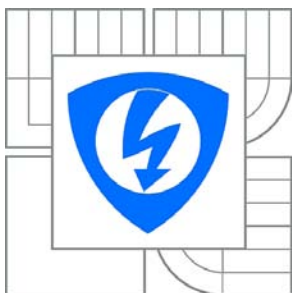




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

VYHODNOCENÍ VLIVU VZDÁLENOSTI CLONEK U SEKUNDÁRNÍHO DETEKTORU NA TLAK V KOMOŘE SCINTILÁTORU S OHLEDEM NA KRITICKÉ PROUDENÍ POMOCÍ SYSTÉMU FLOWWORKS

USING COSMOS FLOWWORKS FOR ANALYSE THE DETECTOR.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAROSLAV HLADÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MAXA, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Jaroslav Hladík

ID: 83755

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Vyhodnocení vlivu vzdálenosti clonek u sekundárního detektoru na tlak v komoře scintilátoru s ohledem na kritické proudění pomocí systému FloWorks

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Pomocí systému Cosmos FloWorks vyhodnotíte vliv vzájemné vzdálenosti clonek u scintilátoru sekundárních elektronů na velikost tlaku v komoře scintilátoru u environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu s ohledem na kritické proudění, které vzniká u clonek s velmi malými otvory.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 27.5.2010

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

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva těchto 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 druhé části, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Jaroslav Hladík
Bytem: Vysoké Mýto, Domoradice 78, 566 01
Narozen/a (datum a místo): 27. 2. 1984, Hradec Králové

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Vyhodnocení vlivu vzdálenosti clonek u sekundárního
detektoru na tlak v komoře scintilátoru s ohledem na kritické
proudění pomocí systému FloWorks

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

2. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
3. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 27. 5. 2010

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Abstrakt:

Předkládaná práce se zabývá problémy proudění plynu v komoře detektoru enviromentálního rastrovacího elektronového mikroskopu. Popisuje základní vlastnosti elektronového mikroskopu a vyhodnocování výstupních signálů. Základním zaměřením práce je návrh umístění clonek v detektoru v prostředí programu SolidWorks 2008. U nich je pomocí systému COSMOS FloWorks provedena analýza čerpání plynu při různých tlacích a vzájemné poloze, která má v daných podmínkách proudění výrazný vliv. Programové prostředí umožňuje 3D modelování a vyhodnocování proudění metodou konečných objemů při zadání základních podmínek řešení, které by se měli co nejvíce přiblížit reálnému chování plynu v reálném detektoru.

Abstract:

This work follow up gas fluxion problems in detector chamber of enviromental scanning electron microscope. Describes basic electron microscopes characteristic and evaluation output signal. Basic focus of this work is proposal placing screening in detector in surroundings programme SolidWorks 2008. There is by the help of system COSMOS FloWorks effected analysis pumping gas with different pressure and mutual position which has significant influence in given fluxion conditions. Programmatic surroundings makes it possible to simulation 3D and evaluation fluxion method final capacities by setting fundamental conditions of solving, which would have been next to real behaviour of gas in real detector.

Klíčová slova:

EREM, proudění plynu, sekundární elektrony, CAD

Keywords:

EREM, fluxion flow, secondary electron, CAD

Bibliografická citace díla:

HLADÍK, J. *Vyhodnocení vlivu vzdálenosti clonek u sekundárního detektoru na tlak v komoře scintilátoru s ohledem na kritické proudění pomocí systému FloWorks*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 134 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. 5. 2010

.....

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. Také děkuji rodičům za podporu při mém mnohaletém studiu.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektrotechnologie

POPISNÝ SOUBOR ZÁVEREČNÉ PRÁCE

Autor: Bc. Jaroslav Hladík

Název závěrečné práce: Vyhodnocení vlivu vzdálenosti clonek u sekundárního detektoru na tlak v komoře scintilátoru s ohledem na kritické proudění pomocí systému FloWorks

Název závěrečné práce ENG: Using Cosmos FloWorks for analyse the detector.

Anotace závěrečné práce: Předkládaná práce se zabývá problémy proudění plynu v komoře detektoru enviromentálního rastrovacího elektronového mikroskopu. Tam je pomocí systému COSMOS FloWorks provedena analýza čerpání plynu při různých tlacích a vzájemné poloze clonek.

Anotace závěrečné práce ENG: This work follow up problems gas fluxion in chamber detector enviromental scanning electron microscope. There's with the help of system COSMOS FloWorks effected analysis pumping gas at different pressure and mutual position screening.

Klíčová slova: EREM, proudění plynu, sekundární elektrony, CAD

Klíčová slova ENG: EREM, fluxion flow, secondary electron, CAD

Typ závěrečné práce: diplomová

Datový formát elektronické verze: formát pdf

Jazyk závěrečné práce: český

Přidělovaný titul: Ing.

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

Škola: Vysoké učení technické v Brně

Fakulta: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Studijní program: Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika

Studijní obor: Elektrotechnická výroba a management

Obsah

1. Úvod	10
2. Elektronová mikroskopie	11
2.1 Definice.....	11
2.2 TEM – Transmisní Elektronová Mikroskopie.....	12
2.3 REM – Rastrovací Elektronová Mikroskopie.....	12
2.3.1 Zobrazovací systém – REM.....	13
2.3.2 Rastrovací proces.....	15
2.3.3 Detekce sekundárních elektronů v REM.....	16
2.3.4 Vychylovací cívky.....	17
2.3.5 Objektiv.....	18
2.3.6 Detektor.....	19
2.3.7 Tvorba obrazu.....	19
2.3.8 Záznam obrazu.....	20
2.3.9 Vakuový systém.....	21
2.3.10 Seřízení REM.....	22
2.3.11 Příprava preparátu – možnosti preparačních technik.....	24
2.4 EREM.....	26
3. Detektor	27
3.1 Scintilační detektor sekundárních elektronů pro EREM.....	28
4. Solid Works	29
4.1 Cosmos FloWorks.....	31
5. Popis modelu proudění tekutiny	32
5.1 Turbulentní proudění.....	32
5.1.1 Teorie turbulence.....	32
5.2 Proudění skutečných kapalin.....	34
5.3 Nestlačitelné a stlačitelné proudění.....	35
5.4 Vakuum.....	36
5.4.1 Dělení a typy vakua.....	36
5.5 Srážky molekul, střední volná dráha.....	37
5.5.1 Závislost rozptylu na počtu interakcí.....	40
6. Vyhodnocení dráhy sekundárních elektronů	43
6.1 Základní rovnice popisující proudění v řešené komoře.....	44
6.2 Zadání podmínek v Cosmos FloWorks pro detektor.....	45
6.2.1 Nastavení sítě.....	45

6.2.2 Nastavení okrajových podmínek.....	48
6.2.3 Nastavení cílů výpočtu.....	50
6.3 Vyhodnocení měření.....	50
7. Závěr	60
8. Seznam použitých zdrojů:	61
Seznam zkratk.....	62
Seznam obrázků.....	63
Příloha A.....	73
Příloha B.....	111

1. Úvod

Vynález rastrovacího elektronového mikroskopu je znám poměrně dlouho. Je uplatňován v mnoha vědeckotechnických oborech a mezi jeho hlavní přednosti je počítána možnost přímého pozorování objektů nepropustných pro elektrony, jednoduchá příprava preparátů, vysoká rozlišovací schopnost a rozsah zvětšení, vynikající hloubka ostrosti a plastičnost obrazu.

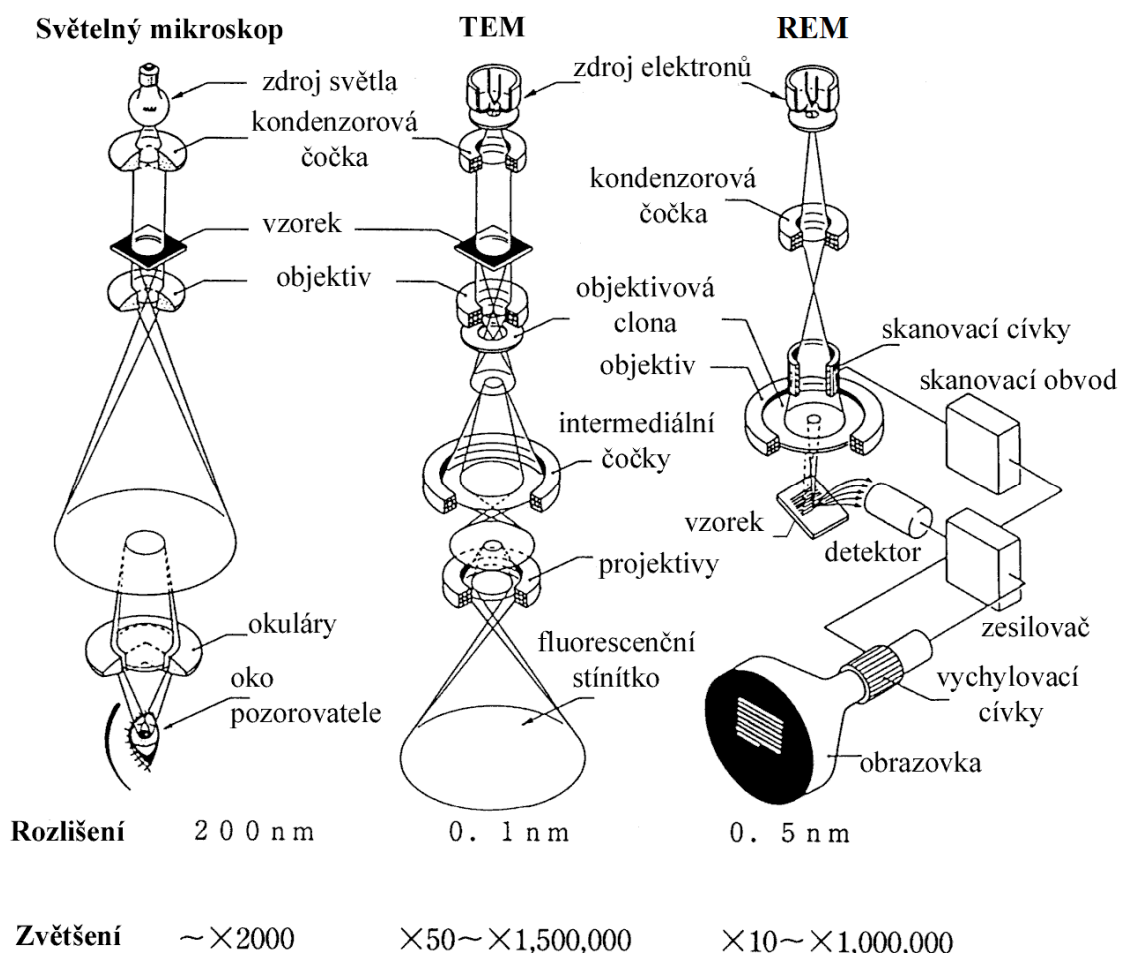
Počátek výzkumů a vývoje rastrovacího elektronového mikroskopu, je kladen do 50. let 20. století. V roce 1965 pak spatřil světlo světa první rastrovací elektronový mikroskop STEREOSCAN. V České republice začíná výroba těchto přístrojů v roce 1976, kdy byl uveden do života rastrovací elektronový mikroskop TESLA BS 300. Všechny tyto přístroje pracují za vysokého vakua 10^{-2} Pa. Tato skutečnost znamená jistou nevýhodu pro pozorování biologických preparátů obsahujících vodu, kdy pro pozorování vzorků v nezměněném tvaru musí být voda vytěsněna a nahrazena jinou látkou. Výrobci rastrovacích elektronových mikroskopů věnují v současnosti značnou pozornost přístrojům, u kterých je možno umístit a pozorovat vzorek při vyšším tlaku. Tyto rastrovací elektronové mikroskopy jsou označovány jako environmentální (EREM). Výhodou těchto přístrojů je možnost pozorovat biologické vzorky a vzorky izolantů bez složité přípravy a dokonce je možno pozorovat preparáty vlhké.

Práce se zaměřuje na detektor environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu a to konkrétně na vyhodnocení vlivu vzdálenosti clonek u scintilačního detektoru tohoto mikroskopu. Model detektoru je navržen v prostředí programu SolidWorks 2008. Vliv rychlosti a tlaku je vyhodnocen pomocí nadstavbového programu COSMOS FloWorks. Je zde porovnáván tlak a rychlost proudění při různých hodnotách tlaku v komoře vzorku a různé vzdálenosti clonek, která značně ovlivňuje proudění mezi nimi.

2. Elektronová mikroskopie

2.1 Definice

Elektronová mikroskopie je metoda umožňující studium mikrostruktury zkoumaných objektů. Mikrostruktura je studována ve vakuu pomocí elektronového svazku, který vzniká emisí elektronů z katody, jež jsou dále urychlovány k anodě. Svazek je fokusován vhodně upraveným elektrickým, magnetickým nebo elektromagnetickým polem tak, aby bylo dosaženo požadovaného zvětšení. Elektronový svazek vytváří obraz interakcemi s pozorovaným preparátem. Podle fyzikální tvorby obrazu dělíme elektronovou mikroskopii na dva základní druhy, transmisní elektronovou mikroskopii a skenovací elektronovou mikroskopii. [5]



Obr. 1. Porovnání konstrukce světelného mikroskopu, transmisního a rastrovacího elektronového mikroskopu

2.2 TEM – Transmisní Elektronová Mikroskopie

Elektrony pronikají pozorovaným preparátem a interakcemi s ním jsou odchylovány od původního směru, jímž se pohyboval hlavní svazek. Většina odchýlených elektronů je pomocí clony ze svazku vyloučena. Obraz je tvořen dopadem převážně neodchýlených elektronů na zobrazovací systém. Zobrazovacím systémem může být stínítko z luminiscenčního materiálu, na kterém se vytvoří kruhový obraz.

Ernest Ruska v letech 1928 - 1933 navrhl elektromagnetickou čočku a roku 1931 sestavil první transmisní elektronový mikroskop, za jehož objev dostal v roce 1986 Nobelovu cenu za fyziku [5]

2.3 REM – Rastrovací Elektronová Mikroskopie

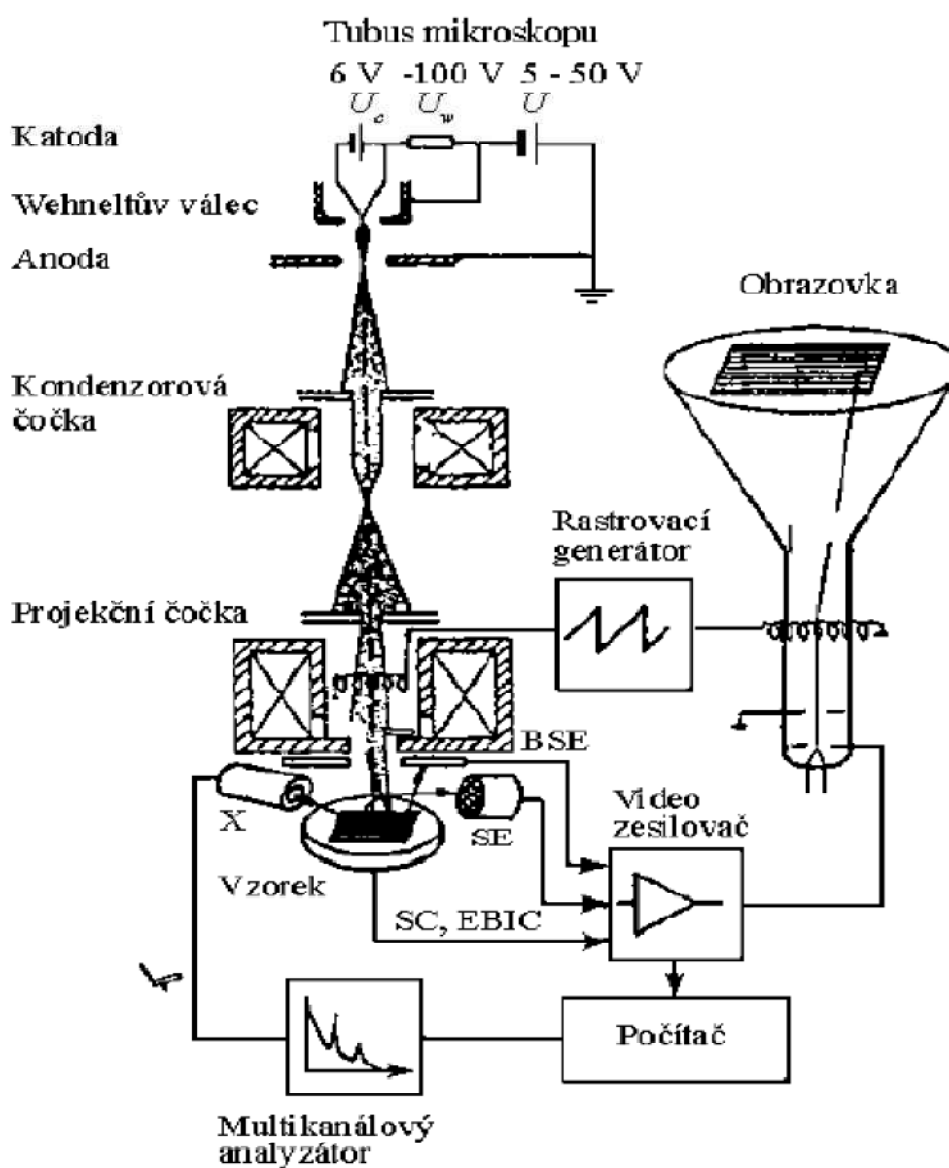
Elektrony dopadají na pozorovaný preparát a interakcí s hmotou vyrazí ze vzorku elektrony. Tyto elektrony jsou pomocí vhodného potenciálu přitahovány na detektory, které vytváří signál upravený pro zpracování v zobrazovacím systému. Zobrazovacím systémem může být obrazovka, na které se vytváří příslušný obraz vzniklý rastrováním elektronového paprsku po snímané ploše. Výsledným obrazem je snímek, který zachycuje povrchovou strukturu preparátu.

Vynález rastrovacího principu se připisuje fyziku Manfred von Ardenne, který jej publikoval roku 1938. Rastrovací princip byl použit v transmisním elektronovém mikroskopu - STEM. Zworykin poprvé použil roku 1942 rastrovací princip ve spojení s detekcí vyražených elektronů pomocí fotonásobiče. [5]

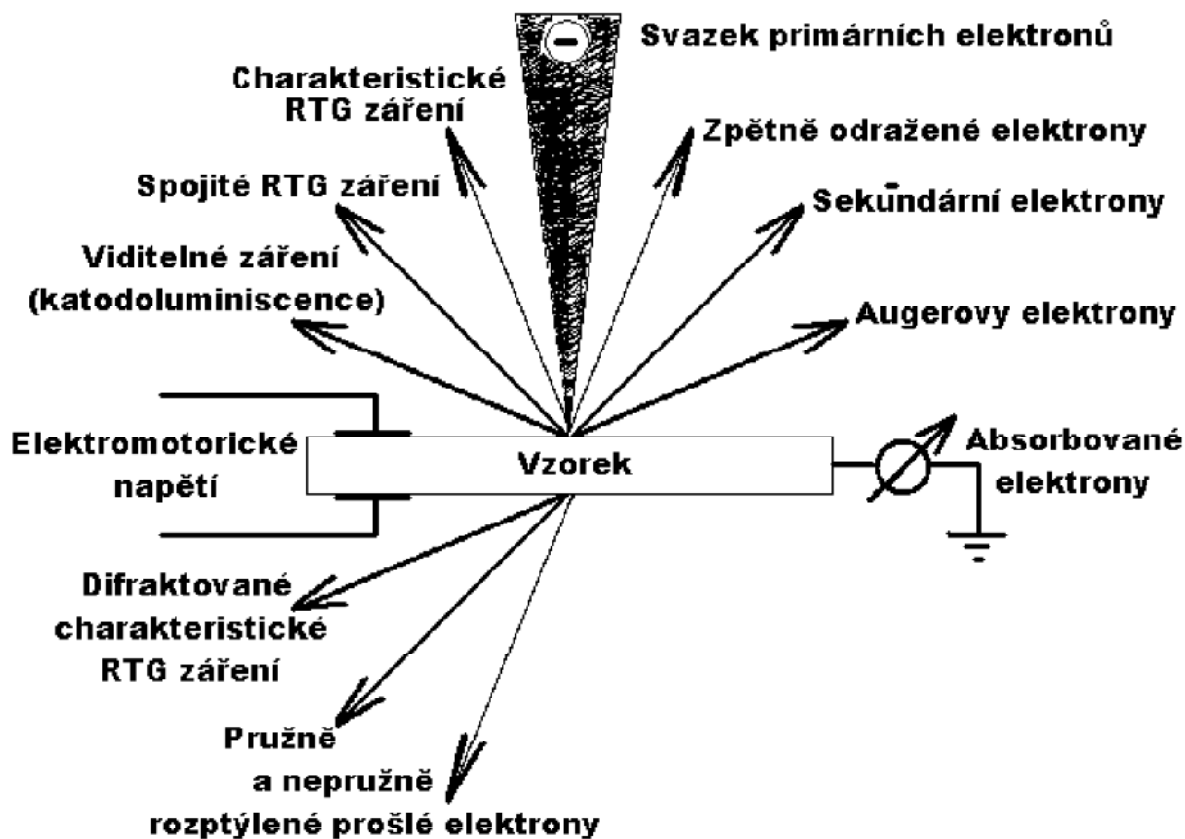
2.3.1 Zobrazovací systém – REM

Rastrovací elektronový mikroskop pracuje s tenkým svazkem elektronů, který dopadá postupně na všechna místa zorného pole. Odražený paprsek se převádí na viditelný obraz. K mikroskopu lze připojit zařízení k analýze složení zkoumaných vzorků.

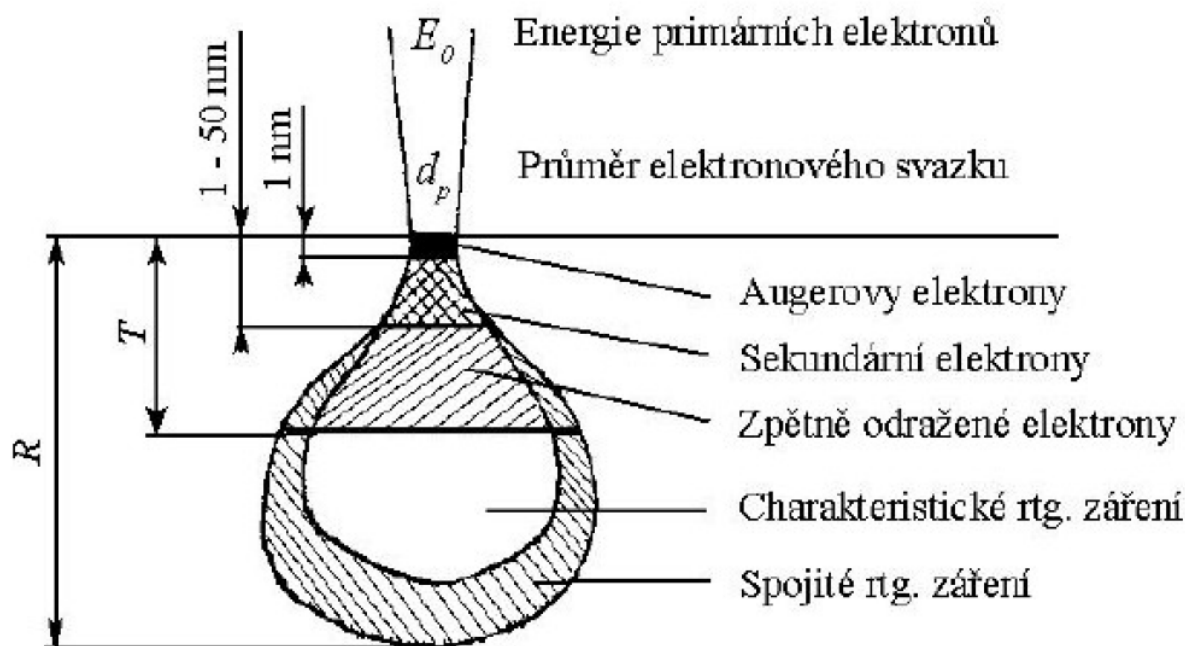
Při interakci elektronů s povrchem sledovaného vzorku vzniká celá řada druhů záření. Tato záření jsou detekována a na základě toho se tvoří různé typy obrazu, které nám poskytují o zkoumaném vzorku různé informace. Nejtypičtější je obraz v sekundárních elektronech a ve zpětně odražených elektronech. Při interakci vznikajícího RTG záření se využívá k analýze chemického složení vzorku v místě dopadu svazku. [1]



Obr. 2. Schéma rastrovacího elektronového mikroskopu [1]



Obr. 3. Signály vznikající při dopadu elektronového svazku na povrch pevné látky [1]



Obr. 4. Velikost objemu, ze kterého se uvolňují některé signály [1]

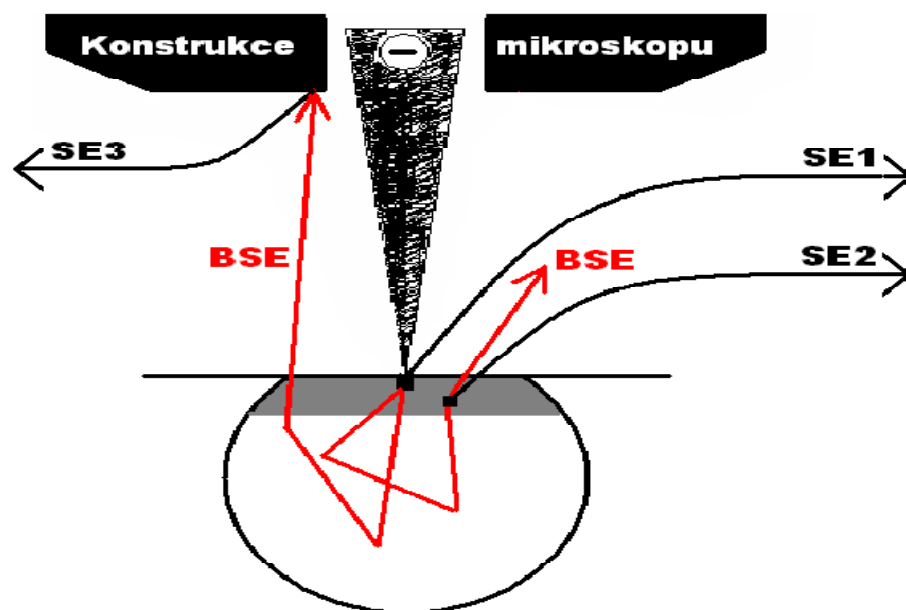
Při dopadu elektronového svazku na povrch materiálů dochází k uvolňování celé řady signálů viz. obrázek 4. Pokud budeme zkoumat materiály větších rozměrů tak elektronový paprsek neprojde látkou jak je vidět na obrázku 3, ale pronikne do látky. Při dopadu elektronového svazku na povrch takovéto látky dojde k pronikání elektronů do látky a jejich následným pružným a nepružným srážkám s částicemi látky.

Na obrázku 4 je znázorněný dopad elektronového paprsku na povrch materiálů a zobrazena hloubka, ze které můžeme daný signál ještě pozorovat. Např. mají-li primární elektrony energii E , která jim umožní proniknout do látky do hloubky $2T$, lze předpokládat, že zpětně odražené elektrony se k povrchu látky jsou schopny dostat z poloviny této maximální vzdálenosti.[5]

2.3.2 Rastrovací proces

V REM jsou elektrony thermodynamicky emitovány z wolframové nebo lanthanumhexaboridové katody a urychleny směrem k anodě, popř. mohou být elektrony emitovány autoemisí (field emission, FE). Wolfram se používá, protože má nejvyšší bod tavení a nejnižší tlak par ze všech materiálů, což umožňuje jeho použití pro emisi elektronů. Elektronový paprsek je nejprve urychlován katodou, čímž získá energii podle potřeby od stovek do statisíců elektronvoltů. Dále je upraven jednou nebo dvěma kondenzorovými čočkami s bodem ohniska od 1nm do 5nm. Paprsek dále prochází vychylovacími cívkami v projekční čočce. Ty vychylují paprsek horizontálně a vertikálně čímž dochází k jeho rastrování po povrchu materiálu. Jakmile paprsek primárních elektronů interaguje se vzorkem, primární elektrony ztrácí energii, takže proniknou pouze do malé vzdálenosti pod povrch. Tato vzdálenost je ovlivněna protonovým číslem vzorku a urychlovacím napětím PE.[6]

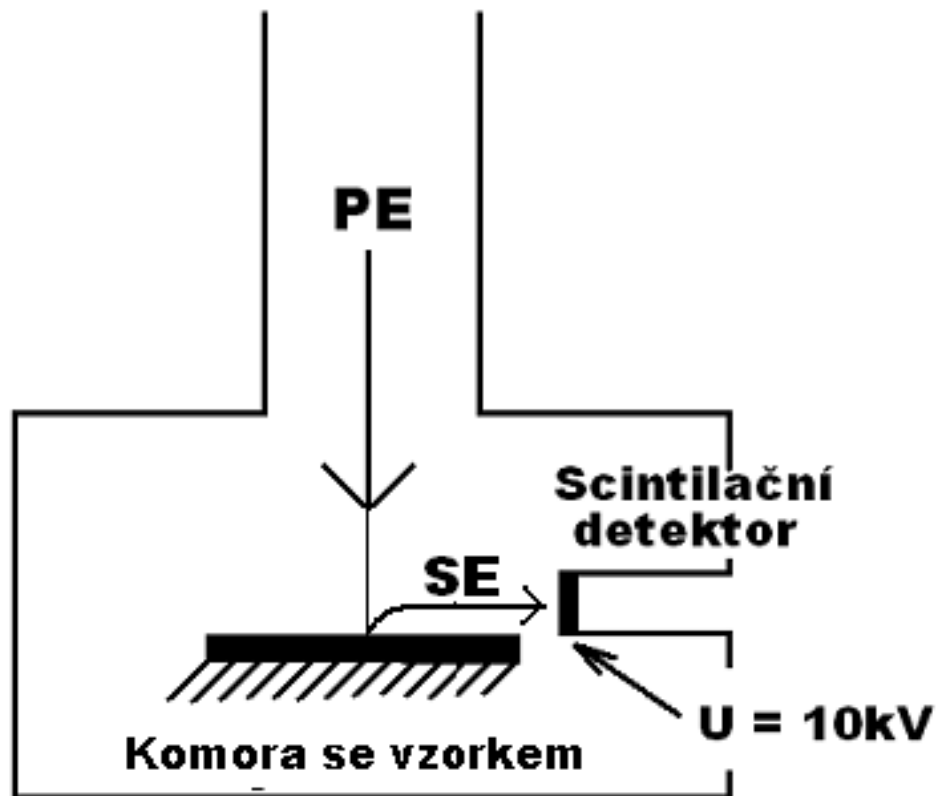
2.3.3 Detekce sekundárních elektronů v REM



Obr. 5. Vznik a typy sekundárních elektronů [1]

Sekundární elektrony jsou dle svého vzniku označovány jako SE1-SE3. Kromě svého původu vzniku viz. obrázek 5 se liší informací, kterou o zkoumaném vzorku přenášejí.

- SE1 Vznikají přesně v místě dopadu PE na povrch vzorku. SE1 mají nejvyšší vypovídající hodnotu a přenášejí topografické informace o vzorku.
- SE2 Vzhledem k nízké energii (do 50 eV), vznikají pouze v tenké vrstvě pod povrchem vzorku (do 50nm). Jejich vznik je zapříčiněn BSE, které při průletu touto vrstvou uvolní SE. SE2 přenáší topografickou a materiálovou informaci.
- SE3 Při uvolňování signálů ze vzorku dopadají některé BSE na konstrukci mikroskopu. Při tom dochází k uvolňování tzv. SE3. SE3 přenáší pouze materiálovou informaci o vzorku a jsou pro pozorování nevhodné. [1]



Obr. 6. Umístění Scintilačního detektoru v komoře mikroskopu

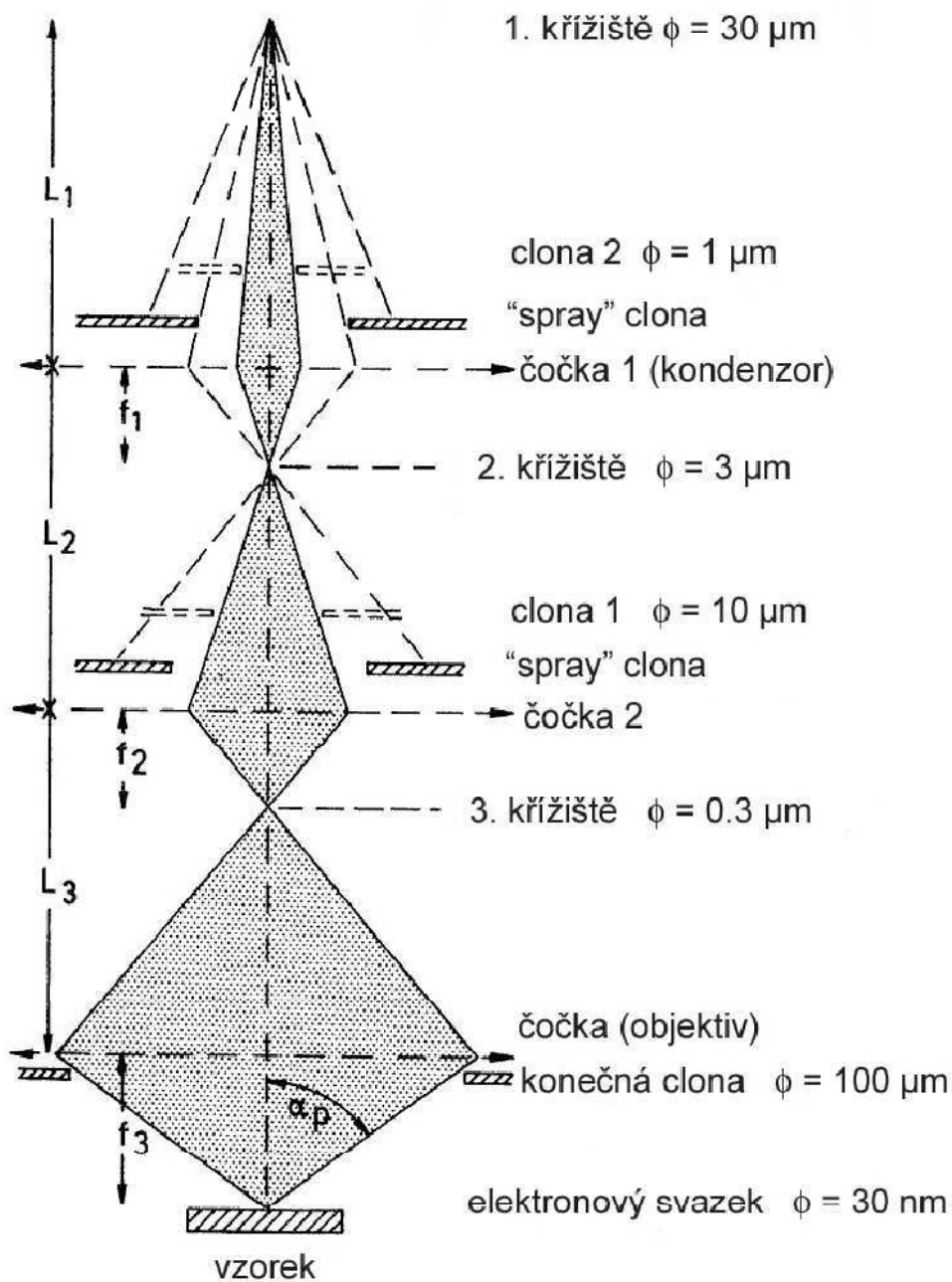
Vzhledem k nízké energii detekovaných SE je nezbytné vhodné umístění Scintilačního detektoru v komoře mikroskopu viz. obrázek 6 tak, aby bylo zachyceno co nejvíce SE. Toho lze dosáhnout i změnou úhlu dopadajících PE. Pokud paprsek PE proniká do vzorku kolmo, tak je vyzařování SE rovnoměrné na všechny strany. Změnou úhlu dopadu PE lze docílit snížení emise SE na jedné straně od paprsku, ale zvýšení na straně druhé (blíže k detektoru). Takto můžeme dostat ve výsledku lepší obraz, než když necháme PE dopadat kolmo na povrch. Při této technice se však sníží hloubka, z níž se emitují SE. [1]

2.3.4 Vychylovací cívky

Svazek primárních elektronů je vychylován ve dvou na sebe kolmých osách. Pro vychylování primárního svazku elektronů se používá pro každý směr dvojice cívek, tím se snižují optické vady zobrazení. Skenování po povrchu preparátu se děje po řádkách, které jsou tvořeny napájením vychylovacích cívek ze zdroje pilového napětí. Frekvence pilového napětí v řádkovém kmitočtu je vyšší než frekvence snímkového kmitočtu. Signál budící vychylovací cívky také synchronizuje tvorbu obrazu v zobrazovací jednotce (obrazovka, monitor). [6]

2.3.5 Objektiv

Objektiv je nejdůležitější částí zobrazovací soustavy REM, na jeho vlastnostech závisí dosažitelná rozlišovací schopnost. Omezení rozlišovací schopnosti je dáno především velikostí sférické vady, která určuje minimální průměr křížště. Sférická vada, klesá se zmenšující ohniskovou vzdáleností objektivové čočky a maximální úhlovou aperturou objektivu danou průměrem objektivové clony. [6]



Obr. 7. Paprskový diagram elektronově-optické soustavy REM [2]

Změnou průměru objektivové clony se mění proudová hustota, proto obvykle SEM pracují pouze s jednou velikostí průměru clony určenou výrobcem (30 μm pro JEOL JSM-7401F, k seřizovacím účelům je možno použít clony 50, 70, 110, 1000 μm).

