALOVÁ, Petra. *Vliv úhlu dýzy na rozložení tlaku plynu v dýze podle Prandtlovy teorie* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134405>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Pavla Šabacká.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Petra Dostalová</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>186111</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Diplomová práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2021/22</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Vliv úhlu dýzy na rozložení tlaku plynu v dýze podle Prandtlovy teorie

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí závěrečné 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 autorka uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma 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: 25. května 2022

-----  
podpis autora

*Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Pavle Šabacké za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Mé poděkování patří také panu doc. Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D. za odborné konzultace a spolupráci při řešení problému mé diplomové práce.*

V Brně dne: 20. května 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE .....</b>	<b>12</b>
1.1 HISTORIE ELEKTRONOVÉ MIKROSKOPIE .....	12
1.2 ROZDĚLENÍ MIKROSKOPŮ .....	13
1.3 ZDROJE ELEKTRONŮ .....	13
<b>2. ROZDĚLENÍ ELEKTROOVÝCH MIKROSKOPŮ .....</b>	<b>14</b>
2.1 TRANSMISNÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP .....	14
2.2 RASTROVACÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP .....	16
<b>3. ENVIRONMENTÁLNÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP (EREM) .....</b>	<b>18</b>
3.1 VAKUOVÝ SYSTÉM ENVIRONMENTÁLNÍHO ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU .....	18
<b>4. DANILATOS, STATISTICKÁ METODA MONTE CARLO .....</b>	<b>20</b>
4.1 DR. DANILÁTOS .....	20
4.2 METODA MONTE CARLO .....	20
4.3 MECHANIKA KONTINUA .....	21
4.4 SROVNÁNÍ METOD MONTE CARLO A MECHANIKY KONTINUA .....	21
<b>5. KRITICKÉ PROUDĚNÍ .....</b>	<b>23</b>
5.1 MACHOVO ČÍSLO .....	25
5.2 HUGONIOTŮV TEORÉM .....	25
5.2.1 $M < 1$ – Podzvukové proudění .....	26
5.2.2 $M = 1$ - Proudění rychlostí zvuku .....	26
5.2.3 $M > 1$ – Nadzvukové proudění .....	26
<b>6. SYSTÉMY POUŽITÉ PRO ŘEŠENÍ PROBLÉMU .....</b>	<b>27</b>
6.1 SOLID WORKS .....	27
6.2 ANSYS FLUENT .....	27
<b>7. EXPERIMENTÁLNÍ KOMORA .....</b>	<b>29</b>
7.1 EXPERIMENTÁLNÍ KOMORA ENVIRONMENTÁLNÍHO ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU .....	29
7.2 LAVALOVA TRYSKA .....	31
7.2.1 <i>Ideální tvar rozšiřující se Lavalovy dýzy</i> .....	32
7.2.2 <i>Lineární tvar Lavalovy dýzy</i> .....	33
7.2.3 <i>Bellova tryska</i> .....	34
<b>8. LAVALOVA DÝZA PRO SNÍMÁNÍ STATICKÉHO TLAKU POMOCÍ PRANDTLOVY TEORIE .....</b>	<b>35</b>
8.1 POUŽITÝ TVAR LAVALOVY DÝZY .....	35
8.2 NÁVRH ROZMĚRŮ POUŽITÉ DÝZY .....	36
8.2.1 <i>Výpočet rychlosti</i> .....	37
8.2.2 <i>Výpočet hustoty plynu</i> .....	37
8.2.3 <i>Výpočet teploty</i> .....	38

8.2.4	Výpočtový průřez .....	38
8.3	TEORIE V OBLASTI KONSTRUKCE CLONY V EREM.....	38
8.3.1	Zužující se clona .....	39
<b>9.</b>	<b>SIMULACE PROUDĚNÍ V LAVALOVĚ DÝZE.....</b>	<b>41</b>
9.1	MACHOVO ČÍSLO.....	41
9.2	STATICÝ TLAK .....	43
9.3	ROZLOŽENÍ HUSTOTY .....	45
9.4	ROZLOŽENÍ TEPLoty.....	47
9.5	ROZPTYL ELEKTRONŮ .....	49
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>51</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>52</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>54</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	První elektronový mikroskop [21].....	12
Obrázek 2	Porovnání TEM a SEM .....	14
Obrázek 3	Excitační objem.....	17
Obrázek 4	Vakuový systém environmentálního elektronového mikroskopu.....	19
Obrázek 5:	Srovnání výsledků simulací obou metod pro rozložení tlaku.....	21
Obrázek 6	Srovnání výsledků simulace teploty obou metod .....	22
Obrázek 7	Srovnání výsledků simulace rychlosti obou metod .....	22
Obrázek 8	Vliv kritického proudění [14].....	23
Obrázek 9	Kritický tlakový poměr .....	24
Obrázek 10	Kritické proudění.....	24
Obrázek 11	Celkový pohled a průřez diferenciálně čerpanou komorou .....	30
Obrázek 12	Popis diferenciálně čerpané komory .....	30
Obrázek 13	Nastavení okrajových podmínek pro simulace .....	30
Obrázek 14	Lavalova konvergentně-divergentní tryska .....	32
Obrázek 15	Nadzvukový výtok plynu z Lavalovy trysky .....	32
Obrázek 16	Ideální tvar rozšiřující se Lavalovy trysky .....	33
Obrázek 17	Lineární tvar Lavalovy trysky .....	33
Obrázek 18	Bellova tryska.....	34
Obrázek 19	Snímané body .....	35
Obrázek 20	Parametry clony pro tok Argonu z komory o 1000 Pa do prostoru vakua.....	39
Obrázek 21	Normalizovaná hustota částic v závislosti na délce clony a rozevření clony .....	40
Obrázek 22	Zkoumaná dráha .....	41
Obrázek 23	Průběh Machova čísla na dráze primárního svazku elektronů.....	42
Obrázek 24	Rozložení Machova čísla pro verzi rozevření dýzy 8° .....	42
Obrázek 25	Rozložení Machova čísla pro variantu rozevření dýzy 12° .....	43
Obrázek 26	Rozložení Machova čísla pro variantu rozevření dýzy 18° .....	43
Obrázek 27	Průběh statického tlaku na dráze primárního svazku elektronů.....	44
Obrázek 28	Rozložení statické tlaku pro variantu rozevření dýzy 8° .....	44
Obrázek 29	Rozložení statického tlaku pro variantu rozevření dýzy 12° .....	45



Obrázek 30 Rozložení statického tlaku pro variantu rozevření dýzy 18° .....	45
Obrázek 31 Průběh hustoty v závislosti na dráze primárního svazku elektronů .....	46
Obrázek 32 Rozložení hustoty pro variantu rozevření dýzy 8° .....	46
Obrázek 33 Rozložení hustoty pro variantu rozevření dýzy 12° .....	47
Obrázek 34 Rozložení hustoty pro variantu rozevření dýzy 18° .....	47
Obrázek 35 Rozložení teploty na dráze primárního svazku elektronů .....	48
Obrázek 36 Rozložení teploty pro variantu rozevření dýzy 8° .....	48
Obrázek 37 Rozložení teploty pro variantu rozevření dýzy 12° .....	49
Obrázek 38 Rozložení teploty pro variantu rozevření dýzy 18° .....	49
Obrázek 39 Pravděpodobnost disperze elektronů .....	50
Obrázek 40 Varianta rozevření dýzy 8° .....	55
Obrázek 41 Varianta rozevření dýzy 10° .....	55
Obrázek 42 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12° .....	56
Obrázek 43 Varianta rozevření dýzy 12° .....	56
Obrázek 44 Varianta rozevření dýzy 14° .....	57
Obrázek 45 Varianta rozevření dýzy 16° .....	57
Obrázek 46 Varianta rozevření dýzy 18° .....	58
Obrázek 47 Varianta rozevření dýzy 8° .....	58
Obrázek 48 Varianta rozevření dýzy 10° .....	59
Obrázek 49 Varianta rozložení zkrácené dýzy 12° .....	59
Obrázek 50 Varianta rozevření dýzy 12° .....	60
Obrázek 51 Varianta rozevření dýzy 14° .....	60
Obrázek 52 Varianta rozevření dýzy 16° .....	61
Obrázek 53 Varianta rozevření dýzy 18° .....	61
Obrázek 54 Varianta rozevření dýzy 8° .....	62
Obrázek 55 Varianta rozevření dýzy 8° .....	62
Obrázek 56 Varianta rozevření dýzy 10° .....	63
Obrázek 57 Varianta rozevření dýzy 10° .....	63
Obrázek 58 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12° .....	64
Obrázek 59 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12° .....	64
Obrázek 60 Varianta rozevření dýzy 12° .....	65
Obrázek 61 Varianta rozevření dýzy 12° .....	65
Obrázek 62 Varianta rozevření dýzy 14° .....	66
Obrázek 63 Varianta rozevření dýzy 14° .....	66
Obrázek 64 Varianta rozevření dýzy 16° .....	67
Obrázek 65 Varianta rozevření dýzy 16° .....	67
Obrázek 66 Varianta rozevření dýzy 18° .....	68
Obrázek 67 Varianta rozevření dýzy 18° .....	68
Obrázek 68 Varianta rozevření dýzy 8° .....	69
Obrázek 69 Varianta rozevření dýzy 10° .....	69
Obrázek 70 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12° .....	70
Obrázek 71 Varianta rozevření dýzy 12° .....	70
Obrázek 72 Varianta rozevření dýzy 14° .....	71
Obrázek 73 Varianta rozevření dýzy 16° .....	71
Obrázek 74 Varianta rozevření dýzy 18° .....	72
Obrázek 75 Varianta rozevření dýzy 8° .....	72
Obrázek 76 Varianta rozevření dýzy 10° .....	73
Obrázek 77 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12° .....	73

Obrázek 78 Varianta rozevření dýzy 12° .....	74
Obrázek 79 Varianta rozevření dýzy 14° .....	74
Obrázek 80 Varianta rozevření dýzy 16° .....	75
Obrázek 81 Varianta rozevření dýzy 18° .....	75
Obrázek 82 Varianta rozevření dýzy 8° .....	76
Obrázek 83 Varianta rozevření dýzy 10° .....	76
Obrázek 84 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12° .....	77
Obrázek 85 Varianta rozevření dýzy 12° .....	77
Obrázek 86 Varianta rozevření dýzy 14° .....	78
Obrázek 87 Varianta rozevření dýzy 16° .....	78
Obrázek 88 Varianta rozevření dýzy 18° .....	79
Obrázek 89 Varianta rozevření dýzy 8° .....	79
Obrázek 90 Varianta rozevření dýzy 10° .....	80
Obrázek 91 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12° .....	80
Obrázek 92 Varianta rozevření dýzy 12° .....	81
Obrázek 93 Varianta rozevření dýzy 14° .....	81
Obrázek 94 Varianta rozevření dýzy 16° .....	82
Obrázek 95 Varianta rozevření dýzy 18° .....	82
Obrázek 96 Varianta rozevření dýzy 8° .....	83
Obrázek 97 Varianta rozevření dýzy 10° .....	83
Obrázek 98 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12° .....	84
Obrázek 99 Varianta rozevření dýzy 12° .....	84
Obrázek 100 Varianta rozevření dýzy 14° .....	85
Obrázek 101 Varianta rozevření dýzy 16° .....	85
Obrázek 102 Varianta rozevření dýzy 18° .....	86
Obrázek 103 Varianta rozevření dýzy 8° .....	86
Obrázek 104 Varianta rozevření dýzy 10° .....	86
Obrázek 105 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12° .....	87
Obrázek 106 Varianta rozevření dýzy 12° .....	87
Obrázek 107 Varianta rozevření dýzy 14° .....	87
Obrázek 108 Varianta rozevření dýzy 16° .....	88
Obrázek 109 Varianta rozevření dýzy 18° .....	88

# ÚVOD

V dnešní době, kdy nám jsou dostupné technologie a technické možnosti, které byly v minulosti nebyly, je velké úsilí hlouběji porozumět nejrůznějším předmětům a materiálům, a to s vidinou jejich poznání i možného budoucího vylepšení. Z tohoto důvodu se začaly rozvíjet nejen optické mikroskopy, které byly vynalezeny dříve, ale protože to nestačilo k dostatečnému poznání, vývoj vedl k sestrojení elektronového mikroskopu, který nám poskytuje mnohem větší možnosti.

Elektronový mikroskop poskytuje více informací než mikroskop optický. Jeho nevýhoda ovšem spočívá v omezení, které se týká zkoumaného vzorku. Vzorky musí být pro možnost pozorování elektronovým mikroskopem uloženy ve vakuu. Tyto problémy vyřešil vynález environmentálního elektronového mikroskopu, který je jedinečný svým vakuovým systémem, díky kterému není podmínkou tlak o hodnotách vakua v komoře se vzorkem. Toto řešení má sice i jistou technickou náročnost, kterou je do určité míry možné zjednodušit.

Tato diplomová práce se zabývá analýzou proudění plynu v experimentální komoře environmentálního elektronového mikroskopu, která je vyvíjena na Ústavu elektrotechnologie FEKT VUT Brno ve spolupráci s Ústavem přístrojové techniky AVČR. Práce je zaměřena na návrh dýzy oddělující diferenciallyně čerpanou komoru a komoru vzorku, ve které je nutno uvažovat nadzvukové proudění a kritický tlak. Tato studie navázala na studii návrhu dýzy s požadavkem na konstrukci tak, aby bylo možné snímat statický tlak v dýze za předpokladu použití Prandtlovy teorie a řeší chování nadzvukového proudění plynu v závislosti na úhlu rozevření dýzy a její délky. Výsledky jsou posuzovány s ohledem na předpokládaný rozptyl elektronů v ose proudění, která je v praxi drahou primárního svazku elektronů procházející komorou.

V systému SolidWorks byl vymodelován 3D objemový model dané experimentální komory environmentálního elektronového mikroskopu. Pro simulace proudění a rozložení tlaku byl využit a systém Ansys Fluent.

# 1. ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE

Díky elektronové mikroskopii je umožněno studium mikrostruktury zkoumaných objektů. Struktura pozorovaných vzorků je zkoumána pomocí elektronového svazku, který je fokusován magnetickým nebo elektromagnetickým polem tvořenými soustavami cívek. Elektronová mikroskopie nám umožňuje pozorovat povrch materiálu, jeho struktura a také je možné udělat jeho prvkovou analýzu [1].

## 1.1 Historie elektronové mikroskopie

K průlommu, který vedl k vynálezu elektronového mikroskopu došlo v roce 1897, kdy J.J Thompson objevil elektron. Další důležitý objev nastal v roce 1925, když Luis de Broglie přišel s tvrzením, že rychle letící částice mají nejen korpuskulární, ale taktéž vlnový charakter jako např. viditelné světlo. K vynaleznutí elektronového mikroskopu bylo ale za potřebí mnoha dalších poznatků a objevů různých badatelů a vědců [1].

První prototyp elektronového mikroskopu byl zkonstruován v roce 1931 inženýry Ruskodem a Knollomem na Vysoké škole technické v Berlíně a o osm let později byla zahájena komerční výroba transmisních elektronových mikroskopů firmou Siemens a Halske, jejichž rozlišovací schopnost mikroskopu byla garantována na 10 nm [1].

## Ruska-Knoll Microscope



1906–1988



1897-1961



Obrázek 1 První elektronový mikroskop [21]

## 1.2 Rozdělení mikroskopů

Mikroskopy se dělí dle metody zobrazování na optické a elektronové. Optický mikroskop tvoří optická část zajišťující vznik a promítnutí obrazu, mechanická část a tubus, jehož účelem je chránit optickou část. Základem optické části jsou čočky, které tvoří objektiv a okulár. Optický mikroskop používá světelné záření, které vlnovou délkou ovlivňuje rozlišení mikroskopu, toto rozlišení se obecně pohybuje okolo 0,0002 mm a maximální užitečné zvětšení s kvalitní optikou nepřesáhne hodnotu 1 500x. U elektronového mikroskopu nejsou použity optické čočky, namísto nich se používají čočky elektromagnetické. Pro zkoumání objektu se u elektronového mikroskopu místo fotonů využívají elektrony [2]. U elektronových mikroskopů můžeme dosáhnout hodnot zvětšení až 1 000 000x, což je zaručeno tím, že vlnové délky urychlených elektronů jsou mnohem nižší, než je hodnota vlnové délky fotonu a díky tomu můžeme dosáhnout i větší rozlišovací schopnosti [1], [2].

Hlavní nevýhodou elektronového mikroskopu oproti světelnému tkví v nutnosti vakua v celém mikroskopu – jak v případě elektronové trysky, kde by mohlo dojít k ionizaci vzduchu a následnému elektrickému výboji mezi katodou a anodou elektronové trysky, tak i v tubusu a v komoře vzorku, kde by mohlo dojít ke kontaminaci molekulami plynu, které by výrazně zkreslovaly výsledek.

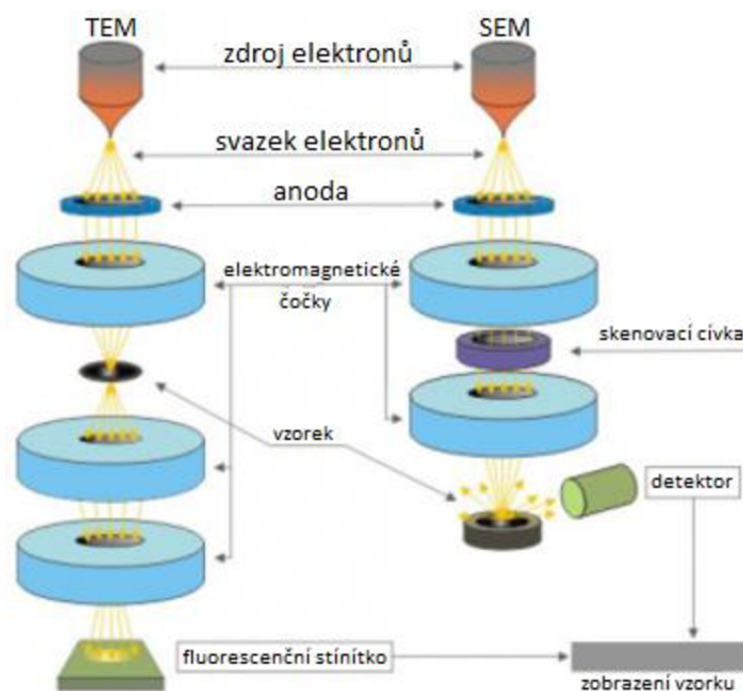
Dosažení pracovního vakua, které se pohybuje v rozmezí  $10^{-3}$  až  $10^{-5}$  Pa, je umožněno díky vakuovému systému elektronového mikroskopu obsahujícímu různé druhy vývěv. Pro základní předčerpání se používá rotační olejová vývěva, díky které je možno dosáhnout tlaku  $10^{-1}$  Pa. Jakmile se dosáhne tohoto tlaku, zapne se difúzní vývěva čerpající až do tlaku  $10^{-3}$  Pa a potřebný tlak až  $10^{-7}$  Pa, který je potřebný obzvláště pro prostor elektronové trysky, je dosažen díky iontové vývěvě (IGP).

## 1.3 Zdroje elektronů

Pro funkci elektronového mikroskopu je nejdůležitější částí zdroj elektronů nazývaný jako elektronová tryska nebo elektronové dělo. Tento mechanismus je založen na emisi elektronu z atomu, který je v něm vázán určitou energií  $E_v$ . Aby k emisi došlo, musí být elektronu dodána energie větší než ta, kterou je vázán. Nejpoužívanějšími druhy emise jsou termoemise a autoemise. Při termoemisi dochází ke žhavení vlákna, které slouží jako katoda, dokud nedojde k překročení tzv. mezní teploty, čímž jsou uvolněny elektrony. U autoemisních zdrojů je naproti kovovému vláknu ve tvaru hrotu umístěna elektroda o vysokém kladném napětí, které je schopno „vytrhávat“ elektrony z

## 2. ROZDĚLENÍ ELEKTROOVÝCH MIKROSKOPŮ

Elektronové mikroskopy jsou rozděleny na dva základní druhy, které můžeme vidět na obrázku č. 2. a to podle způsobu využití elektronového svazku. Prvním z nich je transmisní elektronový mikroskop (TEM – z angl. transmission electron microscope), kde jsou ke zpracování obrazu využity elektrony, které projdou vzorkem a poskytují tak informaci o vnitřní struktuře tohoto vzorku. Druhým typem je rastrovací elektronový mikroskop (SEM z angl. Scanning electron microscope), u kterého je ke zpracování obrazu využíváno elektronů odražených od povrchu zkoumaného objektu a slouží tedy hlavně ke zkoumání povrchu vzorku [2].



Obrázek 2 Porovnání TEM a SEM

### 2.1 Transmisní elektronový mikroskop

První transmisní elektronový mikroskop byl sestaven kolem roku 1930 týmem vedeným M. Knollem a E. Ruskou na Vysoké škole v Berlíně. U tohoto typu elektronového mikroskopu pro získání výsledného obrazu jsou využívány elektrony, které projdou vzorkem a poskytují nám informaci o vnitřní struktuře vzorku [1].

Pro pochopení funkce TEM, jej konstrukčně porovnáme se světelným mikroskopem. Světelný zdroj je zde nahrazen elektronovým dělem, místo skleněných čoček jsou zde čočky elektromagnetické a okulár zde nahrazuje fluorescenční stínítko. Ohniskovou vzdálenost u elektromagnetických čoček můžeme nastavit velikostí proudu procházejícího cívkou. TEM pro svou činnost vyžaduje vakuum. Je to z toho důvodu, aby

v prostoru, ve kterém procházejí elektrony, nemohlo dojít ke kontaminaci tubusu a vzorku molekulami vzduchu a také proto, že elektron by byl ve vzduchu absorbován. Výsledný obraz zkoumaného předmětu můžeme pozorovat pomocí fluorescenčního stínítka přes okno v projekční komoře, nebo pomocí CCD kamery [3].

Výhodou TEM je velké zvětšení, ale je potřeba vzorek speciálně připravit. Tloušťka pozorovaného vzorku může být v závislosti na materiálu a energii elektronu 0,1 až 5  $\mu\text{m}$ . Jeho průměr musí být uzpůsoben držáku vzorku – tzv. holderu a musí také být zbaven veškeré vody [4].

Základními částmi transmisního elektronového mikroskopu je tubus s elektronovou optikou, vakuový systém, elektronika a software.

Zkoumaný vzorek je do mikroskopu vkládán ve formě tenké folie, která je ozařována elektrony. Při dopadu elektronu na pozorovaný vzorek dochází k více druhům interakcí. Většina elektronů projde vzorkem. Tyto prošlé elektrony interagují se vzorkem buď pružně či nepružně. V případě pružné interakce si se vzorkem vymění minimální kinetickou energii a dojde pouze ke změně směru letícího elektronu s tím, že toto odchylení od původního směru je tím větší, čím blíže kolem jádra atomu elektron prolétne. U nepružných interakcí dochází k elektronovým excitacím vlivem nepružně interagujících elektronů, jejich energie se výrazně snižuje a dochází i ke změně vlnové délky, což má za následek zhoršení chromatické aberace [4].

Tubus mikroskopu je složen z trysky, anody, clon, čoček, upevnění pro vzorek a zobrazovacího systému. Zdrojem elektronů je tryska. Poté je těmto elektronům v poli urychlovacího napětí mezi katodou a anodou dodána kinetická energie. Takto rychlený svazek elektronů je pak pro průchod vzorkem formován a směřován díky soustavě čoček a clon. Při průchodu vzorkem elektrony interagují s atomy vzorku a následně se vychýlené elektrony detekují na fluorescenčním stínítku, popřípadě na CCD kameře [4].

Na stínítku můžeme pozorovat obraz, který je tvořen pouze částí elektronů. Příliš vychýlené elektrony jsou zachyceny clonou objektivu a následně jsou vyřazeny. Fázový kontrast je způsoben elektrony, které jsou vychýleny pod různými úhly, což má za následek různé stupně šedi na zobrazení zkoumaného vzorku. Trvalý záznam vzorku může být zaznamenán na fotografický materiál, nebo v digitální formě pomocí CCD (SSC) kamery [4].

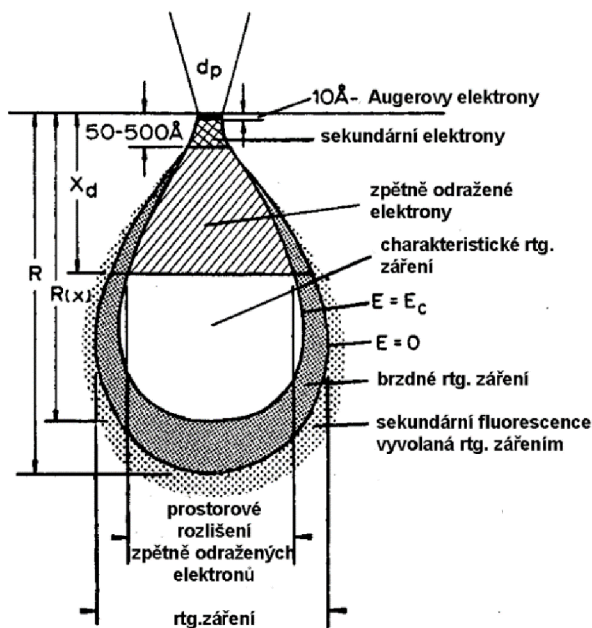
## 2.2 Rastrovací elektronový mikroskop

SEM se využívá pro pozorování povrchu zkoumaného objektu. Využívá se zejména pro sledování struktur pevných látek. I pro funkci tohoto typu elektronového mikroskopu je zapotřebí vakuum. Vzorky připravené k pozorování nemusí být ultratenké jako u TEM, jejich velikost je limitována pouze velikostí vakuové komory, a proto v nich můžeme pozorovat např. hmyz či jiné. V takovém případě je ovšem třeba vzorek speciálně upravit vrstvou vodivého materiálu. Do určité míry můžeme pozorovat analogii funkce SEM s optickým mikroskopem s dopadajícím světlem, ale s rozdílem v principu vytvoření výsledného obrazu [5].

Při zkoumání vzorku pomocí SEM, tenký svazek elektronů dopadá na povrch vzorku. Tento elektronový svazek je díky vychylovací soustavě směřován a postupně se posouvá na všechna místa vzorku. Po dopadu svazku elektronů o vysoké energii se některé z nich odrazí, případně může dojít k emisi sekundárních elektronů z povrchu vzorku. Vyhodnocením odražených a emitovaných elektronů se poté zobrazí požadovaná struktura na monitoru [6].

Pro vysvětlení principu SEM jej rozdělíme na tubus a komoru. V horní části tubusu je umístěna katoda, sloužící jako zdroj primárních elektronů. Při dopadu elektronů na vzorek dochází k interakcím mezi elektrony a vzorkem. Tyto interakce jsou pružné a nepružné. Energie primárních elektronů významně ovlivňuje excitační objem, což je oblast nacházející se pod povrchem vzorku, ze které se uvolňují jednotlivé signály. Čím je energie primárních elektronů nižší, tím mělčí a širší tato oblast je. Na velikost excitační oblasti se podílí i materiálové složení zkoumaného vzorku. Pokud bude ve vzorku obsaženo větší množství těžších kovů, tím více elektronů bude odraženo. Hloubka průniku primárních elektronů pak bude menší. V případě vzorku, který je složený z lehčích kovů, tomu bude naopak. Primární elektrony, které mají energii dostatečně velkou na to, aby pronikly pod povrch, se začnou pohybovat chaotickým způsobem. Tento pohyb poté napomáhá k vytvoření dalších signálů [1].





Obrázek 3 Excitační objem

Pomocí statistické metody simulace drah elektronů, která se nazývá metoda Monte-Carlo lze určit podmínky, za kterých signály vznikají. Tato metoda používá náhodná čísla a umožňuje přibližně popsat pohyb elektronů a jejich objem [1].

Pro SEM jsou důležité dva typy signálů, které se odrazí od povrchu. Jsou to zpětně odražené primární elektrony, které vznikají při pružných deformacích (BSE), a sekundární elektrony vznikající při nepružných interakcích primárních elektronů s elektronovým obalem (SE) [1].

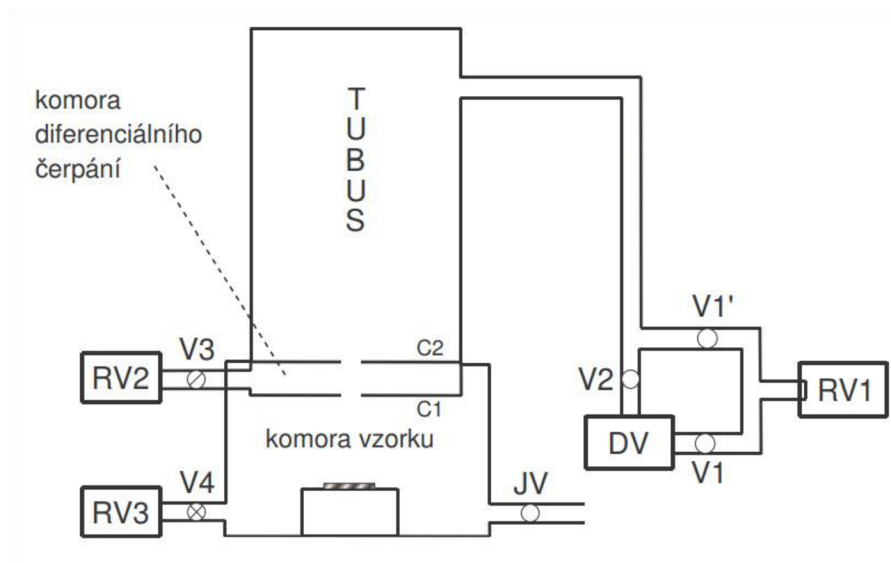
### **3. ENVIRONMENTÁLNÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP (EREM)**

Hlavní nevýhodou u běžného rastrovacího mikroskopu je možnost pozorování pouze čistých, suchých a elektricky nevodivých vzorků, které ovšem také musí vydržet ve vakuu. Jelikož jsou elektrony nabitě částice, nemohou procházet atmosférickým tlakem, neboť by docházelo k jejich srážkám s molekulami plynu. To je důvod, proč není možné pozorovat vlhké biologické vzorky v jejich přirozeném prostředí, neboť ve vakuu okamžitě vysychají.

Pro možnost pozorování i takovýchto biologických vzorků bylo v poslední době vyvinuto úsilí, které vedlo k vývoji environmentálního elektronového mikroskopu (EREM). Od běžného rastrovacího elektronového mikroskopu se EREM liší konstrukcí. Konkrétně je v tomto případě do konstrukce zavedena diferencially čerpaná komora o tlaku do cca 30 Pa, jejíž úkolem je oddělit prostor vakua od prostoru vzorku, ve kterém tak může být tlak až 2000 Pa.

#### **3.1 Vakuový systém environmentálního elektronového mikroskopu**

V komoře environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu (EREM) je studium vzorku při tlaku do 2000 Pa umožněno díky speciálně navrženému vakuovému systému, zobrazeného na obrázku č. 3, kde jsou jako RV označeny rotační vývěvy, DF vývěva difúzní, V1-V4 vakuové jehly, JV jehlový ventil a C1 s C2 tlak omezující clony. V tubusu ESEM je stejně jako u všech ostatních typů elektronových mikroskopů potřeba velmi vysoké vakuum a to až  $10^{-9}$  Pa při použití autoemisních trysek. Pokud by v tubusu nebylo dosaženo takového vakua, nebyla by umožněna správná funkce trysek. Během vytváření primárního svazku elektronů by mohl nastat situace minimálního rozptylu tohoto svazku. Vytváření vakua v tubusu je realizováno za pomoci předčerpání rotační vývěvou na úroveň vakua stanovenou požadavky na tuto úroveň, poté dochází k následnému čerpání pomocí difúzní vývěvy, kdy tlak v tubusu dosahuje hodnot řádově  $10^{-7}$  Pa, a nakonec můžeme dosáhnout tlaku v tubusu řádově  $10^{-9}$  Pa za pomoci turbomolekulární vývěvy [6][7].



Obrázek 4 Vakuový systém environmentálního elektronového mikroskopu

Aby bylo možné udržet velký rozdíl tlaků, je mezi komorou a tubusem zavedena diferenciální komora, která je čerpána samostatnou vývěvou a vytváří tak plynulý přechod mezi oblastmi s rozdílnými pracovními tlaky. K čerpání diferenciální komory se využívá rotační nebo turbomolekulární vývěva [8].

Vzhledem k tomu, že v komoře vzorku není potřebné tak velké vakuum, jako v tubusu, stačí pro její čerpání rotační vývěva. Jako pracovní plyn se zde využívá dusík, ale mohou se použít i vodní páry, aby nedocházelo k vysušení vzorku při nízkých tlacích.

## 4. DANILATOS, STATISTICKÁ METODA MONTE CARLO

### 4.1 Dr. Danilátos

Gerasimos D. Danilátos je řecko-australský fyzik a průkopník v oblasti environmentální elektronové mikroskopie. Narodil se roku 1946 v řecké Cefalonii. V důsledku zemětřesení se jeho rodina přestěhovala do Patrasu, kde žil až do dostudování střední školy. Získal fyzikální titul na Národní a Kapodistrijské univerzitě v Aténách. Poté v roce 1972 emigroval do Austrálie, kde za práci o Dynamických mechanických vlastnostech keratinových vláken, kterou dokončil v lednu roku 1978 na University of New Wales, získal titul Ph.D. Na téže univerzitě poté jako vědec vyvinul Environmentální skenovací elektronový mikroskop (ESEM) [9].

Dr. Danilátos pro své matematické studie pojednávající o proudění plynu při čerpání vakuových komor používá metodu Monte Carlo.

### 4.2 Metoda Monte Carlo

Monte Carlo je statistická numerická metoda, jejíž základem je vztah mezi pravděpodobností různých charakteristik náhodných procesů a proměnných, které jsou řešením dané úlohy. Základní myšlenka této metody spočívá v určení střední hodnoty veličiny, která je výsledkem náhodného děje. Pro získání výsledků je vytvořen počítačový model sledovaného děje a je zapotřebí dostatečné množství simulací, po jejichž proběhnutí se mohou výsledná data zpracovat klasickými statistickými metodami [10].

Pro dosažení efektivního a přesného výpočetního procesu pomocí metody Monte Carlo za užití výpočetní techniky je zapotřebí zaručit kvalitu generovaných náhodných čísel, správný výběr racionálního algoritmu výpočtu a kontrola přesnosti získaného výpočtu [10].

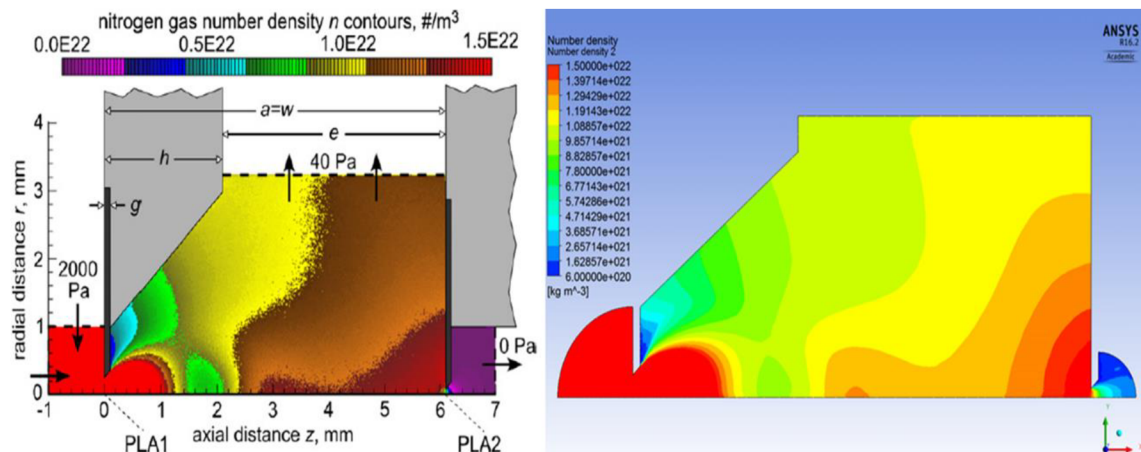
Statistická metoda Monte Carlo neklade základní požadavek na spojitě prostředí výpočetního prostoru, může tedy popisovat efekty nepopsatelné spojitou funkcí. Právě z důvodu absence spojitosti naopak může vracet špatné výsledky. Tato metoda je tedy vhodná pouze k výpočtu pohybu osamocených molekul, kde prostředí není kontinuum, jinými slovy tam, kde již neplatí Navier-Stokesovy rovnice. V takovém prostředí se jedná o velice nízké tlaky.

