



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

ANALÝZA VLIVU UMÍSTĚNÍ KÓNICKÉ CLONY V NADZVUKOVÉM PROUDU V KOMOŘE DIFERENCIÁLNÍHO ČERPÁNÍ.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE CONIC APERTURE PLACEMENT IN THE SUPERSONIC FLOW IN THE
DIFFERENTIALLY PUMPED CHAMBER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Miroslav Rous

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Miroslav Rous

ID: 163016

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Analýza vlivu umístění kónické clony v nadzvukovém proudu v komoře diferenciálního čerpání.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte 2D objemový model komory diferenciálního čerpání podle vzoru z publikace Dr. Danilatose s konickým tvarem clony PLA2. Následně vyhodnoťte další varianty umístění usměrňovače s ohledem na vliv umístění v nadzvukovém proudění při různých tlacích pomocí metody konečných objemů v systému Ansys Fluent. Provedte analýzu možností praktického využití s ohledem na složitost výroby.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 22.5.2018

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

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na problematiku simulace dynamiky média v environmentálním rastrovacím elektronovém mikroskopu. Konkrétně se zabývá zkoumáním vlivu umístění kónické clony v diferenciálně čerpané komoře a šířkou čerpacího kanálu v této komoře.

Teoretická část práce se zabývá obecně environmentálním rastrovacím mikroskopem a dalšími nástroji použitými v této práci, jako software ANSYS Fluen, turbulence tekutin, střední volná dráha molekul a rozptyl elektronů.

V praktické části je práce zaměřena na zpracování dat z programu ANSYS Fluent a na jejich vyhodnocení.

ABSTRACT

The thesis is focused on the medium dynamics simulation in the environmental scanning electron microscope. Specifically, it researches (examines) the conical aperture location effect in the differential pumped chamber and the width of the pumping channel in this chamber.

The theoretical part deals with the environmental scanning microscope generally and other tools used in this thesis, e.g. ANSYS Fluen software, fluid turbulence, medium free path of molecules and electrons scattering.

In the practical part, the work is focused on data processing from the ANSYS Fluent program and on their evaluation.

KLÍČOVÁ SLOVA

Environmentální rastrovací elektronový mikroskop, elektronová mikroskopie, ANSYS Fluent, diferenciálně čerpaná komora

KEY WORDS

Environmental scanning electron microscope, Electron microscopy, ANSYS Fluent, Differentially pumped chamber

ROUS, M. *Analýza vlivu umístění konické clony v nadzvukovém proudu v komoře diferenciálního čerpání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 90 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jirí Maxa, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza vlivu umístění konické clony v nadzvukovém proudu v komoře diferenciálního čerpání jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	8
1 Elektronová mikroskopie	9
1.1 Historie elektronové mikroskopie.....	9
1.2 Princip mikroskopu.....	9
1.3 Rozdělení mikroskopů.....	9
1.3.1 Transmisní elektronový mikroskop (TEM).....	10
1.3.2 Skenovací elektronový mikroskop (SEM).....	13
1.4 Vlastnosti elektronového mikroskopu.....	14
1.5 Environmentální rastrovací elektronový mikroskop (EREM).....	15
2 Článek Velocity and ejector-jet assisted differential pumping	18
2.1 Principy a metodika.....	18
2.2 Plochá geometrie PLA 2.....	19
2.3 VADP (diferenciální čerpání s rychlostním příspěvkem) s kónickou úpravou PLA 2.....	22
2.4 EADE – diferenciální čerpání s proudovou pomocí s přepážkou a kónickou PLA 2.....	24
3 Základní rovnice zákona zachování	25
3.1 Rovnice kontinuity.....	25
3.2 Navierovy-Stokesovy rovnice.....	25
3.3 Rovnice energie.....	26
4 Diskretizační přístupy, Metoda konečných objemů a Interpolační schéma	28
4.1 Diskretizace.....	28
4.2 Metoda konečných objemů – Finite Volume Method,.....	28
4.3 Interpolační schéma (prostorové).....	29
5 CFD program ANSYS Fluent	31
5.1 Pressure – Based solver.....	31
5.1.1 Pressure – Based sdružený algoritmus.....	31
5.1.2 Pressure – Based sekvenční algoritmus.....	31

5.2	Density – Based solver	32
6	Turbulence, proudění	33
6.1	Matematické metody turbulence.....	33
6.2	Boussinesquova hypotéza	34
6.2.1	Statické metody turbulence.....	34
6.2.2	Dvourovnicové modely.....	35
6.3	Rázová vlna.....	35
7	Srážky molekul, střední vlnová dráha a rozptyl elektronů	37
7.1	Srážky molekul, střední vlnová dráha.....	37
7.2	Střední volná dráha	38
7.3	Rozptyl elektronů.....	38
8	Praktická část	40
8.1	Úprava clony PLA 2	40
9	Výsledky simulací	41
9.1	Zhodnocení výsledků.....	47
	Závěr	48
	Literatura	49
	Seznam symbolů a zkratk	51
	Seznam obrázků	54
	Seznam tabulek	58
	Příloha	59

ÚVOD

V dnešní době dostupných technologií a technických možností, které byli v minulosti nedostupné, je velká snaha hlouběji porozumět různým předmětům a materiálům ať už z hlediska poznání, nebo s vidinou jejich budoucího vylepšení. Z tohoto důvodu se začali rozvíjet nejprve optické mikroskopy, to však k dostatečnému poznání nestačilo, a vývoj vedl k sestrojení elektronového mikroskopu.

Elektronový mikroskop poskytoval více informací než optický mikroskop. Jeho nevýhoda ovšem spočívala v omezení týkajících se zkoumaného vzorku, který musel být uložen ve vakuu. Tyto problémy vyřešil vynález environmentálního elektronového mikroskopu, který nemá podmínku vakua v komoře s uloženým vzorkem. Toto řešení má bohužel jistou technickou náročnost, která jde do určité míry zjednodušit.

Tato diplomová práce se zabývá právě tímto zjednodušením, které přináší možnost použití slabší a levnější vývěvy pro odčerpávání média z diferenciálně čerpané komory. Práce se zaměřuje na úpravu vzdálenosti mezi clonami PLA a na úhel clon PLA2 a tím zoptimalizovat požadavky na nižší výkon turbomolekulární vývěvy. V práci je vytvořeno 8 modelů diferenciálně čerpané komory s různou vzdáleností clon PLA a různými úhly clony PLA 2. Tyto modely jsou podrobeny CFD analýze programu ANSYS Fluent. Základním výstupem této analýzy jsou hodnoty hustoty částic, tlak, teplota a rychlost v diferenciálně čerpané komoře. Z vygenerovaných výsledků je vybrána optimální varianta vzdálenosti a úhlu clony PLA 2.

1 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE

Elektronová mikroskopie umožňuje studium mikrostruktury zkoumaných objektů. Struktura je zkoumána pomocí elektronového svazku, který je fokusován magnetickým polem, nebo elektromagnetickým polem. Elektronovou mikroskopií je možné pozorovat povrch materiálu, jeho struktura a také je možné udělat jeho prvkovou analýzu [1].

1.1 Historie elektronové mikroskopie

Největší průlom pro vynález elektronového mikroskopu učinil J. J. Thompson, který v roce 1897 objevil elektron. Další důležitý objev přišel v roce 1925, když Luis de Broglie tvrdil, že rychle letící částice mají nejen korpuskulární, ale i vlnový charakter jako např. viditelné světlo. Pro objevení 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 Ruskomem a Knollomem na Vysoké škole technické v Berlíně. Komerční výroba transmisních elektronových mikroskopů byla zahájena o osm let později firmou Siemens a Halske, která garantovala rozlišovací schopnost mikroskopů na 10 nm [1].

1.2 Princip mikroskopu

Mikroskopy jsou obecně používány pro podrobné zkoumání struktury vzorku. Díky různým typům mikroskopů můžeme zkoumat nejen povrch vzorku, ale i vnitřní strukturu vzorku.

Jednou z hlavních charakteristik mikroskopů je tzv. mezní rozlišovací schopnost, ta je úměrná vlnové délce záření, kterou využívá daný typ mikroskopu, ať už jde o elektronové, nebo optické mikroskopy [1].

1.3 Rozdělení mikroskopů

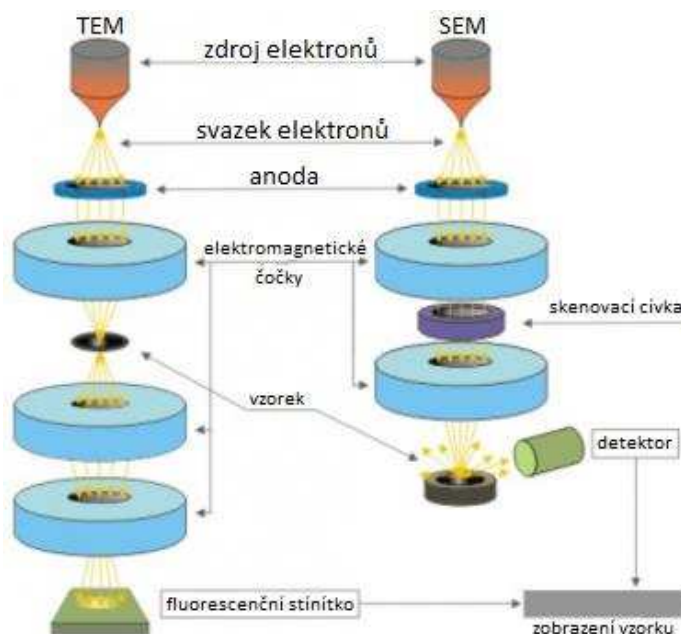
Mikroskopy se dělí dle metody zobrazování na optické a elektronové. Optický mikroskop je tvořen optickou částí, která zajistí vznik a promítnutí obrazu, a mechanickou částí, tubusem, který má za účel chránit optickou část. Základem optické části jsou čočky, které tvoří objektiv a okulár. Optický mikroskop 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 [1], [2].

Elektronový mikroskop je principiálně podobný tomu optickému. Místo optických čoček jsou ovšem použity elektromagnetické čočky a místo fotonů se pro zkoumání objektu využívá elektronů. Vlnové délky urychlených elektronů jsou o mnoho řádů nižší v porovnání s vlnovou délkou fotonu, z tohoto důvodu má elektronový mikroskop větší rozlišovací schopnost a dosahuje vyššího zvětšení, a to až 1 000 000 X. Elektronové mikroskopy se dále dělí podle využití elektronového svazku na transmisní a rastrovací [2].

Elektronové mikroskopy se dělí na dva základní druhy:

- TEM – (transmission electron microscope) zde je využíváno elektronů, které projdou vzorkem a poskytují informaci o vnitřní struktuře vzorku.
- SEM – (scanning electron microscope) v tomto případě se využívají elektrony, které se odrazí od povrchu a je zkoumán povrch vzorku.

Na obrázku č. 1.1 jsou schematicky znázorněny oba typy výše zmíněných mikroskopů [5].



Obr. 1.1: Schematické znázornění elektronových mikroskopů [5].

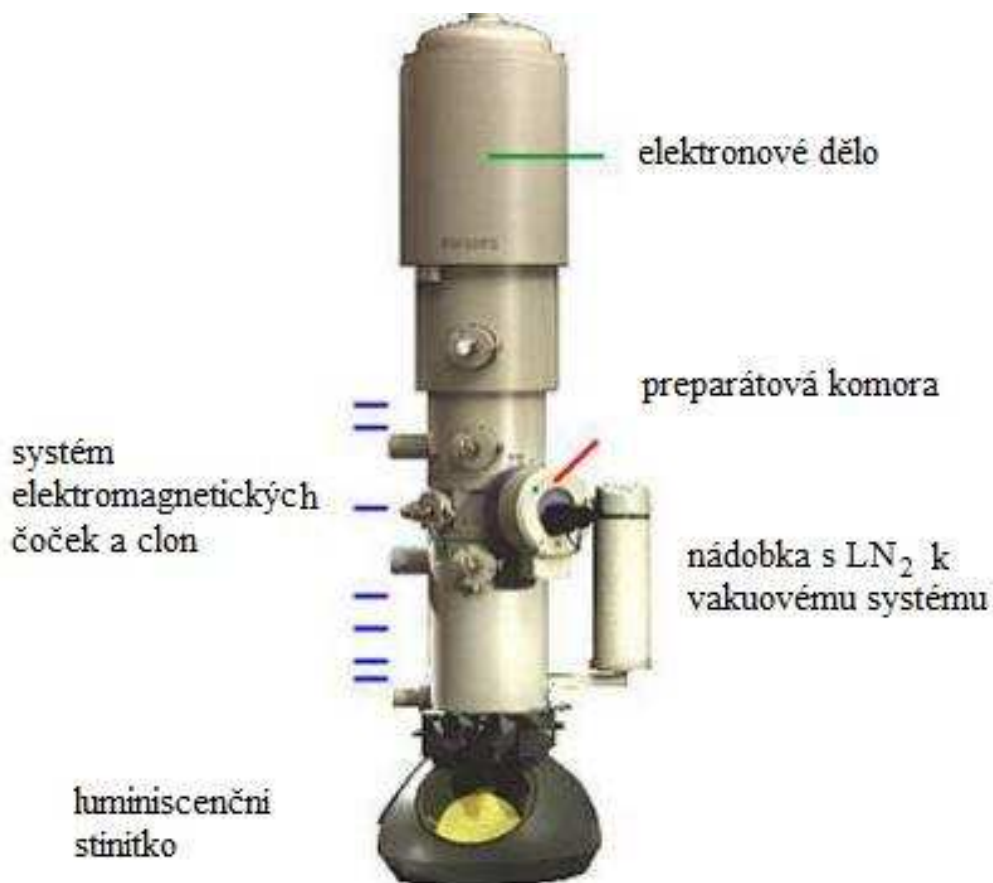
1.3.1 Transmisní elektronový mikroskop (TEM)

Jak již bylo zmíněno, TEM se velice podobá světelnému mikroskopu, světelný zdroj je nahrazen elektronovým dělem, skleněné čočky jsou nahrazeny elektromagnetickými a okulár je nahrazen fluorescenčním stínítkem. U elektromagnetických čoček lze změnit ohniskovou vzdálenost změnou proudu procházejícího cívkou. Prostor, kterým prochází elektrony, musí být ve vakuu, z důvodu zabránění kontaminace tubusu a vzorku molekulami vzduchu a také proto, že by byl ve vzduchu elektron absorbován. Výsledný obraz zkoumaného předmětu lze pozorovat na fluorescenčním stínítku přes okno v projekční komoře, nebo pomocí CCD kamery. Konstrukce mikroskopu je zobrazena na obrázku č. 1.2 [4].

TEM umožňuje pozorování objektů do tloušťky 100 nm s velkou rozlišovací schopností, objekty s větší tloušťkou neumožňují propustnost elektronů, proto je zkoumaný objekt limitován maximální tloušťkou a v průměru musí být dostatečně malý, aby se vešel do držáku vzorku. Jeho průměr musí být maximálně 3 mm, také musí být zbaven veškeré vody.

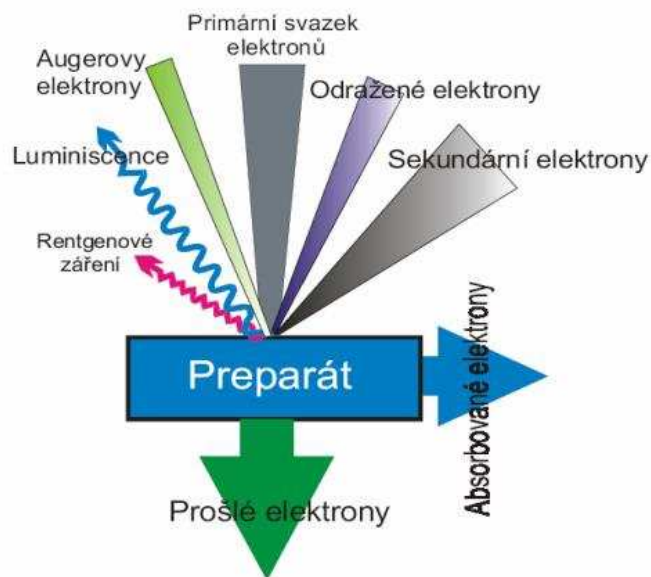
Transmisní elektronový mikroskop je složen ze základních částí:

- tubus s elektronovou optikou,
- vakuový systém,
- elektronika (napájení čoček, zdroj vysokého napětí pro zdroj elektronů),
- software.



Obr. 1.2: Konstrukce transmisního elektronového mikroskopu [3].

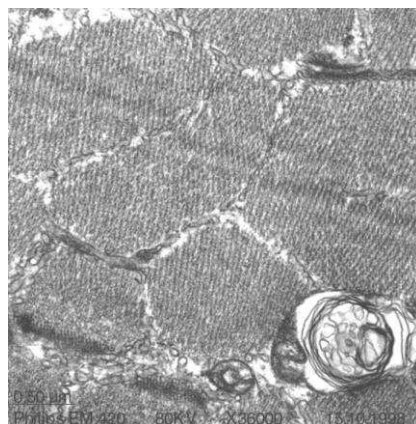
Zkoumaný vzorek musí být do mikroskopu vložen ve formě tenké folie, která je ozařována elektrony. Prošlé elektrony, které jsou znázorněny na obrázku č. 1.3 zeleně, se dělí do dvou druhů. Na interagující pružně a ty co interagují nepružně. Pružně interagující elektrony se vzorkem vymění minimální kinetickou energii a dochází pouze ke změně směru letícího elektronu, čím blíže prolétne elektron kolem jádra atomu, tím více se odchýlí od původního směru. Vlivem nepružně interagujících elektronů dochází k elektronovým excitacím, u těchto elektronů se výrazně snižuje jejich energie a dochází ke změně jejich vlnové délky, to má za následek zhoršení chromatické aberace. Na tento jev má vliv tloušťka vzorku, čím je tloušťka větší, tím výrazněji se tato vada projevuje [3].



Obr. 1.3: Interakce elektronů s preparátem [4].

Tubus mikroskopu obsahuje trysku, anodu, clony, čočky, upevnění pro vzorek a zobrazovací systém. Tryska slouží jako zdroj elektronů, těmto elektronům je dodána kinetická energie v poli urychlovacího napětí, které vzniká mezi katodou a anodou na potenciálu země. Urychlený svazek elektronů je formován a směřován pomocí systému čoček a clon na průchod vzorkem. Při průchodu mezi sebou interagují atomy vzorku a elektrony, tyto interakce způsobují odchylování elektronů, které se následně detekují na fluorescenčním stínítku, popřípadě na CCD kameře [3].

Celkový obraz je na stínítku tvořen pouze částí elektronů, příliš vychýlené elektrony zachytí clona objektivu a jsou vyřazeny. Z důvodu měnící se intenzity elektronového svazku dochází ke kontrastu obrazu. Další elektrony, které jsou vychýleny pod různými úhly, způsobují fázový kontrast, což má za následek různé stupně šedi na zobrazení zkoumaného vzorku. Vzniklý obraz na stínítku má odstíny zelené barvy. Výstupem z TEM je trvalý záznam vzorku, který může být zaznamenán na fotografický materiál, nebo v digitální formě pomocí CCD (SSC) kamery. Záznam z SSC kamery je zobrazen na obrázku č. 1.4 [3].

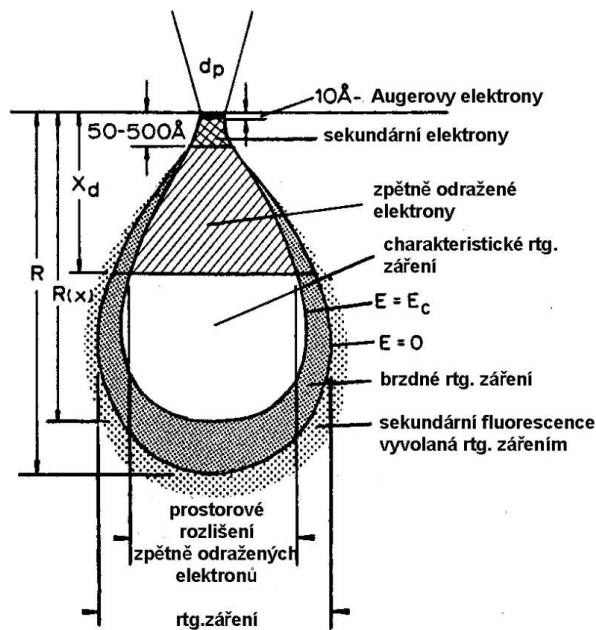


Obr. 1.4: Digitální záznam obrazu z SSC kamery [1].

1.3.2 Skenovací elektronový mikroskop (SEM)

SEM je určen pro pozorování povrchu zkoumaného objektu. Vzorky pro pozorování nemusí být ultratenké jako u TEM, jsou limitovány pouze velikostí vakuové komory. V určité míře pracuje SEM analogicky jako optický mikroskop s dopadajícím světlem, rozdíl je ve vytvoření výsledného obrazu [5].

SEM je možno rozdělit na tubus a komoru. V horní části tubusu se nachází katoda, která je zdrojem primárních elektronů. Elektronů dopadají na vzorek a dochází zde k pružným a nepružným interakcím. Energie primárních elektronů má značný vliv na excitační objem, což je oblast pod povrchem, ze které se uvolňují jednotlivé signály. Oblast excitačního objemu je znázorněna na obrázku č. 1.5. Čím nižší je energie primárních elektronů, tím mělčí a širší tato oblast je. Další vliv na velikost excitační oblasti má i materiálové složení zkoumaného vzorku, čím více bude ve vzorku obsaženo těžších kovů, tím více elektronů bude odraženo a hloubka průniku primárních elektronů bude menší než u vzorku složeného z lehčích kovů. Primární elektrony, které proniknou pod povrch, se začnou pohybovat chaotickým způsobem, tento pohyb napomáhá k vytvoření dalších signálů [1].



Obr. 1.5: Excitační objem [1].

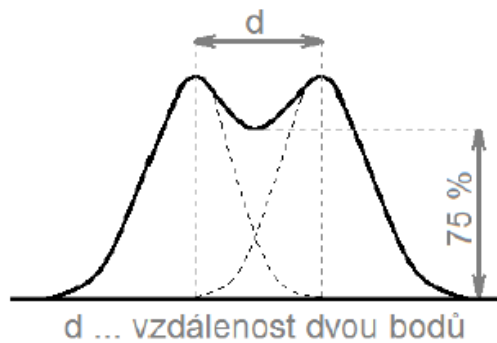
Pomocí statistické metody simulace drah elektronů, která se nazývá metoda Monte-Carlo, lze určit podmínky, za kterých signály vznikají. Tato metoda používá náhodná čísla a umožňuje přibližně popsat pohyb elektronů a jejich objem [1].

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].

1.4 Vlastnosti elektronového mikroskopu

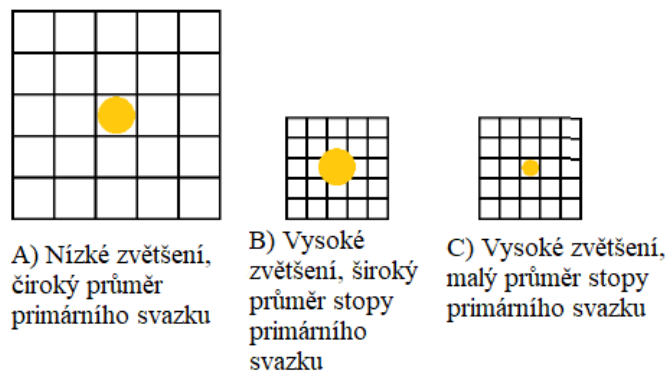
Vlastnosti elektronových mikroskopů obecně slouží k stanovení výkonu mikroskopu, řadí se mezi ně rozlišení, hloubka ostrosti a zvětšení.

- Rozlišení – je definováno jako nejmenší možná vzdálenost mezi dvěma body, které lze daným mikroskopem od sebe rozlišit jako dva body. V elektronové mikroskopii je popsána definice rozlišení Rayleighovým kritériem, které je zobrazeno na obrázku č. 1.6. Toto kritérium uvádí, že dva body jsou rozlišitelné, pokud hustota proudu v polovině vzdálenosti mezi nimi není vyšší než 75 % maximální intenzity [6].



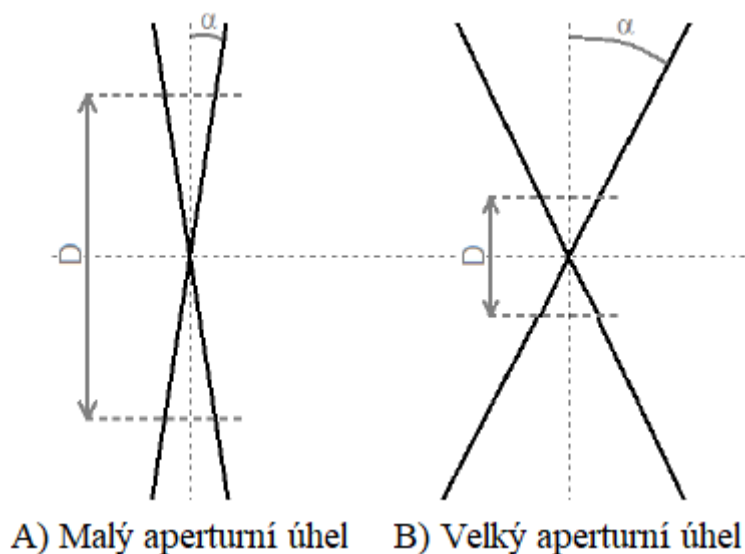
Obr. 1.6: Grafické zobrazení Rayleighova kritéria [6].

Dalším důležitým ukazatelem je vztah mezi průměrem primárního svazku a velikostí pozorovaných detailů. Je nutné dbát na to, aby průměr svazku nepřesahoval do sousedních pixelů. Modelové situace jsou zobrazeny na obrázku č. 1.7, kde na obrázku B a C je zvolen špatný poměr mezi průměrem svazku a velikostí pixelů [6].



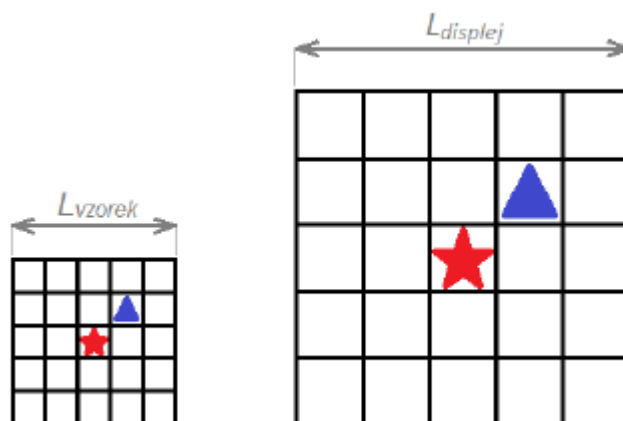
Obr. 1.7: Zobrazení vztahu mezi průměrem primárního svazku a zvětšením [6].

- Hloubka ostrosti – je definována jako tloušťka vrstvy objektu, ve které je možné pozorování detailů s danou ostroť. Velké hloubky ostrosti je možno dosáhnout při použití malé aperturní clony, která zajistí malý aperturní úhel primárního svazku, úhel je značen α a je zobrazen na obrázku č. 1.8. Také lze nastavit dlouhé pracovní vzdálenosti [6].



Obr. 1.8: Zobrazení aperturního úhlu [6].

- Zvětšení – lze rozdělit do dvou skupin. Užitečné zvětšení je takové, při kterém zvětšení přináší i nové detaily při zobrazení. Prázdné zvětšení nepřináší žádné nové detaily při zvětšení a obraz se rozmazává. Příčinou tohoto je překročení rozlišovací schopnosti. Zvětšení je určeno délkou vzorku, po které rastruje primární svazek (L_{vzorek}), vzhledem k velikosti řádku displeje, na kterém se informace zobrazují (L_{displej}). Princip zvětšení je znázorněn na obrázku č. 1.9 [6].



Obr. 1.9: Princip zobrazení zvětšení [6].

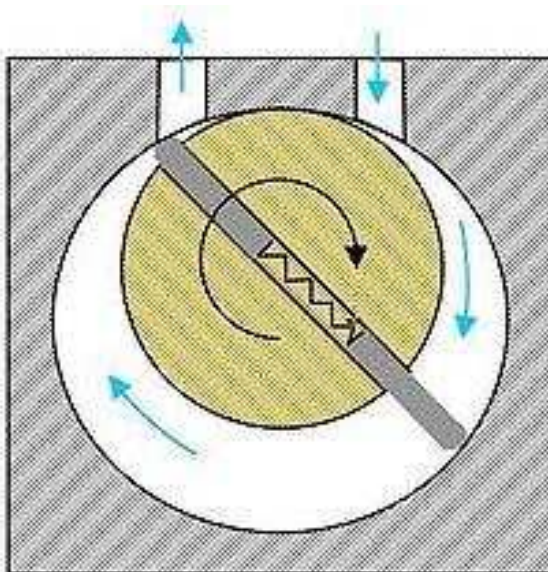
1.5 Environmentální rastrovací elektronový mikroskop (EREM)

V případě skenovacích elektronových mikroskopů je možnost zkoumat vzorek pouze ve vakuu, což může způsobovat problémy u materiálů, jako jsou bavlněné tkaniny, nevodivé materiály a biologické materiály. V případě nevodivého materiálu ve vakuu se na jeho povrchu akumuluje záporný náboj a dochází k výbojům. Všechny tyto

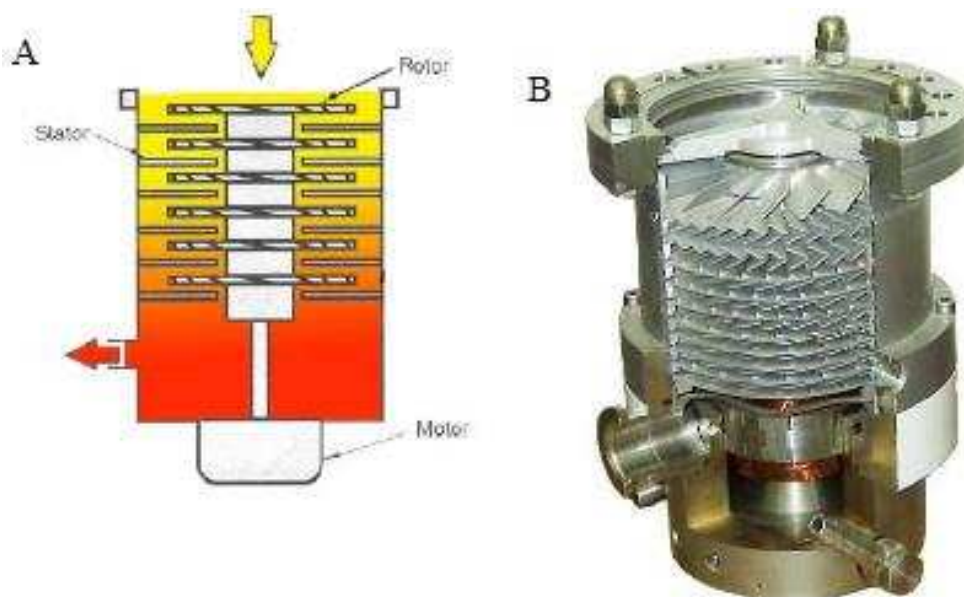
nevýhody mizí při použití environmentálního elektronového mikroskopu. EREM je v základu konstrukčně stejný jako SEM, ale komora se vzorkem je oddělena od vakua. Komora se vzorkem a tubus, ve kterém je vakuum, jsou odděleny komorou diferenciálního čerpání. Tato konstrukční úprava umožňuje zkoumat např. vzorky živého původu. Při vyšším tlaku asi 3 kPa se v komoře na nevodivém vzorku přestane projevovat povrchový záporný náboj v důsledku ionizačních srážek atomů plynu s elektrony. Záporný náboj kompenzují kladné ionty, které jsou přitahovány ke vzorku elektrostatickým polem. Při tlaku cca 611 Pa je možno pozorovat objekty obsahující vodu, bez jejich vysoušení [1], [6].

EREM Aquasem II je jedním z environmentálních rastrovacích mikroskopů. Jedná se o experimentální nekomerční zařízení, které bylo přestavěno v rámci disertační práce Dr. Neděly. Zařízení bylo vytvořeno na bázi REM Vega od firmy TESCAN, a.s. K tomuto konvenčnímu mikroskopu byla připojena diferenciálně čerpaná komora, a to mezi tubus a komoru pro zkoumaný vzorek. Tímto mikroskopem lze dosáhnout vysokého vakua, a to až $5 \cdot 10^{-3}$ Pa při rozlišení 3,5 nm [1], [7].

V tubusu mikroskopu Aquasem II je umístěno elektronové dělo, které používá k emisi elektronů wolframovou katodu, svazek elektronů je formován pomocí magnetických vychylovacích cívek. Dále tubus obsahuje Weneltův válec a anodu. Vakuový systém mikroskopu funguje dvoustupňově pomocí rotační a turbomolekulární vývěvy. Schéma rotační vývěvy je zobrazeno na obrázku č. 1.10 a na obrázku č. 1.11 je zobrazena turbomolekulární vývěva [7].

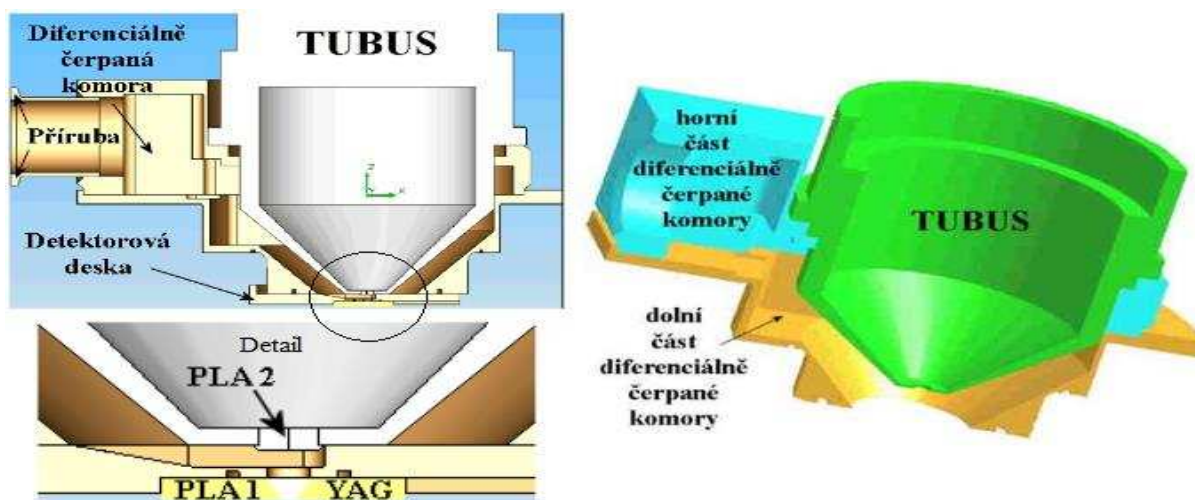


Obr. 1.10: Princip rotační vývěvy [19].



Obr. 1.11: A Schéma turbomolekulární vývěvy; B řez turbomolekulární vývěvou [9].

Diferenciálně čerpaná komora (dále v textu pouze DK) je složena z horní a dolní části, tyto části jsou vakuově těsně spojeny. Z obrázku č. 1.12 vyplývá, že DK je propojena vakuově s tubusem a její objem se zvětšuje ve směru čerpaného plynu od PLA 1 k přírubě DK. Oblast optické osy v DK vymezují clony PLA2 a PLA1, tato oblast je kritická z hlediska velikosti tlaku plynu, jelikož právě zde prochází primární svazek elektronů přes DK [8], [9].



Obr. 1.12: Vlevo řez spodní částí mikroskopu AQUASEM II; vpravo řez diferenciálně čerpanou komorou a tubusem EREM AQUASEM II [8].

Spodní část DK tvoří detektorová deska, která je ke komoře zatěsněna pomocí „O“ kroužku. Tato deska má ve svém středu otvor, díky kterému mohou procházet primární elektrony do komory vzorku, průměr otvoru v PLA 1 je 500 μm . Otvor pro průchod elektronů musí být v optické ose s EREM, to zajišťují mikrometrické šrouby.

2 ČLÁNEK VELOCITY AND EJECTOR-JET ASSISTED DIFFERENTIAL PUMPING

Článek Gerasimose D. Danilata se zabývá problematikou tvaru diferenciálně čerpané komory a jaký má tento tvar vliv na tlak v komoře, kterou prochází paprsek primárních elektronů. Požadavek je kladen na co nejmenší čerpadlo a minimální počet stupňů diferenciálního čerpání za podmínek udržení soustředěného svazku primárních elektronů [17].

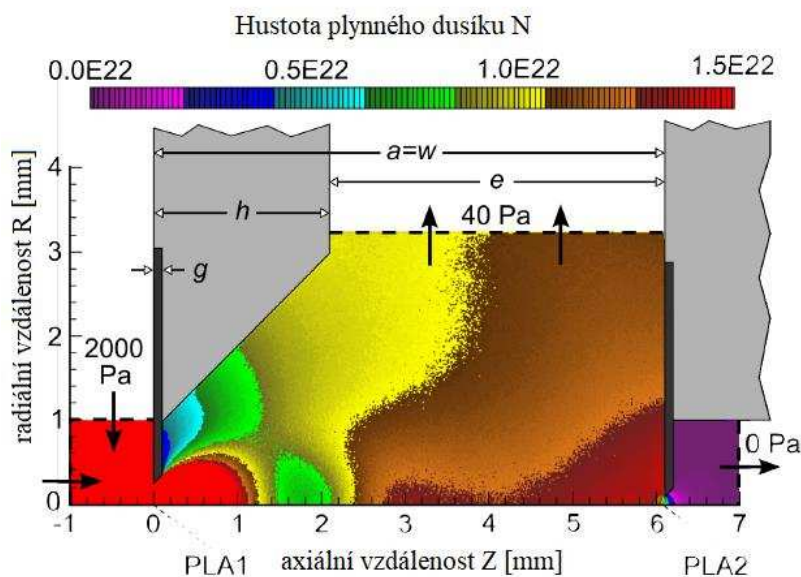
V předchozích kapitolách bylo vysvětleno, že diferenciální čerpaná komora odděluje prostor elektronového děla, kde je vakuum a prostor pozorovaného vzorku, kde je vysoký tlak. Dle použitého zdroje elektronů se odlišuje tlakový rozdíl mezi těmito komorami. V případě použití wolframového vlákna, jako zdroje elektronů, nejsou tak vysoké tlakové nároky na vakuum, jako v případě autoemisního zdroje, který pracuje v prostředí ultravakua. Požadavek na diferenciálně čerpanou komoru je, aby měl paprsek elektronů co nejmenší ztráty. Nejdůležitějšími částmi diferenciálně čerpané komory jsou tlak omezující clony s označením PLA. Clona PLA 1 je umístěna mezi diferenciálně čerpanou komorou a komorou vzorku a PLA 2 je na rozhraní komory s elektronovým dělem a diferenciálně čerpané komory. Na ztráty v paprsku elektronů mají vliv dvě konstrukční řešení. První způsob, jak minimalizovat ztráty je umístit vzorek co nejbližší k cloně PLA 1, druhý způsob minimalizace ztrát je učinění vhodného konstrukčního řešení clony PLA 2 a její posunutí k PLA 1 [17].

V případě použití vysokého urychlovacího napětí nejsou ztráty odražených elektronů ve svazku vysoké. Jelikož je cílem ESEM použití co nejnižšího urychlovacího napětí, je nezbytné diferenciálně čerpanou komoru upravit [17].

V dřívějších dobách byla tato problematika zkoumána experimentálně, nyní může být řešena simulacemi pomocí metody Monte Carlo na PC [17].

2.1 Principy a metodika

Obecně uznávaný průměr PLA je 0,5 mm, pro tento průměr není lehké získat vhodné podmínky pro přechody mezi tlaky, v případě použití rozumné velikosti čerpadla. Z tohoto důvodu se práce Gerasimose D. Danilata zabývá technickými úpravami, jak clon PLA, tak úpravami čerpadla, aby paprsek elektronů byl soudržný v jedné stopě a aby únik plynu přes PLA 2 byl minimální. Na obrázku č. 2.1 je vidět rozložení hustoty plynu, osa mikroskopu je znázorněna osou Z [17].



Obr. 2.1: Průtokové pole clony s geometrií roviny PLA 2 [17].

V komoře, kde se nachází vzorek, je tlak 2000 Pa a teplota 293 K. Z těchto údajů vyplývá, že v komoře je hustota částic $4,94 \cdot 10^{23}/\text{m}^3$, podmínky pro komoru jsou konstantní. Clona PLA 1 je od clony PLA 2 vzdálena 6,1 mm a průměr otvoru v PLA 1 je 0,2 mm. Plyn je odváděn z prostoru mezi clonami kanálkem o šířce $e = 4$ mm, tlak plynu v tomto kanálku se pohybuje kolem 40 Pa [17].

V optimálním případě je mezi clonami PLA 1 a PLA 2 odsát veškerý plyn, který by stál v cestě svazku elektronů. Aby byl všechný plyn z komory odsát, za podmínky průměru PLA 1 = 0,5 mm a tlaku v komoře vzorku 2000 Pa je nutno použít rotační čerpadlo s čerpací rychlostí vyšší než $10 \cdot \text{s}^{-1}$ [17].

2.2 Plochá geometrie PLA 2

Popis vlastností hmotnostního toku plynu mezi dvěma clonami PLA je nápomocen k pochopení výsledků a určení návrhu, které jsou v článku učiněny. Na obrázku č. 2.1 je barevně znázorněno rozložení hustoty plynu po průchodu od PLA 1 do PLA 2 a odsávacího kanálku. Barevné spektrum sloužící k znázornění hustoty plynu v komoře začíná na nejnižší hodnotě $0,0 \cdot 10^{22}/\text{m}^3$, tato hodnota má fialovou barvu a postupně přechází na nejvyšší červenou barvu, která označuje hodnotu $1,5 \cdot 10^{22}/\text{m}^3$ [17].