2.3.6 Detektor

Pro detekci elektronů je nejčastěji používáno scintilačních počítačů s fotonásobičem označovaných jako ET podle Everharta a Thornleye, kteří je zkonstruovali. Detektor se skládá ze scintilačního krystalu nebo fluorescenční látky, jež vytvářejí dopadem elektronů fotony viditelného světla. Takto vzniklé fotony jsou vedeny světlovodem na fotokatodu, z které jsou vnějším fotoelektrickým jevem uvolňovány elektrony. Elektrony jsou urychlovány k elektrodě – dynodě, na níž je kladný potenciál. Dopadem elektronů na dynodu jsou vyraženy sekundární elektrony, které postupují k další dynodě, jež má vyšší potenciál. Z poslední elektrody – anody je přes oddělovací kondenzátor odebírán detekovaný proud. [6]

2.3.7 Tvorba obrazu

Získání obrazu v rastrovacím elektronovém mikroskopu je založeno na interakci primárního svazku s povrchem prohlíženého objektu. Každý produkt této interakce přináší informaci o fyzikálních a chemických vlastnostech zkoumaného objektu, které lze využít, pokud je mikroskop vybaven detekčním čidlem, které dokáže účinně a selektivně tento signál zachytit.

Interakce mezi primárními elektrony a atomy preparátu můžeme stejně jako u TEM rozdělit do dvou skupin: elastické kolize, které mají na svědomí vznik zpětně odražených elektronů a neelastické, při kterých dochází k předávání energie primárních elektronů atomům vzorku a následně k uvolnění sekundárních a Augerových elektronů, rtg. záření a katodoluminiscenci. Energie primárních elektronů, daná použitým urychlovacím napětím, ovlivňuje tvar excitačního objemu, který se s klesající hodnotou U stává mělčí a oblast, ze které se uvolňují sekundární elektrony pak neodpovídá průměru svazku primárních elektronů. Toto zvětšení oblasti, ze které se uvolňují sekundární elektrony, je další příčinou snížení rozlišovací schopnosti mikroskopu při poklesu urychlovacího napětí. Na hloubku penetrace primárních elektronů má dále vliv i složení preparátu, je zřejmé, že preparát tvořený těžšími prvky (např. kovy) bude produkovat více odražených elektronů než preparát tvořený lehkými prvky a hloubka průniku primárních elektronů bude menší.

K zobrazení povrchu preparátu se v REM využívají sekundární elektrony. Od zpětně odražených elektronů se odlišují svojí nízkou energií a rychlostí. Aby byly schopné dostat se k detektoru sekundárních elektronů, je třeba je přitáhnout mřížkou s předpětím okolo 10 kV. Jas paprsku synchronně rastrujícího po obrazovce je přímo úměrný signálu z detektoru sekundárních elektronů. Vzhledem k nízké energii sekundárních elektronů se z vyvýšenin na povrchu preparátu dostane do detektoru více sekundárních elektronů a výsledkem je vyšší intenzita signálu z detektoru a tedy světlé místo na obrazovce. Z prohlubenin je tomu naopak. Tím je získán topografický kontrast, který umožňuje zobrazit v mnohonásobném zvětšení povrch vzorku.

Produkce odražených elektronů, závisí na středním atomovém čísle vzorku. Z toho plyne, že jako světlé oblasti se budou na obrazovce jevit místa s vyšším středním atomovým číslem, tedy ty tvořené těžšími prvky. Naopak, oblasti tvořené lehkými prvky se budou jevit jako tmavá místa. Obraz v odražených elektronech je schopen odlišit oblasti s různým prvkovým složením.

Prohlížení preparátu v REM je často doprovázeno rušivými jevy. K nim patří především nabíjení povrchu preparátu, na který dopadají záporně nabitě primární elektrony. K tomuto jevu dochází v případě, kdy povrch není dostatečně elektricky vodivý. Důsledkem je odklon primárního svazku elektronů, které zahltí detektor sekundárních elektronů. Na obrazovce pak můžeme pozorovat v závislosti na intenzitě nabíjení bílé řádky, v horších případech i celkovou pulzaci obrazu. Protože biologické objekty se ve vysokovakuovém REM musíme stejně jako v případě TEM pozorovat vysušené (elektricky nevodivé), musí se před vlastním pozorováním potáhnout tenkou vrstvičkou kovu s dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí. Ta zajistí odvod záporného náboje a tepla, ve které se přemění většina energie urychlených primárních elektronů. Teplo, které lokálně ve vzorku uvolňují primární elektrony, je velké a projevuje se např. kontaminací skenované oblasti, pohybem preparátu pod svazkem nebo přímo jeho poškozením, např. popraskáním.[6]

2.3.8 Záznam obrazu

Tradičním výstupem z REM je fotografie. Kromě pozorovací obrazovky jsou tyto mikroskopy vybaveny fotomonitorom s jemnějším zrnem, ke kterému je připojen fotoaparát. K vytvoření obrazu na fotografickém filmu se používají fotony, takže lze použít zcela normální černobílý fotografický materiál.

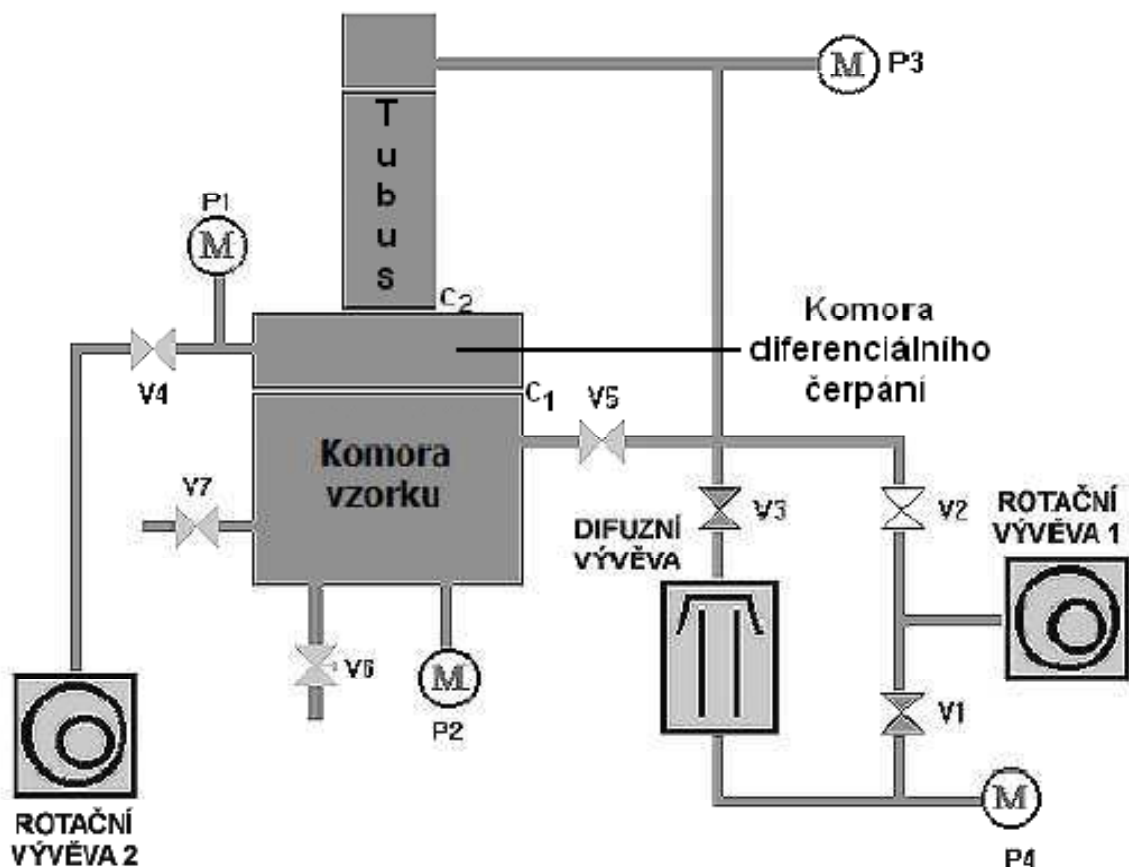
Nové mikroskopy se standardně dodávají s digitálním záznamem obrazu a fotografický záznam je již dodáván pouze na přání zákazníka. Vzhledem k tomu, že signál v REM, který nese obrazovou informaci, má v sobě i informaci o pozici, jeho digitalizace

není tak problematická a nevyžaduje tak náročná zařízení jako v případě TEM. Digitální obraz pak nabízí řadu možností jeho úpravy. Software používaný pro akvizici obrazu je součástí balíku programů, které řídí a kontrolují provoz mikroskopu.[5]

2.3.9 Vakuový systém

Celý vnitřní prostor tubusu a preparátové komory je v REM vyčerpán na hodnotu vakua v závislosti na typu použitého elektronového zdroje. V případě přímo žhavené wolframové katody to znamená 10^{-2} až 10^{-3} Pa. K získání a udržení této hodnoty vakua obvykle postačí dvoustupňový čerpací systém, tvořený rotační a difúzní pumpou. Protože se při práci s REM často vyměňují preparáty v komoře mikroskopu, je výhodné pokud má mikroskop vakuovou propust', která umožní výměnu bez zavzdušnění celé preparátové komory. Čerpání i zavzdušňování mikroskopu nebo jeho částí při výměně preparátu, katody nebo výměně clon provádí a kontroluje u současných přístrojů vakuová automatika.

V posledních deseti letech se na trhu objevily tzv. nízkovakuové a environmentální rastrovací elektronové mikroskopy, ve kterých je v preparátové komoře tlak umožňující pozorovat vzorky s obsahem vody 70, respektive až 90 %. Vnitřní prostor těchto mikroskopů je rozdělen do několika navzájem oddělených komor viz. obrázek 8. Ty jsou čerpány na různé hodnoty tlaku, který klesá směrem od elektronového děla ke komoře preparátů. V nízkovakuových mikroskopech se potom k tvorbě obrazu používají odražené elektrony, které mají dostatečnou energii a rychlost, aby v zaplněném prostředí preparátové komory dorazily k detektoru. V environmentálním REM se využívá k tvorbě obrazu sekundárních i odražených elektronů, které ionizují molekuly plynu v prostoru mezi vzorkem a detektorem a elektrony uvolněné při ionizaci přenáší signál dál do detektoru sekundárních elektronů. Cenou za možnost prohlížet zavodněné preparáty je snížená rozlišovací schopnost. [5]

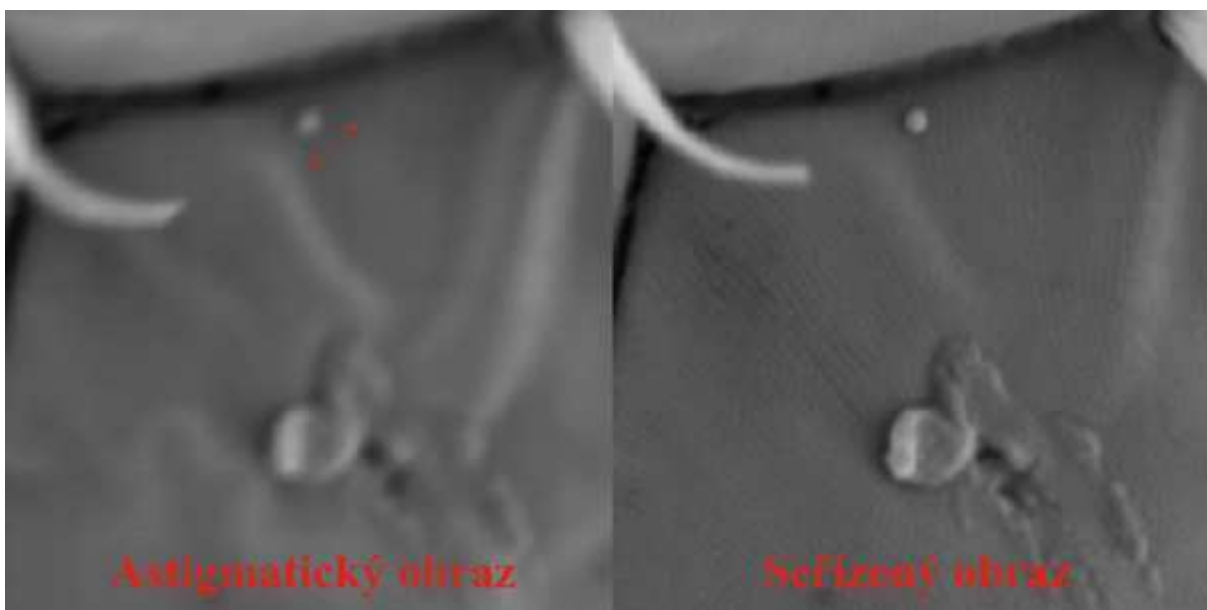


Obr. 8. Vakuový systém EREM
M: Tlakové měrky, V1 - V7: Vakuové ventily [1]

2.3.10 Seřízení REM

Seřízení skenovacího elektronového mikroskopu spočívá v centrování objektivové clony podle pokynů výrobce. Necentrovaná objektivová clona se projevuje posunem obrazu při změně ostření.

Objektivový astigmatismus se seřizuje průběžně během práce s mikroskopem, protože jej ovlivňuje elektrostatické pole vznikající koncentrováním náboje na preparátu a s pohybem preparátu u něj dochází ke značným změnám. Objektivový astigmatismus se projevuje tak, že při rozostřování obrazu se objekty „natahují“ elipticky a ne kruhově, jak ukazuje obrázek 9.



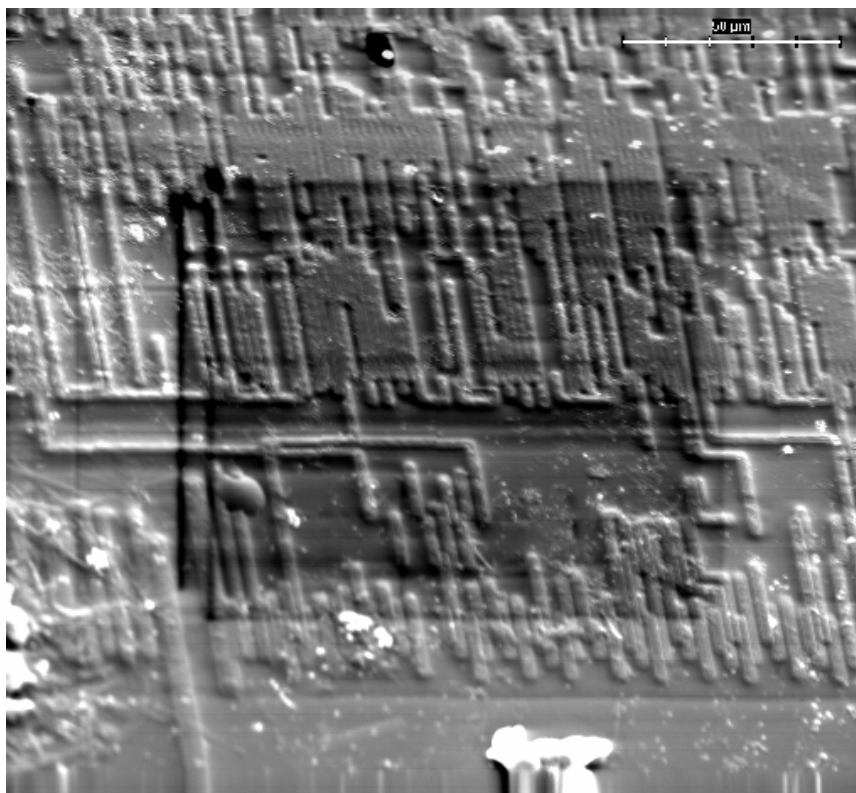
Obr. 9. Povrch oka mouchy[5]

Jak bylo naznačeno, v REM může docházet k hromadění prostorového náboje na povrchu preparátu, protože povrch není natolik vodivý, aby odvedl veškerý náboj. Nahromadění náboje se ve výsledném obrazu projevuje bílými řádky nebo posuvem části obrazu, jak je vidět na obrázku 10. [5]



Obr. 10. Prostorový náboj – končetina kloše [5]

Velká proudová hustota soustředěná do malé plochy může ohřevem poškodit preparát tak, že vznikne na jeho povrchu patrná stopa po skenování elektronovým svazkem viz. obrázek 11.



Obr. 11. Poškození povrchu elektronovým svazkem – povrch elektronického čipu [5]

2.3.11 Příprava preparátu – možnosti preparačních technik

U prozařovací elektronové mikroskopie je celková tloušťka preparátu omezena na tloušťku do asi jednoho sta nanometrů ($0,1 \mu\text{m}$), lépe však ještě menší. Namísto podložního skla můžeme použít tenký napařený uhlíkový film, který i s preparátem nepřesahuje tuto tloušťku. Uložení preparátu na nosné síťce s mikroskopickými otvory je tak nutností (celkový průměr síťky 3 mm, typický počet otvorů v síťce může být kolem tisíce). Pozorovat objekt je pak možné jen v oblastech otvorů v síťce.

U technik zobrazujících povrch musíme respektovat skutečnost, že pozorujeme převážně jen tento povrch. U takového preparátu většinou nezáleží na velikosti objektu, omezením je jen velikost pracovního prostoru mikroskopického zařízení; velikost preparátu se pak dá snadno upravit seříznutím či odříznutím nedůležitých částí objektu. Někdy je třeba pamatovat na zajištění dostatečné rovinnosti objektu (např. u mikroskopie atomárních sil, nebo vzhledem k malé hloubce ostroty u světelné odrazové mikroskopie).

Preparace práškových materiálů, disperzí, nebo dostatečně tenkých filmů je nejjednodušší ze všech preparačních technik. Stačí je nanést na patřičnou podložku. Avšak pro prozařovací elektronovou mikroskopii může i toto být dosti obtížný problém.

U objemnějších objektů (bloků) je často třeba odkrýt strukturu vnitřku. Zde pak máme v zásadě tři možnosti preparace: řez, lom, nebo lept. Příprava tenkých řezů pro světelnou mikroskopii nebo ultratenkých řezů pro prozařovací elektronovou mikroskopii je samostatnou a poměrně obtížnou problematikou. Menší objekty, zvláště nepravidelné, je často třeba uzpůsobit pro řezání tím, že se zalijí do pryskyřice o vhodných vlastnostech. Ultratenké řezy (tlusté kolem 50 nm) zahrnují plochu kolem $0,01 \text{ mm}^2$ až $0,02 \text{ mm}^2$ (přibližně obdélníkový řez o stranách kolem 0,1 mm a 0,1 až 0,2 mm). Uvědomíme-li si, že tloušťka běžného kancelářského papíru je 0,1 mm a že toto je zároveň mez rozlišení neozbrojeného oka, je ihned zřejmé, že manipulace s preparátem není jednoduchá a je k ní třeba dobrého mikroskopu.

Druhou možností odkrýtí vnitřku vzorku pro pozorování jeho struktury je příprava lomových ploch. Není to metoda obecná a kdykoliv použitelná, ale často jediná možná. Zde je třeba zaručit, abychom dokázali eliminovat vliv deformačních procesů, které lomu vždy předcházejí: buď je omezit na minimum (lom při velmi nízkých teplotách, např. v kapalném dusíku), nebo při pozorování lomové plochy umět rozeznat struktury vzniklé deformací od původní struktury objektu.

Třetí možností odkrýtí vnitřku vzorku je lept. Odstranění povrchové vrstvy nebo selektivní odstranění snadněji odstranitelných částí objektu se může provádět fyzikálními nebo chemickými technikami. Z fyzikálních technik se nejčastěji používá procesů vznikajících při výboji ve vakuu (vysokonapět'ovém nebo vysokofrekvenčním). Mechanismy leptu jsou komplikované, mnohdy nedokonale popsány. Výsledek nebývá spolehlivý a téměř vždy vyžaduje odzkoušení leptacích podmínek. Použití chemických činidel pro selektivní odleptání požadované složky objektu bývá lépe definované, i když odzkoušení podmínek je rovněž nutné. Často se používá činidel způsobujících oxidativní degradaci méně odolné složky objektu. Na tomto místě je užitečné zmínit i fyzikálně chemické techniky, spočívající v selektivním rozpuštění některé z minoritních složek systému.

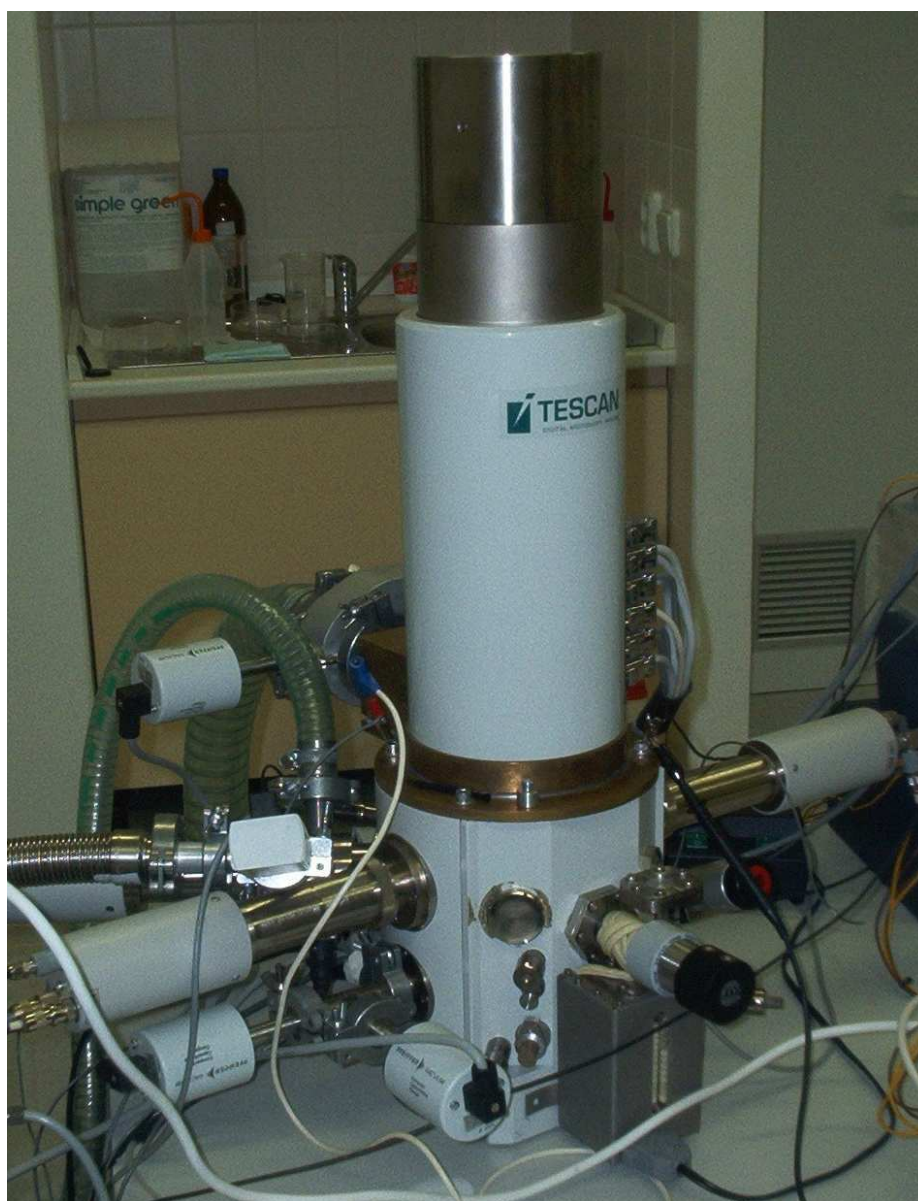
Preparační postupy je možno kombinovat. Můžeme např. leptat povrch vzorku, lomovou plochu nebo řeznou plochu, vzniklou po zhotovení tenkého či ultratenkého řezu. Při interpretaci výsledného obrazu je však třeba znát detailně celý preparační postup, aby bylo zřejmé, jak lze pozorovaný obraz interpretovat, ale také vysvětlit možné preparační artefakty.

[5]

2.4 EREM

Jak bylo zmíněno výše, vzorky pro běžnou REM musí být čisté, suché, elektricky vodivé a musí snést vakuum.

Nedávno byl vyvinut na Ústavu přístrojové techniky AVČR ve spolupráci s UETE [13] „environmentální“ rastrovací elektronový mikroskop (EREM), který je jedinečným řešením pro problematické vzorky. Příkladem takových vzorků jsou vlněné nebo bavlněné tkaniny, kosmetické přípravky, tuky a emulze (např. margarín). EREM je posledním vývojovým stádiem REM, přičemž konstrukčně vycházejí obě technologie ze stejného základu. Liší se pouze oddělením vakuového prostředí v tubusu mikroskopu od prostředí komory vzorku s vyšším tlakem pomocí komory diferenciálního čerpání – diferenciálně čerpané komory.



Obr. 12. Mikroskop EREM

U environmentální rastrovací elektronové mikroskopie jde o pozorování vzorků při vyšším tlaku (300 - 2 000 Pa). Tím je umožněno pozorování vlhkých vzorků a izolantů, které není nutno pro mikroskopii speciálně připravovat.

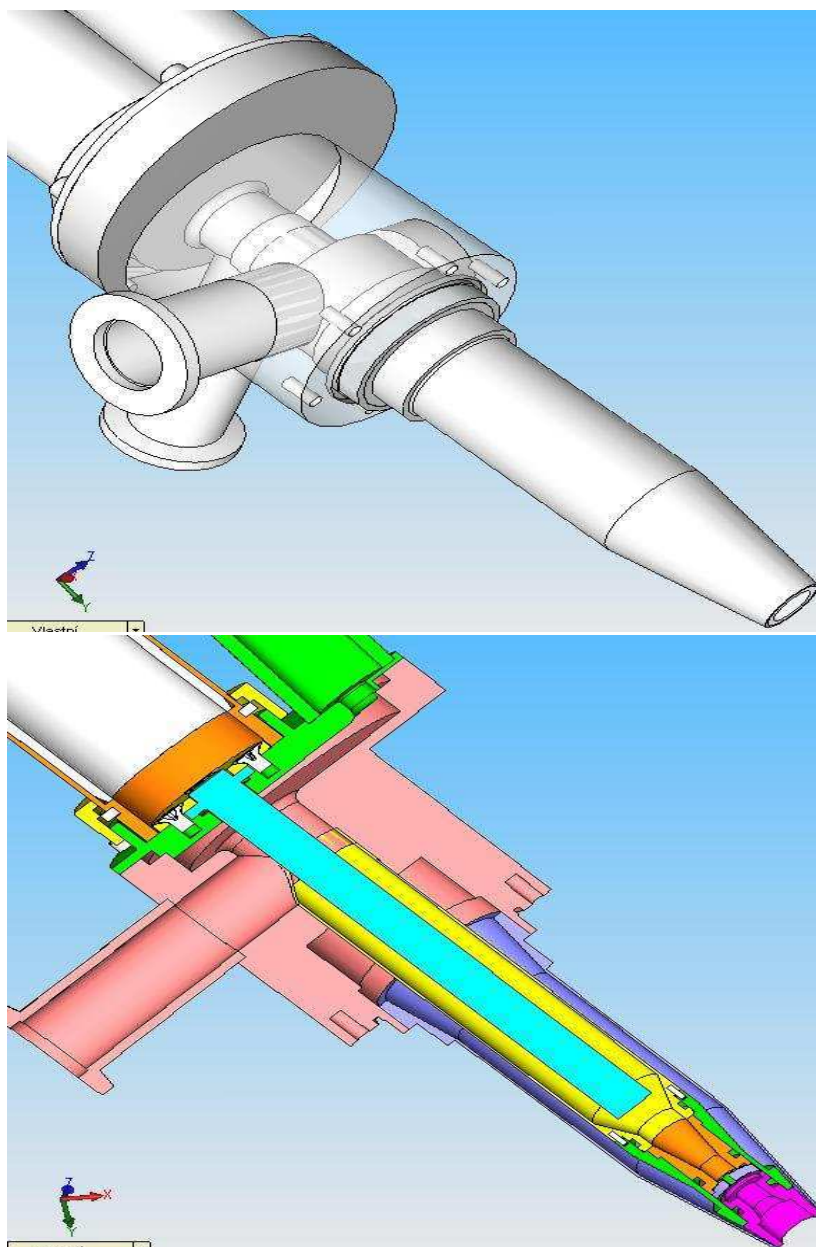
Výsledkem výzkumu možností oddělení prostoru komory vzorku a tubusu systémem diferenciálního čerpání a speciálního dvojitého párového scintilačního detektoru zpětně odražených elektronů je realizace mikroskopu AQUASEM.

Přístroj AQUASEM je řízen počítačem. Počítačová podpora systému umožňuje získání obrazu v bitové mapě (*.bmp) a jeho další zpracování v systémech obrazové analýzy. Kromě toho odpadá celý fotografický proces zpracování obrazu a tím se zpřesňuje měření na EREM.

3. Detektor

Zkoumanou částí je scintilační detektor sekundárních elektronů viz. obrázek 13, který se z boku zasouvá do komory vzorku.

Jak bylo uvedeno, dopadem elektronového svazku na povrch zkoumaného vzorku vzniká řada signálů, jako jsou např. sekundární elektrony (SE), zpětně odražené elektrony (BSE), prošlé elektrony (TE), charakteristické a brzdné rentgenové záření. Správným vyhodnocením těchto signálů je možné získat informace o struktuře, krystalografii, morfologii a chemickém složení vzorku. V případě řešeného projektu jde o scintilační detektor sekundárních elektronů pro EREM viz. obrázek 13.

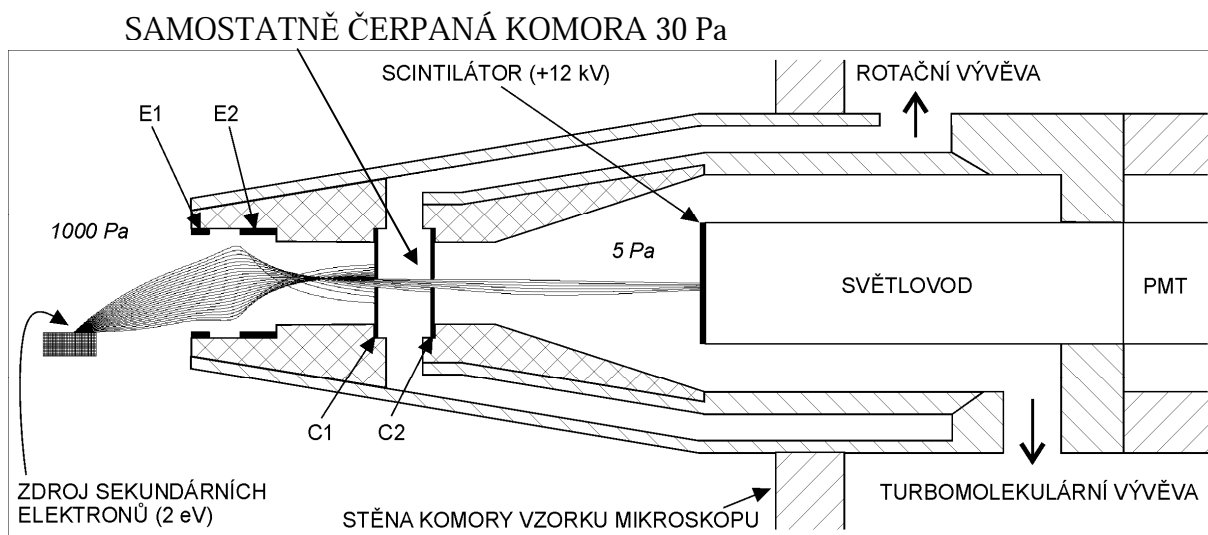


Obr. 13. Scintilační detektor SE

3.1 Scintilační detektor sekundárních elektronů pro EREM

Ve scintilačním detektoru sekundárních elektronů pro EREM je scintilátor umístěn v samostatně čerpané komoře, které je od komory vzorku mikroskopu oddělena clonkami C1 a C2. Na clonkách jsou přiloženy vhodné potenciály v řádu několika set voltů a clonky tak tvoří elektrostatickou čočku. Sekundární elektrony jsou k této čočce nasměrovány elektrodami v ústí detektoru a následně jí prochází. Clonky zároveň brání proudění plynu z komory vzorku, ve které může být tlak až 1500 - 2000 Pa, do komory scintilátoru. Tlak nejvýše 8 Pa v komoře scintilátoru umožňuje přiložit napětí až 12 kV na scintilátor, aniž by toto napětí způsobovalo výboje v plynu. Vysoké napětí přiložené na scintilátoru urychluje elektrony

procházející clonkami na energii dostatečnou k vyvolání scintilací. Fotony vzniklé scintilacemi jsou vedeny světlovodem do fotonásobiče, ve kterém jsou zesíleny a převedeny na elektrický signál. Princip scintilačního detektoru sekundárních elektronů je uveden na obrázku 14. Je třeba upozornit, že na tomto schématu jsou hrdla pro rotační a turbomolekulární vývěvu k sobě otočena o 180 stupňů. Ve skutečnosti, jak vyplývá z obrázku 13, jsou k sobě tato hrdla otočena pouze o 90 stupňů. Na tento fakt je zde upozorněno proto, že bude mít vliv na později popisované nastavení výpočtové sítě v systému FloWorks.



Obr. 14. Princip scintilačního detektoru sekundárních elektronů pro EREM
se simulací drah sekundárních elektronů s energií 2 eV (E1 – extrakční elektroda,
E2 – vychylovací elektroda

4. Solid Works

Jako parametrický 3D modelář nabízí SolidWorks výkonné objemové i plošné modelování postavené na jádře Parasolid[®], práci s neomezeně rozsáhlými sestavami a automatické generování výrobních výkresů.

V SolidWorks je k dispozici celá řada základních, specializovaných i rozšiřujících nástrojů. Počínaje elementárními nástroji pro vytváření objemových těl a ploch, přes nástroje pro analýzu (úkosů, podřezání, úhlových odchylek, křivosti atd.), produktivní nástroje (pole a zrcadlení prvků, dílů i komponentů, vícetělové prostředí, variantní modelování a tabulky variant, automatické a pokročilé tvarové funkce, podpora přechodu ze 2D do 3D, knihovny materiálů, realistické zobrazení atd.) až po specializované návrhářské nástroje jako jsou nástroje pro plechové díly, formy či svařování.

SolidWorks je zajímavou volbou zejména pro plastikáře či nástrojaře, neboť již v základní verzi nabízí zajímavé portfolio funkcí pro vytváření forem – od nástrojů pro hledání siluet, přes vytváření dělicích křivek a ploch, až po automatické vytvoření tvárníku, tvárnice a bočních jader.

V SolidWorks je možné pracovat s velkými sestavami o desítkách tisíců komponentů, a to bez nutnosti načítat všechny tyto komponenty do paměti. Při práci v sestavě se můžete přímo odkazovat na ostatní komponenty, spravovat vazby, vytvářet nové a upravovat stávající komponenty.

SolidWorks obsahuje intuitivní a lehce zvládnutelné modelovací nástroje. Modely je možné vytvářet pomocí vysunutí, rotací, spojení profilů, tažení po křivkách, tenkostěnných operací a skořepin, zaoblení, normalizovaných děr, pokročilých polí atd. Je možné využít všech výhod práce ve vícetělovém prostředí, včetně booleovských operací, konturových skic, posouvání, kopírování a pole těl atd.

Pro tvarově náročné úlohy se využívají nástroje pro analýzu úkosů, podřezání, tloušťky stěn, úhlových odchylek a křivosti ploch a splajnů stejně jako pokročilé funkce a nastavení u nástrojů jako je spojení profilů či tažení po křivce.

Správce konfigurací je nástroj SolidWorks, který vám umožní několikanásobně zvýšit rychlost a efektivitu při práci s typovými řadami, velikostně a tvarově podobnými a variantními modely. Konfigurace můžete v jediném dokumentu lehce vytvářet ručně nebo hromadně pomocí excelovské tabulky variant (i obousměrné), k dispozici jsou i odvozené varianty, varianty na úrovni skic, dílů i sestav atd.

Součástí SolidWorks je plošný modelář pro vytváření komplexních ploch pomocí spojení profilů a tažení po křivce s řídicími křivkami a kontrolou tečnosti. Plochy lze ořezávat, prodlužovat, zaoblovat, doplňovat (untrim), vzájemně nahrazovat nebo i odstraňovat povrchové plochy objemů. Pro manipulaci s plošnými těly jsou v systému nástroje pro posouvání, rotování, kopírování, zrcadlení ploch atd.

Každá změna, provedená v SolidWorks, se automaticky promítne do všech asociovaných pohledů, listů i výkresů. Všechny výkresové pohledy, kóty a popisy se aktualizují automaticky. Není proto nutné ručně překreslovat či znovu vytvářet komplikované řezy, detaily či izometrické pohledy. [12]

4.1 Cosmos FloWorks

SolidWorks® Flow Simulation je nástroj k simulaci proudění tekutin a tepelné analýze plně integrovaný uvnitř programu SolidWorks.

SolidWorks Flow Simulation odstraňuje nutnost modifikace návrhu pro různé výpočtové techniky dynamiky tekutin (CFD). SolidWorks® Flow Simulation nabízí robustnost a nástroje high-end CFD systémů při současném zachování jednoduchého a intuitivního ovládání.

Protože je velice flexibilní, lze SolidWorks® Flow Simulation použít na celou řadu rozdílných aplikací. Zároveň úzká provázanost s CAD, snadné ovládání a rychlá automatická generace výpočetní sítě umožňují operativní změny geometrie modelu a ověření jejich vlivu na provoz zařízení. [12]

SolidWorks® Flow Simulation umožňuje tyto typy simulací:

- vnitřní a/nebo externí tok
- nestlačitelná (kapalina) a stlačitelný (plyn)
- podzvukový, transsonický, a nadzvukové režimy
- viskózní, laminární, a vířivé proudění
- automatické laminární/proudění vířivé s přechodem
- ustálený stav a přechodná analýza
- konjugovaný přestup tepla
- vynucená a přirozená konvekce

Použitelnost SolidWorks® Flow Simulation:

- vícenásobné konfigurace
- toková kalkulačka
- přizpůsobitelná databáze materiálů (tekutiny, plyny, hmoty v tuhé fázi)
- parametrický studijní nástroj

Výstupy SolidWorks® Flow Simulation:

- zpráva Microsoft Word
- Animace ve formátu AVI
- Přizpůsobitelná zpráva šablony
- Ukládání ve formátu BMP, JPEG, VRML

5. Popis modelu proudění tekutiny

Popis modelu proudění tekutiny je zde nutné uvést z důvodu pochopení chování elektronů v detektoru. Elektrony jsou při vstupu do detektoru směřovány vychylovacími cívkami v úzkém svazku do jeho středu. Pro zachování co nejostřejšího obrazu je třeba, aby proudili detektorem laminárně. Z důvodu průchodu clonkami s velmi malým průměrem otvoru a vlivem odčerpávání tlaku s prostoru mezi clonkami a také z prostoru scintilátoru se však proudění laminární mění na proudění turbulentní. Tomu je třeba zamezit, protože takto dochází k velkému záchytu elektronů na clonkách. Laminární proudění elektronů v detektoru je tedy nutné proto, aby se co největší množství elektronů dostalo až ke scintilátoru a tím jsme dosáhli co nejvěrnějšího obrazu.