### 4.3 Mechanika kontinua

Využití Navier-Stokesovy rovnice je jednoznačnou výhodou tam, kde se jedná o spojité prostředí. Je to díky přesnému popsání spjitosti, neboť Navier-Stokesova rovnice se odvozuje od sil, které působí na jednotlivé části tekutiny, kterými jsou gravitace, tlak, tření o sousední části tekutiny nebo vznik turbulence. Stav tekutiny můžeme popsat její rychlostí a tlaky ve všech bodech, ve kterých se tekutina nachází. V kontinuu působí na každý element tekutiny dvě síly, kterými jsou objemová (jednodušší) a plošná (složitější), jejíž původcem jsou sousední elementy. Plošná síla je navíc složena ze dvou částí: první souvisí s tlakem a druhá se připisuje viskozitě - smyku povrchu jednotlivých elementů tekutiny povrchy o sebe (vnitřnímu tření) a je složitější na popis. Tím, že Navier-Stokesovy rovnice neřeší na rozdíl od metody Monte Carlo problém statisticky, ale přesným popisem složitého chování kapaliny, dokáží velice dobře bilancovat složitý proces kontinua [11].

### 4.4 Srovnání metod Monte Carlo a mechaniky kontinua

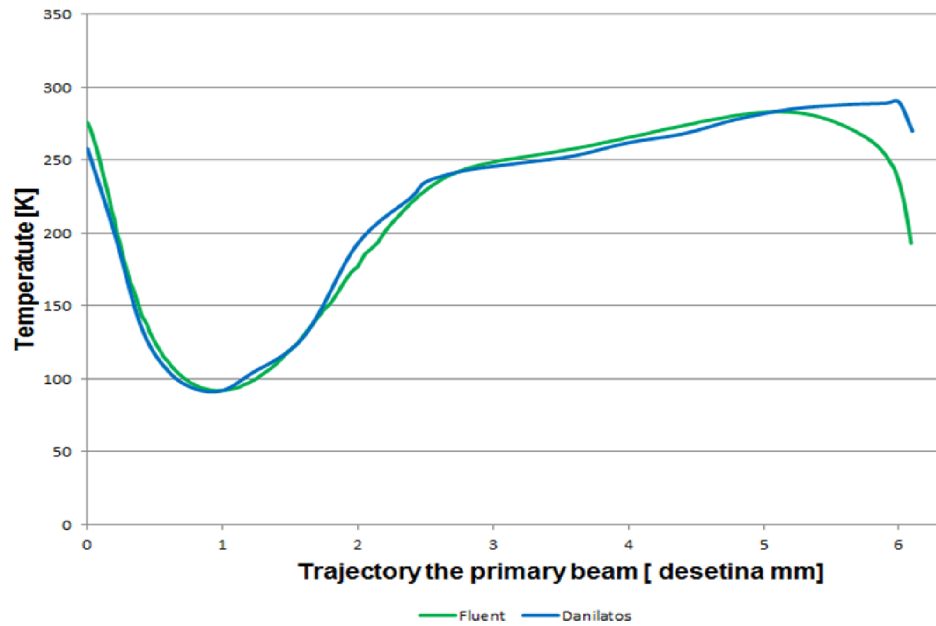
Srovnání výsledků studie čerpání diferencially čerpané komory pomocí statistické metody Monte Carlo, provedené Dr. Danilátem, a simulace metodou continua, provedené na ústavu Elektrotechnologie můžeme vidět na obrázku č. 6. Vlevo vidíme výsledky dosažené pomocí metody Monte Carlo, vpravo pak výsledky získané pomocí programu ANSYS Fluent [11].



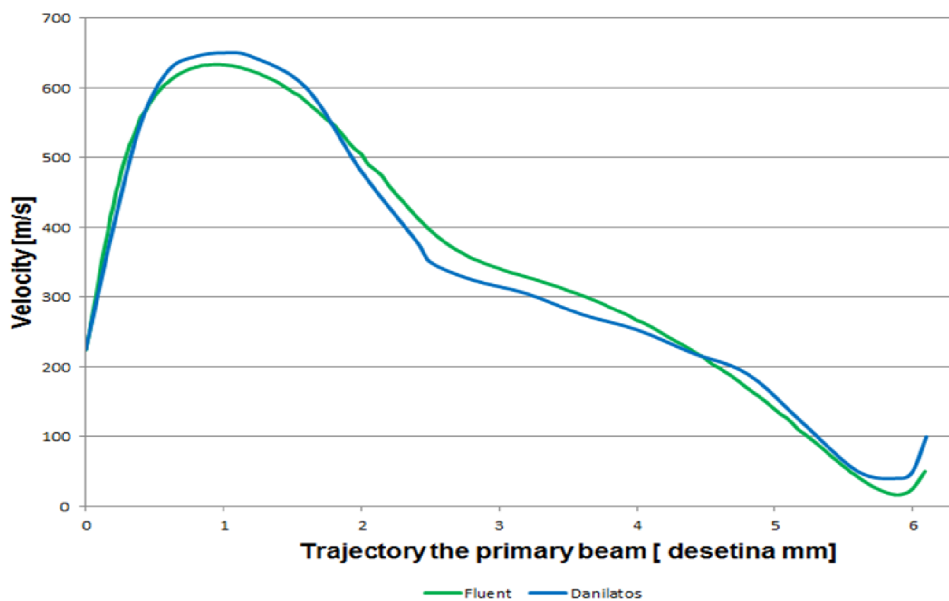
Obrázek 5: Srovnání výsledků simulací obou metod pro rozložení tlaku

Porovnáním těchto simulací, kdy byly obdrženy výsledky rozložení tlaku, lze tvrdit, že obě dvě metody dosahují srovnatelných výsledků.

Významnou shodu lze pozorovat i při porovnání hodnot obdržných simulacemi teploty a rychlosti primárního svazku v závislosti na dráze mezi dvěma clonami. Tyto průběhy jsou vyneseny do grafů na obrázku č.5 a č.6.



Obrázek 6 Srovnání výsledků simulace teploty obou metod

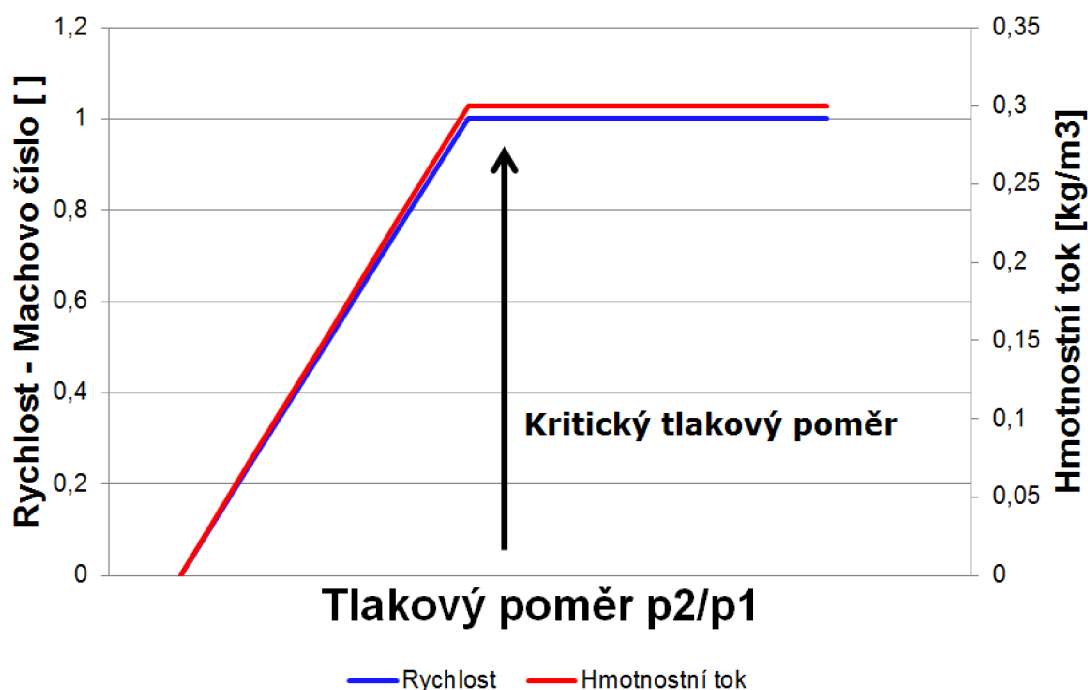


Obrázek 7 Srovnání výsledků simulace rychlosti obou metod

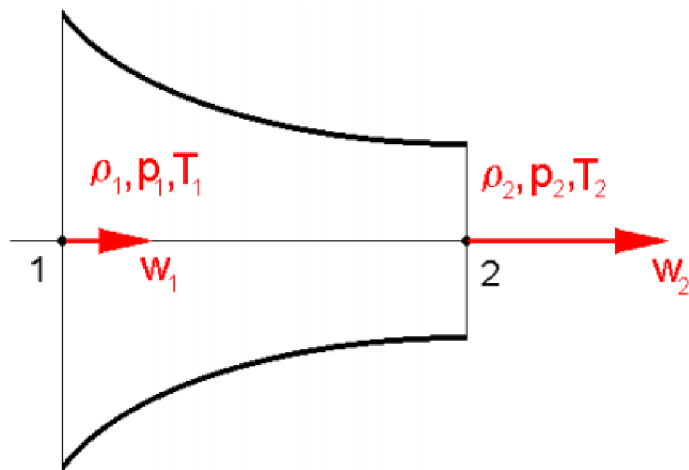
Vzhledem ke skutečnosti, že výsledky simulací obdržené metodou kontinua odpovídají výsledkům simulací obdržených statistickou metodou Monte Carlo, provedené Dr. Danilátem, je možné výsledky obdržené metodou kontinua považovat za relevantní a správné. Navíc, oproti metodě Monte Carlo, metoda spojitého prostředí mnohem lépe popisuje problematiku rázových vln a kritického proudění z důvodu jevů, které vychází z vlastností materiálů.

## 5. KRITICKÉ PROUDĚNÍ

Environmentální elektronový mikroskop je charakteristický svou konstrukcí, a to hlavně diferenciálně čerpanou komorou. Protože jsou komory od sebe oddělené malou clonkou s velkými tlakovými spády, musíme uvažovat tzv. kritické proudění. Takové proudění má své zvláštní fyzikální vlastnosti a vzniká za clonou, která odděluje dvě oblasti o velmi výrazném tlakovém spádu. Pokud tedy máme oblasti s rozdílnými tlaky, proudění probíhá z komory o vyšším tlaku do komory s nižším tlakem a ve clonce dochází k rychlému proudění. Ve clonce je rychlost proudění úměrně vzrůstající rozdílu tlaků na obou stranách clonky, tato úměra ovšem platí jen do chvíle, kdy rychlost proudění dosáhne hodnoty 1 Mach. V daný moment dojde k tzv. kritickému proudění, kdy rychlost proudění clonkou nemůže nabýt hodnot větších než právě 1 Mach. Překročení této hodnoty nedosáhneme ani dalším zvyšováním rozdílu tlaků na obou stranách clonky. Stejně tak platí, že clonkou za jednotku času nemůže projít větší množství plynu, než je množství, které clonkou prochází v momentě, kdy plyn ve clonce proudí rychlostí 1 Mach [12][14].



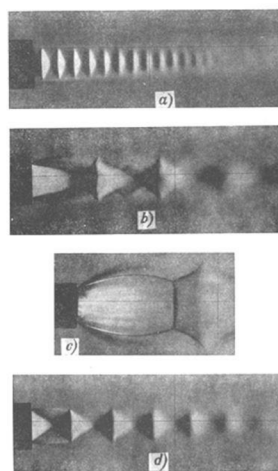
Obrázek 8 Vliv kritického proudění [14]



Obrázek 9 Kritický tlakový poměr

Za clonkou vzniká nadzvukové proudění, ve kterém se vyskytuje jistá oblast sníženého tlaku. Tato oblast za clonkou vzniká z toho důvodu, že clonkou může projít pouze takové množství plynu, které clonkou projde při rychlosti adekvátní rychlosti zvuku, jak již bylo popsáno. V této oblasti, kde je rychlost proudícího plynu nižší než hodnota rychlosti zvuku, vzniká rázová vlna – jedná se o velmi tenkou oblast se zvýšenou hustotou plynu.

Na obrázku č. 11 můžeme vidět tzv. Schlierenovy obrázky získané metodou optického lomu, ze kterých si lze všimnout oblasti nadzvukového proudění, vznikající za clonkou. Tato oblast je tedy oblastí se sníženým tlakem, znázorněná světlejší barvou a končící v místě, kde dochází k rázové vlně, která je zobrazena jako úzká tmavá oblast o vyšší hustotě plynu. Tyto Schlierenovy obrázky zobrazující proudící tok z osově symetrické zužující se trysky. V prvních dvou případech jde o slabé expanze, další dva případy znázorňují expanzi silnou [12] [13].



Obrázek 10 Kritické proudění



## 5.1 Machovo číslo

Důležitou veličinou, která se uvádí v případě proudění velmi vysokou rychlostí, je tzv. Machovo číslo. Jedná se o poměr rychlosti proudění v daném prostředí ku rychlosti zvuku v tom stejném prostředí [14].

$$M = \frac{v}{c} \tag{1}$$

Kde:

M [-] Machovo číslo;

v [ms<sup>-1</sup>] rychlost proudění;

c [ms<sup>-1</sup>] rychlost šíření zvuku v daném prostředí

Pokud v okolí vyšetřovaného bodu tekutiny má Machovo číslo hodnotu:

- menší než jedna, mluvíme o tzv. podzvukovém neboli subsonickém proudění,
- v rozmezí 0,8-1,3 čili v okolí čísla 1, jedná se o transonické proudění.
- právě jedna, mluvíme o zvukovém proudění
- větší než jedna, mluvíme o nadzvukovém proudění.

Za vysokou rychlost je považována taková rychlost, kdy je dosaženo takové hodnoty Machova čísla proudu tekutiny, při kterém pro danou aplikaci nelze tekutinu uvažovat za stlačitelnou. Zvuk je tlaková porucha šířící se stlačitelným prostředím rychlostí zvuku. Pokud je rychlost zdroje tlakové poruchy nebo proudění stlačitelného prostředí blízká rychlosti zvuku nebo vyšší, dochází k efektům narušující spojitost stlačitelného prostředí a místo šíření tlakové poruchy formou zvukových vln dochází k šíření formou tzv. rázových vln [18].

## 5.2 Hugoniotův teorém

Při proudění nadzvukových rychlostí v kanálech mohou vznikat rázové vlny. Vznik těchto rázových vln popisuje Hugoniotův teorém neboli charakteristická rovnice proudění stlačitelné látky je vztah poukazující na závislost mezi Machovým číslem a průtočným průřezem, kterým plyn proudí a popisuje tak rozdílné vlastnosti podzvukového a nadzvukového proudění při kompresi a expanzi.

Z Hugoniotova teorému je zřejmé, že je jediný možný způsob přechodu z nadzvukového proudění do proudění podzvukového a to postupným zmenšováním průtočného průřezu do okamžiku, kdy proudění dosahuje rychlosti zvuku a následně jeho zvětšováním. Stroje, ve kterých může docházet k takto vysokým rychlostem je možné konstruovat jen pro konkrétní podmínky.[14][18].

Vynechá-li se uvažování tření, je znění Hugoniotova teorému:

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

Z toho zákona vyplývá, že změna rychlosti proudu vzduchu a průtočného průřezu závisí na Machovu číslu:

### 5.2.1 $M < 1$ – Podzvukové proudění

Podle Hugoniotova teorému bude při podzvukové rychlosti na vstupu do zužující se trubice docházet k nárůstu rychlosti a naopak.

### 5.2.2 $M = 1$ - Proudění rychlostí zvuku

V tomto případě je derivace změny průřezu rovna nule ( $dA/A = 0$ ). Touto rovnicí je určeno, že místo, ve kterém proudění dosáhne rychlosti zvuku je extrém funkce změny průřezu trubice. Jak již bylo zmíněno, proud tedy dosáhne rychlosti zvuku pouze při zmenšování průtočného průřezu, z čehož vyplývá, že se jedná o nejužší místo a tato rychlost šíření je tzv. kritická rychlost. Při proudění touto rychlostí platí, že tepelný pohyb molekul plynu je stejný jako rychlost proudění a žádná molekula z druhé strany se již nemůže vrátit zpět přes průřez.

### 5.2.3 $M > 1$ – Nadzvukové proudění

Při nadzvukovém proudění dochází k opačným jevům než při proudění podzvukovém, tudíž s rostoucí velikostí průtočného průřezu roste i rychlost proudění a obráceně[14].

## **6. SYSTÉMY POUŽITÉ PRO ŘEŠENÍ PROBLÉMU**

### **6.1 Solid Works**

Pro návrh experimentální diferenciálně čerpané komory environmentálního elektronového mikroskopu byl použit systém SolidWorks. Tento program se řadí do tzv. CAD technologie (z anglického Computer Aided Design) a jde o počítačový program vyvinutý pro modelování objektů ve 3D rozměrech. Při vývoji byl kladen také důraz na uživatelskou přívětivost [15].

Tento systém je určen k parametrickému modelování plošných a objemových těles a umožňuje práci i s rozsáhlými sestavami a automaticky generuje výrobní podklady. Solidworks také zajišťuje nepřetržitou 100 % asociativitu, což znamená, že jakákoli změna, provedená ve výkresu, je okamžitě automaticky promítnuta do celého modelu dílu i sestavy [15].

Mezi výhody tohoto systému patří také vysoký výkon programu i na běžně používaném hardware a samozřejmě i česká technická podpora nebo lokalizace všech nabízených produktů [16].

### **6.2 Ansys Fluent**

Pro simulace prováděné během diplomové práce bude využit systém ANSYS Fluent. Jde o špičkový software používaný pro výpočetní dynamiku kapalin (CFD, z anglického Computational Fluid Dynamics). ANSYS Fluent je využíván pro řešení úloh sestavených fyzikálními a chemickými modely, jako jsou např. laminární a turbulentní proudění, stlačitelné i nestlačitelné tekutiny či modelování průběhu chemických reakcí, a to těch jednoduchých i složitějších heterogenních chemických reakcí, které probíhají při spalování plynů, uhlí, či olejů [17].

Tento program našel uplatnění v celosvětovém měřítku. Je to nejvyužívanější program pro výpočetní dynamiku kapalin a své uplatnění našel jak u malých firem, tak i u velkých nadnárodních koncernů, kde je využíván hlavně ve vývojových fázích produktů pro simulaci vyvíjených přístrojů ještě před tím, než dojde k uvedení konkrétního výrobku do výroby. Samozřejmě je možno jej využít i v pozdější fázi výrobního procesu jako zkontrolování již hotového výrobku a tím odhalit případné nedostatky. Takové odhalení případných nedostatků může významně snížit výrobní náklady [17].

Jelikož tento program využívá fyzikální modely, jsou jeho výsledky obdrženy rychle a poskytuje přesné výsledky. Tento program je využíván ve spoustě různých odvětví jako např. v automobilovém průmyslu, letectví, ve stavebním průmyslu nebo dokonce pro zvyšování spolehlivosti vědeckých nástrojů [17].

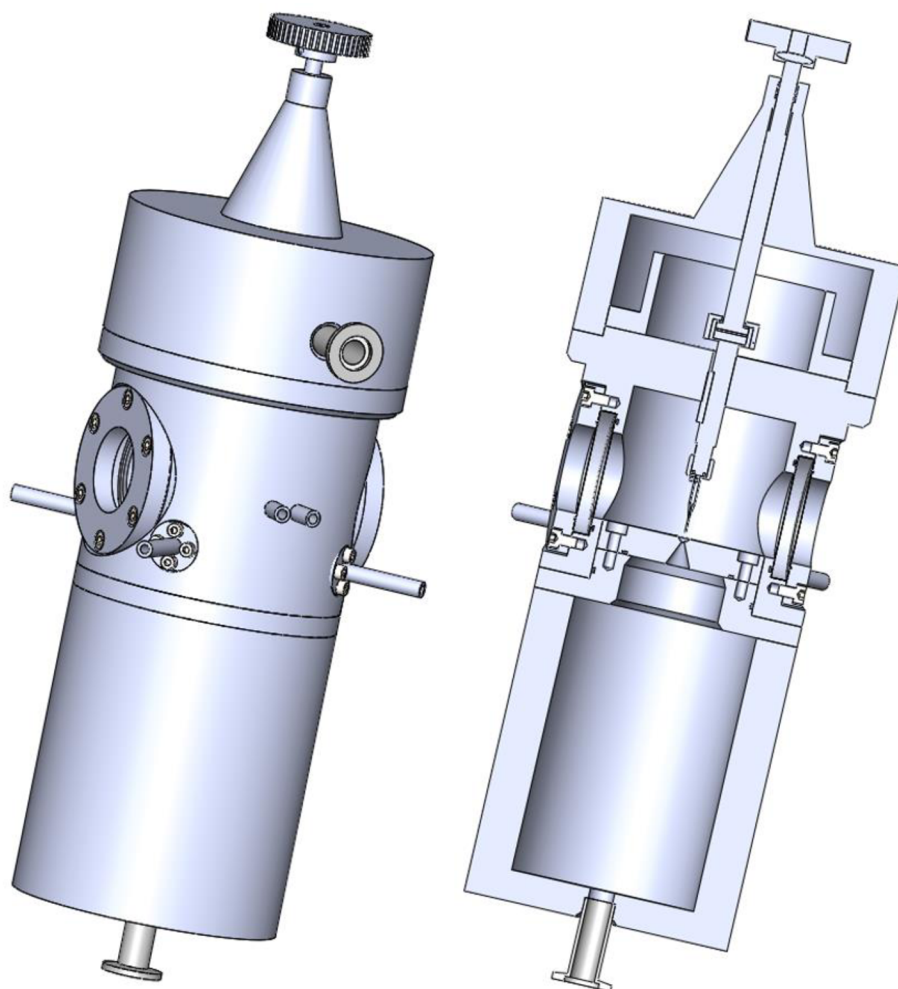
Software ANSYS Fluent nám podle potřeby a účelu použití nabízí nejrůznější konkrétní nástroje. Pro potřebu výpočtů proudění kapalin je využívána platforma s názvem Ansys Meshing. Tato platforma pro daný fyzikální model vytvoří síť, která je vhodná pro konkrétní analýzu daného problému. Pokud s touto platformou pracuje odborný uživatel, má možnost tuto síť upravovat podle jeho specifických požadavků [13]. V případě potřeby zkrácení doby a zvýšení efektivity výpočtů je také možné paralelizovat úlohy za použití více procesorů nebo jader. ANSYS Fluent nám také umožňuje pozastavení probíhajícího výpočtu pro možnost posouzení a vyhodnocení dosavadních výsledků a případné změny parametrů nastavení pro následné pokračování ve výpočtu [17].

## 7. EXPERIMENTÁLNÍ KOMORA

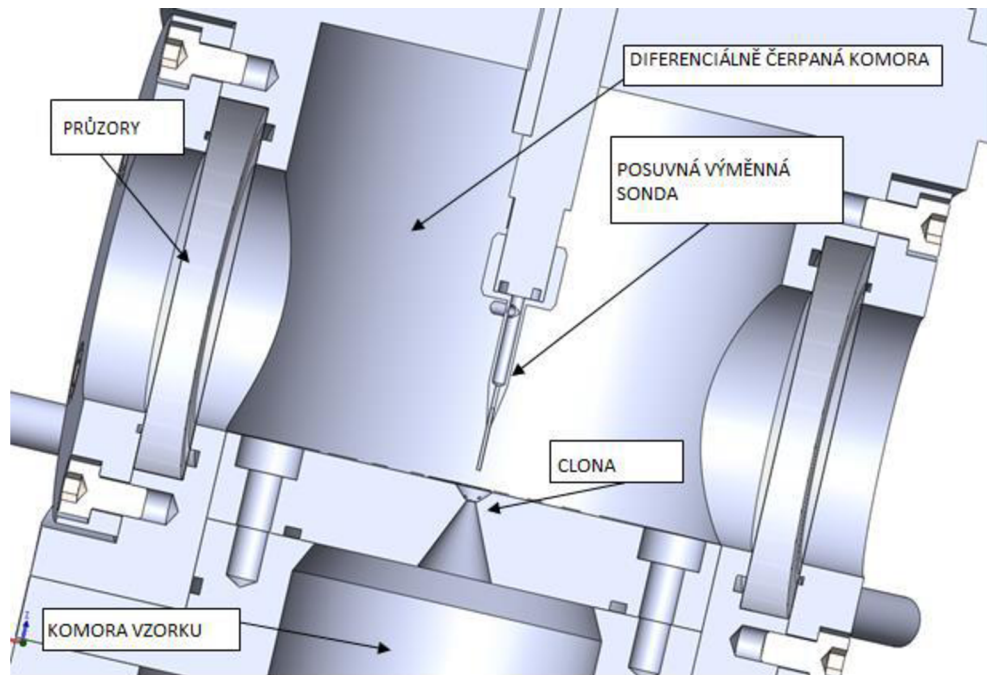
### 7.1 Experimentální komora environmentálního elektronového mikroskopu

Na Ústavu přístrojové techniky AVČR ve spolupráci s Ústavem elektrotechnologie byla původně navržena experimentální komora, jejíž konstrukce kopíruje tvar Danilátova výpočetního modelu. Pro tento výpočetní model byla provedena srovnávací studie. Takto navržená komora by byla ovšem jednoúčelová, z toho důvodu vznikla víceúčelová komora, ve které je možno měřit různé fyzikální úlohy. Mezi tyto úlohy může patřit např. rychlost proudění tryskou, simulace tlaku a teploty na stěnách komory nebo tlak za tryskou [20].

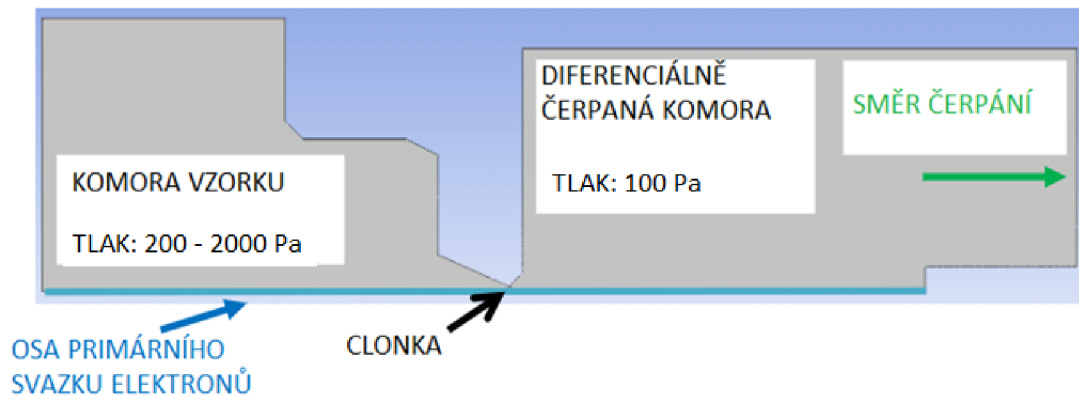
Na obrázku č. 10 je nalevo zobrazen celkový pohled na experimentální diferenciálně čerpanou komoru a také řez touto komorou (vpravo). Zvětšená část zkoumané oblasti je znázorněna na obrázku č. 11.



Obrázek 11 Celkový pohled a průřez diferenciálně čerpanou komorou



Obrázek 12 Popis diferenciálně čerpané komory



Obrázek 13 Nastavení okrajových podmínek pro simulace

Na obrázku 13 je znázorněno nastavení okrajových podmínek pro 2D osově symetrický výpočet pro Ansys Fluent. Pro simulace bude v komoře vzorku jako okrajová podmínka použit tlak 2000 Pa. V diferenciálně čerpané komoře je požadovaný dosažený tlak 100 Pa. Tyto hodnoty odpovídají obvyklému rozsahu použití v komoře vzorku environmentálního elektronového mikroskopu a budou sloužit jako parametry pro návrh dýzy za clonkou, která odděluje komoru vzorku a diferenciálně čerpanou komoru.

## 7.2 Lavalova tryska

Lavalova dýza je speciální tryska umožňující proudícímu médiu překonat rychlost zvuku. Její konstrukce umožňuje zlepšení účinnosti expanze plynu za kritickým průřezem trysky, tedy pro případ  $p^* > p_e$ , kdy je třeba pro expandující plyn vytvořit vhodné podmínky tj. vytvořit za nejužším průřezem trysky (tzv. kritický průřez, protože v něm rychlost proudění dosahuje rychlosti zvuku) rozšiřující se kanál. [18].

Hmotnostní tok Lavalovou tryskou popisuje následující vztah [24]:

$$m = S * \psi * \sqrt{2 * \frac{p_1}{v_1}}$$

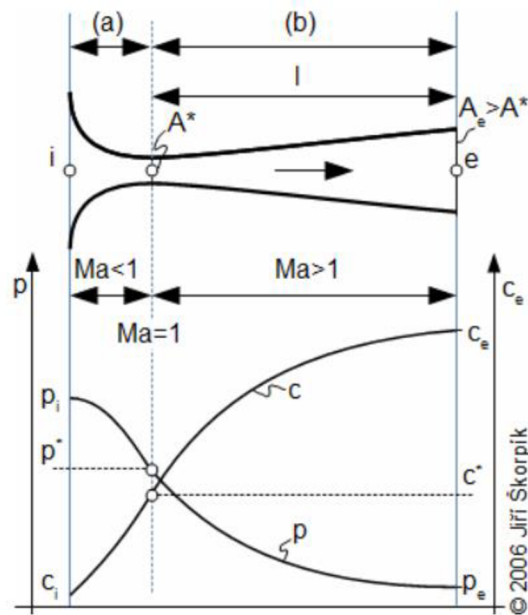
Kde:  $m$  – hmotnostní tok tryskou,  $S$  – velikost průřezu tryskou,  $\Psi$  je výtoková funkce,  $p_1$  – tlak na vstupu trysky,  $v_1$  – rychlost proudícího media na vstupu trysky

Výtoková funkce je rostoucí do takové hodnoty tlakového poměru, kterou značíme jako kritický tlakový poměr. V oblasti růstu výtokové funkce klesá tlak tekoucího media, jeho rychlost roste. S poklesem tlaku klesá i entalpie plynu. S rostoucím entalpickým rozdílem roste rychlost proudění.

Ze vztahu popisujícího hmotností tlak tryskou je patrné, že aby byl hmotnostní tok tryskou ve všech místech trysky konstantní, musí se s rostoucí entalpií její průměr zmenšovat. S klesajícím tlakem a rostoucí rychlostí se tedy zužuje průřez tryskou, to platí do oblasti kritického tlakového poměru. Při dalším snižování tlaku, roste hodnota výtokové funkce, zvyšuje se rychlost media a průřez trysky musí tedy růst také. Lavalova dýza je tedy utvořena ze dvou částí – zužující se a rozšiřující se.

Pokud máme zásobník plynu se stálým tlakem a na výstupu je tak nízký tlak, že tlakový poměr je nižší než kritický tlakový poměr, tak je jisté, že v nějužším místě Lavalovy dýzy medium dosáhne kritického tlaku a kritické rychlosti.

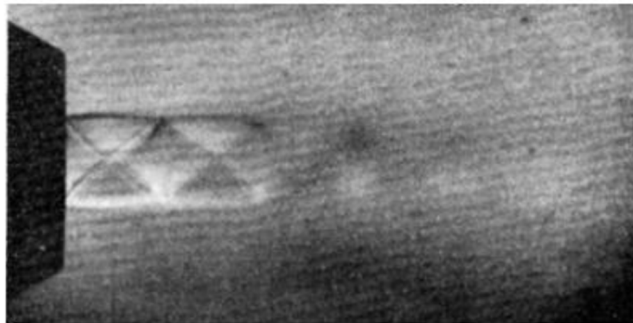
Jelikož dochází ke tlakovému spádu mezi tlakem na vstupu  $p_1$  a tlakem na výstupu  $p_2$ , je plyn expandujícímu z místa o vyšším tlaku do místa s nižším tlakem, uzpůsobena cesta zužující se tryskou. Ve zužující se části trysky plyn zrychluje až do nejužšího místa trysky, kde dosahuje maximální rychlosti. Medium zde má kritický tlak a kritickou rychlost. Za touto oblastí se řídí opačnou logikou. K tomu aby využil tlakový spád, potřebuje rozšiřující se kanál. Expanze do nižších tlaků již není ztátová, ale tlakový spád je využit na kinetickou energii [24].



Obrázek 14 Lavalova konvergentně-divergentní tryska

V konvergentní části trysky je rychlost proudu podzvuková  $Ma < 1$ , v kritickém právě rychlosti zvuku  $Ma = 1$ , v divergentní části nadzvuková  $Ma > 1$ .

Výtoková rychlost Lavalovy trysky je nadzvuková a při výtoku do volného prostoru začne proudění ihned vytvářet rázové vlny – brzdění nadzvukového proudu o okolní plyn.



Obrázek 15 Nadzvukový výtok plynu z Lavalovy trysky

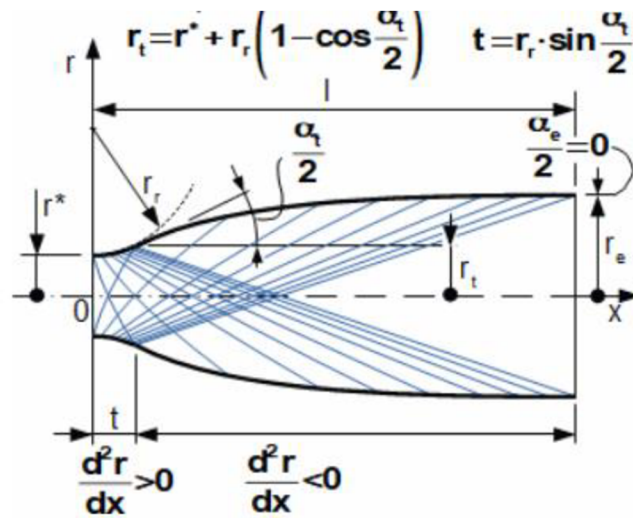
### 7.2.1 Ideální tvar rozšiřující se Lavalovy dýzy

Tvar konstruovaný metodou charakteristik je nejideálnějším tvarem rozšiřující se části Lavalových trysek. Existují také případy, kdy je tvar trysky aproximován polynomem prvního nebo druhého řádu získané analytickými metodami výpočtu.

Výhodou tohoto tvaru dýz je rovnoměrné rychlostní pole na výstupu, ovšem délka takové trysky je mnohem větší než v případě lineárního tvaru trysky, tudíž její účinnost může být nižší než u kónických trysek v důsledku vnitřního tření. Proto je tento tvar



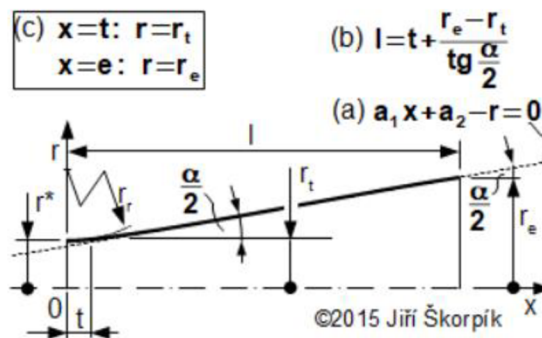
trysek používán prakticky jen v nadzvukových aerodynamických tunelech, kde je velmi důležité mít na výstupu rovnoměrné rychlostní pole [18].



Obrázek 16 Ideální tvar rozšiřující se Lavalovy trysky

### 7.2.2 Lineární tvar Lavalovy dýzy

Lineární tvar je nejjednodušším tvarem Lavalovy dýzy. Pro tyto trysky je charakteristický snadný výpočet i výroba. Používají se pro případy, kdy jiné ztráty jsou tak vysoké, že výroba složitějšího tvaru není ekonomicky výhodná. Tento tvar je využíván u malých raketových motorů, malých trysek nebo např. na injektorech a ejektorech. Výpočet vychází ze zadaného úhlu rozšíření  $\alpha$ , který se pohybuje v rozmezí 8 až 30° a z vypočítaného průtočného průřezu na výstupu  $A_e$ . Tyto dva parametry k výpočtu délky rozšiřující se části dostačující [18].