Dále je nutné definovat vzorec pro NND (Normalized Number Density) [17]:

$$n = \frac{mN_A}{M} \quad [\text{mol}^{-1}] \quad (2.1)$$

- kde: n – látkové množství $[\text{mol}^{-1}]$
 m – hmotnost $[\text{kg}]$
 N_A – Avogadrova konstanta $[\text{mol}^{-1}]$
 M – molární hmotnost $[\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}]$

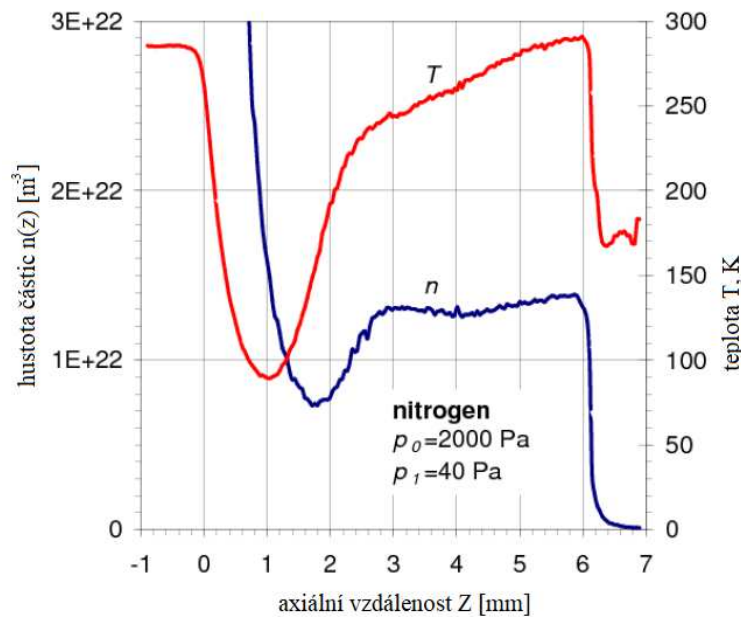
V případě že je zadána hustota materiálu ρ lze použít vzorec [17]:

$$n = \frac{n}{V} = \rho \cdot \frac{N_A}{M} \quad [-] \quad (2.2)$$

kde: N – počet částic v látce [-]

V – objem [m^3]

Z obrázku č. 2.1 jsou hodnoty hustoty částic přeneseny do grafu, který je znázorněn na obrázku č. 2.2. V grafu je uvedena závislost hustoty částic a teploty na axiální vzdálenosti PLA 1 a PLA 2. Na křivce n lze pozorovat prudké klesání hustoty plynů po průchodu clonou PLA 1, to z důvodu ucpání dýzy a nadzvukového proudu. Klesání se zastaví na svém minimu ve vzdálenosti 1,8 mm od clony PLA 1, dále od clony hustota začne stoupat až na svoji počáteční hodnotu. Po průchodu plynu skrz clonou PLA 2 hustota opět klesá až k hodnotám vakua. Křivka T zobrazuje závislost teploty na vzdálenosti clon. Po průchodu clonou PLA 1 prudce teplota plynu klesá a dochází k expanzi plynu. Po dosažení minimální teploty přibližně 90°C se z důvodu postupného zpomalování teplota ohřívá. Po průchodu plynu clonou PLA 2 teplota opět klesne [17].



Obr. 2.2: Závislost hustoty částic na teplotě a vzdálenosti mezi clonami [17].

Na obrázku č. 2.2 je znázorněn graf závislosti rychlosti a Machova čísla na vzdálenosti mezi PLA 1 a PLA 2 [17].

Machovo číslo udává poměr lokální rychlosti plynů v porovnání s místní rychlostí zvuku v proudu pole a je funkcí místní teploty. Machovo číslo je dáno vztahem [17]:

$$\text{Ma} = \frac{v}{c} \quad [-] \quad (2.3)$$

Kde: v – rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

c – rychlost zvuku v daném prostředí [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

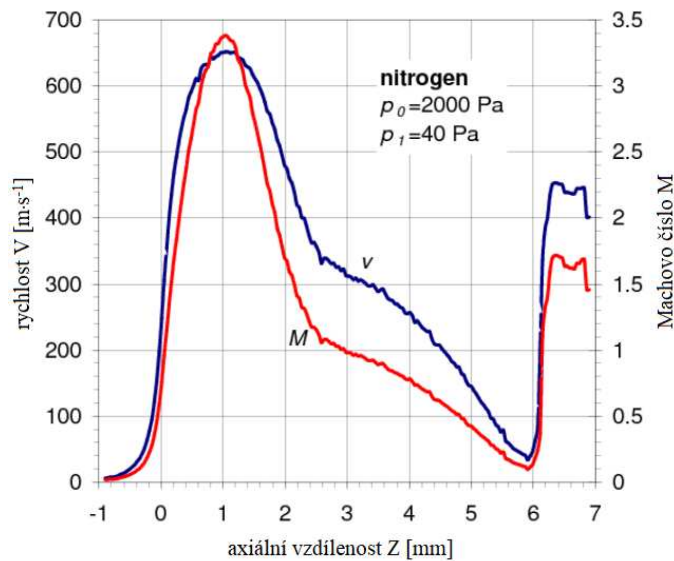
Na obrázku 2.3 je znázorněno nadzvukové proudění, které vznikne po průchodu plynu přes clonu PLA 1, maximální rychlost proudění je v oblasti $Z = 1$ mm dále pak rychlost klesá a v oblasti $Z = 3$ mm je rychlost již podzvuková. Za clonou PLA 2 se rychlost proudění stává opět nadzvukovou a s rostoucí vzdáleností od PLA 2 rychlost klesá. V první nadzvukové oblasti na křivce n v úrovni $Z = 2-3$ mm dochází ke kompresní rázové vlně, ta se nazývá Machův disk. Dále následuje mírná komprese na stěně clony PLA 2. Tento experiment potvrzuje vzorec, který udává vzdálenost Machova disku Z_M od otvoru při volné expanzi, rovnice vzorce je dána vztahem [17]:

$$Z_M = 0,67 D \sqrt{\frac{p_0}{p_1}} \quad [\text{mm}] \quad (2.4)$$

kde: p_0 – stagnační tlak [Pa]

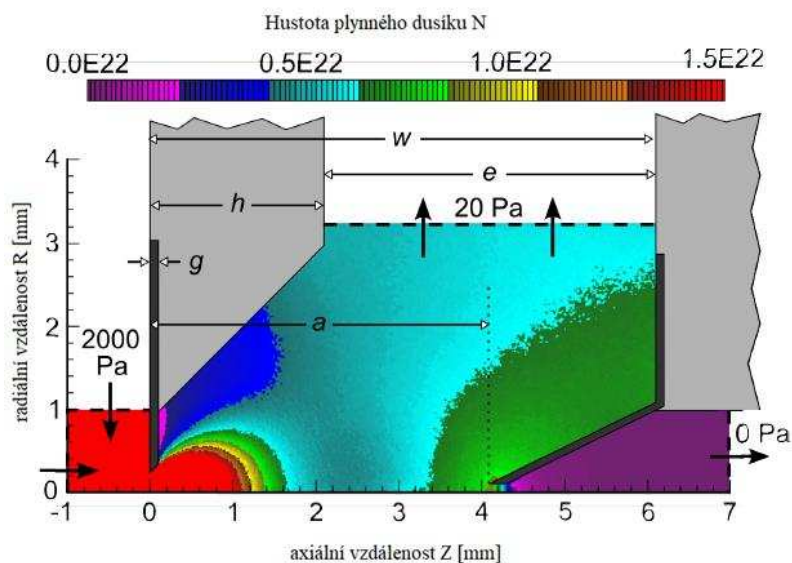
p_1 – tlak v komoře [Pa]

Po dosazení do vzorce je výsledná hodnota $Z_M = 2,4$ mm, tento výsledek odpovídá vzdálenosti, která je uvedena v grafu na obrázku č 2.3. Vzdálenost Machova disku má vliv na objem unikajícího plynu přes clonu PLA 2 a také má vliv na vznik rázových vln [17].



Obr. 2.3: Závislost rychlosti a Machova čísla na vzdálenosti mezi clonami [17].

Vzdálenost PLA 1 a PLA 2 má také vliv na tok plynu, bylo tak zjištěno při experimentu definování variant vzdáleností mezi oběma clonami. Při experimentu docházelo k různému nastavování vzdáleností mezi clonami a výsledek se porovnával s výchozím nastavením. Vzdálenost mezi clonami byla zmenšována po krocích po 1 mm, nejmenší možné vzdálenosti v experimentu byly stanoveny na hodnoty $a = 1,1$ mm a $e = 1$ mm, tyto hodnoty jsou zobrazeny na obrázku č. 2.4. Ostatní podmínky zůstali stejné jako u výchozí situace [17].



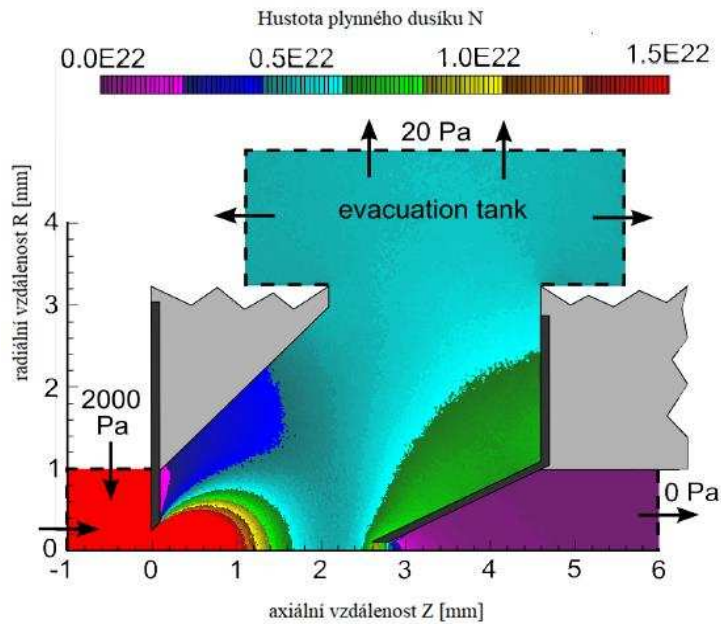
Obr. 2.4: Použití kónické clony PLA2 pro výchozí podmínky [17].

Z výsledků experimentu bylo zjištěno, že rychlost plynů pronikajících přes clony PLA 2 je v začátcích nízká a roste velmi pozvolně, naopak při krátké vzdálenosti se razantně zvyšuje, a to při podmínkách, kdy je vzdálenost od clony PLA 1 menší než 1 až 2 mm. Pro tyto případy zaniká funkčnost diferenciálně čerpané komory [17].

Z výsledků experimentu bylo zjištěno, že pro jednoduchou geometrii clony je optimální meziclonová vzdálenost těsně nad 2 mm, a to přibližně $a = 2,1$ mm. Bohužel tento výsledek nepřinesl významný rozdíl mezi výchozím experimentem a experimentem s upravenou vzdáleností clon. Tato změna umožnila pouze použití menšího čerpadla s potřebnými otáčkami pro získání tlaku $p_1 = 20$ Pa. Tato úprava pomohla k diferenciálnímu čerpání díky vlastnímu působení toku plynů, tudíž byla nazvána jako rychlostní příspěvek k diferenciálnímu čerpání (VADP – velocity assisted differential pumping). Tato úprava může být považována jako první fáze na zlepšení konstrukce diferenciálně čerpané komory, která byla vytvořena pomocí článku pana Danilatose [17].

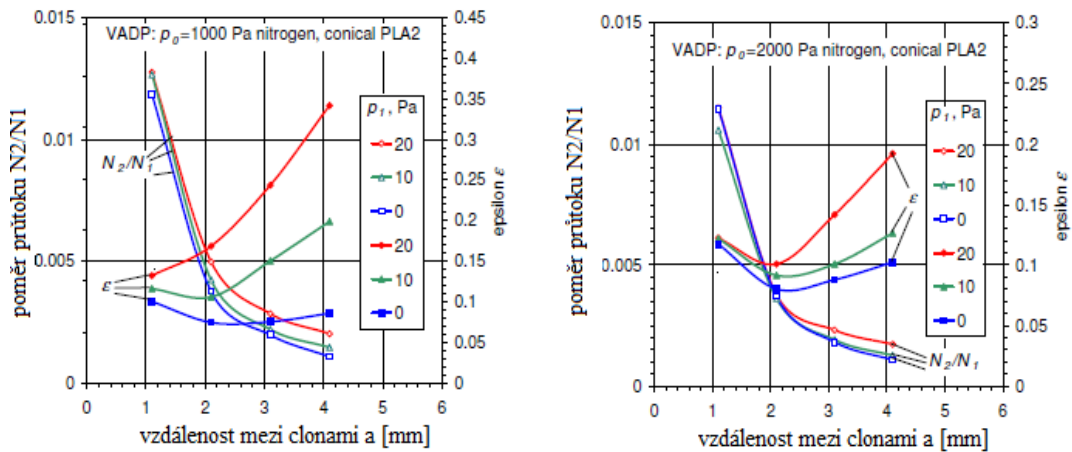
2.3 VADP (diferenciální čerpání s rychlostním příspěvkem) s kónickou úpravou PLA 2

Další zlepšení diferenciálně čerpané komory se týká změny tvaru clony PLA 2. Vylepšená clona byla navržena jako kuželovitá clona, jejíž otvor s menším průměrem musí být umístěn do prostoru nadzvukového proudění plynů. Tento tvar clony brání vzniku kompresních vln, které vznikaly u ploché clony. Dále se zabráni narušení středu toku, což znamená, že vnikající molekulární svazek, který prochází středem trysky, by narušil primární svazek elektronů, z tohoto důvodu je nezbytné tento svazek formovat podél osy, avšak mimo ústí kužele. Na obrázku č. 2.5 je znázorněna upravená kónická clona PLA 2, která zamezuje vzniku silného molekulárního svazku ve středu kuželu [17].



Obr. 2.5: Použití kónické clony PLA2 pro vhodné experimentálně zjištěné podmínky [17].

Clona PLA 2 je umístěna v prvotní vzdálenosti 4 mm a vnitřní povrch kužele pokračuje na stejném poloměru 0,1 mm do vzdálenosti 4,2 mm. Tyto rozměry udávají válcovou plochu o poloměru 0,1 mm a výšce 0,2 mm. Experimentálně bylo zjištěno, že právě tato výška je ideální pro požadované počáteční podmínky. Následně bylo nutné zjistit, do jaké vzdálenosti je vhodné umístit clonu PLA 2 vůči PLA 1. Bylo zjištěno, že vhodná pozice pro umístění clony PLA 2 je ve vzdálenosti $a = 2,1$ mm, jak je vidět na obrázku č. 2.5 [17].



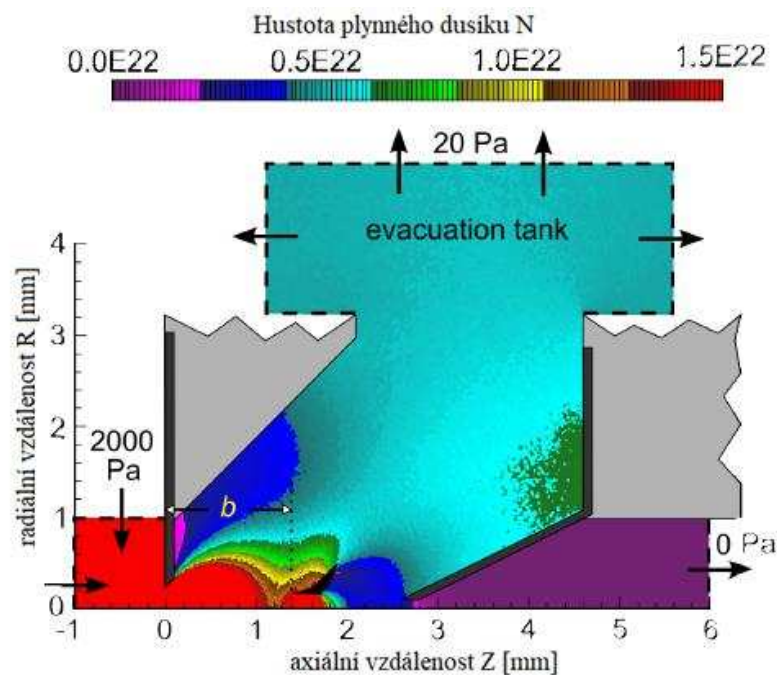
Obr. 2.6: Graf počtu částic v závislosti na vzdálenosti od PLA 1, vlevo pro tlak $p = 1000$ Pa, vpravo pro tlak $p = 2000$ Pa [17].

Podrobnějším nastavováním v této oblasti bylo dosaženo ještě lepších výsledků pro vzdálenost $a = 2,5$ mm. Tento experiment dokázal, že výrazný vliv na zlepšení má kónický tvar clony PLA 2 [17].

2.4 EADE – diferenciální čerpání s proudovou pomocí s přepážkou a kónickou PLA 2

Těsně za clonou PLA 1 vzniká nad jejím horním okrajem oblast, s nízkými tlaky. Tento jev způsobuje právě clona PLA 1, která zde funguje jako tryska a způsobuje odsávání molekul z místa s nízkými tlaky a tyto molekuly dále unáší ve směru toku [17].

Bylo zjištěno, že pokud by se před ústí clony PLA 2 vložila přepážka, bylo by možné přeměřovat proudění před touto clonou a výsledný proud by byl odkloněn. Do diferenciálně čerpané komory byla tedy vložena přepážka, hrot této přepážky je ve vzdálenosti $z = 1,4$ mm, jak je znázorněno na obrázku č. 2.7. U přepážky byl velmi důležitý její tvar, který by měl odklonit proudění částic k PLA 2 a snížit tak únik plynů přes tuto clonu a přeměřovat proudění k sání vývěvy [17].



Obr. 2.7: Komora s přepážkou [17].

Z výsledků Danilatova článku vyplývá, že tato přepážka umístěná ve vhodné poloze je schopna snížit rychlost úniku plynů přes PLA 2 pětinašobně, oproti případu, kdy přepážka do komory umístěna nebyla. Tato úprava byla nazvána EADP – diferenciální čerpání s proudovou pomocí [17].

3 ZÁKLADNÍ ROVNICE ZÁKONU ZACHOVÁNÍ

Zákony zachování různých veličin vyplývají z faktu existence různých symetrií, v dynamice tekutin jsou základní zákony zachování hmotnosti a hybnosti a v termodynamice se k předešlým zákonům přidává ještě zákon zachování energie [10].

3.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity se vztahuje na oblast mechaniky tekutin, kde představuje aplikaci zákona zachování hmoty [10].

Její definice zní: Tekutina proudící elementárním objemem musí mít konstantní hmotnost a celková změna hmotnosti musí být rovna nule. Rovnice kontinuity v diferenciálním vektorovém tvaru pro neustálé prostorové proudění stlačitelné tekutiny má tvar [10]:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad [-] \quad (3.1)$$

kde: ρ – hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 t – čas [s]
 ∇ – operátor nabla [-]
 \vec{u} - vektor rychlosti [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Při ustáleném proudění, kdy se veličiny nemění v čase ($D\rho / Dt = 0$) a kapalina je nestlačitelná ($\rho = \text{konst.}$), je rovnice kontinuity vyjádřena tvarem [10]:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3.2)$$

3.2 Navierovy-Stokesovy rovnice

Základní rovnice popisující proudění tekutin, které vyjadřují zákon zachování hybnosti. Tyto rovnice používají druhý Newtonův pohybový zákon, a to zákon síly. N-S rovnice ve složkovém tvaru lze vyjádřit takto [10]:

$$\frac{Du_i}{Dt} = \underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}}_1 + \underbrace{u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k}}_2 = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}}_3 + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k}}_4 \quad [-] \quad (3.3)$$

kde: 1 – proměnnost proudového pole v čase
2 – charakterizuje konvenci
3 – gradient tlaku
4 – vliv vazkosti

Vektorový tvar N-S rovnice [10]:

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{u}) \cdot \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + i \nabla^2 \vec{u} \quad [-] \quad (3.4)$$

kde: p – modifikovaný tlak [Pa]

i – součinitel kinematické vazkosti [-]

Modifikovaný tlak je dán vztahem [10]:

$$p = P + \rho \psi \quad [\text{Pa}] \quad (3.5)$$

kde: P – tlak [Pa]

ψ – gravitační potenciál [-]

Součinitel kinematické vazkosti určuje vztah [10]:

$$i = \frac{\mu}{\rho} \quad [-] \quad (3.6)$$

kde: μ – dynamická vazkost [Pa·s]

3.3 Rovnice energie

Rovnice energie vyjadřuje zákon zachování energie, tato rovnice počítá s vnitřní energií plynů, proto je vhodná pro řešení systému. Rovnice má tvar [11], [18]:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)}_I + \underbrace{\nabla(\vec{u}(\rho E + p))}_{II} = \nabla \left(\underbrace{\lambda_{\text{eff}} \nabla T}_{III} - \sum_i \underbrace{h_i \cdot \vec{J}_i}_{IV} + \underbrace{(\tau_{\text{eff}} \vec{u})}_{V} \right) + \underbrace{S_h}_{VI} \quad [-] \quad (3.7)$$

kde: E – celková měrná energie [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

λ_{eff} – součinitel efektivní vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T – termodynamická teplota [K]

h_i – měrná entalpie složky i [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

\vec{J}_i - difuzní složka i [-]

τ_{eff} – tenzor efektivního tření [Pa]

S_h – Strouhalovo číslo [-]

I – akumulace energie

II – vtok – výtok

III – složka vodivosti

IV – difuze energie

V – tření (viskózní ztráty)

VI – vydatnost objemového zdroje

Celková měrná energie je dána vztahem [11], [18]:

$$E = U + \frac{1}{2} \bar{u} \cdot \bar{u} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3.8)$$

kde: U – vnitřní energie $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$

Vnitřní energii definuje vztah [11], [18]:

$$U = h - \frac{p}{\rho} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3.9)$$

kde: h – entalpie $[\text{J}]$

Součinitel efektivní vodivosti lze vypočítat vztahem [11], [18]:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda + \lambda_t \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3.10)$$

kde: λ – tepelná vodivost $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

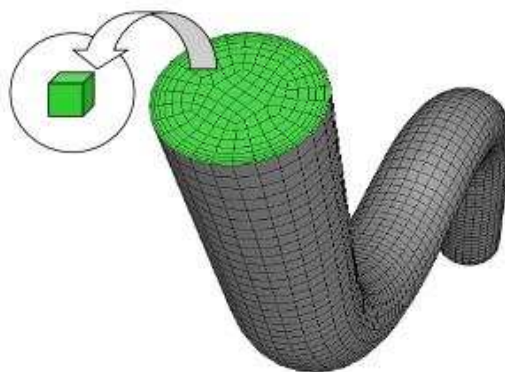
λ_t – turbulentní tepelná vodivost $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

4 DISKRETIZAČNÍ PŘÍSTUPY, METODA KONEČNÝCH OBJEMŮ A INTERPOLAČNÍ SCHÉMA

Znalost těchto metod je nezbytná pro pochopení podstaty principu fungování programů pro simulaci proudění jako je např. program ANSYS Fluent.

4.1 Diskretizace

Diskretizace znamená rozdělení celé oblasti, která bude počítána na konečný počet prvků, nebo objemů, pomocí výpočetní sítě. Na obrázku č. 4.1 je příklad rozdělení tělesa pomocí metody konečných objemů. Diskretizací se nahrazuje spojité prostředí systémem diskretních bodů, v těchto bodech jsou soustředěny fyzikální parametry, které popisují vlastnosti příslušného místa [12], [13].



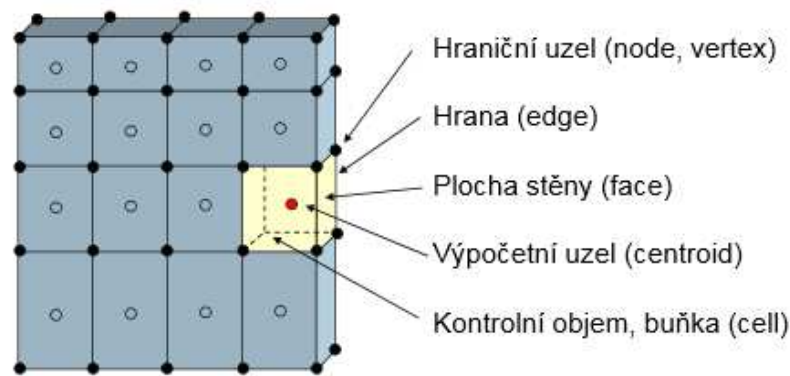
Obr. 4.1: Diskretizace na konečný počet objemů [13].

4.2 Metoda konečných objemů – Finite Volume Method,

Tato metoda má několik zásad [12]:

- využívá integrálního tvaru rovnic
- aproximace toků přes hranice kontrolního objemu
- využívá 80 % komerčních řešičů

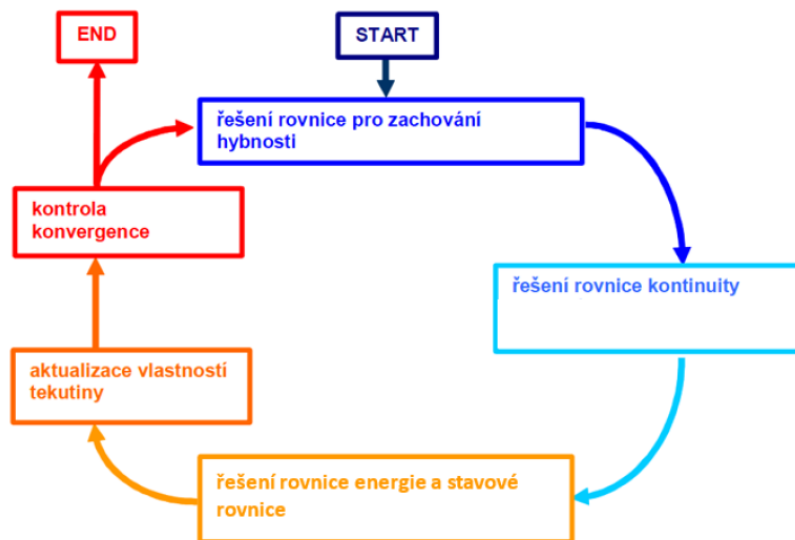
Řešená oblast je rozdělena na konečný počet malých kontrolních objemů, které se nepřekrývají, jak je zobrazeno na obrázku č. 4.2. Objemy jsou rozděleny pomocí sítě, které se říká Grid nebo Mesh. Základní rovnice kontinuity, pohybové nebo rovnice energie, které popisují spojité prostředí, jsou diakritizovány do soustavy algebraických rovnic.



Obr. 4.2: Vyznačení kontrolních objemů [13].

V geometrických středech kontrolních objemů jsou skalární veličiny a hodnoty složek rychlosti, hodnoty na hranicích objemu se získávají interpolací [12].

Výpočet je realizován po cyklech, které označujeme jako iterace. Okrajové podmínky, které byly nastaveny na začátku výpočtu, působí na okolní buňky sítě a v celém objemu probíhá pod tímto vlivem celková změna. Na konci každého výpočtu je provedena kontrola konvergence. Výpočetní cyklus se opakuje do doby, kdy se sledované hodnoty dostatečně ustálí. Na obrázku č. 4.3 je zobrazeno schéma interakčního cyklu [12].

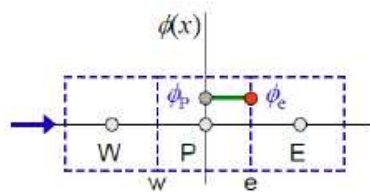


Obr. 4.3: Schéma interakčního cyklu [12].

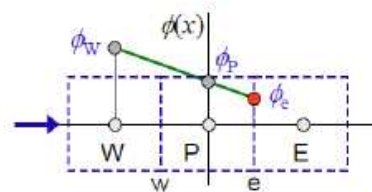
4.3 Interpolační schéma (prostorové)

Simulační program ANSYS Fluent ukládá skalární veličiny a složky rychlosti do jednotlivých středů konečných objemů, pro výpočty simulace je nutné, aby hodnoty skalárních veličin a složky rychlosti byli na hranicích konečných objemů. Hodnoty pro hranice konečných objemů jsou získávány několika druhy interpolací [12].

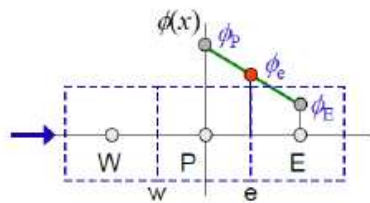
- Protiproudá interpolace 1. řádu (First-order upwind). Zde je předpoklad, že hodnota ϕ na stěně je rovná hodnotě v centru buňky ležící vlevo. (proti proudu) jak je vidět na obrázku č. 4.4 a.
- Protiproudá interpolace 2. řádu (Second-order upwind). Hodnota ϕ na stěně je určena z hodnot center dvou buněk ležící vlevo (proti proudu), interpolace je zobrazena na obrázku č. 4.4 b.
- Centrální diference (central differencing). Určuje hodnotu ϕ na stěně pomocí lineární interpolace mezi hodnotami ve středu sousedních buněk, dle obrázku č. 4.4 c.
- Protiproudá kvadratická interpolace (QUICK). Ze dvou uzlů je aproximována kvadratická křivka, jeden z uzlů leží proti proudu a druhý leží po proudu. Jak je znázorněno na obrázku č. 4.4 d.



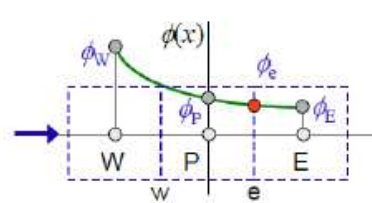
a) Protiproudá interpolace 1. řádu



b) Protiproudá interpolace 2. řádu



c) Centrální diference



d) Protiproudá kvadratická interpolace

Legenda:

- interpolovaná hodnota
- směr toku

Obr. 4.4: Interpolační schémata [12].

5 CFD PROGRAM ANSYS FLUENT

CFD je disciplína, která se zabývá výpočtem dynamiky tekutin simulacemi procesů, které využívají pohybové rovnice a rovnice kontinuity mechaniky tekutin. Jedním z programů umožňující tyto simulace je ANSYS Fluent. Výstupem těchto simulací jsou informace, dávající představu o chování média uvnitř zařízení, rozložení rychlostního pole, nebo například zjištění tlakových ztrát [12], [13].

5.1 Pressure – Based solver

Tato metoda je určena pro řešení úloh s nízkou rychlostí nestlačitelné tekutiny. Algoritmus využívající Pressure – based solver je zařazen do projekčních metod, algoritmus počítá tlak z rovnic kontinuity a hybnosti [12], [13].

5.1.1 Pressure – Based sdružený algoritmus

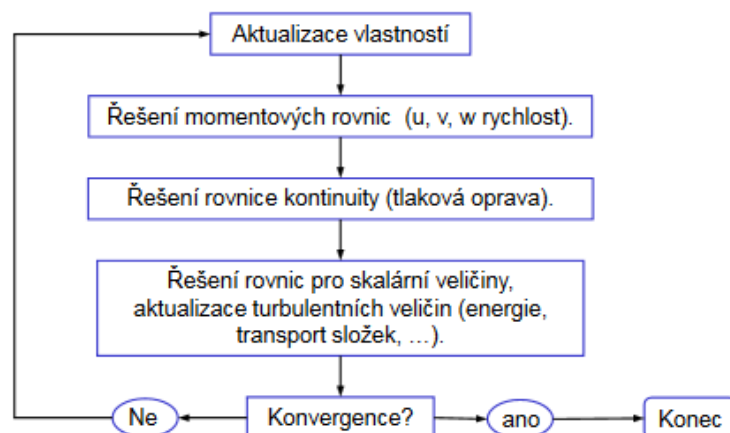
Použití tohoto algoritmu se doporučuje při silných vnitřních závislostech mezi hustotou, hybností a energií složek [12], [13].

Rychlost konvergence je výrazně vyšší než u sekvenčního algoritmu, a to z důvodu sdruženého řešení rovnic hybnosti a kontinuity. Nevýhodou oproti sekvenčnímu algoritmu je nutnost dvojnásobně větší paměti, jelikož se do paměti ukládá diskrétní systém rovnic hybnosti a systém rovnic řešících výpočet rychlosti tlakových polí [12].

5.1.2 Pressure – Based sekvenční algoritmus

Nezávislé rovnice jsou předpokládány pouze pro jedinou proměnnou, vzhledem k tomu že jsou rovnice nelineární a závislé, to ovšem znamená, že výpočet se musí opakovat, dokud nejsou splněna konvenční kritéria.

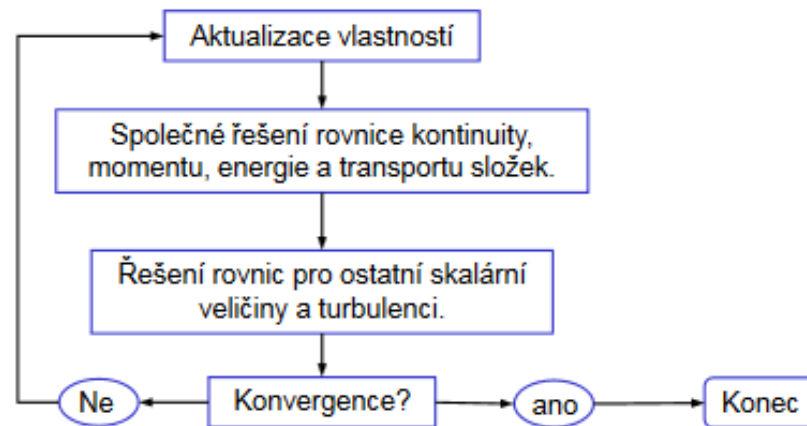
Algoritmus efektivně využívá paměti, jelikož je v každý okamžik v paměti uložena pouze jedna diskreditovaná rovnice. Interakce sekvenčního algoritmu je naznačena na obrázku č. 5.1 [12].



Obr. 5.1: Pressure – Based sekvenční algoritmus [12].

5.2 Density – Based solver

Density - Based solver řeší všechny rovnice pro hybnost kontinuity a energii současně, rovnice pro ostatní skalární veličiny jsou řešeny odděleně až poté. I zde je podmínkou provedení určitého počtu iteračních cyklů, aby byla splněna konvergenční kritéria. Na obrázku č. 5.2 jsou znázorněny jednotlivé kroky iterace. Metoda Density – Based solver má dvě metody linearizace rovnic, explicitní a implicitní metodu [12].



Obr. 5.2: Density – Based solver [12].

- Explicitní metody

Neznámé hodnoty jsou v každé buňce počítány ze vztahů, které obsahují pouze existující hodnoty, známé z předchozí iterace. U této metody se mohou vyskytovat problémy s numerickou stabilitou [12].

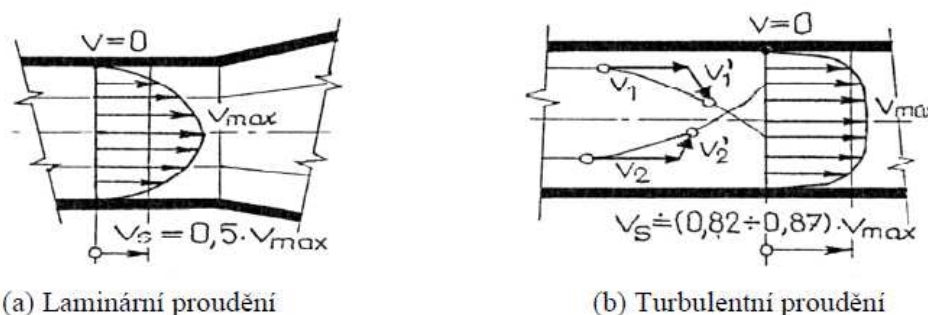
- Implicitní metody

Neznámé hodnoty jsou stanoveny z existujících i neznámých hodnot ve vedlejších buňkách [12].

6 TURBULENCE, PROUDĚNÍ

Proudění lze rozdělit do dvou základních typů, do laminárního a turbulentního. Laminární proudění je charakteristické pro velmi pomalý pohyb, nebo pro vysokou hodnotu vazkosti, typ laminárního proudění je zobrazen na obrázku č. 6.1 a. V případě laminárního proudění se částice pohybují uspořádaně a vzájemně po sobě kloužou ve vrstvách. Proudění zcela neviskózní tekutiny je vždy laminární, turbulence nemůže v neviskózní tekutině vzniknout [10].

Turbulentní proudění je charakterizováno rychlým pohybem, nebo malým vlivem viskozity, kdy i menší poruchy v proudu nekontrolovatelně rostou a způsobují tak intenzivní promíchávání v celé oblasti. Turbulentní proudění je zobrazeno na obrázku č. 6.1 b. [14].

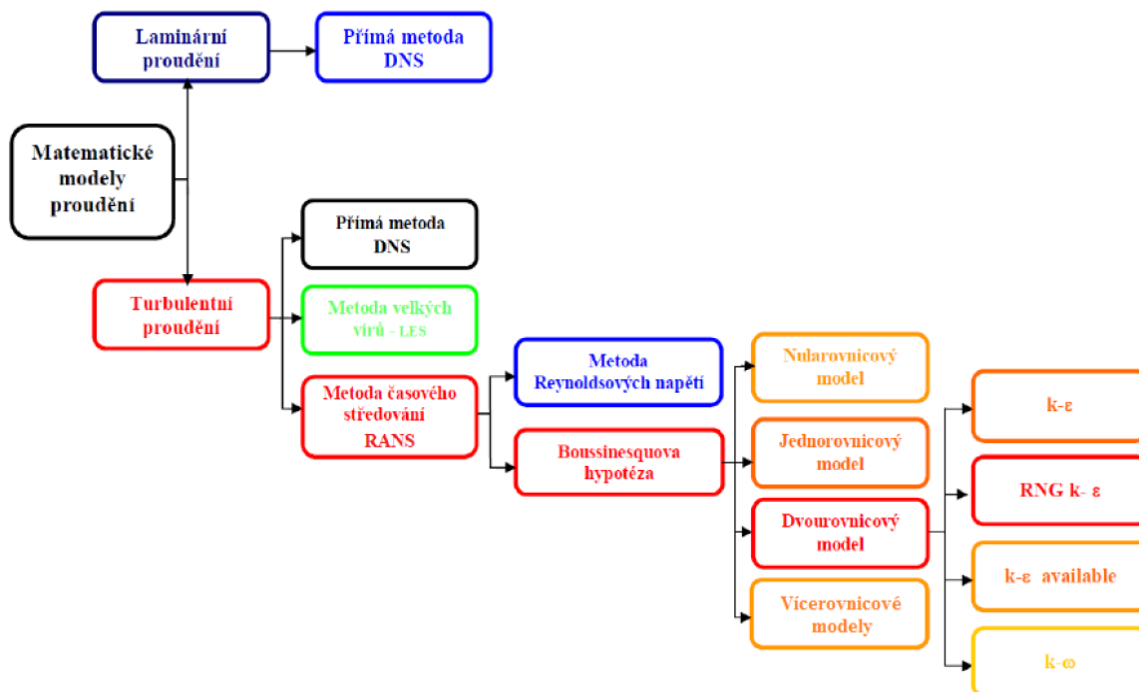


Obr. 6.1: Rychlostní profil pro proudění v potrubí [1].

6.1 Matematické metody turbulence

Z důvodu složitosti chování turbulentních vírů není možné popsat jejich průběh zcela přesně, proto se používají zjednodušené matematické simulace. Struktura matematických modelů proudění je znázorněna na obrázku č. 6.2. Numerické simulace mají tři základní přístupy [12], [18]:

- DNS – Metoda přímé simulace.
- LES – Metoda velkých vírů.
- RANS – Metoda časového středování.



Obr. 6.2: Schéma modelů proudění [18].

6.2 Boussinesquova hypotéza

Předpokladem této hypotézy, podobně jako u laminárního proudění, je u zjednodušeného dvourozměrného proudění pro smykové napětí platnost Newtonova vztahu pro smykové napětí, a to [18]:

$$\tau = \eta \frac{du}{dx} \text{ [Pa]} \quad (6.1)$$

kde: τ – tečné napětí v kapalině [Pa]

u – rychlost toku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

x – souřadnice ve směru kolmém na směr proudění [m]

η – dynamická viskozita [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$]

6.2.1 Statické metody turbulence

Pro případ laminárního proudění pro výpočet průběhu je systém pohybových rovnic uzavřen a je možné využívat metodu přímé simulace. V případě turbulentního proudění je systém ovšem nedostatečně určený, tzn. počet neznámých proměnných je více než je rovnic, z tohoto důvodu se vytváří soubor přídatných rovnic a empirických vztahů, které se označují jako modely turbulence [12].

6.2.2 Dvourovnicové modely

Do oblasti dvourovnicových modelů patří model k- ε a model k- ω , které se následně dělí na další podskupiny. Do skupiny k- ω patří Standard k- ω , SST k- ω , všechny tyto modely jsou vhodné k počítání plně rozvinutých turbulentních proudění volného proudu, avšak pro výpočty v blízkosti pevných stěn se jejich vhodnost snižuje. V případě všech modelů typu k- ω je rychlost disipace ε nahrazena specifickou rychlostí disipace ω , která je vyjádřena vzorcem [12], [18]:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{K} \text{ [m}^2\cdot\text{s}^{-3}\text{]} \quad (6.2)$$

kde: ε – disipace [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$]

K – turbulentní kinetická energie [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$]

Do skupiny k- ε patří Standard k- ε , RNG k- ε a Realizable k- ε , v těchto modelech se využívá Boussinesquovi hypotézy o vírové viskozitě. Turbulentní vazkost je určena rovnicí pro turbulentní kinetickou energii k a pro rychlost disipace ε a je dána vztahem [12], [18]:

$$v_{\text{turb}} = f(K, \varepsilon) \text{ [m}^2\cdot\text{s}^{-1}\text{]} \quad (6.3)$$

- Standard k- ε se používá v případě, když v úloze figuruje vysoké Reynoldsovo číslo $Re \geq 200000$. Úloha není vhodná pro řešení případů obtékání křivočarých těles.
- RNG k- ε model využívá matematického postupu normalizačních grup (RNG), model se používá pro případy, kde se vyskytují rozsáhlé oblasti se zavířením a proudění může být až laminární.
- Realizable k- ε dosahuje nejvyššího výkonu ze všech modelů k- ε . V porovnání s modelem Standard k- ε je zde odlišně definována turbulentní vazkost a také je modifikována transportní rovnice pro rychlost disipace ε .
- Standard k- ω se využívá pro případy nízkého Reynoldsova čísla $Re \leq 200000$ a pro přechodné režimy proudění, s ne úplně vyvinutou turbulencí. Model je velice citlivý na podmínky ve volném proudu a nejvyšší přesnosti dosahuje v blízkosti stěn.
- SST k- ω (Shear Stress Transport k- ω model) je to kombinace výhod modelů k- ω a k- ε . Vhodný pro případy velice nízkého Reynoldsova čísla $Re \leq 5000$. Model se často používá pro použití u lopatkových strojů, kde má velmi vysokou přesnost. Ve volném prostoru model funguje jako k- ε a v blízkosti stěn uplatňuje výhody k- ω .