5.1 Turbulentní proudění

Proudění se obecně nazývá turbulentní, jestliže jeho proměnné vykazují chaotické fluktuace jak v prostoru, tak v čase. Je charakteristické vytvářením vírů a vratných proudů, pomocí kterých lze turbulenci charakterizovat a vysvětlit tak její dynamiku jako funkci času. [14] Toto charakterizování závisí především na možnostech získat informace o prostorových strukturách turbulence a jejich vývoji v čase. Jak experimentálně, tak i početně se však takový systém popisuje jako chaotický a neregulární a opakovatelnosti u něj lze dosáhnout pouze ve statistickém smyslu. Díky rychlému rozvoji výpočetní techniky je však možné řešit rovnice proudění tekutin přístupem, který se nazývá numerická simulace, což je jeden z nástrojů studia základních aspektů turbulence. Její hlavní výhodou je, že dává detailní informace o trojdimenzionálních strukturách, které nelze získat měřením v laboratoři.

5.1.1 Teorie turbulence

Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, turbulentní proudění je tvořeno turbulentní víry různých velikostí, které lze charakterizovat délkovým měřítkem l (m) a rychlostním měřítkem u ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Velikost těchto měřítek je obvykle určena geometrií proudění (charakteristickým rozměrem proudění). Dále v této práci budou tato měřítka pro zjednodušení označována jako makroměřítka. Na druhé straně tekutina, ve které se objevuje turbulence, je charakterizována svými molekulárními vlastnostmi, jako je kinematická viskozita ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), jejímž hlavním důsledkem je vyhlazení rychlostních gradientů pomocí molekulární difúze.

Výše zavedené parametry nám dovolují zavést bezrozměrnou veličinu, známou jako Reynoldsovo číslo

$$Re_l = \frac{u l}{\nu},$$

kteřé lze upravit následovně

$$Re_l = \frac{u l l}{l} = \frac{l^2}{\frac{l}{u} T_t} = \frac{T}{T_t},$$

kde T_t označuje časové měřítko přenosu turbulentních vírů o makroměřítku l a T označuje časové měřítko molekulární difúze. Proudění lze charakterizovat na základě hodnoty Reynoldsova čísla následovně:

- $T_t < T$ tj. $Re_l < 1$ laminární proudění
- $T_t > T$ tj. $Re_l > 1$ turbulentní proudění

Nerovnost je splněna pro poměrně malé hodnoty parametry proudění, takže lze udělat závěr, že většina proudění je turbulentní. Mohou však nastat i následující stavy:

- $T_t \gg T$ tj. $\gg 1$ plně vyvinutá turbulence

To znamená, že viskózní děje, které ovlivňují časové měřítko T , mohou být zanedbány vzhledem k dynamice vírů, které se objevují nad hodnotou T_t . Turbulentní víry v plně vyvinutém turbulentním proudění jsou téměř neviskózní, jinak řečeno, jsou nezávislé na vlastnostech kapaliny. Tato vlastnost se nazývá Reynoldsova podobnost.

- $T \approx T_t$ tj. $Re_l \approx 1$ přechodový stav

Laminární stacionární proudění se mění na turbulentní, nestacionární, pokud je překročeno kritické Reynoldsovo číslo $Re_{l,c}$. Proudění se zpočátku stává periodické. Tato kvalitativní změna v chování proudění se nazývá bifurkace a změna ze stacionárního k periodickému proudění (s jednoduchou frekvencí) je známá jako Hopfova bifurkace. Oscilace mohou být interpretovány jako první turbulentní víry v proudění. Při zvyšování Reynoldsova čísla se vytvářejí další nestability, až se proudění stane plně turbulentní.

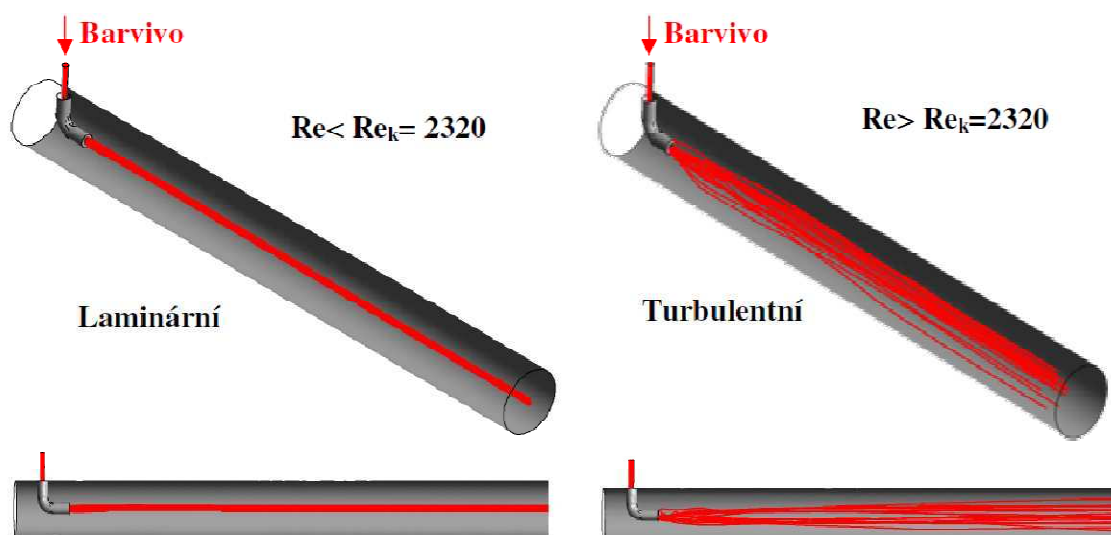
5.2 Proudění skutečných kapalin

Proudění skutečných kapalin může být klasifikováno jako laminární nebo turbulentní proudění. V případě jednorozměrného proudění v potrubí hranici tvoří experimentálně určené kritické Reynoldsovo číslo Re , definováno vztahem:

$$Re = \frac{v_s d}{\nu},$$

kde v_s je střední rychlost v potrubí, d jeho průměr a ν kinematická viskozita.

Kritická hodnota Re_{krit} pro potrubí kruhového průřezu je 2320. Při $Re \leq Re_{krit}$ se v potrubí vyvine uspořádané laminární proudění, pohyb se děje ve vrstvách a částice tekutiny se nepohybují napříč průřezem. Je-li $Re \geq Re_{krit}$, proudění je turbulentní viz. obrázek 15.



Obr. 15. Reynoldsův pokus [15]

Při vyšších Reynoldsových číslech částice tekutiny konají neuspořádaný pohyb všemi možnými směry. Tento pohyb je nepravidelný, náhodný a připomíná pohyb molekul plynu, ale na rozdíl od molekul se částice tekutiny mohou rozpadat a ztrácet tak svou identitu. Pohyb částic kolmo ke stěně zvyšuje tok hybnosti ke stěně, a proto je pokles tlaku ve směru proudění mnohem větší než u laminárního proudění. Následkem promíchávání tekutiny jsou rozdíly rychlosti na různých místech průřezu mnohem menší než u laminárního proudění mimo oblast poblíž stěny.

5.3 Nestlačitelné a stlačitelné proudění

Proudění skutečných kapalin může být klasifikováno jako nestlačitelné nebo stlačitelné proudění. V případě proudění tekutiny pro hodnocení stlačitelnosti použijeme Machovo číslo M , definováno vztahem

$$M = \frac{v}{c} ,$$

kde v je rychlost tekutiny, c je rychlost zvuku.

Pro rychlost zvuku v ideálním plynu platí vztah

$$c = \sqrt{\kappa RT} ,$$

kde T je teplota plynu, R všeobecná plynová konstanta a κ je Poissonova konstanta udávající poměr měrných tepelných kapacit za stálého tlaku a stálého objemu, platí

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} .$$

Proudění považuje prakticky za nestlačitelné, když se neprojeví změna hustoty plynu na probíhající proudění, v případě že platí pro hodnotu Machova čísla vhodně volená nerovnost

$$M \leq (0,2 - 0,3) .$$

V případě splnění nerovnosti lze považovat i proudění plynu za proudění nestlačitelné tekutiny, tj. kapaliny. Hustota plynu ρ při výpočtu je považovaná za konstantní a určuje se z počátečních podmínek.

V případě nesplnění nerovnosti je proudění plynu považováno za proudění stlačitelné tekutiny. Hustota plynu ρ při výpočtu je proměnná a vyhovuje rovnici stavu ideálního plynu ve tvaru

$$p = R \rho T .$$

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

Zmenšuje-li se průměr, kterým prochází plyn, dochází ke zvyšování jeho rychlosti až ke kritickému stavu. Zvětšuje-li se průměr, kterým prochází plyn, klesá rychlost plynu a tím se oddaluje od kritického stavu.

K dosažení nadzvukového proudění v trubici proměnného průřezu je tedy třeba v podzvukovém proudu nejprve průřez trubice zmenšovat a po dosažení kritického stavu proudění začít průřez trubice zvětšovat, aby bylo dosaženo v trubici nadzvukového proudění.

5.4 Vakuum

Vakuum je označení pro systém, který obsahuje plyny nebo páry a jejich tlak je nižší než tlak atmosférický. V případě vysokého a velmi vysokého vakua je tlak podstatně nižší než tlak atmosférický. Vysoké a velmi vysoké vakuum nalézá uplatnění v celé řadě aplikací. Tyto aplikace se dělí na dvě základní skupiny:

1. Aplikace, v nichž je koncentrace plynu v systému menší než určitá hodnota, tzn., že plyn je natolik zředěný, že téměř nebrání pohybu jiných pevných těles, plynů nebo částic. Do této skupiny patří přístroje využívající elektronové svazky (elektronky, elektronové mikroskopy,...), svazky různých částic (přístroje pro vakuové napařování nebo naprašování, plazmové přístroje,...) a rotory s velkou rychlostí otáčení.

2. Aplikace zaměřené na získávání velmi čistých povrchů. Povrch je zbaven plynů a zůstane čistý tím déle, čím vyšší je hodnota vakua v systému. Uplatnění lze nalézt v celé řadě fyzikálních a chemických procesů, zejména při výrobě polovodičových součástek a jiné.

[16]

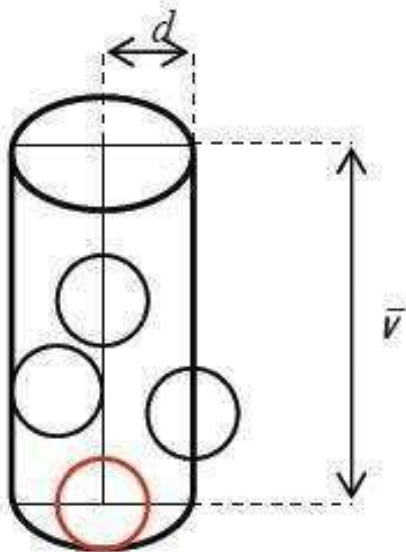
5.4.1 Dělení a typy vakua

Hovoříme-li o vakuu, máme na mysli systém obsahující plyny nebo páry o tlaku nižším, než je tlak atmosférický. V taxise používá podrobnějšího dělení, protože jako vakuu můžou být označovány hodnoty tlaku od desítek kPa až po hodnoty řádově 10^{-13} Pa. V tabulce 1 je uvedeno rozdělení tlaků a vakua s příklady použití.

Tab. 1. Rozdělení tlaků a vakua s příklady použití [16]

Vakuum	Tlak	Hodnota tlaku	Použití
Technické	Atmosférický snížený	101 kPa	Při povrchu Země
Primární		10 kPa	V plynech plněných žárovkách
		1 kPa	Vstupní otvor vodní vývěvy
		100 Pa	V různých výbojkách
		10 Pa	
Vysoké	Nízký	1 Pa	
		10^{-1} Pa	Metalurgické pece
		10^{-2} Pa	V Dewarových nádobách
		10^{-3} Pa	Vakuové napařování
		10^{-4} Pa	Přijímací elektronky
Ultravakuum	Velmi nízký	10^{-5} Pa	Vysílací elektronky
		10^{-6} Pa	Urychlovače částic
		10^{-7} Pa	Rentgentky
		10^{-8} Pa	Experimentální aparatury pro výzkum povrchu
		10^{-9} Pa	
Extrémně vysoké	Extrémně nízký	10^{-10} Pa	Speciální aparatury
		10^{-11} Pa	Výzkum s nejnižšími tlaky
		10^{-12} Pa	
		10^{-13} Pa	Kosmický prostor

5.5 Srážky molekul, střední volná dráha



Problematiku, uvedenou v této kapitole, je nutno uvést z důvodu, že se stává jedním z kritérií vyhodnocení výsledků získaných pomocí dále prováděné simulace proudění pomocí systému COSMOS FloWorks, neboť jejím smyslem je vyhodnotit optimální podmínky pro průchod primárního svazku elektronů diferenciallyně čerpanou komorou, popř. sekundárních elektronů při průchodu detektorem tak, aby elektrony měly co nejméně srážek s molekulami čerpaného plynu.[17]

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

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

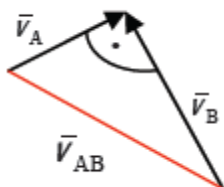
Za jednotku času urazí molekula průměrnou dráhu v a narazí do všech molekul, které budou ve válci o poloměru d a výšce v .

$$z_A = \pi d^2 \bar{v} \frac{N}{V} \quad [s^{-1}]$$

Zpřesnění: všechny molekuly jsou v pohybu. Střední aritmetickou rychlost je třeba nahradit vzájemnou střední rychlostí.

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

Částice se srážejí pod různými úhly z intervalu 0-180°, v průměru můžeme uvažovat úhel 90°. Pro střední vzájemnou rychlost pak platí:



$$\bar{v}_{AB} = \sqrt{\bar{v}_A^2 + \bar{v}_B^2}$$

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

Vyjádříme-li tzv. redukovanou hmotnost μ dvou částic A a B, u kterých dojde ke srážce vztahem:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_A} + \frac{1}{m_B}$$

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

$$\bar{v}_{AB} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi\mu}}$$

který se pro případ srážky dvou stejných částic A zjednoduší:

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

$$\bar{v}_{AA} = \bar{v} \sqrt{2} \quad .$$

Pro počet srážek jedné molekuly s ostatními molekulami stejného druhu za jednotku času pak dostaneme:

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

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

$$z_{AA} = \frac{1}{2} \frac{N}{V} z_A \quad [m^{-3} s^{-1}]$$

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

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

$$z_{AB} = \frac{N_A}{V} z_A$$

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

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

$$d_{AB} = \frac{d_A + d_B}{2}$$

Střední volná dráha $l =$ průměrná dráha, kterou částice uletí mezi dvěma srážkami

$$\bar{l} = \frac{\bar{v}}{z_A}$$

$$\bar{l} = \frac{1}{\frac{N}{V} \pi d^2 \sqrt{2}} .$$

⇓

Z uvedeného platí, že:

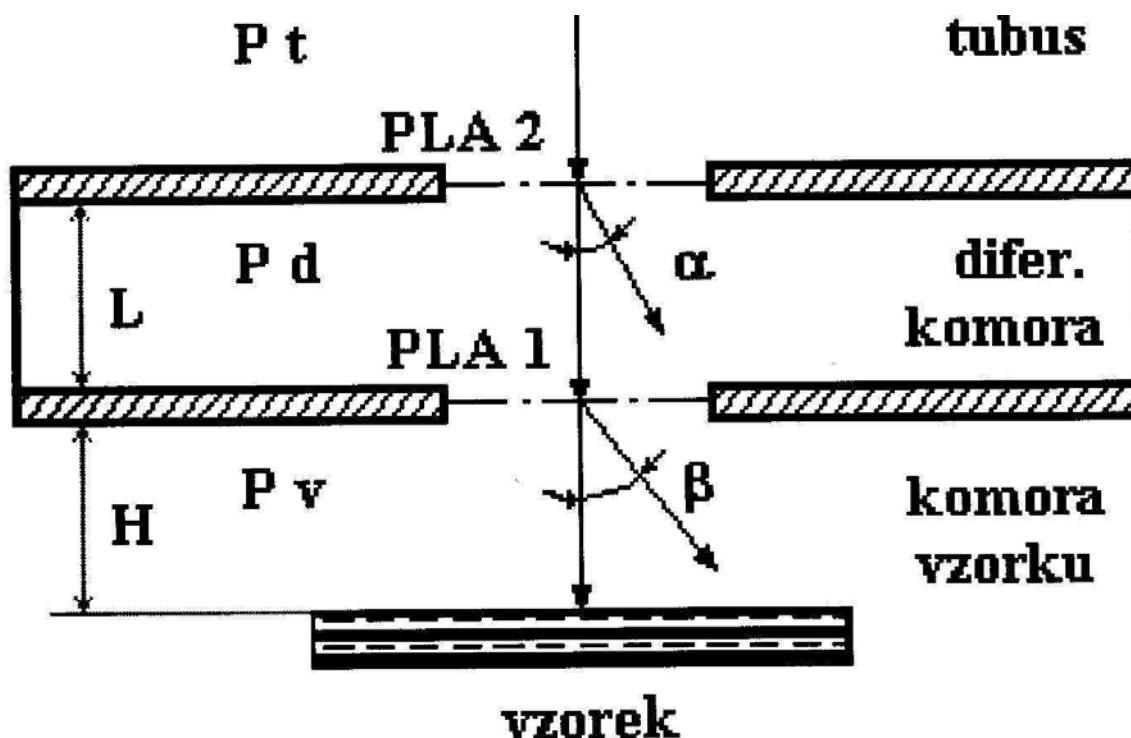
- Zdvojnásobí-li se počet částic v jednotce objemu – tedy tlak plynu, střední volná dráha klesne na polovinu.
- Střední volná dráha nezávisí na teplotě. [17]

5.5.1 Závislost rozptylu na počtu interakcí

Základním požadavkem kladeným na mikroskopy pracující s vyšším tlakem v komoře vzorku, je vytvořit takové podmínky pozorování, za kterých by převážná část elektronů elektronového svazku zůstala i po průchodu prostředím s vyšším tlakem v původní stopě. Tyto elektrony dopadají na povrch vzorku, od kterého se odrážejí a nesou informaci mající zásadní vliv na rozlišení.

V prostředí vyššího tlaku plynu dochází k četným srážkám primárních elektronů s molekulami plynu, přičemž elektrony ztrácejí část své energie a mění směr dráhy. Důsledkem toho je rozostření (rozptyl) primárního svazku.

K rozostření elektronového svazku dochází v zásadě ve dvou případech. Nejdříve při průchodu komorou diferenciálního čerpání a poté při průchodu komorou vzorku, jejíž vysoký tlak má na rozptyl elektronového svazku největší vliv. Obě komory jsou odděleny aperturní clonou PLA1, přičemž vzdálenost mezi ní a povrchem vzorku je nutné pokud možno co nejvíce minimalizovat. Na obrázku 16 je zjednodušeně znázorněn pohyb elektronového svazku oběma komorami.



Obr. 16. Rozptyl svazku primárních elektronů

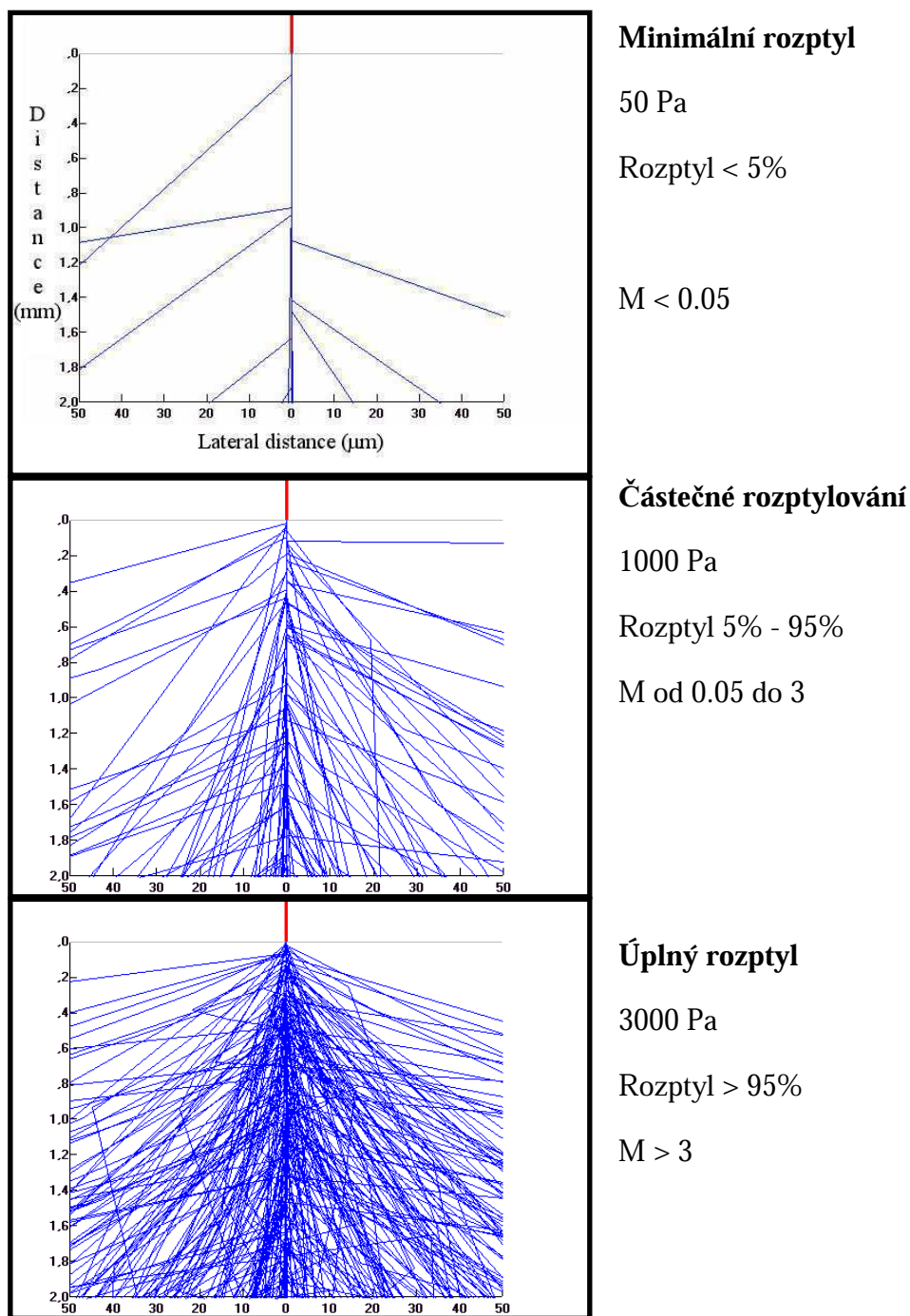
Vzdálenost obou aperturních clon PLA1 a PLA2, je označena L a je konstantně určena konstrukcí dané části komory diferenciálního čerpání viz. obrázek 16. Vzdálenost povrchu vzorku od aperturní clony PLA1 je proměnná díky možnosti vertikálního posuvu vzorku. Rozptyl svazku primárních elektronů zde charakterizují úhly α v komoře diferenciálního čerpání a β komoře vzorku.

Záchytný průřez σ_T je definován jako blízké okolí částice plynu, v němž ocitne-li se elektron při svém průletu, dojde ke srážce. To tedy znamená, že záchytný průřez plynu je závislý nejen na druhu plynu, ale i na urychlovacím napětí. Pro demonstraci tohoto tvrzení je uvedena tabulka 2, ve které jsou vypočteny hodnoty záchytného průřezu σ_T v závislosti na urychlovacím napětí svazku primárních elektronů U pro vodní páry.

Tab. 2. Závislost záchytného průřezu na urychlovacím napětí

U (kV)	σ_T (m^2)
5	$6,9 \cdot 10^{-21}$
10	$3,3 \cdot 10^{-21}$
15	$2,6 \cdot 10^{-21}$
20	$1,9 \cdot 10^{-21}$

Z tabulky 2 vyplývá, že podmínky pro zajištění co nejmenšího počtu srážek jsou nevhodnější při volbě napětí U vyššího, než je 10 kV.

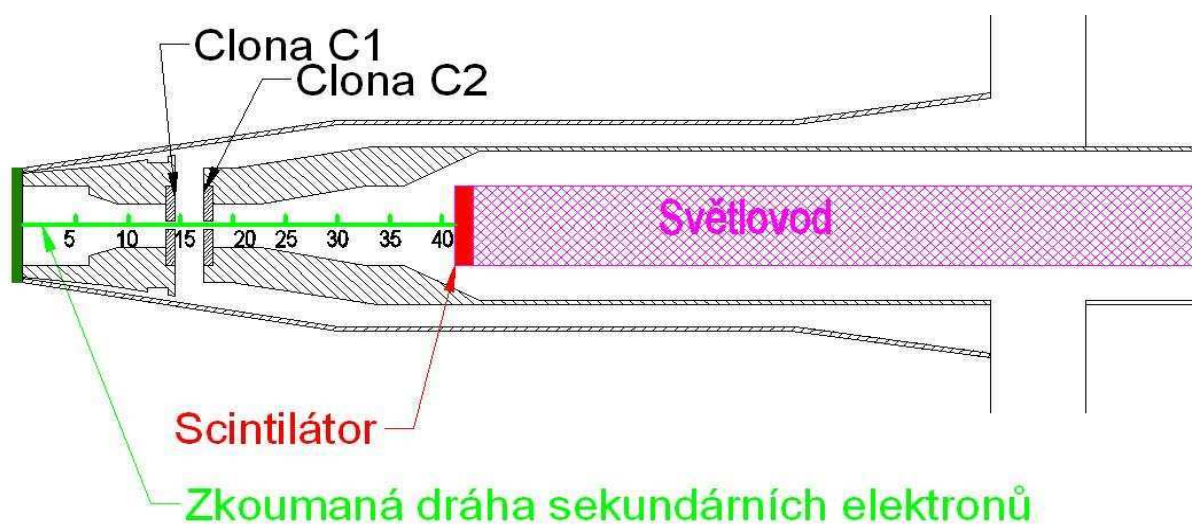


Obr. 17. Tři základní rozptylové režimy svazku primárních elektronů

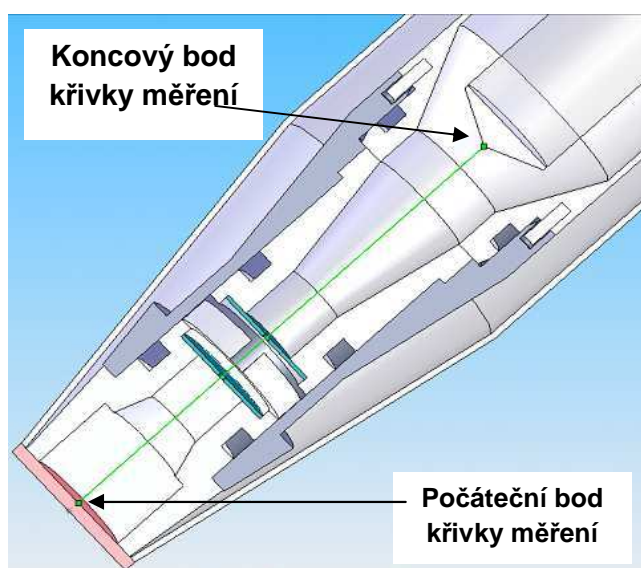
Kompromisním režimem je režim částečného rozptylu, na obrázku 17 uprostřed. Z uvedeného vyplývá, že druhým z nutných kritérií pro zhodnocení dále uvedených výsledků simulací proudění plynu je, aby například dráha primárního svazku při průchodu diferenciální komorou procházela oblastí vyššího tlaku po co nejkratší dráze, tedy aby se sledovalo kromě co nejnižšího aritmetického průměru tlaku na této dráze i to, aby tlak nad komorou vzorku klesl co nejrychleji na co nejnižší hodnotu.

6. Vyhodnocení dráhy sekundárních elektronů

Předmětem zkoumání je dráha sekundárních elektronů od jejich vstupu, kde je tlak 200 - 1000 Pa, přes první clonku C1, za kterou je odčerpáván tlak rotační vývěvou, až k tlaku 30 Pa. Dále pak elektrony prochází druhou clonkou C2, kde je tlak odčerpáván turbomolekulární vývěvou až na hodnotu 5 Pa. Hodnota tlaku v tomto místě nesmí přesáhnout hranici 8 Pa, jinak by mohlo docházet k výbojům vlivem velmi vysokého napětí na scintilátoru. Celá dráha svazku elektronů je zobrazena na obrázku 18. Pro její vyhodnocení je použit simulační program COSMOS FloWorks.



Obr. 18. Dráha elektronů od jejich vstupu až k scintilátoru



Obr. 19. Dráha sekundárních elektronů v detektoru

Na obrázku 19 je zobrazen celý detektor a na něm pro přehlednost znovu vyznačena zkoumaná dráha sekundárních elektronů. Na této dráze jsou zkoumány dva druhy veličin z rozdílných důvodů. Z hlediska vlastního zkoumání pro optimální funkci detektoru je sledován průběh tlaku média na dráze sekundárních elektronů a pro pochopení charakteristiky proudění sledujeme průběhu rychlosti včetně hodnoty Machova čísla.

6.1 Základní rovnice popisující proudění v řešené komoře

Pro řešení problému je použit profesionální program Cosmos FloWorks, který řeší systém následujících tří parciálních diferenciálních rovnic, doplněný stavovou rovnicí. Jde o trojrozměrný typ proudění stlačitelné, vazké tekutiny s přívodem tepla.

Základní rovnice popisující proudění vazké stlačitelné tekutiny v karteziánské souřadné soustavě zapsané v konzervativním tvaru jsou tři zákony zachování a to zákon zachování hmotnosti, zákon zachování pohybu a zákon zachování energie doplněné čtvrtou rovnicí a to rovnicí stavu uvažované tekutiny.

Rovnice spojitosti, vyjadřující zákon zachování hmotnosti, nabývá tvaru

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

Stokes – Navierova rovnice, vyjadřující aplikovanou Newtonovu větu o změně hybnosti, ve tvaru

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t} E + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (ij + ij^R) + q_i) + ij^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_i u_i + Q_H \quad , \quad E = e + \frac{v^2}{2} .$$

Rovnice stavu, vztahující určovací veličiny stavu tekutiny, pro uvažovaný ideální plyn, ve tvaru:

$$= \frac{p}{RT} \quad .$$

V uvedených rovnicích je u rychlost tekutiny, p tlak tekutiny, ρ je hustota tekutiny, T je teplota tekutiny, e je vnitřní energie, S_i jsou vnější hmotnostní síly působící na jednotku hmotnosti (kupř. tíhová, odstředivá), QH je přívod či odvod tepla vztahovaný na jednotku objemu, q_i je tok tepla difusní, τ_{ik} je tensor vazkých napětí a ij jsou indexy u veličin udávající sumaci dle tří směrů souřadnic (Einsteinova sumace).

6.2 Zadání podmínek v Cosmos FloWorks pro detektor

6.2.1 Nastavení sítě

Jak bylo již předběžně uvedeno, v případě výpočtů pro detektor není možné využít nastavení sítě pro symetrické tvary, neboť jak vyplývá z obrázku 26, příruby pro čerpání komory scintilátoru a komory mezi clonkami jsou k sobě navzájem otočeny o 90 stupňů.

I zde je nejprve nastaven počet buněk základní sítě v osách X, Y a Z, který je uveden v tabulce 3 a následně je provedeno zjemnění oblastí obou clonek, kde jsou očekávány složitější podmínky proudění v důsledku malých otvorů viz. obrázek 20:

- Přibližně 4 násobné zjemnění v kuželové části.
- Přibližně 64 násobné zjemnění ve válcové části v oblasti průchodu primárního svazku elektronů.

Tab. 3. Základní nastavení velikosti sítě

	X	Y	Z	ROZMĚR X	ROZMĚR Y	ROZMĚR Z
DETEKTOR	65	65	100	81.2 mm	101 mm	154.9 mm

I v tomto případě se určuje navíc nastavení sítě v oblasti zúžení, kanálků, ostřejších přechodů, oblasti zakřivených ploch a další viz. Tabulka 4.

Tab. 4. Doplnující nastavení velikosti sítě

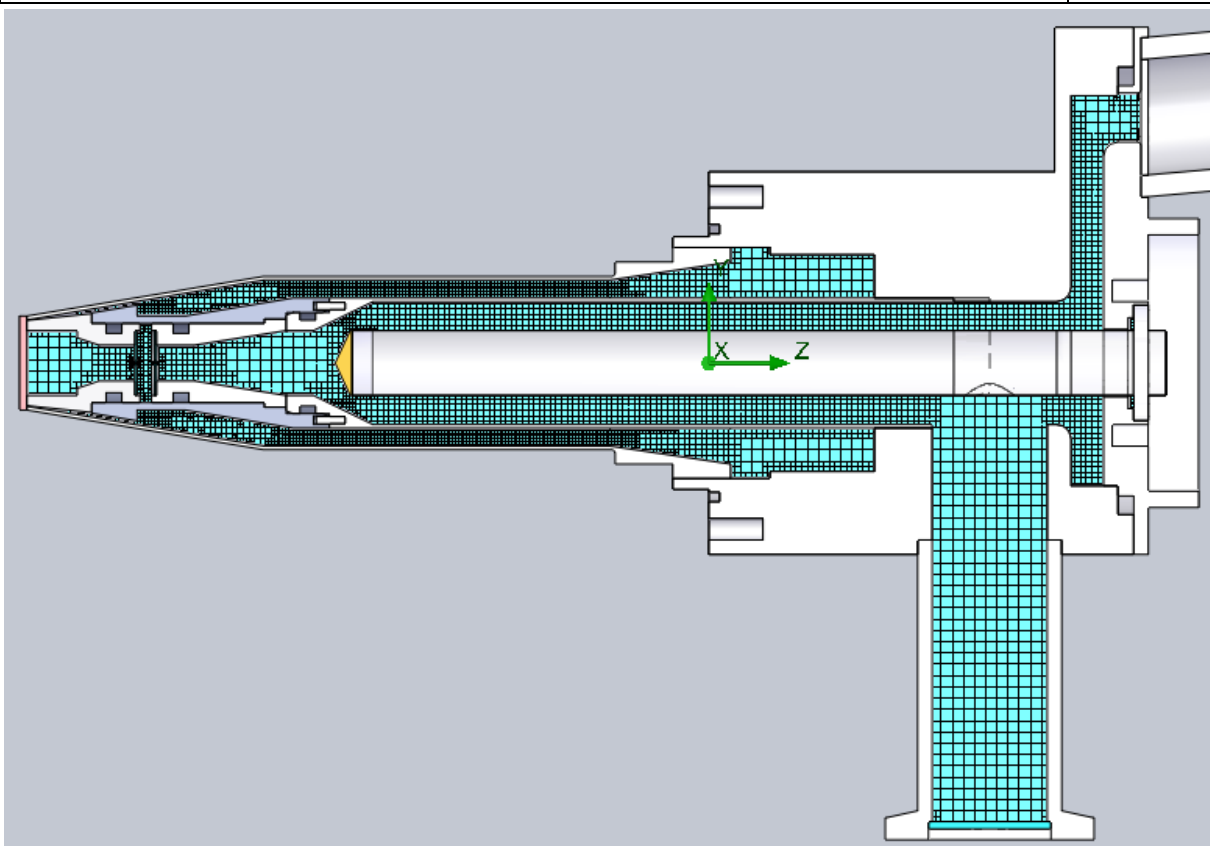
Solid/Fluid Interface	
Small solid features refinement level (Úroveň zjemnění v oblasti malých částic)	1
Curvature refinement level (Úroveň zjemnění v oblasti zakřivených ploch)	1
Curvature refinement criterion (Kriterium zjemnění v oblasti zakřivených ploch)	0.15
Tolerance refinement level (Úroveň tolerance zjemnění)	1
Tolerance refinement criterion (Kriterium tolerance zjemnění)	3.289 mm
Narrow channels	
Advanced narrow channel refinement (Pokročilé zjemnění úzkých kanálků)	On
Characteristic number of cells across a narrow channel (Charakteristický počet buněk v úzkém kanálku)	5
Narrow channels refinement level (Úroveň zjemnění v úzkém kanálku)	2
The minimum height of narrow channels (Minimální rozměr úzkého kanálku)	Off
The maximum height of narrow channels (Maximální rozměr úzkého kanálku)	Off

Jak je vidět na obrázku 20, nastavení sítě ve výpočtové oblasti detektoru je kombinací lokálního zjemnění a doplňujícího nastavení sítě. V místech širších kanálků je velikost buněk v původním nastavení, v místech užších kanálků dochází k zjemnění v důsledku doplňujícího nastavení a okolí clonek je zjemněno pomocí lokálního nastavení.