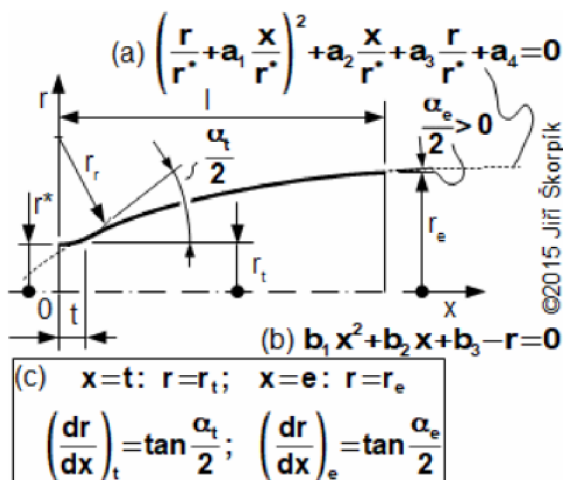


Obrázek 17 Lineární tvar Lavalovy trysky

U trysek toho tvaru není možné dosáhnout rovnoměrného rychlostního pole na výstupu trysky a odklon rychlosti od osy kanálu způsobuje ztrátu na hybnosti v osovém směru.

### 7.2.3 Bellova tryska

Tzv. Bellova tryska je nejpoužívanějším tvarem rozšiřující se části Lavalovy trysky. Používá se především u raketových motorů. Tvar této trysky bývá navržen dvojitým způsobem. První způsob je podle rovnice Rao (podle G.V.R. Rao, který tuto rovnici sestavil na základě experimentů). Druhý způsob je podle rovnice Allman-Hoffman (podle Allman J. G. a Hoffman J. D., kteří tuto rovnici odvodili zjednodušením rovnice Rao). Oba dva způsoby dají jako výsledek rovnice, které jsou polynomy druhého stupně. Jako okrajové podmínky pro rovnice Rao jsou výstupní a vstupní úhel, které jsou na sobě závislé. V případě rovnice Allman-Hoffman k řešení stačí pouze vstupní úhel  $\alpha_t$ . Bellova tryska je kratší než lineární tryska, přesto má v osovém směru větší účinnost i hybnost [18].



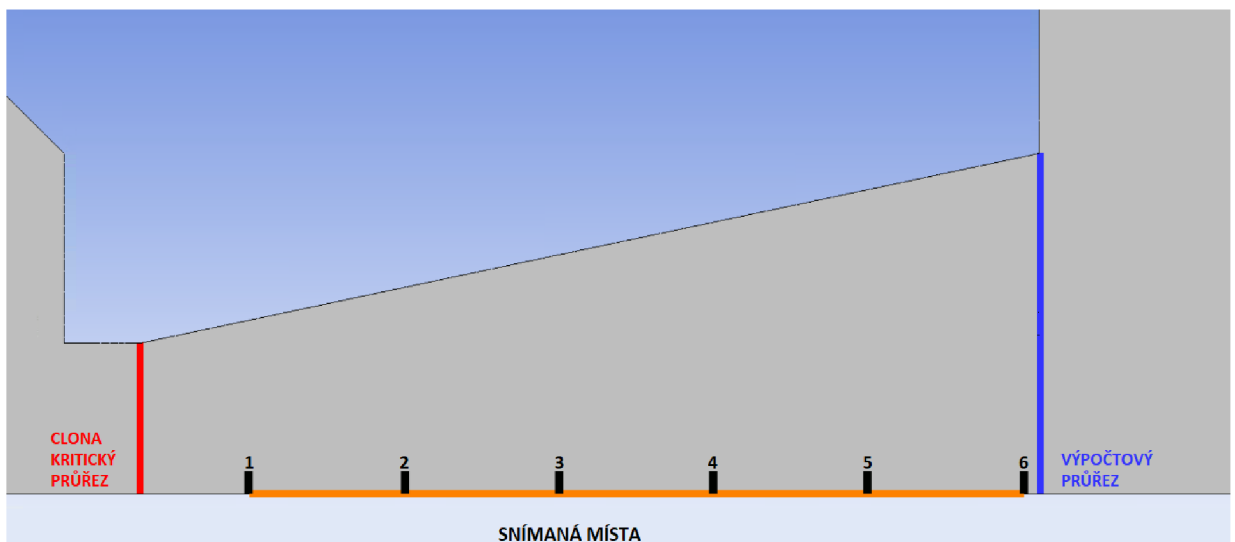
Obrázek 18 Bellova tryska

## 8. LAVALOVA DÝZA PRO SNÍMÁNÍ STATICKÉHO TLAKU POMOCÍ PRANDTLOVY TEORIE

### 8.1 Použitý tvar Lavalovy dýzy

Jedním z plánovaných experimentů prováděných v experimentální komoře je snímání tlaku Pitotovou trubicí. Z důvodu malých rozměrů není možné snímat tlak uvnitř samotné dýzy, nýbrž pouze nad dýzou.

Proto bylo přistoupeno k metodě měření, kdy statický tlak bude snímán pomocí malých otvorů spirálovitě umístěných po obvodu výstupu dýzy. Tato metoda snímání tlaku vychází z Prandtlovy teorie, podle které má rozložení statického tlaku v průřezu proudění stejné hodnoty. Tato teorie platí např. při rovnoměrném proudění v trubce. V případě nadzvukového proudění za dýzou dochází k expanzi plynu, tudíž pro použití Prandtlovy teorie je nutné, aby byl stanoven přesný tvar dýzy podle výpočtového průřezu.



Obrázek 19 Snímané body

Proto V experimentální komoře byla řešena Lavalova lineární dýza, jejíž rozměry byly stanoveny podle teorie isoentropického jednorozměrového proudění. Při návrhu rozměrů se vychází ze vztahů, které stanoví poměry rychlosti, teploty, tlaků, hustoty a Machova čísla mezi prostředím, které vstupuje do dýzy, dále v dýze, a nakonec ve výpočtovém průřezu expanze za dýzou [14].

Vztahy platící pro isoentropické proudění:

$$\frac{v_v}{v_{kr}} = \left[ \frac{(\chi + 1)M^2}{2 + (\chi - 1)M^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\frac{v_v}{v_0} = \left[ \frac{2}{2 + (\chi - 1)M^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\frac{T_v}{T_0} = \frac{2}{2 + (\chi - 1)M^2} \quad (5)$$

$$\frac{p_v}{p_0} = \left[ \frac{2}{2 + (\chi - 1)M^2} \right]^{\frac{\chi}{\chi - 1}} \quad (6)$$

$$\frac{\rho_v}{\rho_0} = \left[ \frac{2}{2 + (\chi - 1)M^2} \right]^{\frac{1}{\chi - 1}} \quad (7)$$

$$\frac{\rho_v}{\rho_{kr}} = \frac{A_{kr}}{A} = M \left[ \frac{\chi + 1}{2 + (\chi - 1)M^2} \right]^{\frac{1}{2\chi - 1}} \quad (8)$$

Kde:

$v_v$  – výstupní rychlost,  $v_{kr}$  – kritická rychlost,  $v_0$  – vstupní rychlost,  $T_v$  – výstupní teplota,  $T_0$  – vstupní teplota,  $p_v$  – výstupní tlak,  $p_0$  – vstupní tlak,  $\rho_v$  – výstupní hustota,  $\rho_0$  – vstupní hustota,  $A_{kr}$  – kritický průřez,  $A$  – výpočtový průřez,  $M$  – Machovo číslo,  $\chi$  – plynová konstanta ( $\chi = 1,14$ )

## 8.2 Návrh rozměrů použité dýzy

Nejideálnějším řešením by bylo použití clonky o průměru 500  $\mu\text{m}$  jako u běžných elektronových mikroskopů. V takovém případě by ovšem byla dýza tak malá, že by plánované experimenty byly problematické. Z toho důvodu byl zvolen průměr clonky 2 mm.

Oproti předchozím analýzám prováděných na ústavu, kde byly voleny hodnoty tlaku v diferenciálně čerpané komoře 40 Pa a 70 Pa byl zvolen tlak 100 Pa. Jedním z důvodů

je rezerva, aby v případě praktického experimentu byla jistota schopnosti dosáhnout daných podmínek odčerpáním vývěvami tak, aby v komoře vzorku zůstalo 2000 Pa.

Ze zvolených rozměrů clonky a velikosti tlaku byl vypočten venkovní průřez. Je tedy nutno zvolit pouze správný úhel. V neideálnějším případě by tryska měla být co nejdelší, ovšem z konstrukčních důvodů je požadavek, naopak, na co nejvíce rozevřenou dýzu. Cílem diplomové práce tedy bude pomocí simulací stanovit kompromis mezi těmito požadavky.

Ze vztahů pro isoentropické proudění při poměru tlaků  $p_0=2000$  Pa a  $p_v=100$ Pa vychází následující výsledky.

Poměr těchto tlaků činí 0,05 a je následně možno z tabulek pro proudění plynů odečíst hodnotu Machova čísla  $M_v = 2,6$ . Tato hodnota bude využita v dalších výpočtech [14].

### 8.2.1 Výpočet rychlosti

Pro  $M_v = 2,6$  je uvedený poměr rychlosti na výstupu ku rychlosti na vstupu 0,6521. Z výše uvedených vztahů pro isoentropické proudění a zadaných vstupních hodnot je možné dopočítat hodnoty výstupní.

Rychlost zvuku na vstupu v daném prostředí získáme ze vztahu:

$$v_0 = \sqrt{\chi RT} \quad (9)$$

Kde:

R značí univerzální plynovou konstantu a  $T_0 = 297,15$  K.

Jelikož známe hodnotu rychlosti zvuku na vstupu a hodnotu poměru rychlostí odečtenou z tabulky  $v_v/v_0$  podle Machova čísla  $M_v$ , můžeme dopočítat výstupní rychlost, která činí  $v_v = 585,8$  ms<sup>-1</sup>.

### 8.2.2 Výpočet hustoty plynu

Pro  $M_v = 2,6$  je uvedený poměr hustoty výstupní ku hustotě vstupní 0,1179.

Podobným způsobem jako při výpočtu rychlosti, lze určit hustotu plynu na vstupu ze vztahu:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{RT_0} \quad (10)$$

A následně je stejným způsobem jako při výpočtu rychlosti možno obdržet hodnotu hustoty na výstupu.

Obdržené hodnoty jsou  $\rho_0 = 0,023$  a  $\rho_v = 0,00276$  kgm<sup>-3</sup>.

### 8.2.3 Výpočet teploty

Pro  $Mv = 2,6$  je hodnota poměru výstupní a vstupní teploty 0,4252. Jelikož je počáteční teplota  $T_0 = 297,15$  K, z rovnice popisující isoentropické proudění dostaneme hodnotu výstupní teploty  $T_v = 126,3$ K.

### 8.2.4 Výpočtový průřez

A nakonec můžeme stanovit hodnotu rozevření dýzy neboli tzv. výpočtový průřez, při kterém bude platit Prandtlova teorie, která tvrdí, že statický tlak bude ve stejném průřezu stejný.

Pro daný tlakový poměr známe díky hodnotě  $Mv = 2,6$  konstantu poměru hustoty výstupní ku hustotě kritické. Ta platí i pro poměr  $A_k/A_v$ :

$$\frac{\rho_v}{\rho_{kr}} = \frac{A_k}{A_v} = 0,1953 \quad (11)$$

Jelikož je zvolená clona, která je zároveň kritickým průřezem  $A_k = 2$  mm, je hodnota  $A_{kr} = 3,14$  mm<sup>2</sup> a můžeme dopočítat výpočtový průřez  $A_v = 9,1$  mm<sup>2</sup>, tedy průměr  $D_v = 3,4$  mm<sup>2</sup>.

Výsledný úhel bude zvolen v závislosti na výsledcích simulací proudění tryskou podle rozložení tlaku. Simulace budou provedeny pro několik variant úhlu a bude zvolena varianta takového úhlu, který se bude jevit jako nejoptimálnější pro snímání statického tlaku na zvolené Lavalové dýze podle Prandtlovy teorie.

Na uvedenou studii navazuje studie chování nadzvukového proudění plynu v závislosti na úhlu rozevření dýzy a její délky. Výsledky jsou posuzovány s ohledem na předpokládaný rozptyl elektronů v ose proudění, která je v praxi drahou primárního svazku elektronů procházející komorou [14].

## 8.3 Teorie v oblasti konstrukce clony v EREM

Tato kapitola vzchází z výzkumu Dr. Daniláta, který se ve svém výzkumu věnuje účinnosti přenosu elektronového svazku mezi oblastí vakua a vysokého tlaku u „nízkovakuových“ (LVSEM) a environmentálních (ESEM) rastrovacích elektronových mikroskopů [23]. Jak již bylo zmíněno používá pro své výpočty statistickou metodu Monte Carlo (DSMC) k určení vlastností proudícího plynu, a to zejména změn hustoty plynu podél dráhy primárního paprsku elektronů. Bylo zjištěno, že komerční ESEM a LVSEM způsobují zbytečné ztráty primárního svazku elektronů během čerpání před

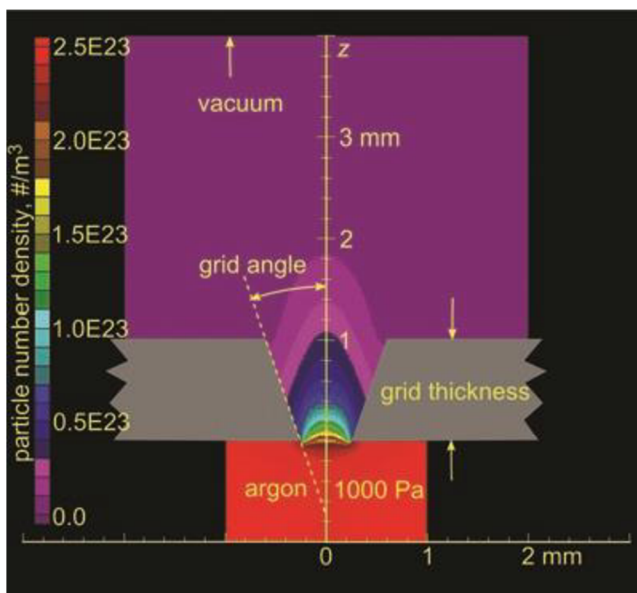
jejich vstupem do komory vzorku. Jako referenční standard pro porovnání výkonu různých systémů je použita tenká clonka omezující tlak (PLA).

Dr. Danilátos ve svých publikacích uváděl, že pro dosažení ideální konfigurace diferenciálního čerpání měl být přechod mezi oblastí vakua a tlakovou komorou navržen tak, aby mezi těmito oblastmi byl zaručen co nejprudší přechod. Takových podmínek má být dosaženo právě použitím tenké clony. Tímto řešením je zaručena minimální možná ztráta paprsku v této přechodové oblasti.

Z hlediska požadavků na čerpání a dosažení lepšího vakua, by ovšem bylo vhodnějším řešením použití tlustší clony, která zajišťuje menší průtok plynu. Z těchto dvou protichůdných požadavků se při jakémkoli návrhu systému upřednostňuje minimalizace ztráty paprsku elektronů před účinností čerpání, pokud je cílem dosáhnout nejlepšího možného zobrazení za nejpříznivějších podmínek. Klasifikujícími parametry jsou tedy přenos svazu elektronů a množství plynu unikajícího otvorem.

### 8.3.1 Zúžující se clona

Při hledání ideální konfigurace diferenciálního čerpání je možné dospět k použití „tenké“ clony také použitím zúžující se clony. Začne se nejprve „tlustým“ otvorem na straně vakua zúžujícím se do hrdla neboli místa s nejužším průměrem na straně komory s vyšším tlakem. Na obr. 20 je znázorněn konkrétní příklad toku argonu začínajícího stagnačním tlakem v komoře o tlaku 1000 Pa, který protéká clonou o průměru 0,5 mm na straně vyššího tlaku a rozšiřující se na průměr 1 mm na straně vakua. Rozdíl hustoty počtu částic na metr krychlový je zde více než 2 řády v rozpětí 4 mm nad spodní částí mřížky clony, která se nachází na straně vakua.



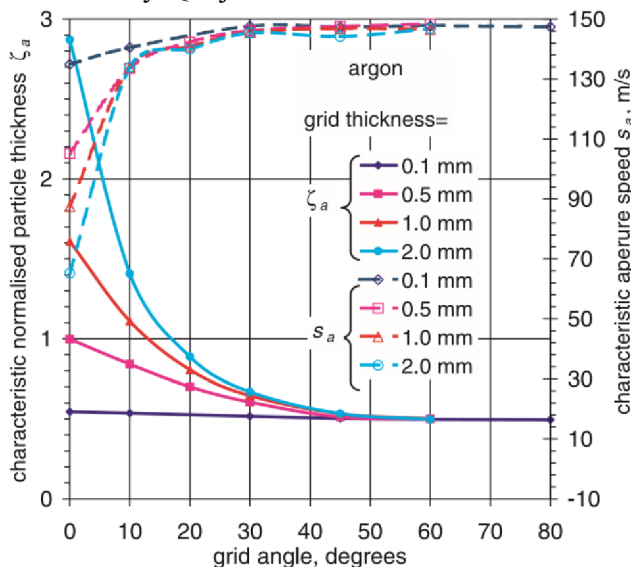
Obrázek 20 Parametry clony pro tok Argonu z komory o 1000 Pa do prostoru vakua

Průtokové pole pro tento případ bylo vypočteno již zmíněnou metodou Monte Carlo, která nám umožňuje v kterémkoli bodě toho pole získat veškeré vlastnosti, které nás zajímají (např. Machovo číslo, hustota, teplota, netěsnost...).

Jedním ze zkoumaných parametrů je normalizovaná hustota částic  $\zeta_a$ . Jedná se o bezrozměrný parametr získaný normalizací hustoty průtoku stagnačního plynu na průměr clonky D. Pokud se nastaví dolní mez integrálu v rovnici pro výpočet této veličiny, uvedené ve zmíněné publikaci [24], do hrdla otvoru (v tomto případě se shoduje s počátkem osy při  $z = 0$  mm) je získána konečná hodnota právě charakteristickou konstantou  $\zeta_a$ . Normalizovaná hustota částic  $\zeta_a$  pro různé hodnoty délky clony a úhlu rozevření clony (divergence) je znázorněna na obr. 21.

Na stejném grafu je také vynesena charakteristická rychlost clony  $s_a$ , která je určena průtokem N částic za jednotku času přes clonu.

Je zajímavé, že všechny křivky znázorněné v grafu konvergují blízko u sebe pro úhly rozevření clonky větší než  $45^\circ$ . V mezním případě, kdy se buď průměr clony blíží k nule nebo se úhel rozevření blíží  $90^\circ$ , dosáhne clona kritické charakteristické rychlosti  $s_c$  nazývané kritickou hodnotou clony, ze které je možno určit rychlost úniku clony neboli netěsnost clony Q v jednotkách  $\text{Pa/m}^3$ .



Obrázek 21 Normalizovaná hustota částic v závislosti na délce clony a rozevření clony

Pro návrh diferenciálního čerpacího systému jsou důležité oba parametry, nicméně důležitější veličinou je normalizovaná hustota částic, neboť hlavním cílem při návrhu takového systému je přenos elektronového svazku s minimální možnou ztrátou.

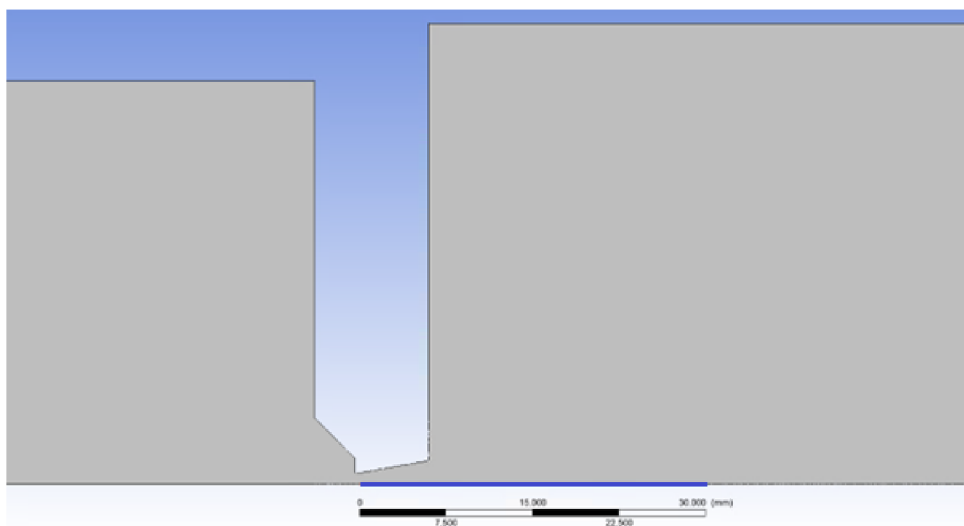
Z obr. 21 také vyplývá, že pro použití zužující se clonky se při rozevření clony  $10^\circ$  rychlost úniku nejvíce přiblížila maximální hodnotě dosažené při použití tenké clony PLA. Takový návrh tedy zaručuje minimalizaci úniku plynu, aniž by došlo ke zbytečným ztrátám paprsku.



## 9. SIMULACE PROUDĚNÍ V LAVALOVĚ DÝZE

V této diplomové práci byly v systému Ansys Fluent provedeny analýzy proudění uvnitř Lavalovy dýzy pro stanovení optimálního návrhu této dýzy. Analýzy byly provedeny pro tlakový poměr 2000 Pa ku 100 Pa a byl zkoumán vliv úhlu rozevření dýzy na výsledné rozložení tlaku v dýze na základě Prandtlovy teorie. Byly zkoumány varianty rozevření dýzy v rozmezí 8–18°. Nejoptimálnější variantou pro řízenou expanzi dle teorie [22] je úhel 12°. V praxi ale na podmínky pro efektivní průchod elektronového paprsku přes diferenciálně čerpanou komoru a dýzu nemusí platit, že nejlepší podmínky poskytuje řízená expanze. Proto byly pro danou práci volena škála úhlů a změna délky dýzy. Pro úhly 8° a 10° došlo k přiškrcení dýzy. Pro úhly 14°, 16° a 18° je rozevření větší než udává literatura k optimálnímu úhlu.

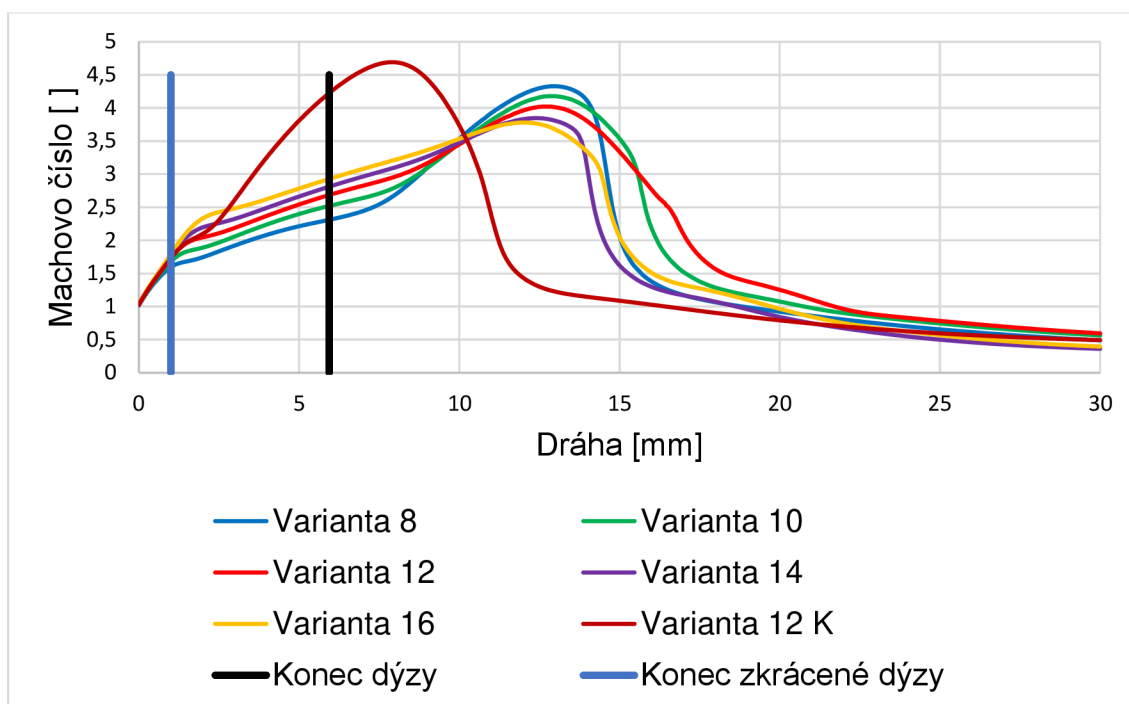
Zde jsou uvedeny výsledky simulací pro zkoumané stavové veličiny na zvolené dráze v dýze a v oblasti expanze.



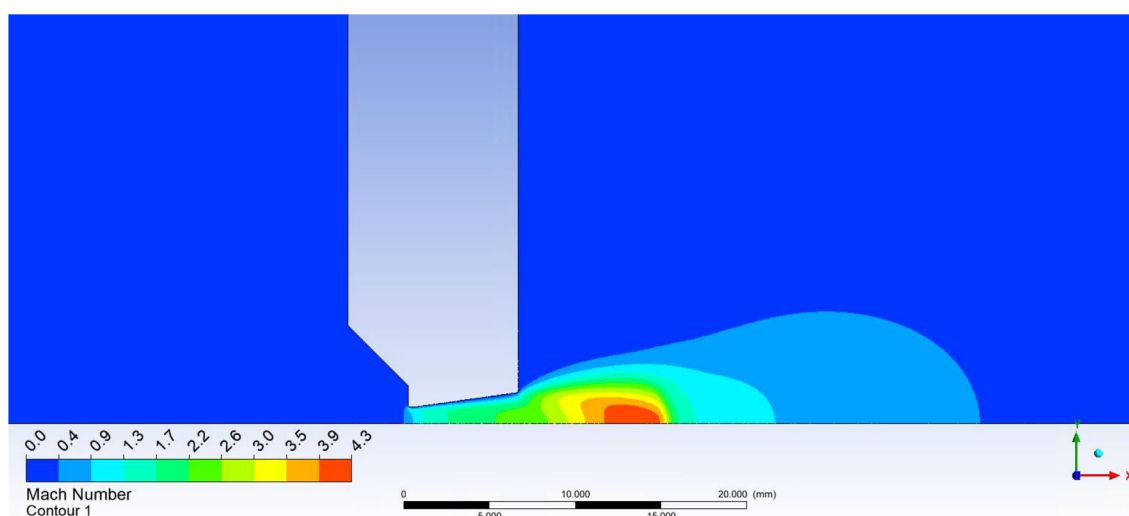
Obrázek 22 Zkoumaná dráha

### 9.1 Machovo číslo

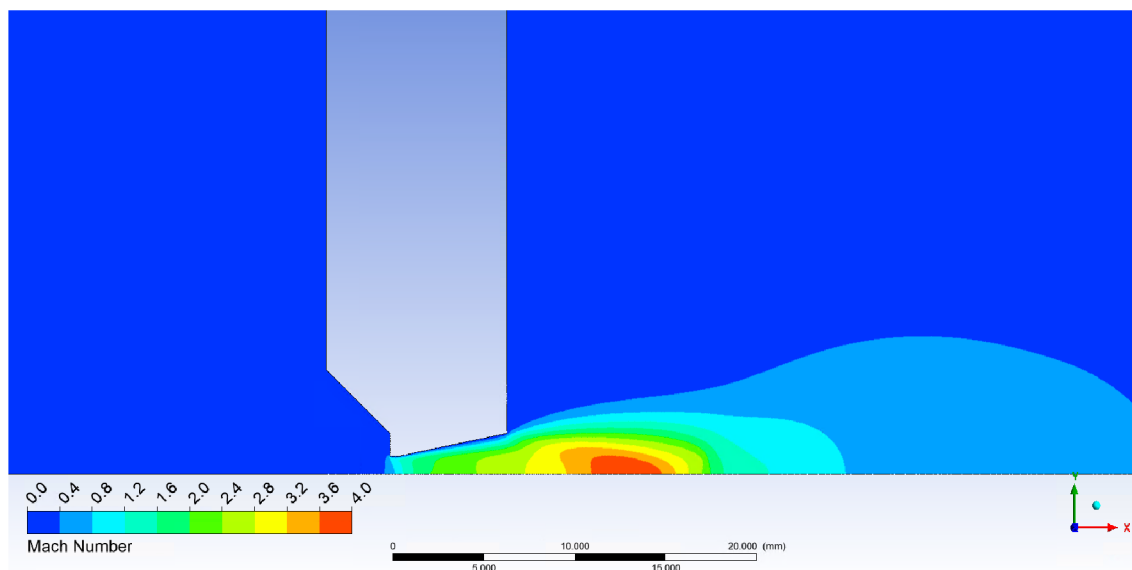
Na obr. 23 je zobrazen průběh Machova čísla v závislosti na dráze primárního svazku elektronů. Z průběhu grafu závislosti Machova čísla na dráze je patrné, že expanze plynu za clonou 12° je rovnoměrná po celé dráze nadzvukového proudění – dochází k řízené expanzi zakončené nárůstem tlaku a vzniku Machova disku. Pro varianty rozevření dýzy 8° a 10° dochází k zaškrncení kužele dýzy, což vede ke zpomalení rychlosti v oblasti proudění dýzou a následné dodatečné expanzi plynu za dýzou. U variant 14°, 16° a 18° dochází ke zvýšené expanzi plynu již v samotné dýze. To z důvodu většího rozšíření prostoru než vyžaduje řízená expanze.



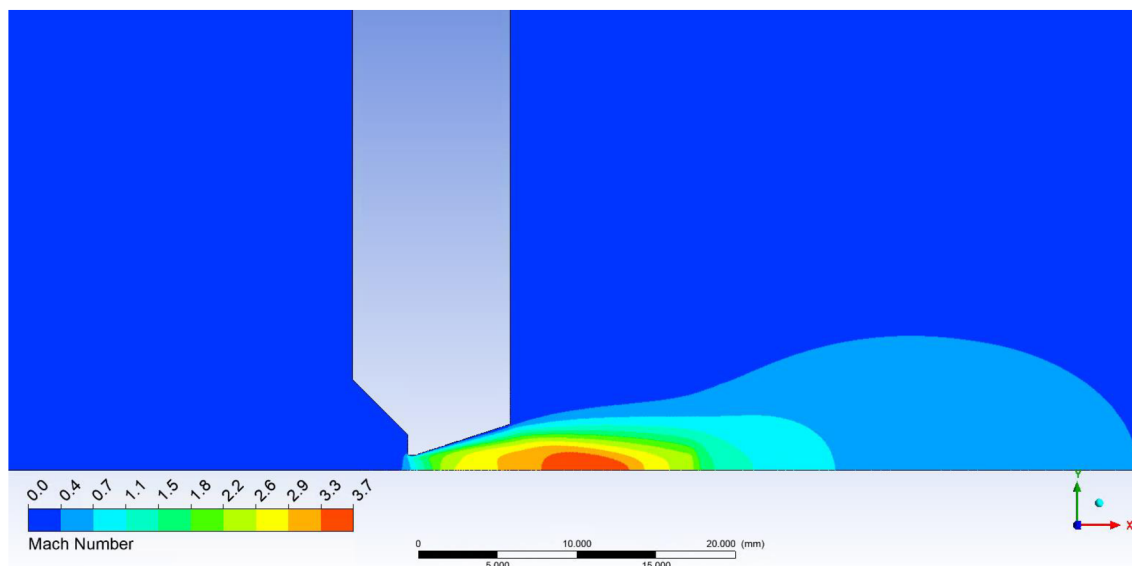
Obrázek 23 Průběh Machova čísla na dráze primárního svazku elektronů



Obrázek 24 Rozložení Machova čísla pro verzi rozevření dýzy 8°



Obrázek 25 Rozložení Machova čísla pro variantu rozevření dýzy  $12^\circ$

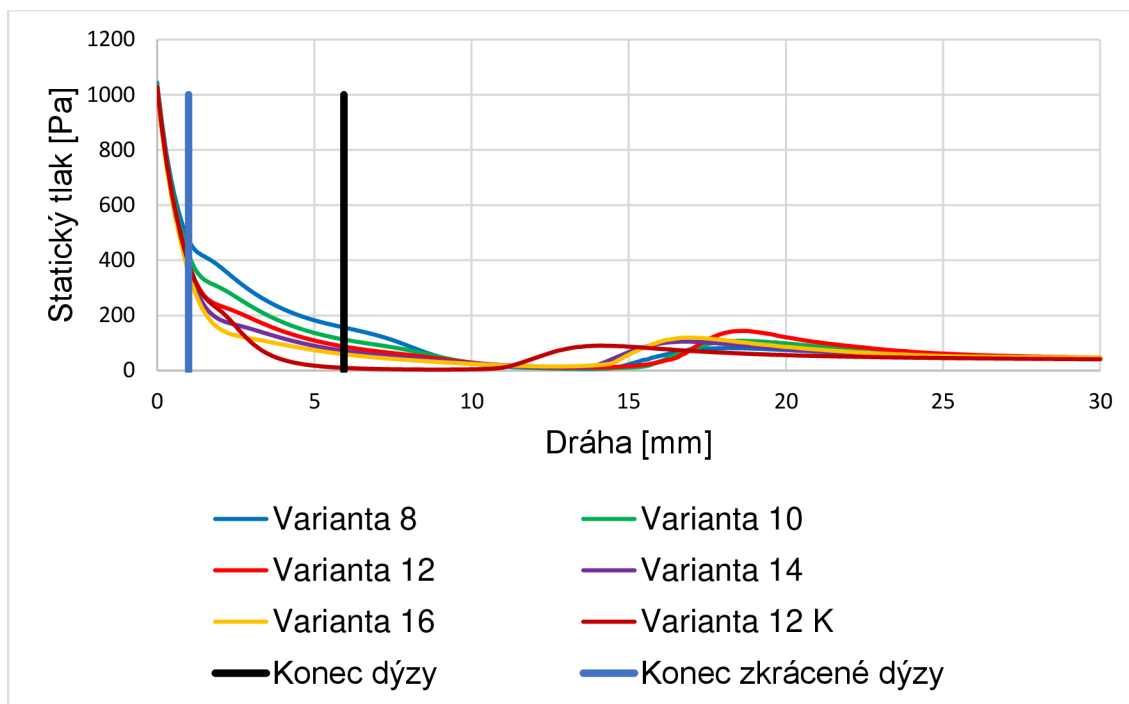


Obrázek 26 Rozložení Machova čísla pro variantu rozevření dýzy  $18^\circ$

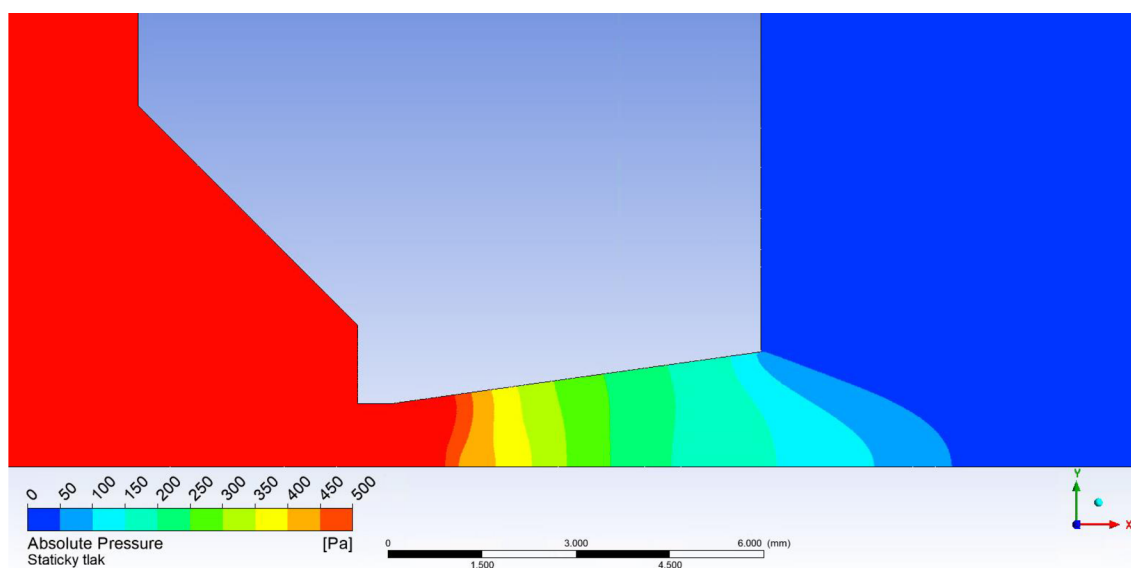
## 9.2 Statický tlak

Na obr. 27 je vynesena průběh statického tlaku na dráze primárního svazku elektronů vedoucí od nejužšího místa dýzy přes vlastní oblast Lavalovy dýzy a oblast expanze za dýzou. Z výsledků je patrné, že u verze s úhlem  $12^\circ$  je expanze plynu rovnoměrná v dýze i za ní. Na konci expanze dochází k nárůstu tlaku a tvorbě Machova disku.