6.3 Rázová vlna

Při nadzvukovém pohybu tělesa vzniká efekt zvaný rázová vlna. Tento efekt vzniká i při obdobné situaci, kterou je nadzvukové proudění. Každý statický bod materiálu, který je obtékán ve stlačitelném prostředí, vytváří rozruchy tlakového pole. V případě, kdy rychlost proudění je větší než rychlost zvuku, vytvářené vlny se skládají na sebe a vzniká rázová vlna. V rázové vlně skokově klesá rychlost proudu plynu, statický tlak

naopak skokově roste a celkový tlak se o něco zmenší. Pokles celkového tlaku znamená, že na rázové vlně dochází k energetickým ztrátám, velikost těchto ztrát je úměrná intenzitě rázové vlny a intenzita rázové vlny je rovna velikosti rozdílu rychlosti před a za vlnou. [20]

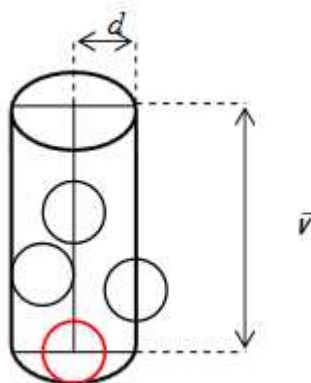
Pomocí webového kalkulátoru s názvem Compressible Aerodynamics Calculator 3.0 je možno určit rychlost, při které dochází k utržení rázové vlny. Kalkulátor je založen na principu Taylor-Maccollovy analýzy a lze jej nalézt na stránce: [21]. Pomocí tohoto kalkulátoru bylo zjištěno, že u clony PLA 2, která je pod úhlem 17° dochází k utržení rázové vlny do rychlosti 1,15 Machu, což odpovídá rychlosti $391,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro clonu PLA 2 s úhlem 37° dochází k odtržení rázové vlny při rychlosti 1,77 Machu což je $602,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z výše zmíněných poznatků vyplívá, že čím je rychlost proudění vyšší, tím menší má rázová vlna sklon k odtržení a clona PLA 2 může mít větší úhel.

7 SRÁŽKY MOLEKUL, STŘEDNÍ VLNOVÁ DRÁHA A ROZPTYL ELEKTRONŮ

Interakce, které vznikají mezi molekulami pracovního plynu a elektrony, jsou využívány pro vyhodnocování výsledků simulací apod. [15].

7.1 Srážky molekul, střední vlnová dráha

Frekvencí srážek se rozumí, srážky jedné molekuly s dalšími molekulami stejného druhu za určitý čas. Pro zjednodušenou představu budou molekuly představeny jako koule o poloměru d , pouze jedna molekula je v pohybu, ostatní se nehýbají. Za jednotku času urazí molekula průměrnou dráhu \bar{v} a narazí do všech molekul, které jsou ve válci o poloměru d a výšce \bar{v} [15]. Výše popsaná situace je zobrazena na obrázku č. 7.1.



Obr. 7.1: Srážky molekul [15].

Výpočet frekvence srážek udává vztah [15]:

$$Z_A = \pi d^2 \bar{v} \frac{N}{V} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (7.1)$$

kde: \bar{v} - střední aritmetická rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

d - průměr válce [m]

N - počet molekul [-]

V reálném případě se ovšem budou pohybovat všechny molekuly. Proto je nutné nahradit střední aritmetickou rychlost \bar{v} za vzájemnou střední rychlost \bar{v}_{AB} . Vzájemná střední rychlost dvou rozdílných částic A a B se vypočte vztahem [15]:

$$\bar{v}_{AB} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi\alpha}} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (7.2)$$

kde: \bar{v}_{AB} - vzájemná střední rychlost částic [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

k - Boltzmannova konstanta [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$]

α - redukovaná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$]

V případě dvou stejných částic se zápis zjednoduší na [15]:

$$\bar{v}_{AA} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_a}} \sqrt{2} = \bar{v} \sqrt{2} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7.3)$$

kde: \bar{v}_{AA} - vzájemná střední rychlost dvou stejných částic $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

m_a – hmotnost jedné částice $[\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}]$

Z výše uvedených vzorců je sestaven vzorec pro frekvenci srážek jedné molekuly s ostatními molekulami stejného druhu, za předpokladu, že jsou všechny molekuly v pohybu [15]:

$$Z_A = \pi d^2 \bar{v} \frac{N}{V} \sqrt{2} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (7.4)$$

Vzorec pro srážky molekul stejného druhu za jednotku času v určitém objemu je dán vztahem [15]:

$$Z_{AA} = \frac{1}{2} \frac{N}{V} Z_A = \frac{\sqrt{2}}{2} \pi d^2 \bar{v} \left(\frac{N}{V} \right)^2 \quad [\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7.5)$$

Vzorec pro srážky molekul A s ostatními molekulami B, ke kterým dochází za jednotku času v určitém objemu, je dán vzorcem [15]:

$$Z_{AB} = \frac{N_A}{V} \frac{N_B}{V} \pi d_{AB}^2 \bar{v}_{AB} = \frac{N_A}{V} \frac{N_B}{V} \pi \left(\frac{d_A + d_B}{2} \right)^2 \bar{v}_{AB} \quad [\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7.6)$$

7.2 Střední volná dráha

Střední volná dráha je průměrná vzdálenost, kterou uletí částice mezi dvěma srážkami, tato vzdálenost je určena vztahem [15]:

$$\bar{l} = \frac{1}{\frac{N}{V} \cdot \pi d^2 \sqrt{2}} \quad [\text{m}] \quad (7.7)$$

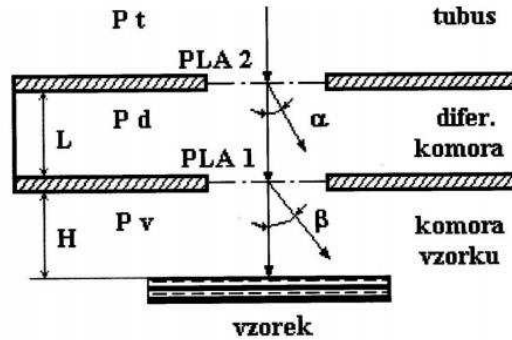
Střední volná dráha je nepřímo úměrná počtu částic v jednotce objemu, tedy tlaku plynu. Střední volná dráha také nezávisí na teplotě prostředí, ve kterém se částice pohybují.

7.3 Rozptyl elektronů

Jedním z nejdůležitějších požadavků pro pozorování environmentálním mikroskopem je udržení svazku primárních elektronů v původní stopě i po průchodu prostředím s vyšším tlakem. V případě nedodržení původní stopy dojde ke zhoršení rozlišovací schopnosti mikroskopu [16].

V prostředí, kde je vyšší tlak, než vakuum dochází k srážkám primárních elektronů s molekulami plynu častěji. To je důvod proč primární elektrony ztrácejí část své kinetické energie a také se vychylují z přímé stopy svého letu [16].

K rozptýlení elektronového svazku dochází ve dvou místech, nejprve při průchodu komorou diferenciálního čerpání a poté při průchodu komorou, kde je umístěn vzorek. V komoře vzorku je vysoký tlak, proto má tato část největší vliv na rozptyl stopy elektronového svazku. Obě komory jsou odděleny aperturní clonou PLA1 jak je vidět na obrázku č.7.2. K největšímu rozptylu dochází na úseku H a to mezi aperturní clonou a vzorkem, proto je nutné tuto vzdálenost co nejvíce minimalizovat [16].



Obr. 7.2: Rozptyl svazku primárních elektronů [16].

Základní parametr, který je používán při řešení problematiky rozptylu elektronového paprsku, je průměrný počet srážek M připadající na elektron pohybující se v plynném prostředí komory diferenciálního čerpání. Stejný způsob lze použít pro určení průměrného počtu srážek v komoře vzorku. Průměrný počet srážek je dán vzorcem [16]:

$$M_L = \sigma_T \cdot n_L \cdot L \quad [-] \quad (7.8)$$

kde: σ_T – celkový záchytný průřez plynu [m^2]

n_L – koncentrace molekul plynu [m^{-3}]

L – délka [m]

Koncentraci molekul plynu určuje vztah [16]:

$$n_L = \frac{p_D}{k \cdot T} \quad [m^{-3}] \quad (7.9)$$

kde: p_D – tlak plynu [Pa]

Velikost parametru M rozlišuje tři základní rozptylové režimy:

- Minimální rozptyl, pohybuje se v rozmezí $0 \leq M \leq 0,05$. V tomto případě se 5 % elektronů odchýlilo od původní stopy.
- Úplný rozptyl se pohybuje v intervalu $3 < M$. V režimu úplného rozptylu se odchýlí více než 95 % elektronů od původní trasy.
- Částečný rozptyl je dán intervalem $0,05 < M \leq 3$.

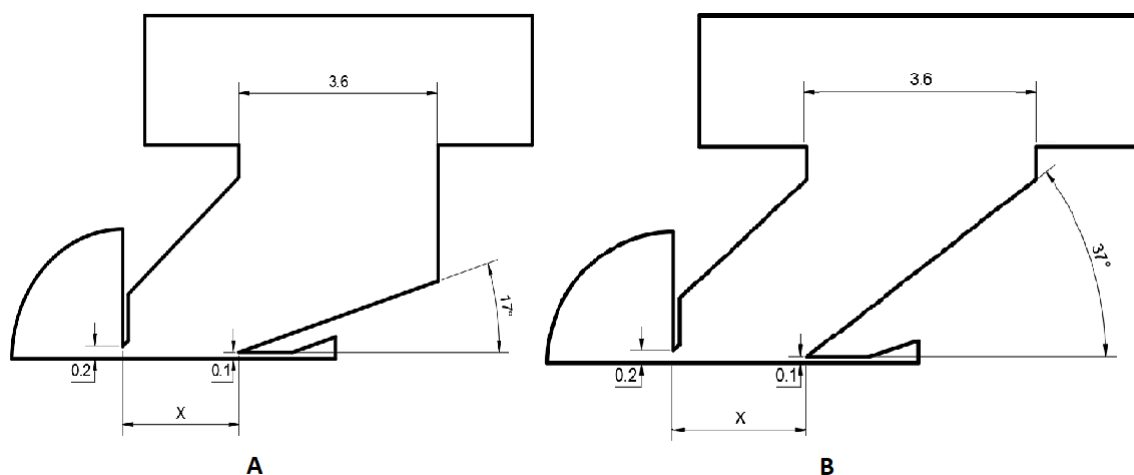
8 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem práce je najít optimální tvar a umístění kónické clony PLA 2, která odděluje diferenciálně čerpanou komoru od tubusu mikroskopu, ve kterém je vakuum.

Návrhy na optimalizace PLA 2 se opírají o dřívější výzkum Dr. Danilose, jemuž se věnuje kapitola 2 této diplomové práce. Modely s úpravami jsou tvořeny v programu AutoCad Inventor a následné CFD simulace a jejich vyhodnocení probíhá v programu ANSYS Fluent.

8.1 Úprava clony PLA 2

Úprava DČK se týkala posunutí PLA 2 blíže k PLA 1 a změnu úhlu kónické plochy, tato úprava se rozdělila na čtyři etapy. Na obrázku č. 8.1 jsou zobrazeny dva základní modely, kde na obrázku A svírá PLA 2 úhel 17° a na obrázku B má PLA 2 úhel 37° . U obou těchto modelů došlo k úpravě vzdálenosti mezi oběma clonami, tato vzdálenost je na obrázku č. 8.1 reprezentována kótou X a byla upravena na hodnoty 1,1 mm, 2,1 mm, 3,1 mm, 4,1 mm pro variantu A i B, z čehož vzniklo konečných 8 modelů.



Obr. 8.1: Úprava úhlu clony PLA2.

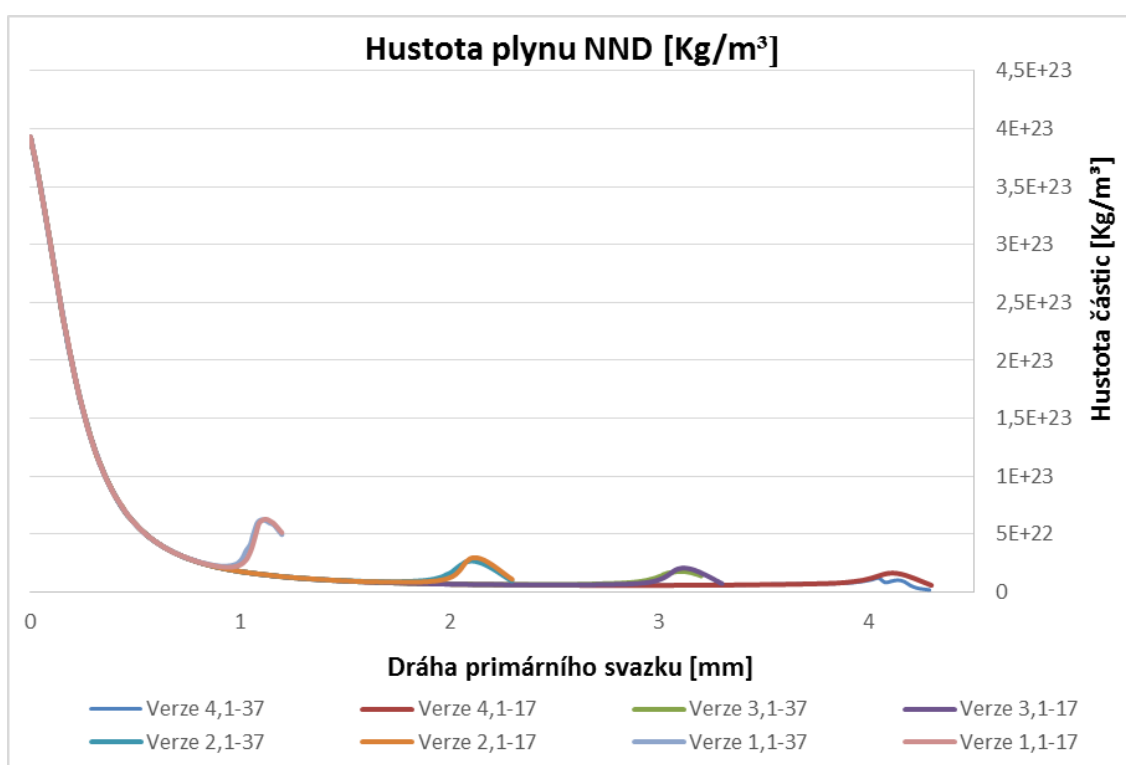
9 VÝSLEDKY SIMULACÍ

V této práci bylo vyhodnocováno 8 modelů, které se liší vzdáleností clon PLA 1 od PLA 2 a úhlem PLA 2, modely a jejich rozdílné rozměry jsou uvedeny v tabulce č. 9.1.

Tab. 9.1: Verze modelů

Verze	1,1-17	1,1-37	2,1-17	2,1-37	3,1-17	3,1-37	4,1-17	4,1-37
Vzdálenost PLA [mm]	1,1	1,1	2,1	2,1	3,1	3,1	4,1	4,1
Úhel [°]	17	37	17	37	17	37	17	37

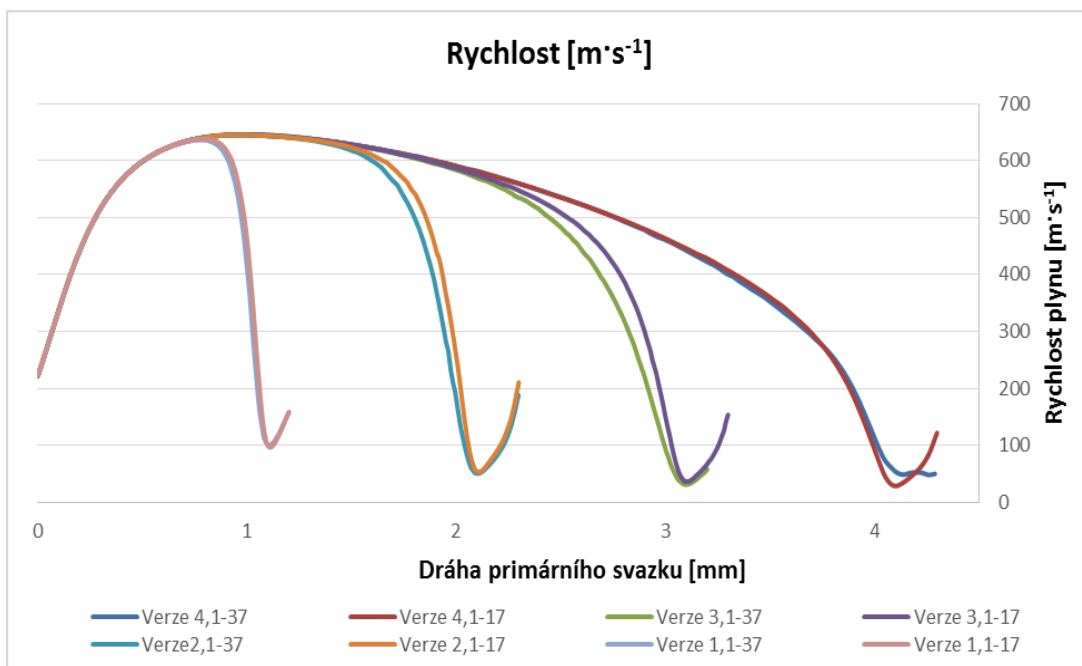
U každého z modelů byly vyhodnoceny 4 základní oblasti, a to normalizovaná hustota plynu (NND), rychlost proudění plynu, teplota a tlak v komoře diferenciálního čerpání. Jednotlivé oblasti jsou zpracovány do grafů, které obsahují údaje z jednotlivých oblastí všech modelů, obrázky a grafy samostatných modelů jsou obsaženy v příloze.



Obr. 9.1: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1.

V prvním grafu, který je na obrázku č. 9.1, je znázorněna závislost hustoty částic plynu na vzdálenosti od PLA 1 směrem k PLA 2.

Největší hustota plynu vychází u varianty s vzájemnou vzdáleností clon 1,1 mm, kde má plyn po průchodu PLA 1 největší hustotu, a to z důvodu zbrzděním plynu z vysoké rychlosti, to platí pro variantu s úhlem clony PLA 2 17° i 37°. U dalších variant k tomuto zbrzdění nedochází z tak vysoké rychlosti. Z grafu je patrné, že hustota plynu klesá s rostoucí vzdáleností clon.

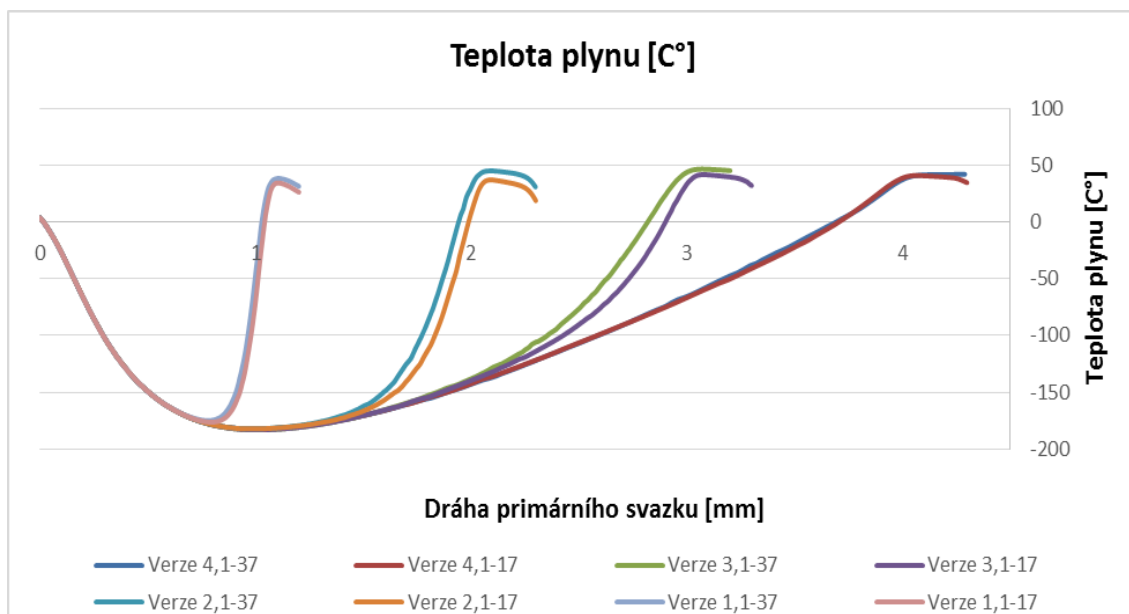


Obr. 9.2: Graf závislosti rychlosti proudění plynu na vzdálenosti od PLA 1.

Na obrázku č. 9.2 je graf s vynesenu závislostí rychlosti proudění plynu na vzdálenosti PLA 1 od PLA 2.

Z grafu je patrné že s rostoucí vzdáleností od PLA 1 se snižuje rychlost proudění plynu, kde se varianta se vzdáleností 1,1 mm dostává na nejnižší rychlost proudění $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a varianta s nejdělsí vzdáleností 4,1 mm a úhlem 17° klesá až na hodnotu $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

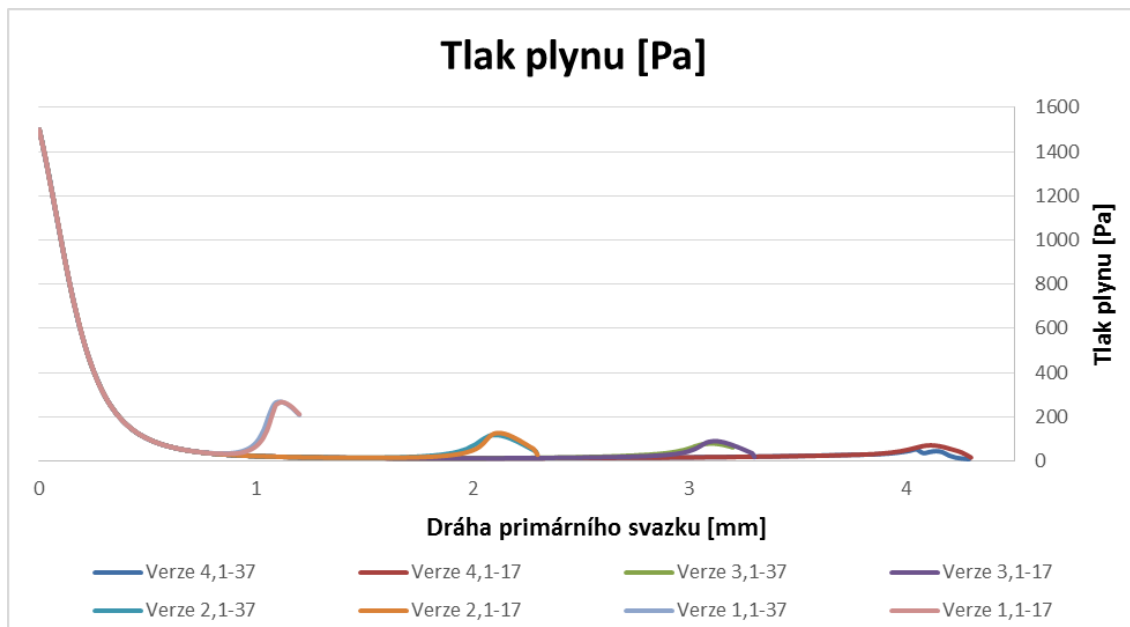
U variant s vzdáleností clon 1,1 mm, 2,1 mm, 3,1 mm zasahuje clona PLA 2 do oblasti s nadzvukovým prouděním, a proto je snížení rychlosti proudění intenzivnější, než u varianty 4,1 mm.



Obr. 9.3: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1.

Na obrázku č. 9.3 je zobrazen průběh teploty v závislosti na vzdálenosti od PLA 1, teplota se pohybuje v intervalu od 50 °C do -180 °C.

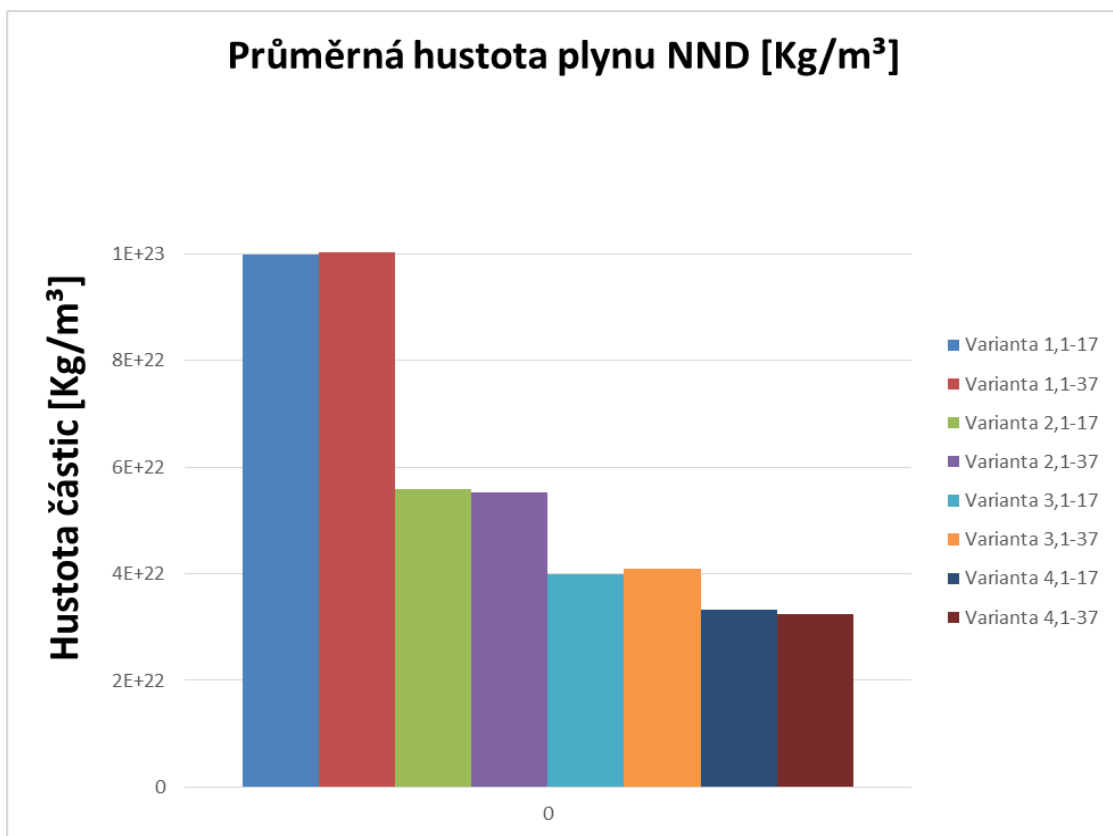
Důvodem rychlého snížení teploty plynu je nadzvukový stav proudění, z tohoto důvodu mají všechny varianty do svého minima průběh teplot podobný, po dosažení minima začne teplota stoupat a s rostoucí vzdáleností mezi clonami se tak děje pozvolněji.



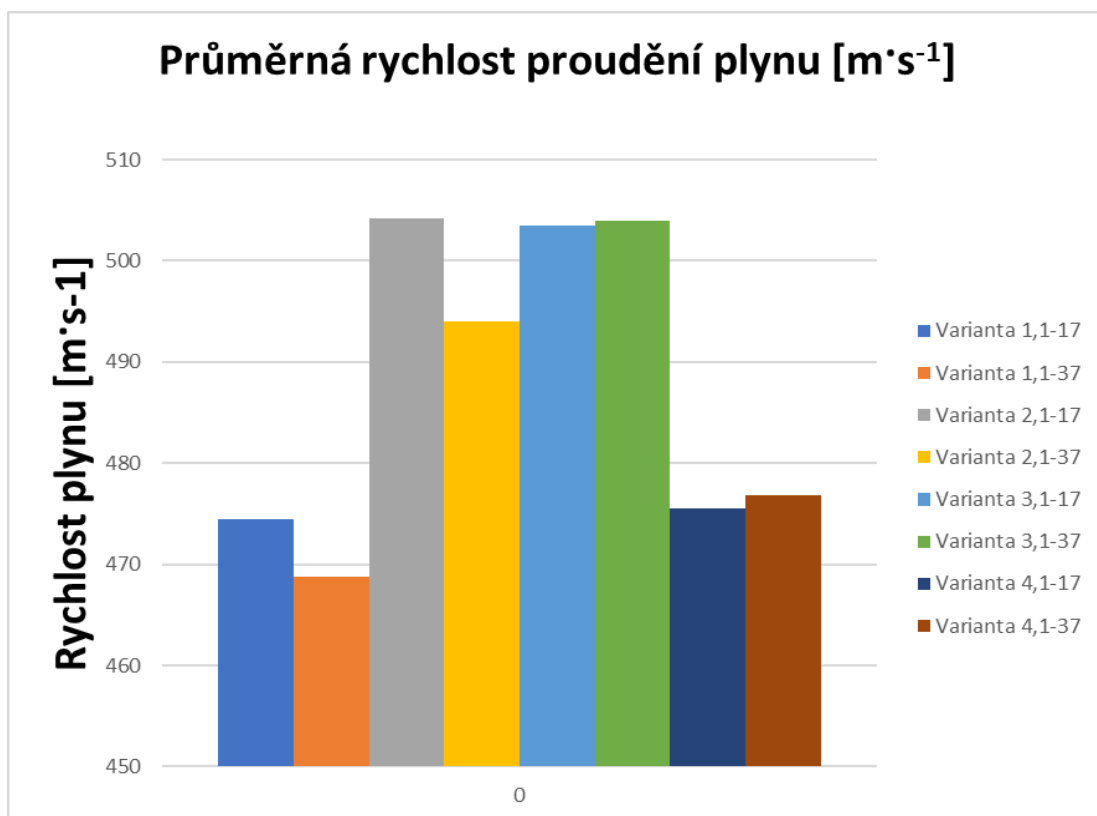
Obr. 9.4: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1.

Na obrázku 9.4 je vynesena závislost tlaku plynu na vzdálenosti od PLA 1. Stejně jako u grafu hustoty částic plynu (NND) se nejvíce odlišuje verze se vzdáleností clon 1,1 mm, která má největší tlakový nárůst před PLA 2. Ostatní verze mají tento tlakový nárůst nižší s rostoucí vzdáleností od PLA 1.

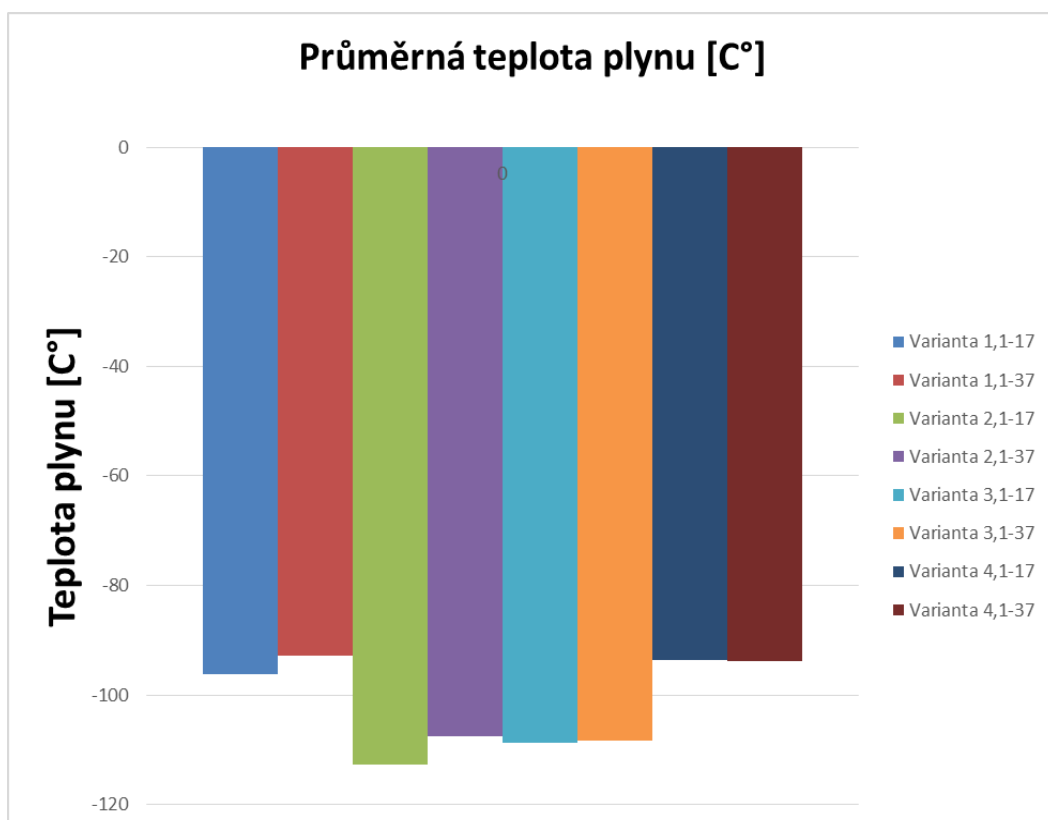
Dále byl vytvořen graf průměrných hodnot hustoty plynu na obrázku č. 9.5, graf průměrné rychlosti na obrázku č. 9.6, graf průměrné teploty na obrázku č. 9.7, graf průměrného tlaku na obrázku č. 9.8.



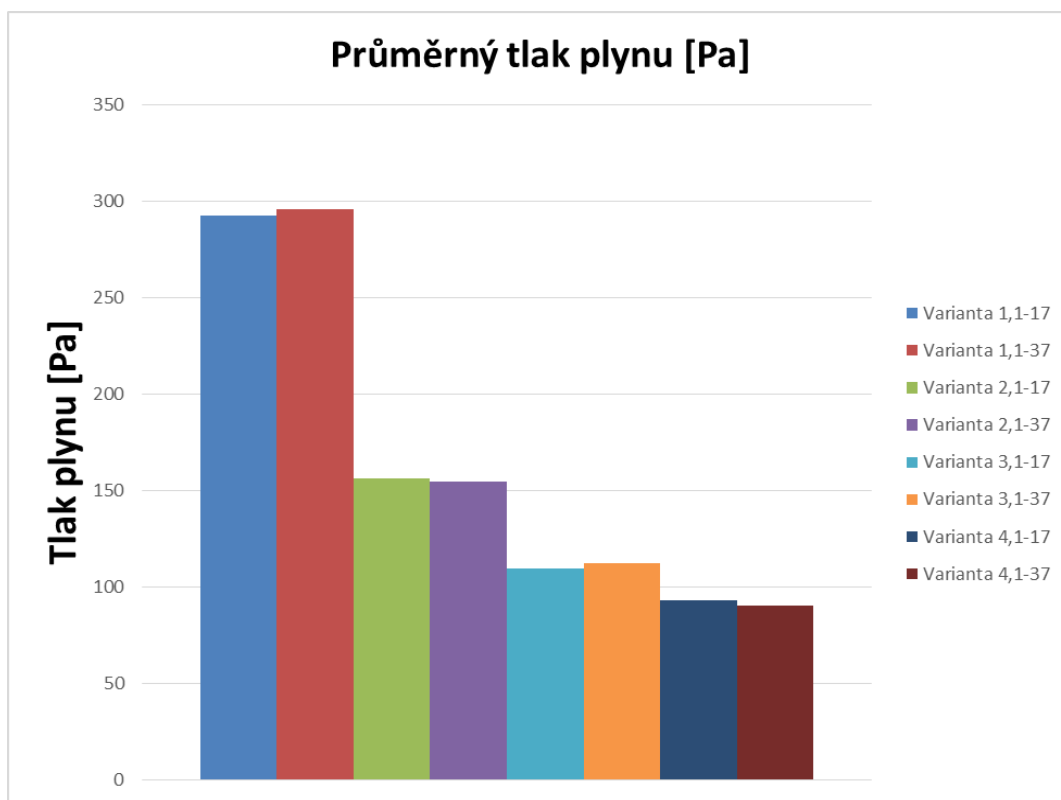
Obr. 9.5: Graf průměrné hustoty plynu u jednotlivých variant.



Obr. 9.6: Graf průměrných rychlostí proudění jednotlivých variant.



Obr. 9.7: Graf průměrných teplot jednotlivých variant.

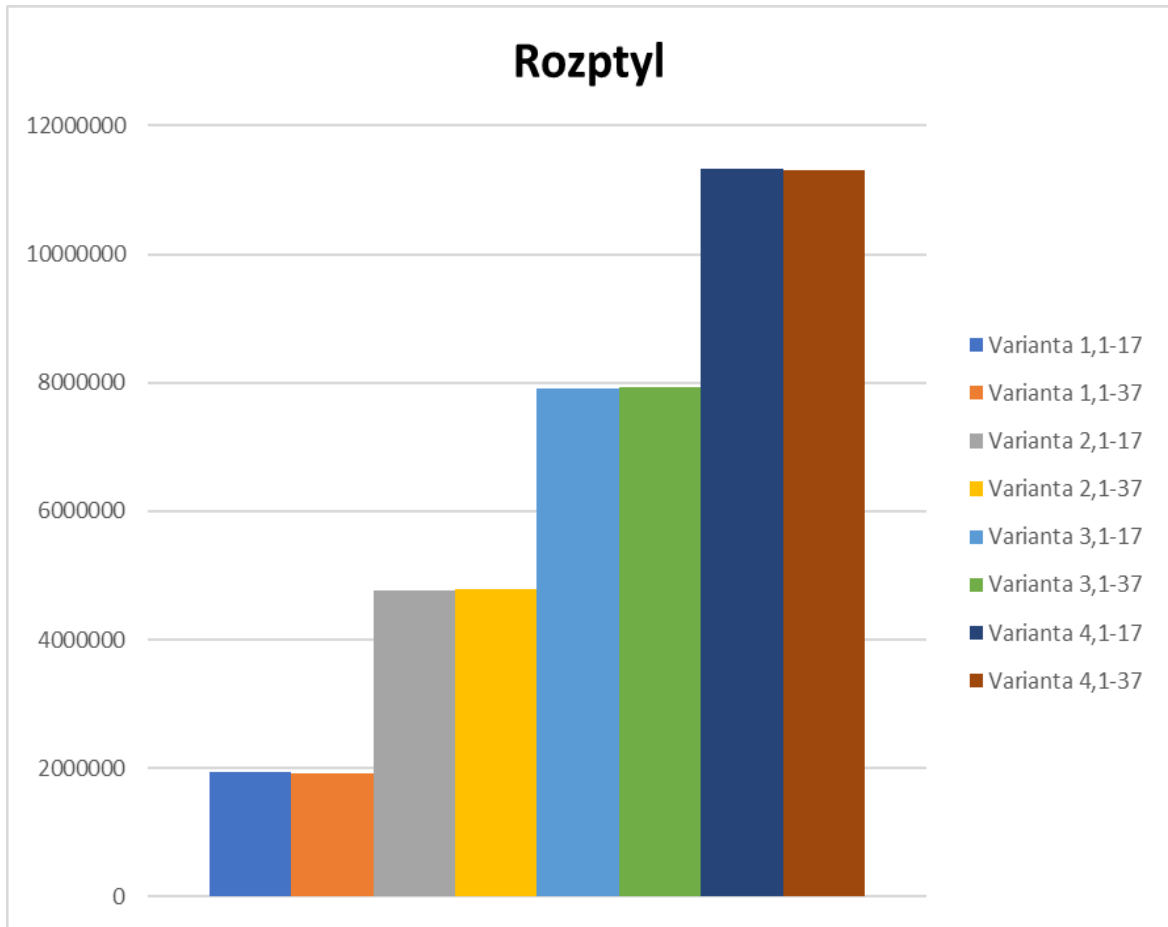


Obr. 9.8: Graf průměrného tlaku jednotlivých variant.

Následuje sloupcový graf s vnesenými hodnotami pravděpodobnosti rozptylu elektronů u jednotlivých variant. Rozptyl elektronů je přímo úměrný součinu hodnot tlaku a vzdálenosti, kterou elektron urazí. Vzhledem k významné počáteční závislosti tlaku na vzdálenosti uražené elektronem od PLA 1 rovno 0 až k PLA2 rovno d lze situaci vyjádřit pomocí integrálu:

$$Pd = \int p(x)dx \quad (9.1)$$

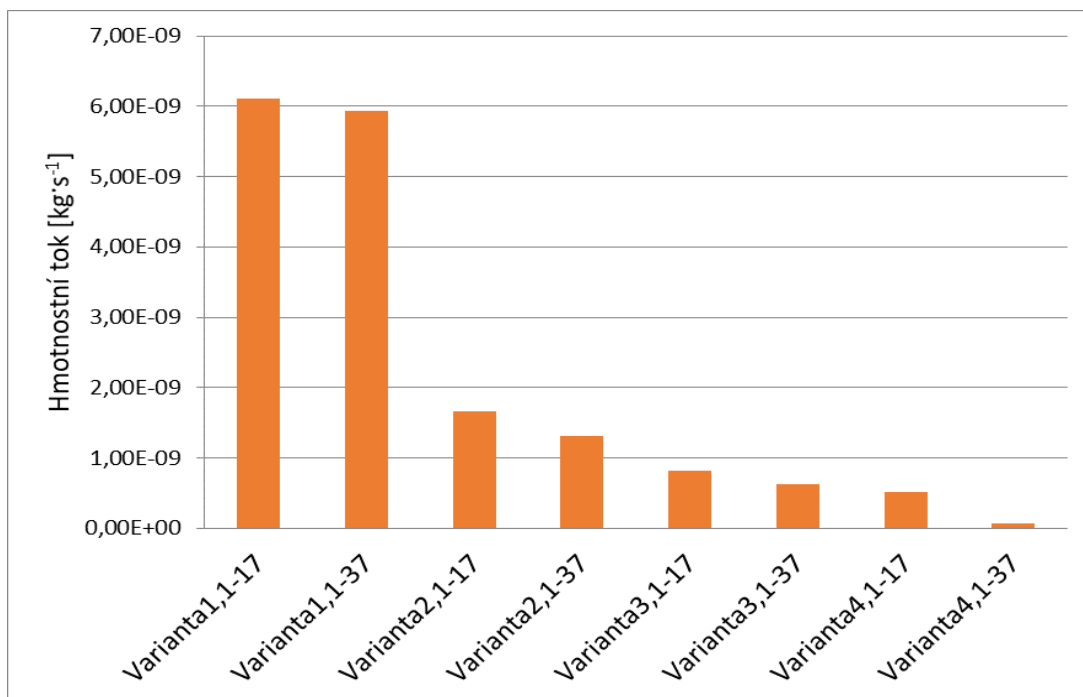
Graf pravděpodobnosti rozptylu elektronů u jednotlivých variant je zobrazen na obrázku č. 9.9.