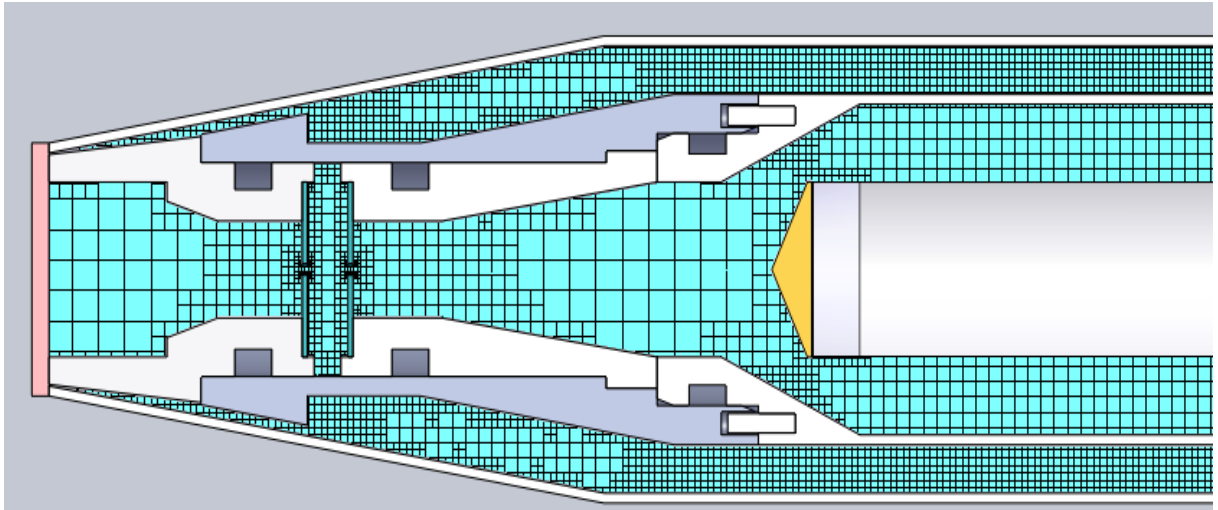
I v případě detektoru je během výpočtu využito adaptivního zjemňování viz. tabulka 5.

Tab. 5. Nastavení adaptivního zjemnění sítě

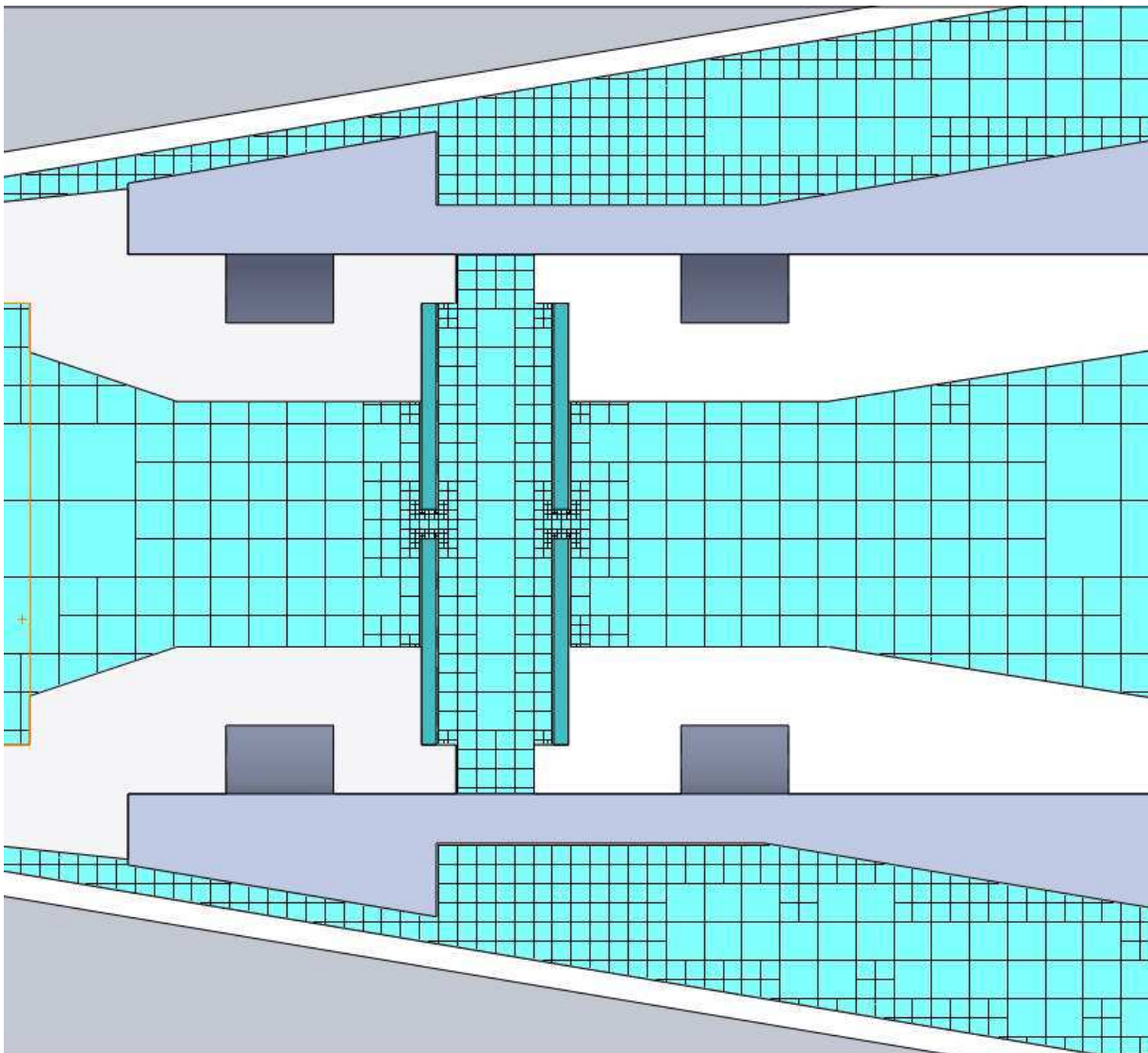
Refinement level (Úroveň zjemnění)	1
Refinement criterion (Kriterium zjemnění)	2
Unrefinement criterion (Kriterium rušení zjemnění)	0.15
Adaptive refinement in fluid (Úroveň adaptivního zjemnění v oblasti proudění)	On
Use global parameter variation (Využití globálního parametru kolísání)	Off
Approximate maximum cells (Maximální počet buněk)	750000
Refinement strategy (Nastavení strategie zjemňování sítě)	Periodic
Units (Způsob ukončení výpočtu)	Travels
Relaxation interval (Interval uvolnění)	0.4
Periodic refinement options (Podmínky periodického zjemnění)	Start: 1 Period: 0.5



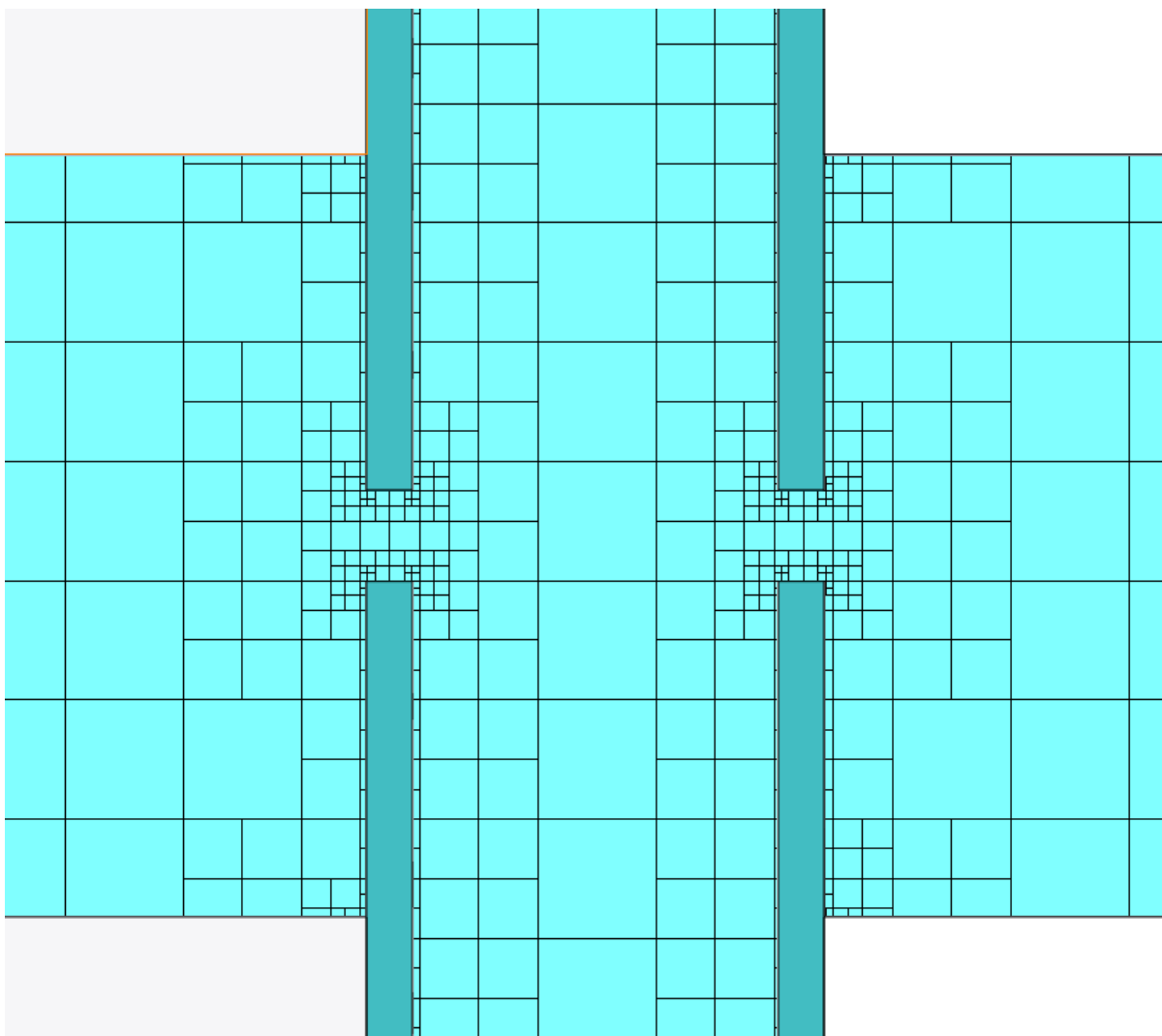
Obr. 20. Nastavení sítě ve výpočtové oblasti detektoru – celý detektor



Obr. 21. Nastavení sítě ve výpočtové oblasti detektoru – vstupní část detektoru



Obr. 22. Nastavení sítě ve výpočtové oblasti detektoru – detail oblasti clonek



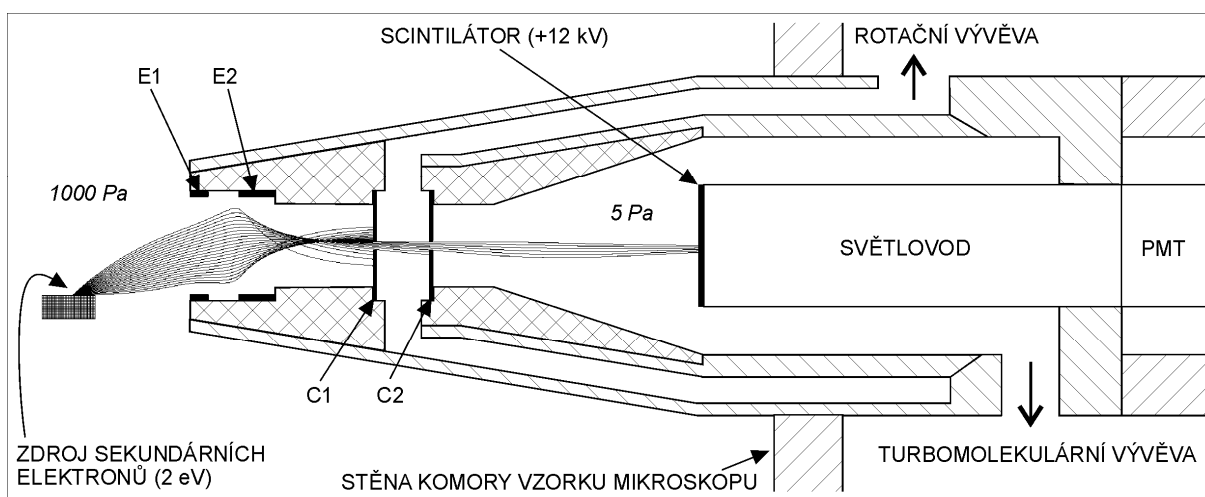
Obr. 23. Nastavení sítě ve výpočtové oblasti detektoru – detail prostoru mezi clonkami

6.2.2 Nastavení okrajových podmínek

Nastavení okrajových podmínek vyplývá z kapitoly 3 popisující podmínky a funkci detektoru. Do detektoru vedou 3 otvory:

- **Hrdlo čerpání komory scintilátoru.** Tato komora je čerpána turbomolekulární vývěvou Pfeiffer TPD 011 rychlostí čerpání $0.0044 \text{ m}^3/\text{s}$.
- **Hrdlo čerpání prostoru mezi clonkami.** Tento prostor je čerpán rotační vývěvou Lavat RV 40/21 rychlostí čerpání $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$.
- **Hrdlo detektoru vstupující do komory vzorku.** Tato práce počítá s variantami velikostí tlaku v komoře vzorku: 200, 400, 600, 800, 1000 Pa.

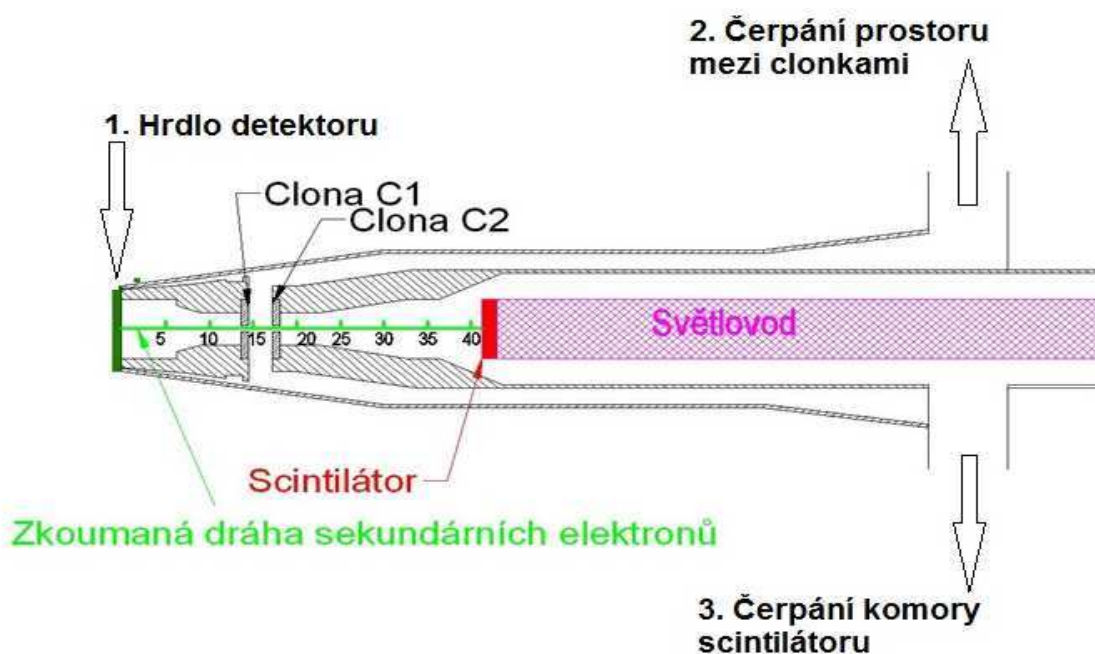
Uvedený stav, ze kterého vyplývá nastavení okrajových podmínek, je uveden na obrázcích 20, 21, 22 a 23. Čerpání v praxi probíhá až do chvíle dosažení okrajových podmínek.



Obr. 24. Schéma detektoru sekundárních elektronů pro EREM
 C1 – clonka 1, C2 – clonka 2, v uvedeném případě jde o clonky s otvory 0.6 mm

Z uvedeného vyplývá následující nastavení okrajových podmínek v oblasti otvorů vstupujících do detektoru:

1. Na hrdle detektoru ústícím do komory vzorku byla postupně nastavována okrajová podmínka - *statický tlak pro hodnoty: 200, 400, 600, 800, 1000 Pa.*
2. **Prostor mezi clonkami** - podle parametrů vývěvy byla na hrdlo čerpání prostoru mezi clonkami zadána okrajová podmínka *objemového čerpání: 0.01 m³/s.*
3. **Komora scintilátoru** - podle parametrů vývěvy byla na hrdlo čerpání komory scintilátoru zadána okrajová podmínka *objemového čerpání 0.0044 m³/s.*



Obr. 25. Schematické zobrazení detektoru se zadáním okrajových podmínek

6.2.3 Nastavení cílů výpočtu

Ve vlastním výpočtu jsou sledovány tyto veličiny:

- Průběh statického tlaku v detektoru,
- průběh rychlosti toku média v detektoru, včetně Machova čísla,
- průběh hmotnostního toku na otvorech detektoru včetně čerpacích otvorů,
- průběh teploty v detektoru.

6.3 Vyhodnocení měření

Pro měření v detektoru byly použity clonky s otvorem o průměru 0,6 mm. Clonky byly od sebe vzdáleny 2,4 mm, 2,8 mm, 3,2 mm, 3,6 mm a 4,0 mm. V komoře vzorku byly použity tlaky 200, 400, 600, 800 a 1000 Pa. Kompletní výsledky všech měření jsou uvedeny v Přílohách:

Příloha A obsahuje grafické rozložení rychlostí a tlaků,

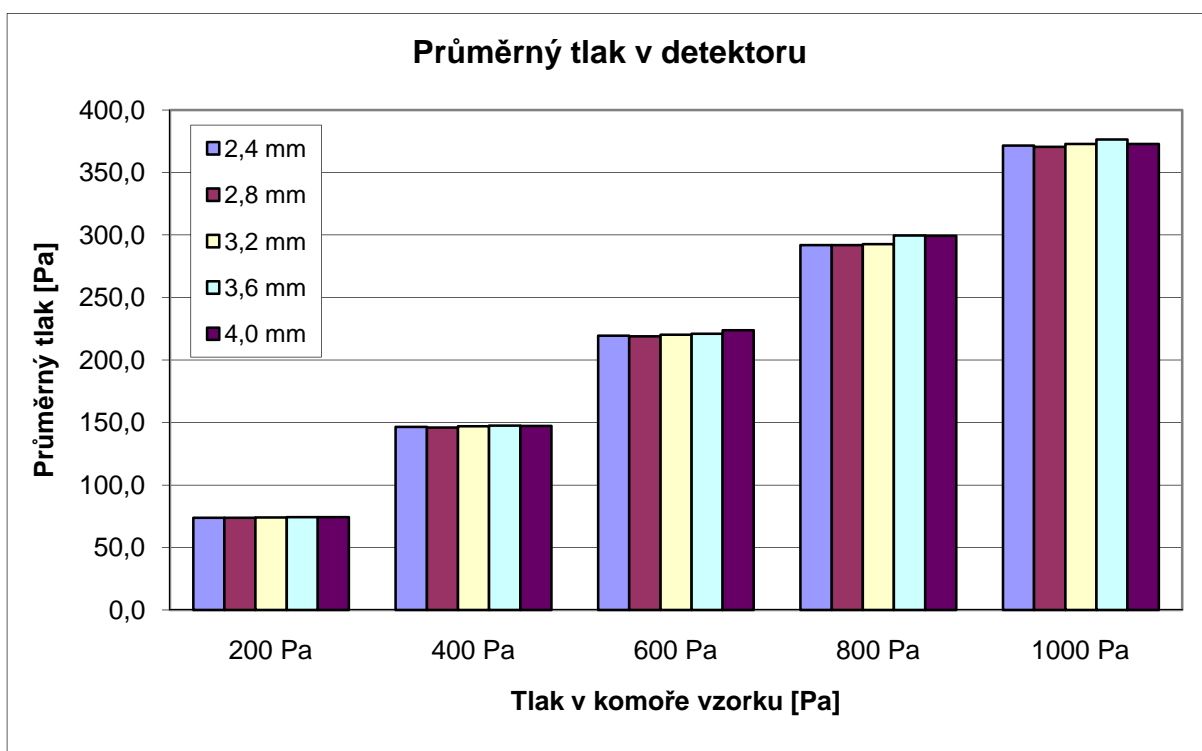
Příloha B grafy průběhu rychlosti a tlaku na celé jejich dráze v detektoru.

V tabulce 6 je uveden výsledný průměrný tlak na celé dráze sekundárních elektronů v detektoru. Na průměrný tlak má vzdálenost clonek zanedbatelný vliv, zjištěné odchylky se dají přisoudit toleranci v oblasti přesnosti výpočtu.

Tab. 6. Vliv vzdálenosti clonek a tlaku u vzorku na průměrný tlak v detektoru

Tlak \ Vzdálenost	2,4 mm	2,8 mm	3,2 mm	3,6 mm	4,0 mm
200 Pa	73,8	73,9	74,1	74,3	74,4
400 Pa	146,5	146,0	146,9	147,5	147,3
600 Pa	219,5	218,9	220,2	221,1	223,9
800 Pa	292,0	291,9	292,7	299,5	299,4
1000 Pa	371,6	370,4	372,9	376,4	372,8

Na obrázku 26 je uveden graficky vliv vzdálenosti clonek a tlaku u vzorku na průměrný tlak v detektoru. Barevně jsou rozlišeny jednotlivé vzdálenosti clonek, které jak je vidět, mají na výsledný průměrný tlak v detektoru jen minimální vliv.



Obr. 26. Vliv vzdálenosti clonek a tlaku u vzorku na průměrný tlak v detektoru

Dále byl porovnáván výsledný tlak u scintilátoru, který nesmí být vyšší než 8 Pa, aby nedocházelo k elektrickým výbojům z důvodu velmi vysokého napětí na scintilátoru. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7. Z té vyplývá zajímavé zjištění, že od tlaku cca 500 Pa vzniká na první clonce kritické proudění a vytváří tak vlnu nerovnoměrných výsledků u scintilátoru. Nejhorší výsledky mají vzdálenosti clonek 2,4 mm a 3,6 mm mají nejhorší výsledky, nejlepší pak vzdálenosti clonek 3,2 mm a 4,0 mm

Důvodem jsou tlakové a rychlostní podmínky v prostoru mezi clonkami. Ty vyvolávají skokově různé tlakové a rychlostní spády na druhé clonce, což vyvolá v některých případech podmínky pro pulzaci expanzních vln, které jsou příčinou vírů v prostoru mezi druhou clonkou a scintilátorem, viz obrázky 24 a 25.

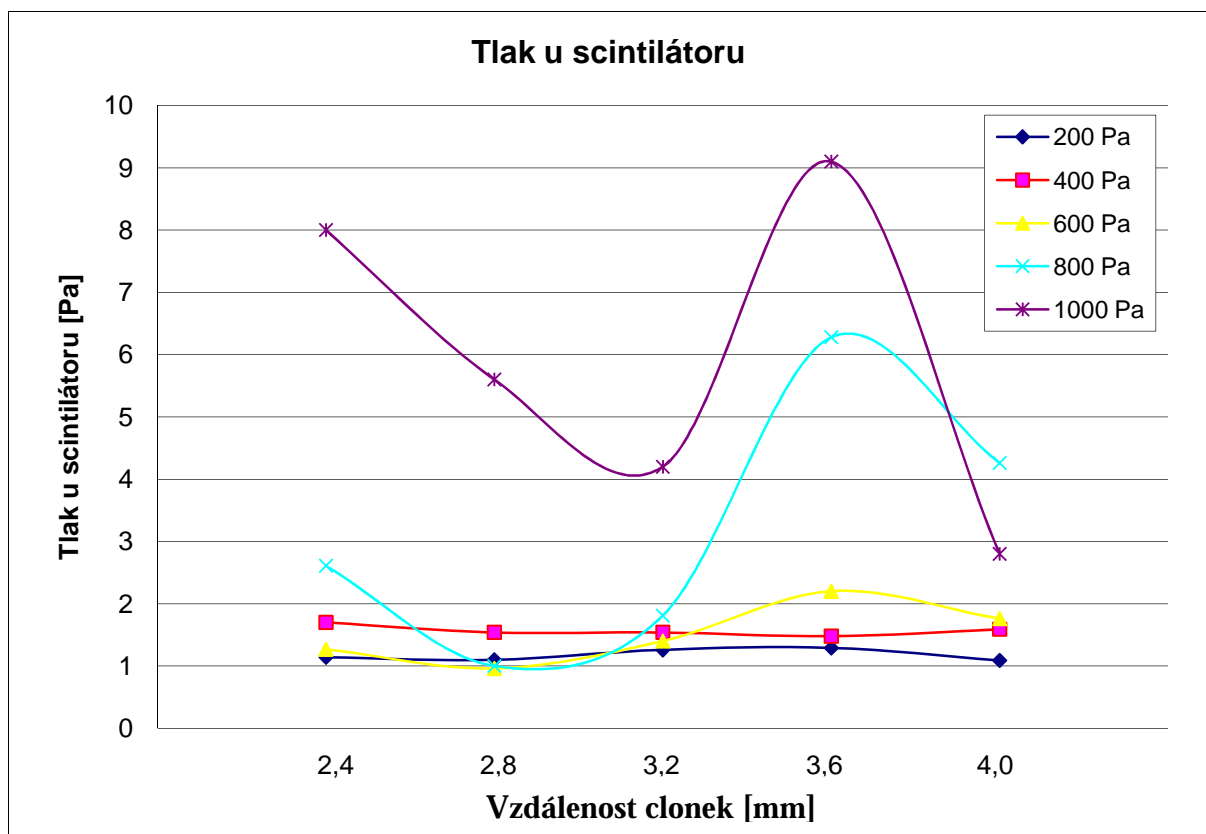
Na obrázcích 29, 31 a 32, je zobrazeno proudění při vzdálenosti clonek 4,0 mm, 3,2 mm a 2,8 mm při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa. Jak je zřejmé, nevzniká při proudění plynu dvojitá expanzní vlna, která ovlivňuje výsledný tlak u scintilátoru.

Na obrázcích 30 a 33 je zobrazena ukázka proudění za druhou clonkou v oblasti před scintilátorem pro vybrané varianty, poukazující na uvedené změny u vzdáleností clonek 2,4 mm a 3,6 mm, při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa. Ty mají negativní vliv na odčerpávání plynu v prostoru před scintilátorem, což způsobuje u uvedených variant vyšší hodnoty.

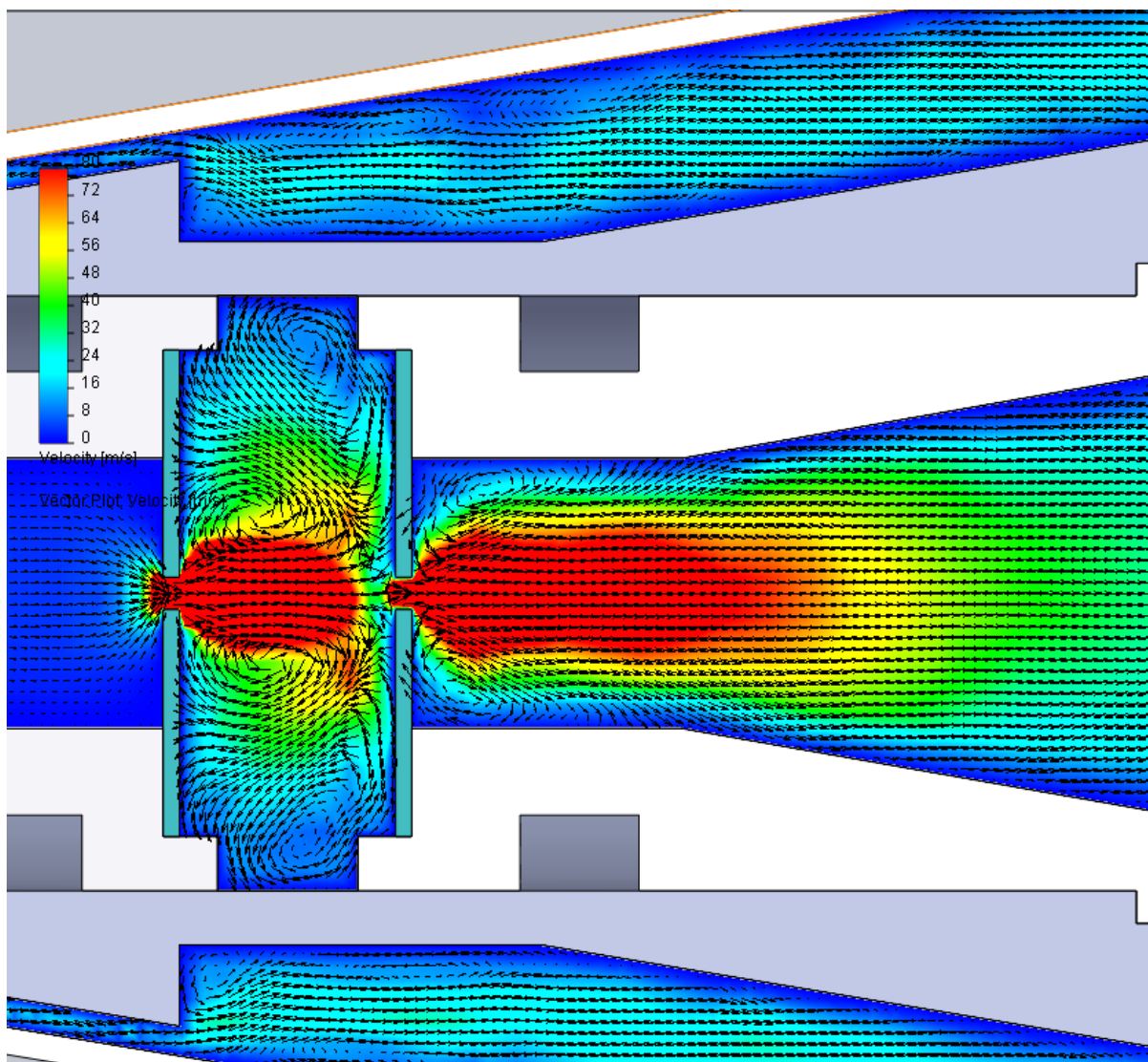
Tab. 7. Vliv vzdálenosti clonek a tlaku u vzorku na tlak u scintilátoru

Tlak \ Vzdálenost	2,4 mm	2,8 mm	3,2 mm	3,6 mm	4,0 mm
200 Pa	1,14	1,10	1,26	1,29	1,09
400 Pa	1,70	1,54	1,54	1,48	1,59
600 Pa	1,27	0,96	1,40	2,20	1,76
800 Pa	2,61	1,00	1,81	6,28	4,26
1000 Pa	8,00	5,60	4,20	9,10	2,80

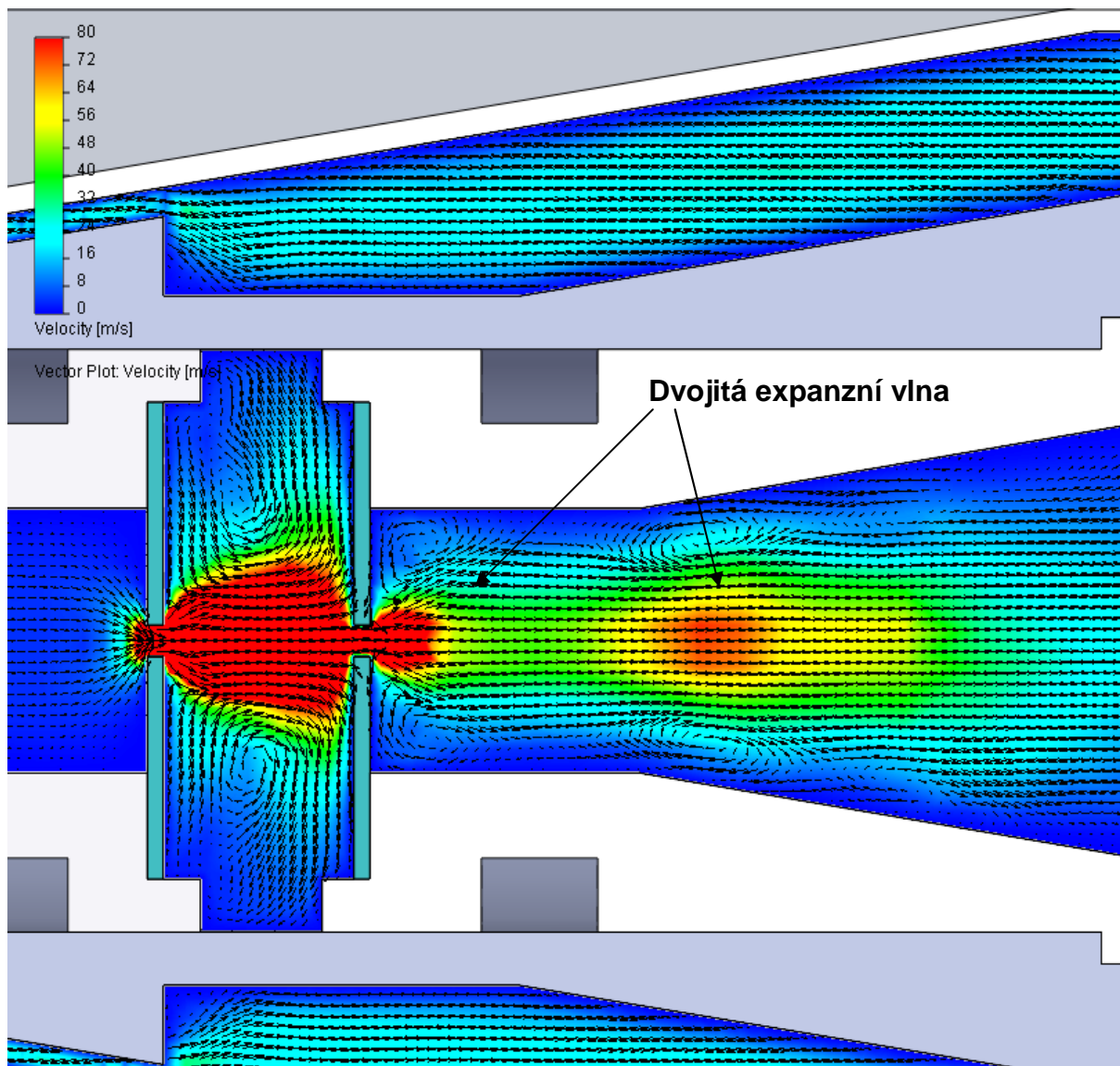
Grafické znázornění je na obrázku 27, kde jsou vidět výkyvy v tlaku u scintilátoru ovlivněné víry vznikajícími prouděním plynu mezi clonkami.