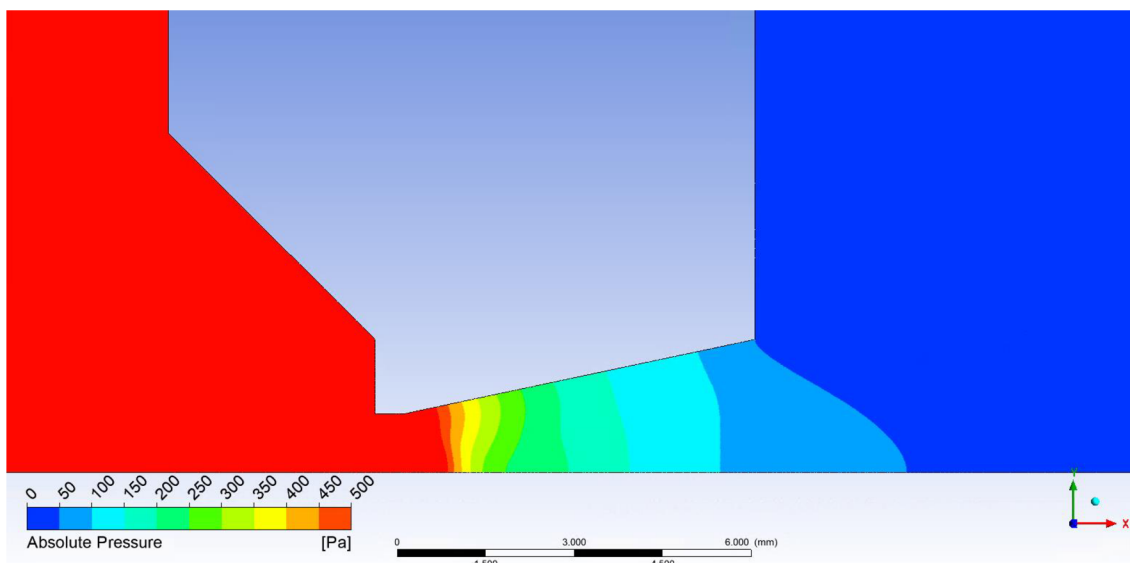
Oproti tomu varianty s menším úhlem vykazují v oblasti dýzy menší pokles tlaku a naopak dodatečnou expanzi za koncem, dýzy.



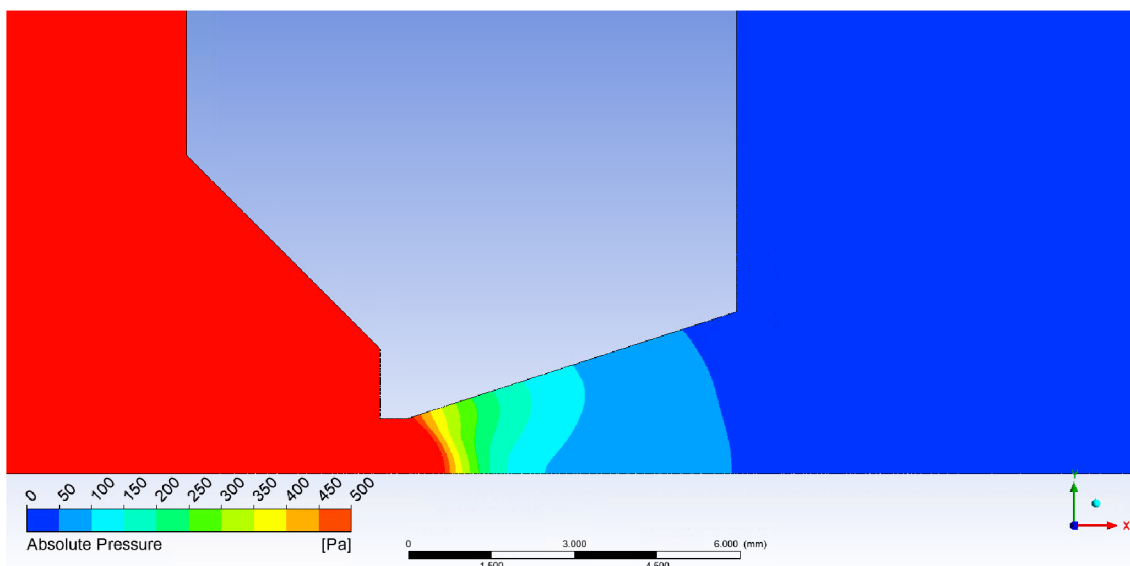
Obrázek 27 Průběh statického tlaku na dráze primárního svazku elektronů



Obrázek 28 Rozložení statické tlaku pro variantu rozevření dýzy 8°



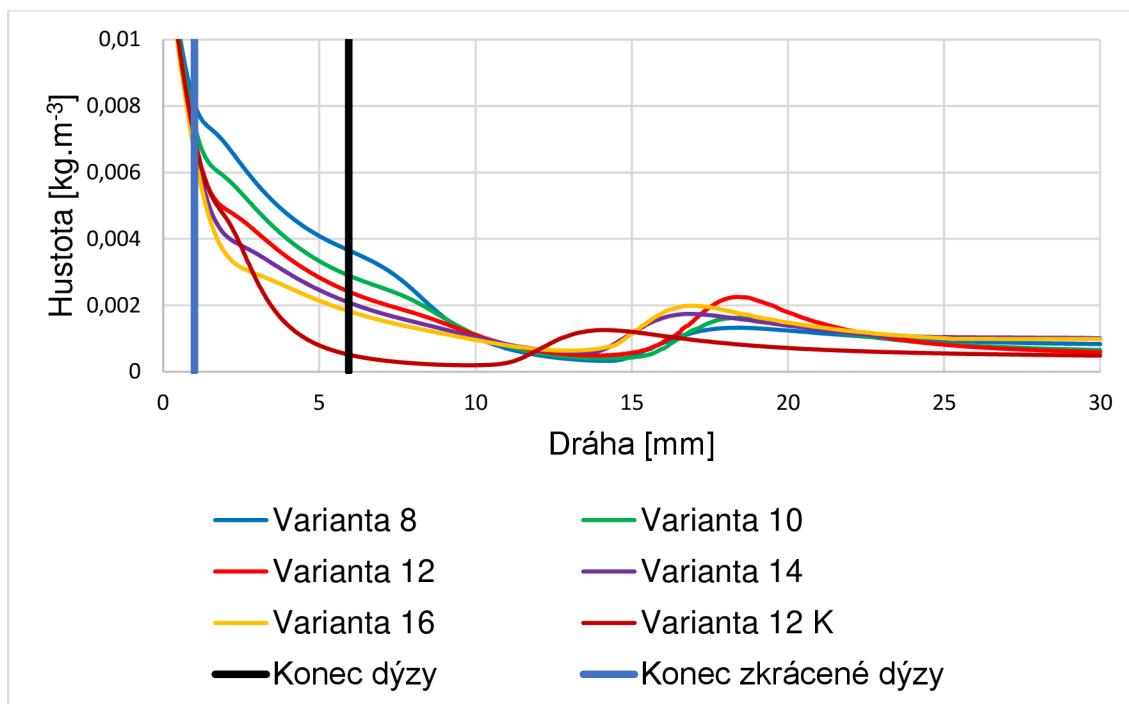
Obrázek 29 Rozložení statického tlaku pro variantu rozevření dýzy  $12^\circ$



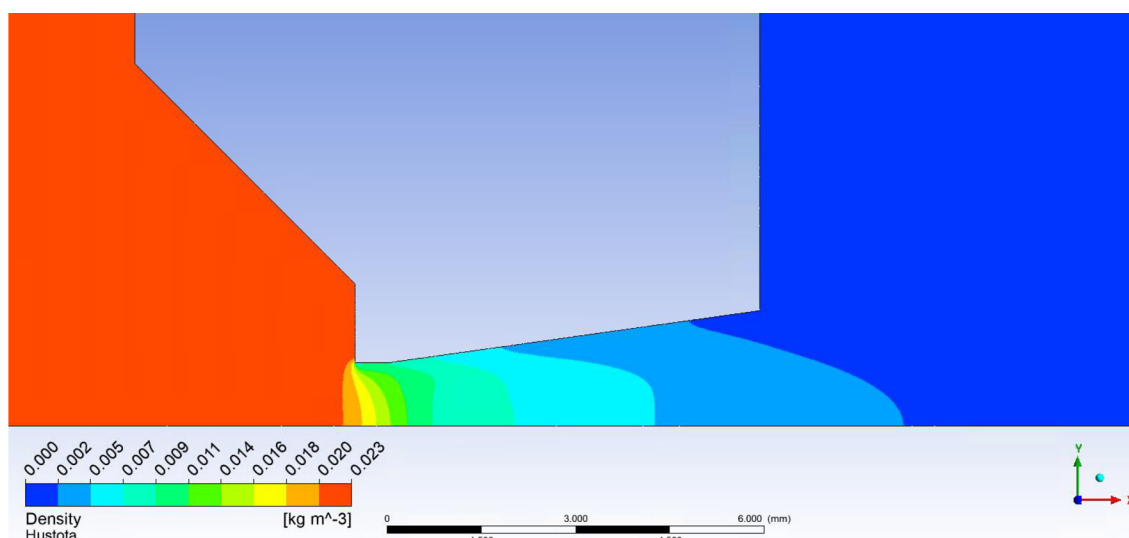
Obrázek 30 Rozložení statického tlaku pro variantu rozevření dýzy  $18^\circ$

### 9.3 Rozložení hustoty

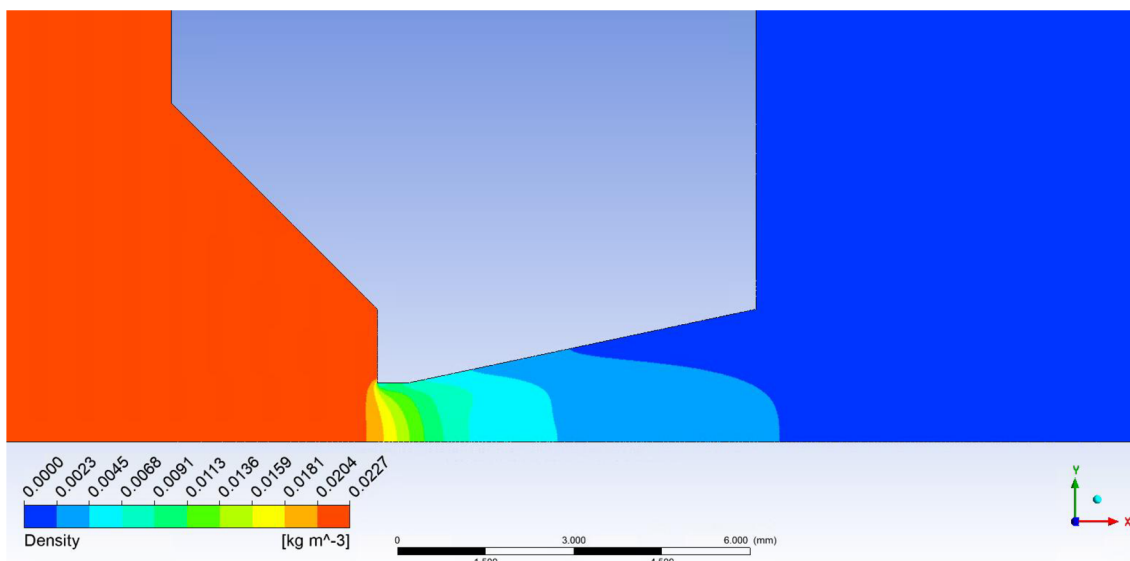
Na obr. 31 je vyobrazený průběh hustoty na dráze primárního svazku elektronů. Tento průběh odpovídá průběhu statického tlaku.



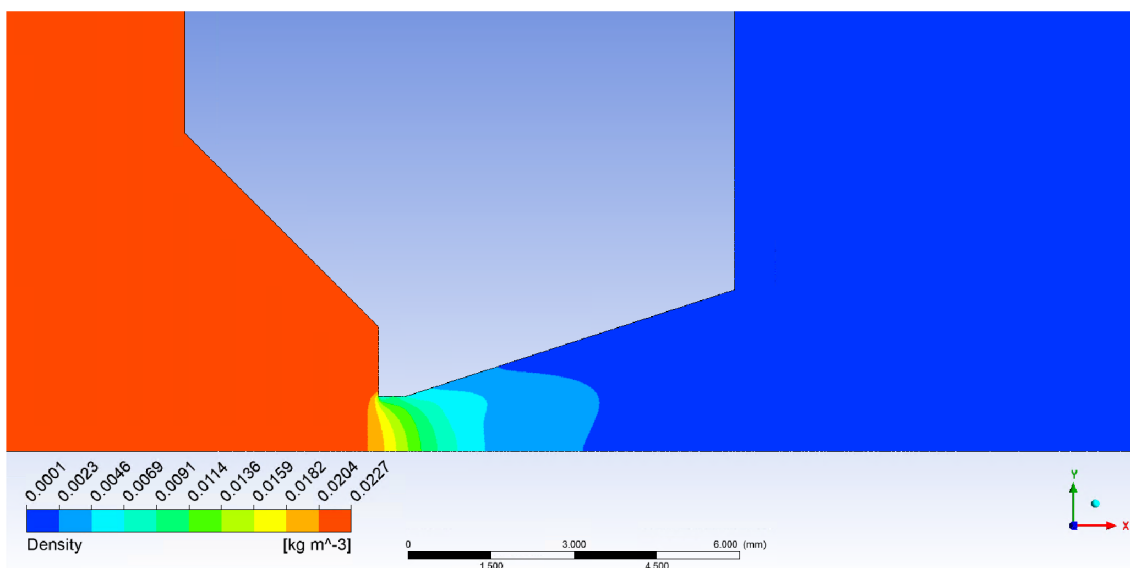
Obrázek 31 Průběh hustoty v závislosti na dráze primárního svazku elektronů



Obrázek 32 Rozložení hustoty pro variantu rozevření dýzy  $8^\circ$



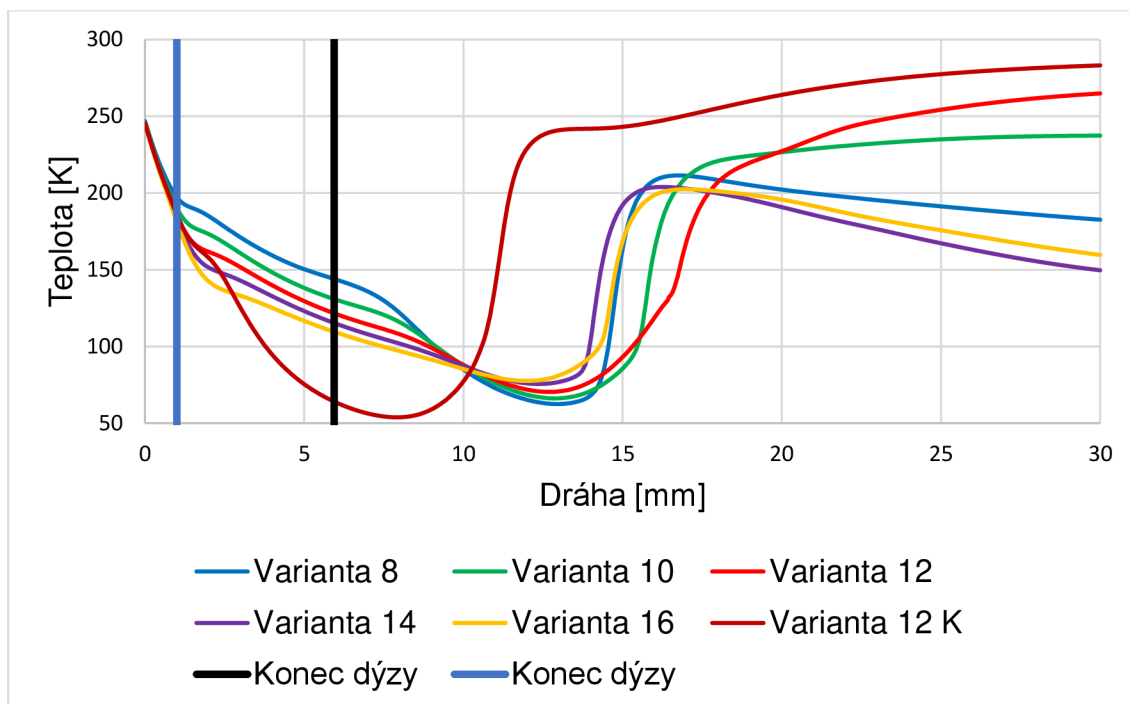
Obrázek 33 Rozložení hustoty pro variantu rozevření dýzy 12°



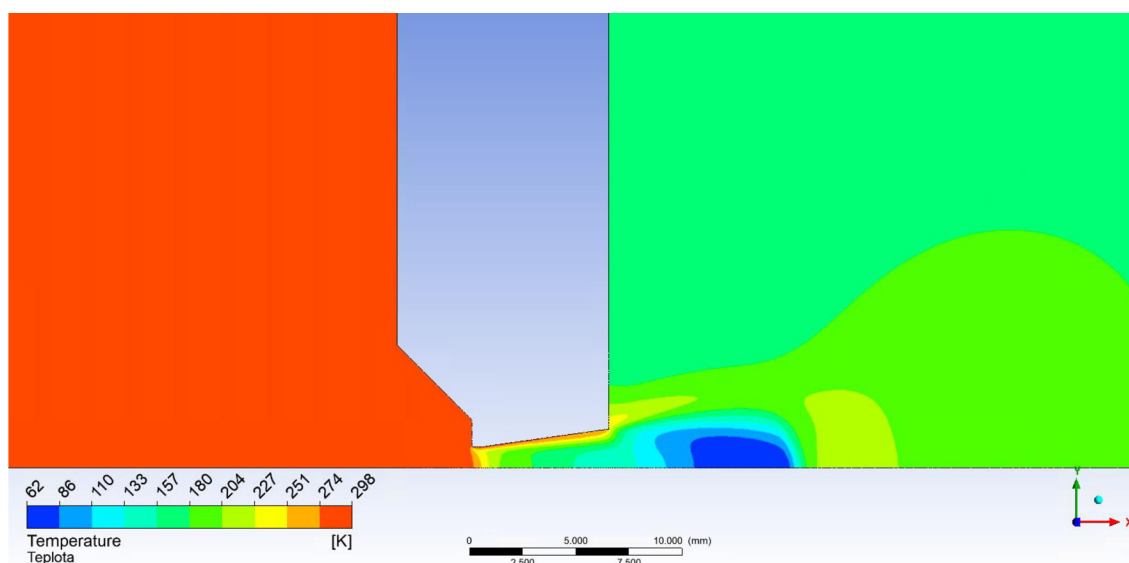
Obrázek 34 Rozložení hustoty pro variantu rozevření dýzy 18°

## 9.4 Rozložení teploty

Průběh závislosti na zvolené dráze je znázorněn na obr. 35. Je patrné, že teplota je závislá na veličinách rychlosti a tlaku, neboť tlak a teplota s nárůstem rychlosti v oblasti expanze plynu klesají přímo úměrně. Teploty zde dosahují kryogenních hodnot.

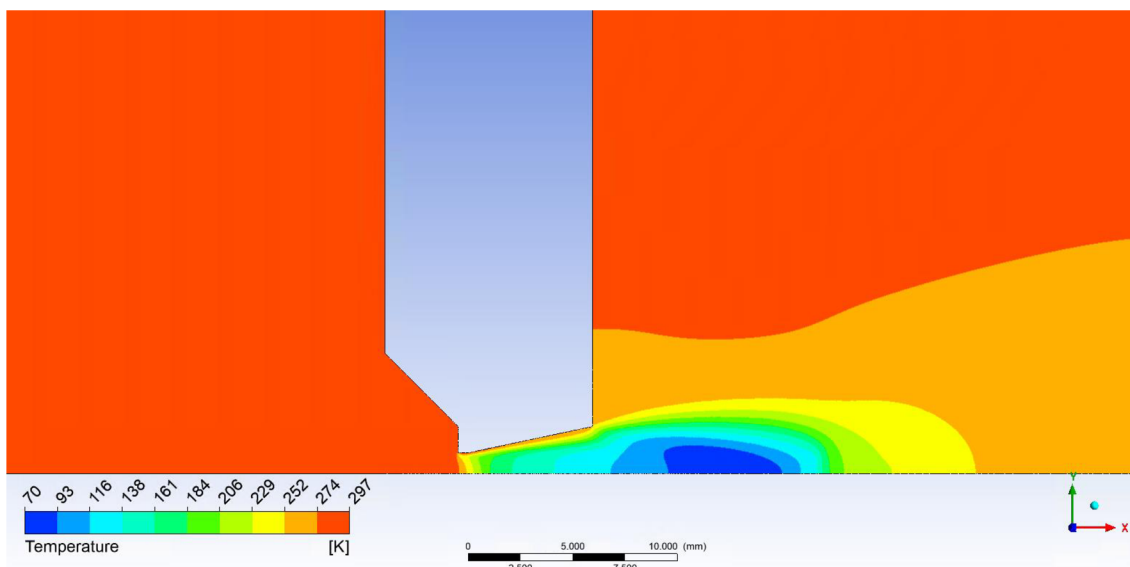


Obrázek 35 Rozložení teploty na dráze primárního svazku elektronů

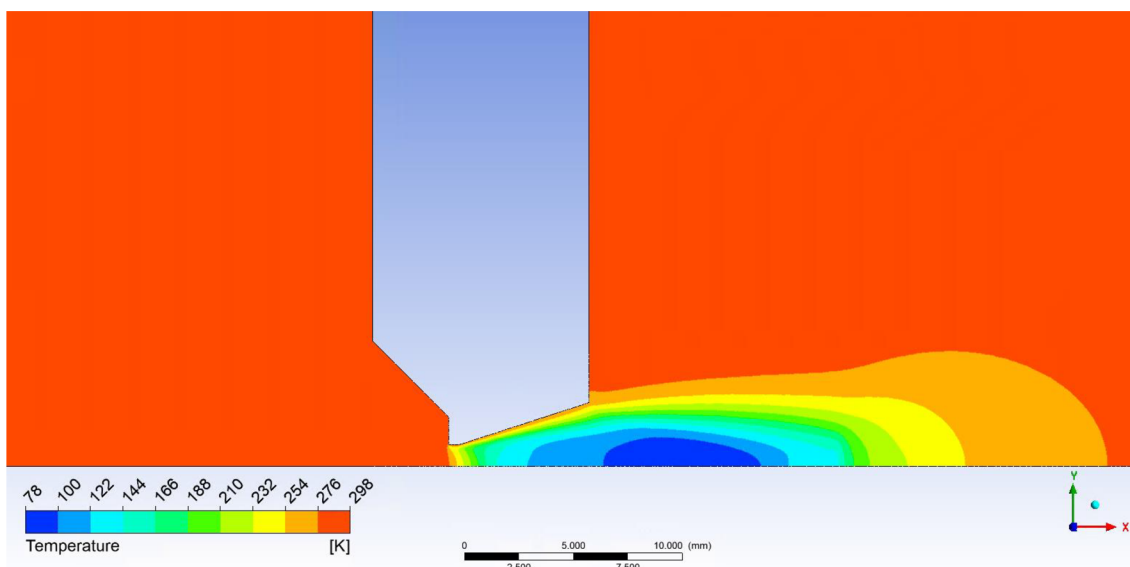


Obrázek 36 Rozložení teploty pro variantu rozevření dýzy 8°





Obrázek 37 Rozložení teploty pro variantu rozevření dýzy 12°



Obrázek 38 Rozložení teploty pro variantu rozevření dýzy 18°

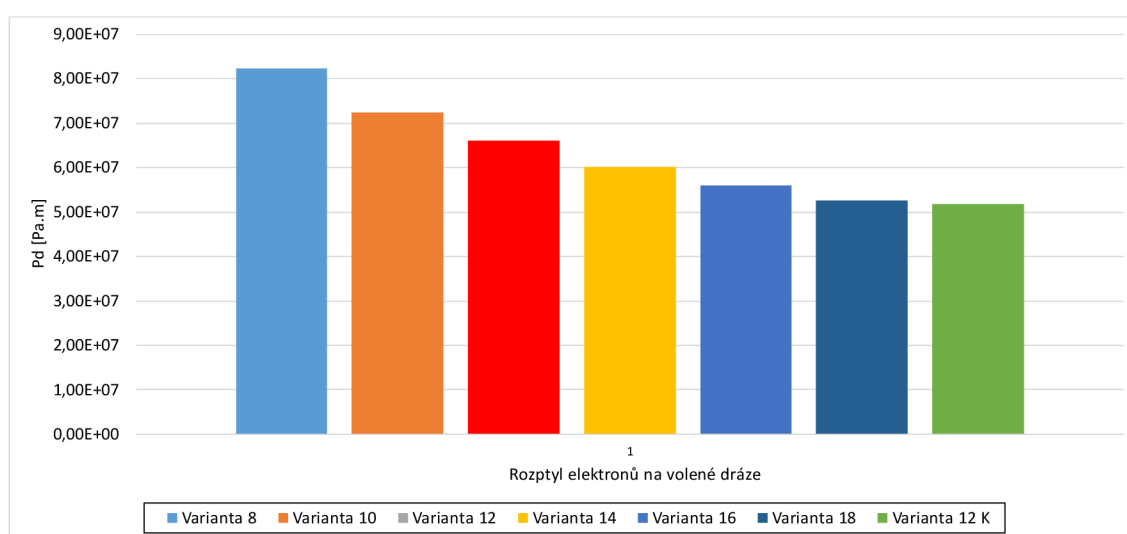
## 9.5 Rozptyl elektronů

Hlavní pozorované kritérium je pravděpodobnost disperze elektronů. Je odvozeno od daného tlaku probíhajícího na dráze primárního elektronového svazku. Rozptyl elektronů je přímo úměrný součinu hodnot tlaku a vzdálenosti, kterou při tomto tlaku elektron uběhne. Vzhledem k výrazné počáteční závislosti tlaku na vzdálenosti lze posuny elektronu na dráze od PLA2 až po PLA1 vyjádřit pomocí integrálu:

$$Pd = \int p(x)dx \quad \text{od } 0(=PLA1) \text{ do } d.$$

Na základě daného vztahu je na obr. 39 vynesena graf porovnávající předpokládaný rozptyl u řešených variant. Z grafu porovnávající jednotlivé varianty s rozlišnými úhly je patrné, že varianty s menším úhlem způsobující seškrčení proudu a následnou dodatečnou expanzí za dýzou jsou pro rozptyl elektronů horší než naopak přeexpandované dýzy s velkým úhlem. Vypovídající hodnotu má potom nejlépe hodnocená varianta zkrácené dýzy s výpočtovým průřezem.

Vyšší pravděpodobnost elektronové disperze přináší negativní efekt v podobě menšího množství dopadajících elektronů na testovaný vzorek a celkového zhoršení obrazu. Proto je žádoucí udržovat rozptyl co nejmenší.



Obrázek 39 Pravděpodobnost disperze elektronů

## ZÁVĚR

V této diplomové práci bylo třeba nejprve zpracovat a nastudovat informace potřebné pro pochopení daného problému a jeho řešení.

První kapitola obsahuje všeobecné informace týkající se problematiky mikroskopů a jejich rozdělení, zejména pak mikroskopů elektronových a také zdroje elektronů.

Druhá kapitola je zaměřena na transmisní a rastrovací elektronovou mikroskopii.

Kapitola třetí se věnuje již konkrétně environmentálnímu elektronovému mikroskopu, kterého se bude týkat následující studie.

Následující kapitola slouží k seznámení se studií Dr. Daniláta a jeho statistickým přístupem k simulaci čerpání diferenciallyně čerpané komory pomocí metody Monte Carlo, dále metodou mechaniky kontinua, která je využívána na Ústavu přístrojové techniky AVČR a Ústavu elektrotechnologie VUT v Brně pomocí systému ANSYS Fluent a následné studii srovnání, která byla na ústavu provedena.

Pátá kapitola objasňuje problematiku kritického proudění plynů a Machova čísla.

Následující kapitola se týká počítačových systému použitých při řešení problému, kterými jsou Solidworks a ANSYS Fluent.

Na závěr teoretické části je pak představena experimentální komora navržená pro environmentální elektronový mikroskop a také dýza, která bude předmětem simulací.

V diplomové práci byly provedeny analýzy proudění plynu v experimentální komoře s dýzou s výpočtovým průměrem řešeným pro poměr tlaků 2000 Pa ku 100 Pa. Pro daný výpočtový průřez byly voleny různé variantami úhlu rozevření dýzy od nejpoužívanější verze 12° po varianty se zúženým nebo naopak rozevřeným úhlem a s variantou se zkrácenou délkou. Výsledky ukázaly, že verze s úhlem 12° dává nejlepší výsledky pro řízenou expanzi plynu, ale pro průchod primárního elektronového paprsku vyhovují nejlépe termodynamické podmínky rozšířené expanze plynu a zkrácené verze.

Výsledky jsou podkladem pro další plánované experimenty na dané komoře.

## LITERATURA

- [1] Jana Nebesářová. Elektronová mikroskopie pro biology [online]. České Budějovice, 2001 [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: <http://triton.paru.cas.cz/old-lem/book/Podkap/1.0.html>
- [2] Elektronový mikroskop [online]. 2017 [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: [http://www.wikiskripta.eu/index.php/Elektronov%C3%BD\\_mikroskop](http://www.wikiskripta.eu/index.php/Elektronov%C3%BD_mikroskop)
- [3] ŠAFÁŘOVÁ, Klára. Transmisní elektronová mikroskopie [online]. Olomouc, 2008 [cit. 2020-10-07]. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/texty/TEM-teorie.pdf>. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [4] Klára Šafářová. Skenovací (rastrovací) elektronová mikroskopie [online]. 2009 [cit. 2020-10-07]. Dostupné z: [http://nanosystemy.upol.cz/download/2009/12-WS/safarova\\_sem.pdf](http://nanosystemy.upol.cz/download/2009/12-WS/safarova_sem.pdf)
- [5] JÄGER, V, V. GÄRTNEROVÁ: Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura [online]. 2008 [cit. 2020-10-07]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>
- [6] NOVÁK, Pavel. Scintilační a ionizační detektor sekundárních elektronů pro REM pracující při vyšším tlaku v komoře vzorku [online]. Brno, 2009 [cit. 2020-10-10]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/2888> . Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Jiráček, CSc.
- [7] DEBBIE, J. Stokes. Principles and practice of variable pressure/environmental scanning electron microscopy (VP-ESEM). Chichester: Wiley, 2008, 7. vyd. 221 s. ISBN 978-0-470-06540-2.
- [8] BEDNÁŘ, E. Analýza vlivu proudění plynu v oblasti umístění vzorku v komoře environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 112s. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Mgr. Jiří Maxa, Ph.D
- [9] DANILATOS, G.D. ESEM Science and Technology [cit. 2020-11-3]. Dostupné z: <http://www.danilat.com>
- [10] KOZUBKOVÁ, M.; BLEJCHAŘ, T.; BOJKO, M. Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti. Ostrava : 2011. Skriptum. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
- [11] LEPLTOVÁ, K. Matematicko - fyzikální analýza dynamického tlaku pro experimentální diferenciální komoru.. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 85 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.
- [12] URUBA, V. Turbulence. Praha, 2009, 141 s. Skriptum. ČVUT v Praze, Fakulta strojní
- [13] ANSYS [online]. Canonsburg: ANSYS [cit.2020-11-12]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/>

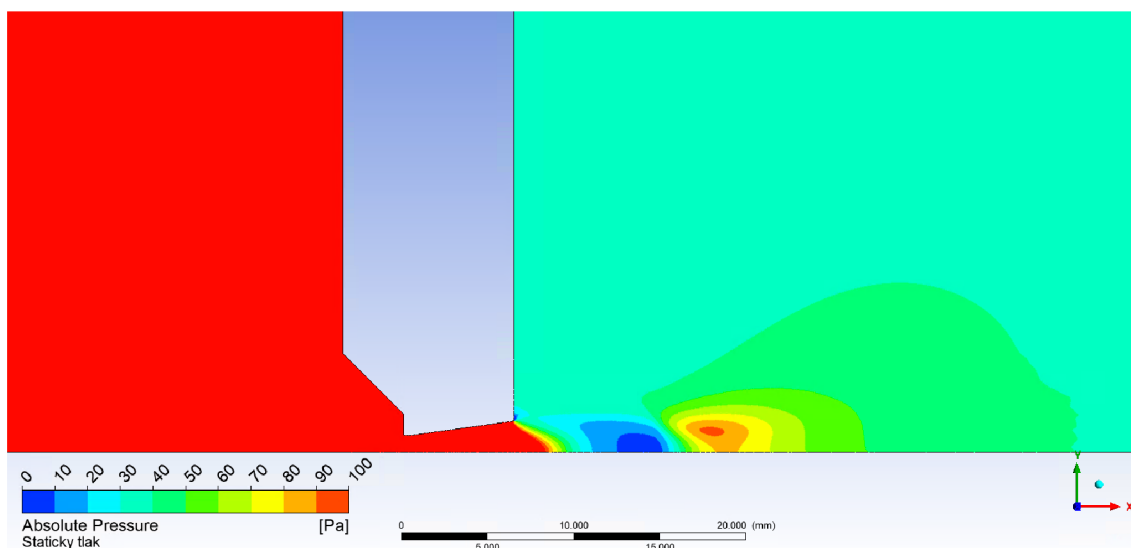
- [14] ŠABACKÁ, Pavla. Analýza nadzvukového proudění v experimentální komoře při vložení tlakových a teplotních sond. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126865>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D
- [15] SolidWorks – 3D CAD navrhování. SolidVision, s.r.o. [online]. Brno: SolidVision [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/solidworks/>
- [16] Informace o společnosti [online]. Qaltham (Massachussets): Dassault Systèmes SolidWorks, 2017 [cit.2020-11-20]. Dostupné z: <https://www.solidworks.cz/uvodni-stranka/menu-horni/informace-o-firme/informace-o-spolecnosti/>
- [17] ANSYS [online]. Canonsburg: ANSYS [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/>
- [18] ŠKORPÍK, Jiří. Proudění plynů a par tryskami, Transformační technologie, 2006-02, [last updated 2020-12-10]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293.[cit. 2020-12-10] Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/40.html>
- [19] SALGA, J.; HOŘENÍ, B. Tabulky proudění plynu. UNOB Brno : 1997
- [20] KLUSÁČKOVÁ, Petra. Analýzy čerpání v experimentální komoře pro elektronový mikroskop pomocí systému ANSYS. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119708>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.
- [21] DEAN, Thomas. Structural and Functional Connectomics [online]. [cit. 2020-10-20]. Dostupné z: <http://cs.brown.edu/people/tld/note/blog/14/10/16/index.html>
- [22] Dejč, M.J. Technická dynamika plynů; Státní nakladatelství technické literatury: Praha, 1967.
- [23] Danilatos, G.D. Figure of merit for environmental SEM and its implications. J. Microsc. 2011, 244, 159–169
- [24] Zeman, R. Lavalova dýza [online]. [cit.2022-03-20]. Dostupné z <https://onlineschool.cz/termomechanika/lavalova-dyza/>