Obr. 9.9: Graf pravděpodobnosti rozptylu elektronů jednotlivých variant.

Z vnesených hodnot rozptylu elektronů je patrné že s rostoucí vzdáleností mezi clonami PLA vzrůstá rozptyl elektronů, což přináší negativní efekt v podobě menšího množství dopadajících elektronů na zkoumaný prvek a k celkovému zhoršení obrazu. Proto je žádoucí držet rozptyl v co nejmenší možné míře.

Na obrázku č. 9.10 je zobrazen graf hmotnostního průtoku ve směru od clony PLA 1 k PLA 2 pro všechny varianty.



Obr. 9.10: Graf hmotnostních průtoků.

Z uvedených hodnot vyplývá, že s rostoucí vzdáleností clon PLA se snižuje hmotnostní průtok plynu směrem ke cloně PLA 2. V případě varianty se vzdáleností clon 4,1 mm a úhlem PLA 2 37° tento průtok klesá téměř k nule z důvodu většího úhlu kužele, což vede k větší tlakové ztrátě za rázovou vlnou.

9.1 Zhodnocení výsledků

Z uvedených výsledků na obrázku č. 9.9 vyplívá skutečnost, že s rostoucí vzdáleností mezi clonami se zvyšuje pravděpodobnost rozptylu elektronů na dráze od PLA 1 do PLA 2. V případě příliš velkého rozptylu elektronů, jich nedopadne na vzorek potřebné množství a mikroskop není schopen vykonávat svoji funkci. Tomuto kritériu rozptylu nejlépe vyhovuje varianta se vzdáleností mezi clonami 1,1 mm.

Dalším důležitým kritériem je hmotnostní tok, který proudí skrz PLA 2 do tubusu. V případě velkého hmotnostního průtoku procházejícího do tubusu by docházelo k nemožnosti udržení vakua v tubusu a mikroskop by opět ztrácel svoji funkci. Dle obrázku 9.10 je nejvhodnější varianta pro kritérium hmotnostního průtoku se vzdáleností clon 4,1 mm a úhlem 37°.

Jelikož se obě varianty vzájemně vylučují a opomenout nelze ani jedno z výše uvedených kritérií, vychází nejlépe měření pro verze se vzdáleností 2,1 mm a 3,1 mm.

Další výběr spočívá v úhlu clony PLA 2, zde je zvolen úhel clony 37°. Z obrázku č. 9.10 je patrné, že varianta s 37° má nižší hmotnostní tok přes PLA 2, než varianta 17°. Důvodem tohoto sníženého hmotnostního toku je kolmý charakter rázové vlny, který je zobrazen na obrázku č. 10.48. Za rázovou vlnou kolmého charakteru dochází k větší tlakové ztrátě, tato skutečnost má pozitivní vliv na hmotnostní tok do PLA 2. Na obrázku 10.40 je viditelná šikmá rázová vlna.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se věnuje problematice průběhu proudění plynu v diferenciálně čerpané komoře environmentálního elektronového rastrovacího mikroskopu, konkrétně umístění clony PLA 2 v této komoře.

V první kapitole je obecný pohled na elektronové mikroskopy, jejich rozdělení a také jejich základní vlastnosti, jako rozlišení, hloubka ostroty a zvětšení. V druhé kapitole je uveden článek Velocity and ejector-jet assisted differential pumping, který se zabývá diferenciálně čerpanou komorou a optimalizací umístění clony PLA. Následující kapitola se zabývá několika základními rovnicemi používanými v termodynamice a v dynamice tekutin, jako jsou rovnice energie a rovnice kontinuity. Kapitola 4 a 5 se věnuje programu ANSYS Fluent. Kapitola 6 se věnuje turbulenci a turbulentnímu proudění a aerodynamice, konkrétně problematice rázové vlny. Kapitola 7 se zabývá srážkami molekul a rozptylem elektronů.

Následuje praktická část práce, která se věnuje konkrétním simulacím modelů. Bylo vytvořeno 8 modelů diferenciálně čerpaných komor ve variantách se vzdálenostmi clon 1,1 mm, 2,1 mm, 3,1 mm, 4,1 mm a pro každou vzdálenost dva úhly PLA 2 a to 17° a 37°.

V prvotní části byli všechny modely podrobeny simulaci v programu Ansys Fluent. Výstupem této simulace byli grafy a obrázky pro normalizovanou hustotu plynu, rychlost proudění plynu, teplotu a tlak. Pro větší přehlednost byli všechny varianty jednotlivých modelů zaneseny do společného grafu pro jednotlivé zkoumané oblasti jako je tlak, nebo rychlost proudění plynu. Dále byli vytvořeny grafy průměrných hodnot všech variant pro tlak, teplotu, rychlost proudění a normalizovanou hustotu plynu. Jako poslední byli vytvořeny grafy pravděpodobnostního rozptylu elektronů a hmotnostního průtoku pro jednotlivé varianty modelů.

V poslední kapitole 9.1 je zhodnocení výsledků. Z grafu pravděpodobnosti rozptylu elektronů je patrné, že nejideálnější variantou je model se vzdáleností clon 1,1 mm bez ohledu na úhel clony PLA 2 a se zvětšující vzdáleností clon se výsledky horší. V grafu hmotnostních průtoků vychází nejlépe varianta se vzdáleností clon 4,1 mm a úhlem 37°. Se snižující vzdáleností clon se výsledky postupně zhoršují, přičemž lépe vždy vychází varianta s úhlem PLA 2 37°. Tento jev je zapříčiněn vznikem rázové vlny, která se u varianty 37° tvoří kolmo k směru proudění a tím napomáhá snížení proudícího plynu za PLA 2. Z výše zmíněných výsledků byly zvoleny dvě nejvhodnější varianty, varianta 2,1 mm a varianta 3,1 mm obě s úhlem 37°.

Dalším krokem práce by mohla být detailnější úprava úhlu clony PLA 2, která by mola zapříčinit další snížení toku plynu přes PLA 2.

LITERATURA

- [1] Jana Nebesářová. Elektronová mikroskopie pro biology [online]. České Budějovice, 2001 [cit. 2017-07-25]. Dostupné z: <http://triton.paru.cas.cz/old-lem/book/Podkap/1.0.html>
- [2] Elektronový mikroskop [online]. 2017 [cit. 2017-07-26]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Elektronov%C3%BD_mikroskop
- [3] ŠAFÁŘOVÁ, Klára. Transmisní elektronová mikroskopie [online]. Olomouc, 2008 [cit. 2015-08-07]. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/texty/TEM-teorie.pdf>. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [4] Klára Šafářová. Skenovací (rastrovací) elektronová mikroskopie [online]. 2009 [cit. 2017-07-31]. Dostupné z: 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. 2017-08-01]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>
- [6] 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.
- [7] HLA VATÁ, P. Návrh tvaru diferenciálně čerpané komory pro EREM. Brno, 2014. Klasické a španělské gymnázium. Vedoucí práce Mgr. Markétě Benešová, Ph.D.
- [8] NEDĚLA, Vilém. Detekce signálních elektronů v prostředí vysokého tlaku plynů environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu. Brno, 2006. Doktorská práce. FEKT VUT.
- [9] ERBEN, Milan. Vakuová technika: Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií. Pardubice, 2008. Skripta. Univerzita Pardubice.
- [10] URUBA, V. Turbulence. Praha, 2009, 141 s. Skriptum. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [11] KOZUBKOVÁ, M, T BLEJCHAŘ a M; BOJKO. Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti. Ostrava, 2011. Skriptum. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [12] MAXA, J, P VYROUBAL a V NEDĚLA. Řízení a správa dat. Brno, 2015. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] Počítačová dynamika tekutin, CFD. Ústav chemického inženýrství [online]. Praha, 2007 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/uchi/ped/cfd/>
- [14] Hydromechanika [online]. Skripta. Brno. FSI VUT. Dostupné z: http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/nezarazene/Hydromechanika_--FSI_VUT_Brno--.pdf
- [15] SRÁŽKY MOLEKUL, STŘEDNÍ VOLNÁ DRÁHA [online]. [cit. 2017-08-22]. Dostupné z: http://web.natur.cuni.cz/~zuskova/ktp_2_so.pdf
- [16] NEDĚLA, Vilém. Detekce signálu scintilačním detektorem v EREM. Brno: VUT FEKT UETE, 2001.
- [17] GERASIMOS, D. Danilatos. Velocity and ejector-jet assisted differential pumping: Novel design stages for environmental SEM. Australia, 2012. Micron 43 (600-611).
- [18] ZÁCHA, P. Fluent: Přednášky. Praha, 2014. Učební text. České vysoké učení technické v Praze.

- [19] *Vývěva* [online]. Praha, 2018 [cit. 2018-01-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDv%C4%9Bva>
- [20] *Rázová vlna* [online]. Praha, 2015 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2005-2006/Zima05/proc/sonika.pdf>
- [21] Compressible Aerodynamics Calculator 3.0 [online]. Virginia, 2014 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~devenpor/aoe3114/calc.html>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

- 1 – proměnnost proudového pole v čase
2 – charakterizuje konvenci
3 – gradient tlaku
4 – vliv vazkosti
I – akumulace energie
II – vtok – výtok
III – složka vodivosti
IV – difuze energie
V – tření (viskózní ztráty)
VI – vydatnost objemového zdroje
c – rychlost zvuku v daném prostředí [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
d – průměr válce [m]
E – celková měrná energie [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]
h – entalpie [J]
h_i – měrná entalpie složky i [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]
i – součinitel kinematické vazkosti [-]
 \bar{J}_i – difuzní složka i [-]
k – Boltzmannova konstanta [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$]
K – turbulentní kinetická energie [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$]
L – délka [m]
m – hmotnost [kg]
M – molární hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$]
m_a – hmotnost jedné částice [$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$]
n – látkové množství [mol^{-1}]
N – počet částic v látce [-]
N_A – Avogadrova konstanta [mol^{-1}]
n_L – koncentrace molekul plynu [m^{-3}]
p – modifikovaný tlak [Pa]
P – tlak [Pa]
p₀ – stagnační tlak [Pa]
p₁ – tlak v komoře [Pa]

p_D – tlak plynu [Pa]
 S_h – Strouhalovo číslo [-]
 t – čas [s]
 T – termodynamická teplota [K]
 u – rychlost toku [$m \cdot s^{-1}$]
 \vec{u} - vektor rychlosti [$m \cdot s^{-1}$]
 U – vnitřní energie [$J \cdot kg^{-1}$]
 V – objem [m^3]
 v – střední aritmetická rychlost [$m \cdot s^{-1}$]
 \vec{v}_{AA} – vzájemná střední rychlost dvou stejných částic [$m \cdot s^{-1}$]
 \vec{v}_{AB} - vzájemná střední rychlost částic [$m \cdot s^{-1}$]
 x – souřadnice ve směru kolmém na směr proudění [m]
 α – redukovaná hmotnost [$kg \cdot mol^{-1}$]
 ε – disipace [$m^2 \cdot s^{-3}$]
 μ – dynamická vazkost [Pa·s]
 η – dynamická viskozita [$N \cdot s \cdot m^{-1}$]
 λ – tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
 λ_{eff} – součinitel efektivní vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
 λ_t – turbulentní tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
 ρ – hustota [$kg \cdot m^{-3}$]
 σ_T – celkový záchytný průřez plynu [m^2]
 τ – tečné napětí v kapalině [Pa]
 τ_{eff} – tenzor efektivního tření [Pa]
 ψ – gravitační potenciál [-]
 ∇ – operátor nabla [-]
 BSE - Zpětně odražené elektrony
 CCD - Charge-coupled device
 DK- Diferenciálně čerpaná komora
 DNS – Metoda přímé simulace
 EADP – Diferenciální čerpání s proudovou pomocí
 EREM - Environmentální elektronový mikroskop
 LES – Metoda velkých vírů
 NND - Normalized number density

NS - Navierovy-Stokesovy

PC - Personal computer

RANS – Metoda časového středování

RNG - Re-Normalisation Group

SE – Sekundární elektrony

SEM – Scanning electron microscope

SST - Shear Stress Transport k - ω model

TEM – Transmission electron microscope

VADP – rychlostní příspěvek k diferenciálnímu čerpání

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Schematické znázornění elektronových mikroskopů [5].	10
Obr. 1.2: Konstrukce transmisního elektronového mikroskopu [3].	11
Obr. 1.3: Interakce elektronů s preparátem [4].	12
Obr. 1.4: Digitální záznam obrazu z SSC kamery [1].	12
Obr. 1.5: Excitační objem [1].	13
Obr. 1.6: Grafické zobrazení Rayleighova kritéria [6].	14
Obr. 1.7: Zobrazení vztahu mezi průměrem primárního svazku a zvětšením [6].	14
Obr. 1.8: Zobrazení aperturního úhlu [6].	15
Obr. 1.9: Princip zobrazení zvětšení [6].	15
Obr. 1.10: Princip rotační vývěvy [19].	16
Obr. 1.11: A Schéma turbomolekulární vývěvy; B řez turbomolekulární vývěvou [9].	17
Obr. 1.12: Vlevo řez spodní částí mikroskopu AQUASEM II; vpravo řez diferenciálně čerpanou komorou a tubusem EREM AQUASEM II [8].	17
Obr. 2.1: Průtokové pole clony s geometrií roviny PLA 2 [17].	19
Obr. 2.2: Závislost hustoty částic na teplotě a vzdálenosti mezi clonami [17].	20
Obr. 2.3: Závislost rychlosti a Machova čísla na vzdálenosti mezi clonami [17].	21
Obr. 2.4: Použití kónické clony PLA2 pro výchozí podmínky [17].	22
Obr. 2.5: Použití kónické clony PLA2 pro vhodné experimentálně zjištěné podmínky [17].	23
Obr. 2.6: Graf počtu částic v závislosti na vzdálenosti od PLA 1, vlevo pro tlak $p = 1000$ Pa, vpravo pro tlak $p = 2000$ Pa [17].	23
Obr. 2.7: Komora s přepážkou [17].	24
Obr. 4.1: Diskretizace na konečný počet objemů [13].	28
Obr. 4.2: Vyznačení kontrolních objemů [13].	29
Obr. 4.3: Schéma interakčního cyklu [12].	29
Obr. 4.4: Interpolační schémata [12].	30
Obr. 5.1: Pressure – Based sekvenční algoritmus [12].	31
Obr. 5.2: Density – Based solver [12].	32
Obr. 6.1: Rychlostní profil pro proudění v potrubí [1].	33
Obr. 6.2: Schéma modelů proudění [18].	34
Obr. 7.1: Srážky molekul [15].	37
Obr. 7.2: Rozptyl svazku primárních elektronů [16].	39
Obr. 8.1: Úprava úhlu clony PLA2.	40

Obr. 9.1: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1.	41
Obr. 9.2: Graf závislosti rychlosti proudění plynu na vzdálenosti od PLA 1.	42
Obr. 9.3: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1.	42
Obr. 9.4: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1.	43
Obr. 9.5: Graf průměrné hustoty plynu u jednotlivých variant.	44
Obr. 9.6: Graf průměrných rychlostí proudění jednotlivých variant.	44
Obr. 9.7: Graf průměrných teplot jednotlivých variant.	45
Obr. 9.8: Graf průměrného tlaku jednotlivých variant.	45
Obr. 9.9: Graf pravděpodobnosti rozptylu elektronů jednotlivých variant.	46
Obr. 9.10: Graf hmotnostních průtoků.	47
Obr. 10.1: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 17°).	59
Obr. 10.2: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 1,1 mm 17°).	59
Obr. 10.3: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 17°).	60
Obr. 10.4: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 1,1 mm 17°).	60
Obr. 10.5: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 17°).	61
Obr. 10.6: Obrázek – teplota plynu (Varianta 1,1 mm 17°).	61
Obr. 10.7: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 17°).	62
Obr. 10.8: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 1,1 mm 17°).	62
Obr. 10.9: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 37°).	63
Obr. 10.10: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 1,1 mm 37°).	63
Obr. 10.11: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 37°).	64
Obr. 10.12: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 1,1 mm 37°).	64
Obr. 10.13: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 37°).	65
Obr. 10.14: Obrázek – teplota plynu (Varianta 1,1 mm 37°).	65
Obr. 10.15: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 37°).	66
Obr. 10.16: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 1,1 mm 37°).	66
Obr. 10.17: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 17°).	67
Obr. 10.18: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 2,1 mm 17°).	67
Obr. 10.19: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 17°).	68
Obr. 10.20: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 2,1 mm 17°).	68

Obr. 10.21: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 17°)....	69
Obr. 10.22: Obrázek – teplota plynu (Varianta 2,1 mm 17°).	69
Obr. 10.23: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 17°).....	70
Obr. 10.24: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 2,1 mm 17°).	70
Obr. 10.25: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 37°).....	71
Obr. 10.26: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 2,1 mm 37°).....	71
Obr. 10.27: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 37°).....	72
Obr. 10.28: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 2,1 mm 37°).	72
Obr. 10.29: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 37°)....	73
Obr. 10.30: Obrázek – teplota plynu (Varianta 2,1 mm 37°).	73
Obr. 10.31: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 37°).....	74
Obr. 10.32: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 2,1 mm 37°).	74
Obr. 10.33: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 17°).....	75
Obr. 10.34: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 3,1 mm 17°).....	75
Obr. 10.35: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 17°).....	76
Obr. 10.36: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 3,1 mm 17°).	76
Obr. 10.37: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 17°)....	77
Obr. 10.38: Obrázek – teplota plynu (Varianta 3,1 mm 17°).	77
Obr. 10.39: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 17°).....	78
Obr. 10.40: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 3,1 mm 17°).	78
Obr. 10.41: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 37°).....	79
Obr. 10.42: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 3,1 mm 37°).....	79
Obr. 10.43: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 37°).....	80
Obr. 10.44: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 3,1 mm 37°).	80
Obr. 10.45: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 37°)....	81
Obr. 10.46: Obrázek – teplota plynu (Varianta 3,1 mm 37°).	81
Obr. 10.47: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 37°).....	82
Obr. 10.48: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 3,1 mm 37°).	82
Obr. 10.49: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 17°).....	83

Obr. 10.50: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 4,1 mm 17°).....	83
Obr. 10.51: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 17°).....	84
Obr. 10.52: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 4,1 mm 17°).	84
Obr. 10.53: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 17°)....	85
Obr. 10.54: Obrázek – teplota plynu (Varianta 4,1 mm 17°).	85
Obr. 10.55: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 17°).....	86
Obr. 10.56: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 4,1 mm 17°).	86
Obr. 10.57: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 37°).....	87
Obr. 10.58: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 4,1 mm 37°).....	87
Obr. 10.59: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 37°).....	88
Obr. 10.60: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 4,1 mm 37°).	88
Obr. 10.61: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 37°)....	89
Obr. 10.62: Obrázek – teplota plynu (Varianta 4,1 mm 37°).	89
Obr. 10.63: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 37°).....	90
Obr. 10.64: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 4,1 mm 37°).	90

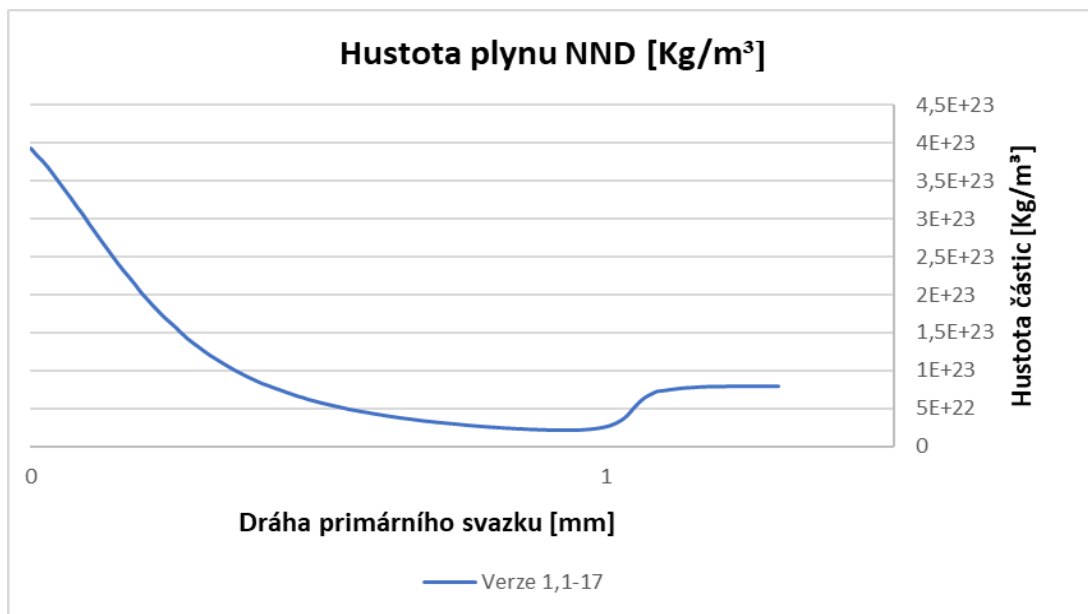
SEZNAM TABULEK

Tab. 9.1: Verze modelů.....	41
-----------------------------	----

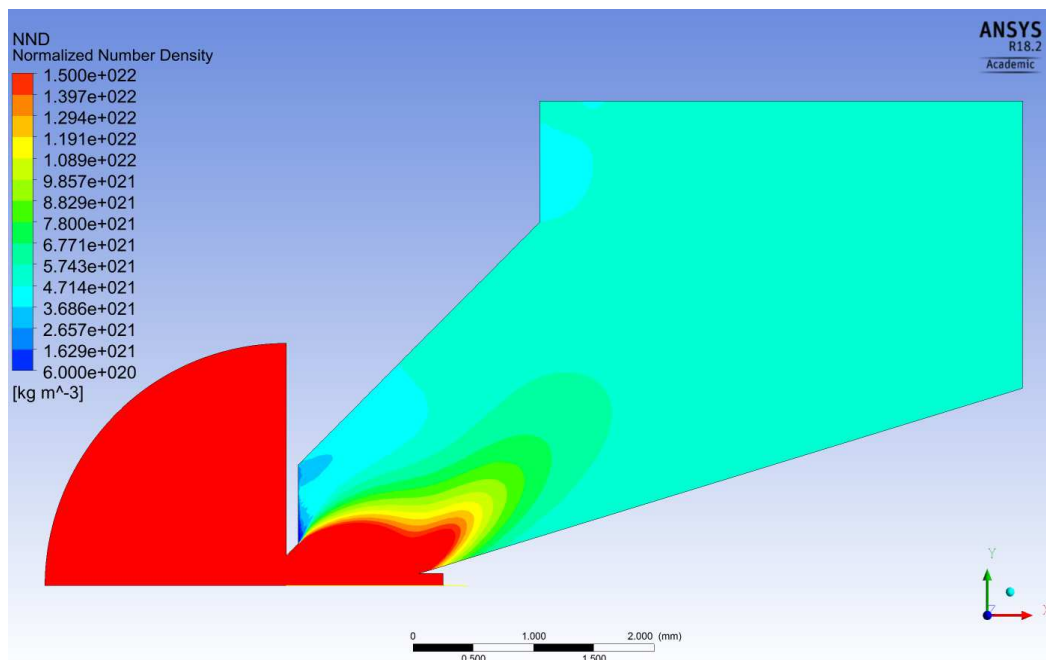
PŘÍLOHA

V příloze jsou obsaženy jednotlivé výsledky variant modelů pro oblasti NND, rychlost, teplota a tlak v podobě grafu a obrázku simulace diferenciálně čerpané komory. Výsledky jsou výstupem programu Ansys Fluent v podobě grafu a obrázku.

Varianta 1,1 mm 17° normalizovaná hustota plynu (NND).

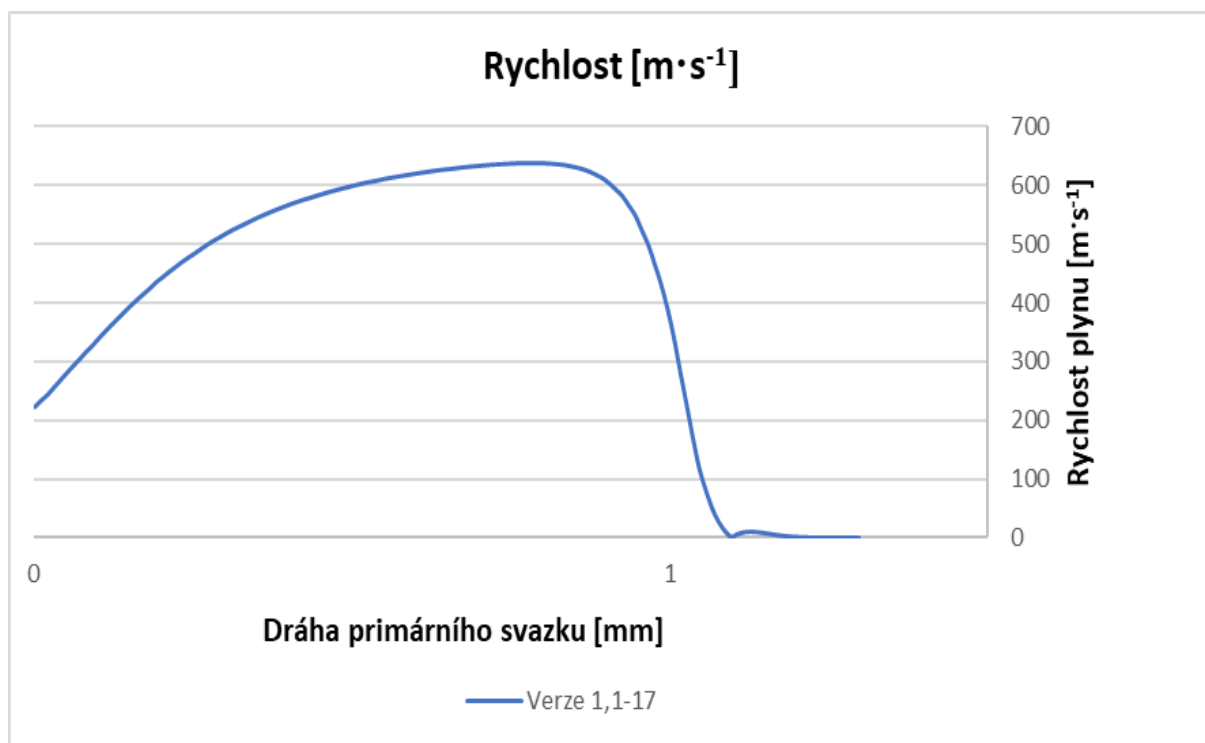


Obr. 10.1: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 17°).

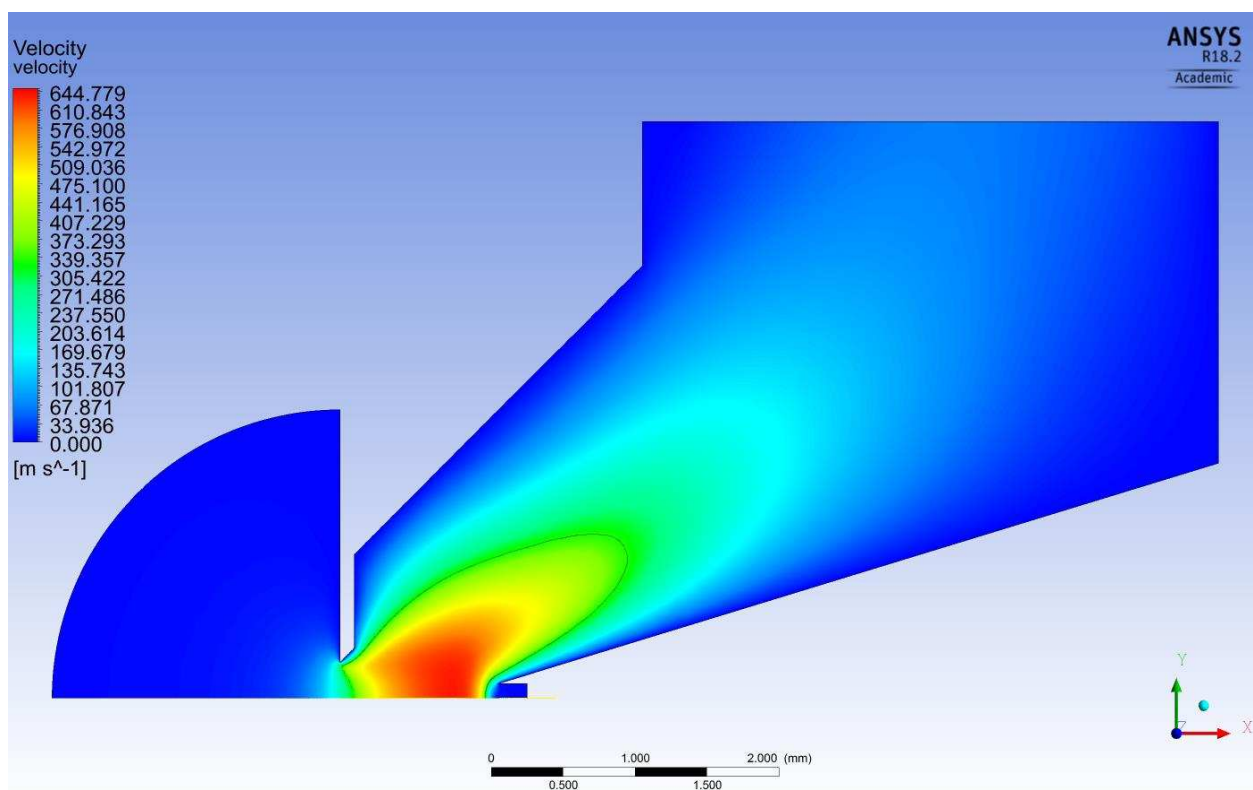


Obr. 10.2: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 1,1 mm 17°).

Varianta 1,1 mm 17° rychlost proudění.

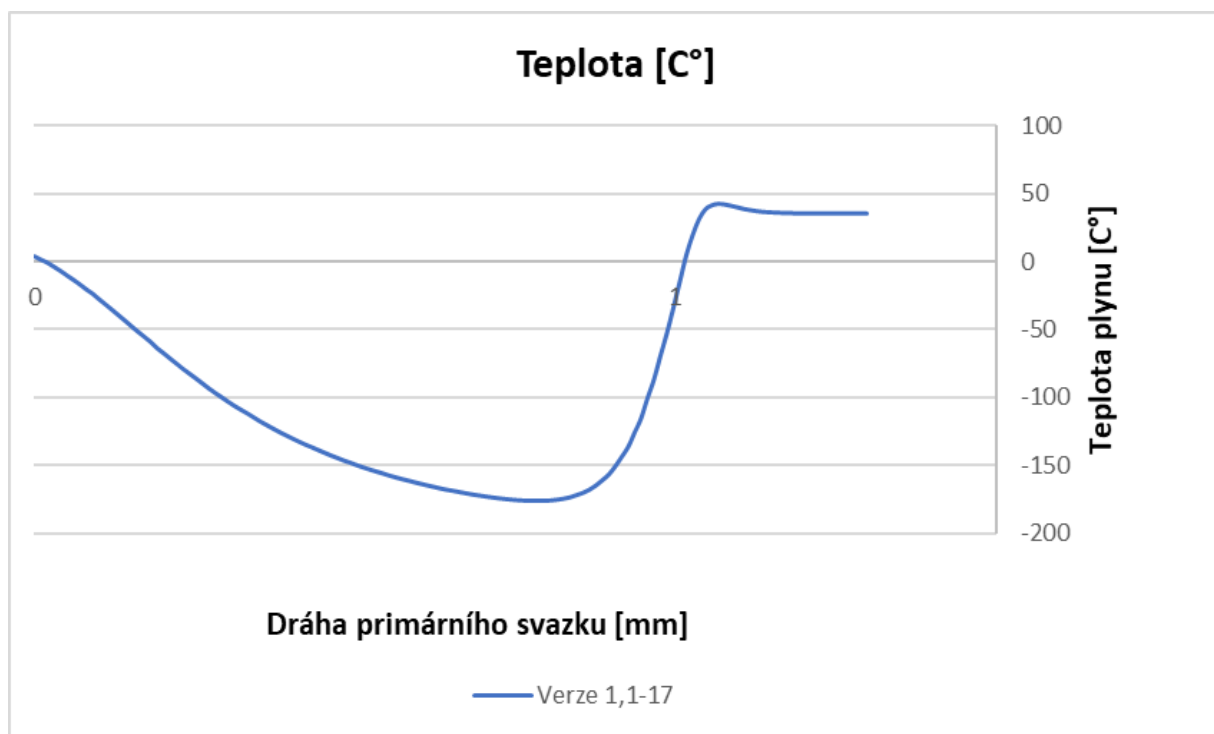


Obr. 10.3: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 17°).

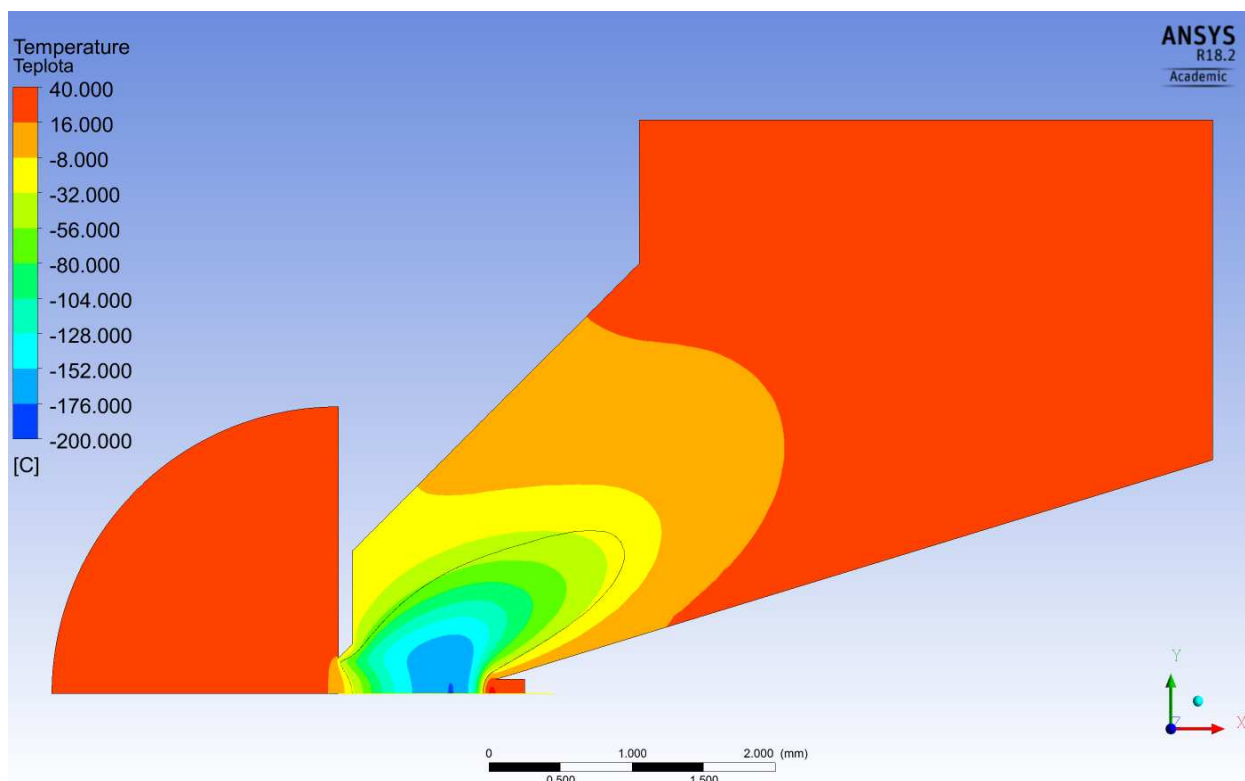


Obr. 10.4: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 1,1 mm 17°).

Varianta 1,1 mm 17° průběh teploty.

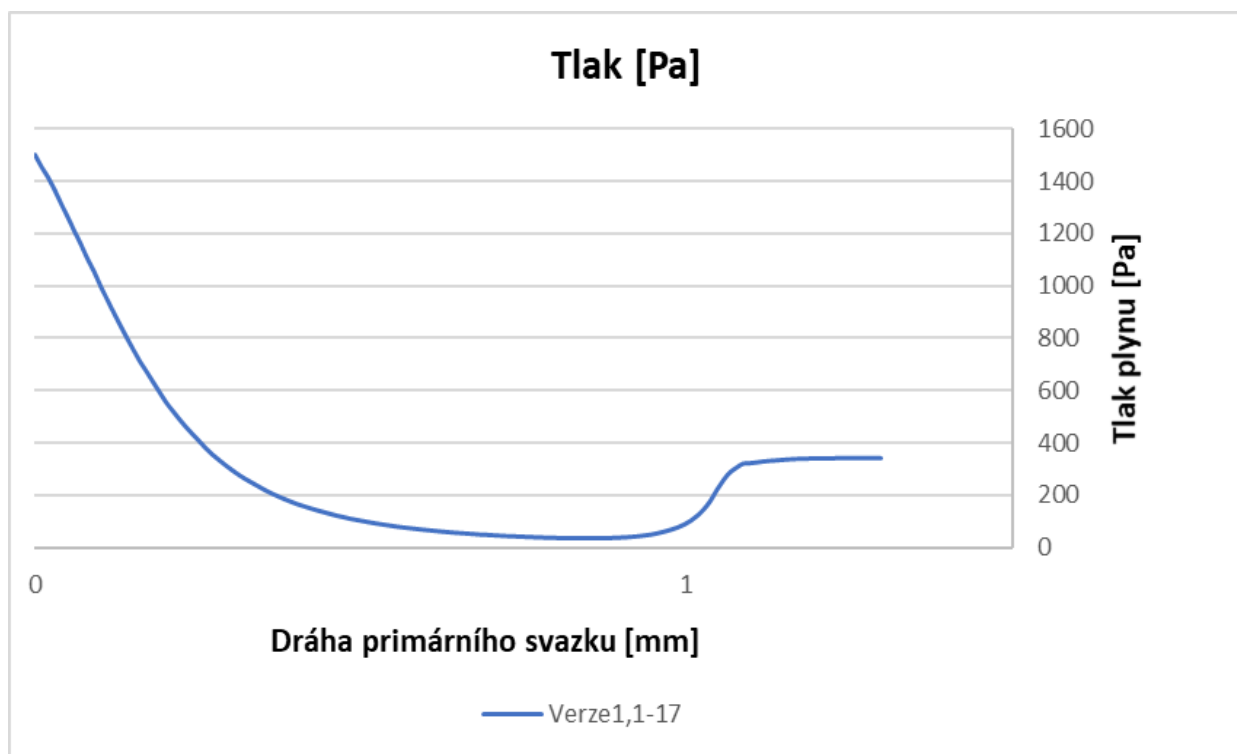


Obr. 10.5: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 17°).

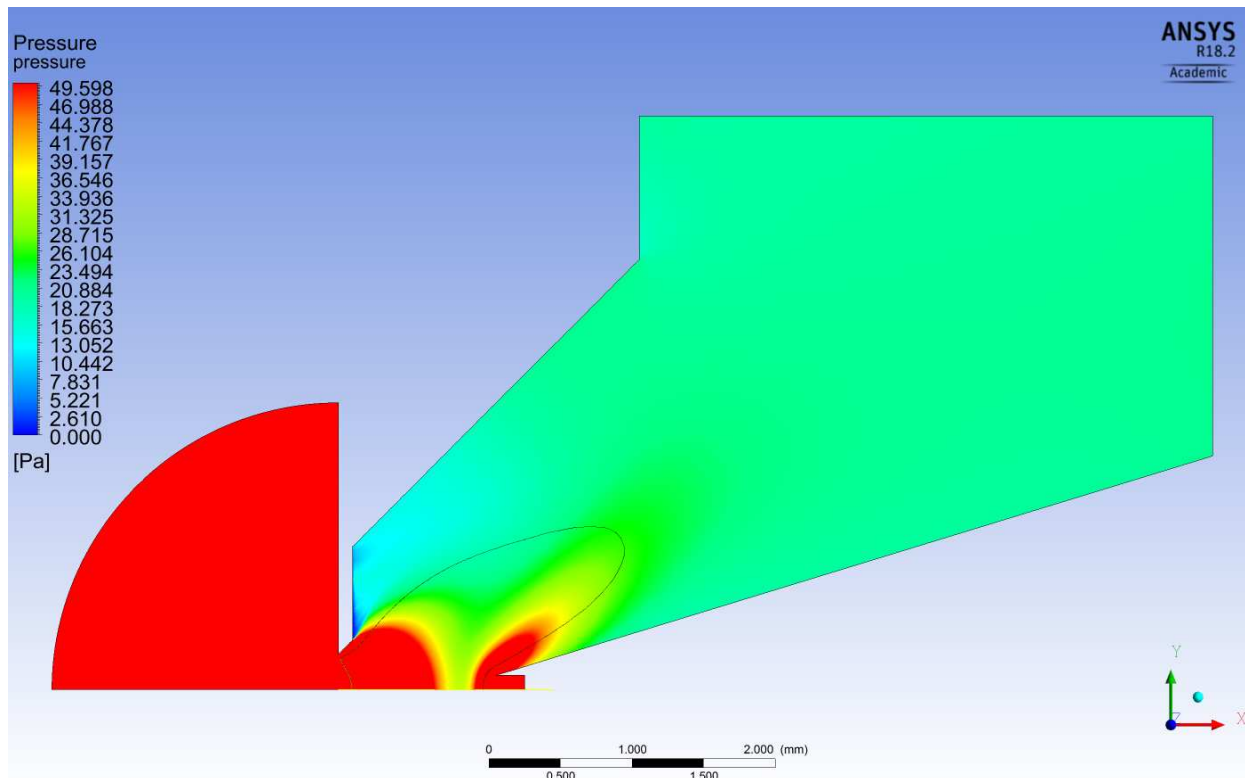


Obr. 10.6: Obrázek – teplota plynu (Varianta 1,1 mm 17°).