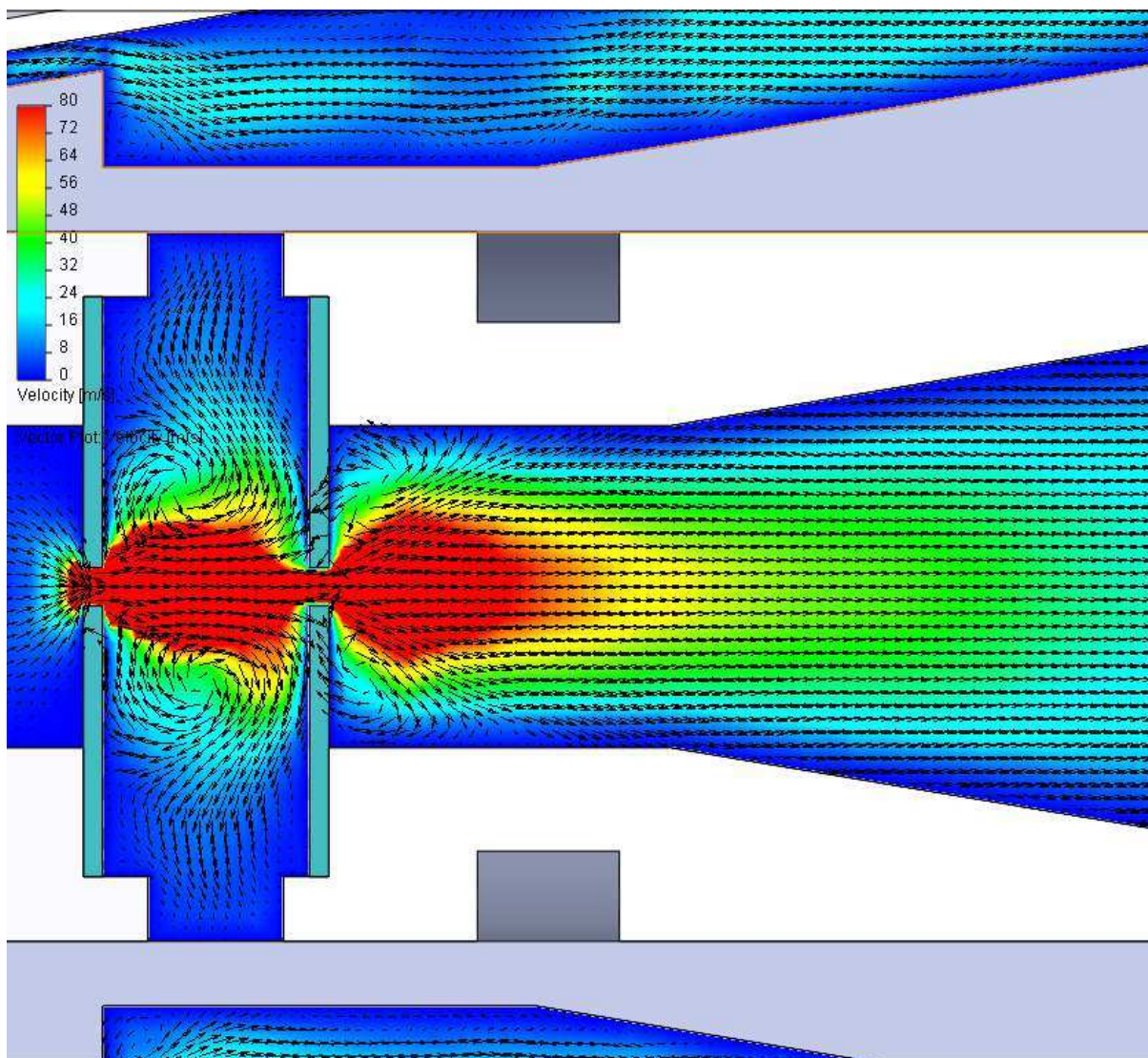
Obr. 27. Vliv vzdálenosti clonek a tlaku u vzorku na tlak u scintilátoru



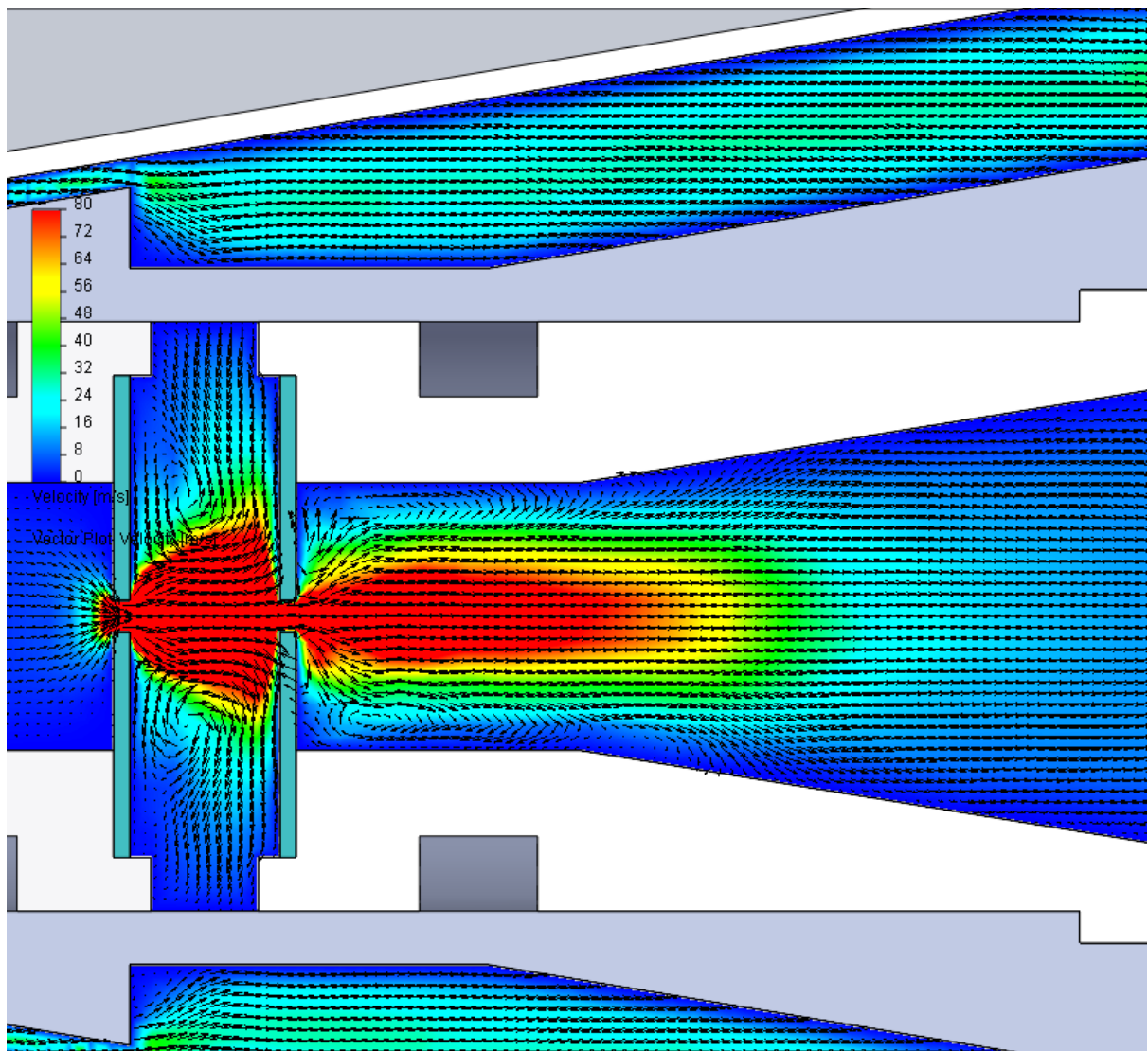
Obr. 28. Grafické znázornění vířů, vzdálenost clonek 4,0 mm a tlaku 1000 Pa



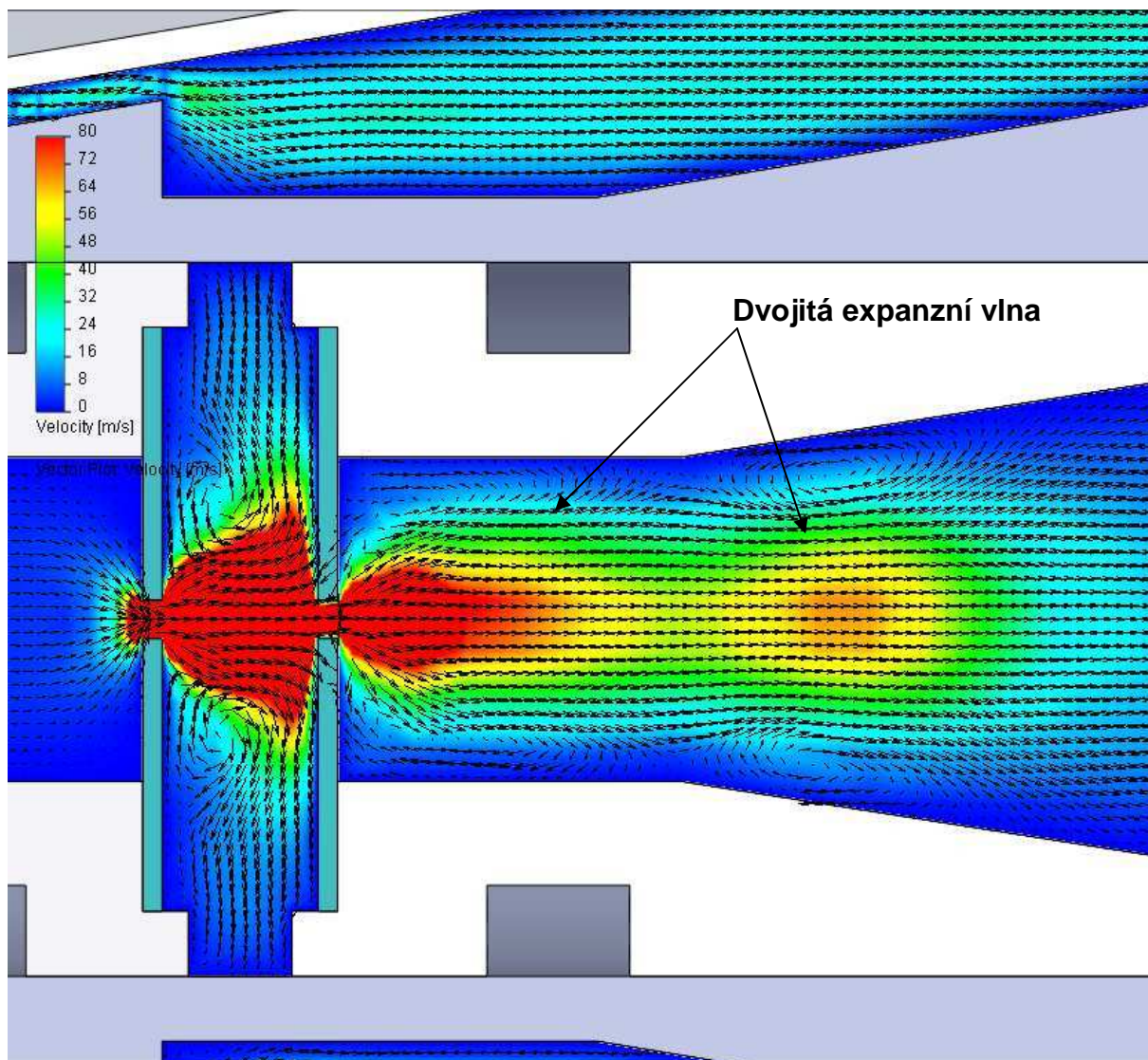
Obr. 29. Grafické znázornění vířů, vzdálenost clonek 3,6 mm a tlaku 1000 Pa



Obr. 30. Grafické znázornění vírů, vzdálenost clonek 3,2 mm a tlaku 1000 Pa



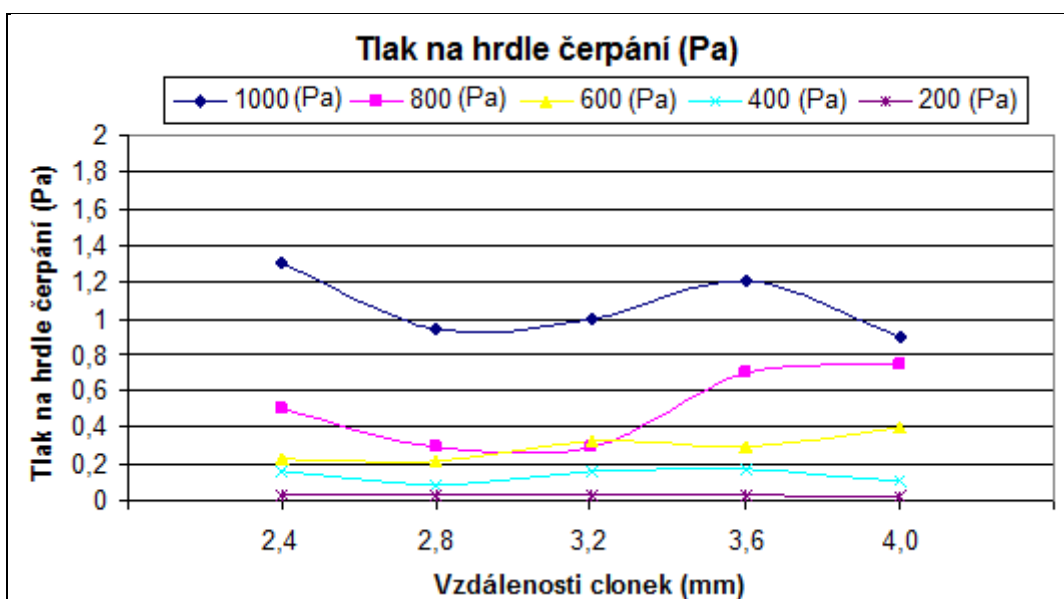
Obr. 31. Grafické znázornění vířů, vzdálenost clonek 2,8 mm a tlaku 1000 Pa



Obr. 32. Grafické znázornění vírů, vzdálenost clonek 2,4 mm a tlaku 1000 Pa

Důležitým poznatkem je, že vypočtené hodnoty u hrdla čerpání mají vyrovnané výsledky neprokazující uvedené nerovnoměrnosti. Tento fakt potvrzuje i průběh znázorněný na obrázku 32. V praxi je totiž možné umístit měрку právě až za hrdlo čerpání a tlak u scintilátoru je pak nutné ze získaných hodnot odhadnout. Tato práce dokazuje, že praktické měření je skutečně jen orientační, protože z uvedeného je patrné, že právě vzdálenost clonek hraje velmi důležitou roli vzhledem k podmínkám proudění ovlivňující tlak u scintilátoru.

Vypočtené hodnoty na hrdle čerpání vykazují vyrovnanost jen s malými odchylkami analogicky kopírující stav proudění v detektoru. Odchytky jsou tak nepatrné, že je v běžném experimentálním měření v praxi nelze zachytit a poznat dle nich vzniklou pulzaci za druhou clonkou. Z tohoto důvodu jsou tyto analýzy velmi důležité pro popis skutečného proudění v zařízení a ověření jeho správné funkce.

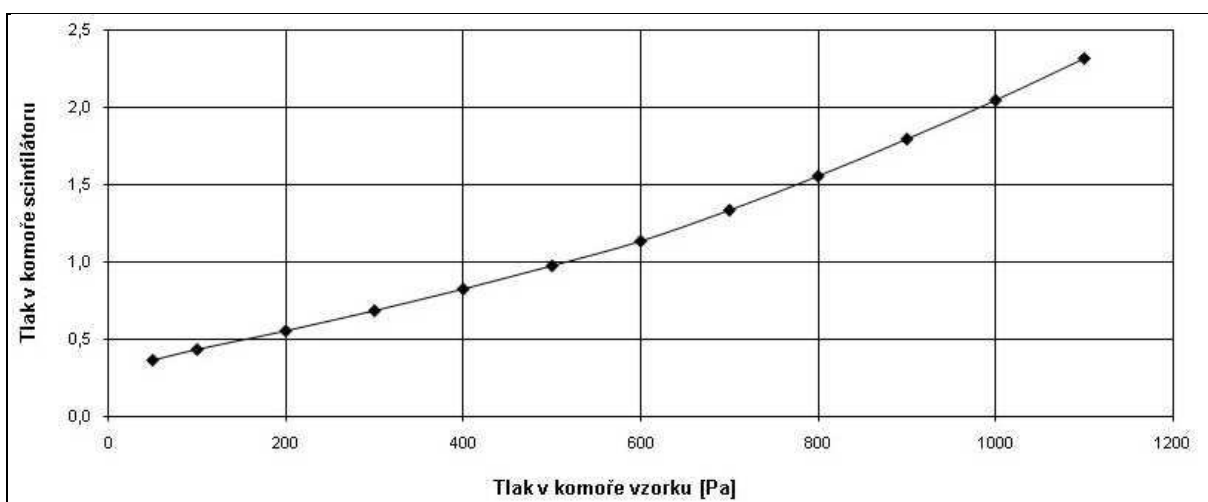


Obr. 33. Průběh tlaku na hrdle čerpání

Tlaky na hrdle čerpání sice v řádu viz. obrázek 33 odpovídají experimentálně naměřeným hodnotám, ale ve skutečnosti jsou tyto vypočtené hodnoty nižší než ty experimentálně stanovené (v řádu 0,55 – 2 Pa). Jedním z důvodů je, že v praxi je čerpadlo umístěno mnohem dále, než je nastavena okrajová podmínka nasimulovaného čerpadla. Při simulaci se k tomuto kroku přistupuje především z důvodu ušetření počtu buněk výpočtové sítě. Nastavení okrajové podmínky však nemá výrazný vliv na vypočtené hodnoty.

Tab. 8. Vliv tlaku v komoře vzorku na tlak u scintilátoru při vzdálenosti clonek 4,4 mm měřený na reálném detektoru

Tlak v komoře vzorku [Pa]	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Tlak v komoře scintilátoru [Pa]	0,36	0,43	0,55	0,68	0,82	0,97	1,13	1,33	1,55	1,79	2,04	2,31



Obr. 34. Vliv tlaku v komoře vzorku na tlak u scintilátoru při vzdálenosti clonek 4,4 mm měřený na reálném detektoru

Dalším důvodem nižších vypočtených hodnot může být netěsnost systému v praxi a nerovnoměrný chod čerpadla oproti ideálním podmínkám výpočtu.

Pro porovnání je na obrázku 34 a tabulce 8 je zobrazena závislost tlaku v komoře vzorku na tlaku u scintilátoru při vzdálenosti clonek 4,4 mm měřený na detektoru EREM na Ústavu přístrojové techniky AVČR. Jak je zřejmé, naměřené hodnoty na reálném detektoru se liší od vypočtených jen minimálně.

7. Závěr

Tato práce je zaměřena na vyhodnocení vlivu vzdálenosti clonek u scintilačního detektoru v environmentálním rastrovacím elektronovém mikroskopu. Předmětem stanovení je rychlost a tlak proudění v detektoru. Hodnoty rychlosti a tlaku jsou vyhodnoceny pomocí programu SolidWorks 2008 a jeho nadstavby COSMOS FloWorks.

V teoretické části jsem se zaměřil na seznámení s funkcí rastrovacího elektronového mikroskopu, popis jeho částí, včetně detektoru a popis proudění. Dále jsem zde uvedl základní informace o programu pro 3D modelování SolidWorks 2008 a jeho nadstavby COSMOS FloWorks. V experimentální části byl vytvořen model detektoru EREM, na němž byly provedeny simulace potřebné k vyhodnocení závislosti vzdálenosti clonek a tlaku v komoře vzorku na výsledném tlaku u scintilátoru (ten nesmí být vyšší než 8 Pa jinak by mohlo dojít k jeho poškození). Byly porovnávány vzdálenosti clonek 2,4 mm, 2,8 mm, 3,2 mm, 3,6 mm a 4,0 mm při hodnotách tlaku u hrdla detektoru 200 Pa, 400 Pa, 600 Pa, 800 Pa a 1000 Pa. Nejhorší odezvu měl detektor se vzdálenostmi clonek 2,4 mm a 3,6 mm, na kterém vznikala za druhou clonkou dvojitá expanzní vlna. Ta nadměrně zvyšovala tlak u scintilátoru, čímž by v praxi mohlo docházet k jeho poškození. Tento negativní jev se projevoval výrazněji při zvýšení tlaku na hrdle detektoru nad hodnotu přibližně 500 Pa. Při průměrném tlaku v detektoru měla vzdálenost clonek jen minimální vliv. Působením tohoto tlaku však docházelo k ovlivnění tlaku u scintilátoru. Nejnižších hodnot tlaku u scintilátoru bylo dosaženo při vzdálenosti clonek 3,2 mm a 4,0 mm. Hodnota tlaku u scintilátoru u těchto vzdáleností nepřesáhla 4,5 Pa. Kompletní výsledky simulací pro jednotlivé hodnoty vzdálenosti clonek a tlaků na hrdle detektoru jsou uvedeny v přílohách této práce.

Tato práce názorně ukazuje ohromné možnosti při vývoji produktů a jejich testování. Model lze vytvořit pomocí programu SolidWorks a jeho následné testování pak v nadstavbách tohoto programu. To přináší společně úsporu času při vývoji a testování nových produktů, a také úsporu nemalých finančních prostředků, které by jinak museli vynaložit na výrobu prototypů a jejich dlouhé testování. Výroba prototypu samozřejmě úplně neodpadá, ale díky simulacím je možné vyrobit prototyp s předem ověřenými parametry a zkrátit tak výrazně dobu následného testování. Jak dokazuje tato práce, lze pomocí počítačové simulace také odhalit skutečnosti, které nemohou být v praxi experimentálně zjištěny. Odpadá např. zkreslení vznikající při experimentálním měření z důvodů nevhodně umístěného měřicího zařízení (z technicko-konstrukčních důvodů jej nelze umístit lépe). Omezí se tak anomální výsledky z komory scintilátoru.

8. Seznam použitých zdrojů:

- [1] ČUDEK, P. *Scintilační detektor sekundárních elektronů pro ESEM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008
- [2] *Základy rastrovací elektronové mikroskopie* [cit. 2009-06-04]. Dostupné z WWW: <http://www.isibrno.cz/~bohunka/rem.pdf>
- [3] MAXA, J.: *Třírozměrné modelování a simulace*. VUT FEKT Brno: 2006
- [4] NEDĚLA, V., MAXA, J. *Environmental Scanning Electron Microscope AquasemII – the Design and Applications*. In *Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instruments*. Brno: Institute of Scientific Instruments of AS CR, 2006, s. 55 - 56, ISBN 80-239-6285-X
- [5] *Elektronová mikroskopie* [cit. 2009-03-02]. Dostupné z WWW: <http://home.pf.jcu.cz/~bilyto00/bak>
- [6] *Elektronová mikroskopie pro biology* [cit. 2009-04-01]. Dostupné z WWW: <http://www.paru.cas.cz/lem/book>
- [7] Frank L., Jiráček J., Reka A., Rozsívalová Z.: *Speciální diagnostika*
- [8] [cit. 2009-04-04]. Dostupné z WWW: <https://skripta.ft.tul.cz/akreditace/data/2007-11-20/16-02-10.pdf>
- [9] Bílý T.: *Fyzikální principy transmisní a skenovací elektronové mikroskopie*
- [10] Čudek P.: *Elektronová mikroskopie*
- [11] Lednický F.: *Pohledy do mikrosvěta*
- [12] *Solidworks* [cit. 2009-05-04]. Dostupné z WWW: <http://www.solidworks.cz/>
- [13] Neděla V., Aufrata R.: *Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie*, *Československý časopis pro fyziku*, (3) (2005) 251.
- [14] BOUŠEK, J. *Vakuová technika*. VUT FEKT Brno: 2005
- [15] DRÁBKOVÁ, S., *Mechanika tekutin*, Technická Univerzita Ostrava: 2007
- [16] AMBROŽ, V. *Analýza rozložení tlaků v detektoru SE pomocí systému Cosmos FloWorks*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 94 s., 25 s. příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Mgr. Jiří Maxa, Ph.D.
- [17] *Srážky molekul, střední volná dráha* [cit. 2009-05-04]. Dostupné z WWW: http://web.natur.cuni.cz/~zuskova/ktp_2_so.pdf

Seznam zkratek

EREM	- Environmentální rastrovací elektronový mikroskop
TEM	- Transmisní elektronový mikroskop
REM	- Rastrovací elektronový mikroskop
RTG	- Rentgenové záření
PE	- Primární elektrony
SE	- Sekundární elektrony
BSE	- Backscattered electrons = zpětně odražené elektrony
TE	- Transmitted electrons = Prošlé elektrony
CFD	- Computational fluid dynamics = Výpočty dynamických toků
CAD	- Computer-aided design = počítačem podporované projektování
AVI	- Audio Video Interleave = multimediální kontejner, který obsahuje jednu nebo více datových stop
BMP	- Microsoft Windows Bitmap = počítačový formát pro ukládání rastrové grafiky
JPEG	- Joint Photographic Experts Group = standardní metoda ztrátové komprese používané pro ukládání počítačových obrázků ve fotorealistické kvalitě
VRML	- Virtual Reality Modeling Language = grafický formát založený na deklarativním programovacím jazyce, který byl navržen především pro popis trojrozměrných scén obsahujících aktivní i pasivní objekty

Seznam obrázků

Obr. 1.	Porovnání konstrukce světelného mikroskopu, transmisního a rastrovacího elektronového mikroskopu.....	11
Obr. 2.	Schéma rastrovacího elektronového mikroskopu [1].....	13
Obr. 3.	Signály vznikající při dopadu elektronového svazku na povrch pevné látky [1]	14
Obr. 4.	Velikost objemu, ze kterého se uvolňují některé signály [1].....	14
Obr. 5.	Vznik a typy sekundárních elektronů [1].....	16
Obr. 6.	Umístění Scintilačního detektoru v komoře mikroskopu	17
Obr. 7.	Paprskový diagram elektronově-optické soustavy REM [2]	18
Obr. 8.	Vakuový systém EREM.....	22
Obr. 9.	Povrch oka mouchy[5].....	23
Obr. 10.	Prostorový náboj – končetina kloše [5]	23
Obr. 11.	Poškození povrchu elektronovým svazkem – povrch elektronického čipu [5]	24
Obr. 12.	Mikroskop EREM.....	26
Obr. 13.	Scintilační detektor SE.....	28
Obr. 14.	Princip scintilačního detektoru sekundárních elektronů pro EREM.....	29
Obr. 15.	Reynoldsův pokus [15]	34
Obr. 16.	Rozptyl svazku primárních elektronů	41
Obr. 17.	Tři základní rozptylové režimy svazku primárních elektronů	42
Obr. 18.	Dráha elektronů od jejich vstupu až k scintilátoru.....	43
Obr. 19.	Dráha sekundárních elektronů v detektoru	43
Obr. 20.	Nastavení sítě ve výpočtové oblasti detektoru – celý detektor	46
Obr. 21.	Nastavení sítě ve výpočtové oblasti detektoru – vstupní část detektoru.....	47
Obr. 22.	Nastavení sítě ve výpočtové oblasti detektoru – detail oblasti clonek.....	47
Obr. 23.	Nastavení sítě ve výpočtové oblasti detektoru – detail prostoru mezi clonkami	48
Obr. 24.	Schéma detektoru sekundárních elektronů pro EREM.....	49
Obr. 25.	Schematické zobrazení detektoru se zadáním okrajových podmínek.....	49
Obr. 26.	Vliv vzdálenosti clonek a tlaku u vzorku na průměrný tlak v detektoru	51
Obr. 27.	Vliv vzdálenosti clonek a tlaku u vzorku na tlak u scintilátoru	52
Obr. 28.	Grafické znázornění vírů, vzdálenost clonek 4,0 mm a tlaku 1000 Pa	53
Obr. 29.	Grafické znázornění vírů, vzdálenost clonek 3,6 mm a tlaku 1000 Pa	54
Obr. 30.	Grafické znázornění vírů, vzdálenost clonek 3,2 mm a tlaku 1000 Pa	55

Obr. 31.	Grafické znázornění vírů, vzdálenost clonek 2,8 mm a tlaku 1000 Pa	56
Obr. 32.	Grafické znázornění vírů, vzdálenost clonek 2,4 mm a tlaku 1000 Pa	57
Obr. 33.	Průběh tlaku na hrdle čerpaní.....	58
Obr. 34.	Vliv tlaku v komoře vzorku na tlak u scintilátoru při vzdálenosti clonek 4,4 mm měřený na reálném detektoru.....	58
Obr. 35.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	73
Obr. 36.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	74
Obr. 37.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	74
Obr. 38.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	75
Obr. 39.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	76
Obr. 40.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	76
Obr. 41.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	77
Obr. 42.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	78
Obr. 43.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	78
Obr. 44.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	79
Obr. 45.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	80
Obr. 46.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	80
Obr. 47.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	81
Obr. 48.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	82
Obr. 49.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	82
Obr. 50.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	83

Obr. 51.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	84
Obr. 52.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	84
Obr. 53.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	85
Obr. 54.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	86
Obr. 55.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	86
Obr. 56.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	87
Obr. 57.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 3,2mm.....	88
Obr. 58.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	88
Obr. 59.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	89
Obr. 60.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 3,6mm.....	90
Obr. 61.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	90
Obr. 62.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	91
Obr. 63.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	92
Obr. 64.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	92
Obr. 65.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	93
Obr. 66.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	94
Obr. 67.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	94
Obr. 68.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	95
Obr. 69.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	96

Obr. 70.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	96
Obr. 71.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	97
Obr. 72.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	98
Obr. 73.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	98
Obr. 74.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	99
Obr. 75.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	100
Obr. 76.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	100
Obr. 77.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	101
Obr. 78.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	102
Obr. 79.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	102
Obr. 80.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	103
Obr. 81.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	104
Obr. 82.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	104
Obr. 83.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	105
Obr. 84.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	106
Obr. 85.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	106
Obr. 86.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	107
Obr. 87.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	108
Obr. 88.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	108

Obr. 89.	Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	109
Obr. 90.	Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	110
Obr. 91.	Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	110
Obr. 92.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,4 mm	111
Obr. 93.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	111
Obr. 94.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,8 mm	112
Obr. 95.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	112
Obr. 96.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,2 mm	113
Obr. 97.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	113
Obr. 98.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,6 mm	114
Obr. 99.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	114
Obr. 100.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 4,0 mm	115
Obr. 101.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	115
Obr. 102.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,4 mm	116
Obr. 103.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	116
Obr. 104.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,8 mm	117
Obr. 105.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	117
Obr. 106.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,2 mm	118
Obr. 107.	Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	118

Obr. 108. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,6 mm	119
Obr. 109. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	119
Obr. 110. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 4,0 mm	120
Obr. 111. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	120
Obr. 112. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,4 mm	121
Obr. 113. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	121
Obr. 114. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,8 mm	122
Obr. 115. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	122
Obr. 116. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,2 mm	123
Obr. 117. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	123
Obr. 118. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,6 mm	124
Obr. 119. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	124
Obr. 120. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 4,0 mm	125
Obr. 121. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	125
Obr. 122. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,4 mm	126
Obr. 123. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	126
Obr. 124. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,8 mm	127
Obr. 125. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	127
Obr. 126. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,2 mm	128

Obr. 127. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	128
Obr. 128. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,6 mm	129
Obr. 129. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	129
Obr. 130. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,4 mm	130
Obr. 131. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,4 mm.....	130
Obr. 132. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,8 mm	131
Obr. 133. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,8 mm.....	131
Obr. 134. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,2 mm	132
Obr. 135. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,2 mm.....	132
Obr. 136. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,6 mm	133
Obr. 137. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,6 mm.....	133
Obr. 138. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 4,0 mm	134
Obr. 139. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 4,0 mm.....	134

Seznam tabulek

Tab. 1. Rozdělení tlaků a vakua s příklady použití [16]	37
Tab. 2. Závislost záchytného průřezu na urychlovacím napětí.....	41
Tab. 3. Základní nastavení velikosti sítě.....	45
Tab. 4. Doplnující nastavení velikosti sítě	45
Tab. 5. Nastavení adaptivního zjemnění sítě.....	46
Tab. 6. Vliv vzdálenosti clonek a tlaku u vzorku na průměrný tlak v detektoru	50
Tab. 7. Vliv vzdálenosti clonek a tlaku u vzorku na tlak u scintilátoru	52
Tab. 8. Vliv tlaku v komoře vzorku na tlak u scintilátoru při vzdálenosti clonek 4,4 mm měřený na reálném detektoru.....	58

Seznam příloh

Příloha A.....	73
Tlak 200 Pa vzdálenost clonek 2,4 mm	73
Zobrazení rozložení rychlosti	73
Zobrazení rozložení tlaku	74
Zobrazení vektorů proudění	74
Tlak 200 Pa vzdálenost clonek 2,8 mm	75
Zobrazení rozložení rychlosti	75
Zobrazení rozložení tlaku	76
Zobrazení vektorů proudění	76
Tlak 200 Pa vzdálenost clonek 3,2 mm	77
Zobrazení rozložení rychlosti	77
Zobrazení rozložení tlaku	78
Zobrazení vektorů proudění	78
Tlak 200 Pa vzdálenost clonek 3,6 mm	79
Zobrazení rozložení rychlosti	79
Zobrazení rozložení tlaku	80
Zobrazení vektorů proudění	80
Tlak 200 Pa vzdálenost clonek 4,0 mm	81
Zobrazení rozložení rychlosti	81
Zobrazení rozložení tlaku	82
Zobrazení vektorů proudění	82
Tlak 400 Pa vzdálenost clonek 2,4 mm	83
Zobrazení rozložení rychlosti	83
Zobrazení rozložení tlaku	84
Zobrazení vektorů proudění	84
Tlak 400 Pa vzdálenost clonek 2,8 mm	85
Zobrazení rozložení rychlosti	85
Zobrazení rozložení tlaku	86
Zobrazení vektorů proudění	86
Tlak 400 Pa vzdálenost clonek 3,2 mm	87
Zobrazení rozložení rychlosti	87
Zobrazení rozložení tlaku	88
Zobrazení vektorů proudění	88
Tlak 400 Pa vzdálenost clonek 3,6 mm	89
Zobrazení rozložení rychlosti	89
Zobrazení rozložení tlaku	90
Zobrazení vektorů proudění	90
Tlak 400 Pa vzdálenost clonek 4,0 mm	91
Zobrazení rozložení rychlosti	91

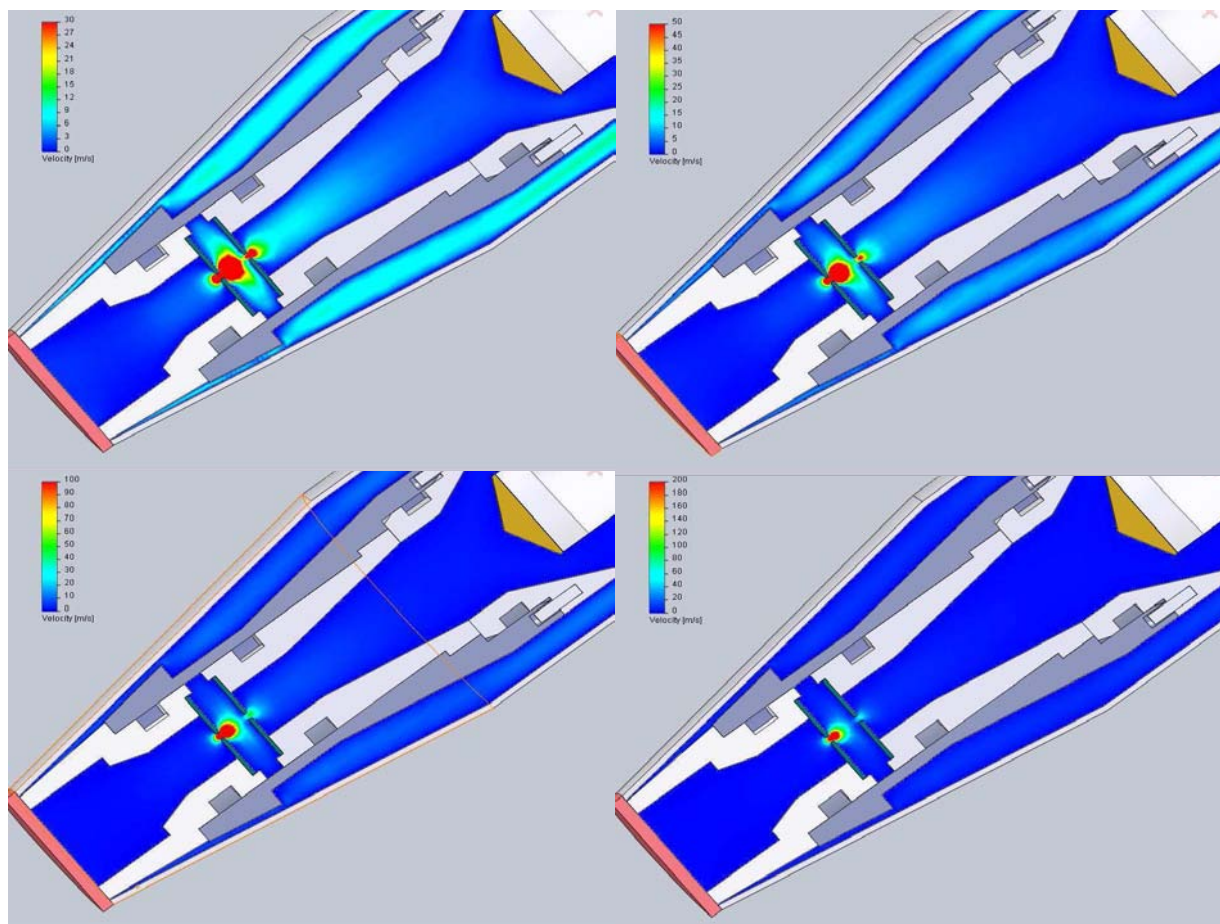
Zobrazení rozložení tlaku	92
Zobrazení vektorů proudění	92
Tlak 600 Pa vzdálenost clonek 2,4 mm	93
Zobrazení rozložení rychlosti	93
Zobrazení rozložení tlaku	94
Zobrazení vektorů proudění	94
Tlak 600 Pa vzdálenost clonek 2,8 mm	95
Zobrazení rozložení rychlosti	95
Zobrazení rozložení tlaku	96
Zobrazení vektorů proudění	96
Tlak 600 Pa vzdálenost clonek 3,2 mm	97
Zobrazení rozložení rychlosti	97
Zobrazení rozložení tlaku	98
Zobrazení vektorů proudění	98
Tlak 600 Pa vzdálenost clonek 3,6 mm	99
Zobrazení rozložení rychlosti	99
Zobrazení rozložení tlaku	100
Zobrazení vektorů proudění	100
Tlak 600 Pa vzdálenost clonek 4,0 mm	101
Zobrazení rozložení rychlosti	101
Zobrazení rozložení tlaku	102
Zobrazení vektorů proudění	102
Tlak 800 Pa vzdálenost clonek 2,4 mm	103
Zobrazení rozložení rychlosti	103
Zobrazení rozložení tlaku	104
Zobrazení vektorů proudění	104
Tlak 800 Pa vzdálenost clonek 2,8 mm	105
Zobrazení rozložení rychlosti	105
Zobrazení rozložení tlaku	106
Zobrazení vektorů proudění	106
Tlak 800 Pa vzdálenost clonek 3,2 mm	107
Zobrazení rozložení rychlosti	107
Zobrazení rozložení tlaku	108
Zobrazení vektorů proudění	108
Tlak 800 Pa vzdálenost clonek 3,6 mm	109
Zobrazení rozložení rychlosti	109
Zobrazení rozložení tlaku	110
Zobrazení vektorů proudění	110

Příloha B.....	111
Tlak v komoře vzorku 200 Pa.....	111
Tlak v komoře vzorku 400 Pa.....	116
Tlak v komoře vzorku 600 Pa.....	121
Tlak v komoře vzorku 800 Pa.....	126
Tlak v komoře vzorku 1000 Pa.....	130

Příloha A

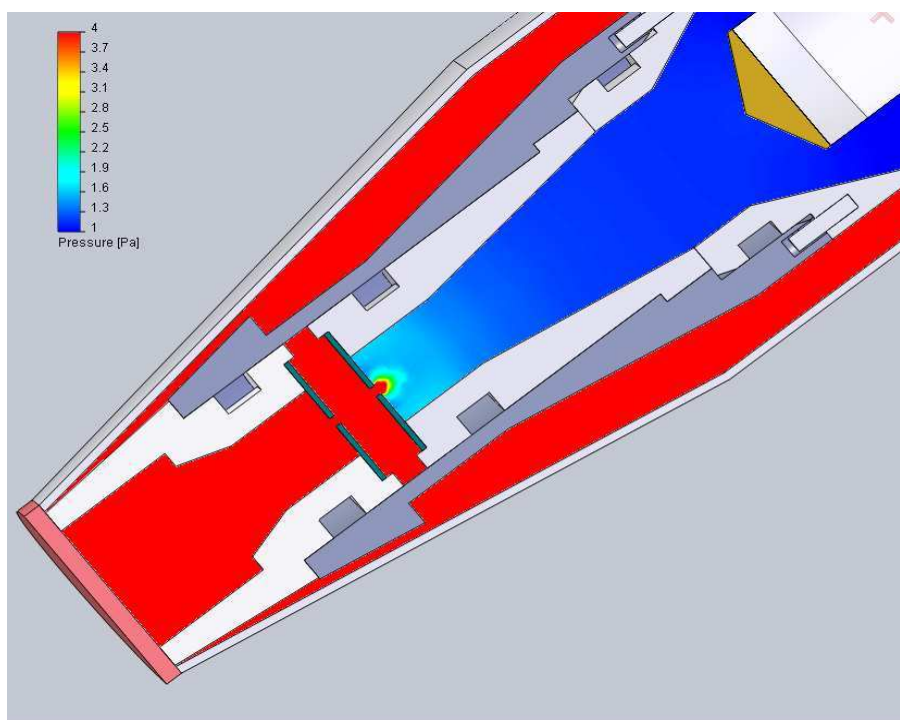
Tlak 200 Pa vzdálenost clonek 2,4 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