# SEZNAM PŘÍLOH

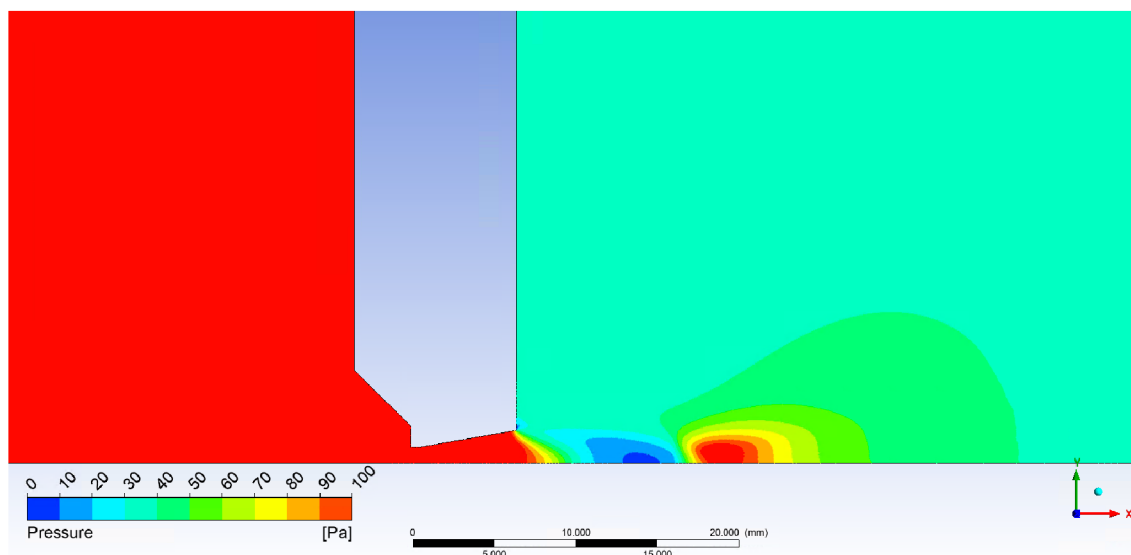
PŘÍLOHA A - VÝSLEDKY SIMULACÍ.....	55
------------------------------------	----

# Příloha A - VÝSLEDKY SIMULACÍ

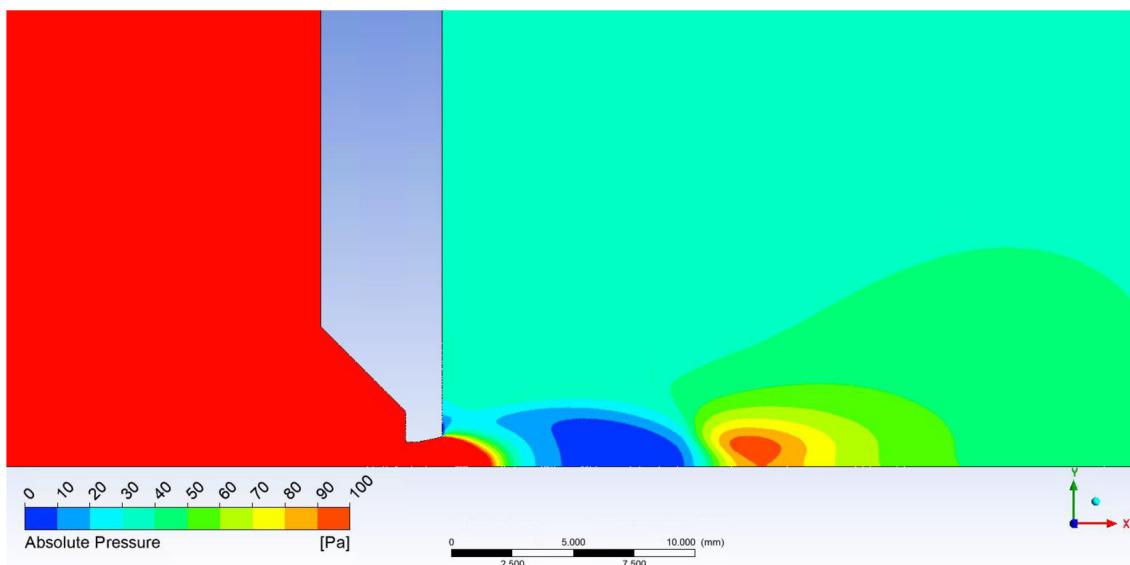
## A.1 Rozložení statického tlaku v dýze a za dýzou



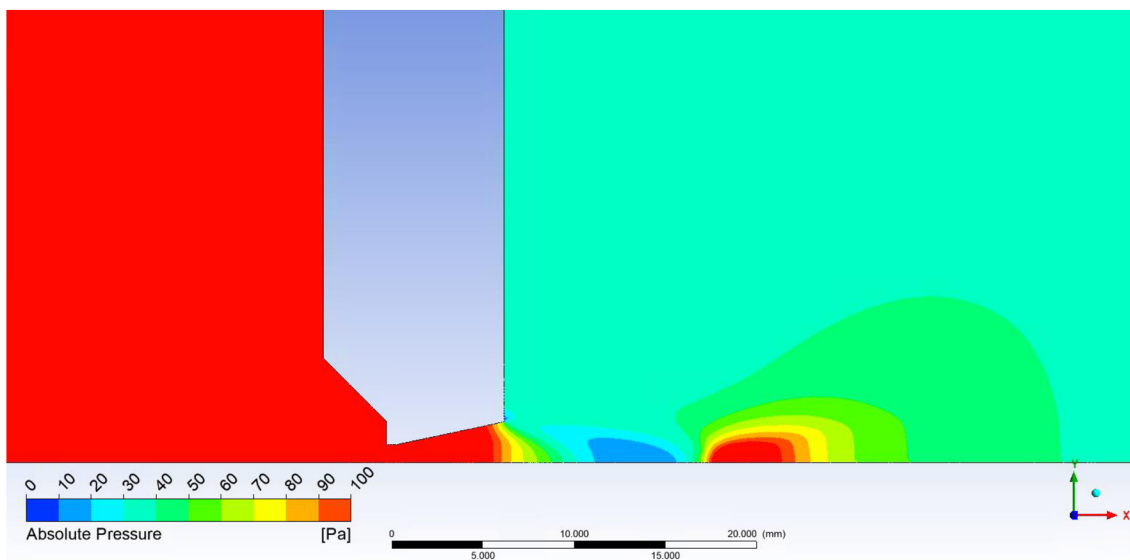
Obrázek 40 Varianta rozevření dýzy 8°



Obrázek 41 Varianta rozevření dýzy 10°

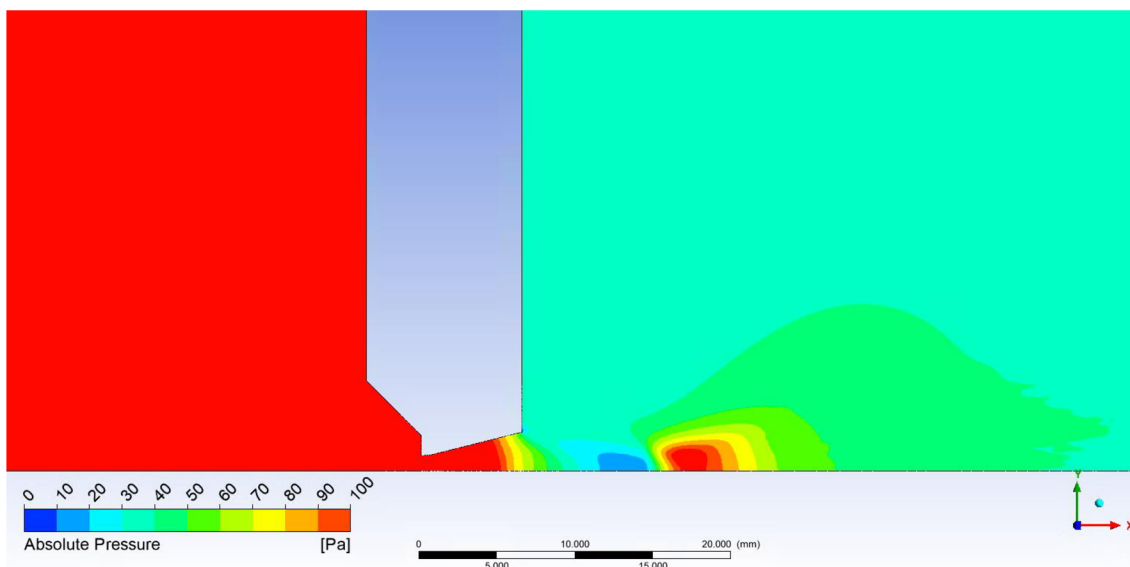


Obrázek 42 Varianta rozevření zkrácené dýzy  $12^\circ$

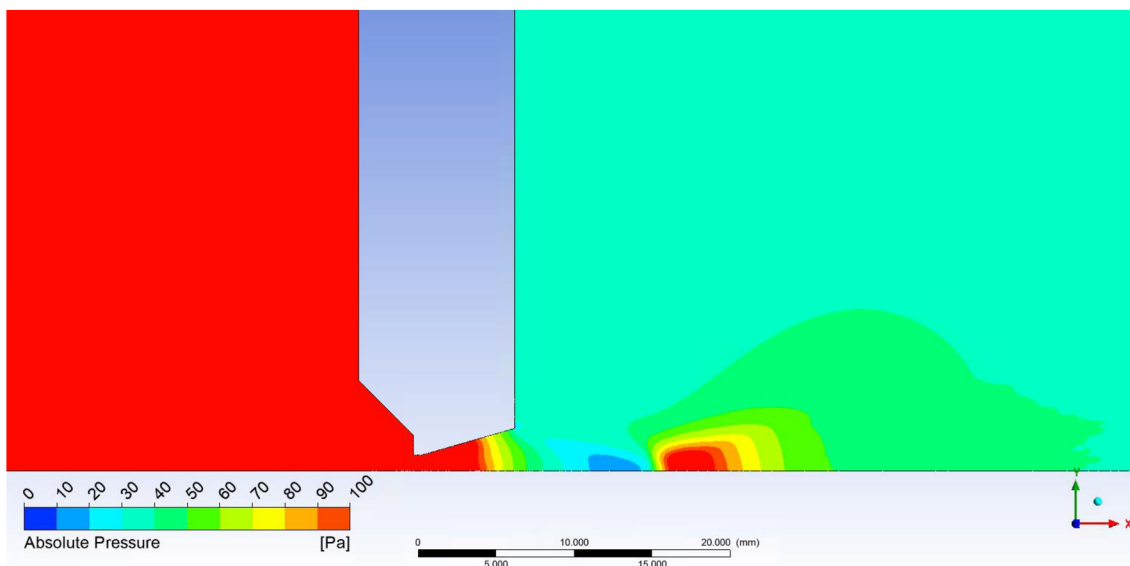


Obrázek 43 Varianta rozevření dýzy  $12^\circ$

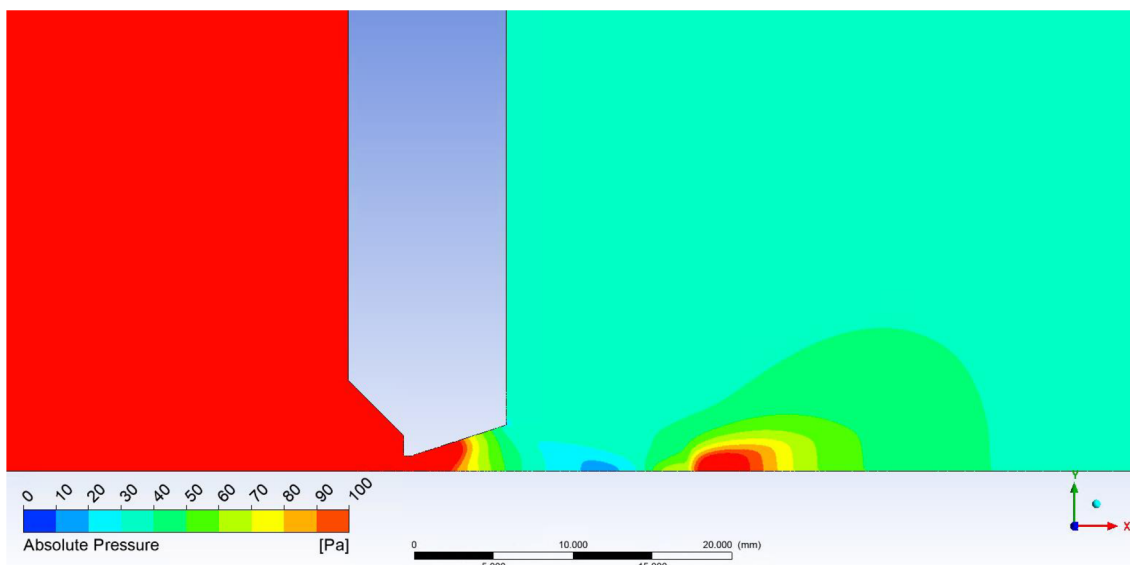




Obrázek 44 Varianta rozevření dýzy 14°

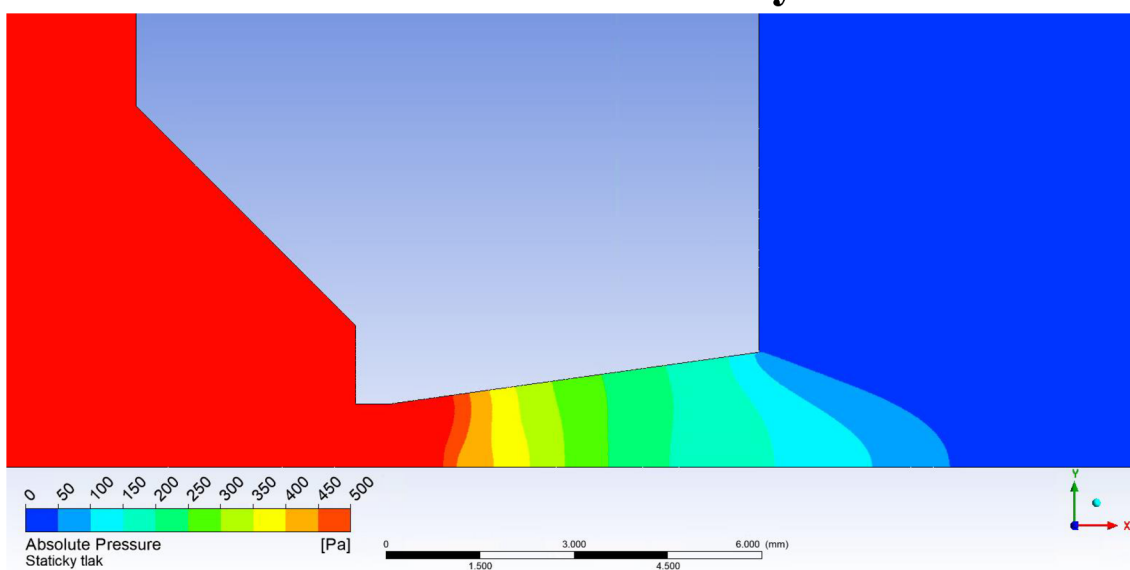


Obrázek 45 Varianta rozevření dýzy 16°

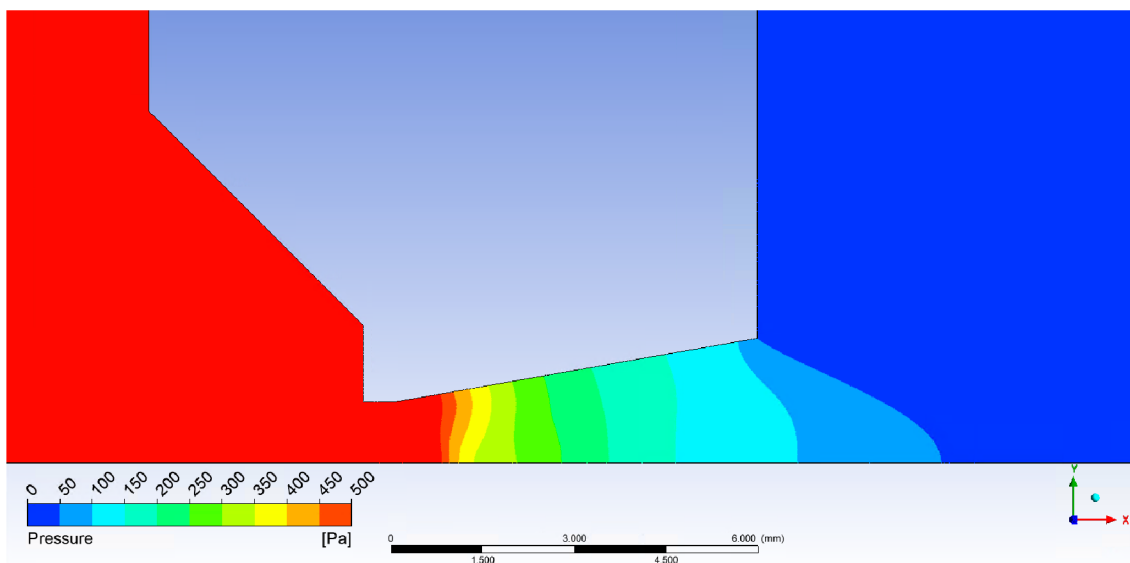


Obrázek 46 Varianta rozevření dýzy 18°

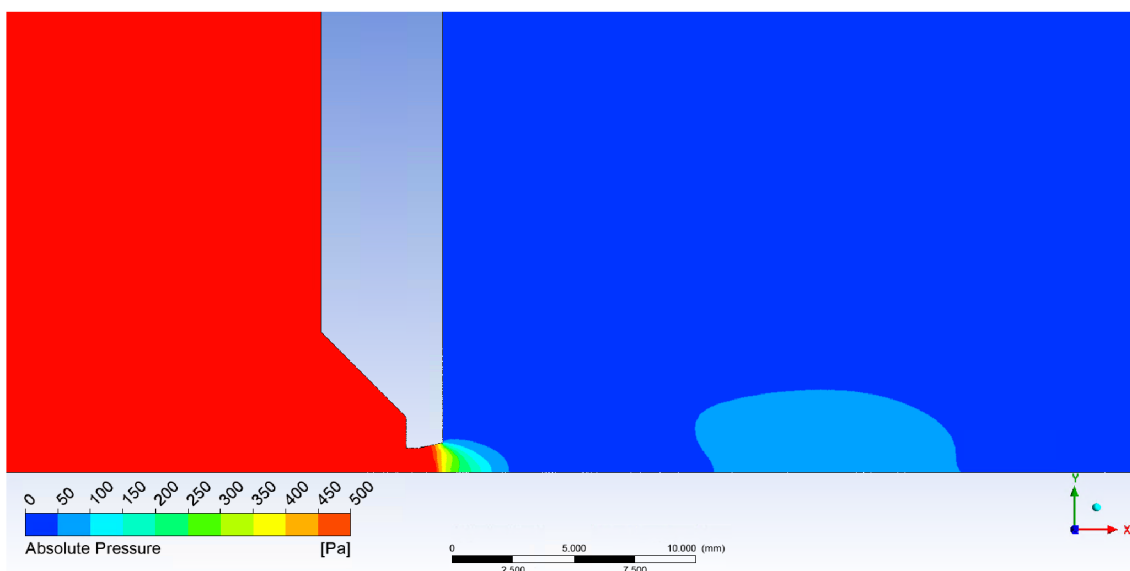
## A.2 Rozložení statického tlaku v dýze



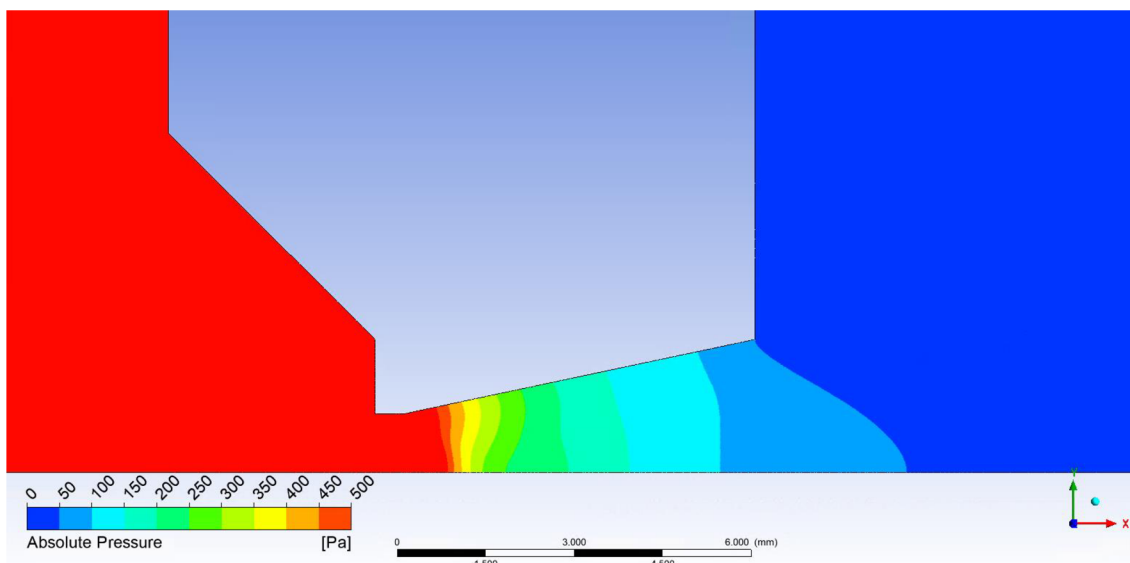
Obrázek 47 Varianta rozevření dýzy 8°



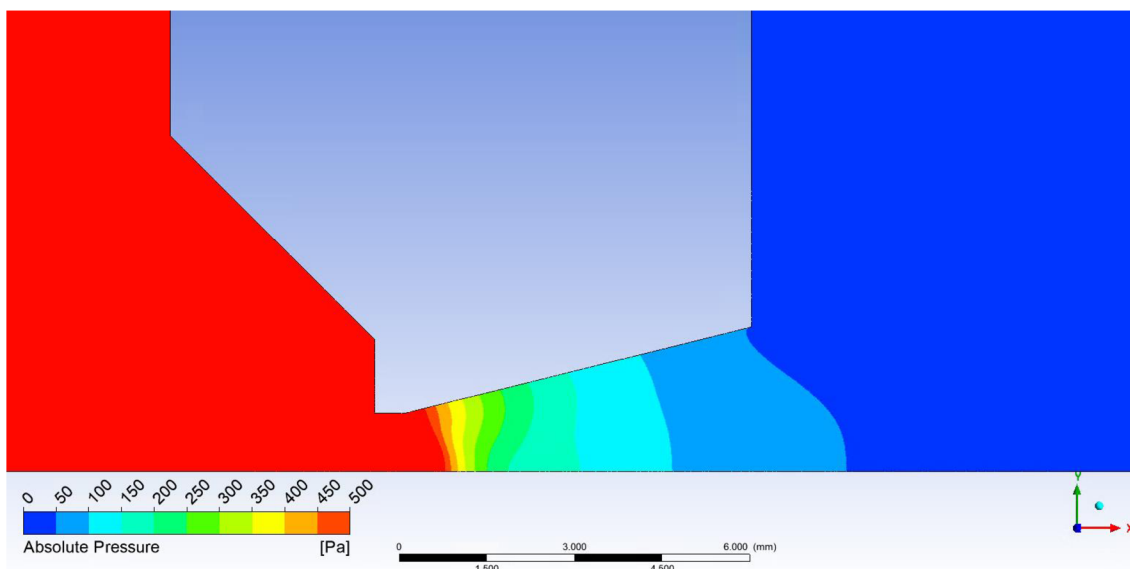
Obrázek 48 Varianta rozevření dýzy  $10^\circ$



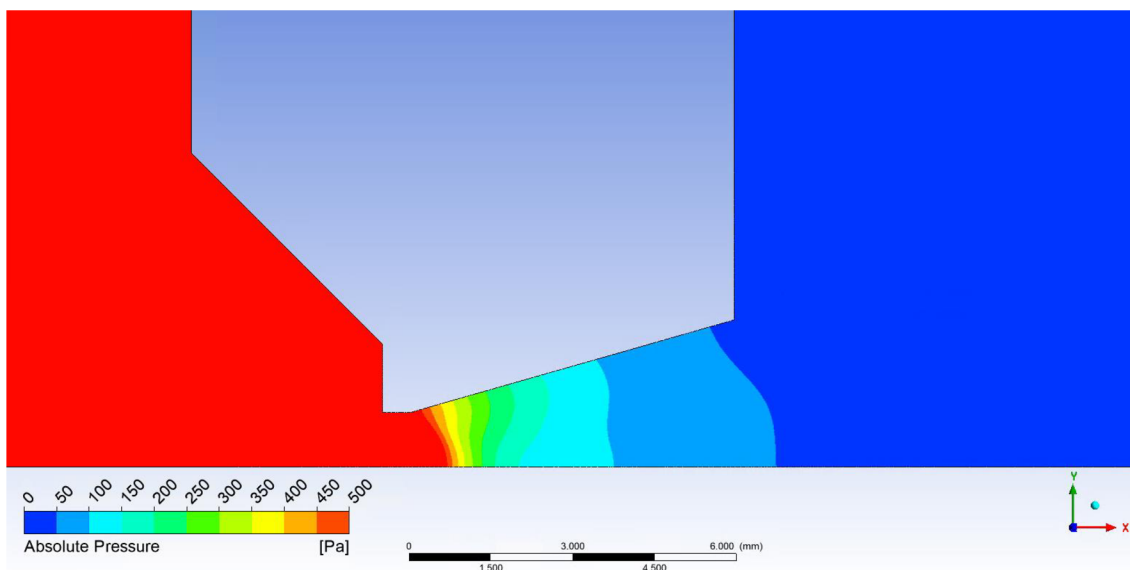
Obrázek 49 Varianta rozložení zkrácené dýzy  $12^\circ$



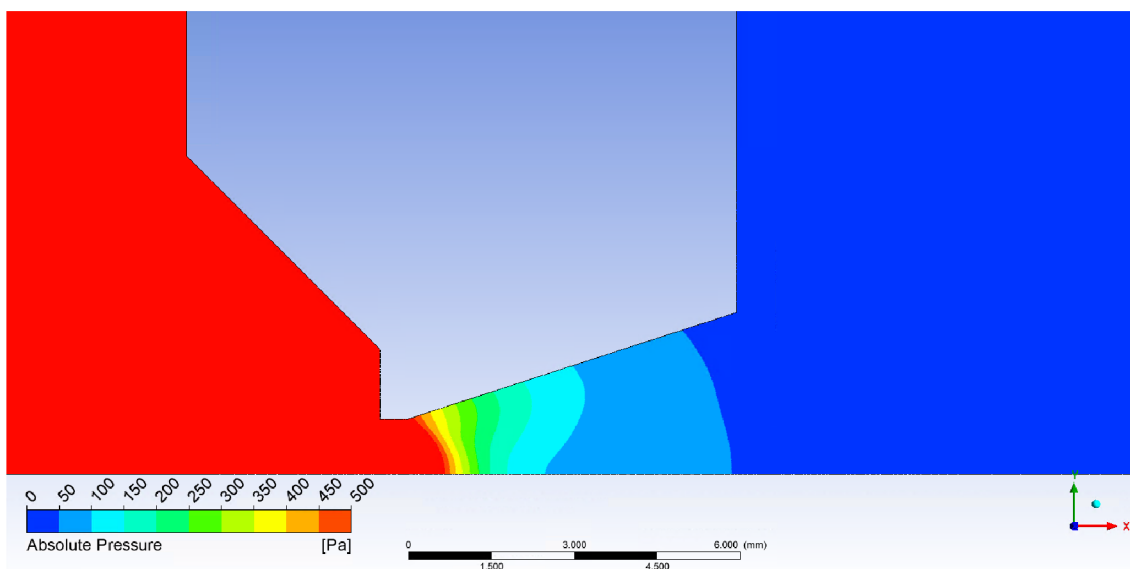
Obrázek 50 Varianta rozevření dýzy 12°



Obrázek 51 Varianta rozevření dýzy 14°

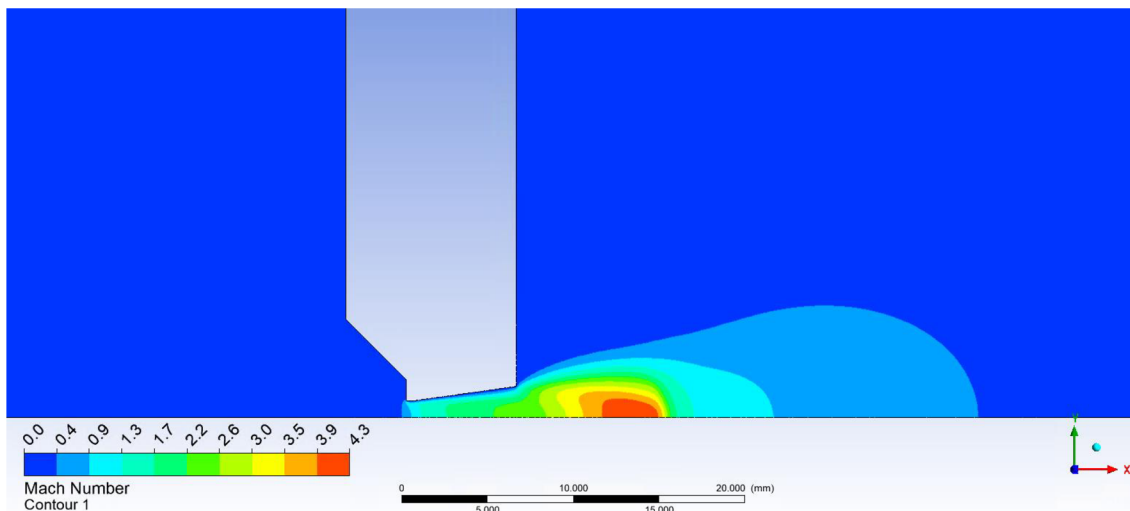


Obrázek 52 Varianta rozevření dýzy  $16^\circ$

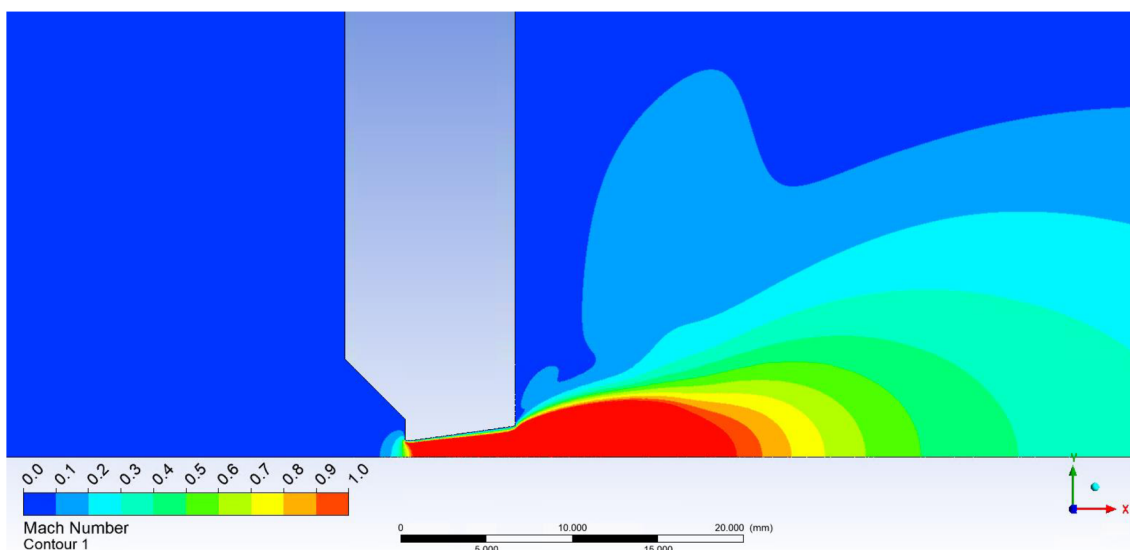


Obrázek 53 Varianta rozevření dýzy  $18^\circ$

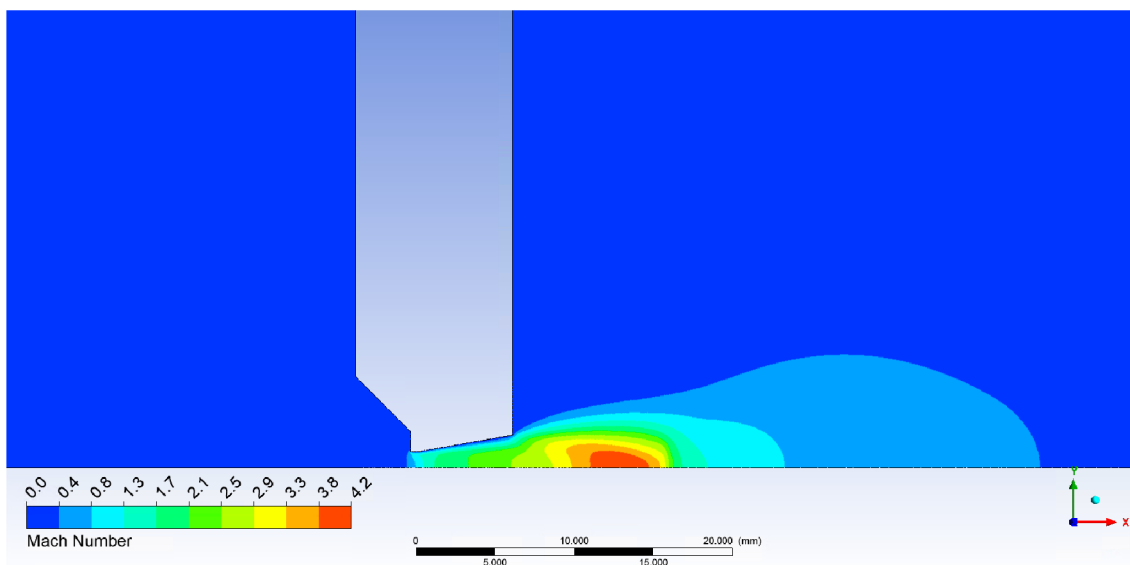
### A.3 Rozložení Machova čísla uvnitř dýzy a za dýzou



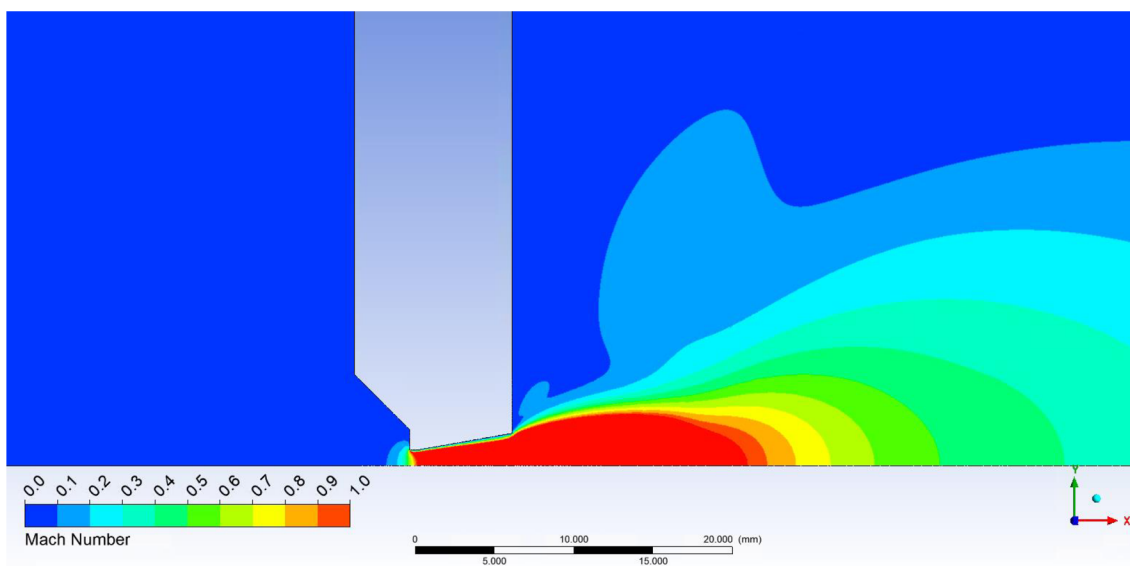
Obrázek 54 Varianta rozevření dýzy  $8^\circ$