Varianta 1,1 mm 17° průběh tlaku.

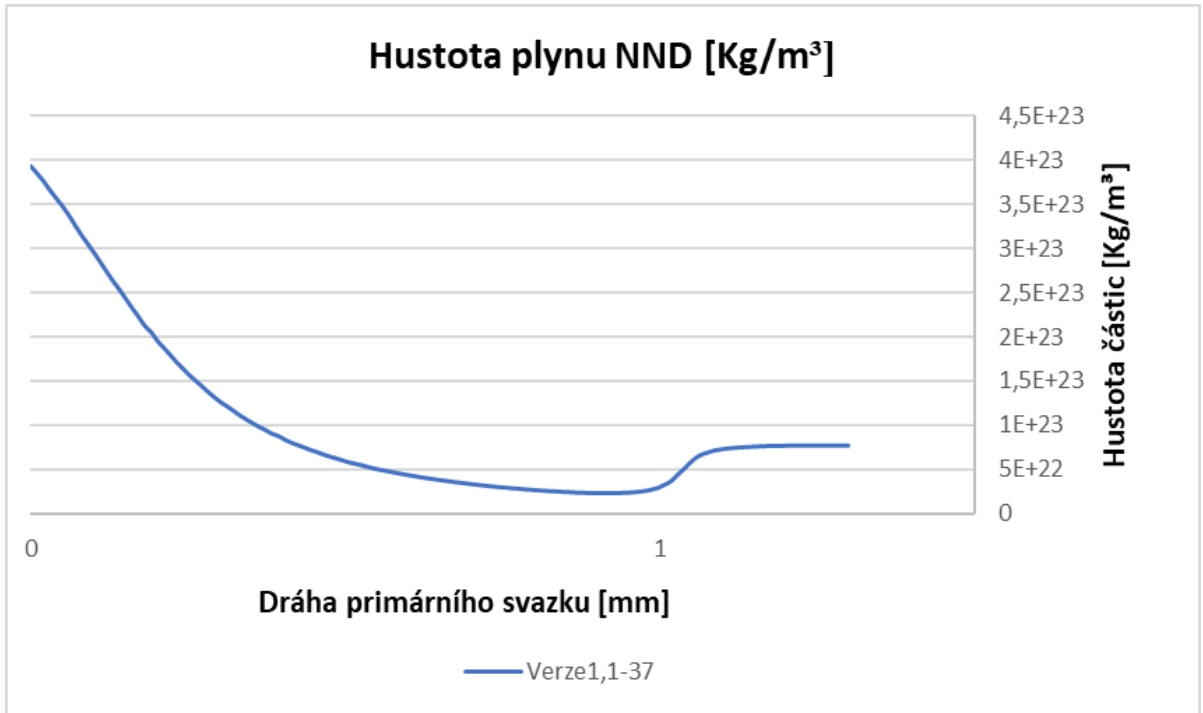


Obr. 10.7: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 17°).

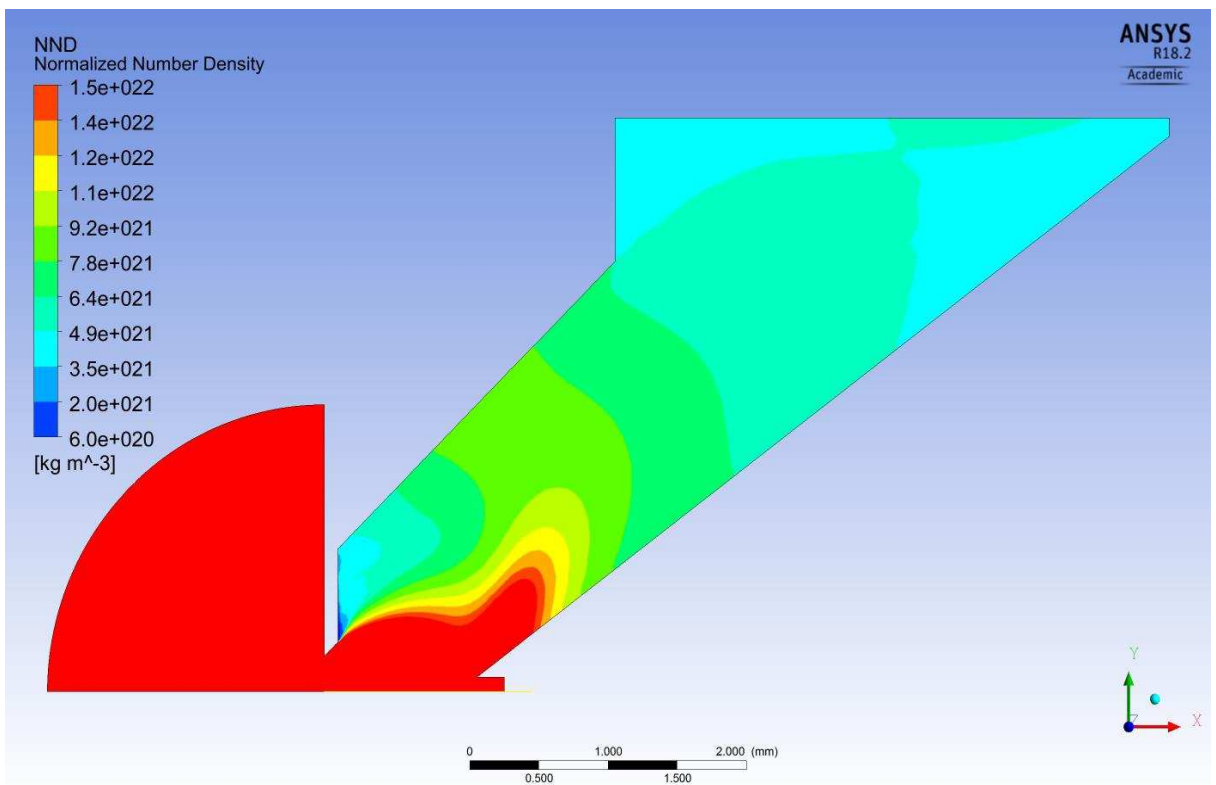


Obr. 10.8: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 1,1 mm 17°).

Varianta 1,1 mm 37° normalizovaná hustota plynu (NND).

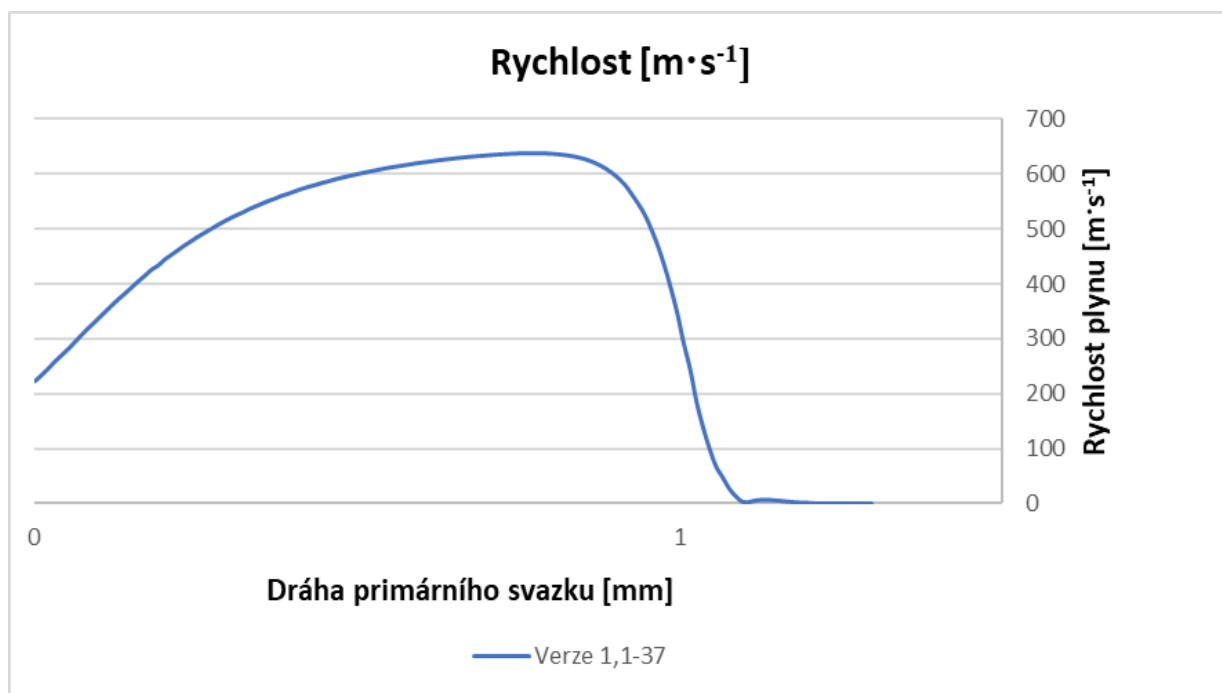


Obr. 10.9: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 37°).

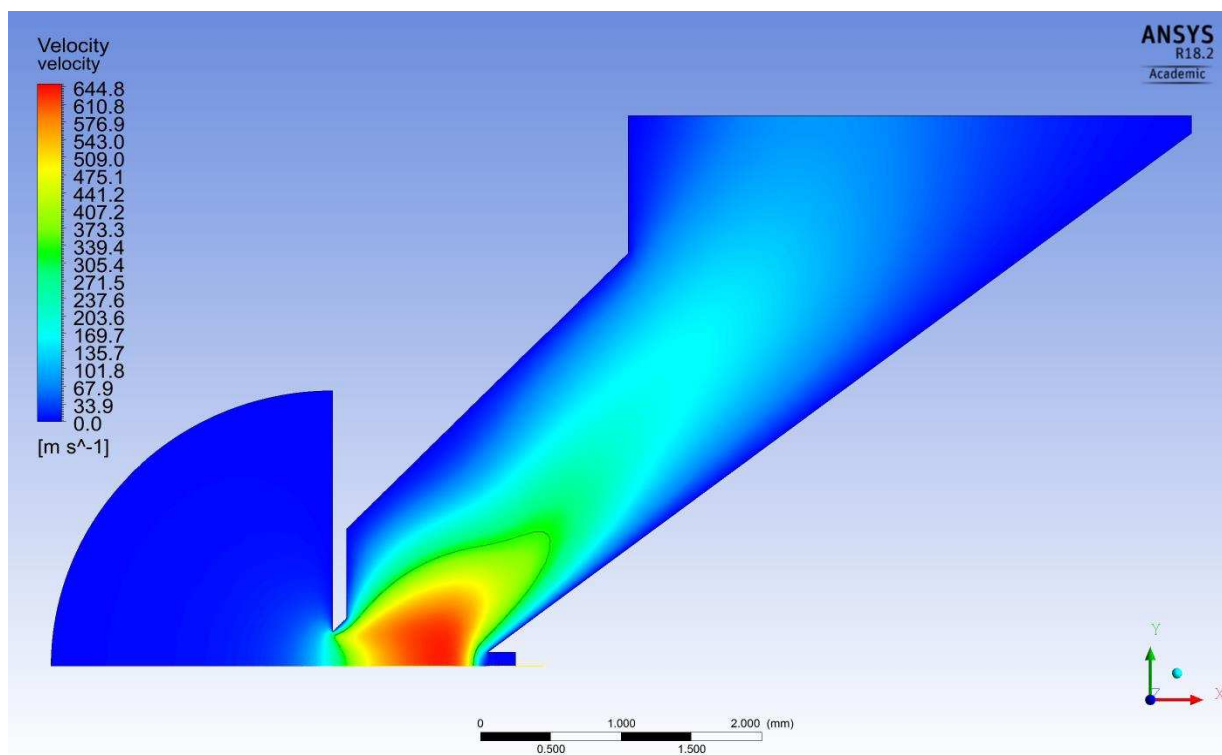


Obr. 10.10: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 1,1 mm 37°).

Varianta 1,1 mm 37° rychlost proudění.

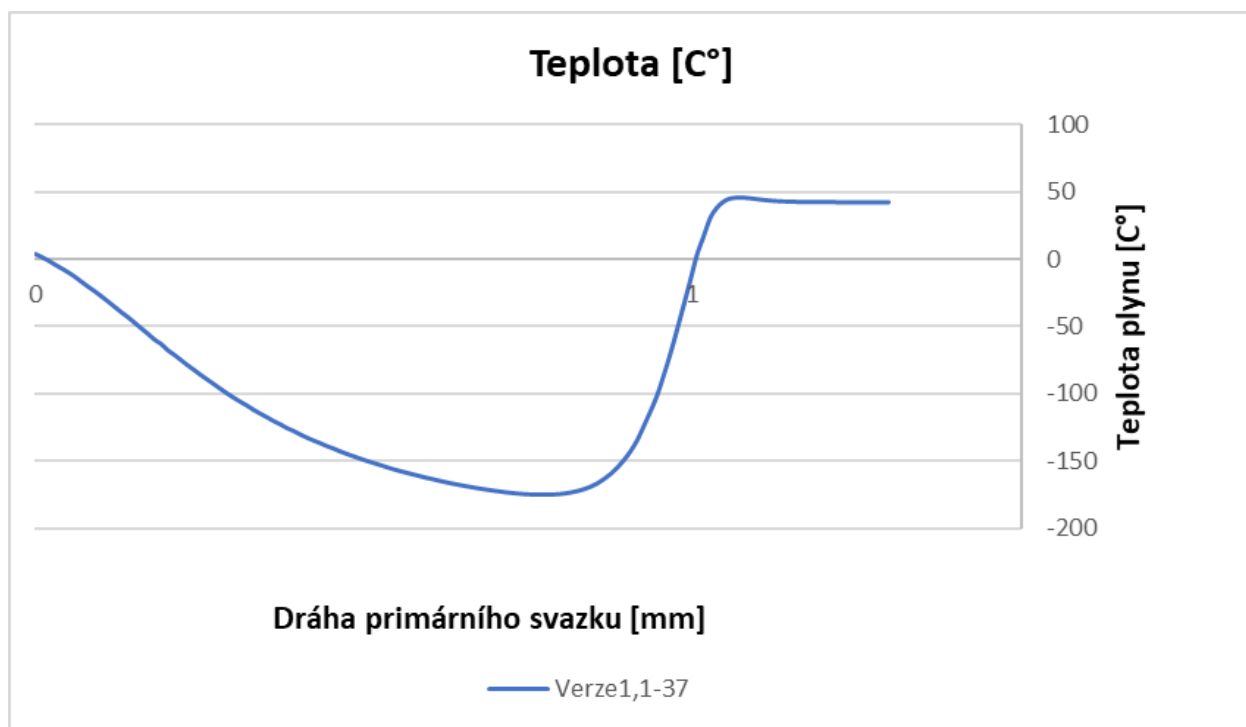


Obr. 10.11: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 37°).

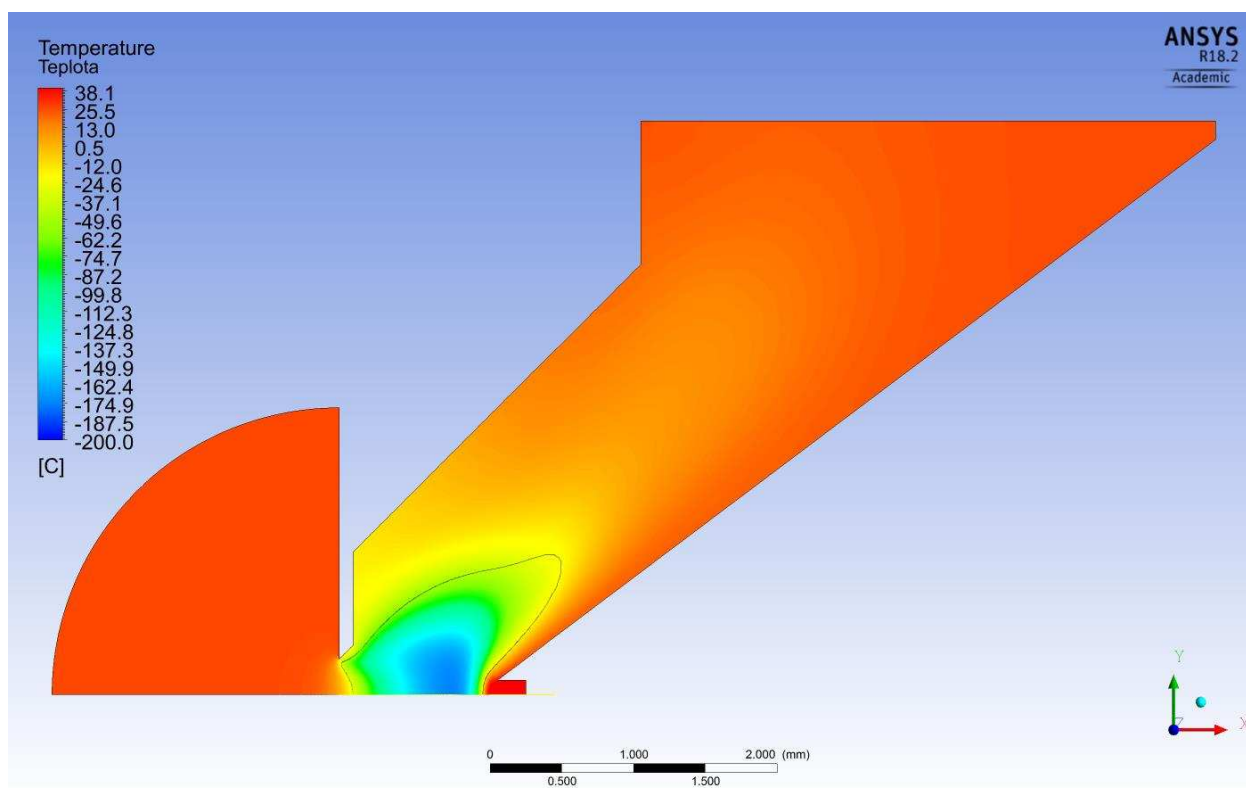


Obr. 10.12: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 1,1 mm 37°).

Varianta 1,1 mm 37° průběh teploty.

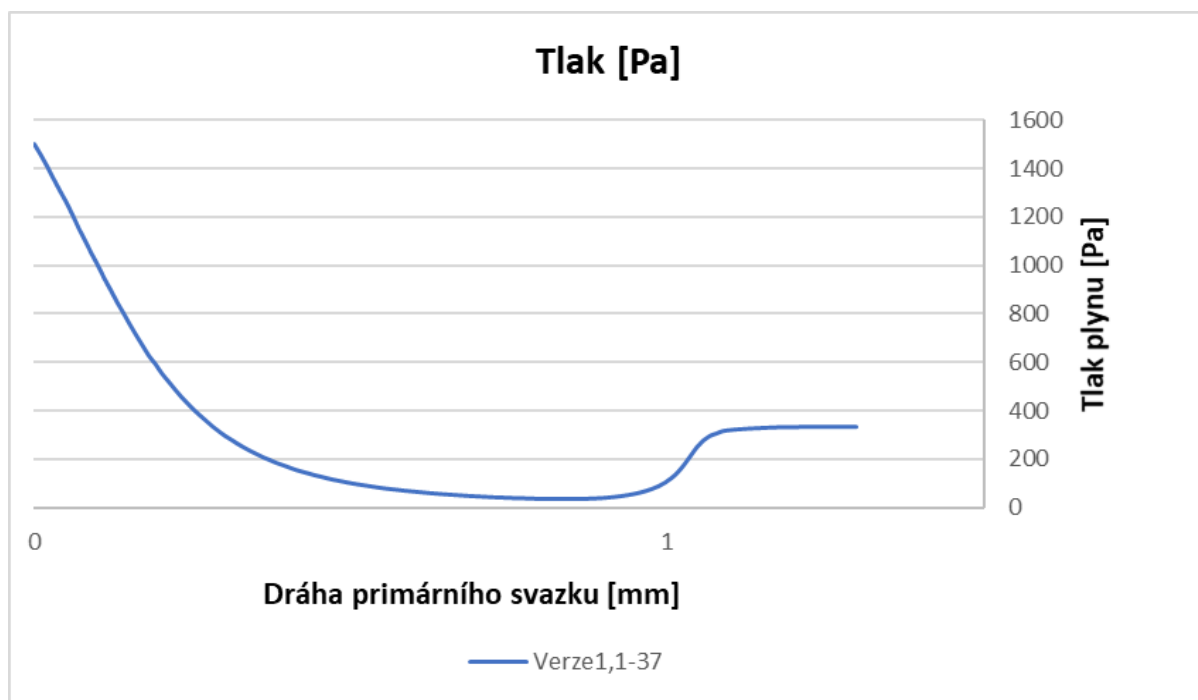


Obr. 10.13: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 37°).

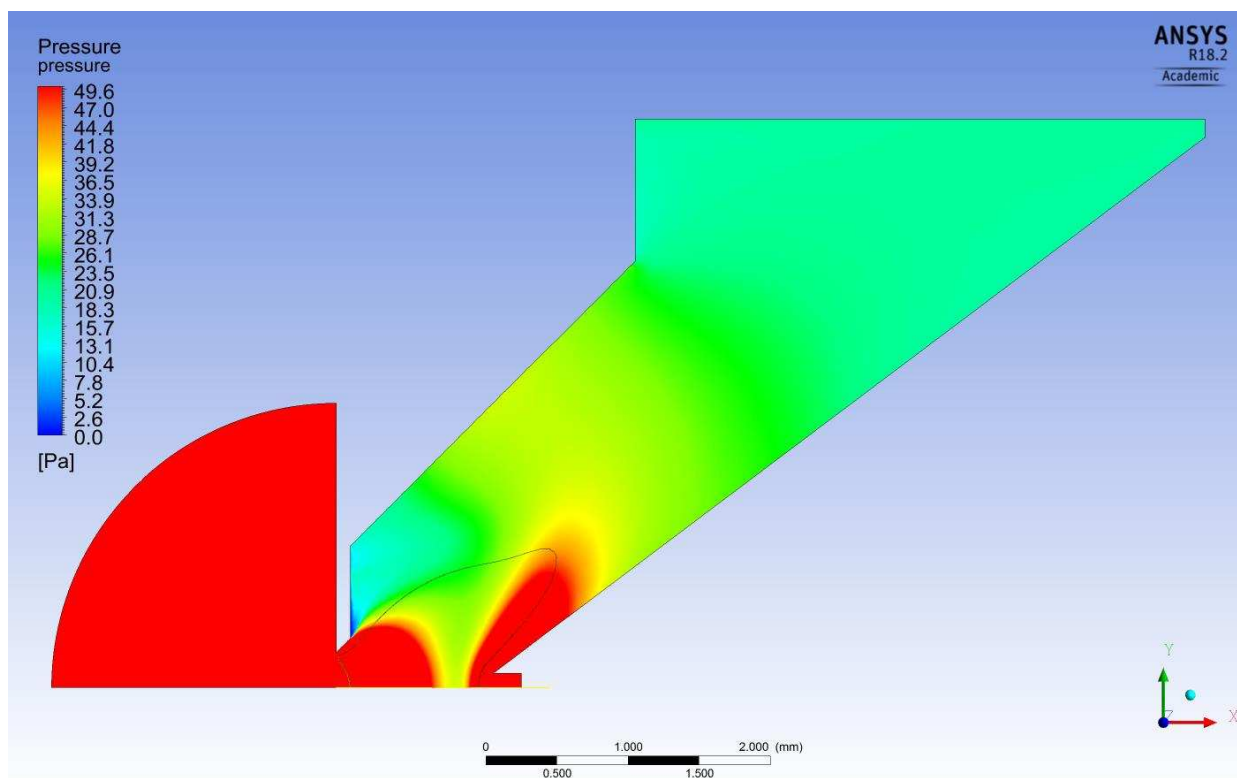


Obr. 10.14: Obrázek – teplota plynu (Varianta 1,1 mm 37°).

Varianta 1,1 mm 37° průběh tlaku.

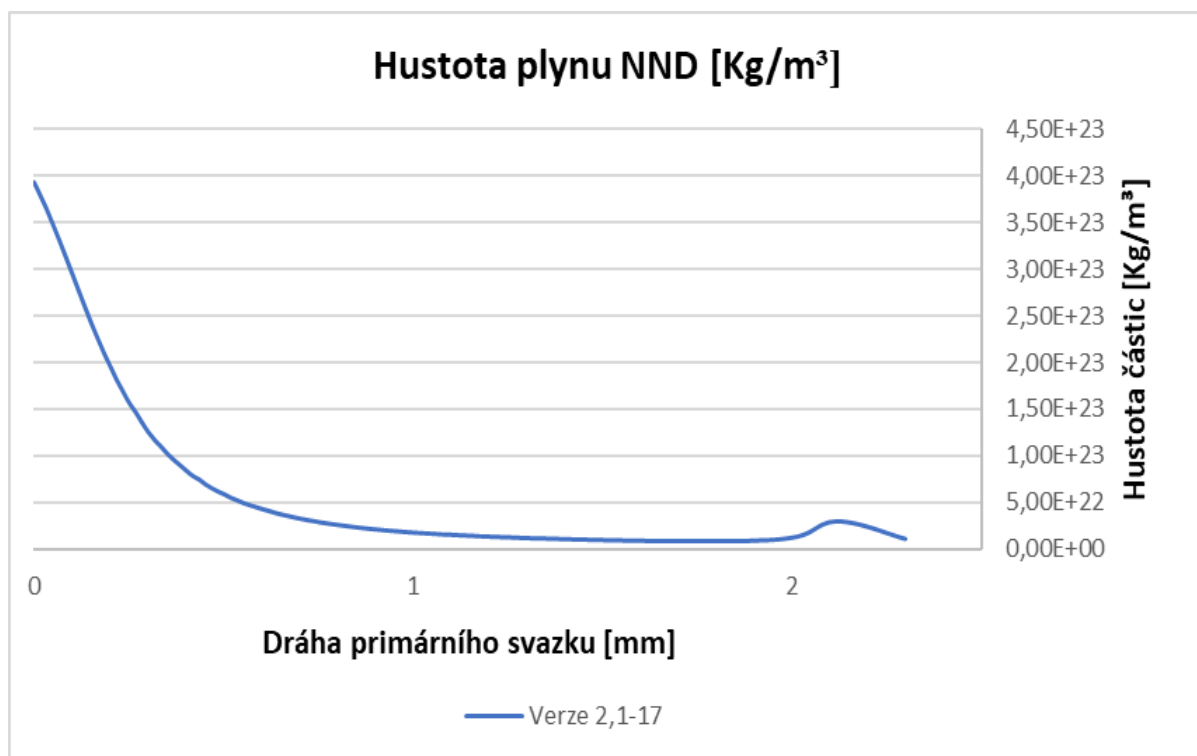


Obr. 10.15: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 1,1 mm 37°).

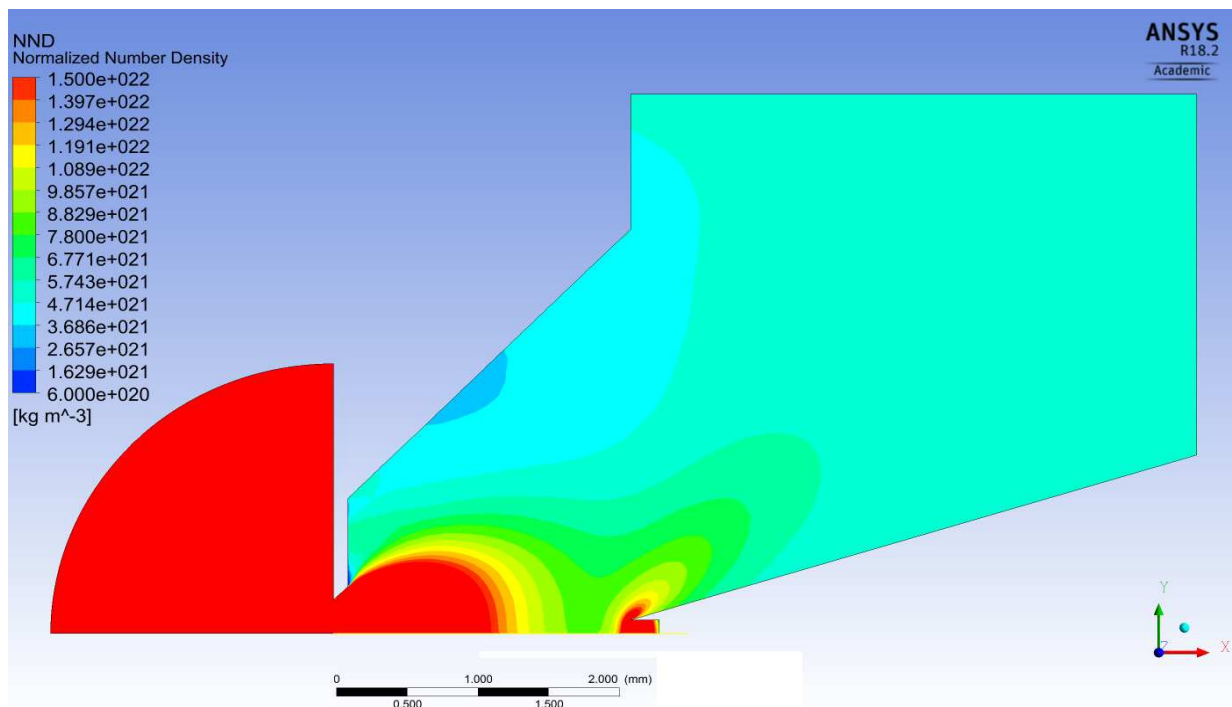


Obr. 10.16: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 1,1 mm 37°).

Varianta 2,1 mm 17° normalizovaná hustota plynu (NND).

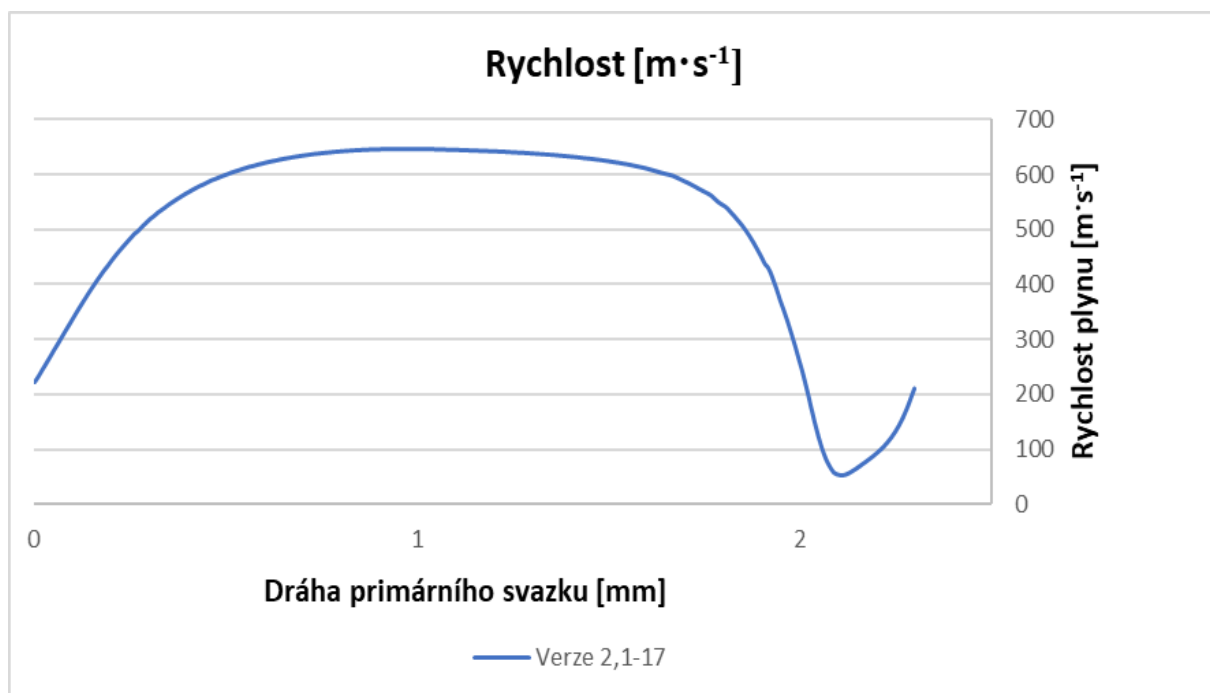


Obr. 10.17: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 17°).

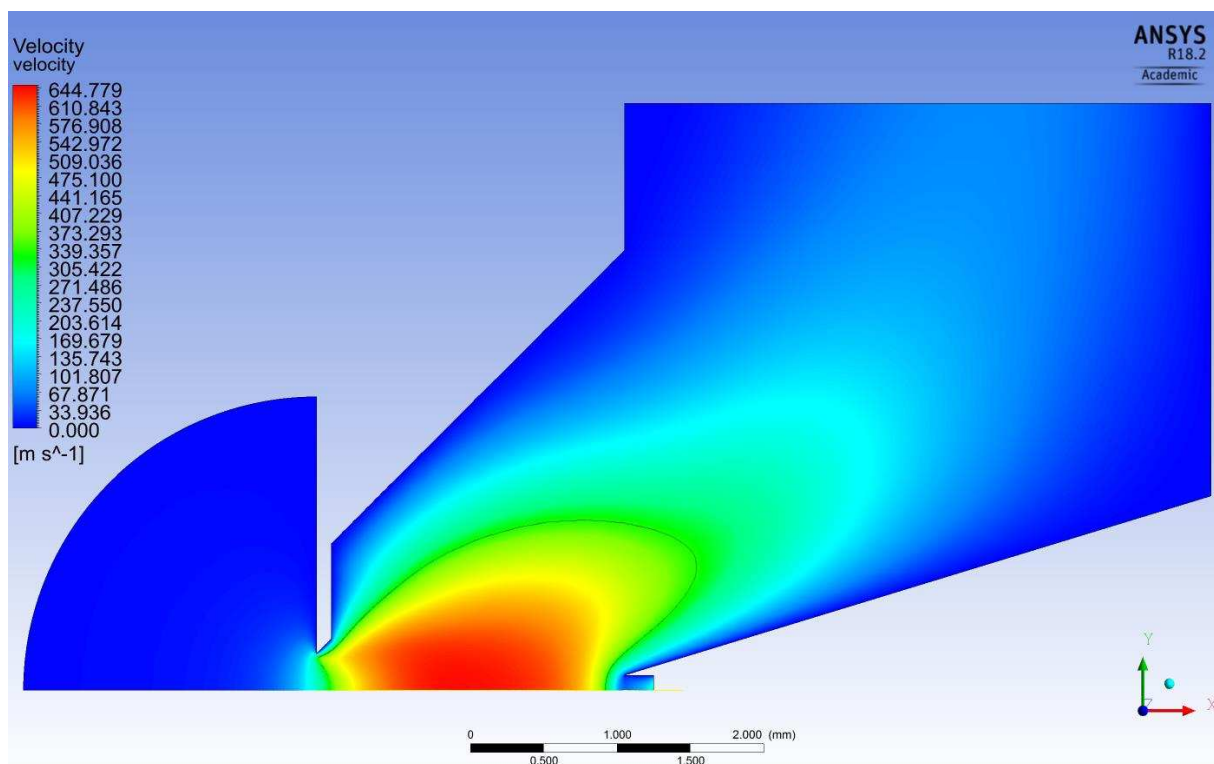


Obr. 10.18: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 2,1 mm 17°).

Varianta 2,1 mm 17° rychlost proudění.

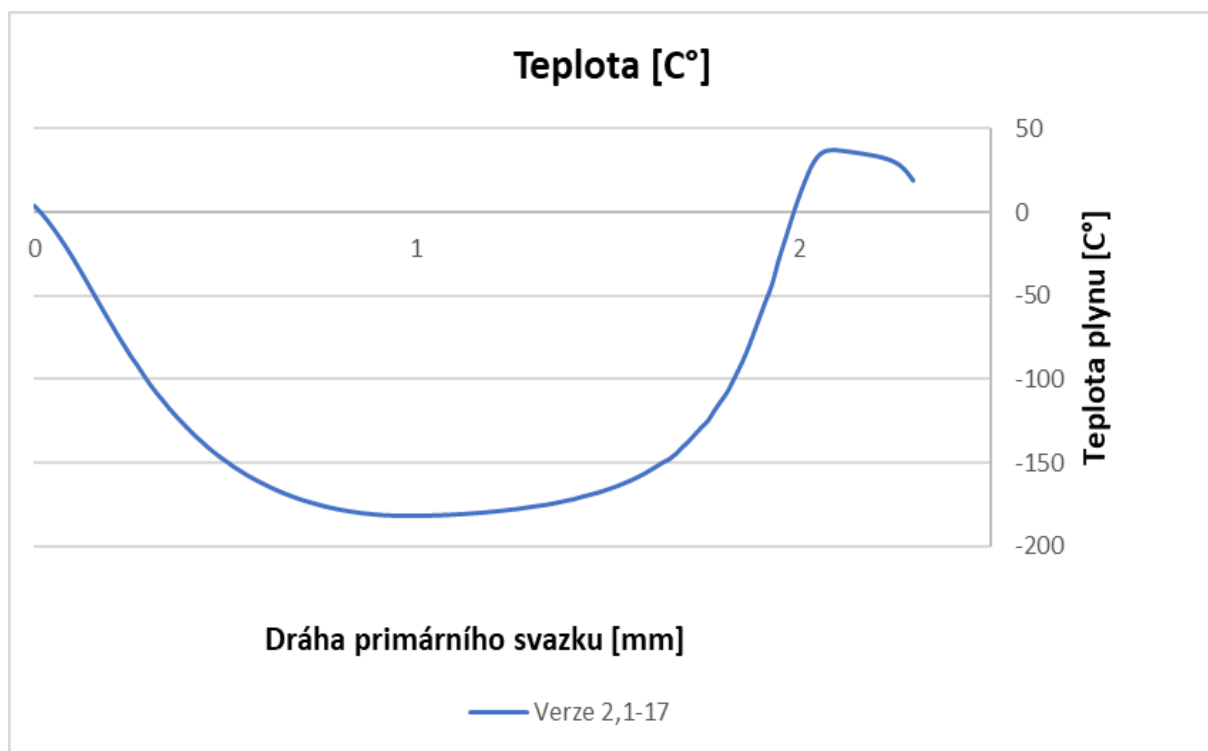


Obr. 10.19: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 17°).

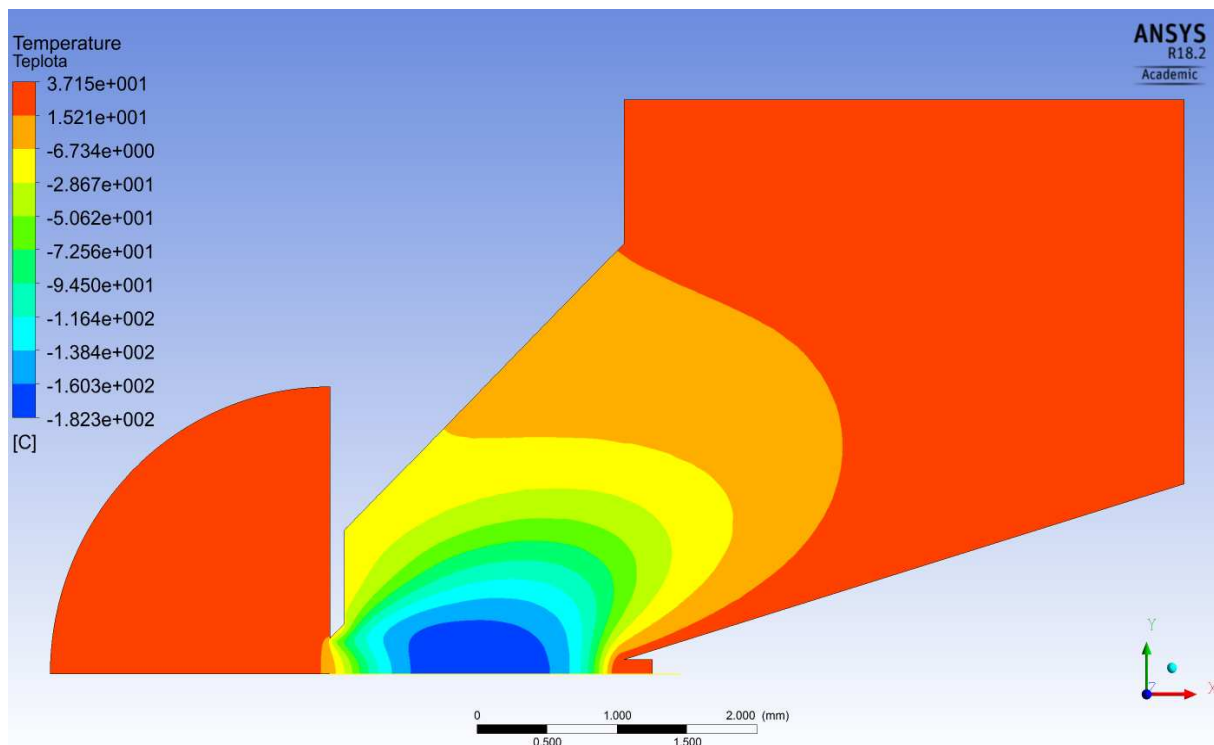


Obr. 10.20: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 2,1 mm 17°).

Varianta 2,1 mm 17° průběh teploty.