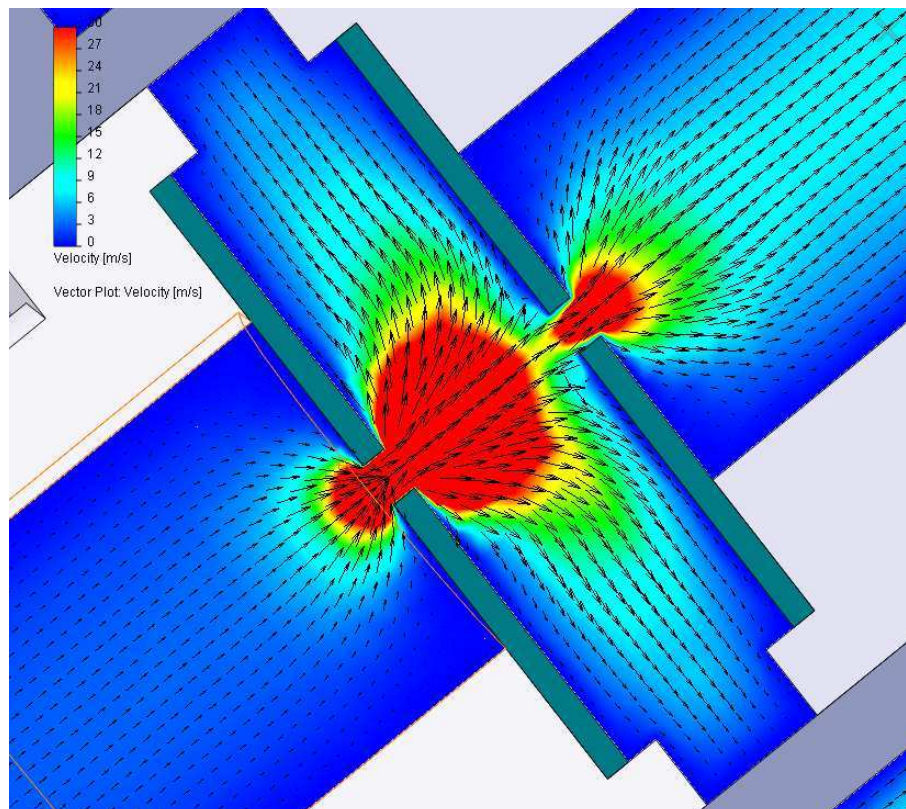
Obr. 35. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 36. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm

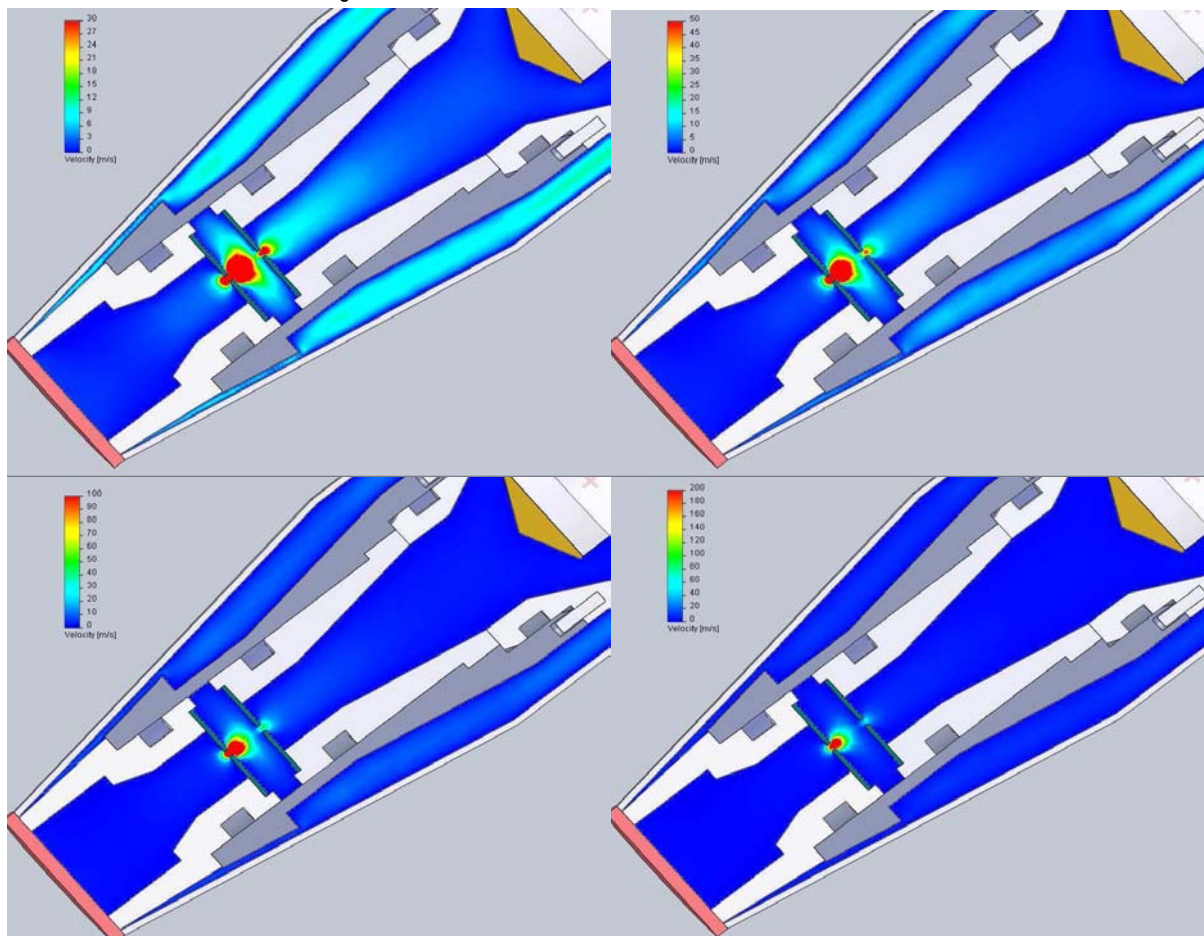
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 37. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm

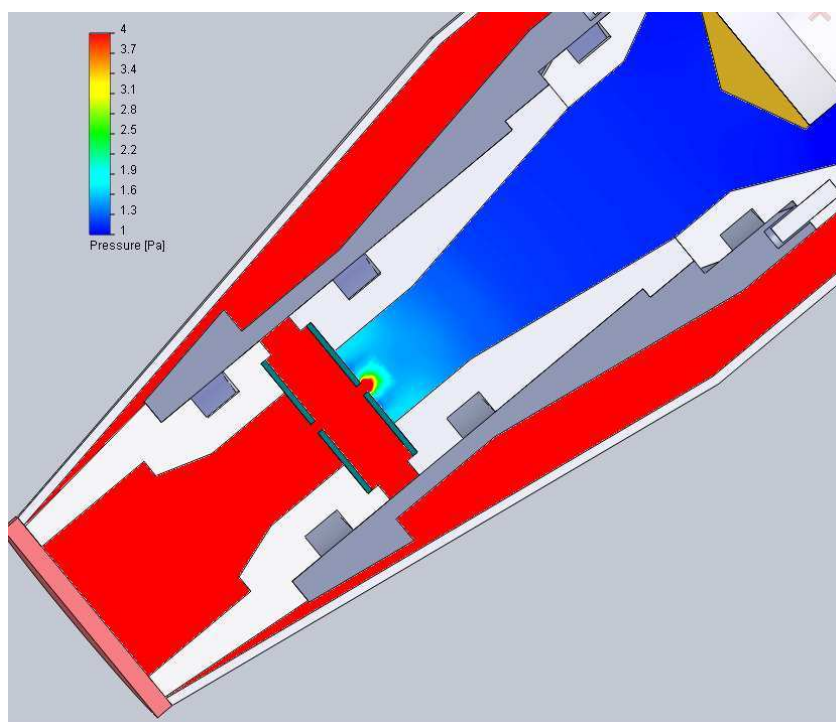
Tlak 200 Pa vzdálenost clonek 2,8 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



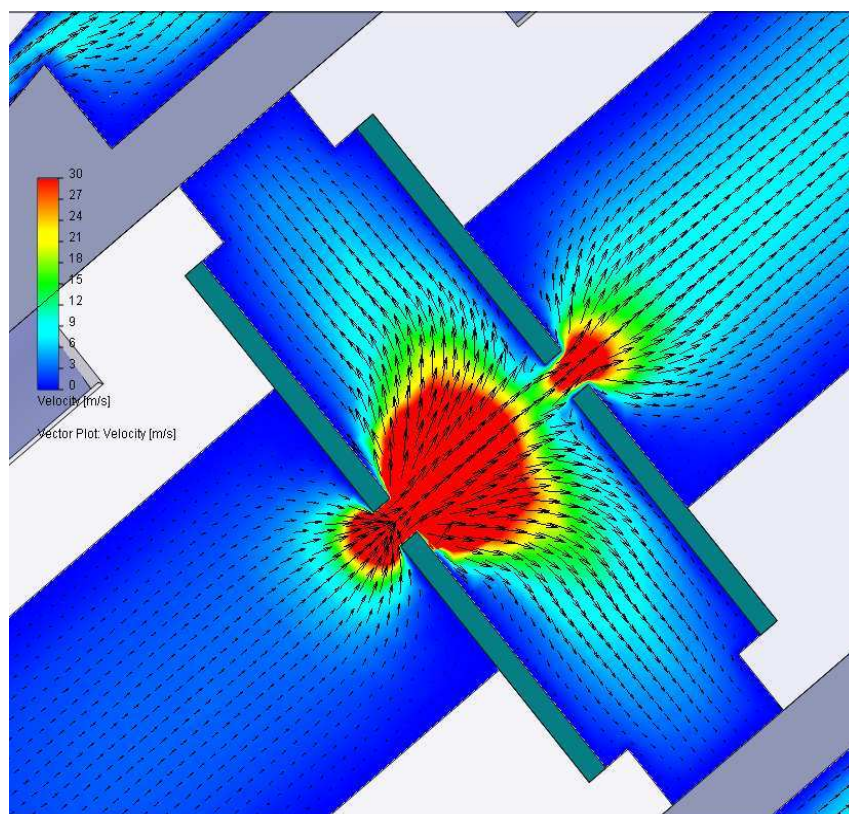
Obr. 38. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 39. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

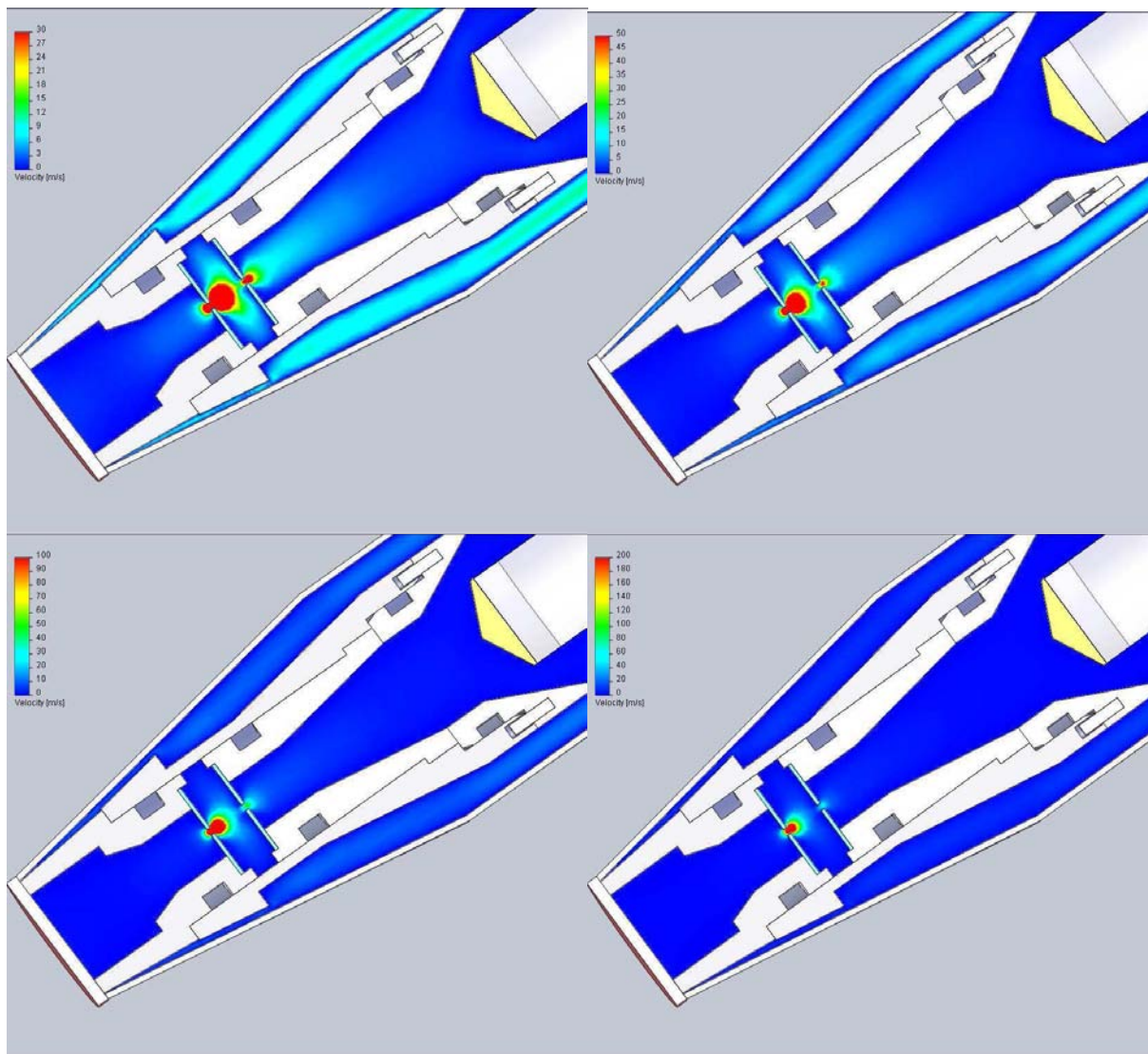
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 40. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

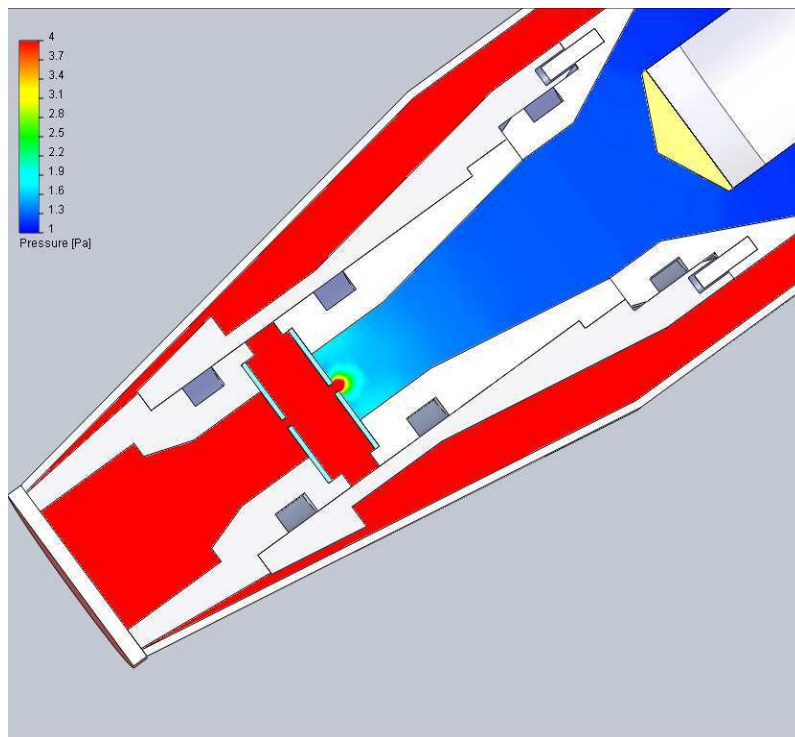
Tlak 200 Pa vzdálenost clonek 3,2 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



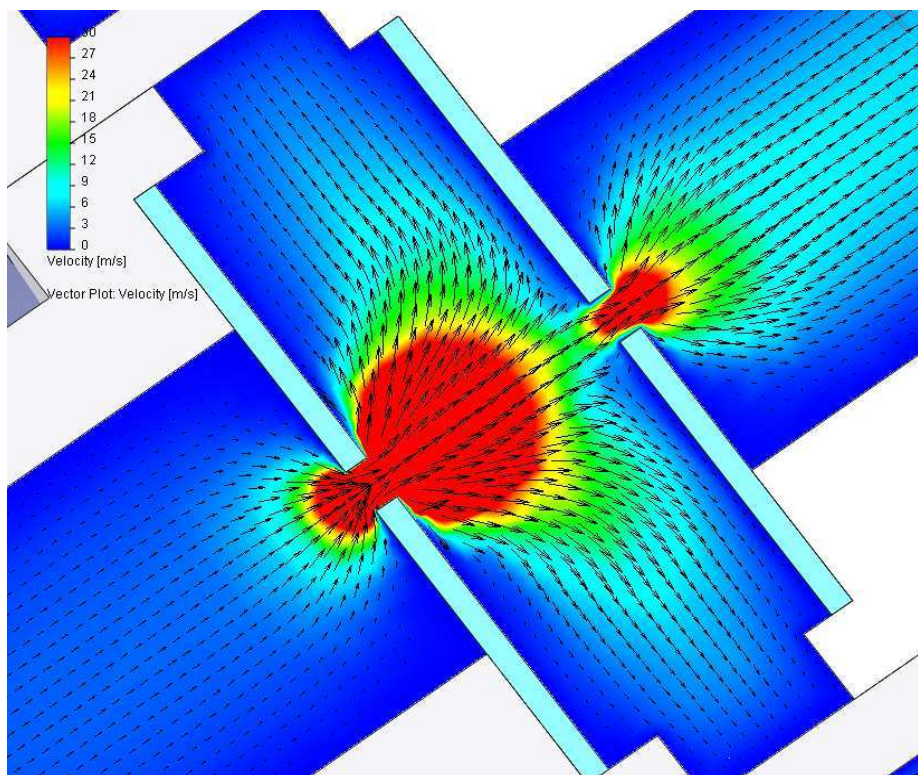
Obr. 41. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 42. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm

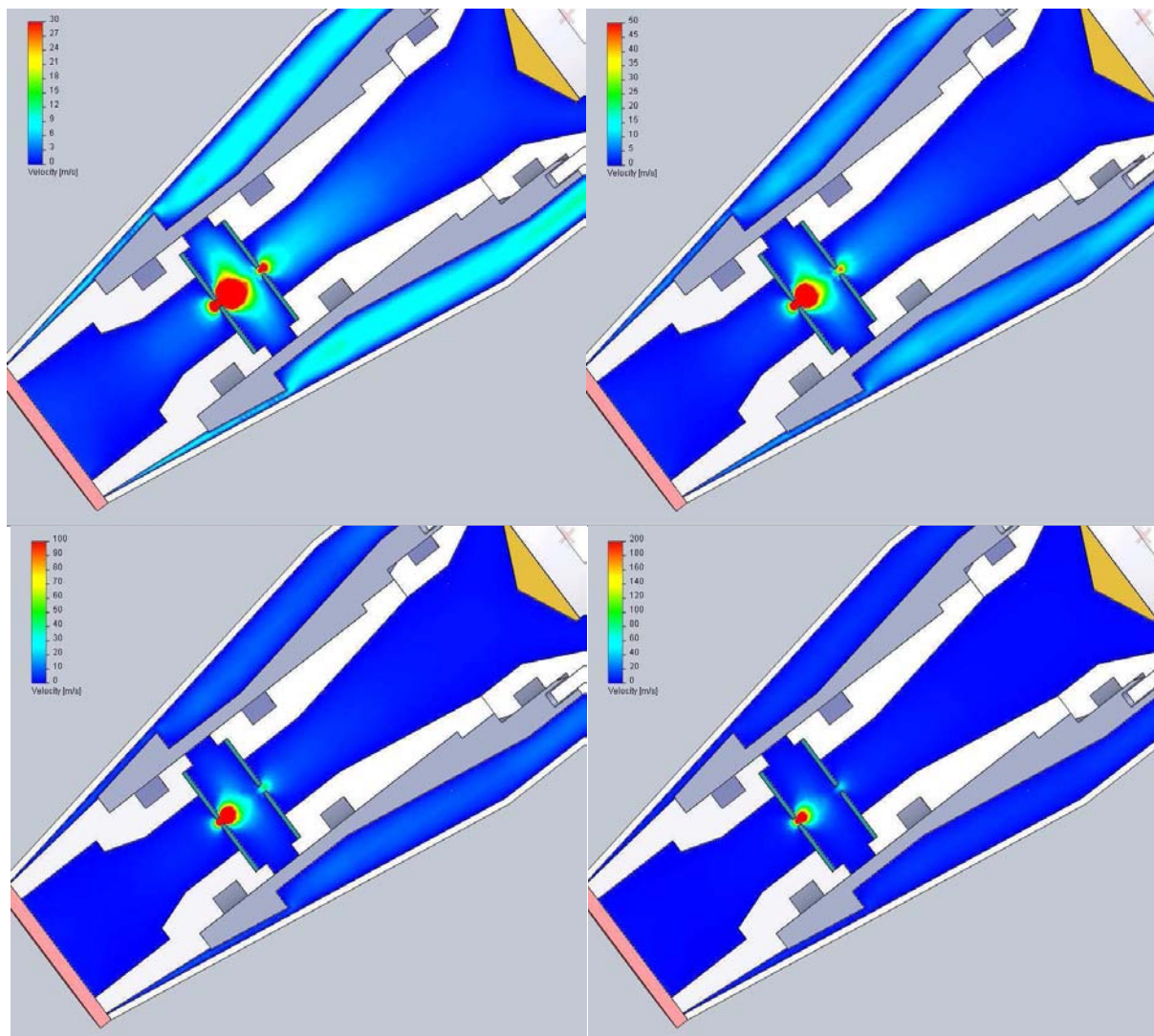
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 43. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

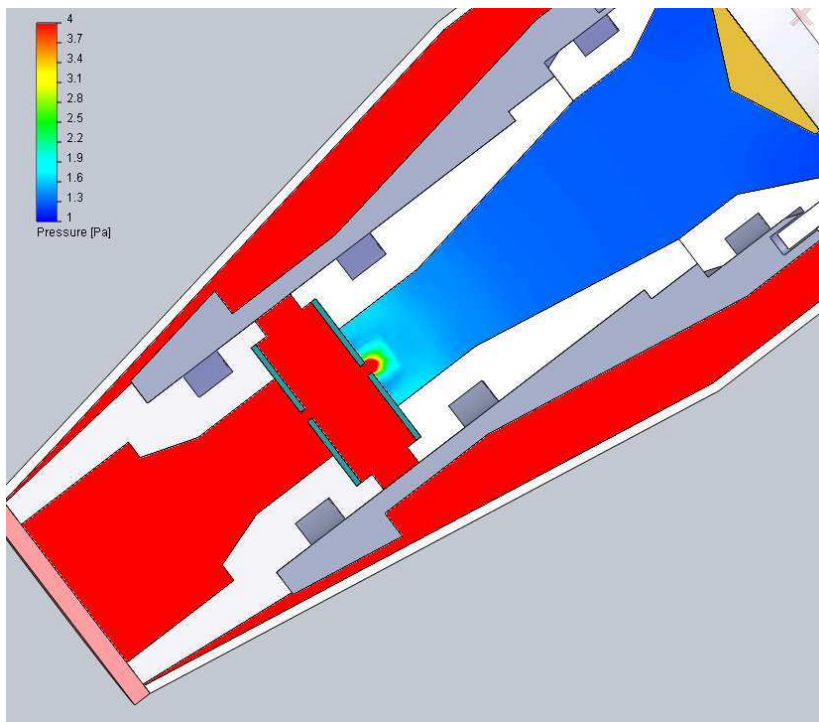
Tlak 200 Pa vzdálenost clonek 3,6 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



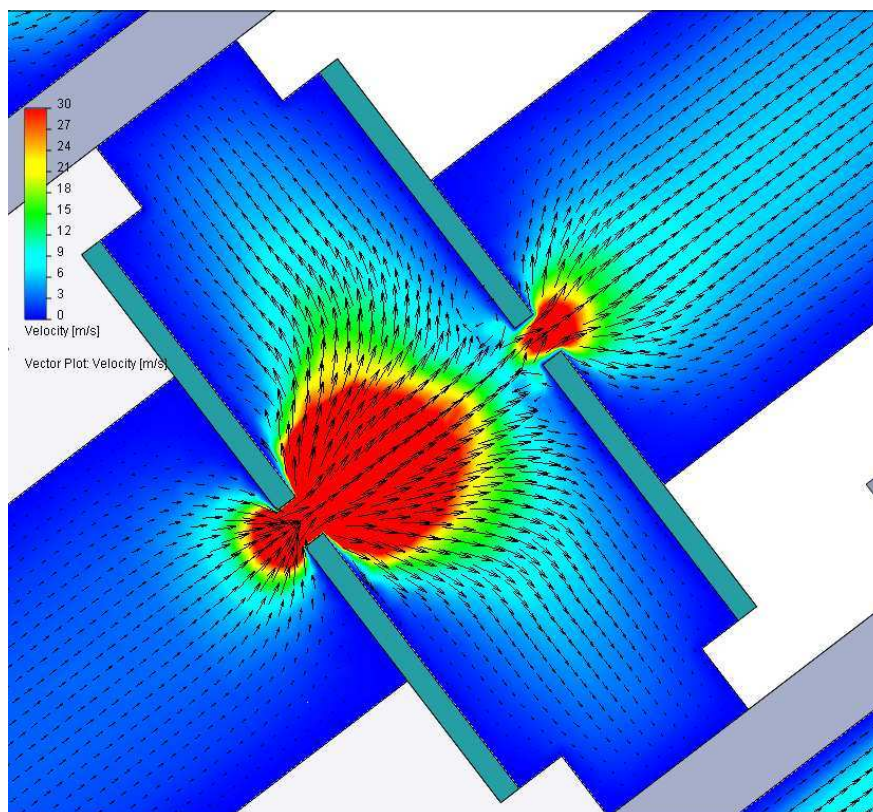
Obr. 44. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 45. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm

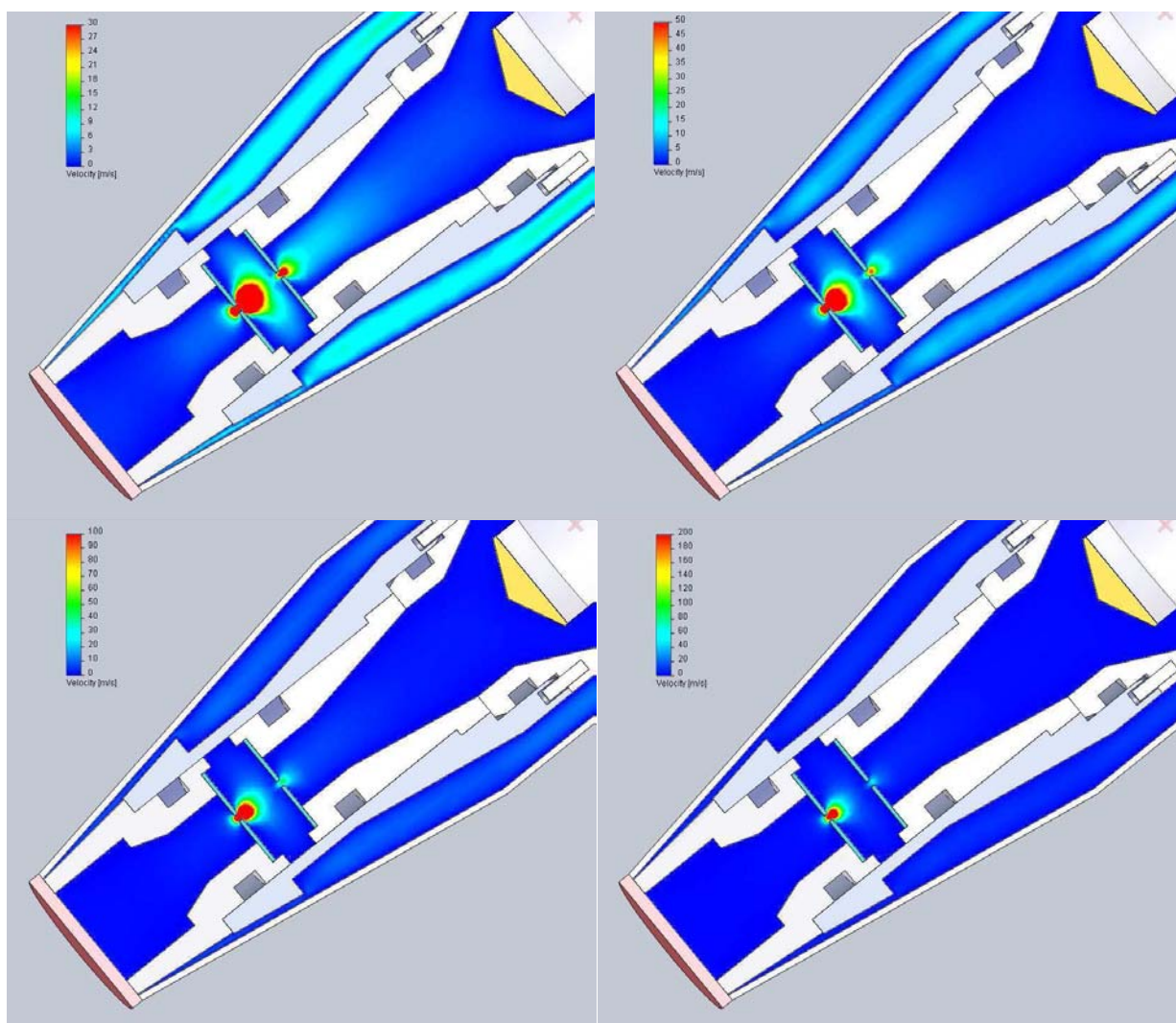
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 46. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm

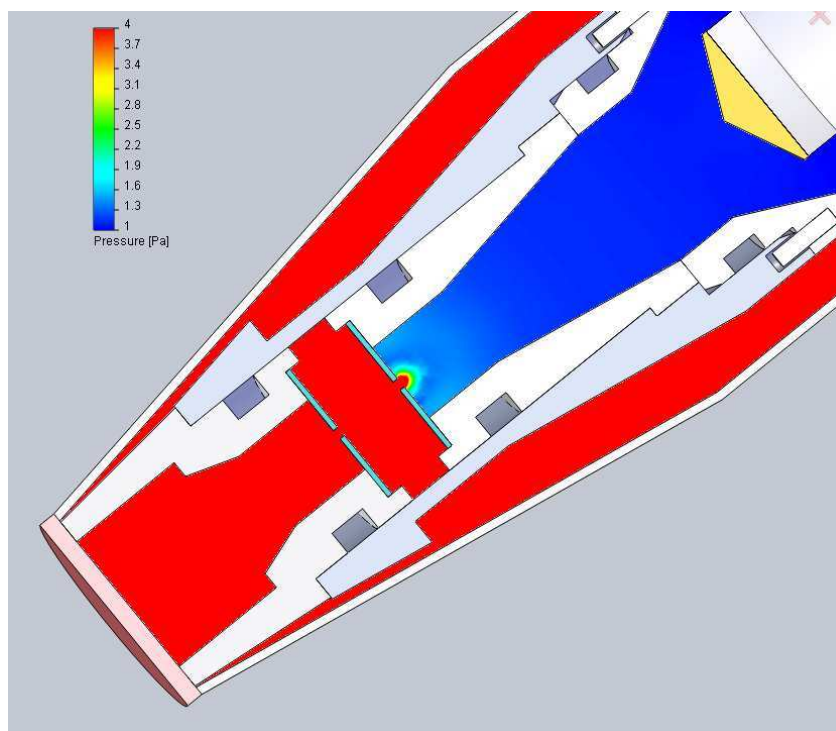
Tlak 200 Pa vzdálenost clonek 4,0 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



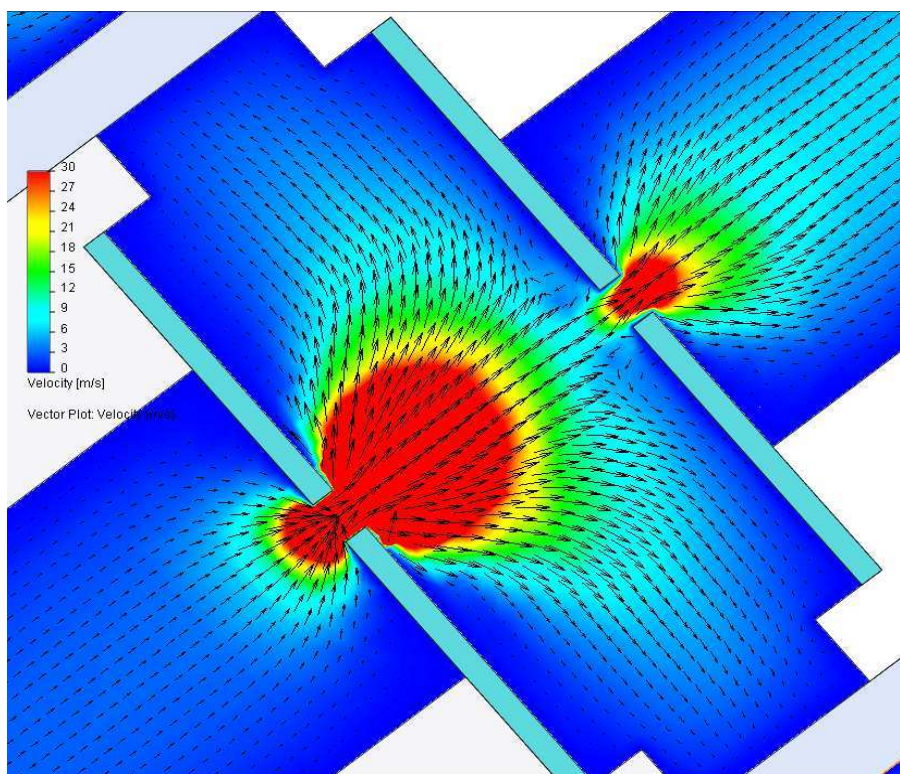
Obr. 47. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 48. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm

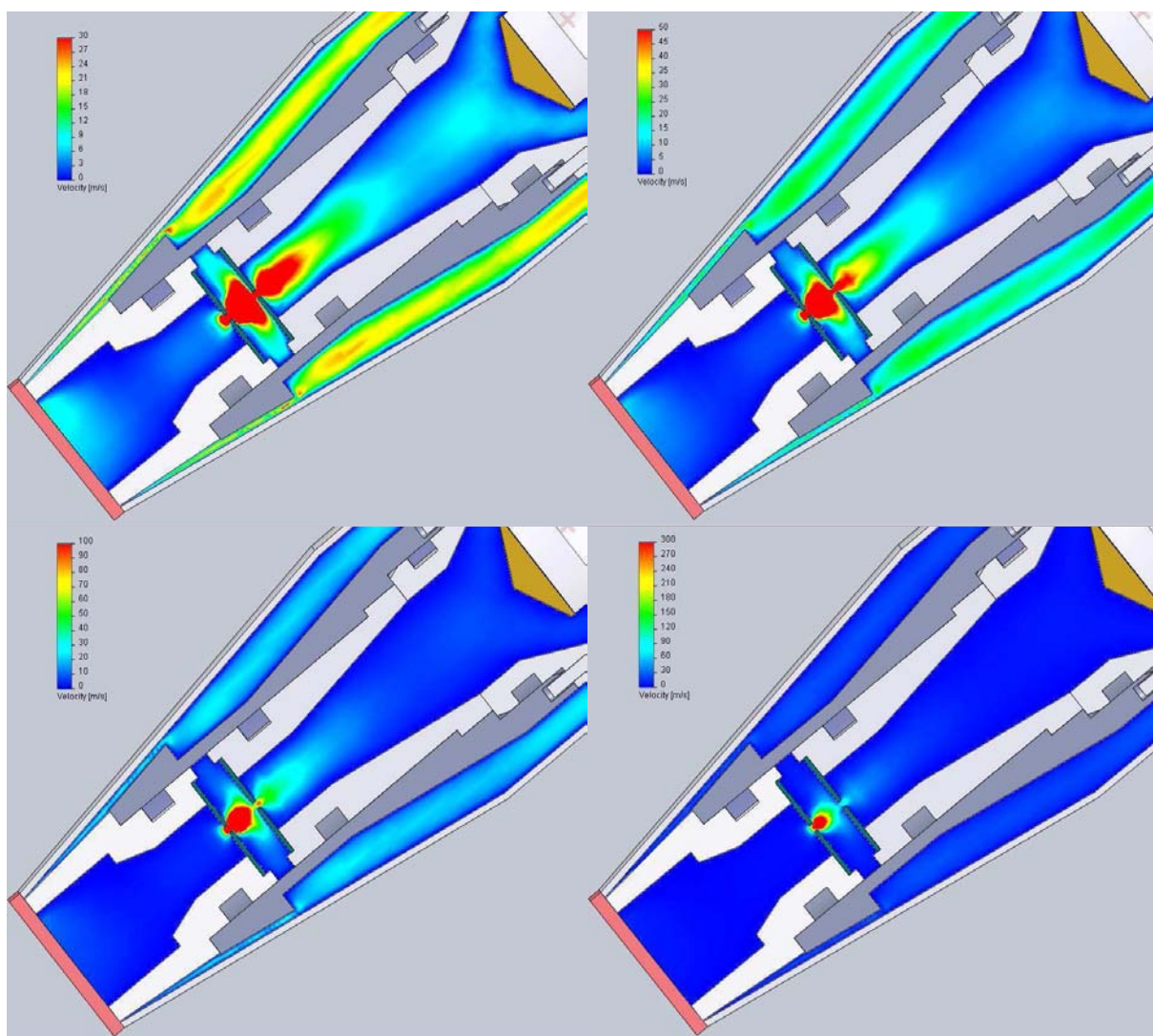
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 49. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 200 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm