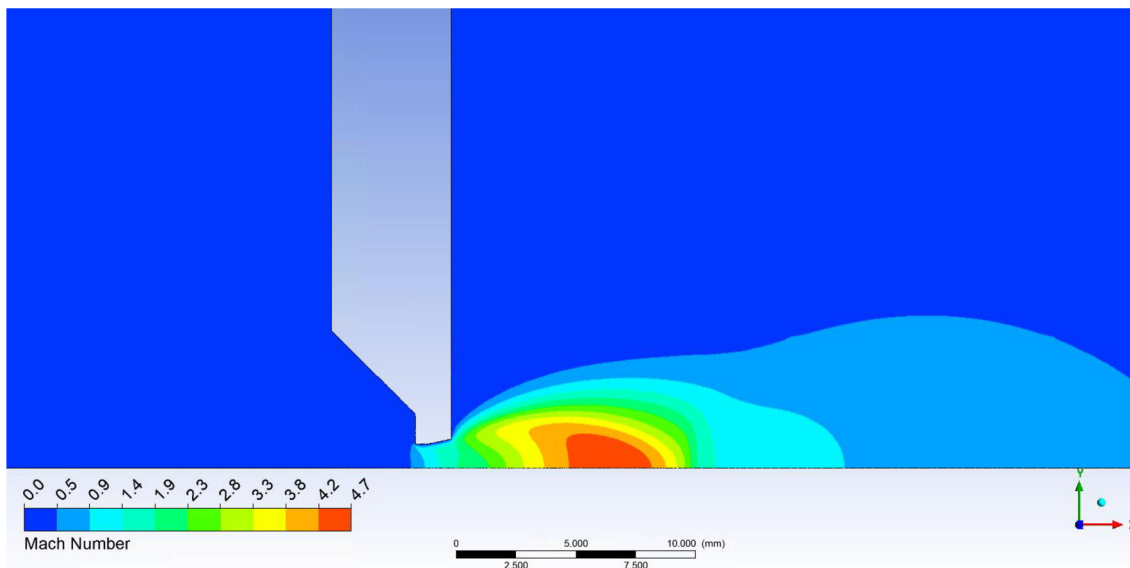
Obrázek 55 Varianta rozevření dýzy  $8^\circ$



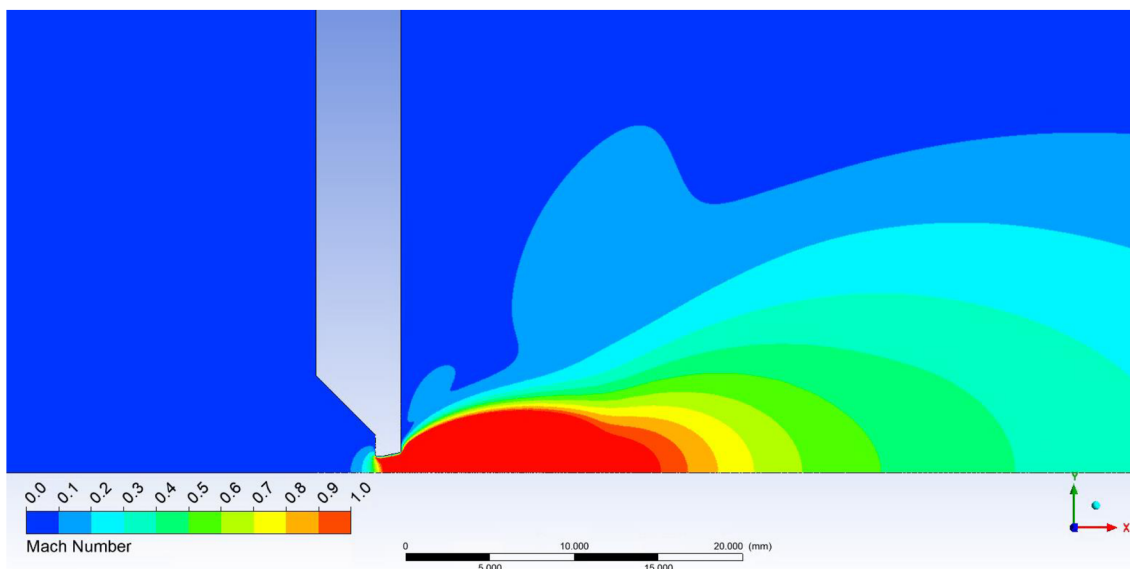
Obrázek 56 Varianta rozevření dýzy  $10^\circ$



Obrázek 57 Varianta rozevření dýzy  $10^\circ$

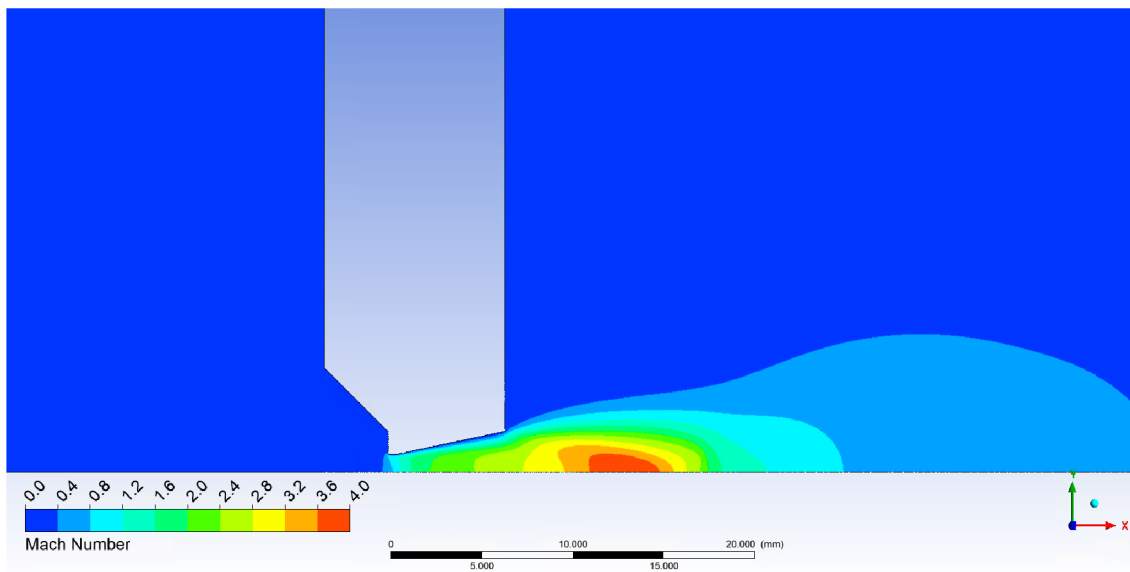


Obrázek 58 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12°

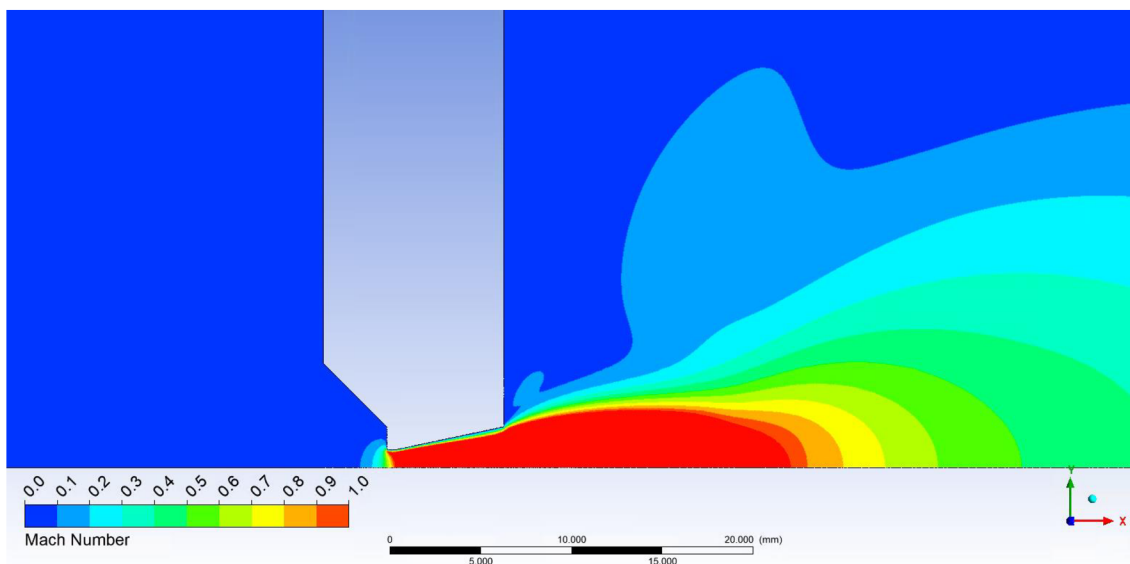


Obrázek 59 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12°

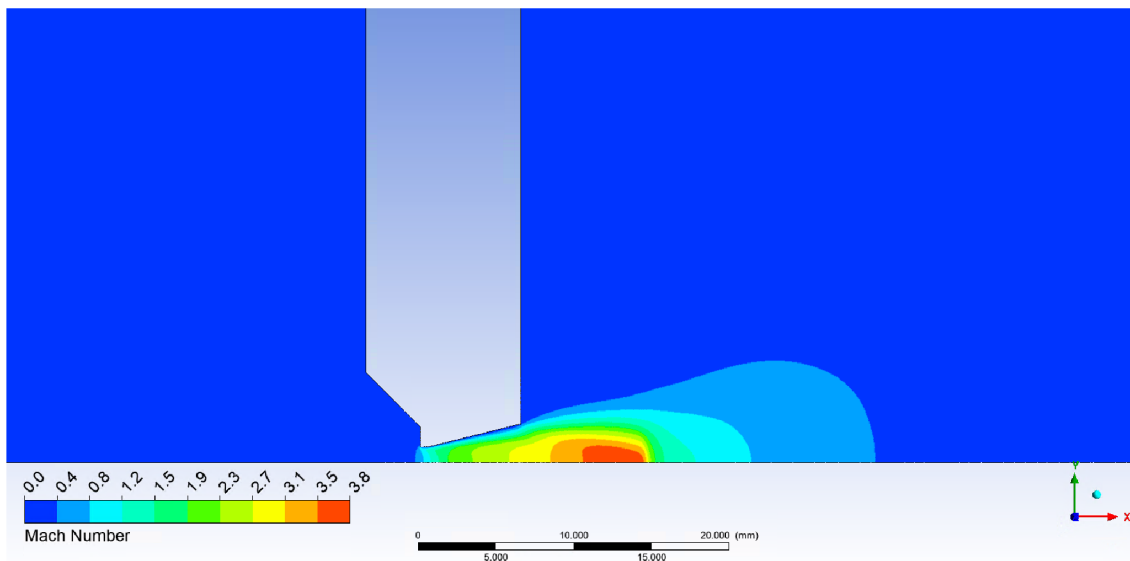




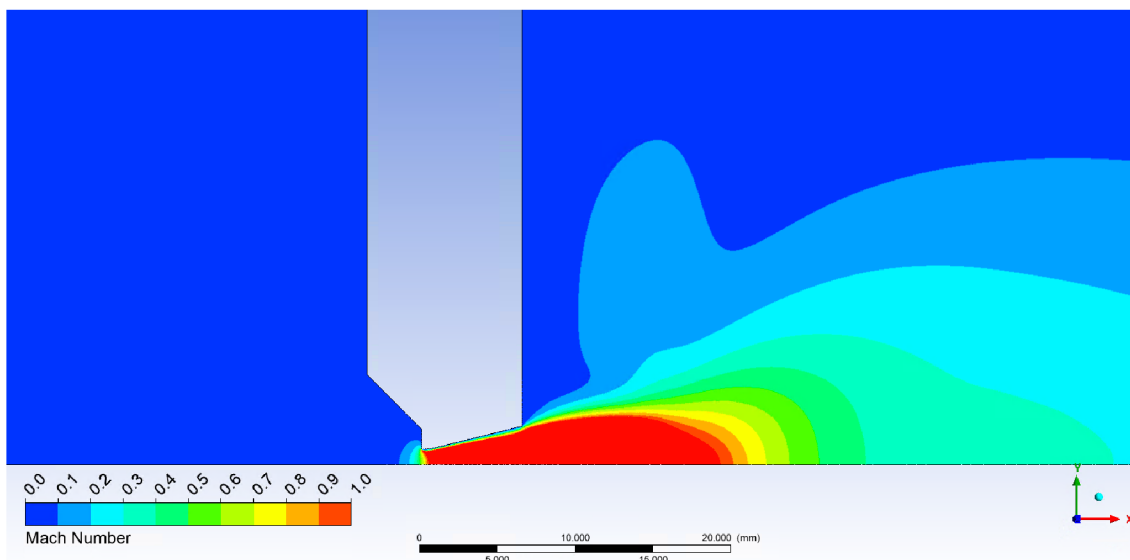
Obrázek 60 Varianta rozevření dýzy  $12^\circ$



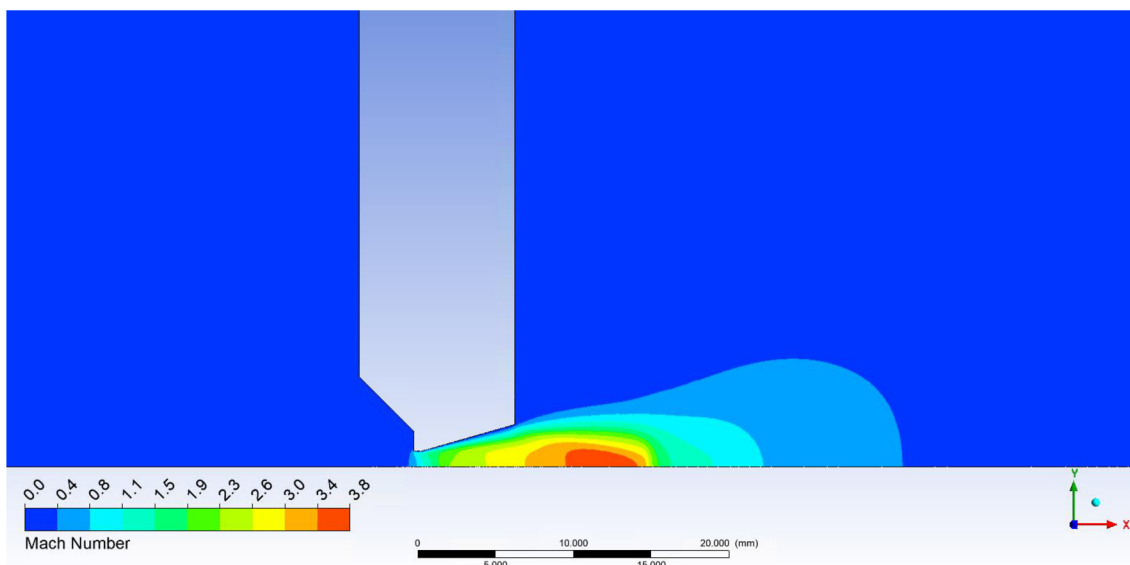
Obrázek 61 Varianta rozevření dýzy  $12^\circ$



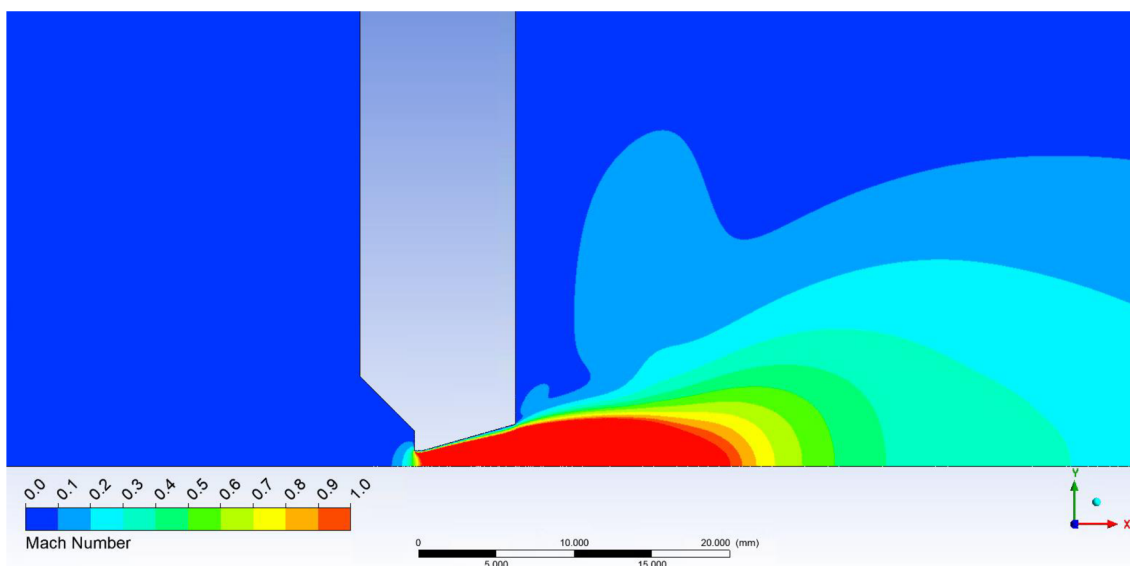
Obrázek 62 Varianta rozevření dýzy  $14^\circ$



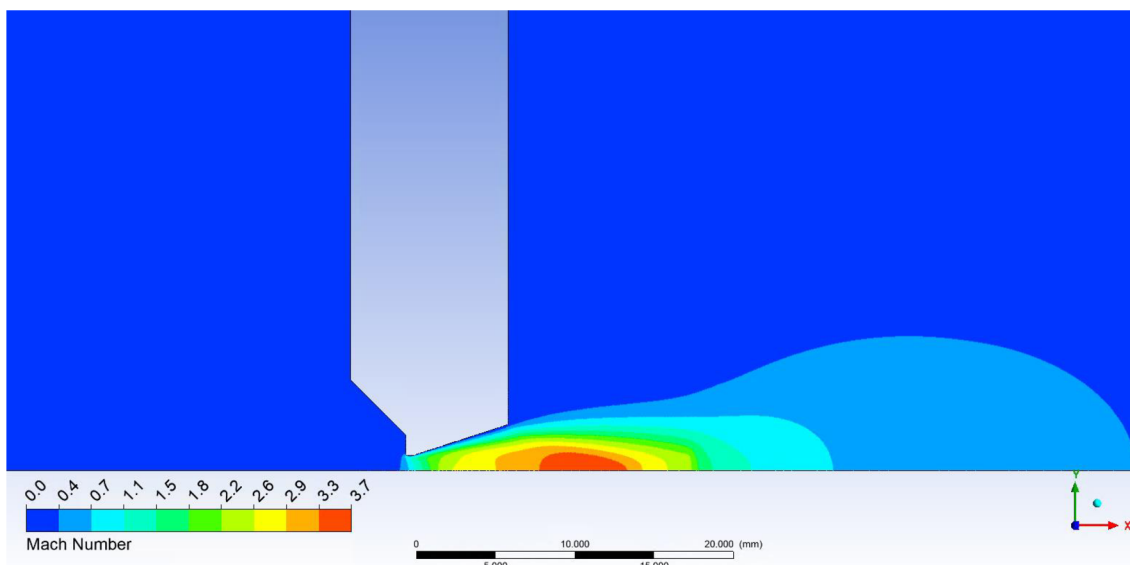
Obrázek 63 Varianta rozevření dýzy  $14^\circ$



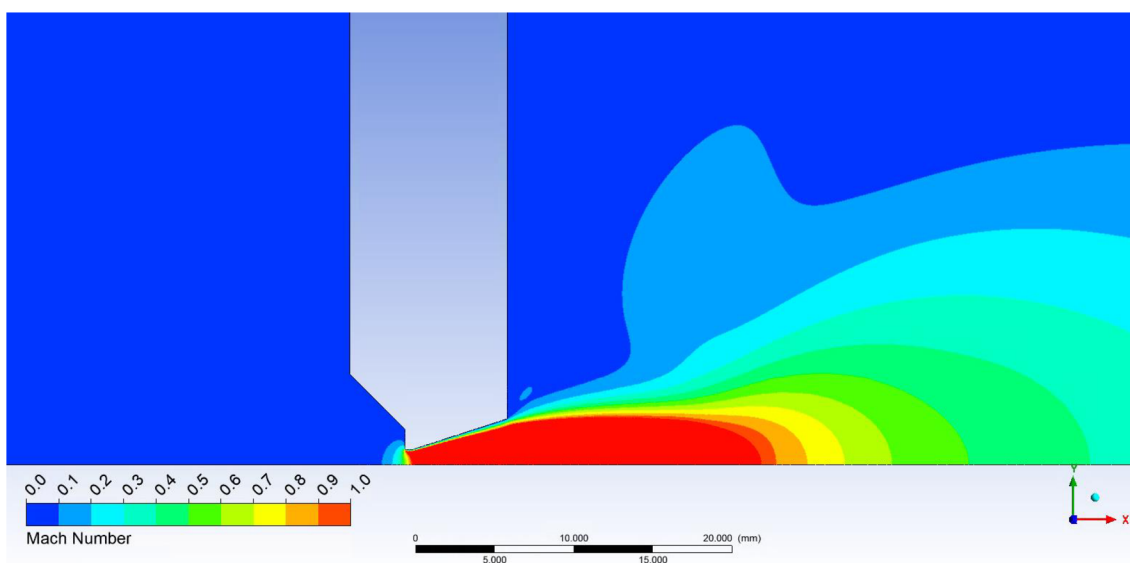
Obrázek 64 Varianta rozevření dýzy  $16^\circ$



Obrázek 65 Varianta rozevření dýzy  $16^\circ$

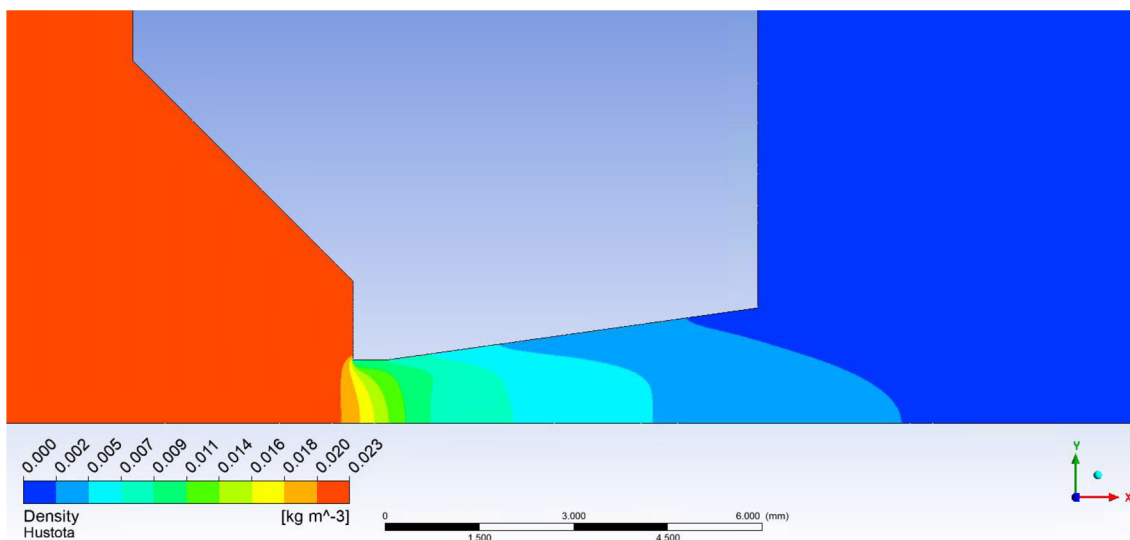


Obrázek 66 Varianta rozevření dýzy  $18^\circ$

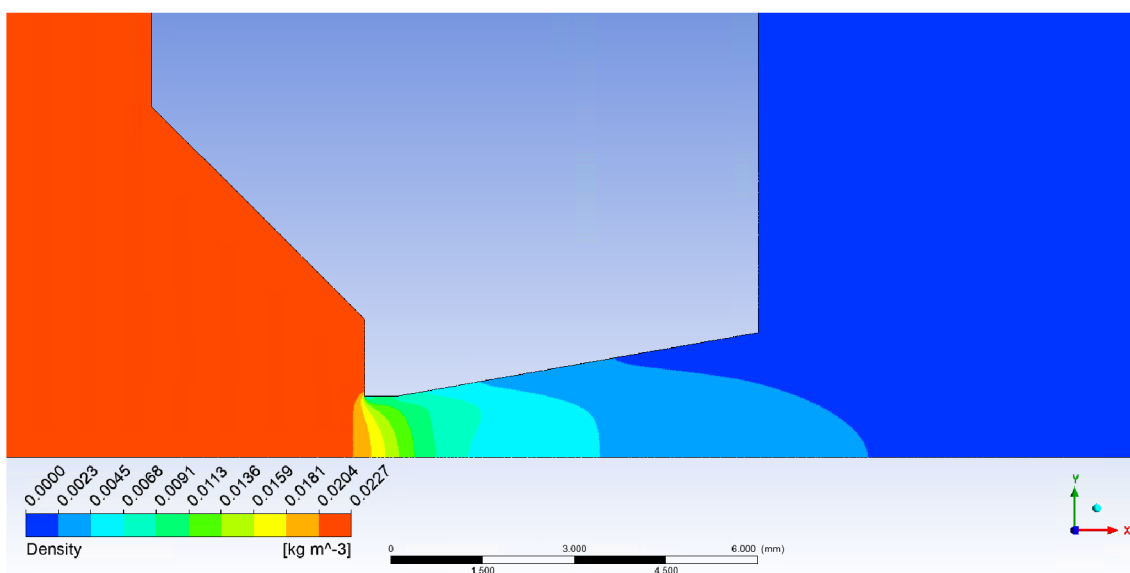


Obrázek 67 Varianta rozevření dýzy  $18^\circ$

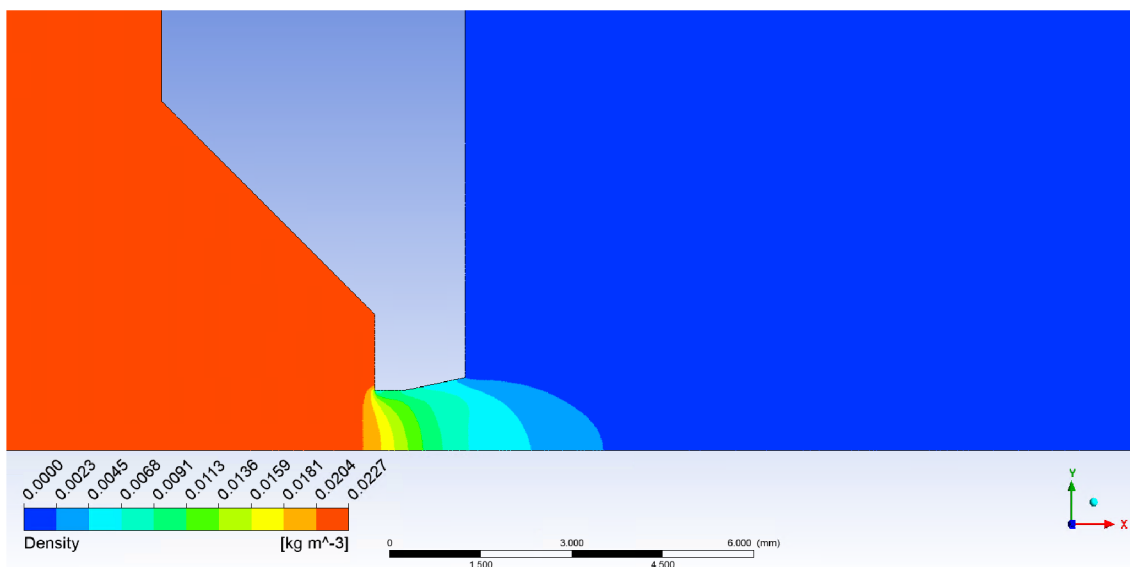
## A.4 Rozložení hustoty



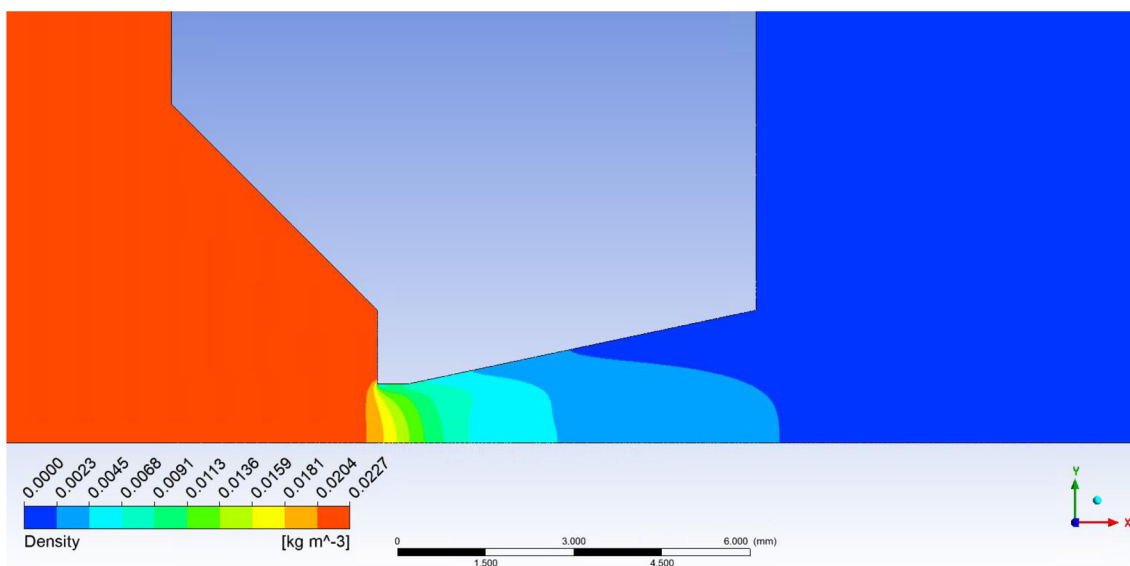
Obrázek 68 Varianta rozevření dýzy 8°



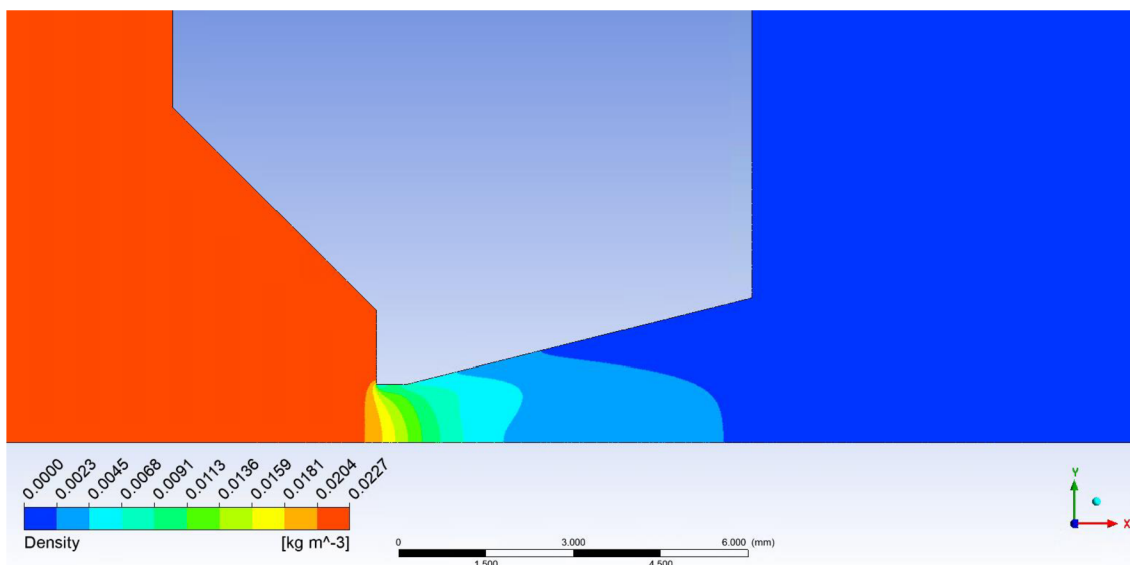
Obrázek 69 Varianta rozevření dýzy 10°



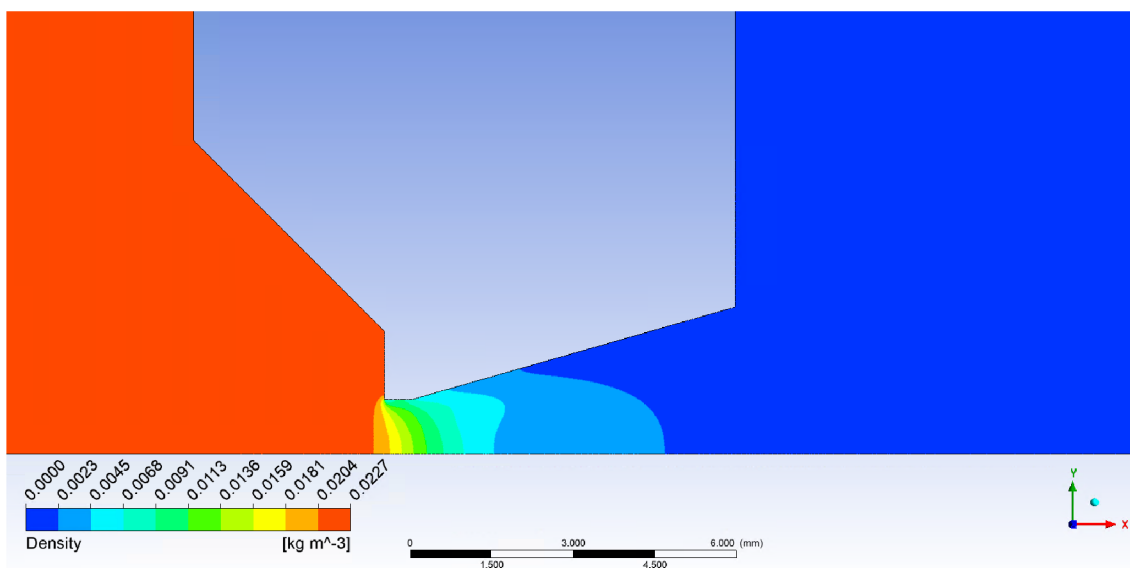
Obrázek 70 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12°