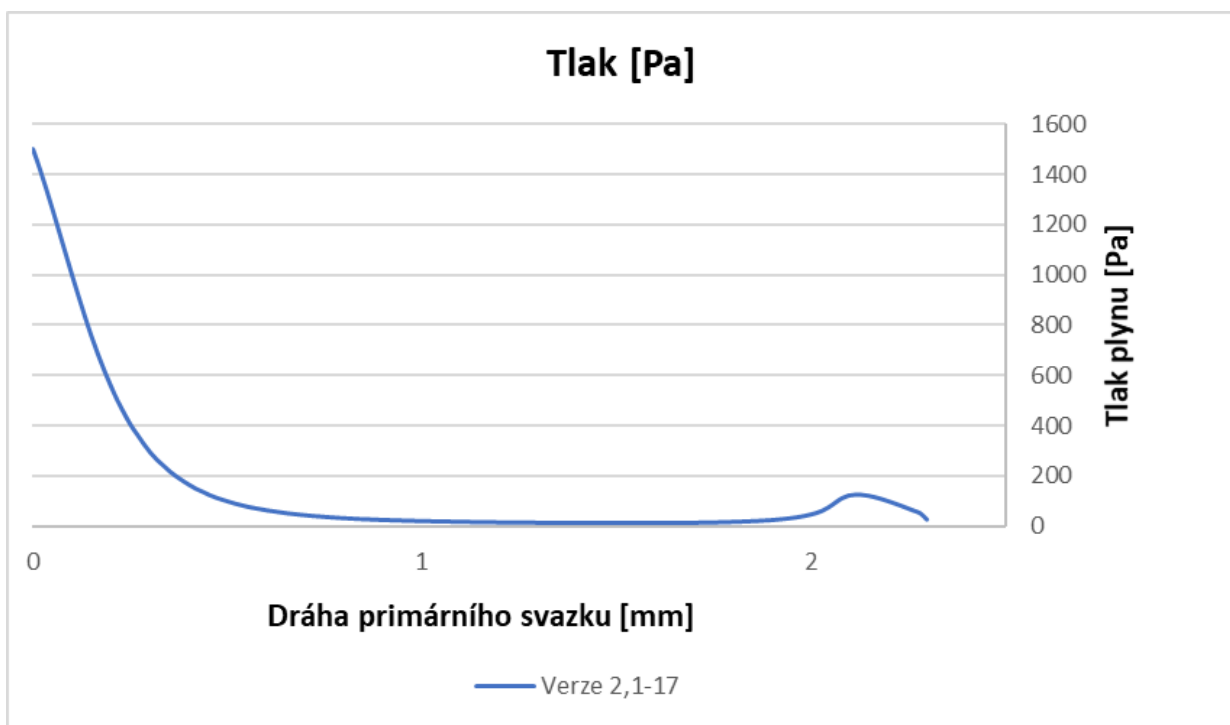


Obr. 10.21: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 17°).

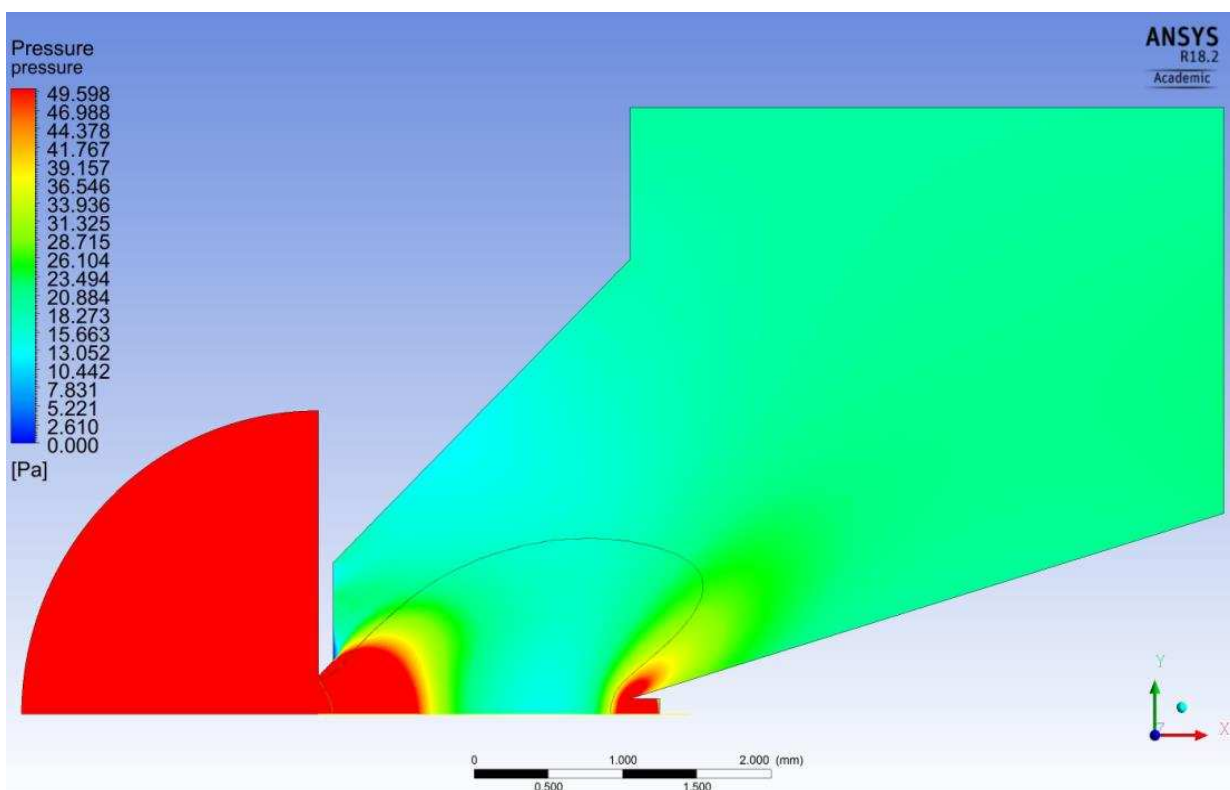


Obr. 10.22: Obrázek – teplota plynu (Varianta 2,1 mm 17°).

Varianta 2,1 mm 17° průběh tlaku.

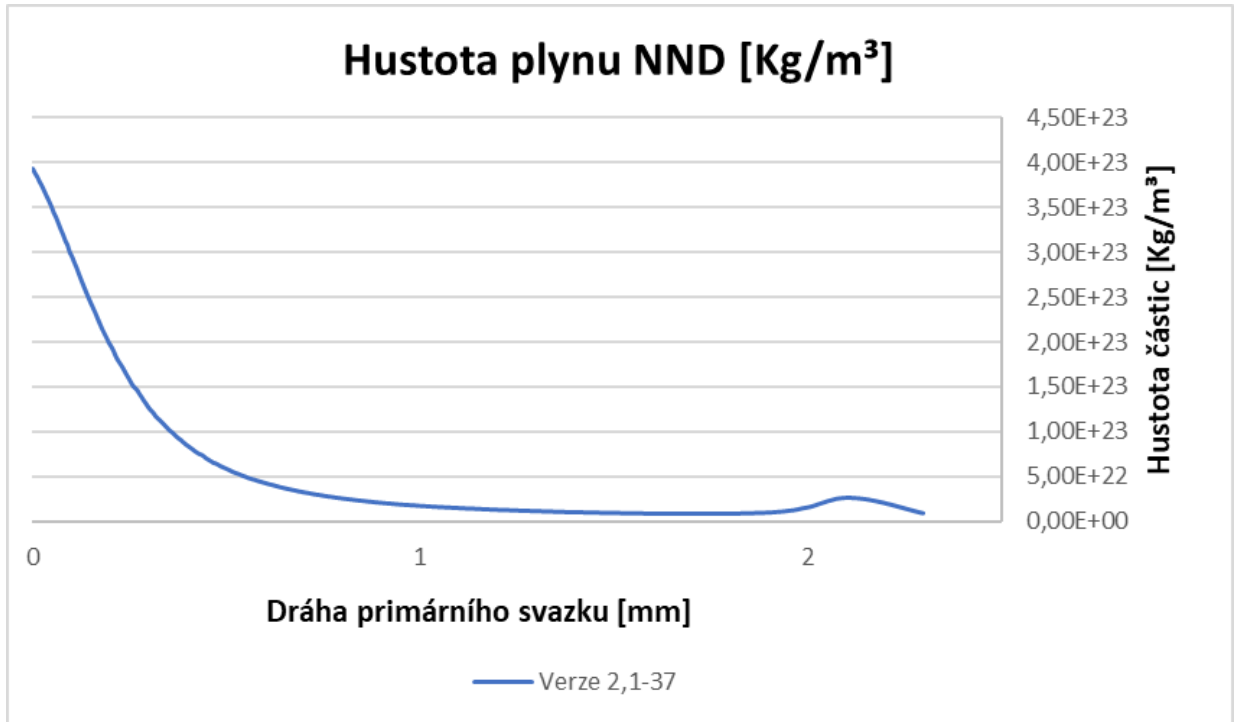


Obr. 10.23: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 17°).

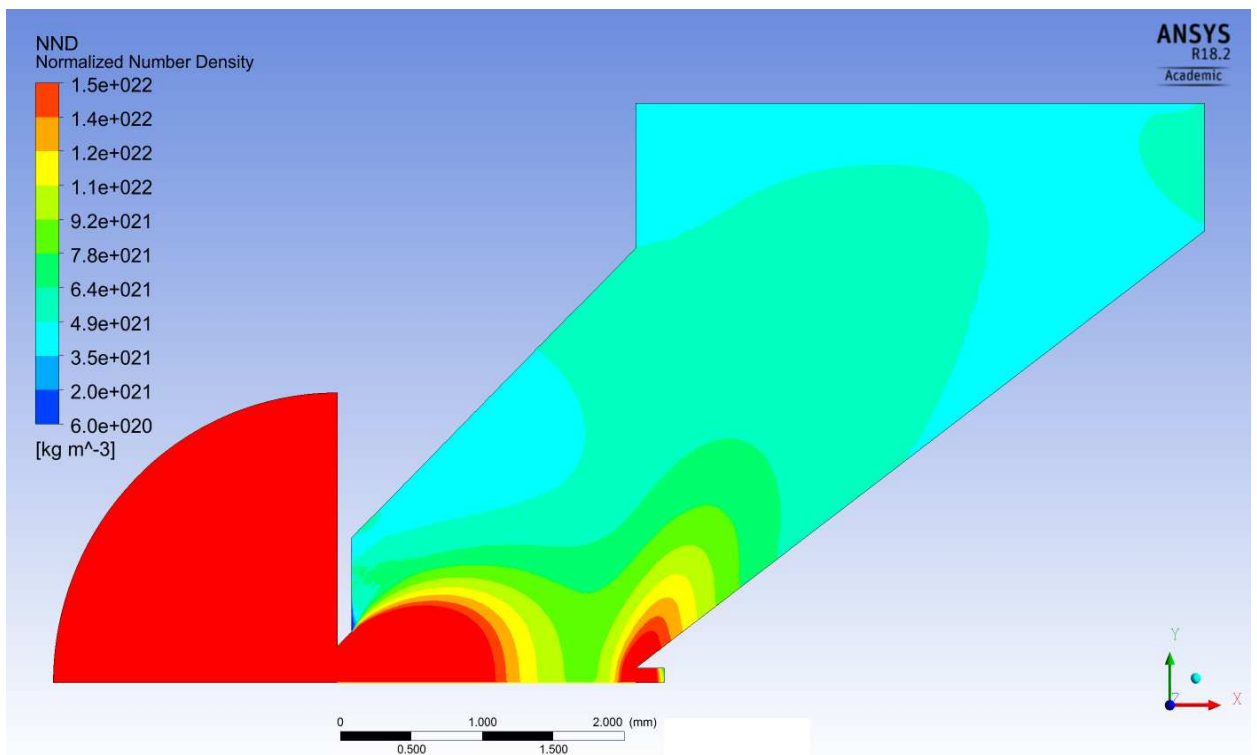


Obr. 10.24: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 2,1 mm 17°).

Varianta 2,1 mm 37° normalizovaná hustota plynu (NND).

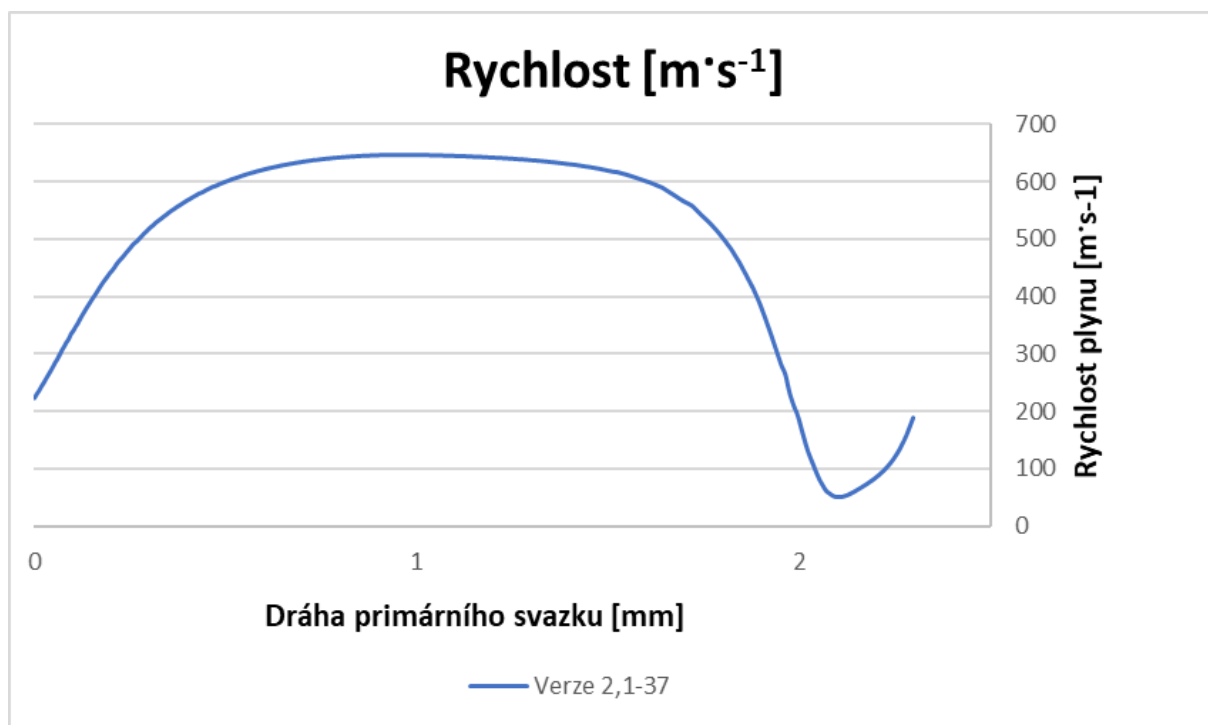


Obr. 10.25: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 37°).

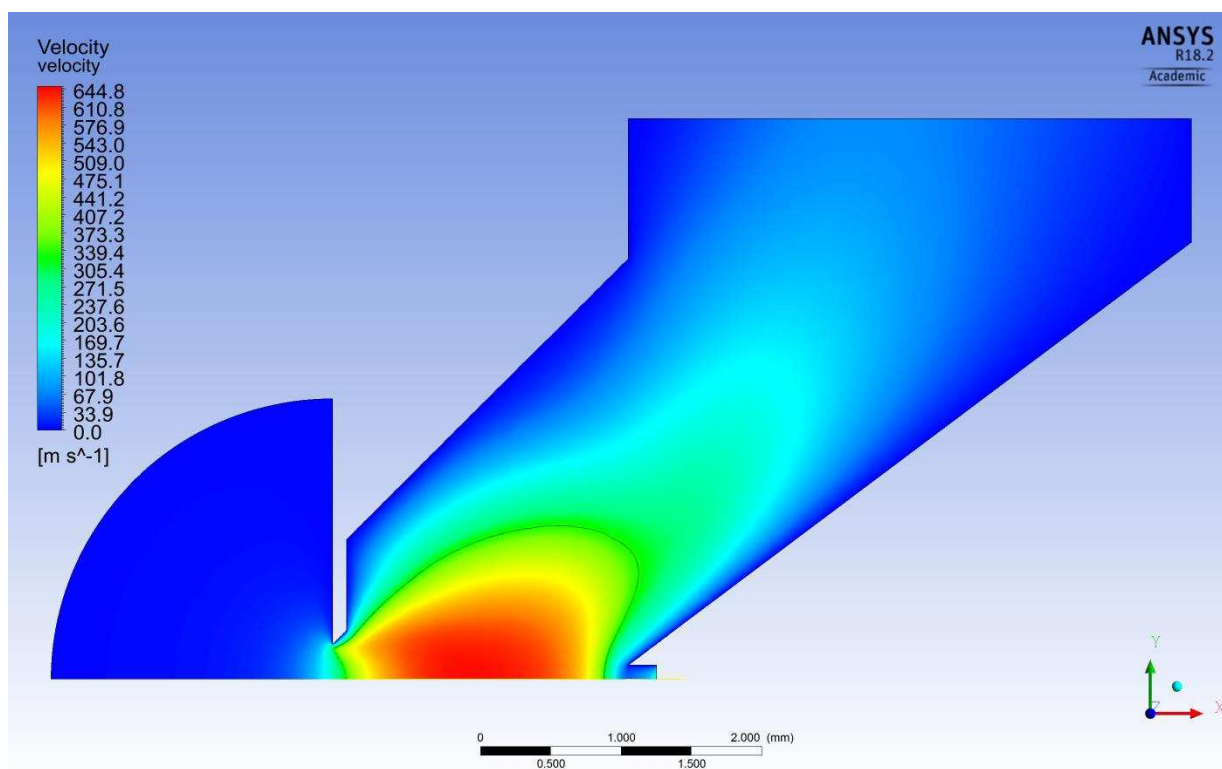


Obr. 10.26: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 2,1 mm 37°).

Varianta 2,1 mm 37° rychlost proudění.

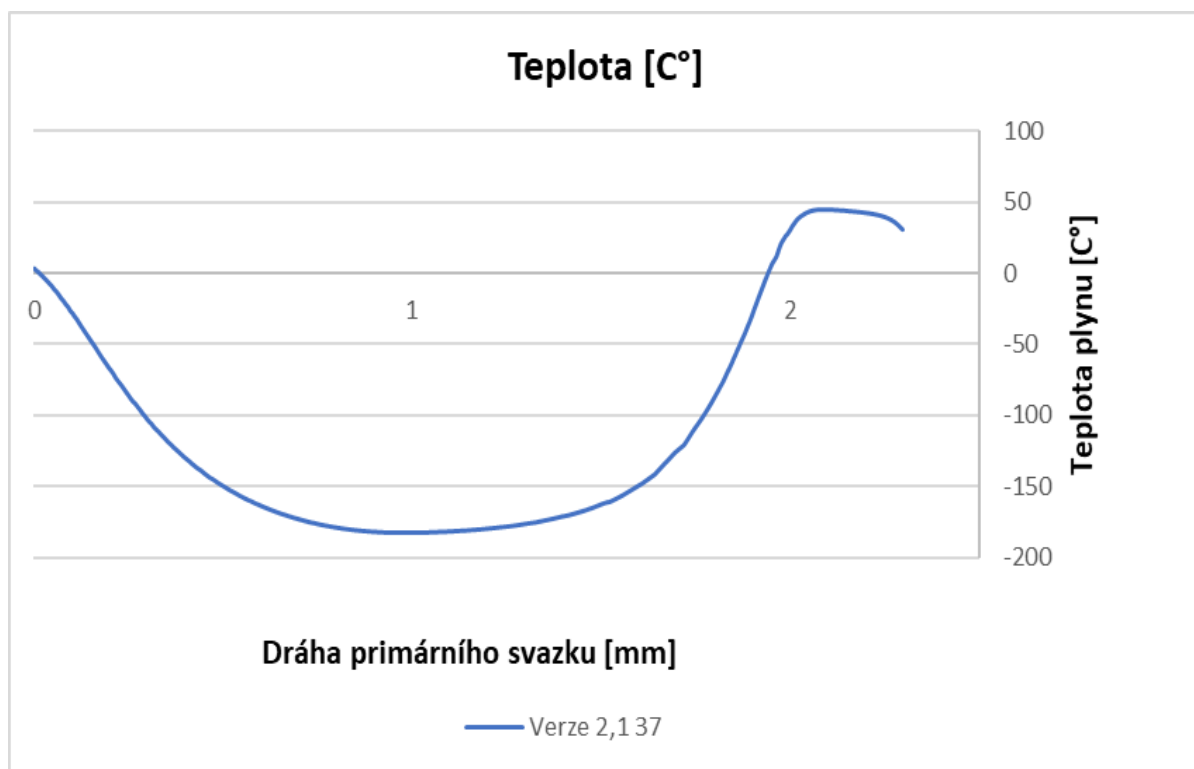


Obr. 10.27: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 37°).

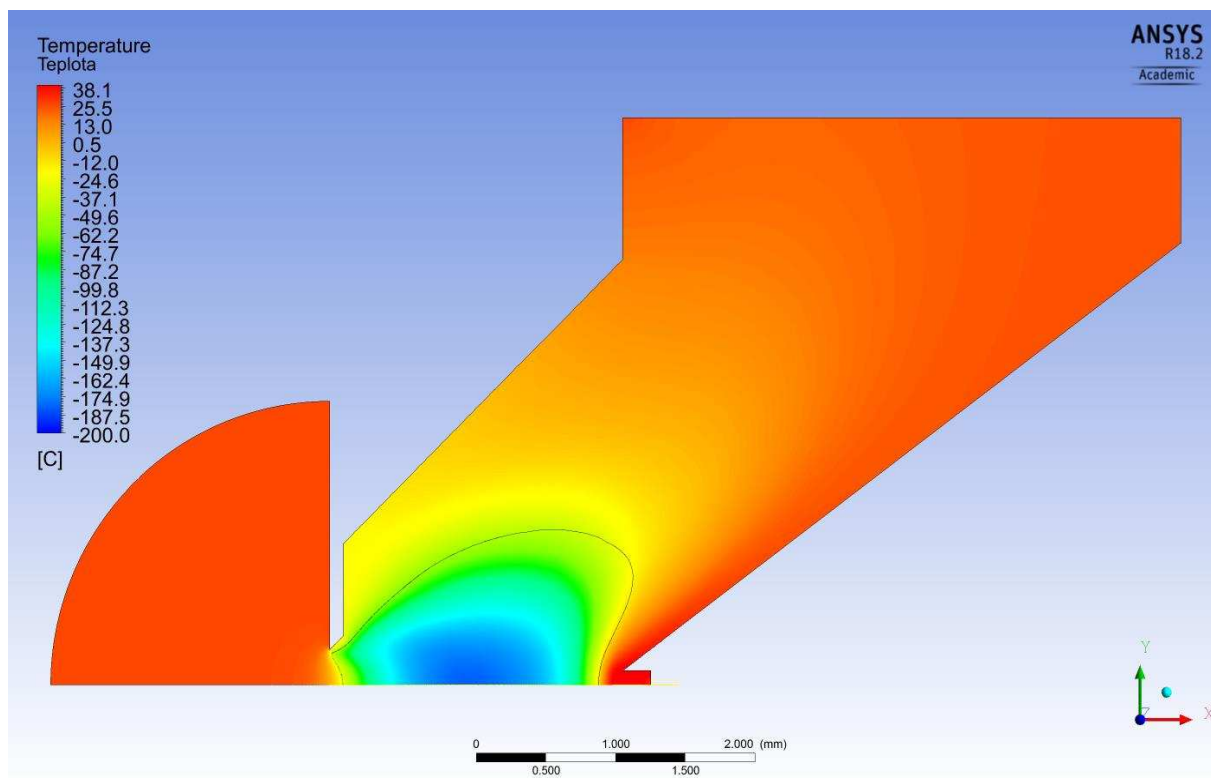


Obr. 10.28: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 2,1 mm 37°).

Varianta 2,1 mm 37° průběh teploty.

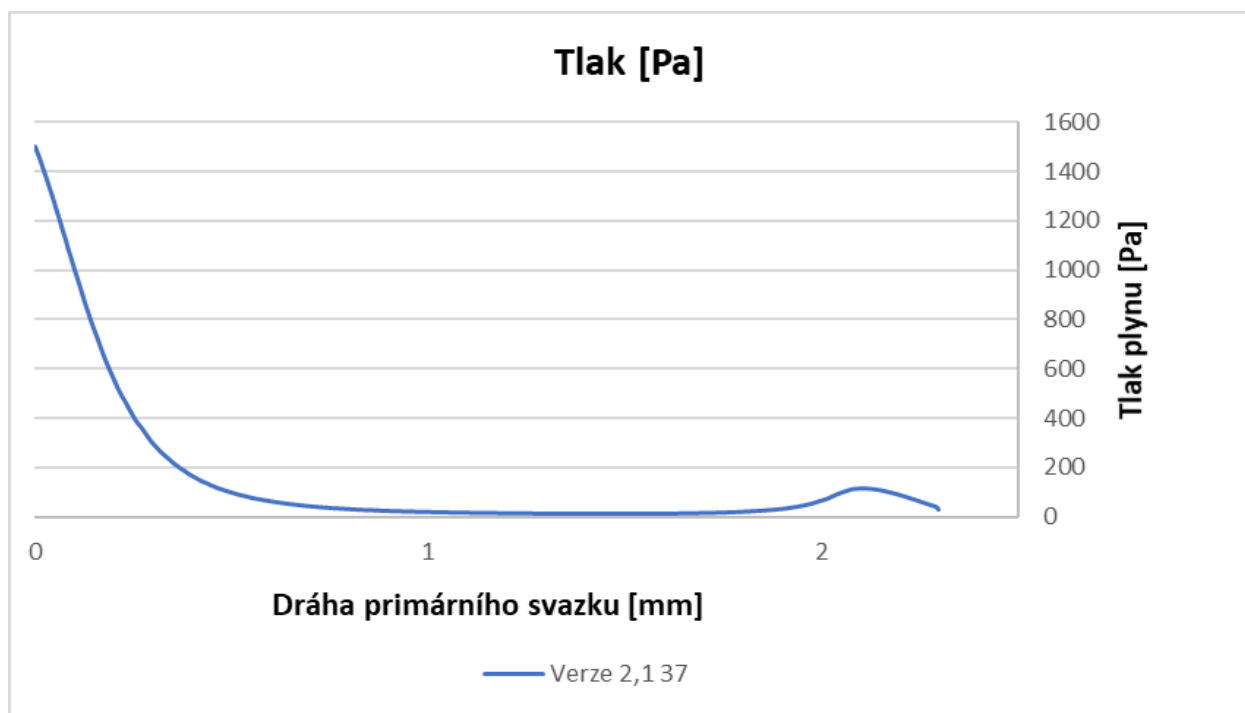


Obr. 10.29: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 37°).

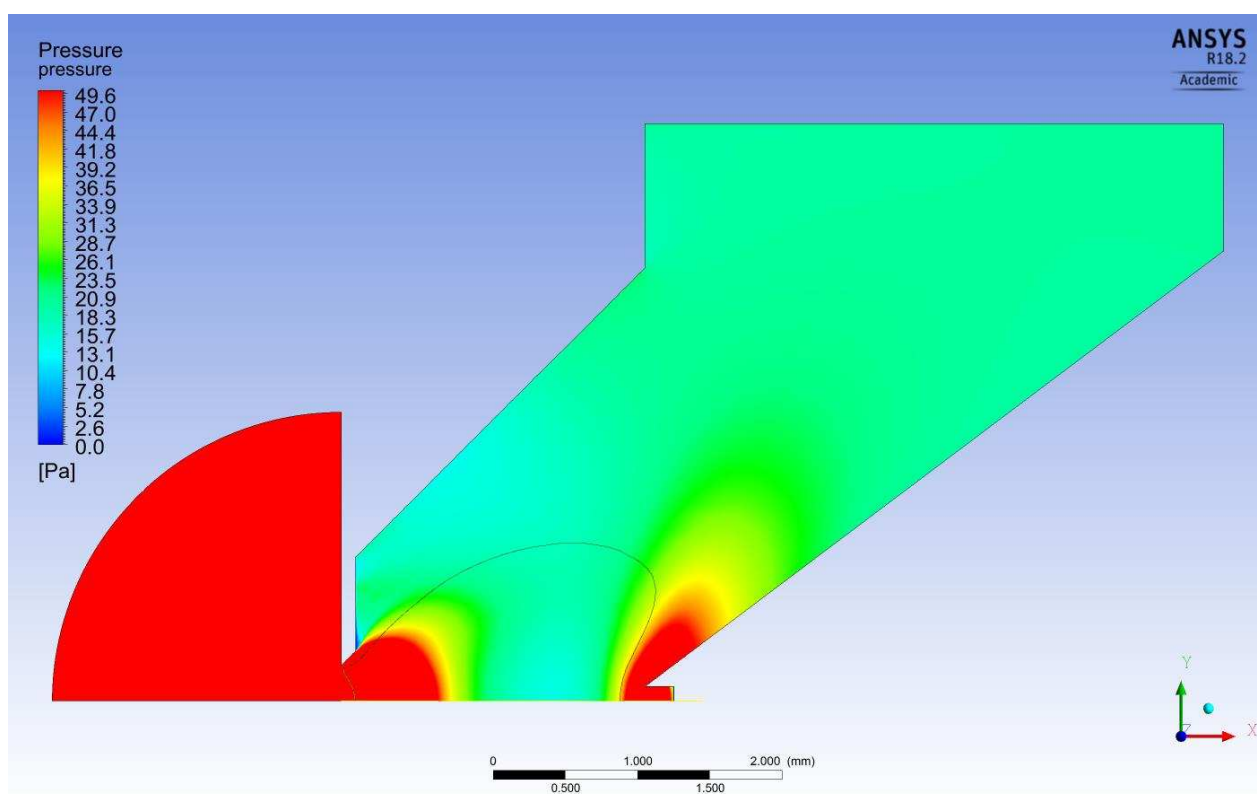


Obr. 10.30: Obrázek – teplota plynu (Varianta 2,1 mm 37°).

Varianta 2,1 mm 37° průběh tlaku.

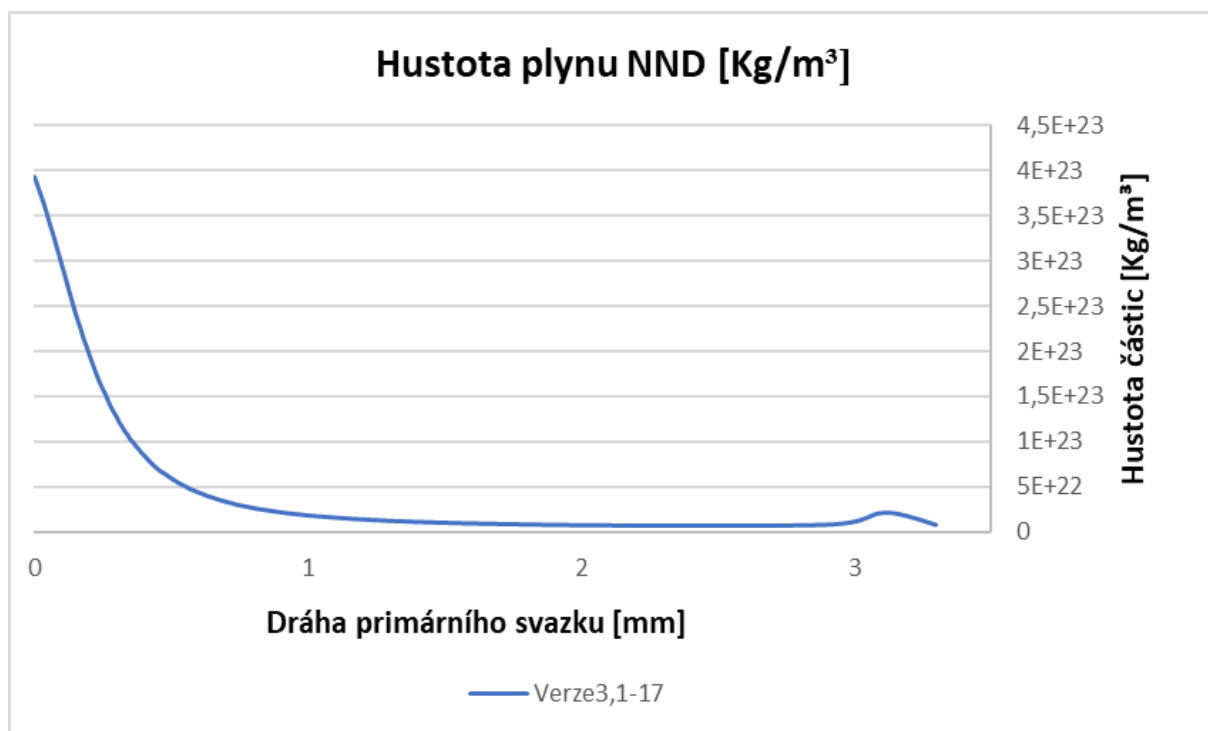


Obr. 10.31: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 2,1 mm 37°).

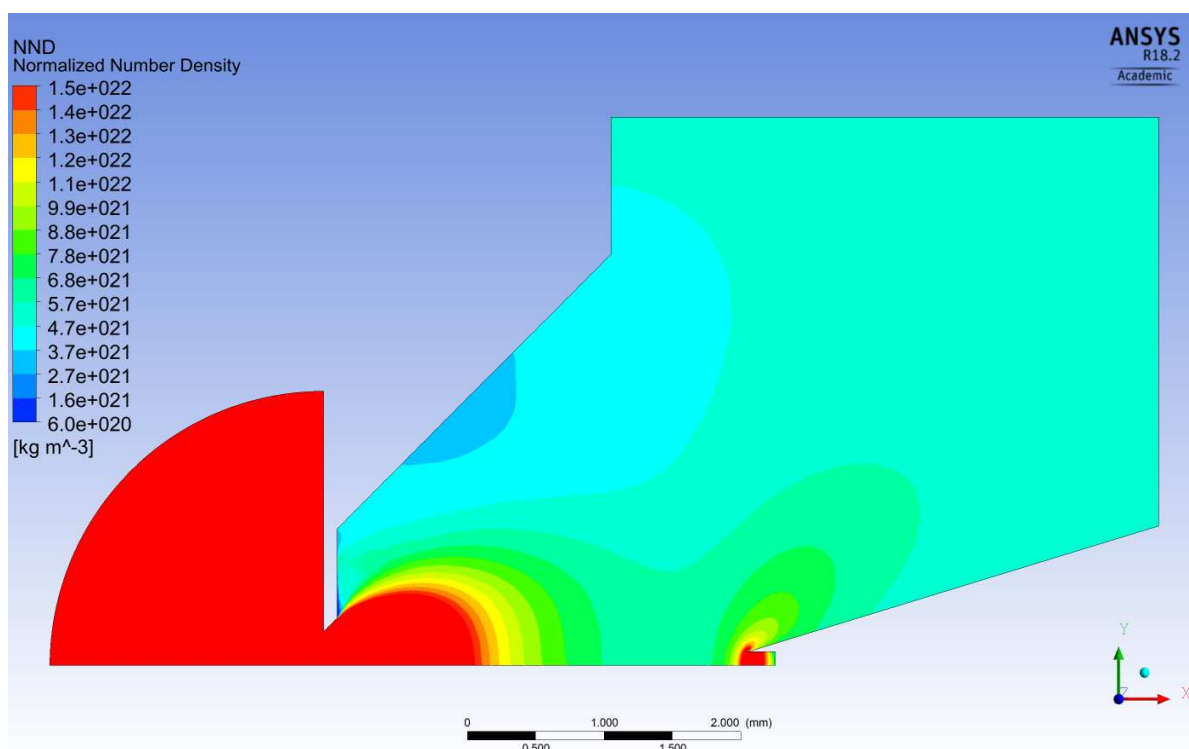


Obr. 10.32: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 2,1 mm 37°).

Varianta 3,1 mm 17° normalizovaná hustota plynu (NND).

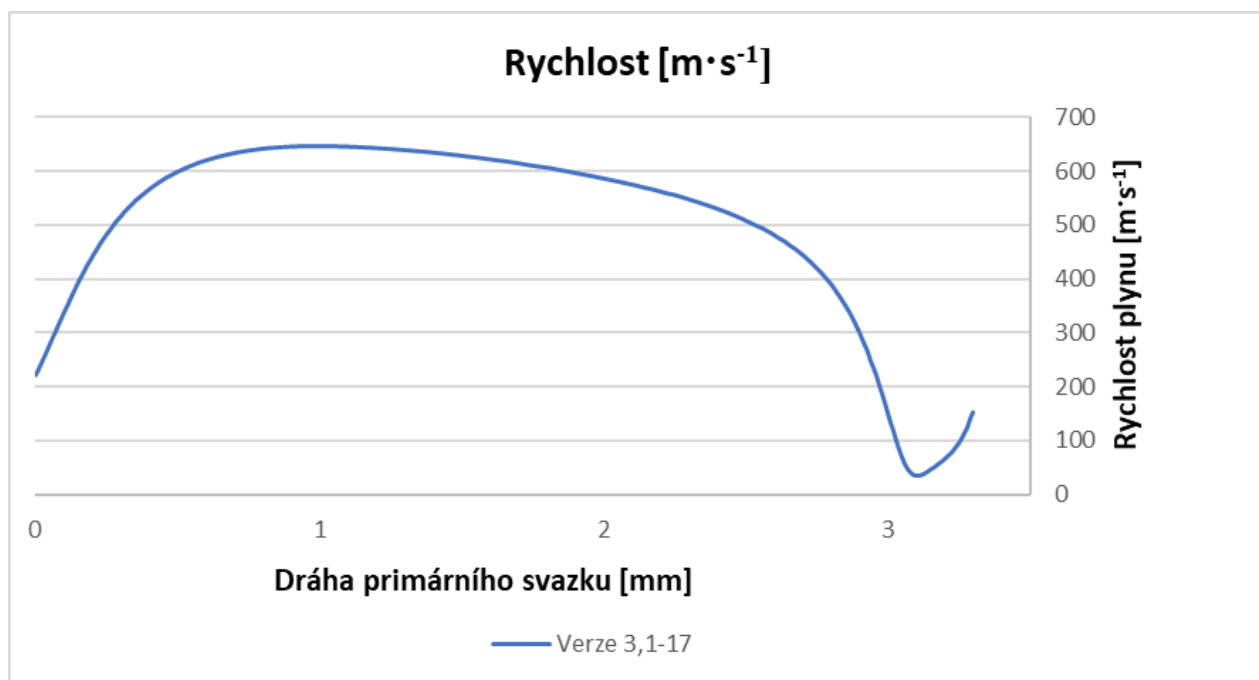


Obr. 10.33: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 17°).

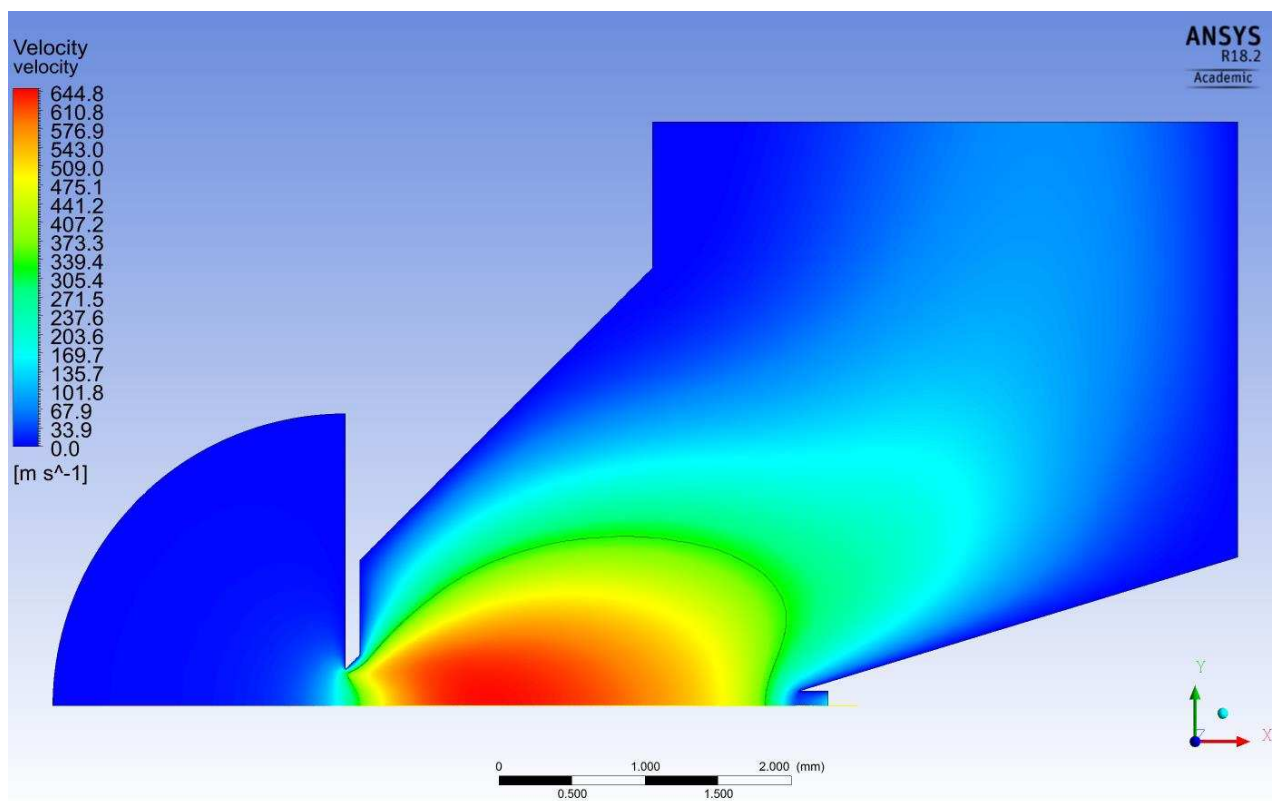


Obr. 10.34: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 3,1 mm 17°).

Varianta 3,1 mm 17° rychlost proudění.