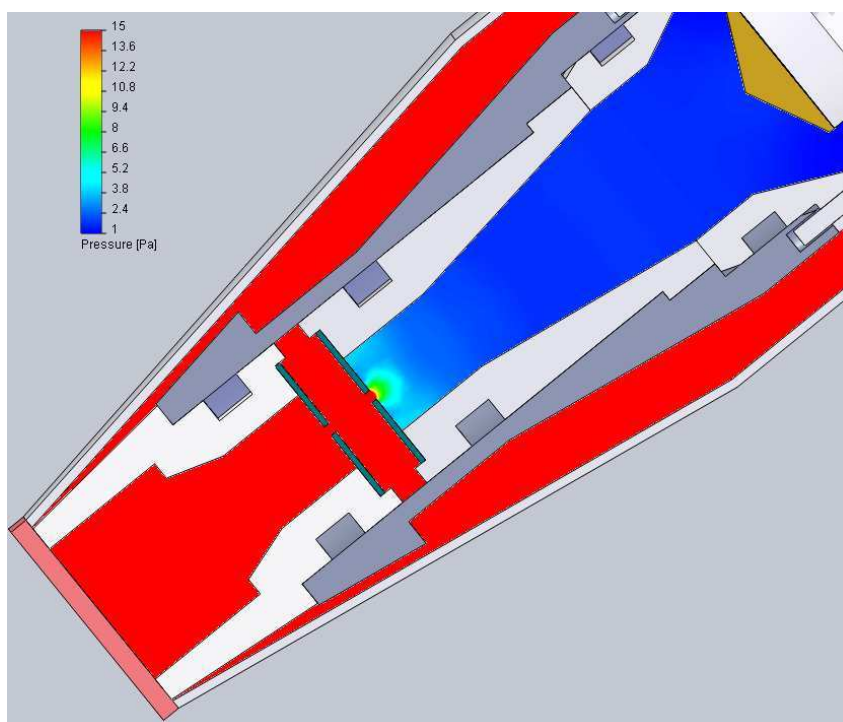
Tlak 400 Pa vzdálenost clonek 2,4 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



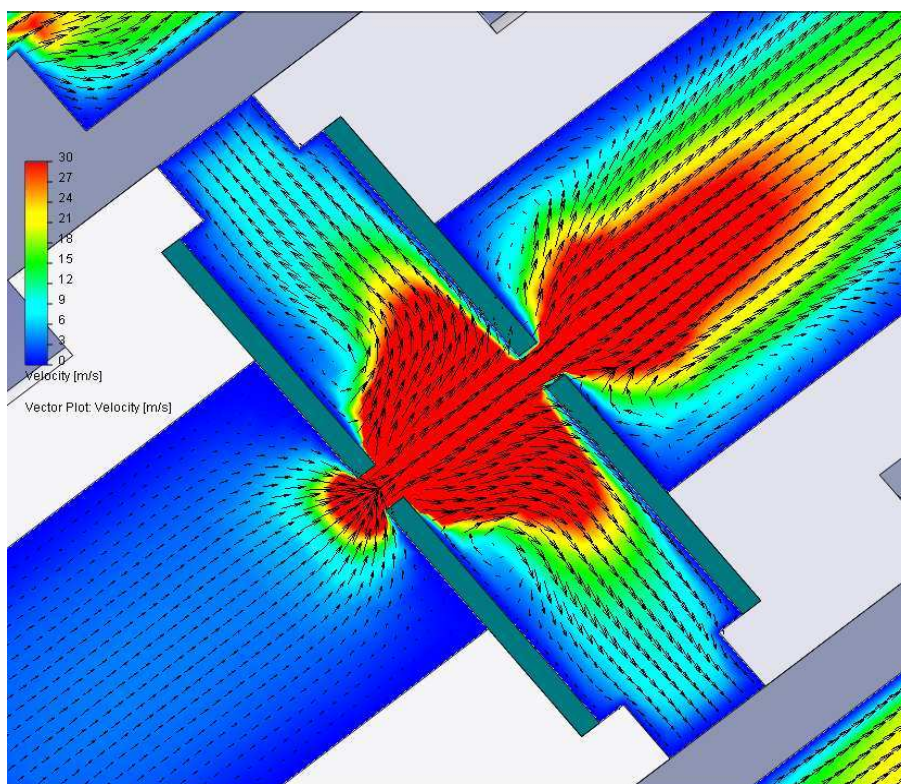
Obr. 50. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 51. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm

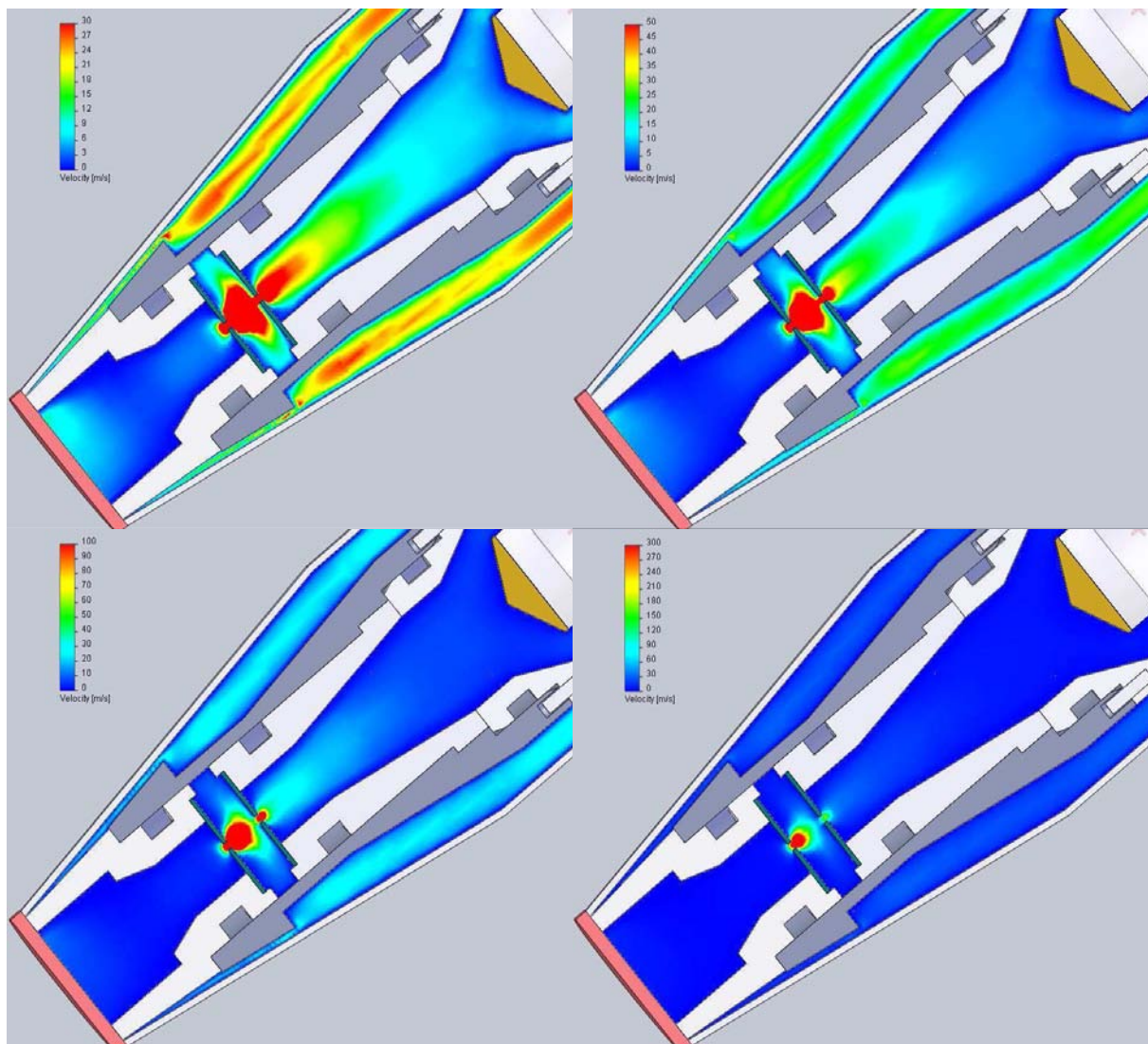
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 52. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm

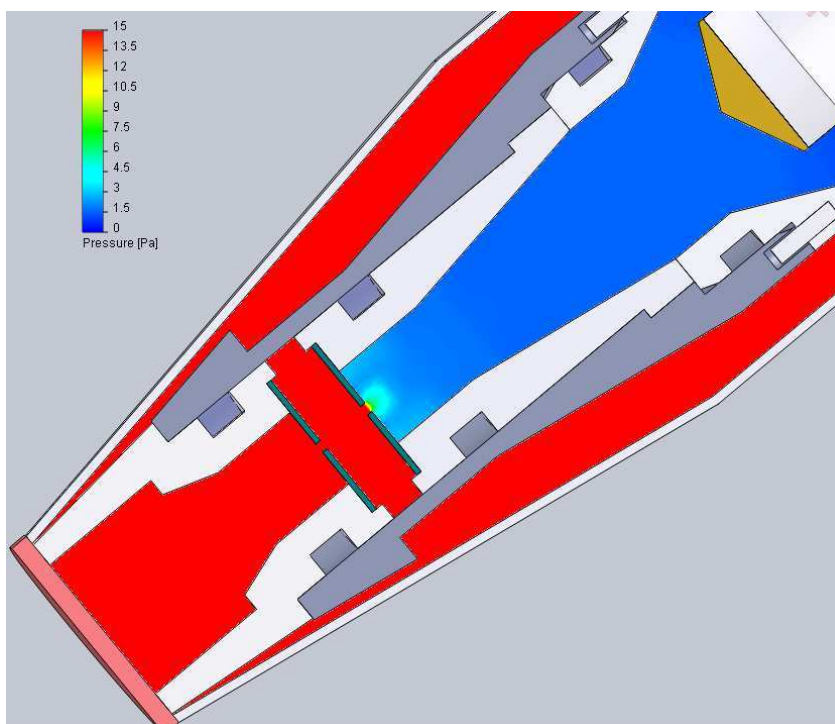
Tlak 400 Pa vzdálenost clonek 2,8 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



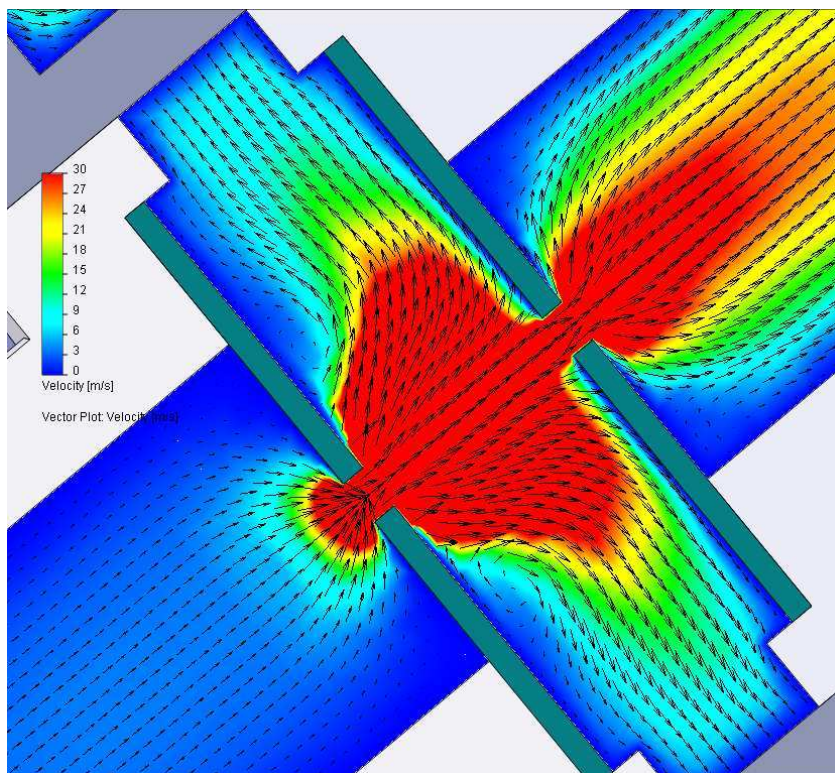
Obr. 53. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 54. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

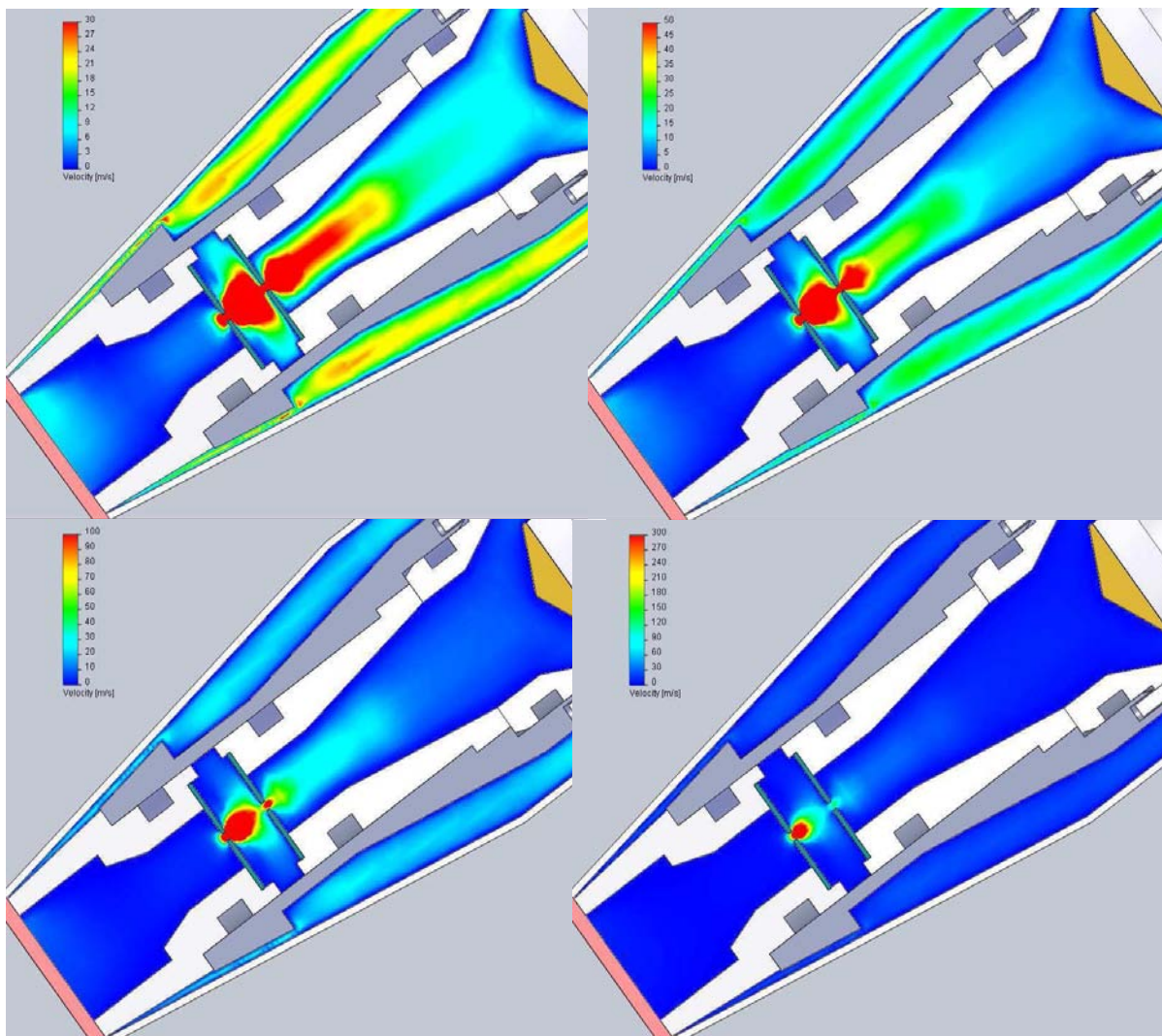
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 55. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm

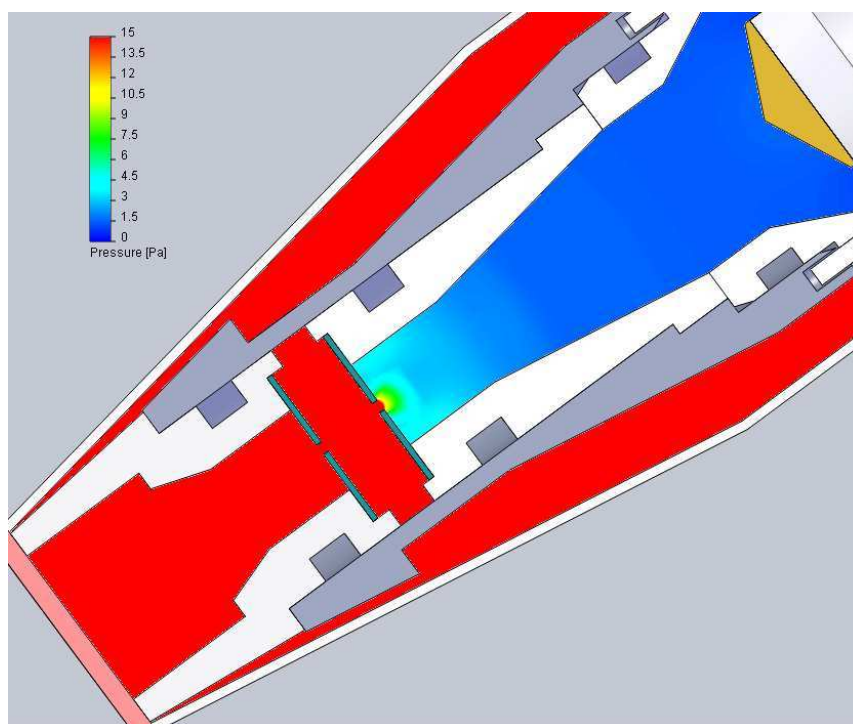
Tlak 400 Pa vzdálenost clonek 3,2 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



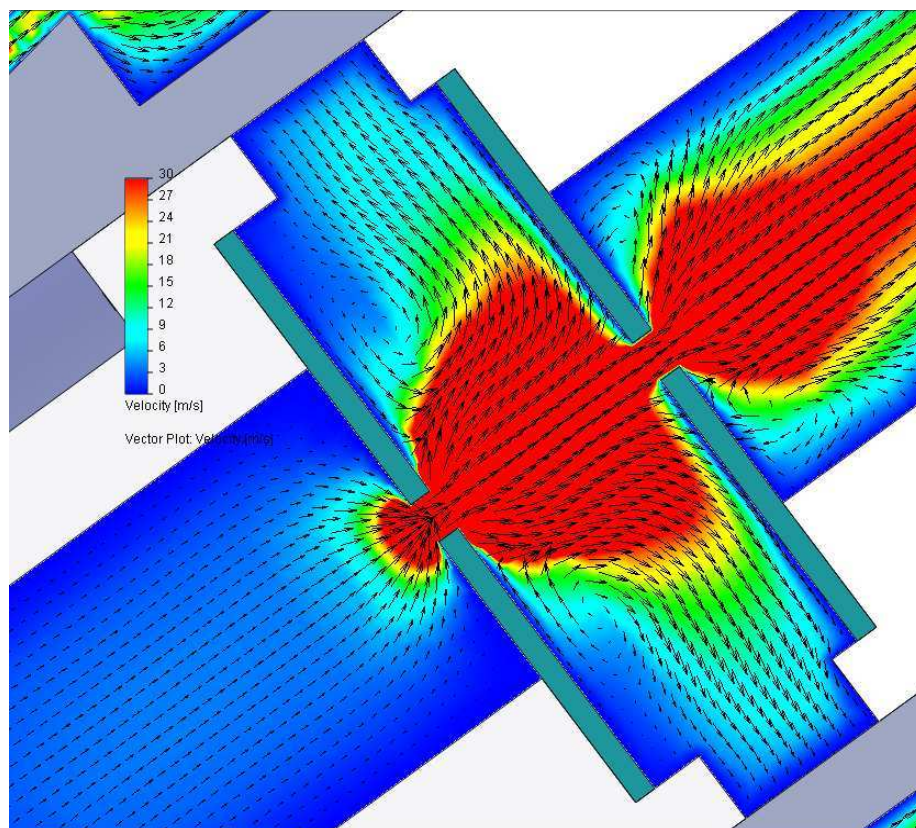
Obr. 56. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 57. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 3,2mm

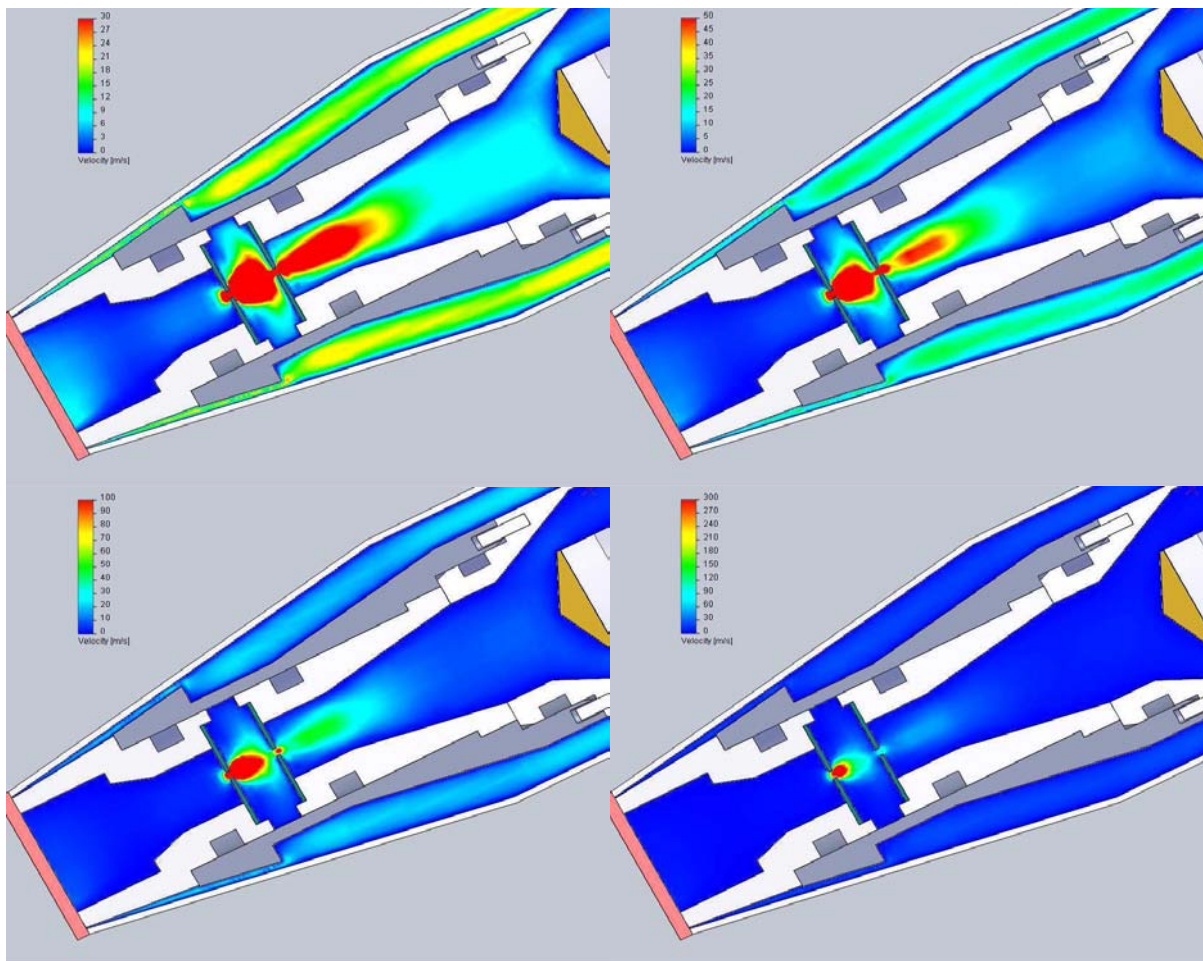
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 58. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm

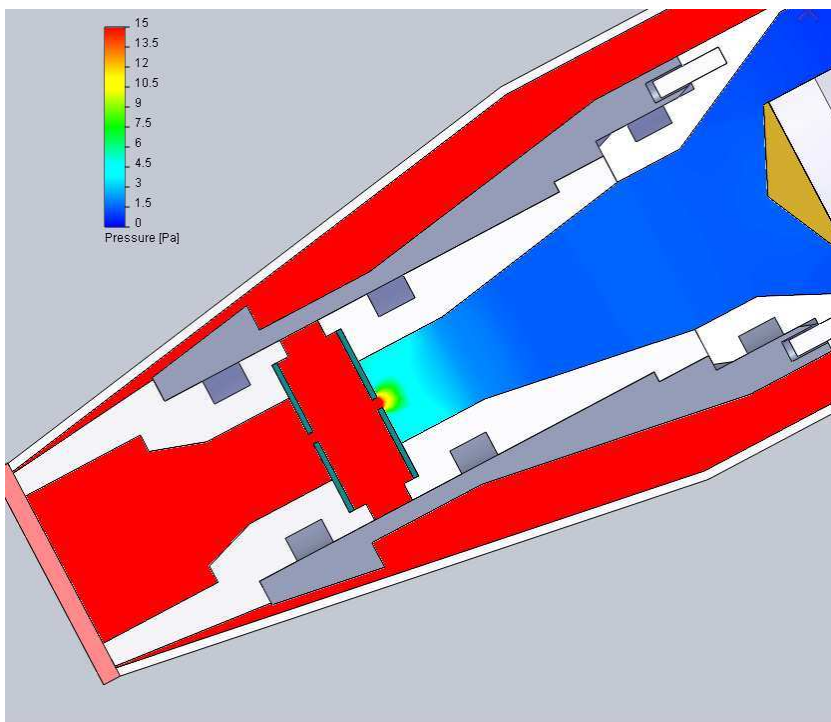
Tlak 400 Pa vzdálenost clonek 3,6 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



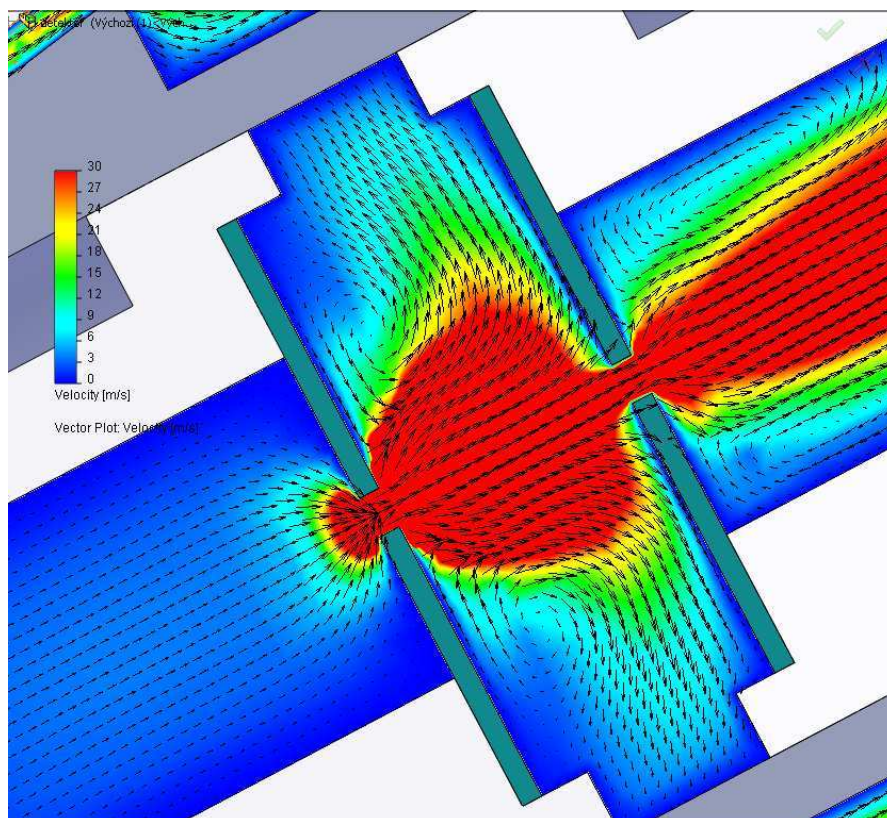
Obr. 59. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 60. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 3,6mm

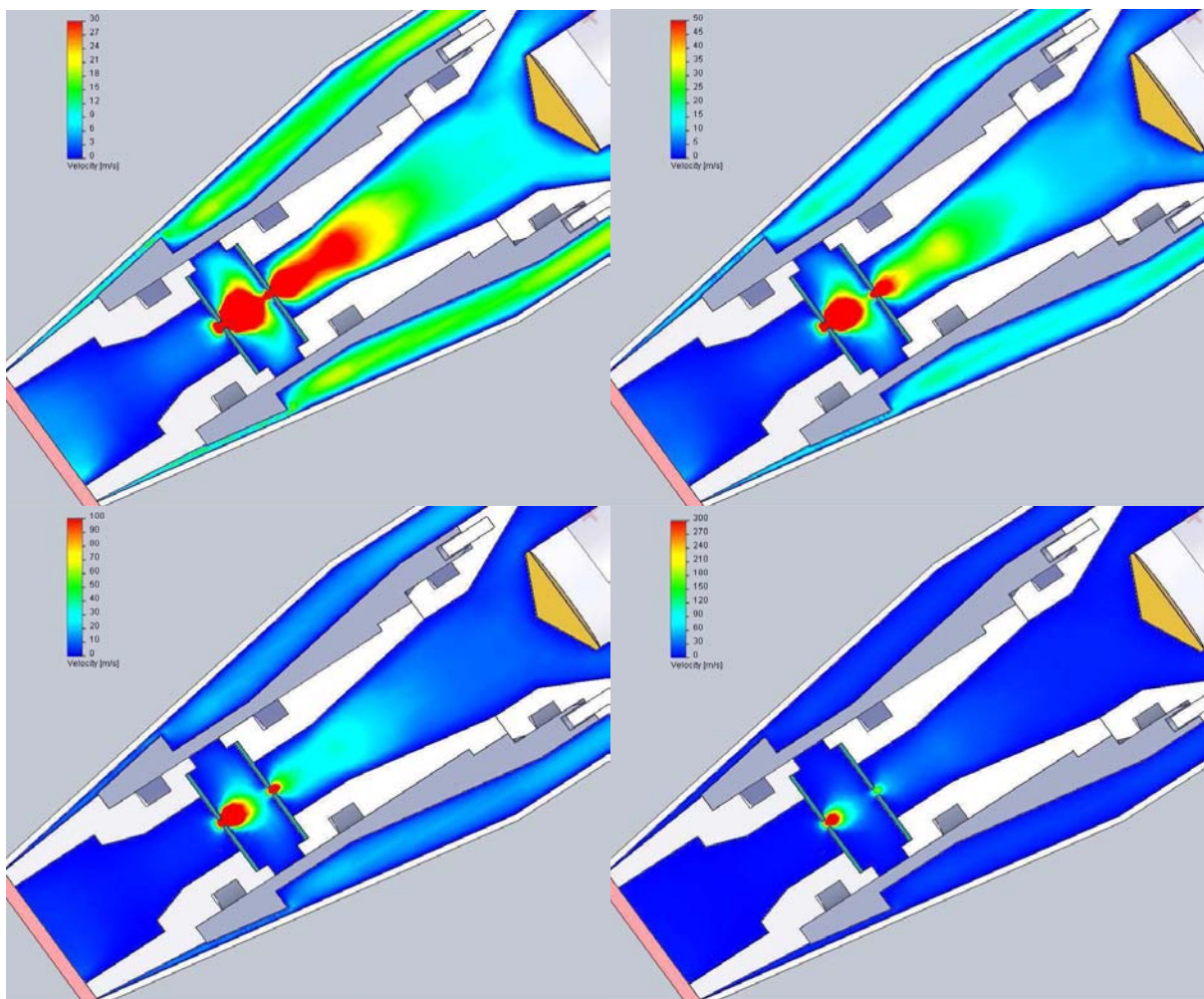
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 61. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm

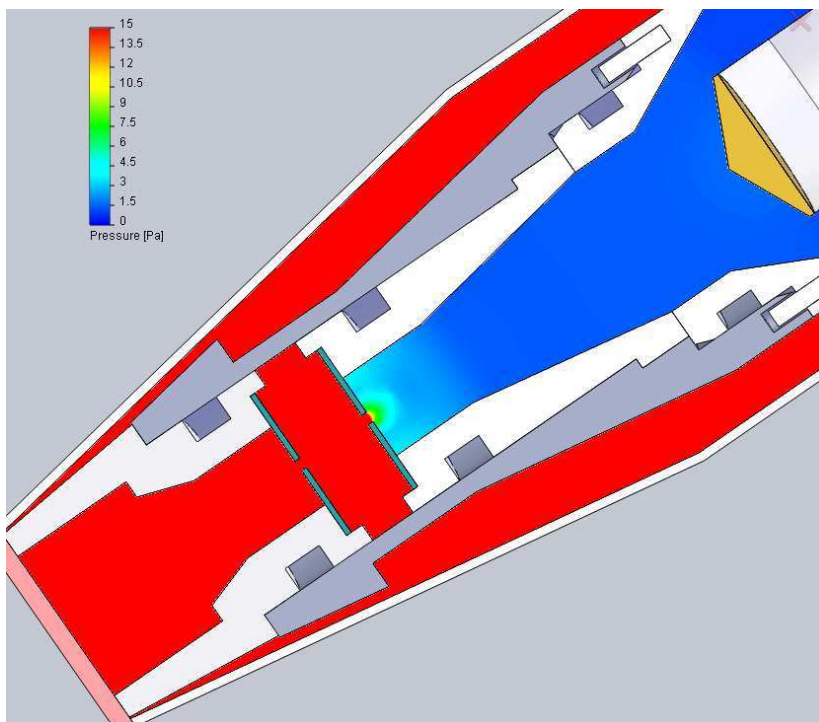
Tlak 400 Pa vzdálenost clonek 4,0 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



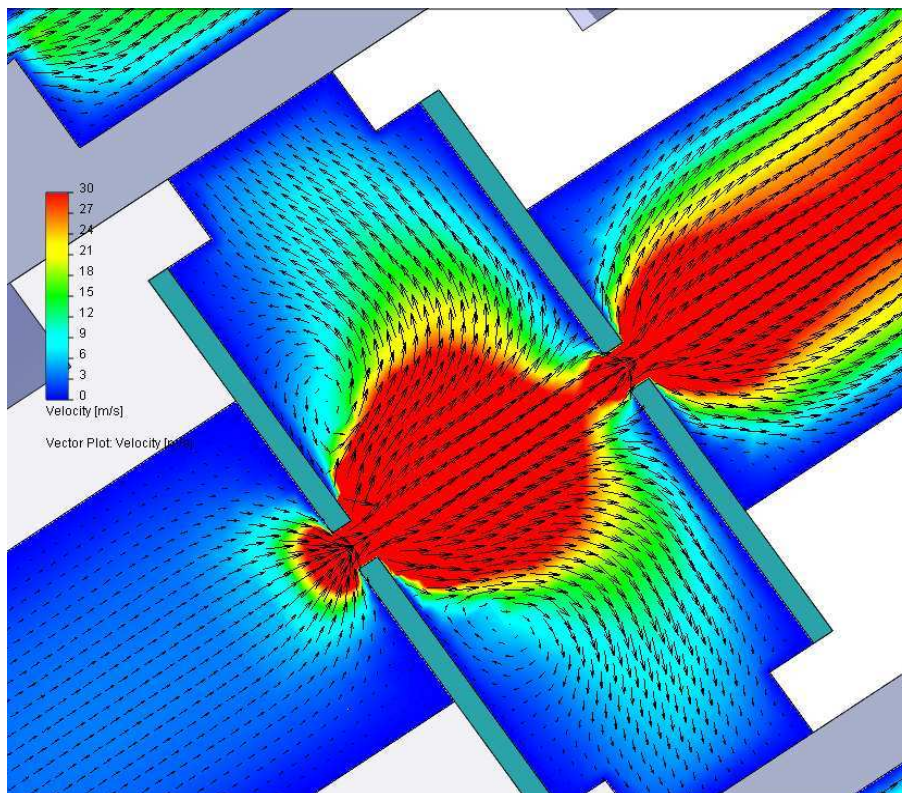
Obr. 62. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 63. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm