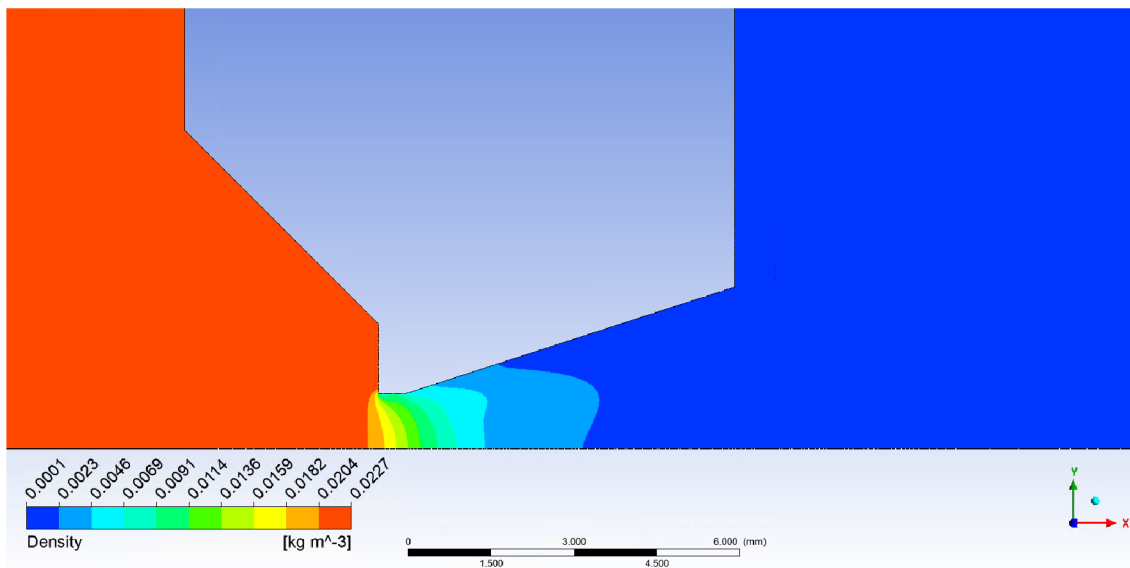
Obrázek 71 Varianta rozevření dýzy 12°



Obrázek 72 Varianta rozevření dýzy 14°

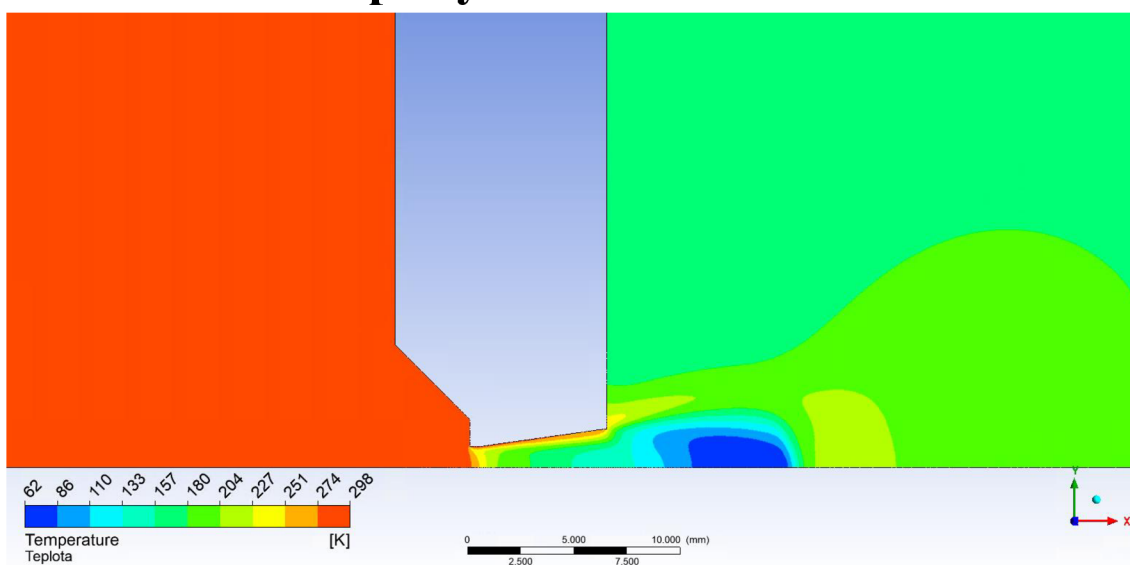


Obrázek 73 Varianta rozevření dýzy 16°



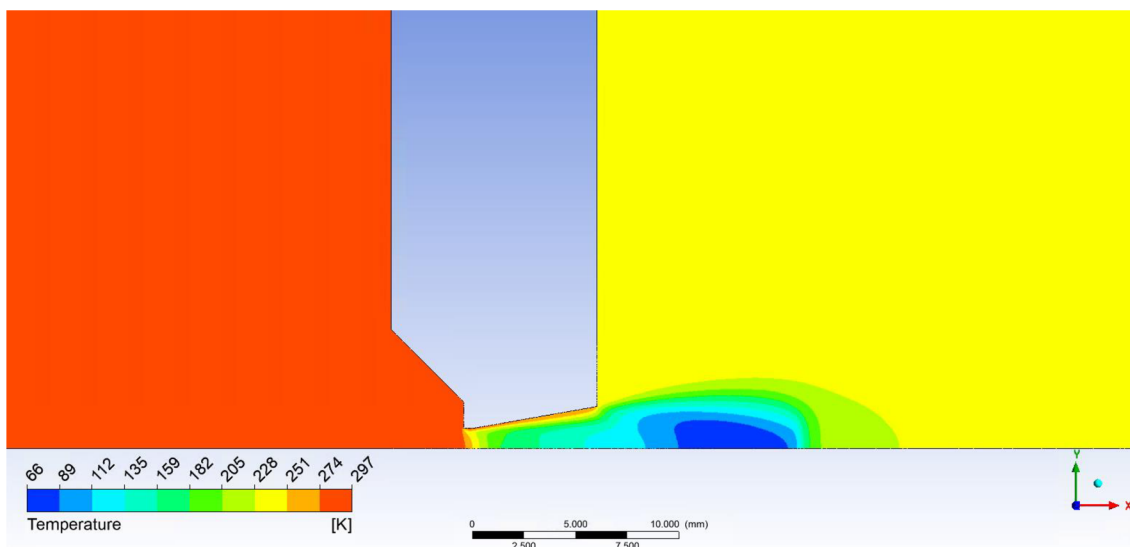
Obrázek 74 Varianta rozevření dýzy 18°

## A.5 Rozložení teploty

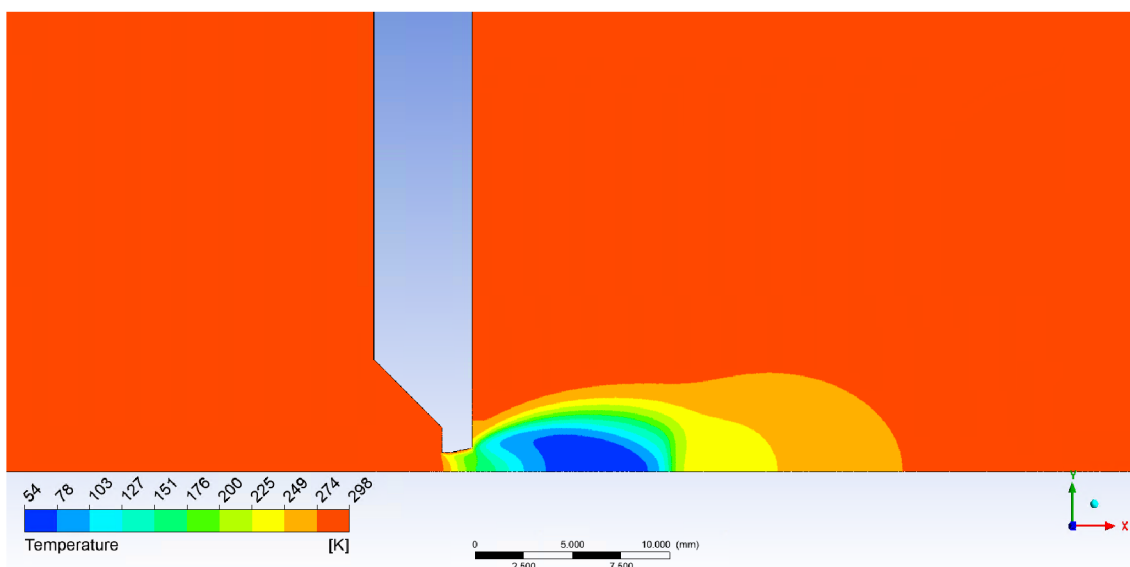


Obrázek 75 Varianta rozevření dýzy 8°

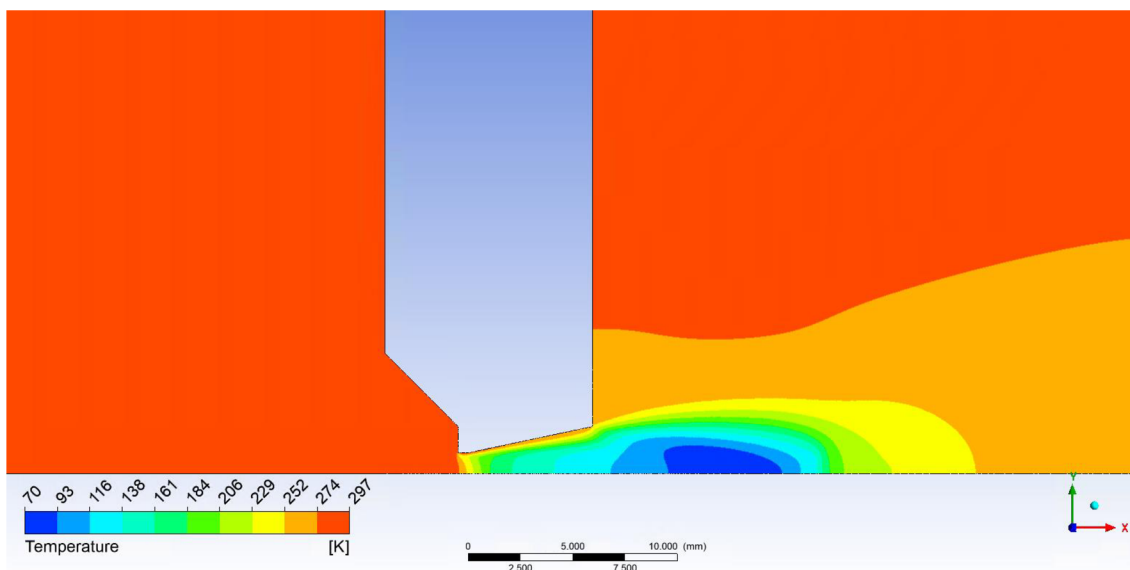




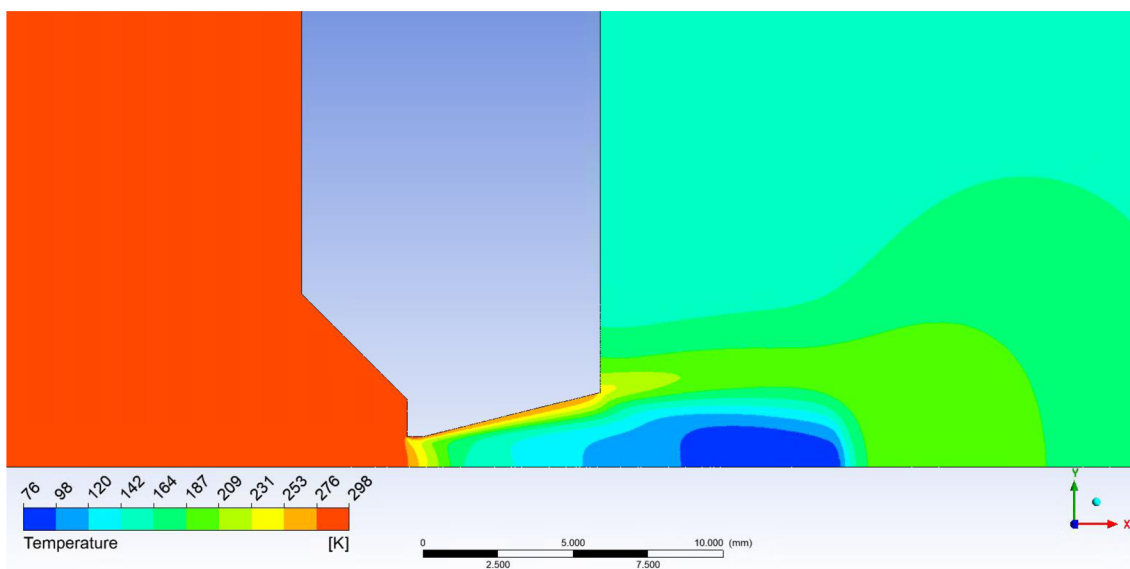
Obrázek 76 Varianta rozevření dýzy 10°



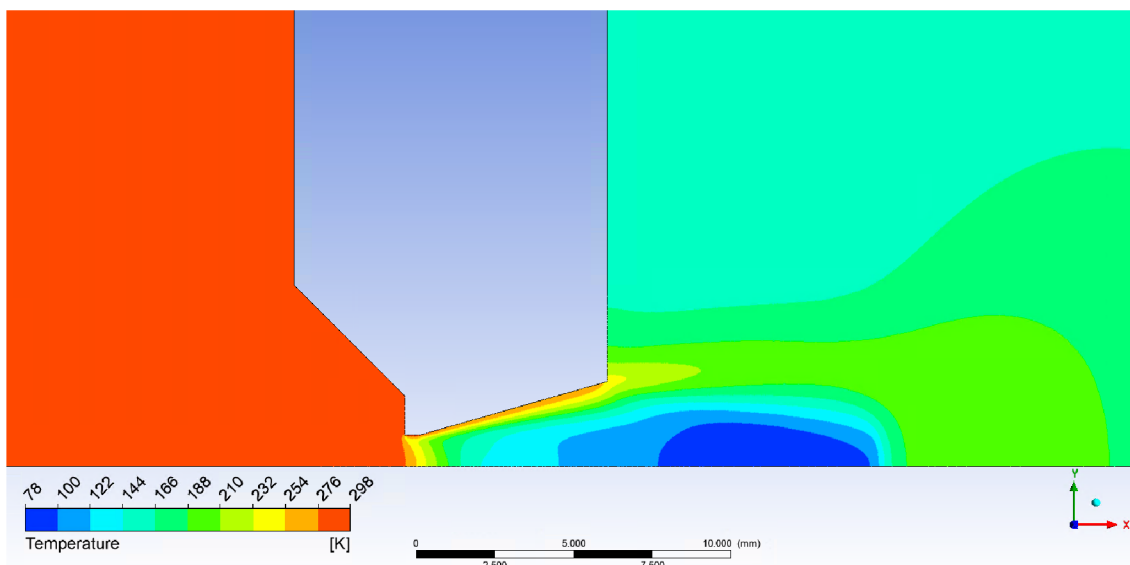
Obrázek 77 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12°



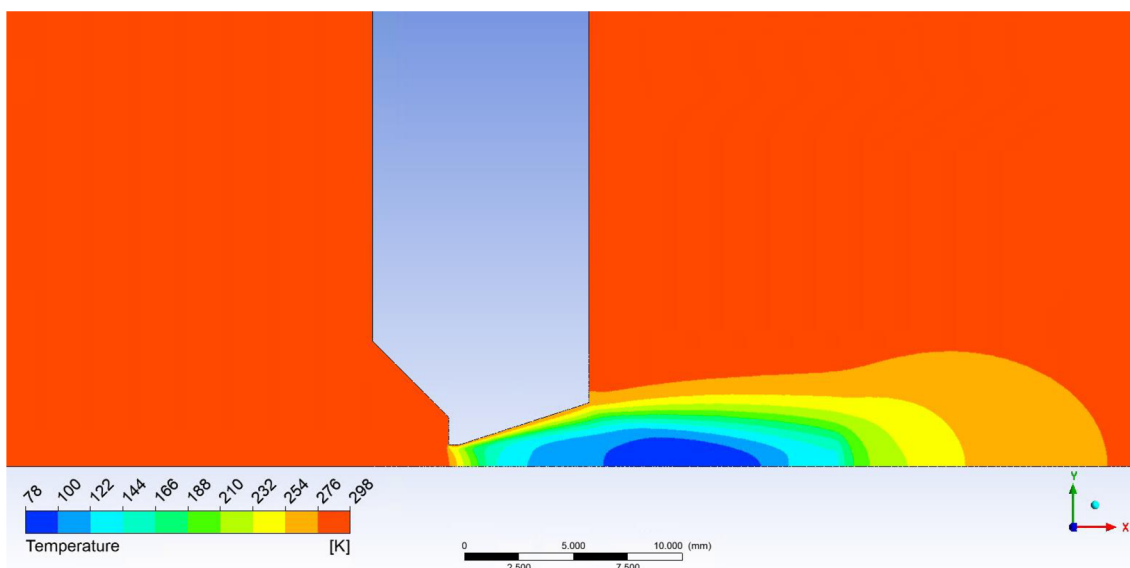
Obrázek 78 Varianta rozevření dýzy  $12^\circ$



Obrázek 79 Varianta rozevření dýzy  $14^\circ$

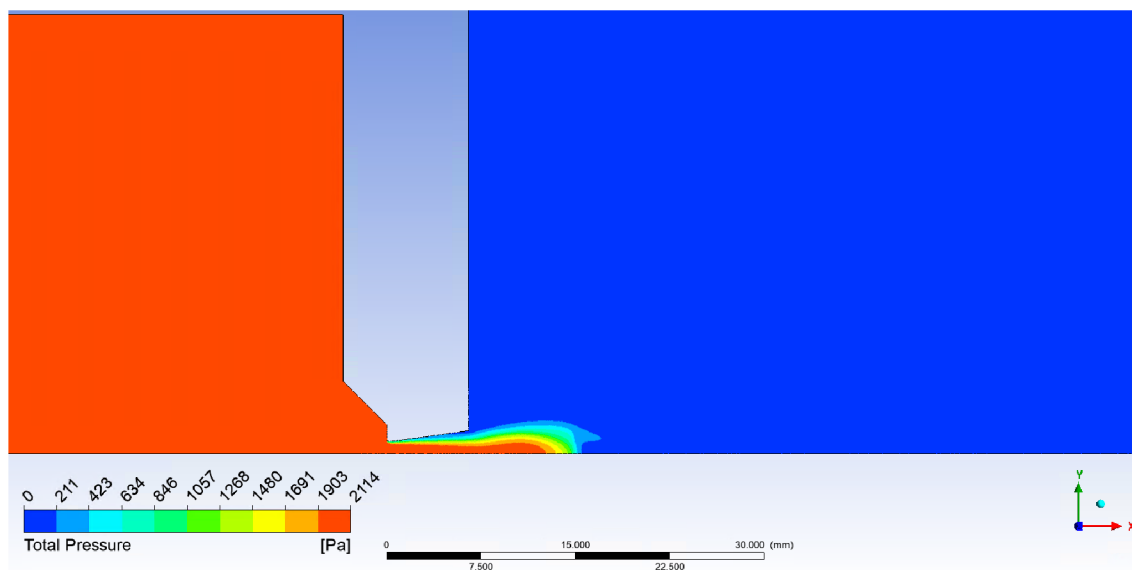


Obrázek 80 Varianta rozevření dýzy  $16^\circ$

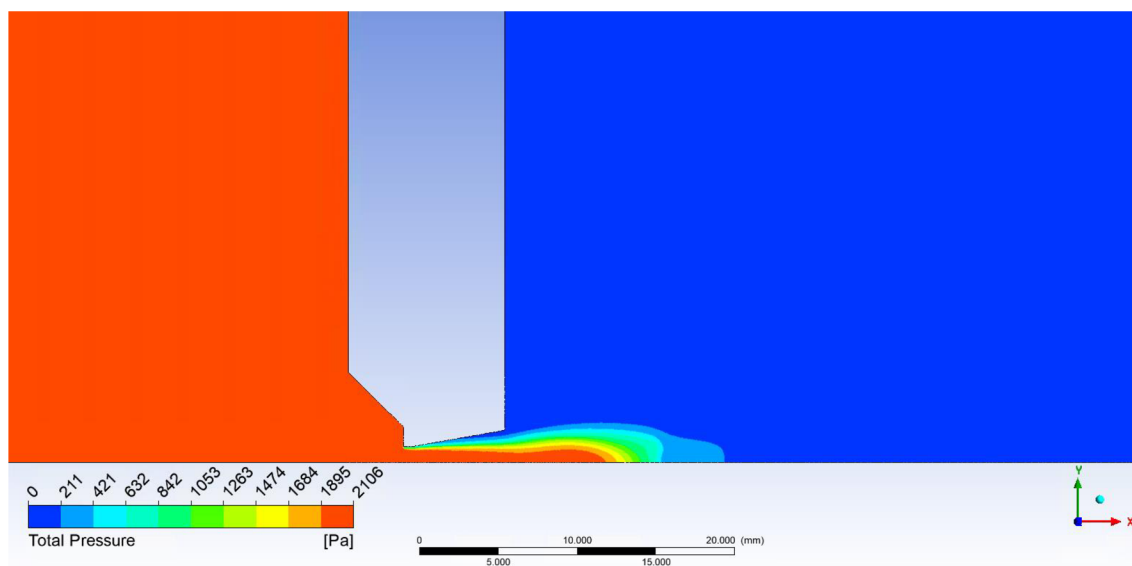


Obrázek 81 Varianta rozevření dýzy  $18^\circ$

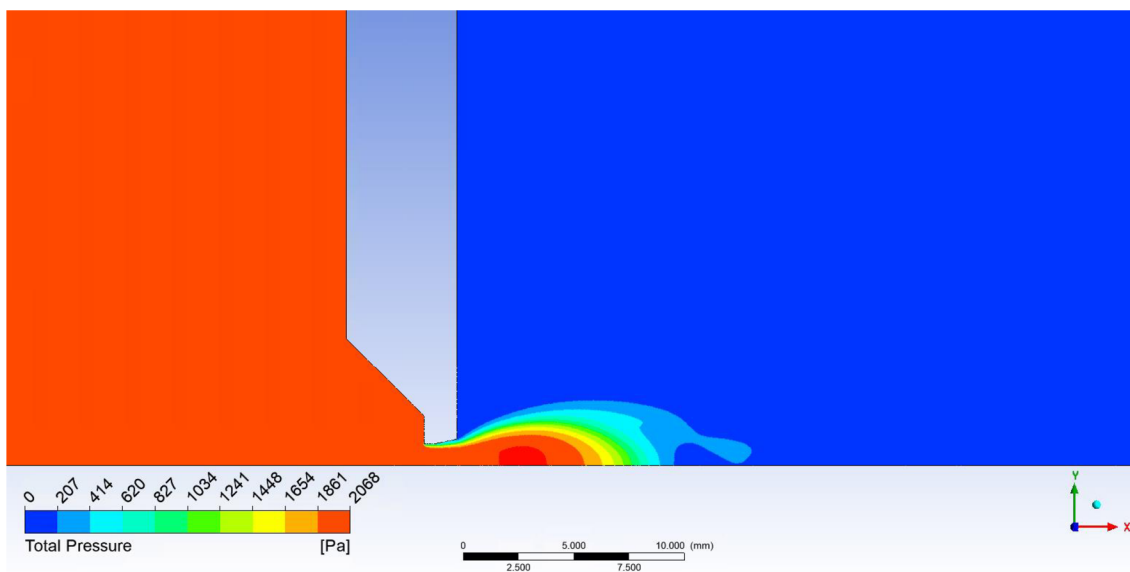
## A.6 Rozložení celkového tlaku



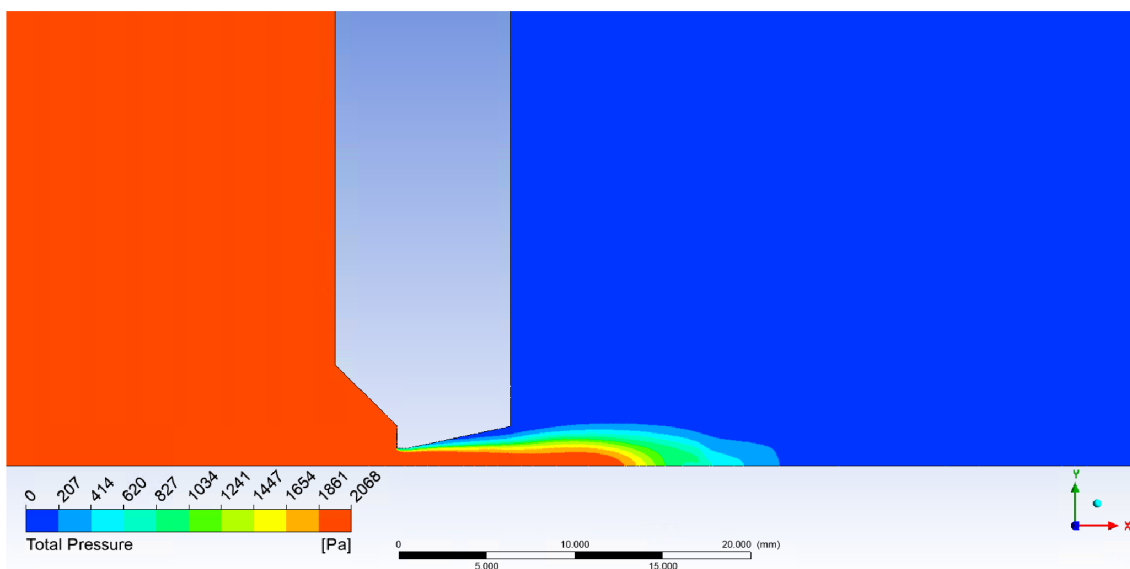
Obrázek 82 Varianta rozevření dýzy  $8^\circ$



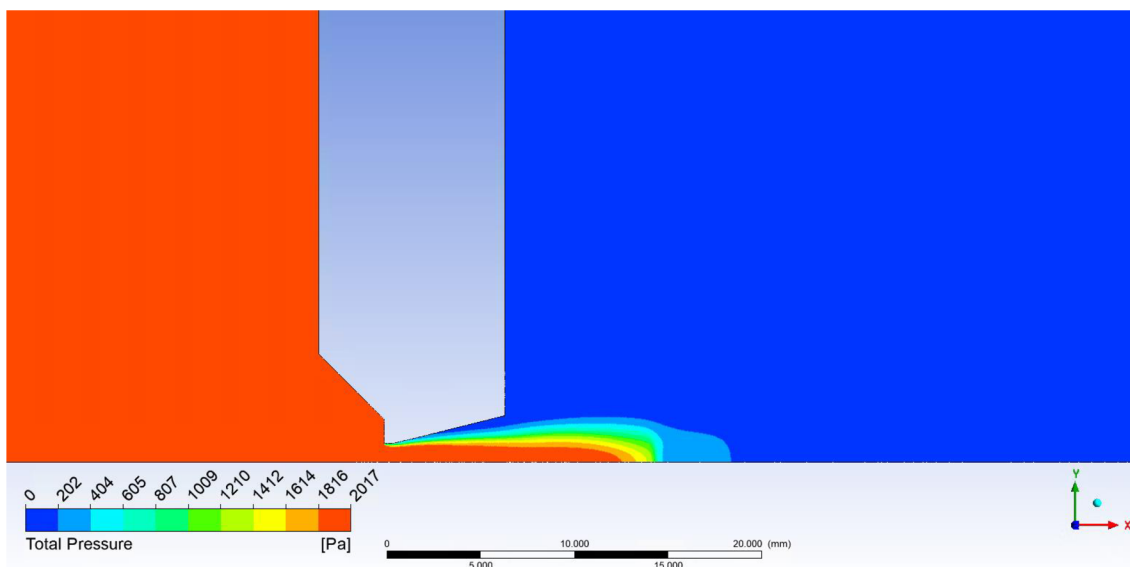
Obrázek 83 Varianta rozevření dýzy  $10^\circ$



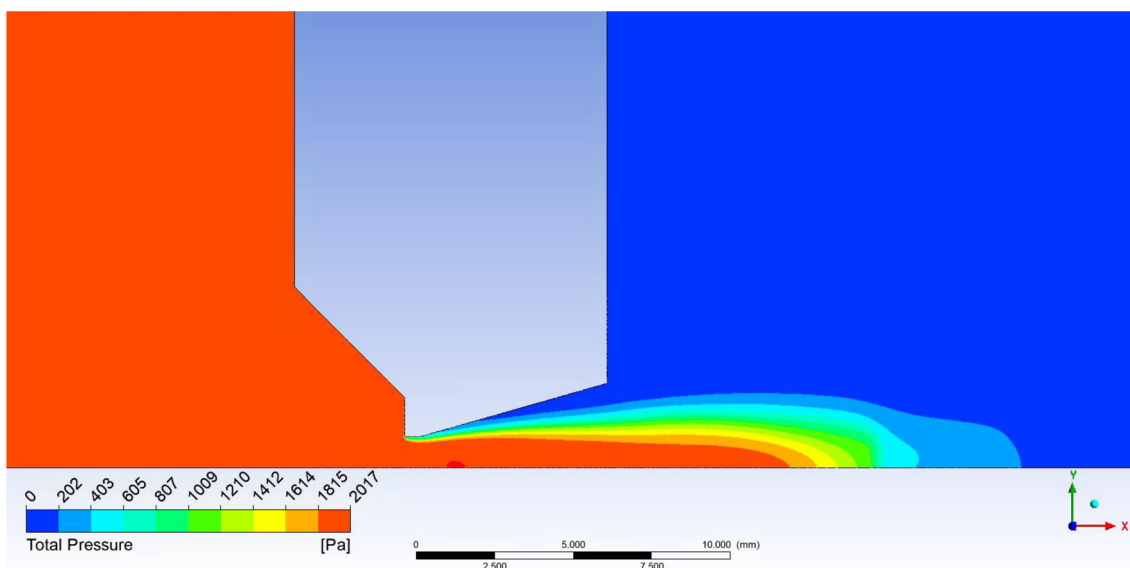
Obrázek 84 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12°