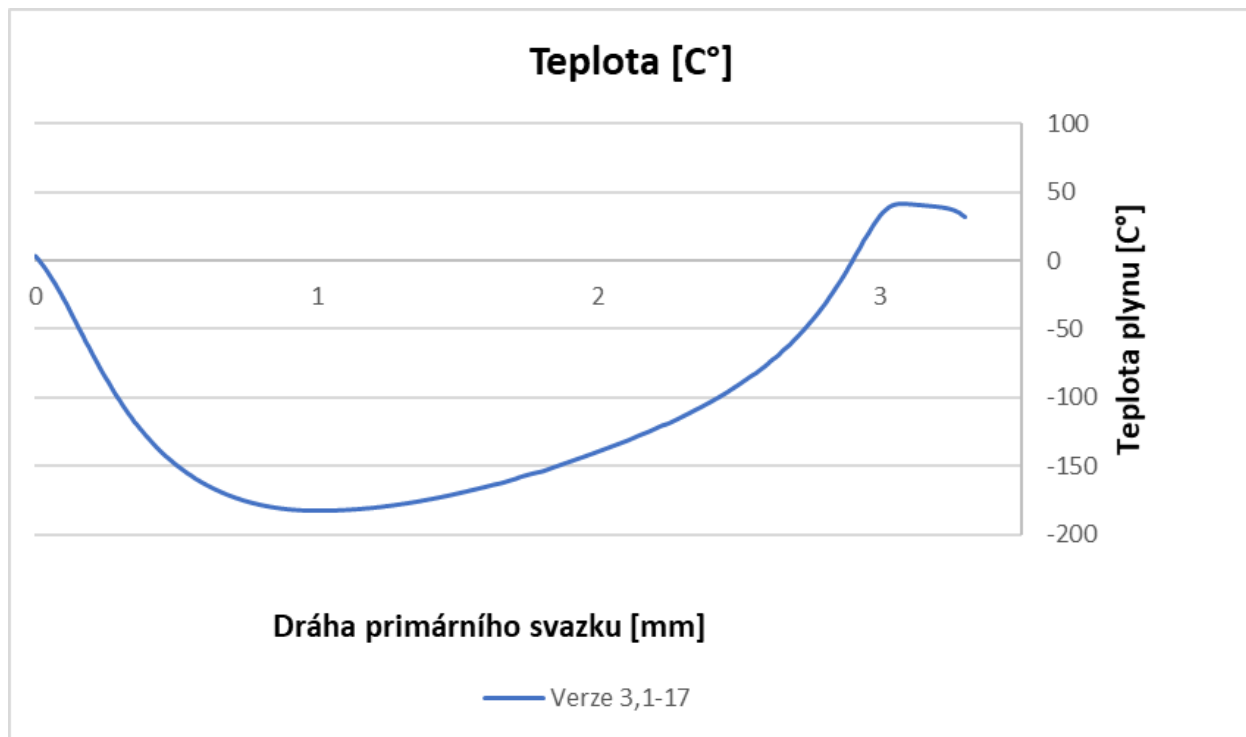


Obr. 10.35: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 17°).

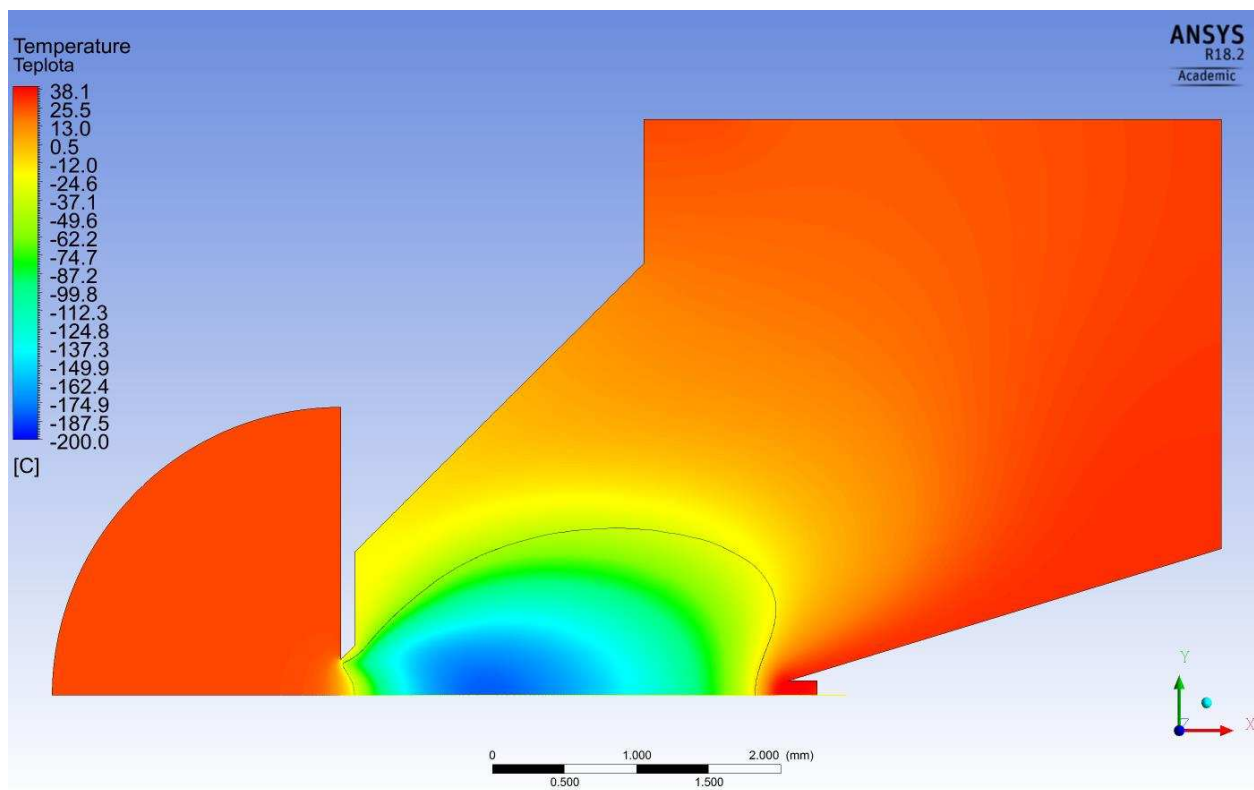


Obr. 10.36: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 3,1 mm 17°).

Varianta 3,1 mm 17° průběh teploty.

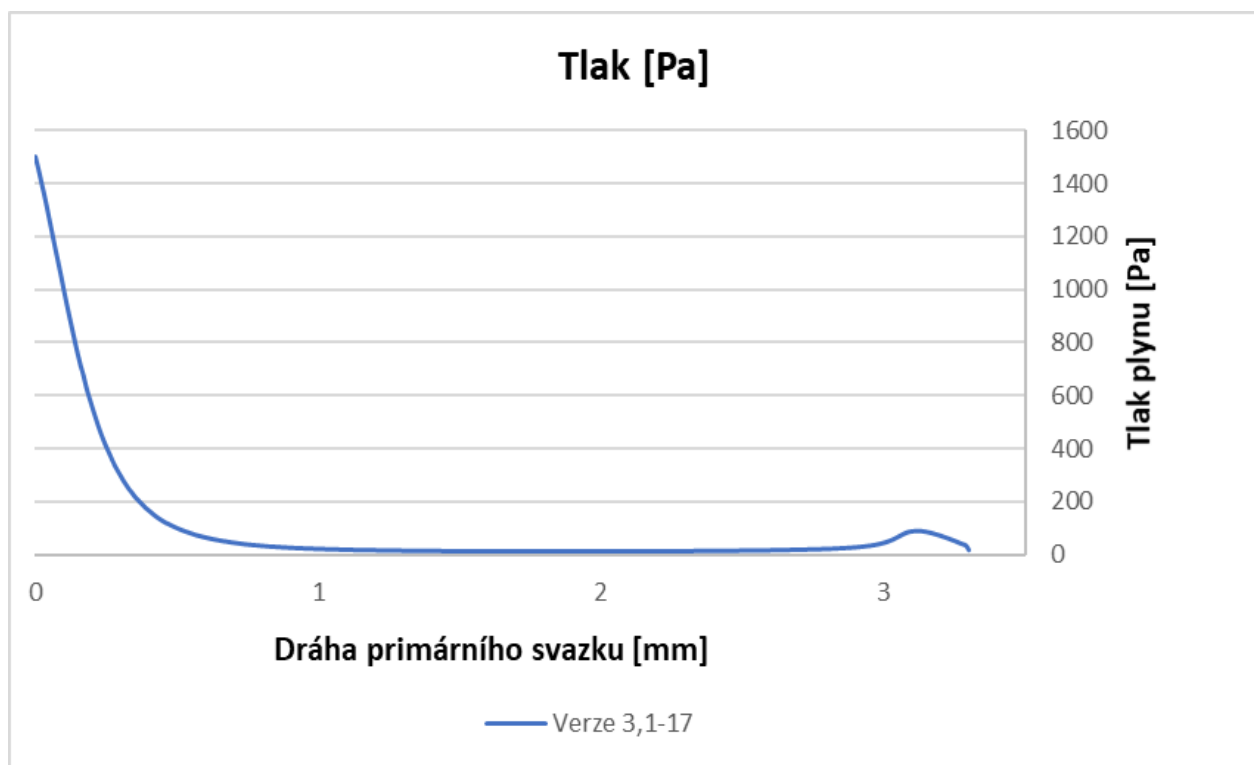


Obr. 10.37: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 17°).

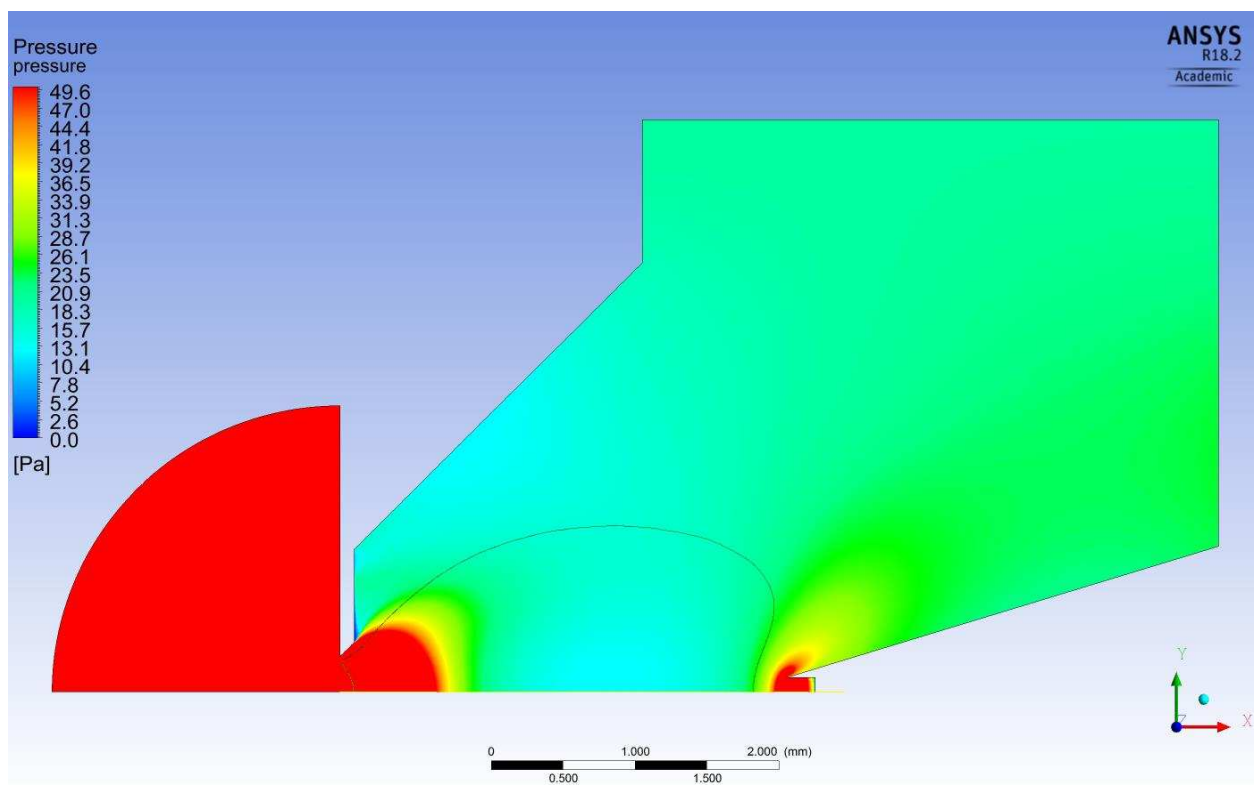


Obr. 10.38: Obrázek – teplota plynu (Varianta 3,1 mm 17°).

Varianta 3,1 mm 17° průběh tlaku.

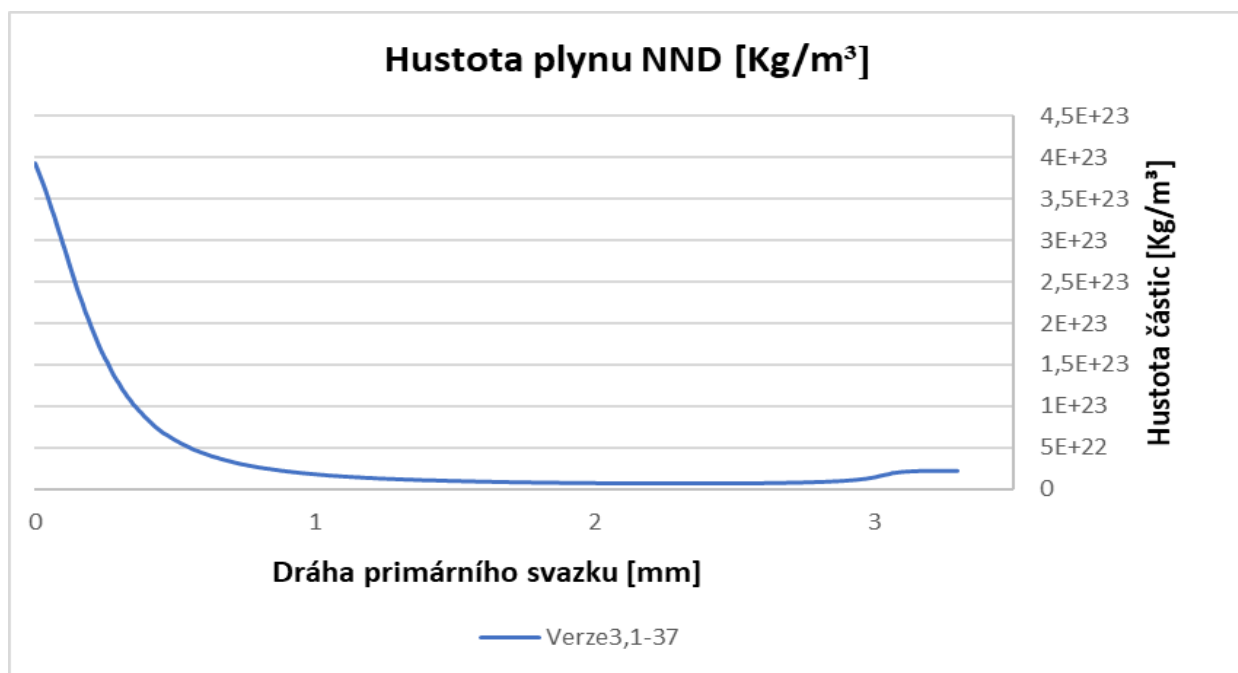


Obr. 10.39: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 17°).

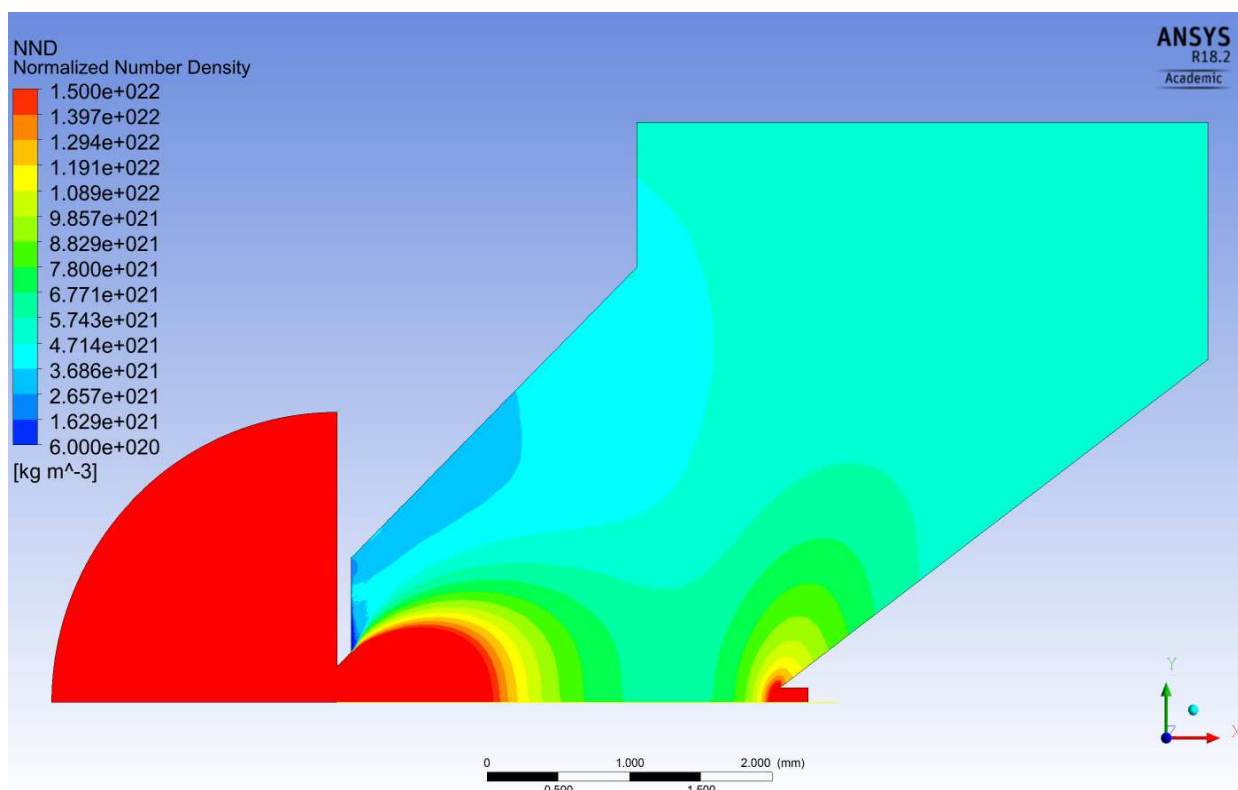


Obr. 10.40: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 3,1 mm 17°).

Varianta 3,1 mm 37° normalizovaná hustota plynu (NND).

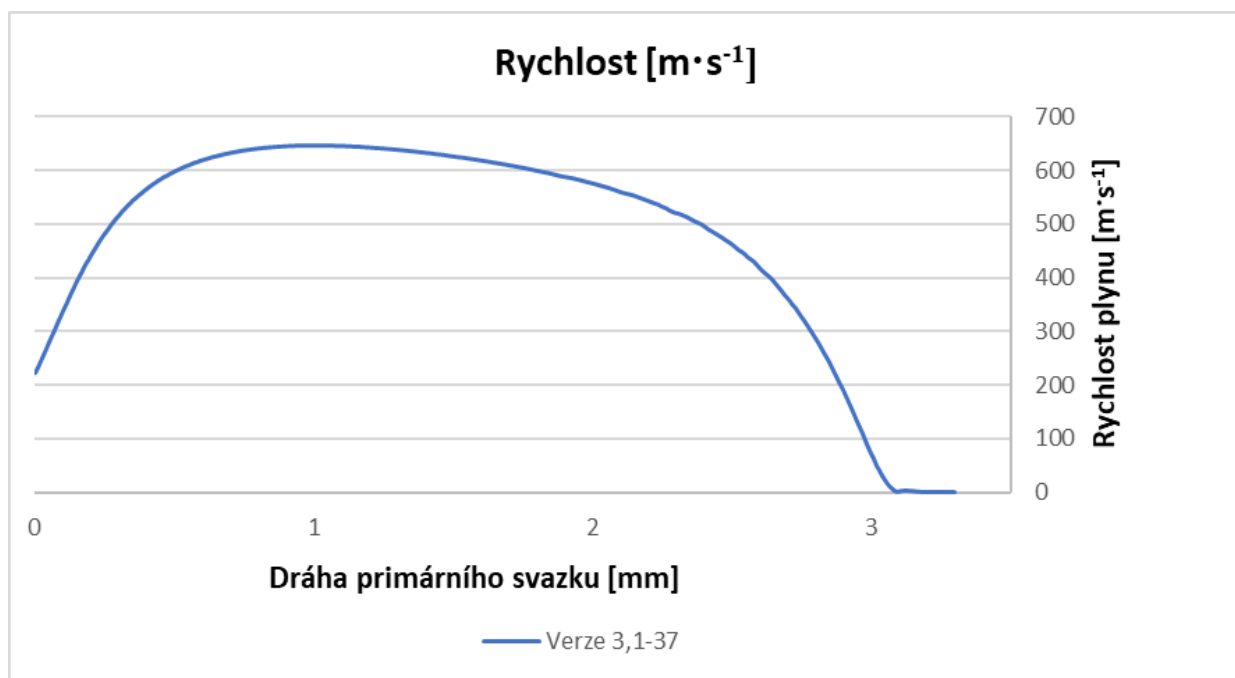


Obr. 10.41: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 37°).

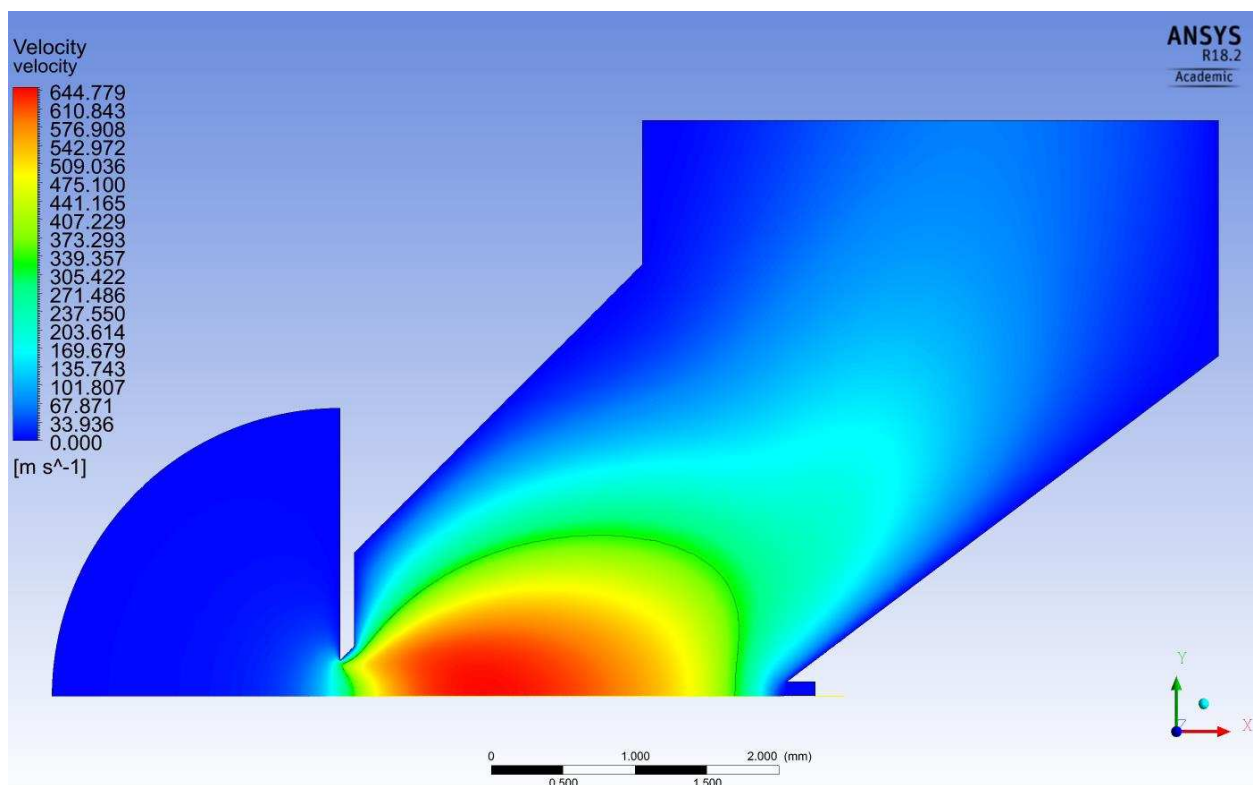


Obr. 10.42: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 3,1 mm 37°).

Varianta 3,1 mm 37° rychlost proudění.

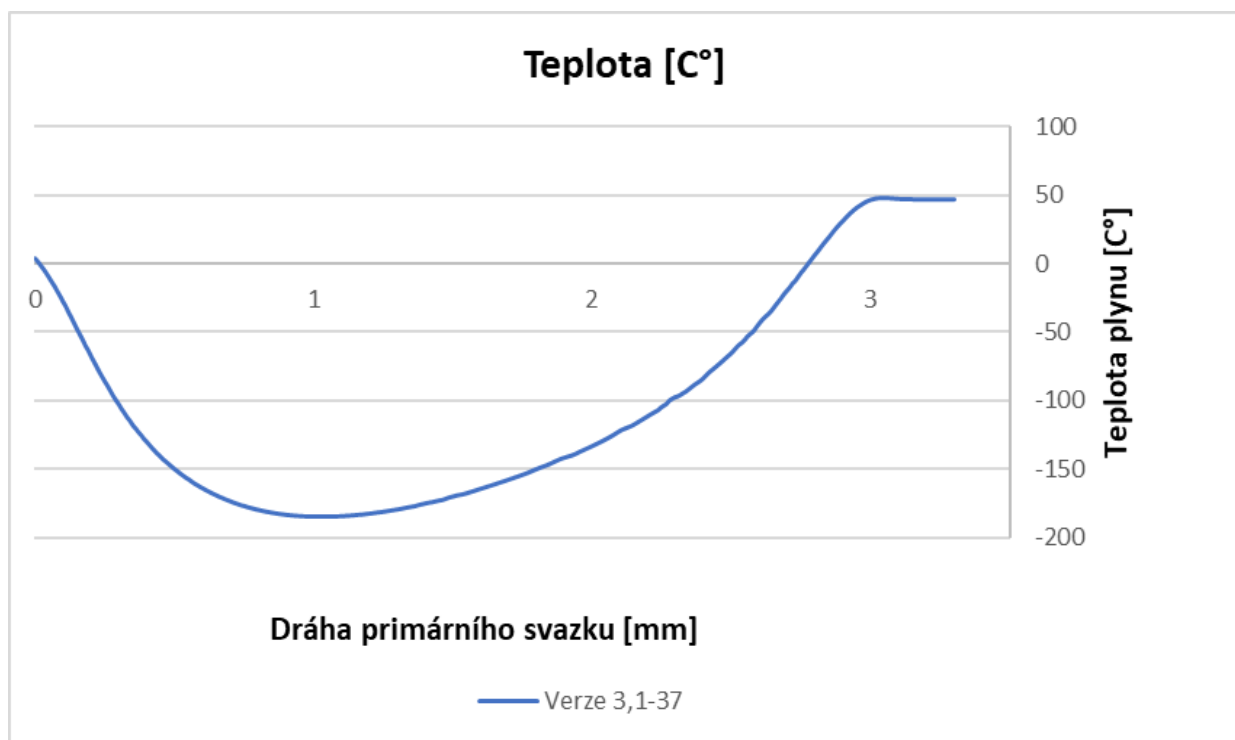


Obr. 10.43: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 37°).

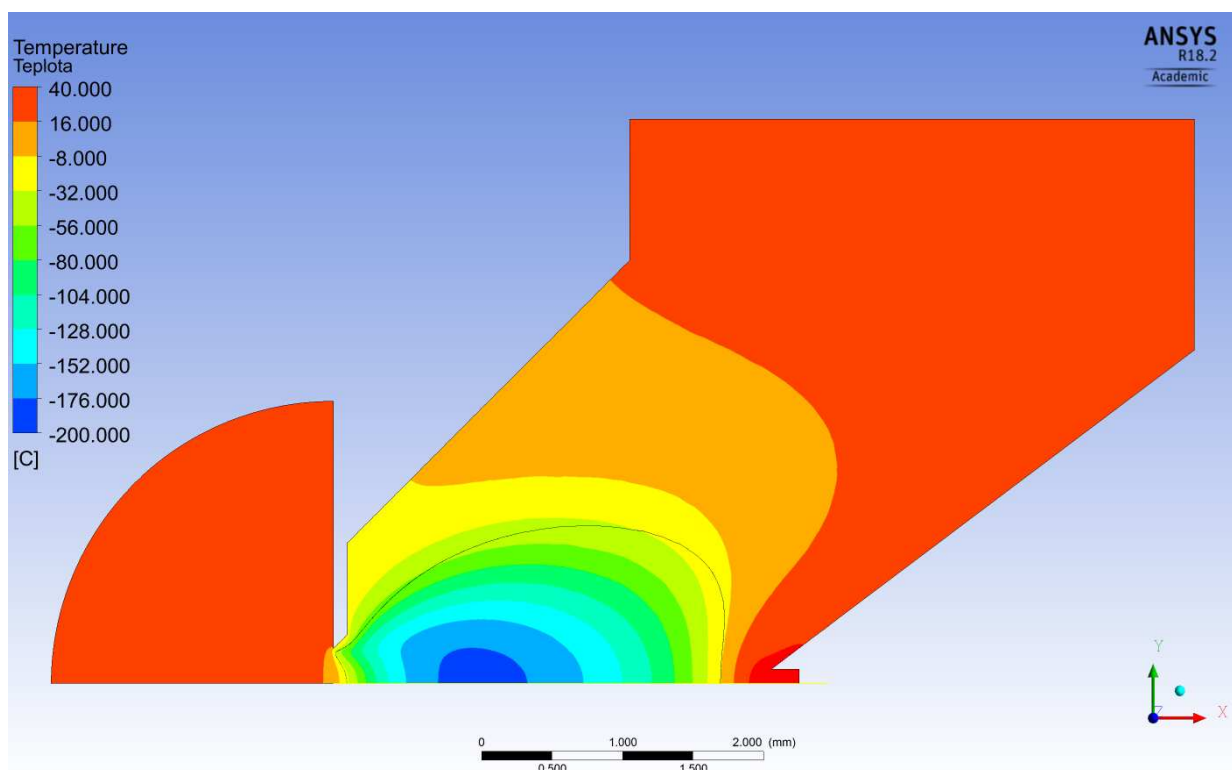


Obr. 10.44: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 3,1 mm 37°).

Varianta 3,1 mm 37° průběh teploty.

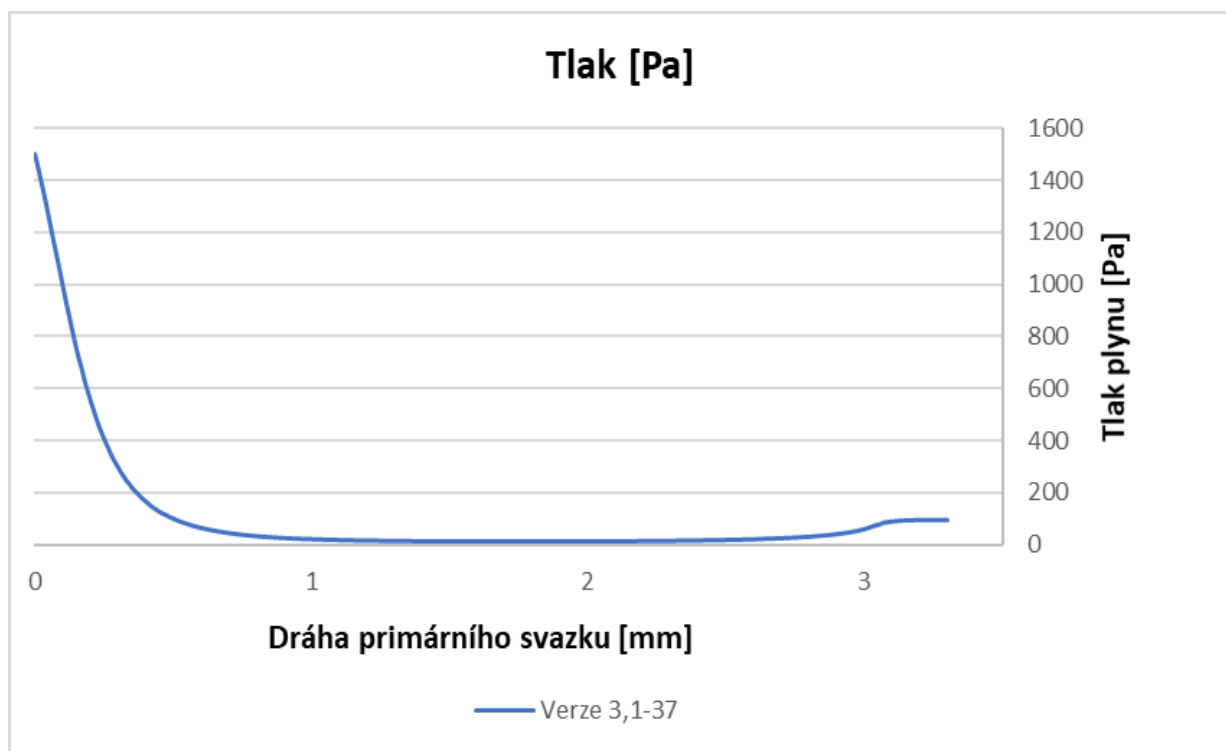


Obr. 10.45: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 37°).

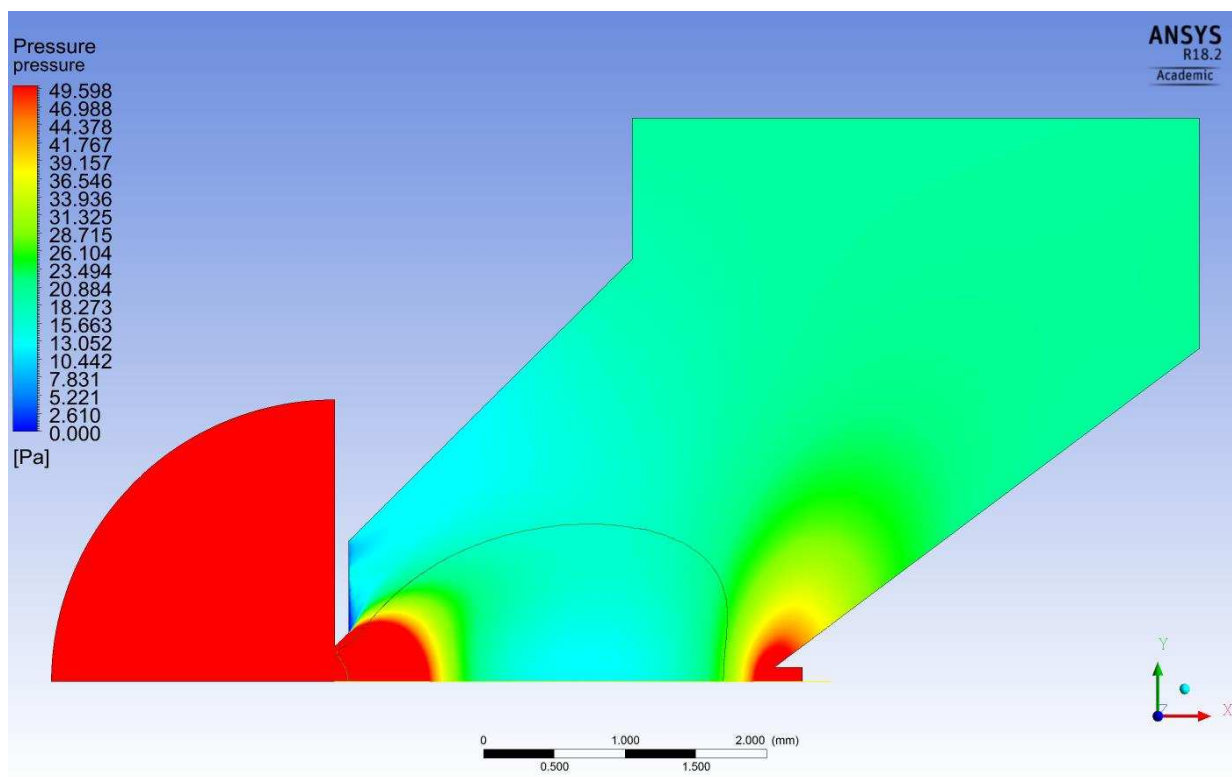


Obr. 10.46: Obrázek – teplota plynu (Varianta 3,1 mm 37°).

Varianta 3,1 mm 37° průběh tlaku.

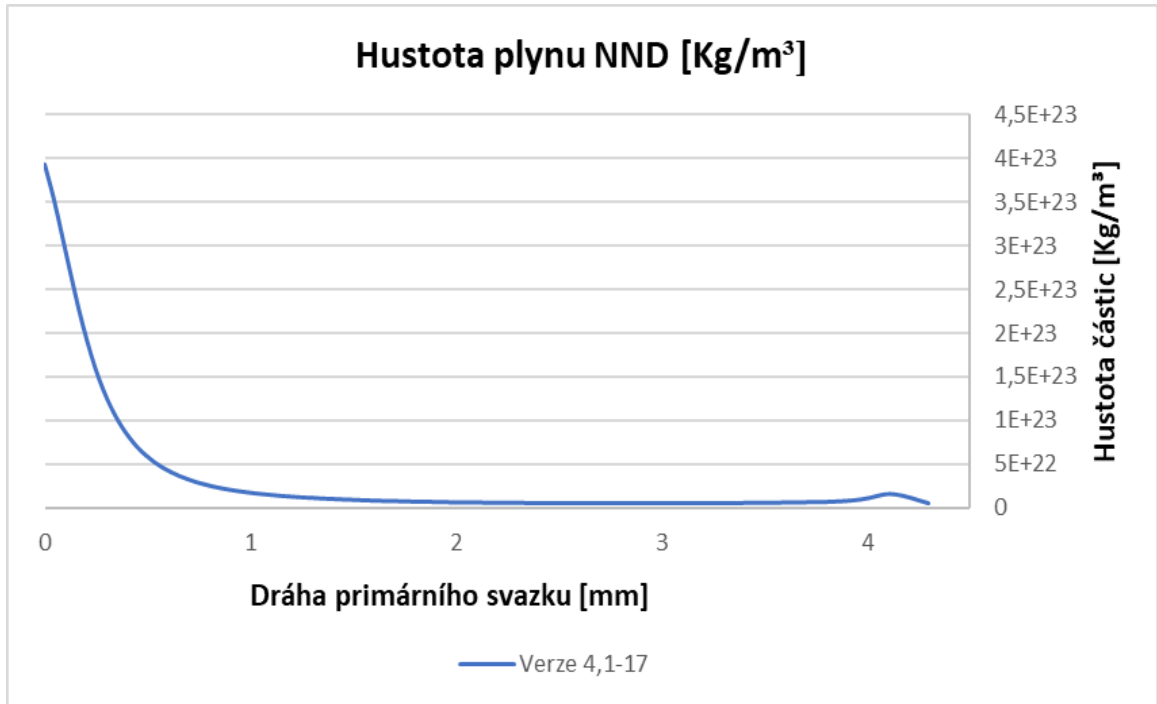


Obr. 10.47: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 3,1 mm 37°).

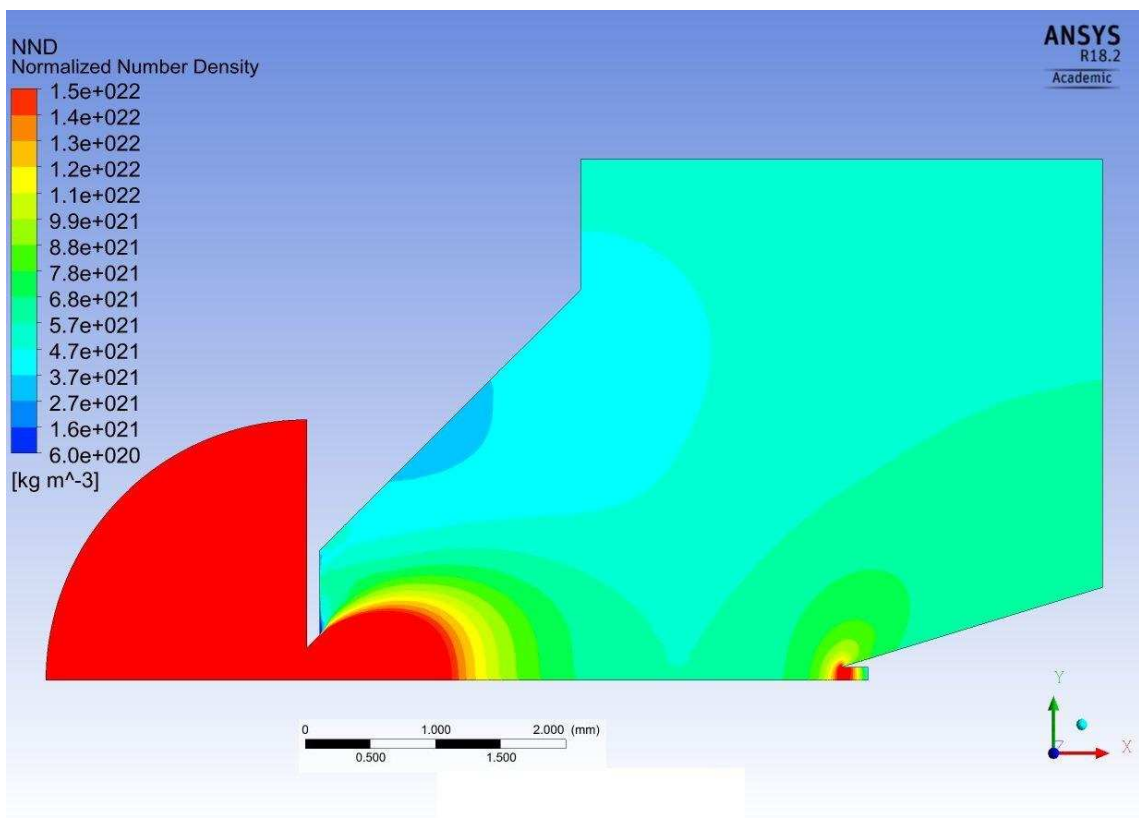


Obr. 10.48: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 3,1 mm 37°).