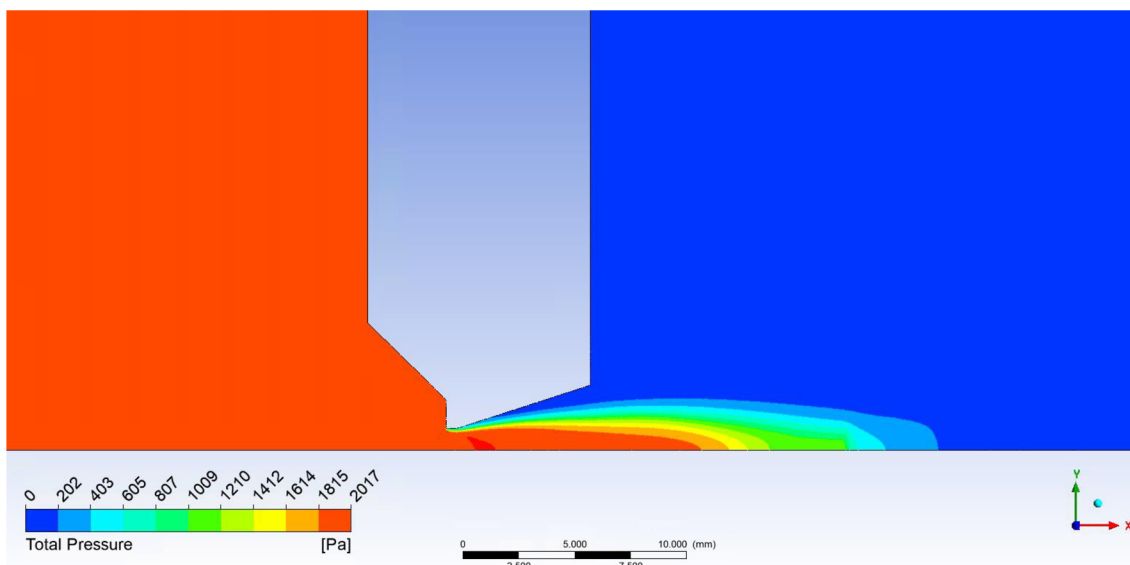
Obrázek 85 Varianta rozevření dýzy 12°



Obrázek 86 Varianta rozevření dýzy 14°

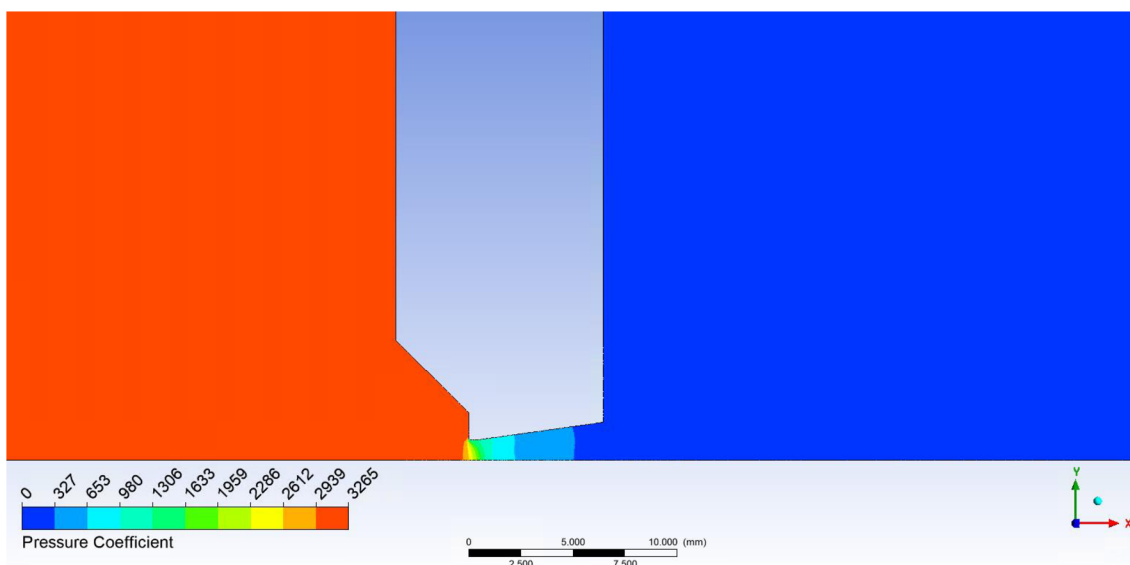


Obrázek 87 Varianta rozevření dýzy 16°

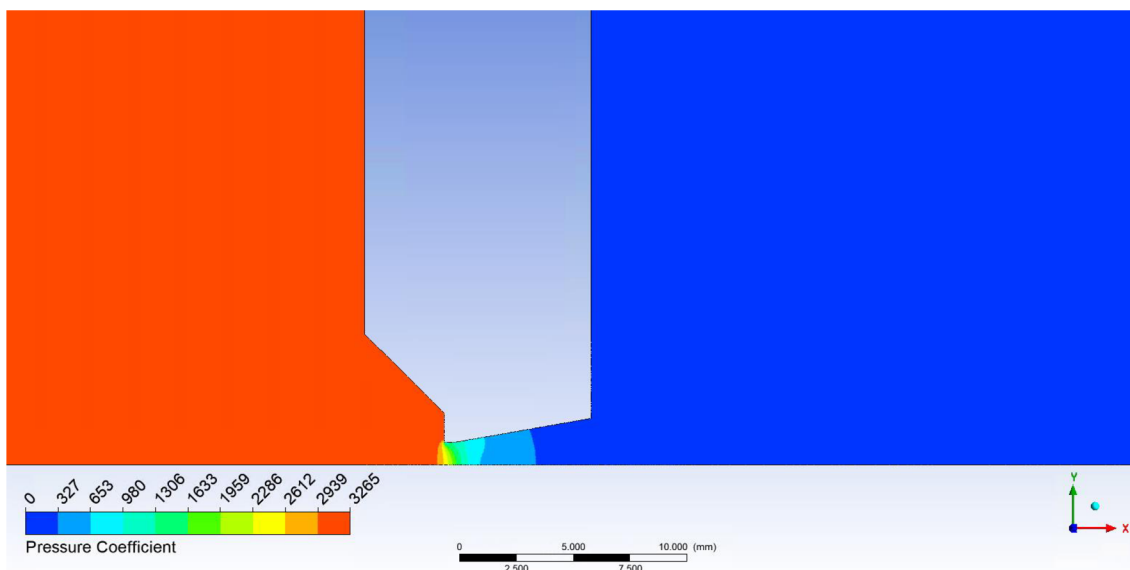


Obrázek 88 Varianta rozevření dýzy  $18^\circ$

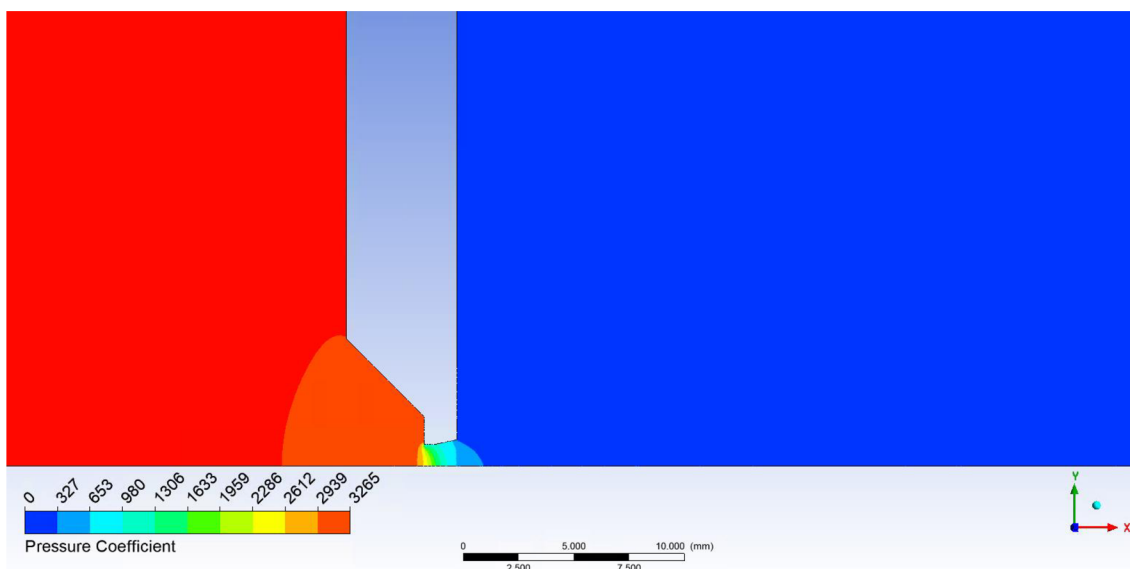
## A.7 Rozložení tlakového koeficientu



Obrázek 89 Varianta rozevření dýzy  $8^\circ$

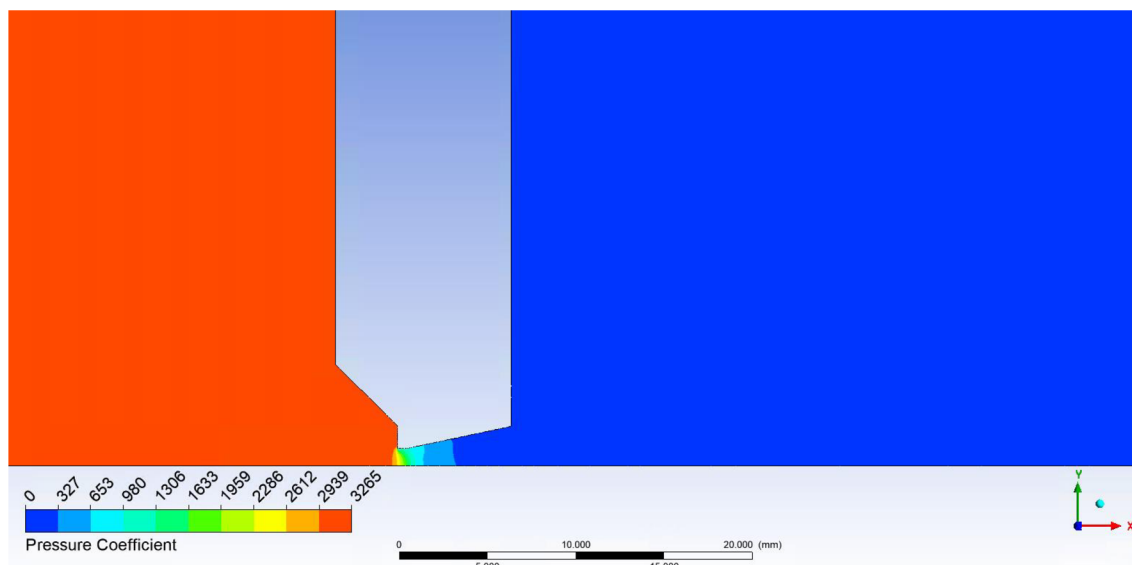


Obrázek 90 Varianta rozevření dýzy  $10^\circ$

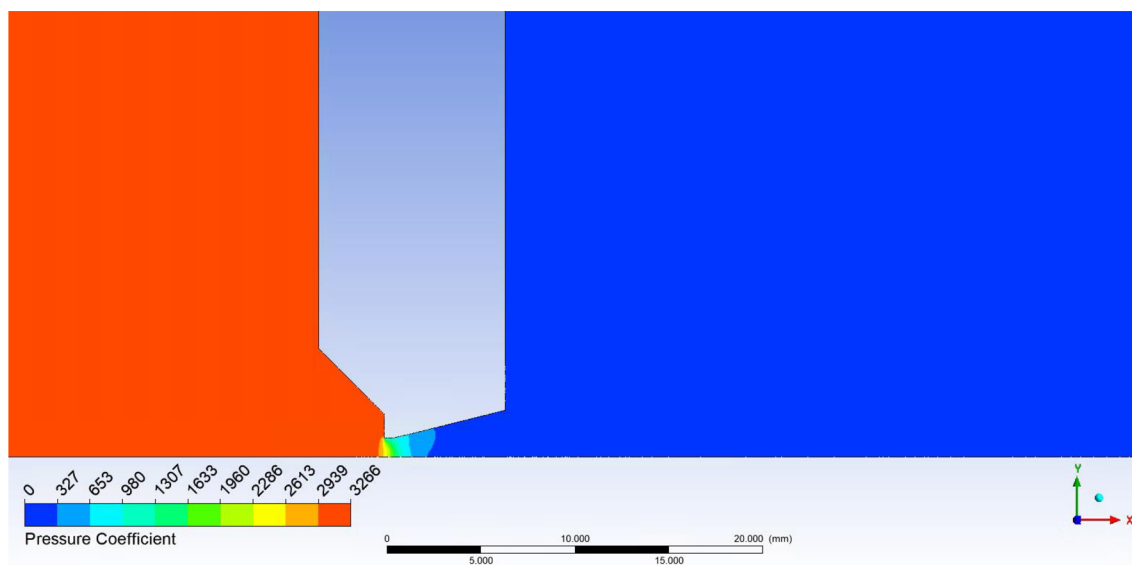


Obrázek 91 Varianta rozevření zkrácené dýzy  $12^\circ$

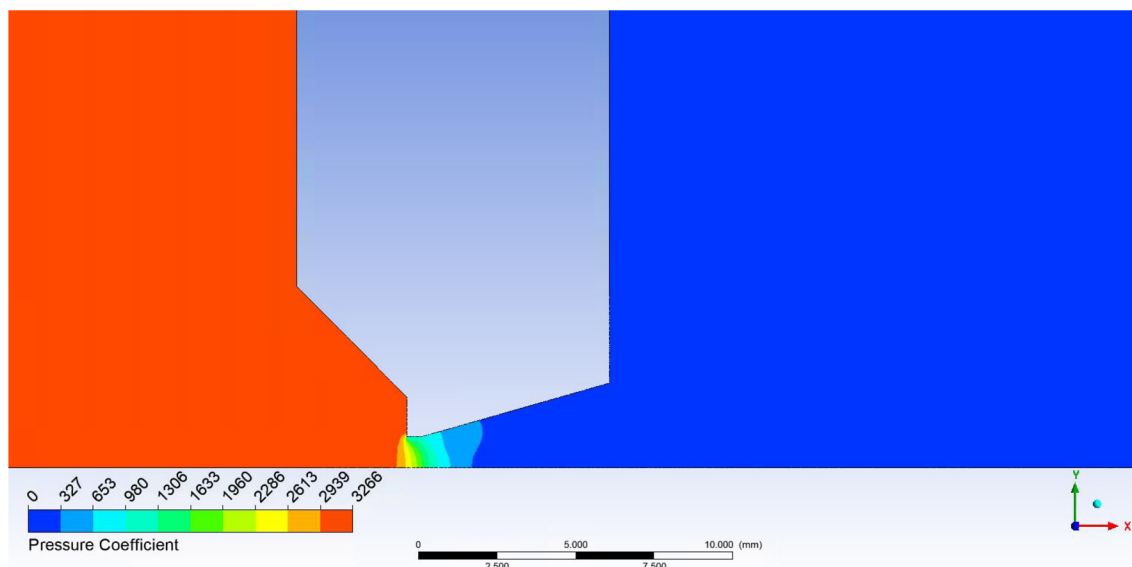




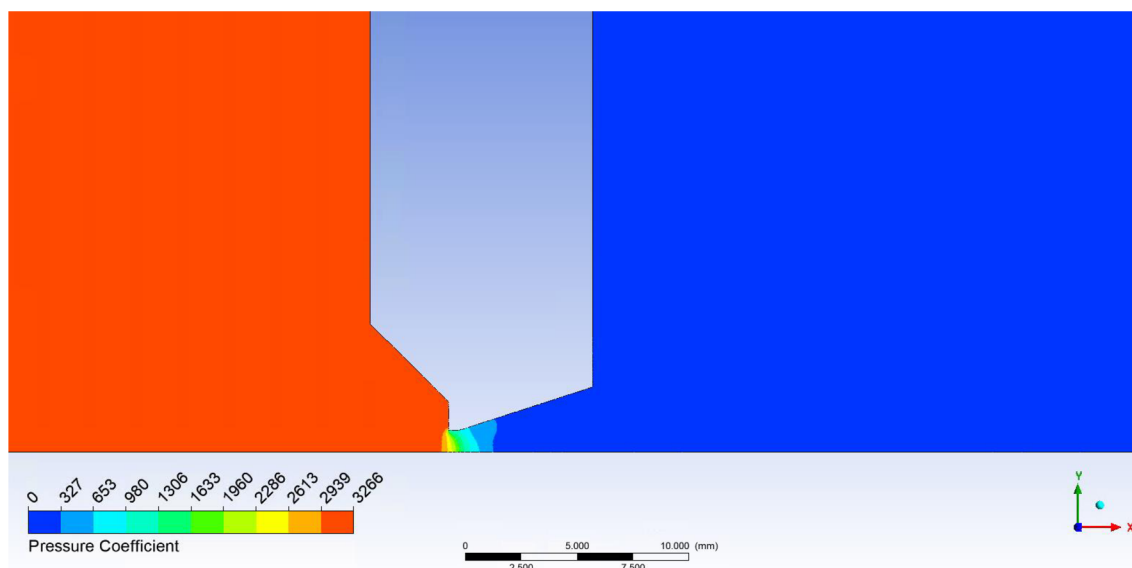
Obrázek 92 Varianta rozevření dýzy 12°



Obrázek 93 Varianta rozevření dýzy 14°

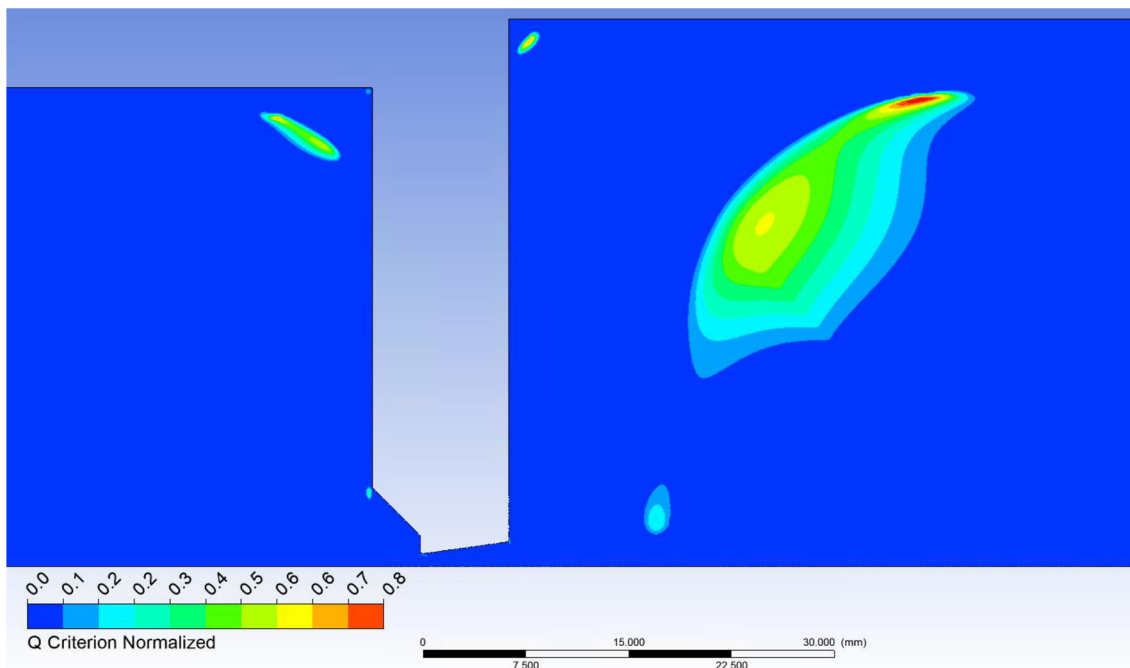


Obrázek 94 Varianta rozevření dýzy  $16^\circ$

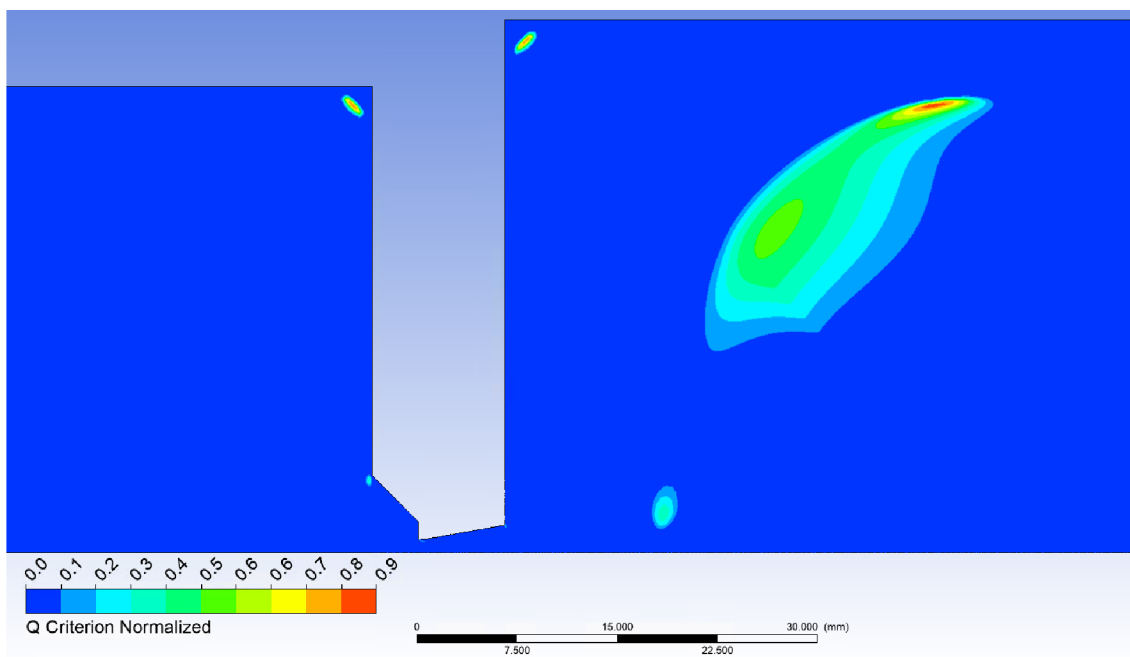


Obrázek 95 Varianta rozevření dýzy  $18^\circ$

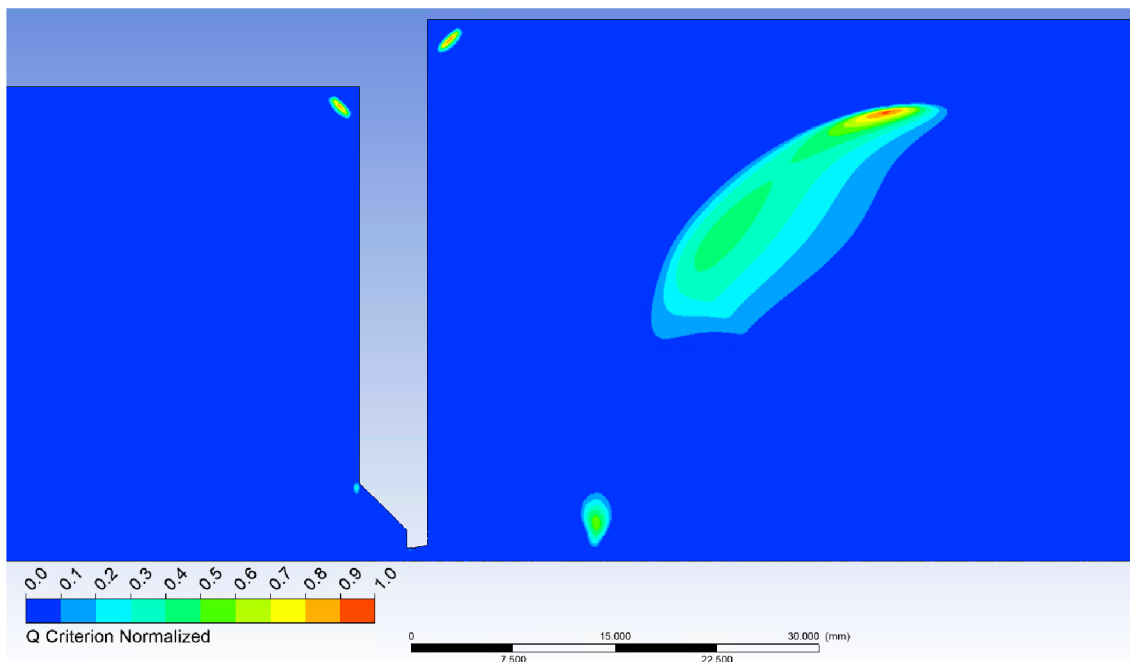
## A.8 Rozložení Q Criterion Normalized



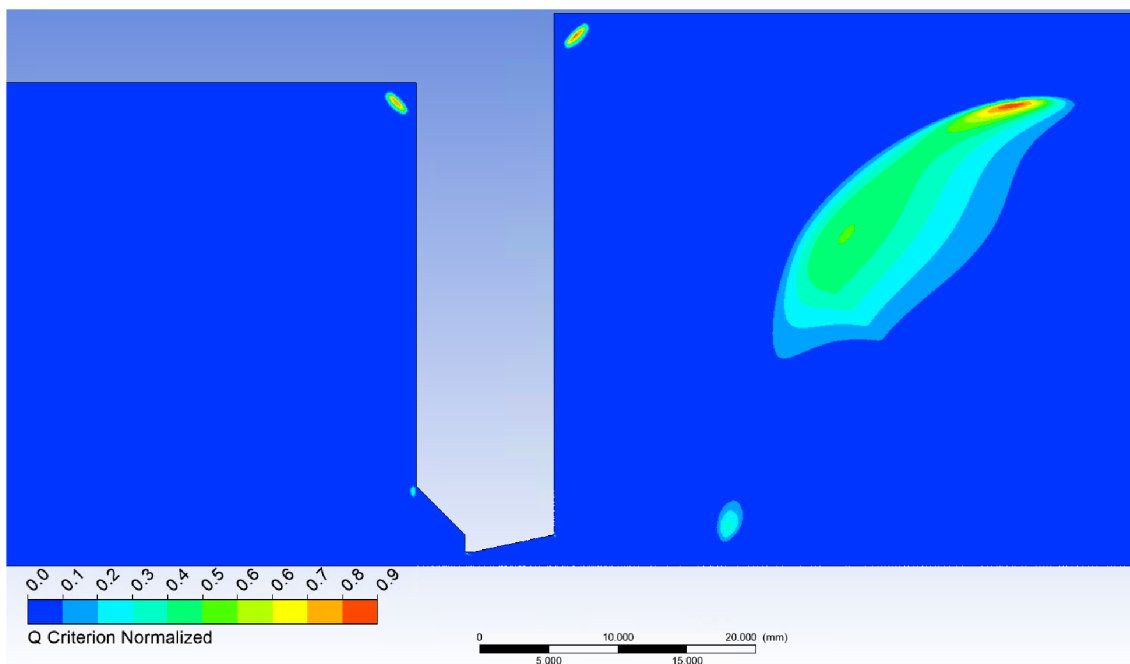
Obrázek 96 Varianta rozevření dýzy  $8^\circ$



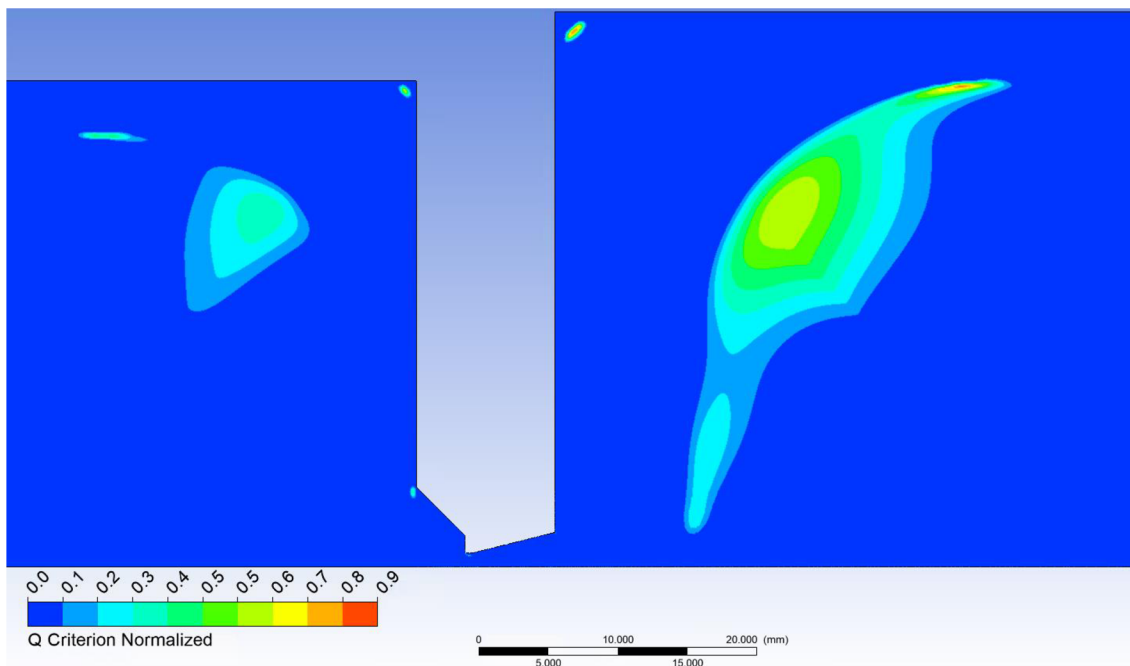
Obrázek 97 Varianta rozevření dýzy  $10^\circ$



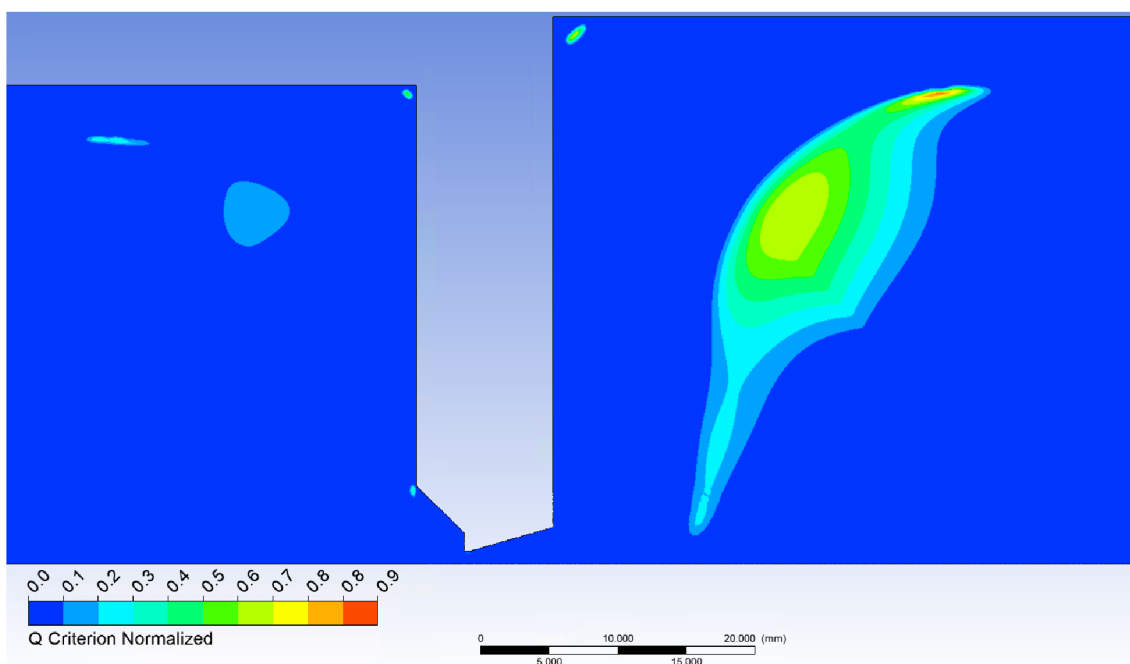
Obrázek 98 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12°



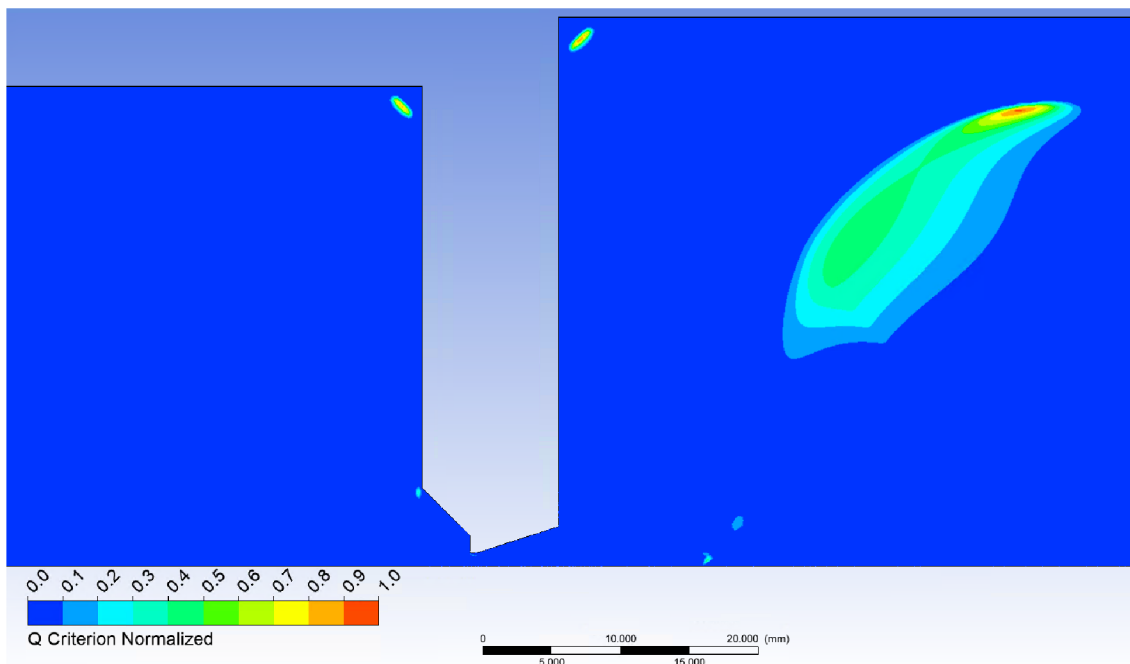
Obrázek 99 Varianta rozevření dýzy 12°



Obrázek 100 Varianta rozevření dýzy 14°

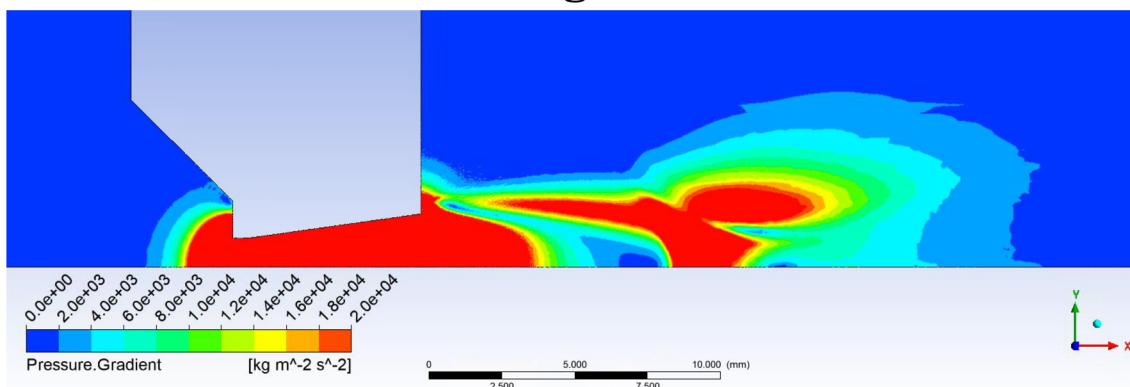


Obrázek 101 Varianta rozevření dýzy 16°

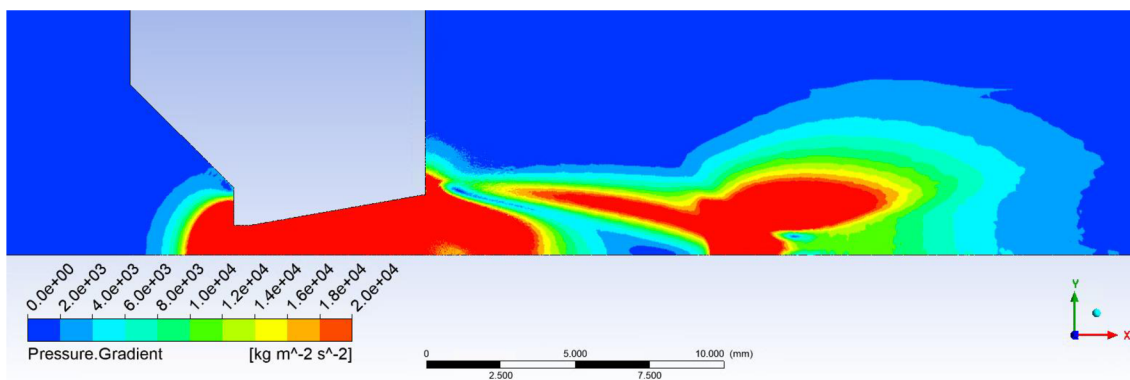


Obrázek 102 Varianta rozevření dýzy 18°

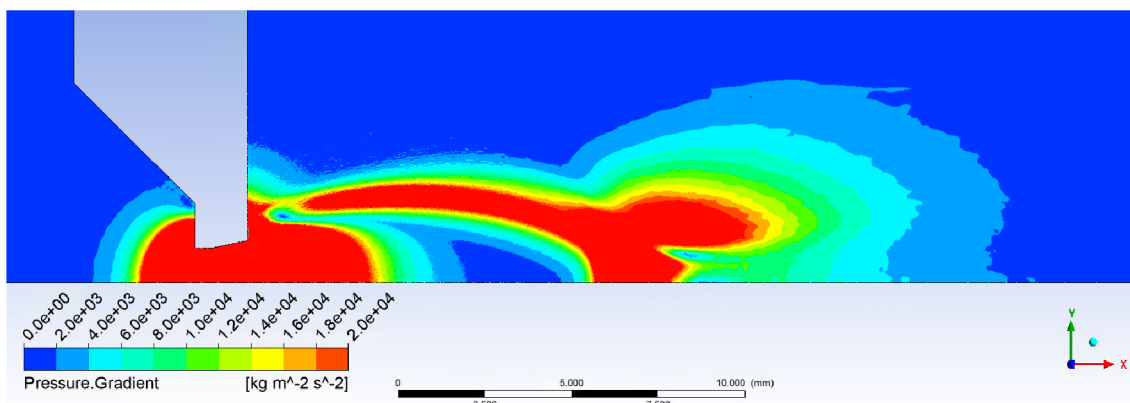
## A.9 Rozložení tlakového gradientu



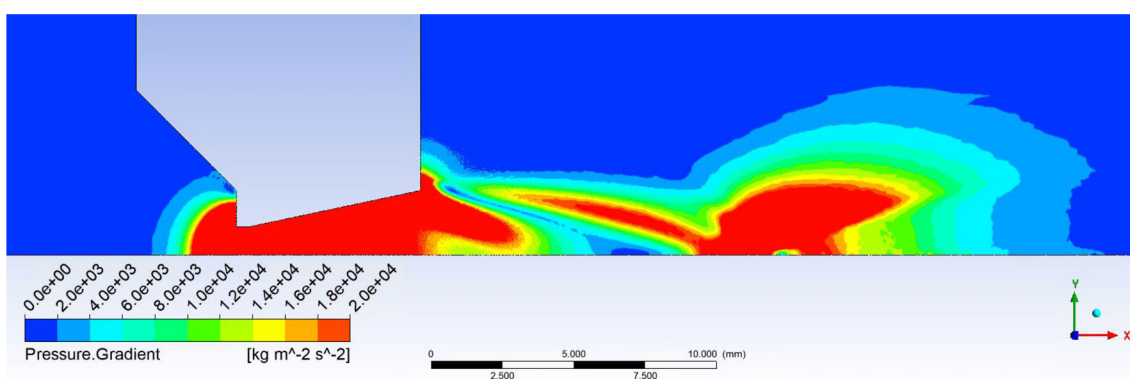
Obrázek 103 Varianta rozevření dýzy 8°



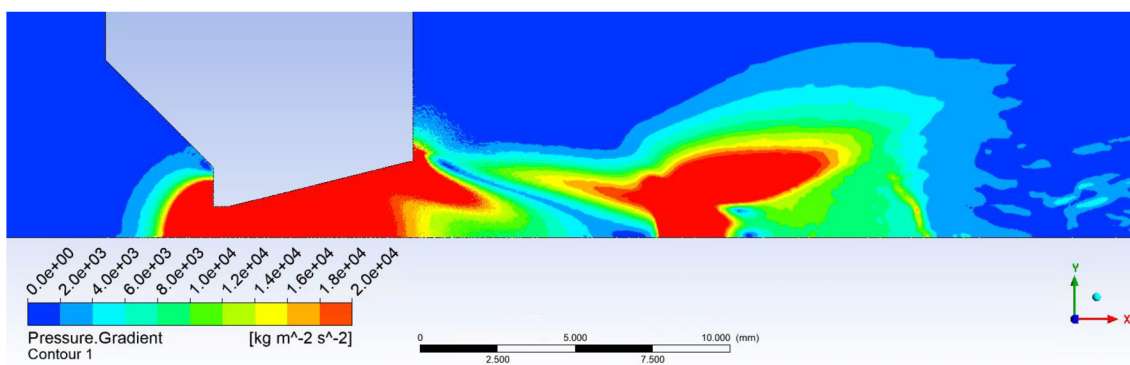
Obrázek 104 Varianta rozevření dýzy 10°



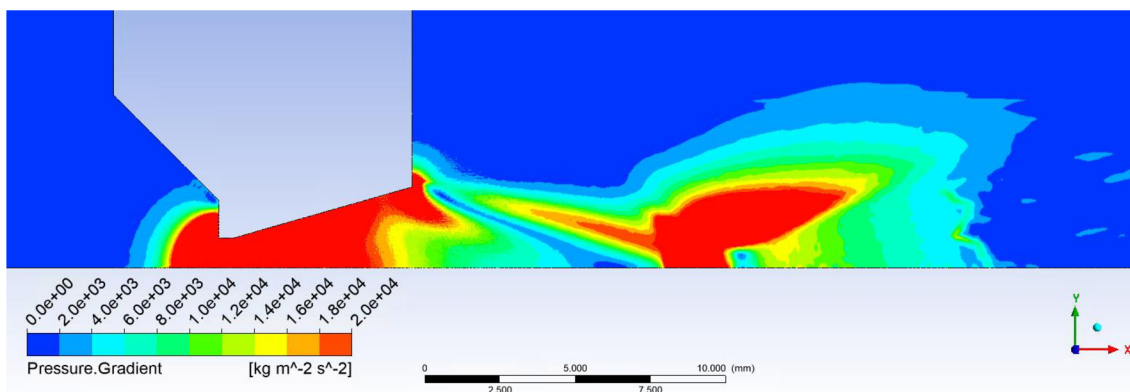
Obrázek 105 Varianta rozevření zkrácené dýzy 12°



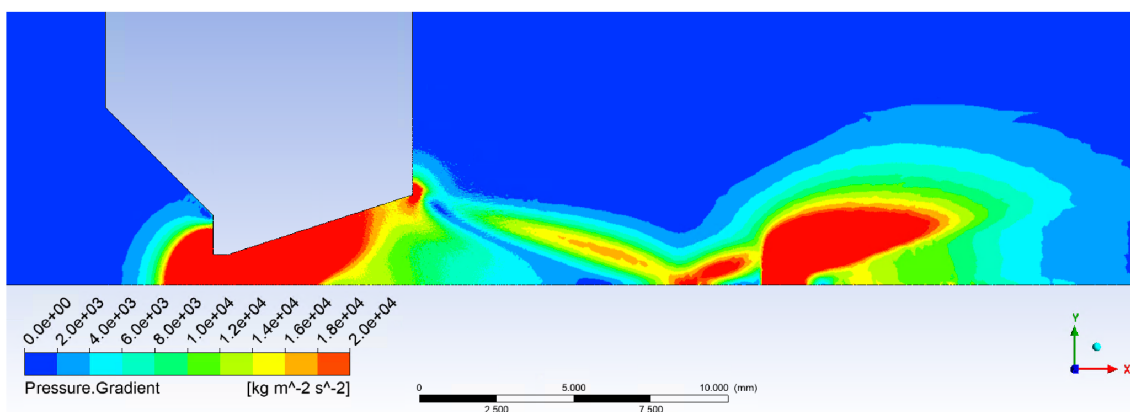
Obrázek 106 Varianta rozevření dýzy 12°



Obrázek 107 Varianta rozevření dýzy 14°



Obrázek 108 Varianta rozevření dýzy 16°



Obrázek 109 Varianta rozevření dýzy 18°