Varianta 4,1 mm 17° normalizovaná hustota plynu (NND).

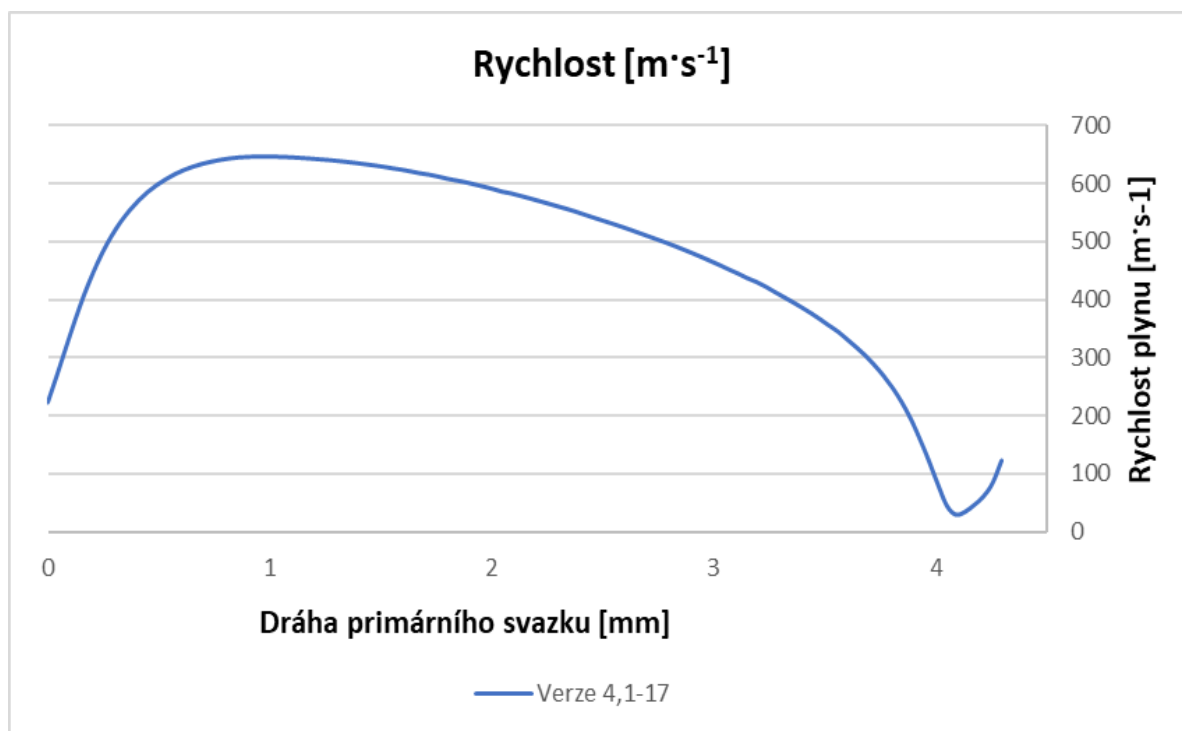


Obr. 10.49: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 17°).

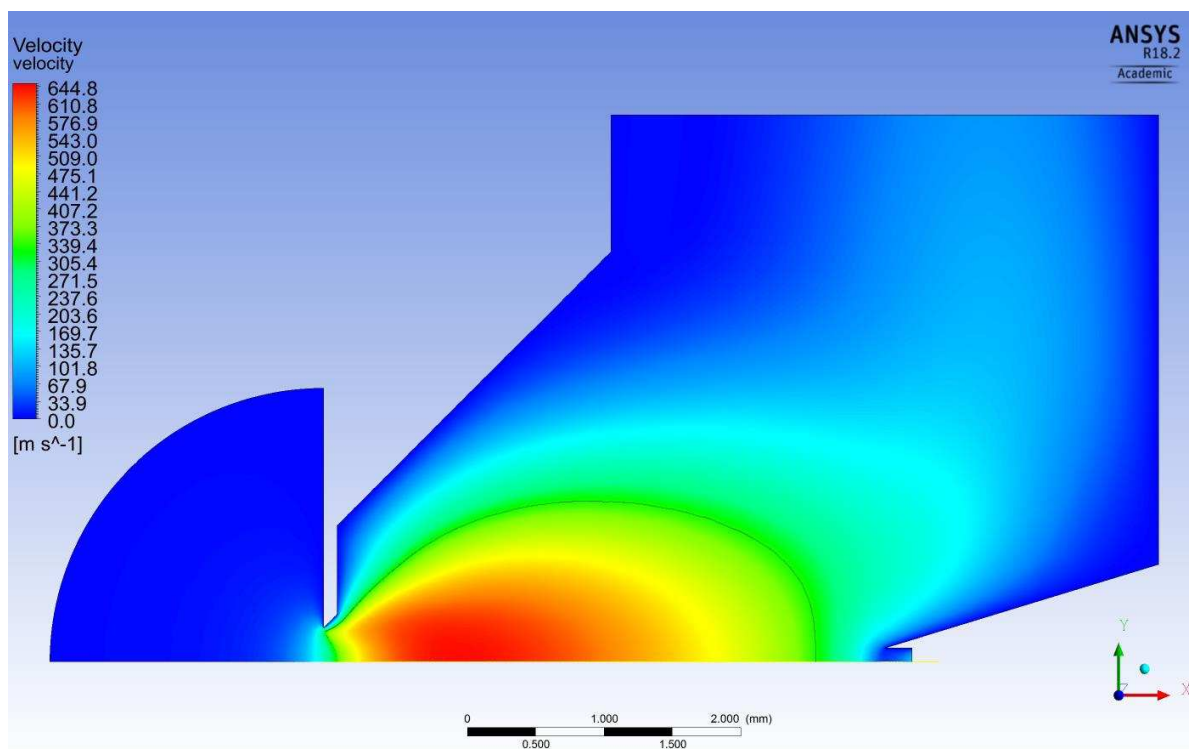


Obr. 10.50: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 4,1 mm 17°).

Varianta 4,1 mm 17° rychlost proudění.

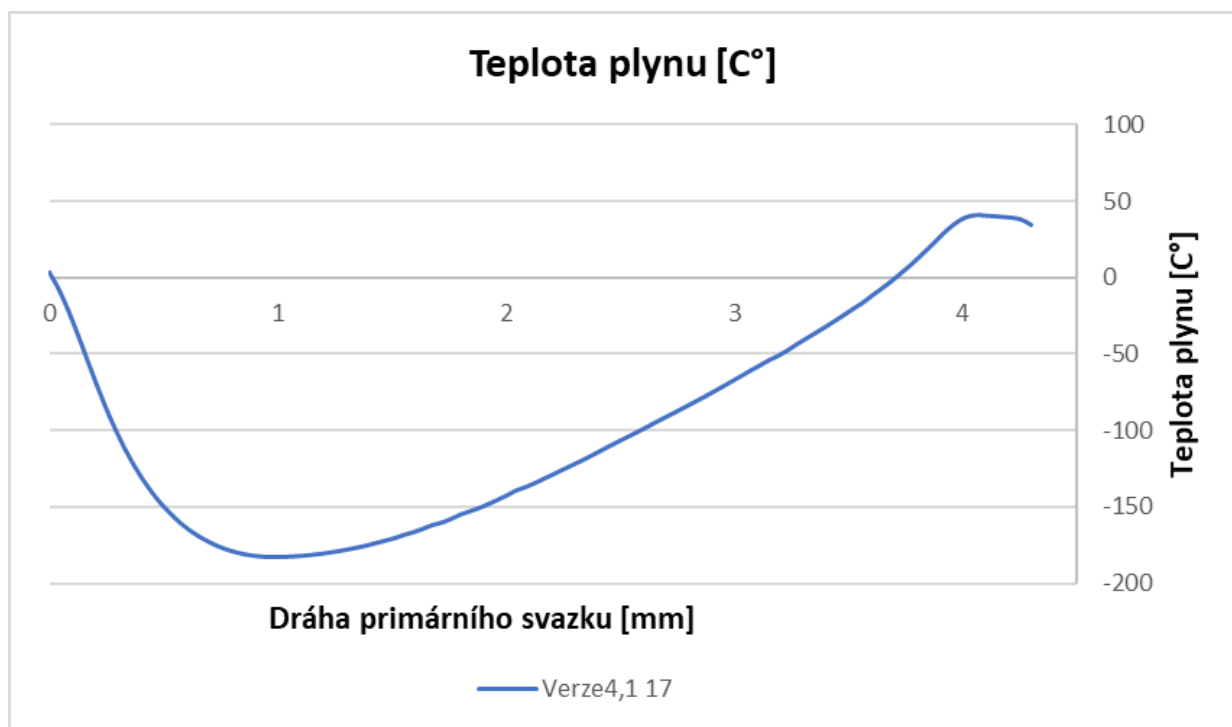


Obr. 10.51: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 17°).

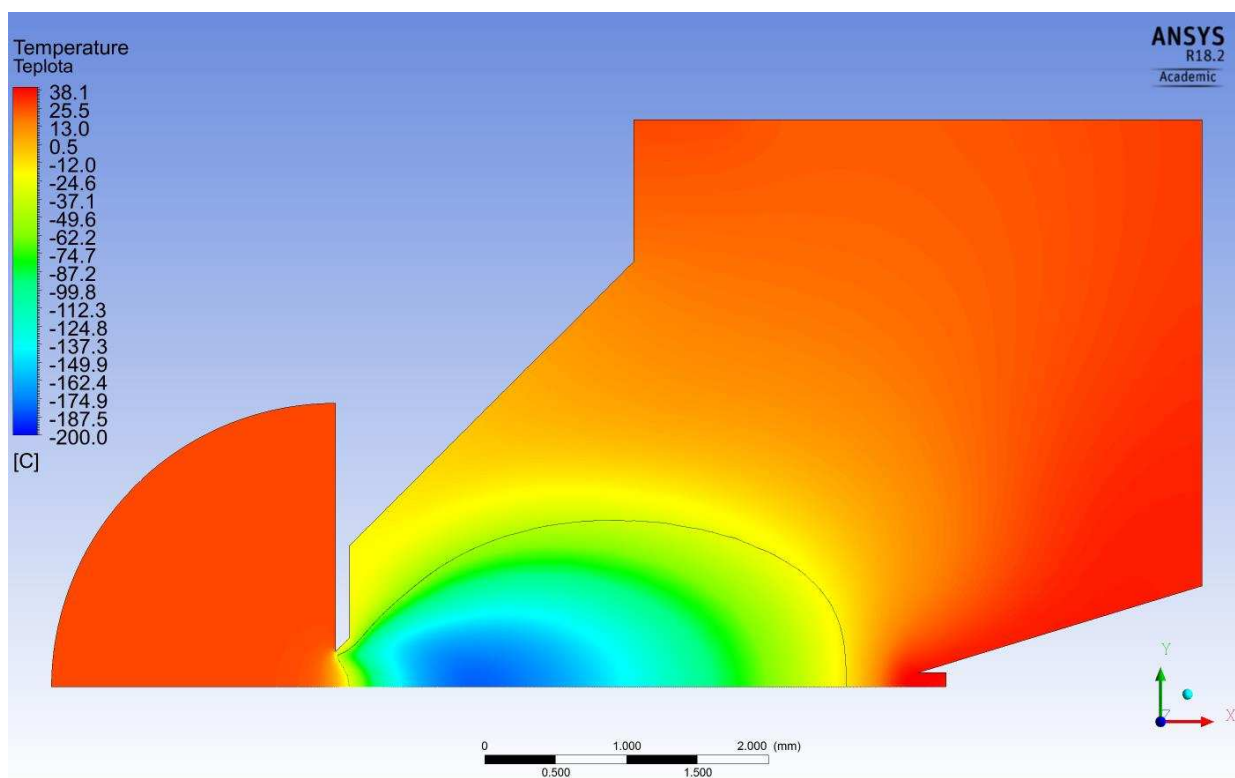


Obr. 10.52: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 4,1 mm 17°).

Varianta 4,1 mm 17° průběh teploty.

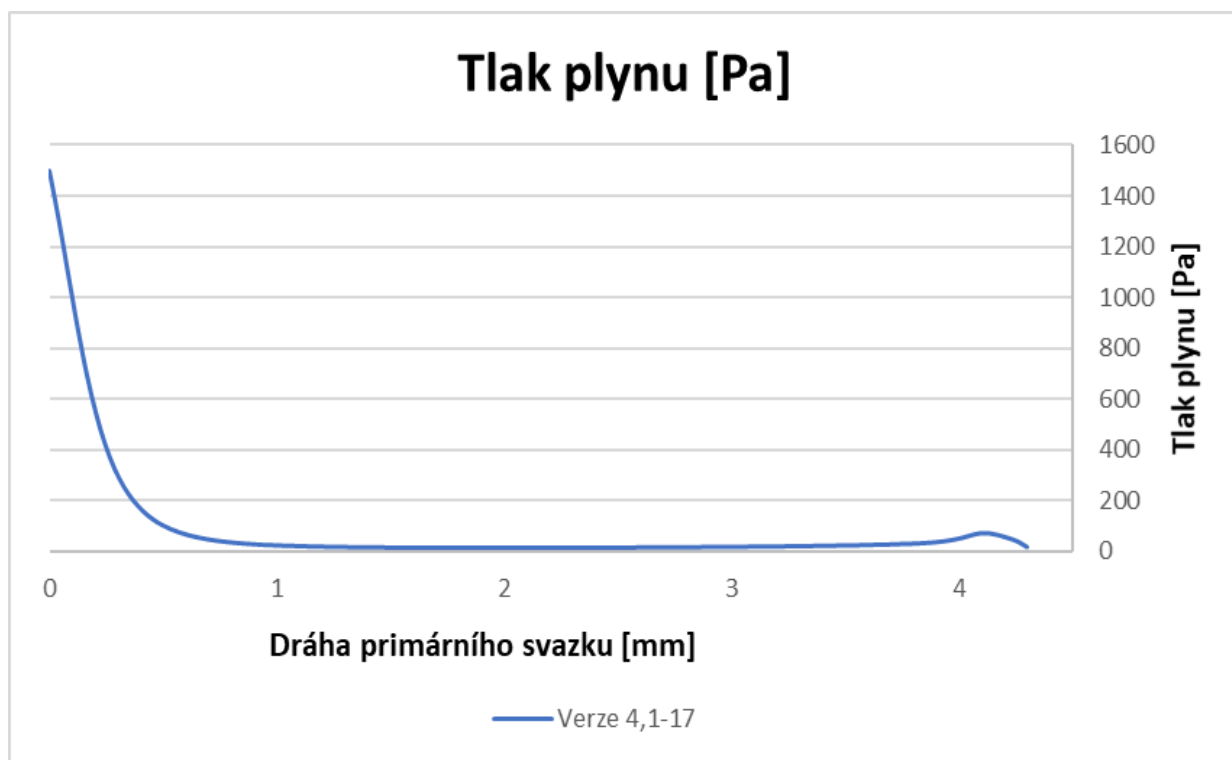


Obr. 10.53: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 17°).

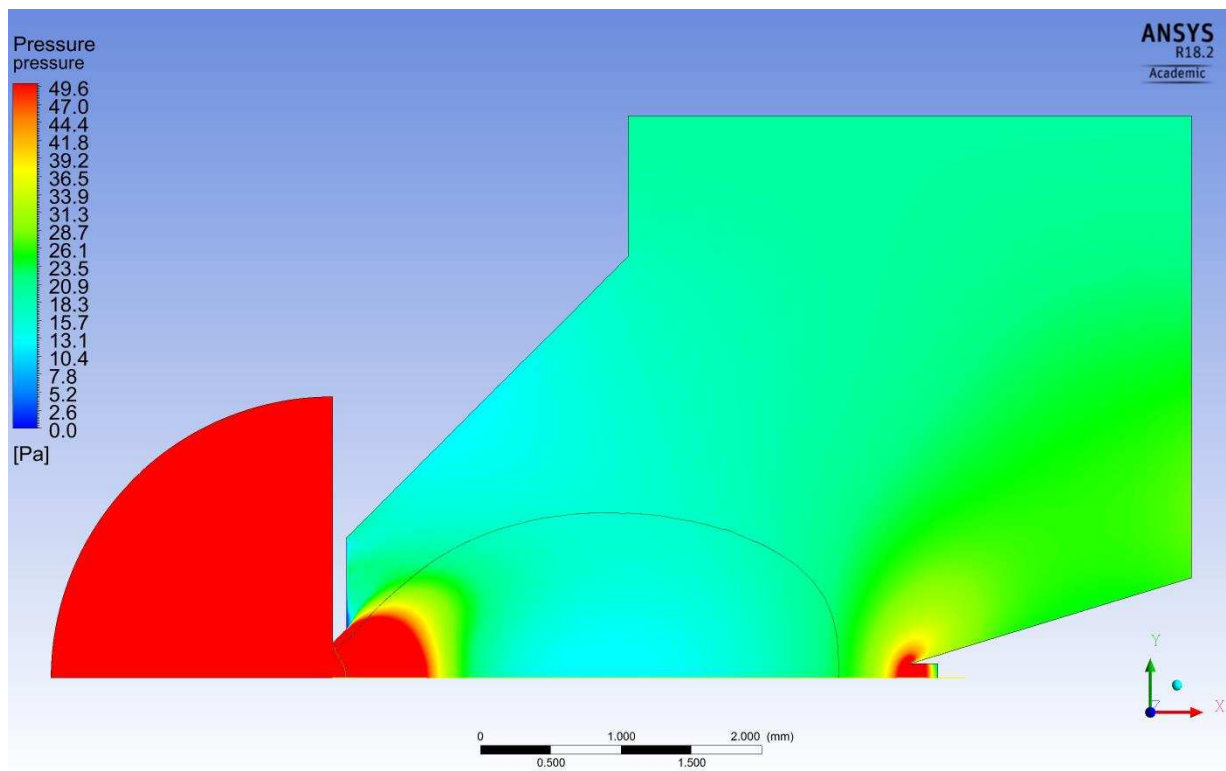


Obr. 10.54: Obrázek – teplota plynu (Varianta 4,1 mm 17°).

Varianta 4,1 mm 17° průběh tlaku.

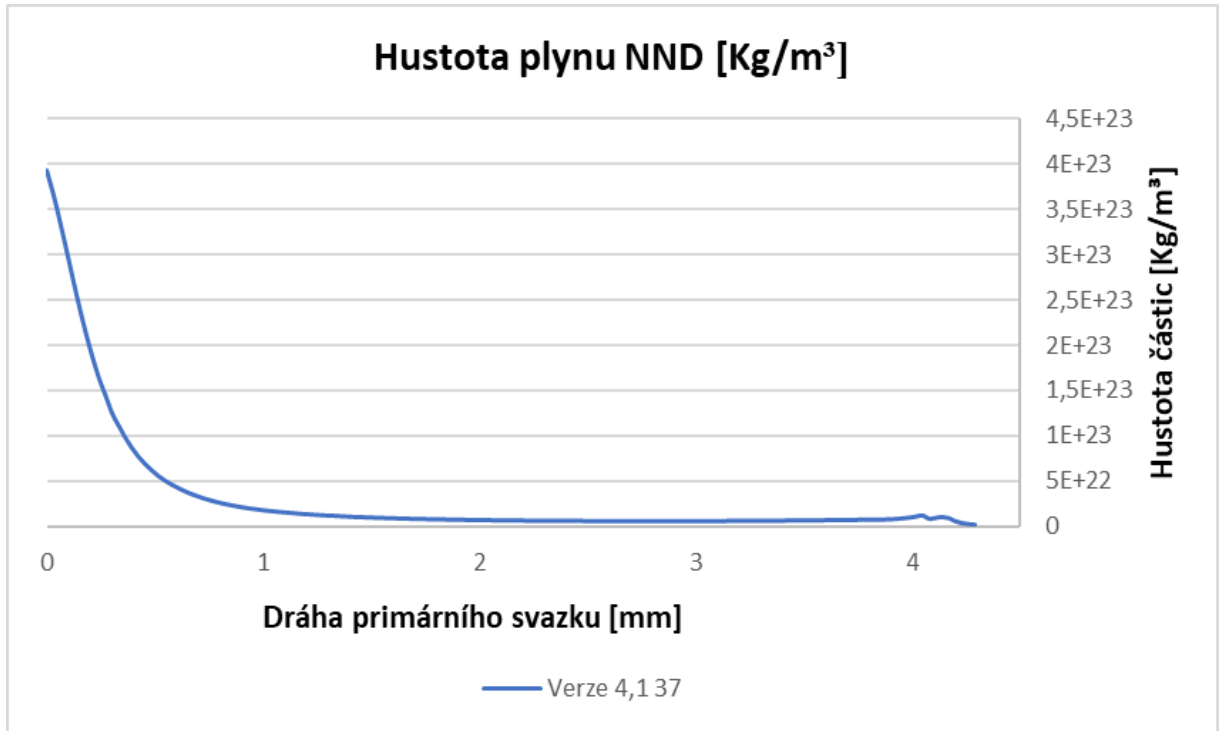


Obr. 10.55: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 17°).

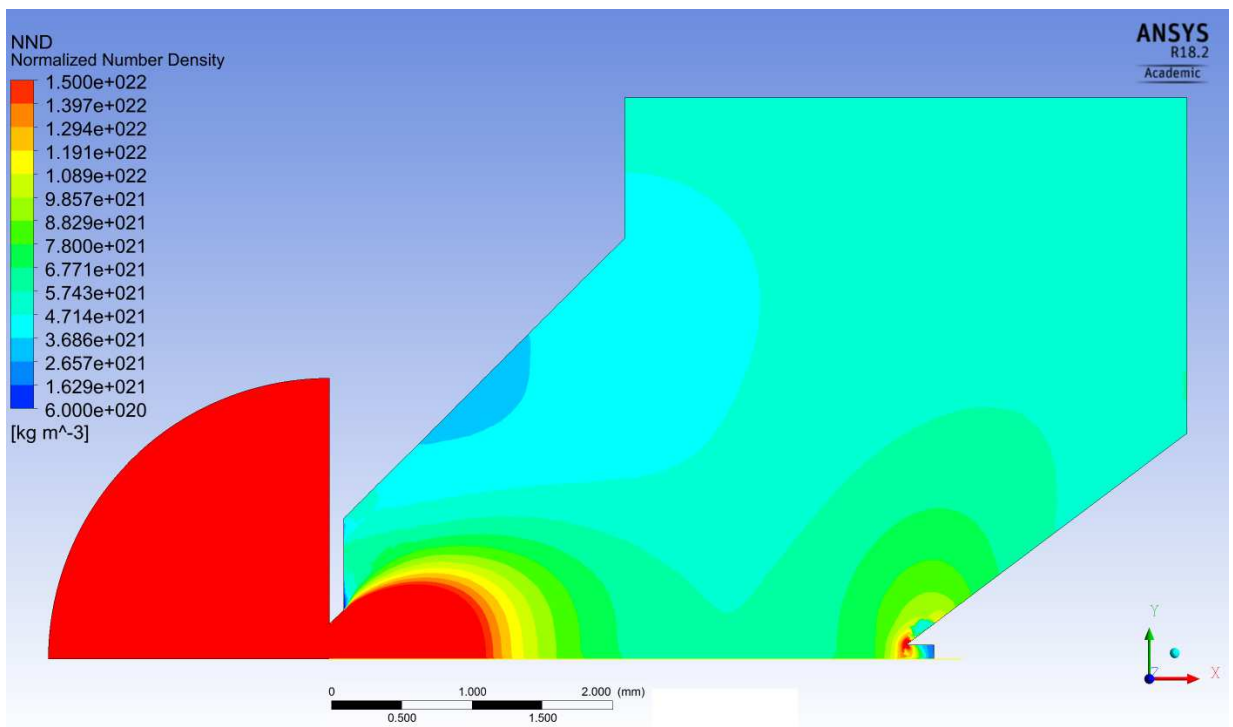


Obr. 10.56: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 4,1 mm 17°).

Varianta 4,1 mm 37° normalizovaná hustota plynu (NND).

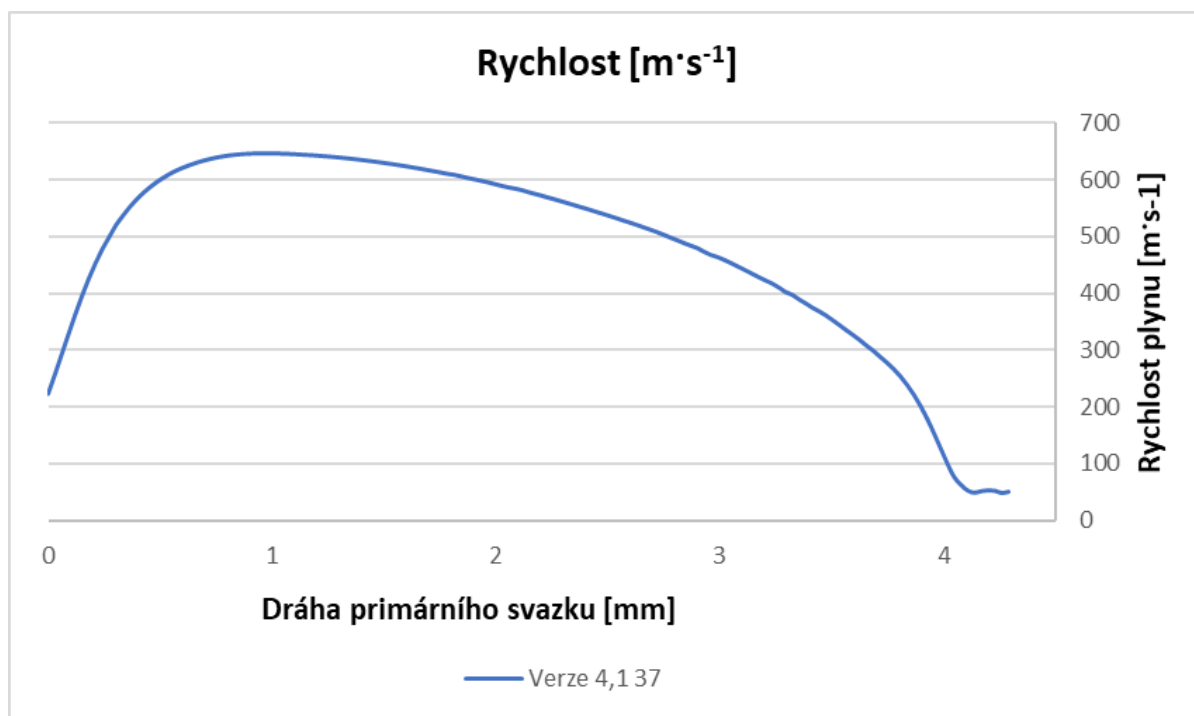


Obr. 10.57: Graf závislosti hustoty plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 37°).

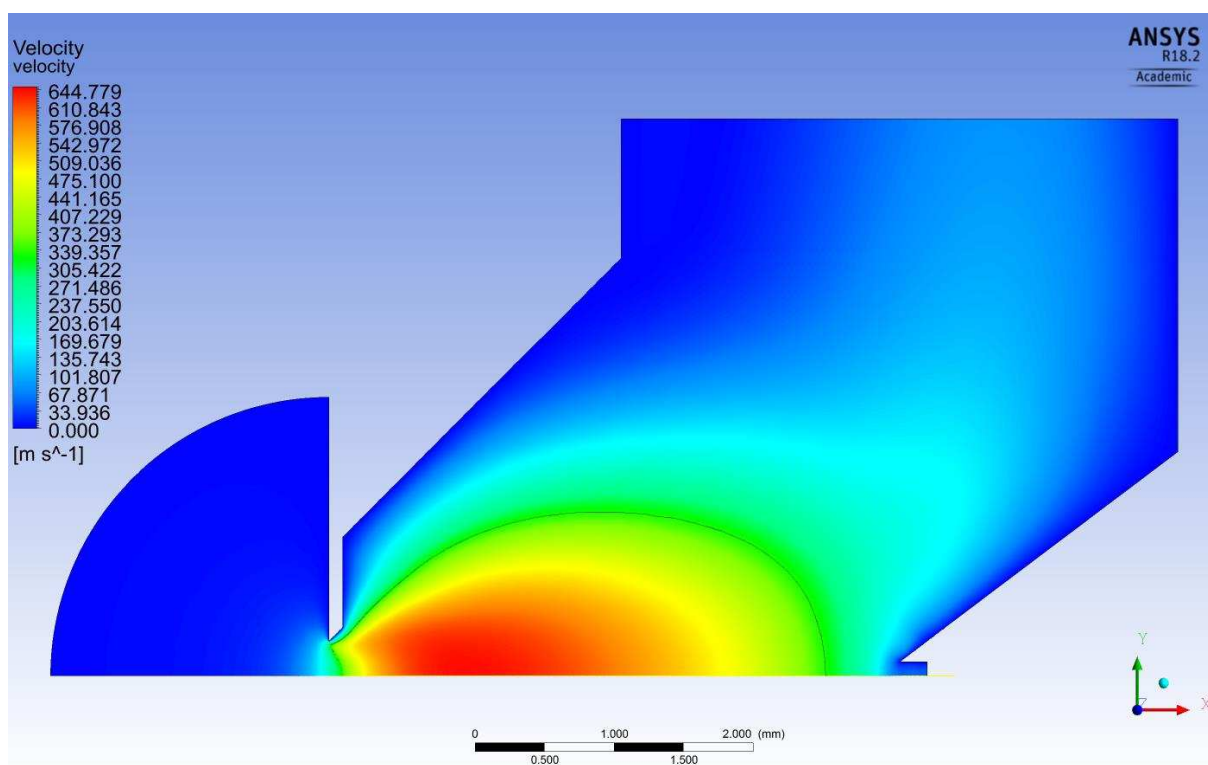


Obr. 10.58: Obrázek – normalizovaná hustota plynu (Varianta 4,1 mm 37°).

Varianta 4,1 mm 37° rychlost proudění.

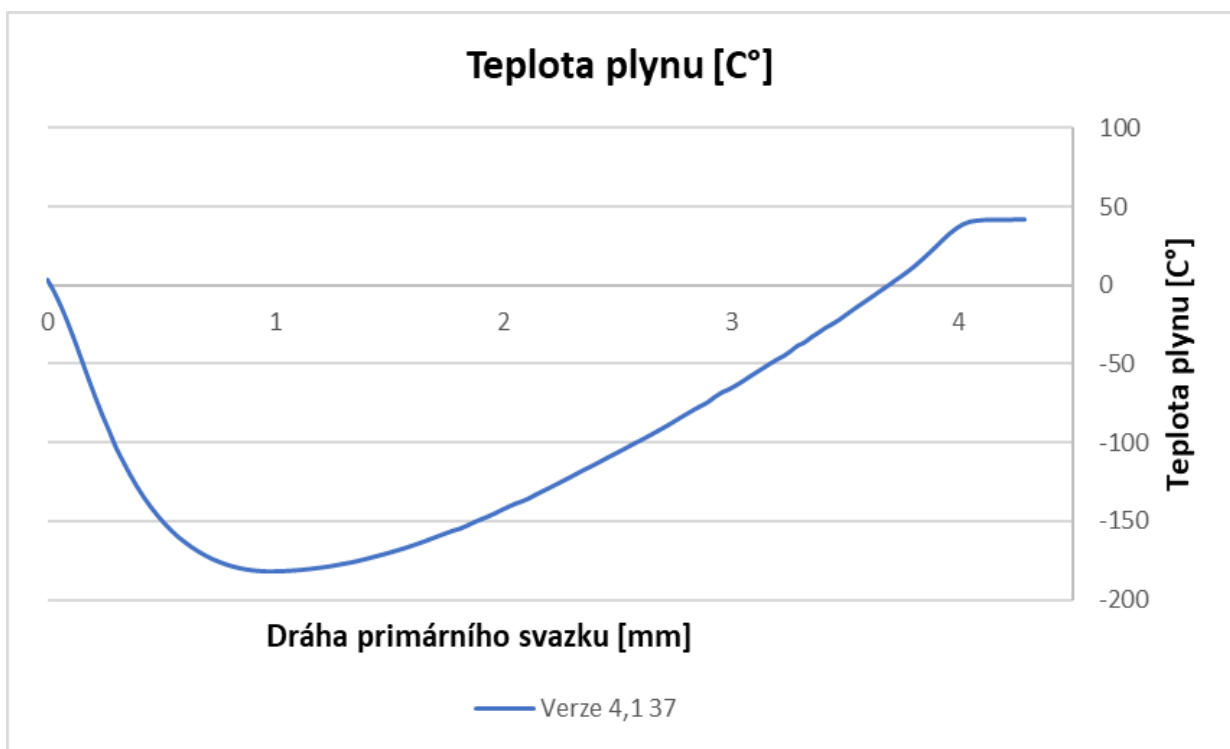


Obr. 10.59: Graf závislosti rychlosti plynu na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 37°).

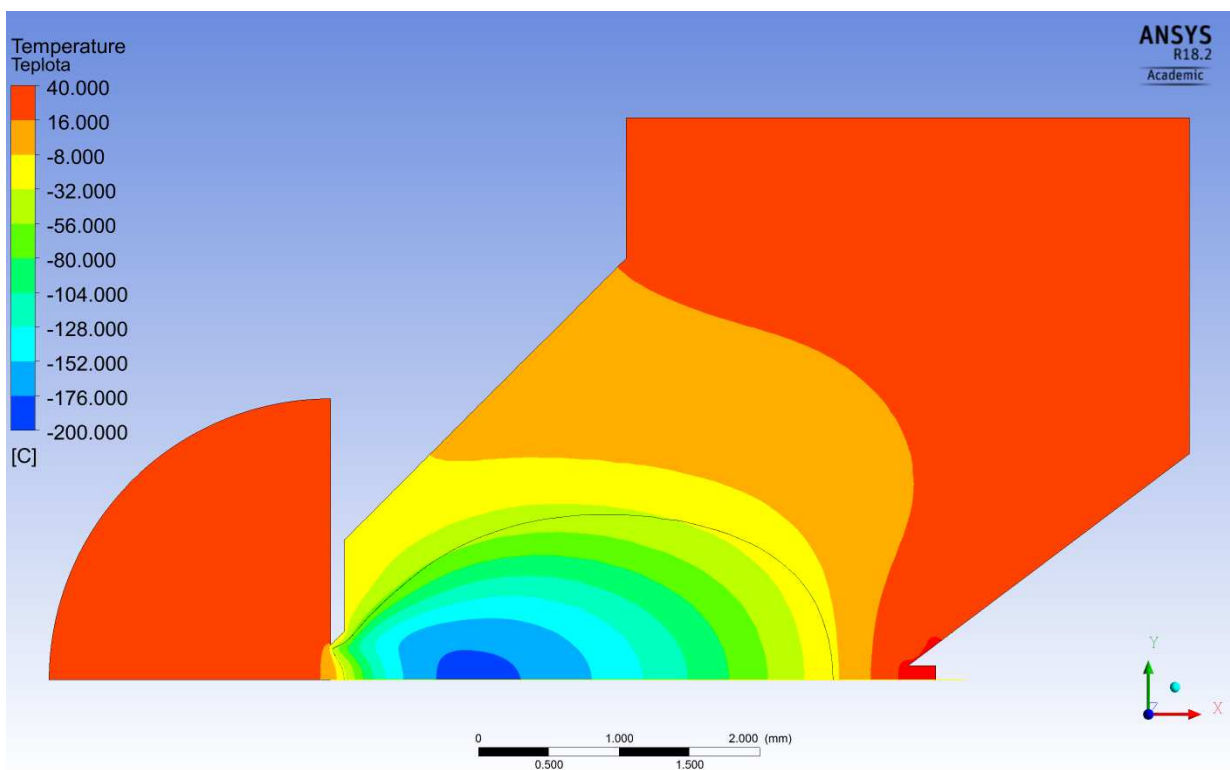


Obr. 10.60: Obrázek – rychlost proudění plynu (Varianta 4,1 mm 37°).

Varianta 4,1 mm 37° průběh teploty.

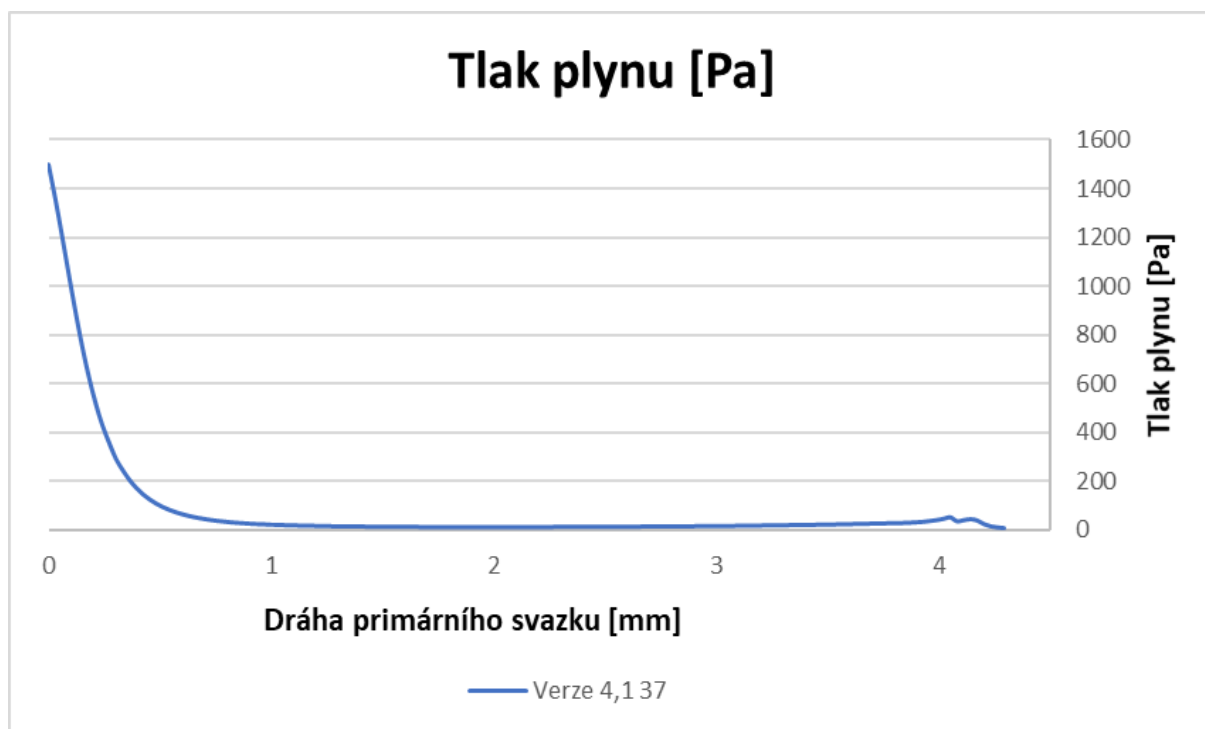


Obr. 10.61: Graf závislosti teploty na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 37°).

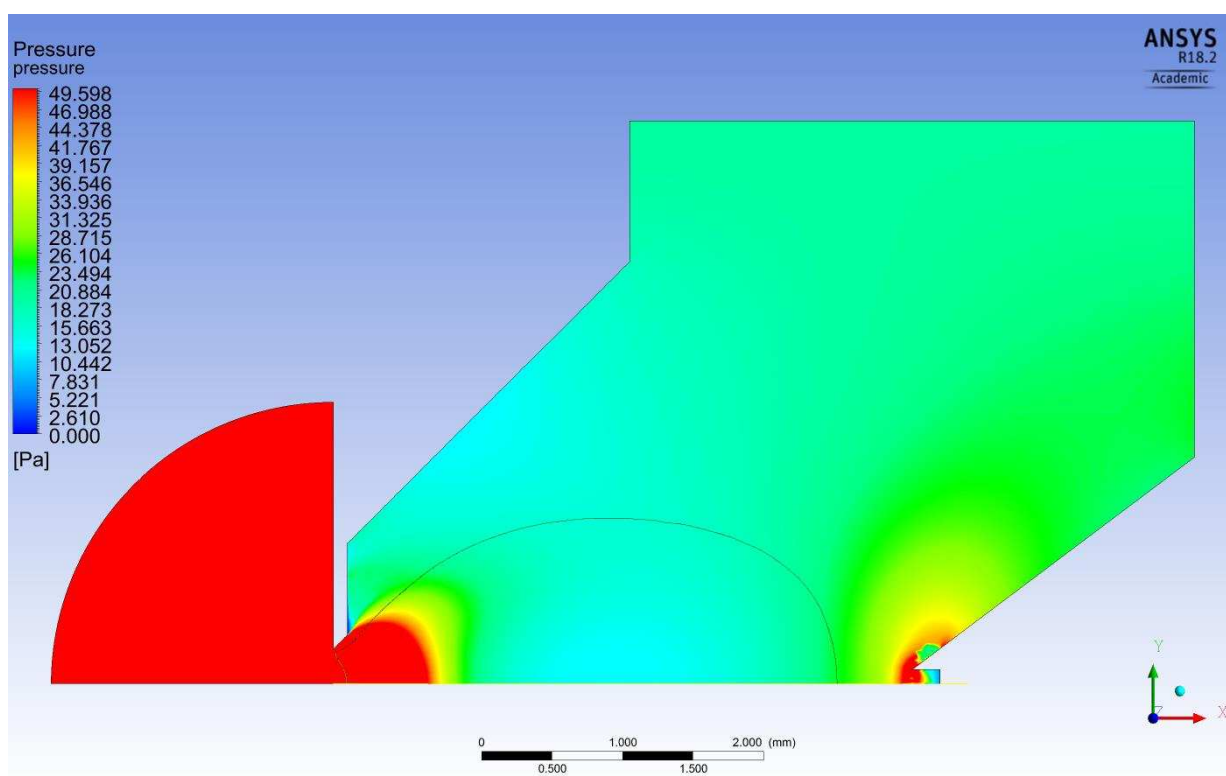


Obr. 10.62: Obrázek – teplota plynu (Varianta 4,1 mm 37°).

Varianta 4,1 mm 37° průběh tlaku.



Obr. 10.63: Graf závislosti tlaku na vzdálenosti od PLA 1 (Varianta 4,1 mm 37°).



Obr. 10.64: Obrázek – průběh tlaku (Varianta 4,1 mm 37°).