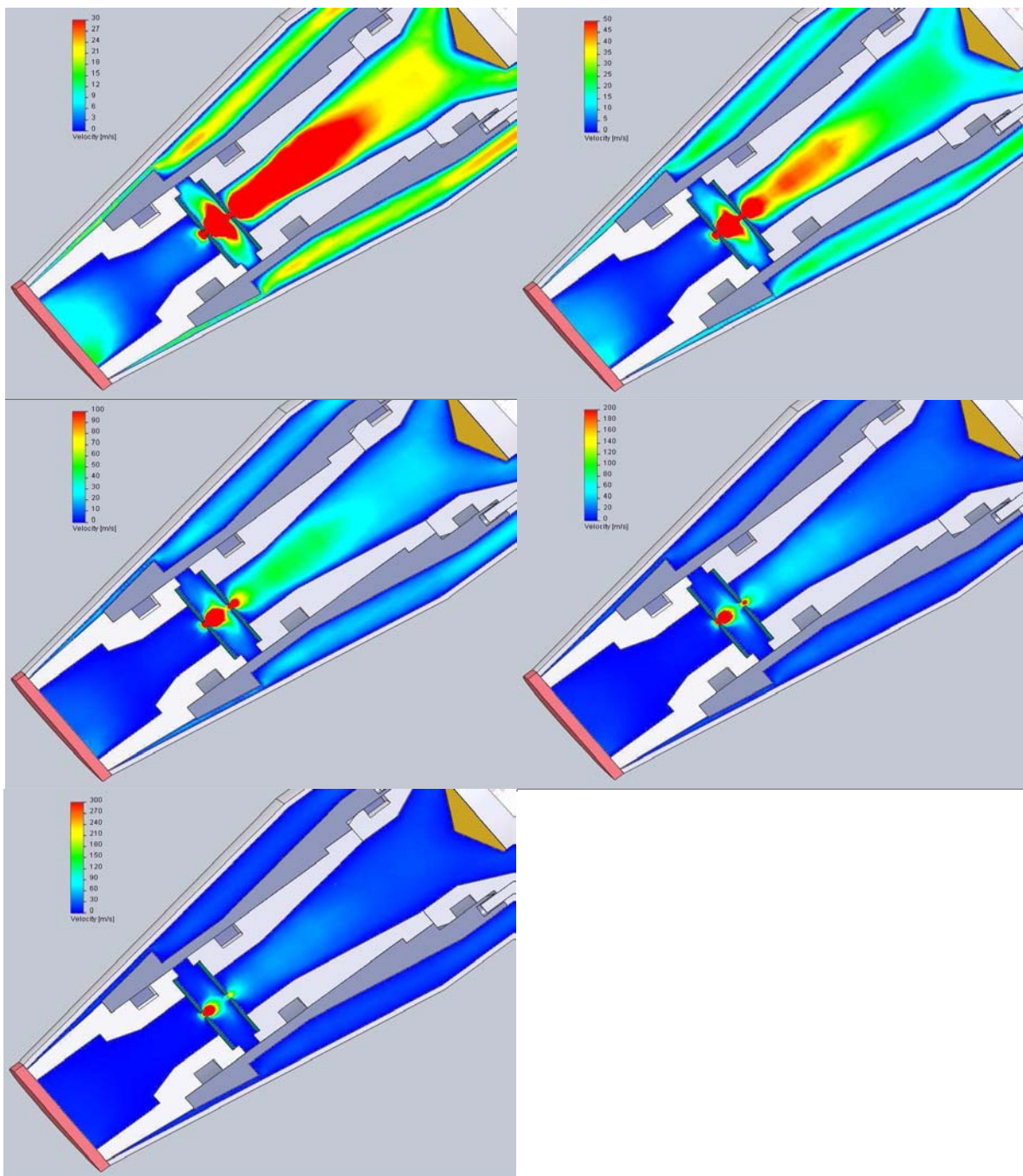
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 64. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm

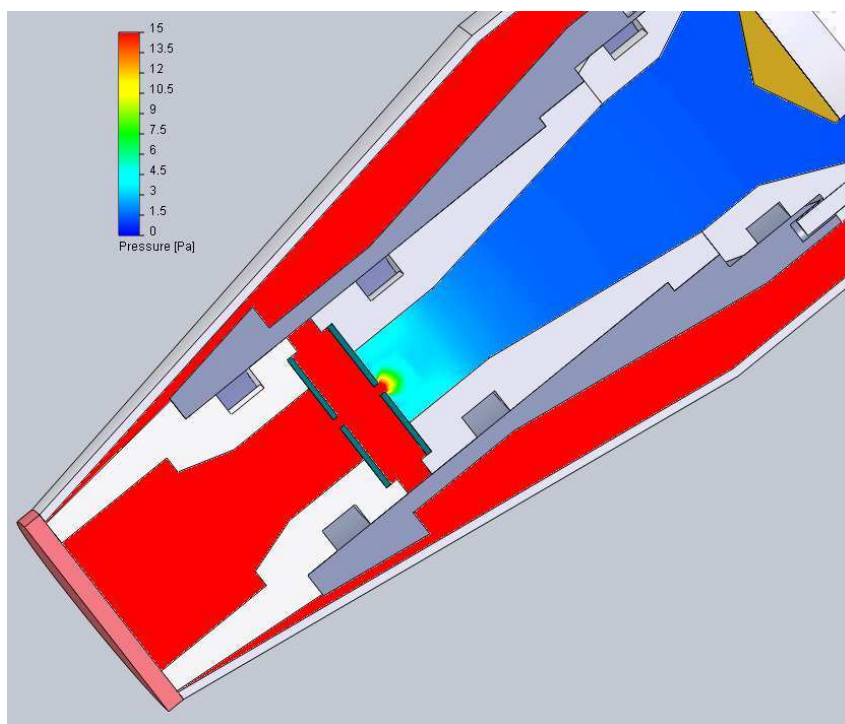
Tlak 600 Pa vzdálenost clonek 2,4 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



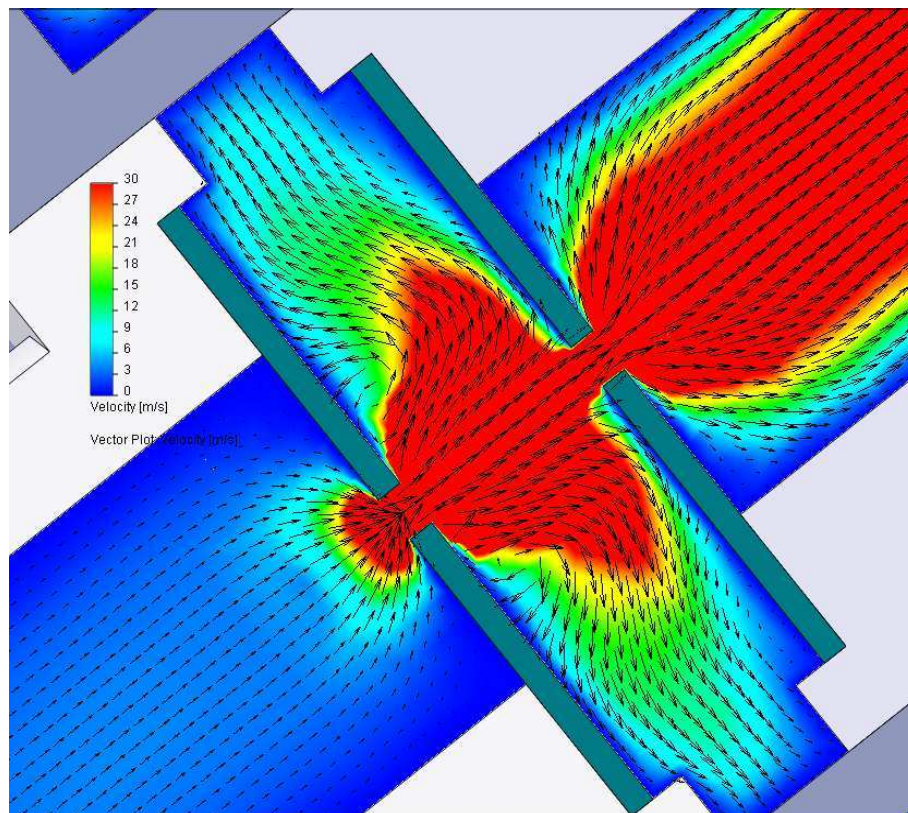
Obr. 65. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 66. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm

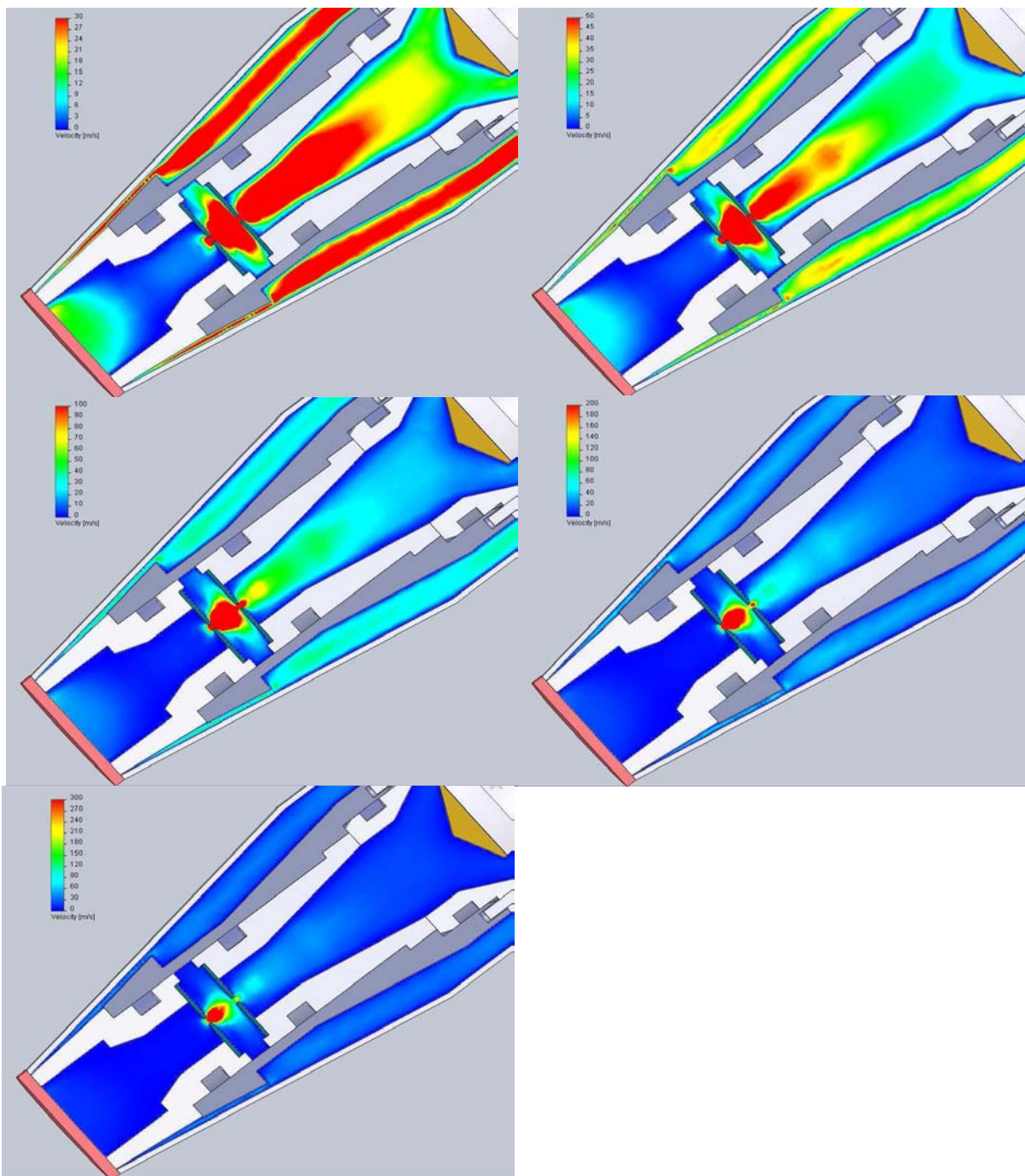
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 67. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 400 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm

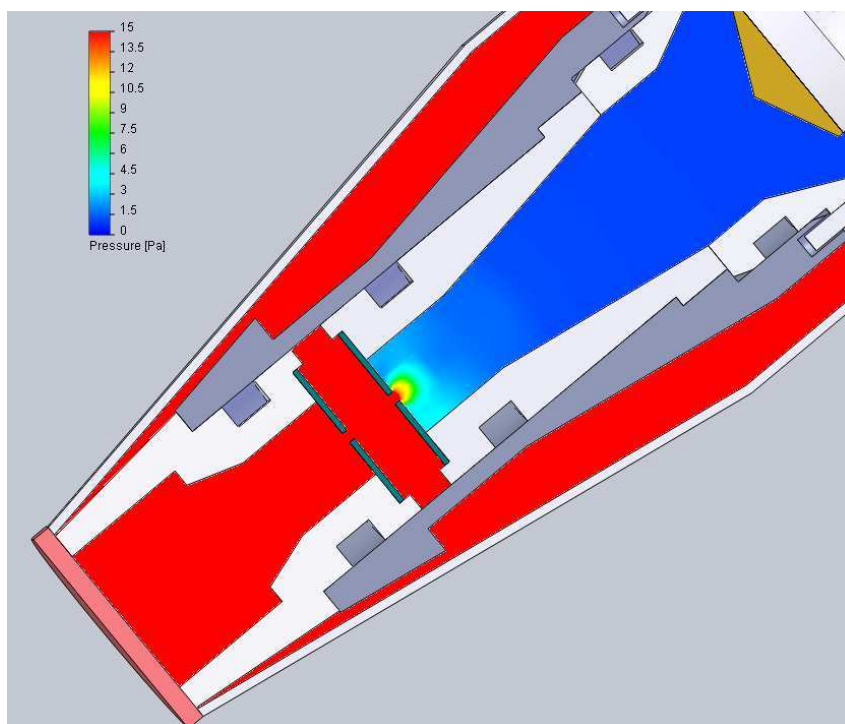
Tlak 600 Pa vzdálenost clonek 2,8 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



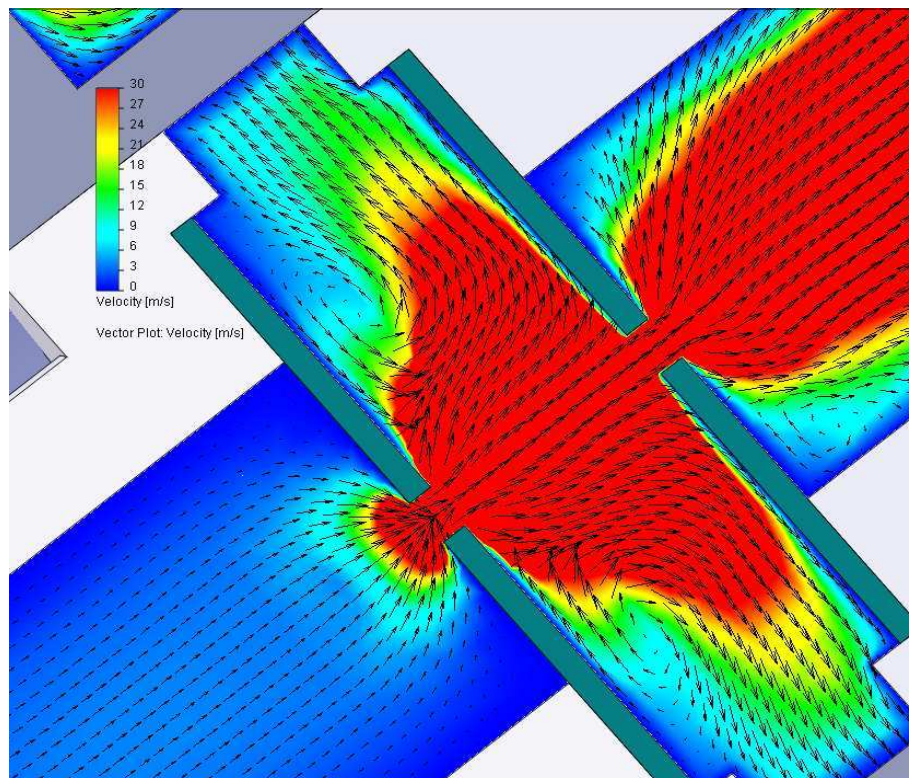
Obr. 68. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 69. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

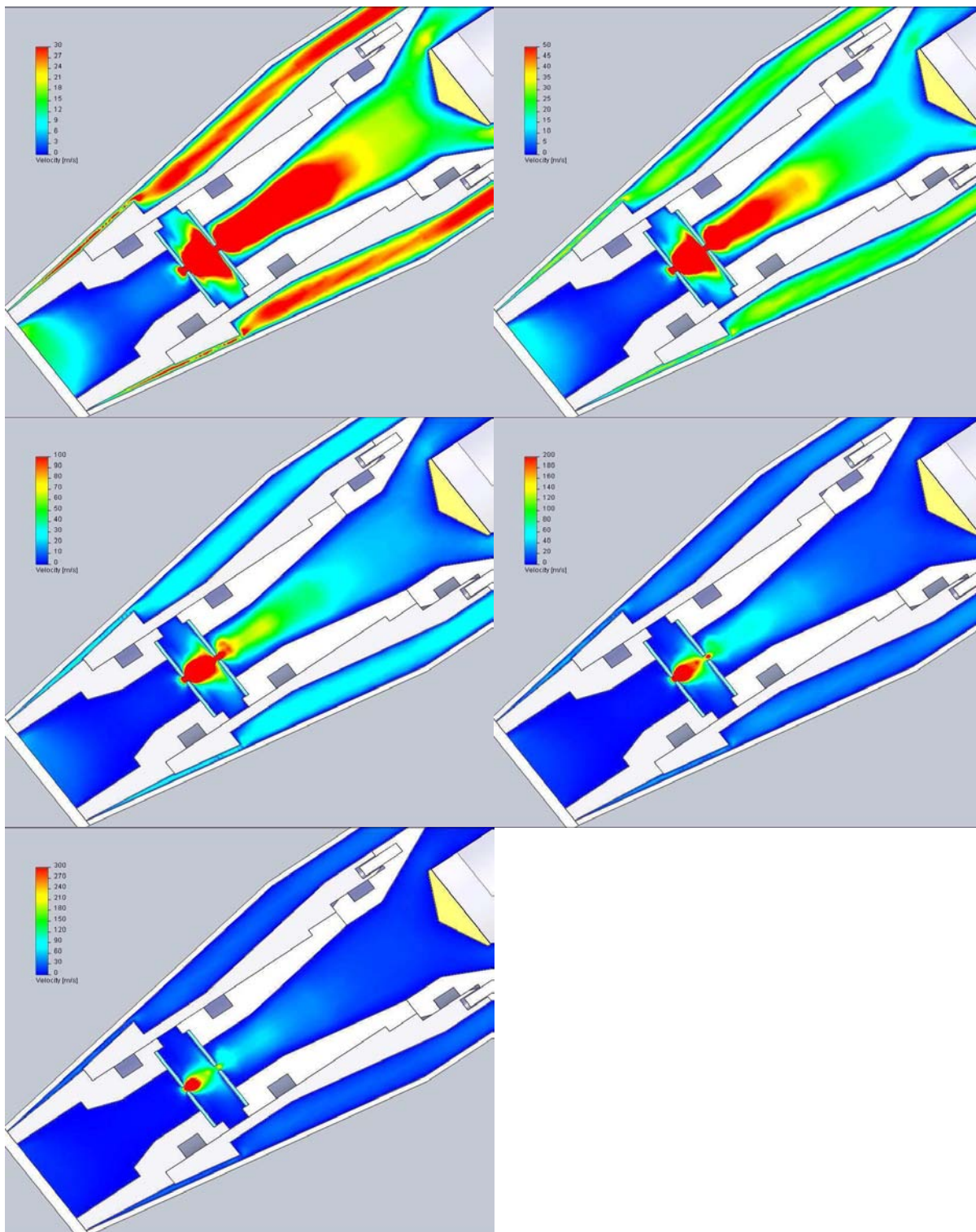
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 70. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

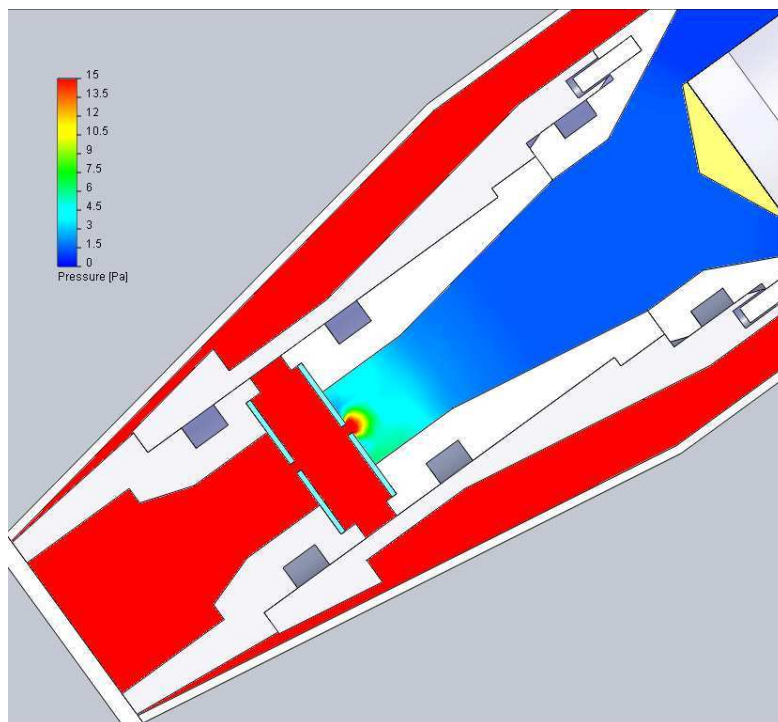
Tlak 600 Pa vzdálenost clonek 3,2 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



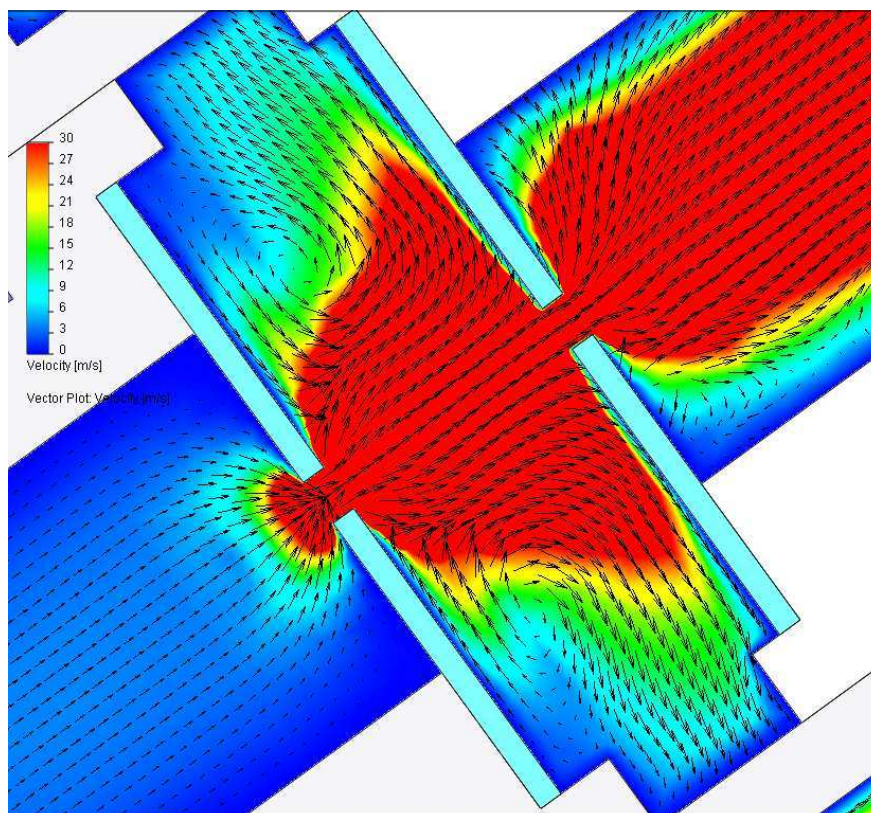
Obr. 71. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 72. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm

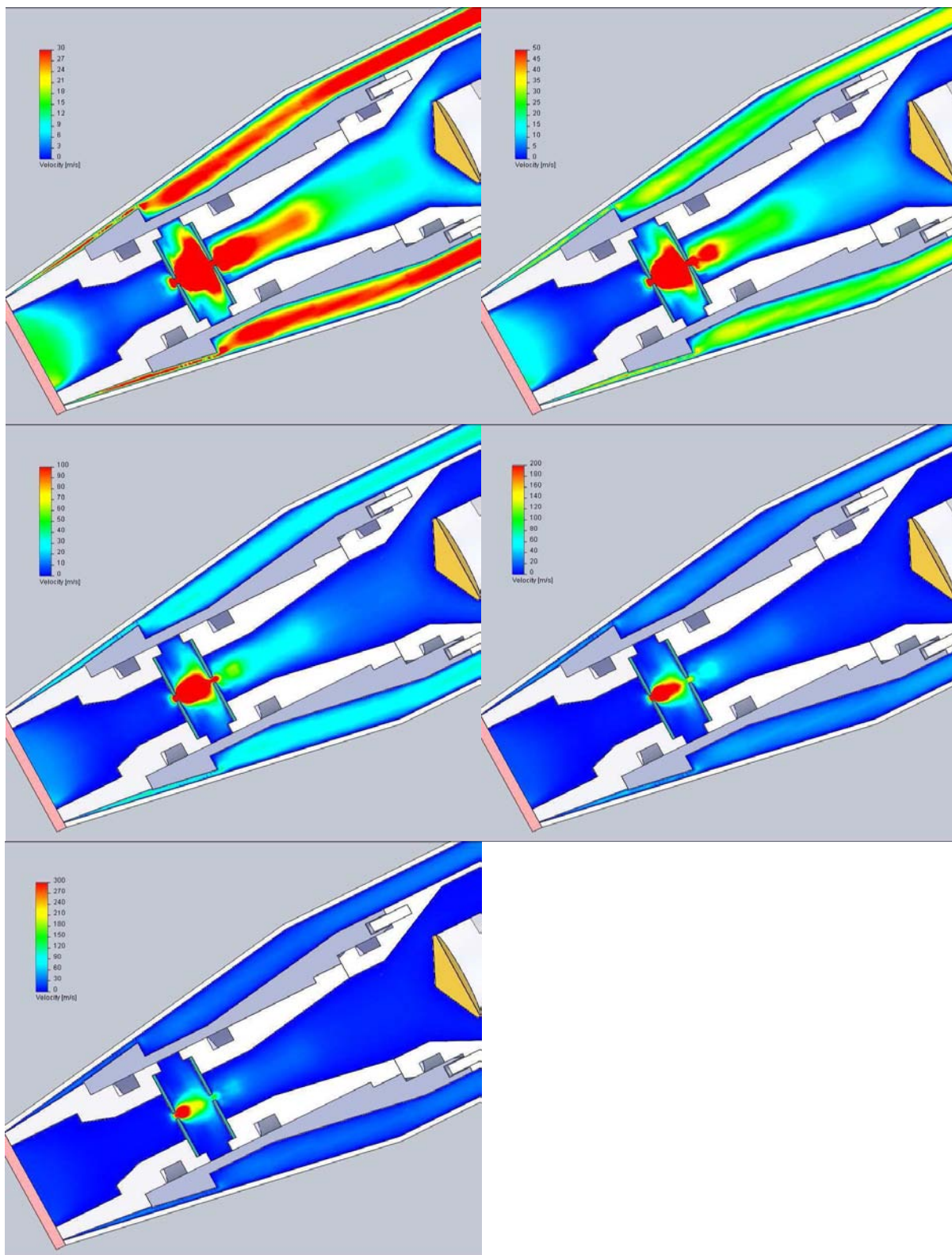
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 73. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm

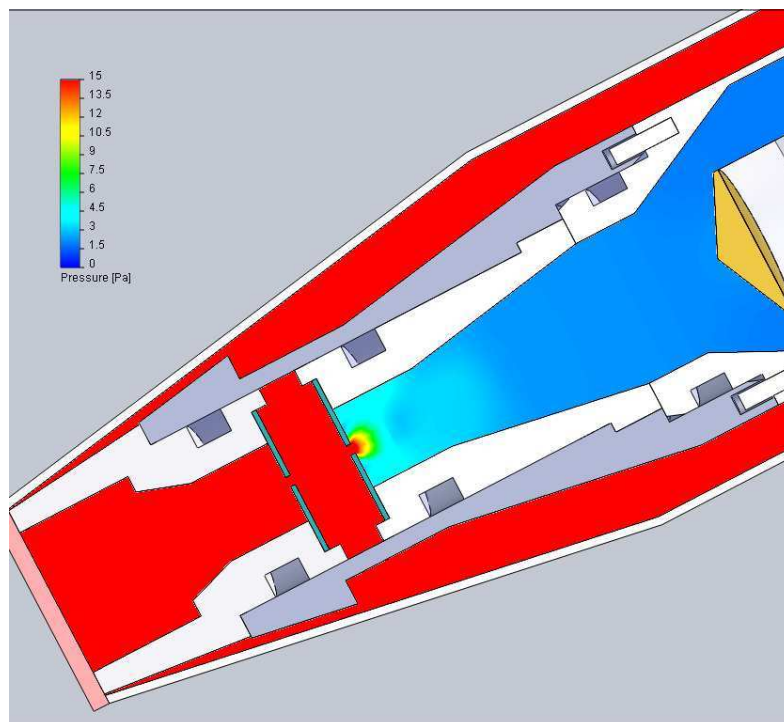
Tlak 600 Pa vzdálenost clonek 3,6 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



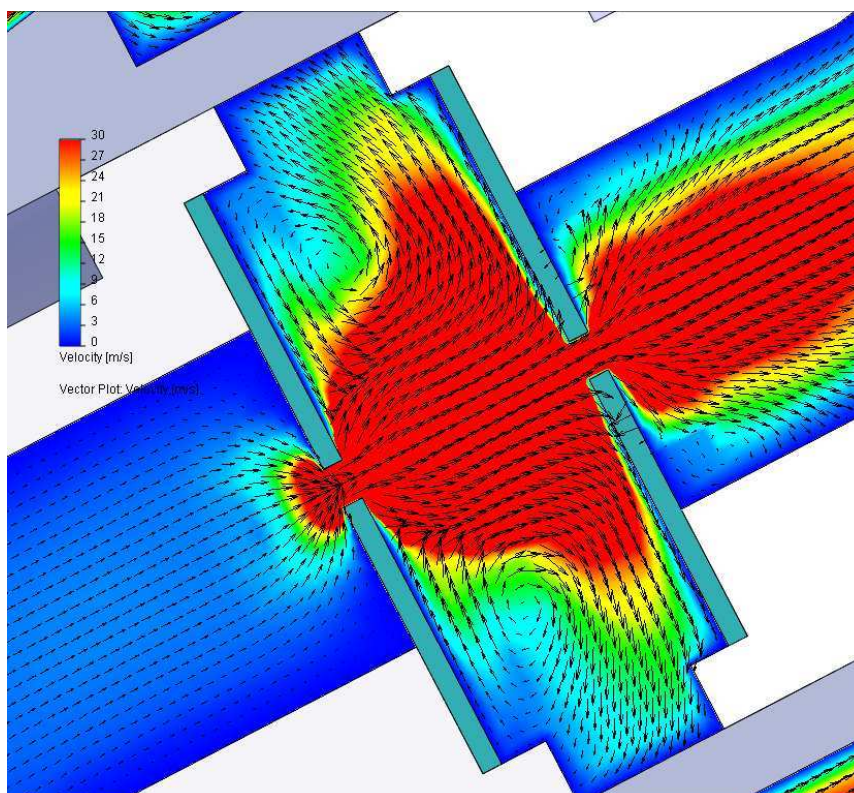
Obr. 74. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 75. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm

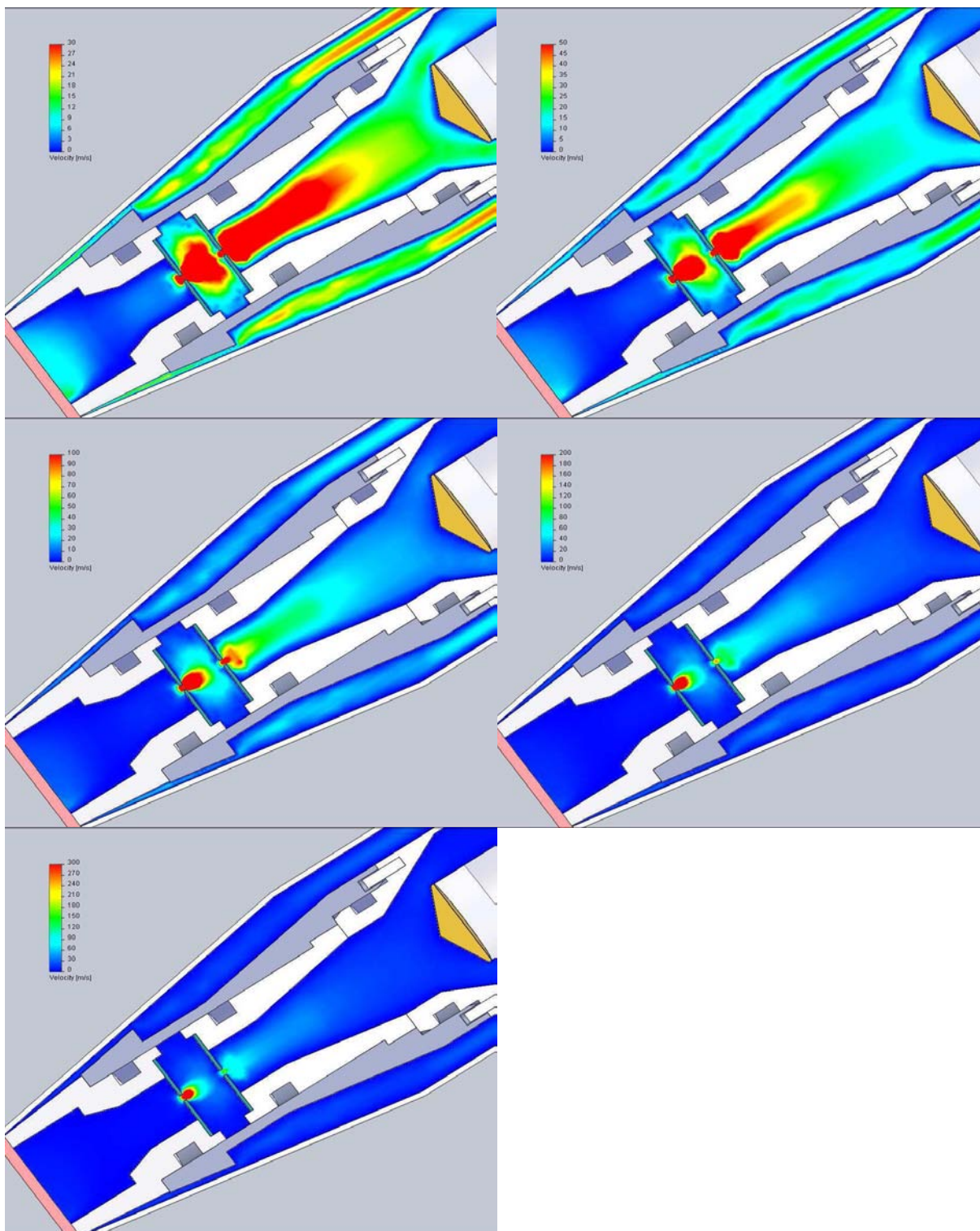
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 76. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm

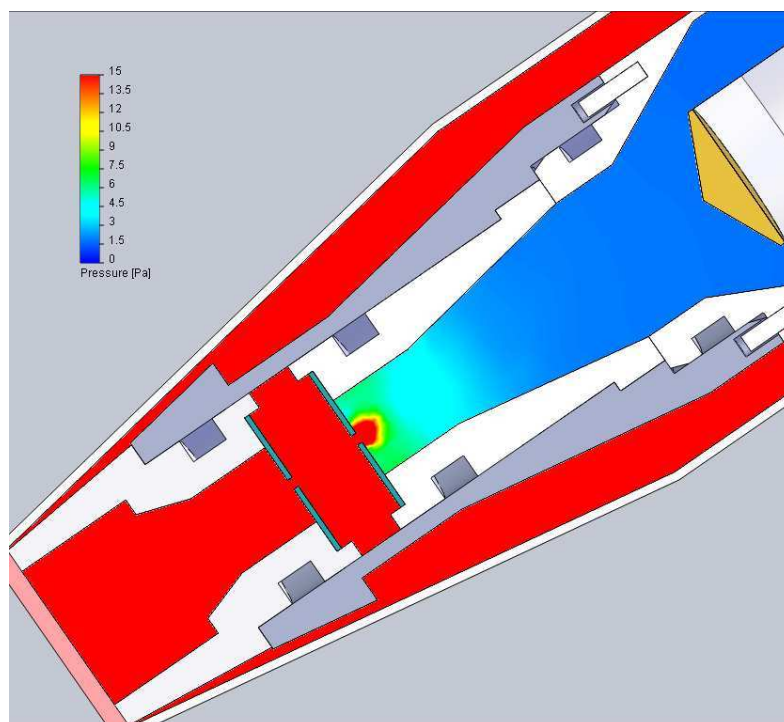
Tlak 600 Pa vzdálenost clonek 4,0 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



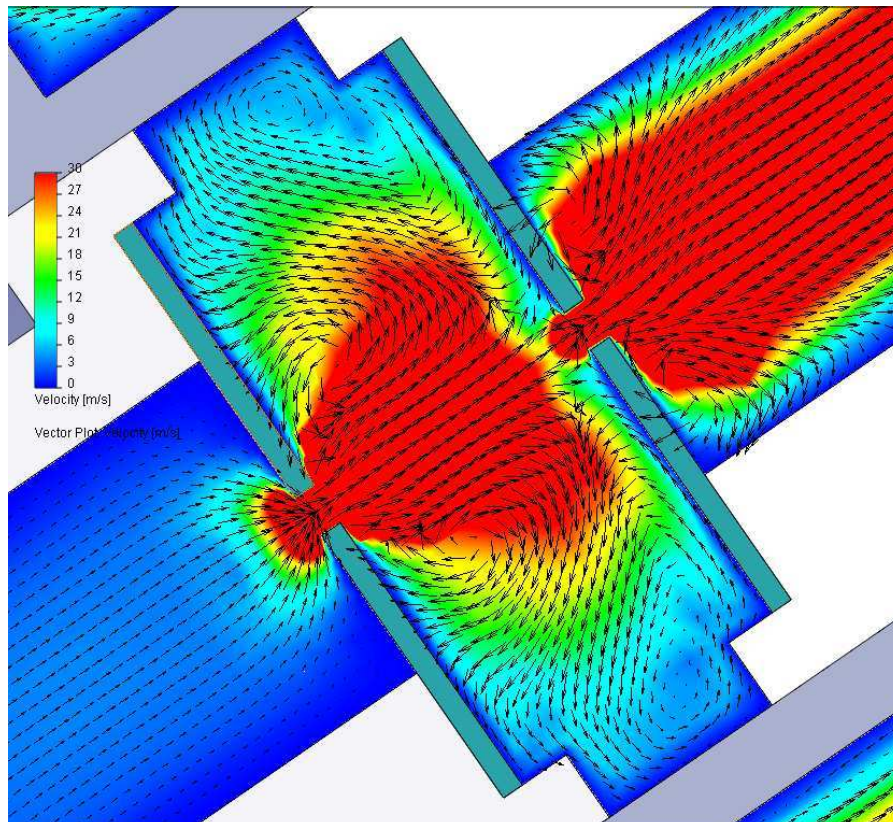
Obr. 77. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 78. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 4,0 mm

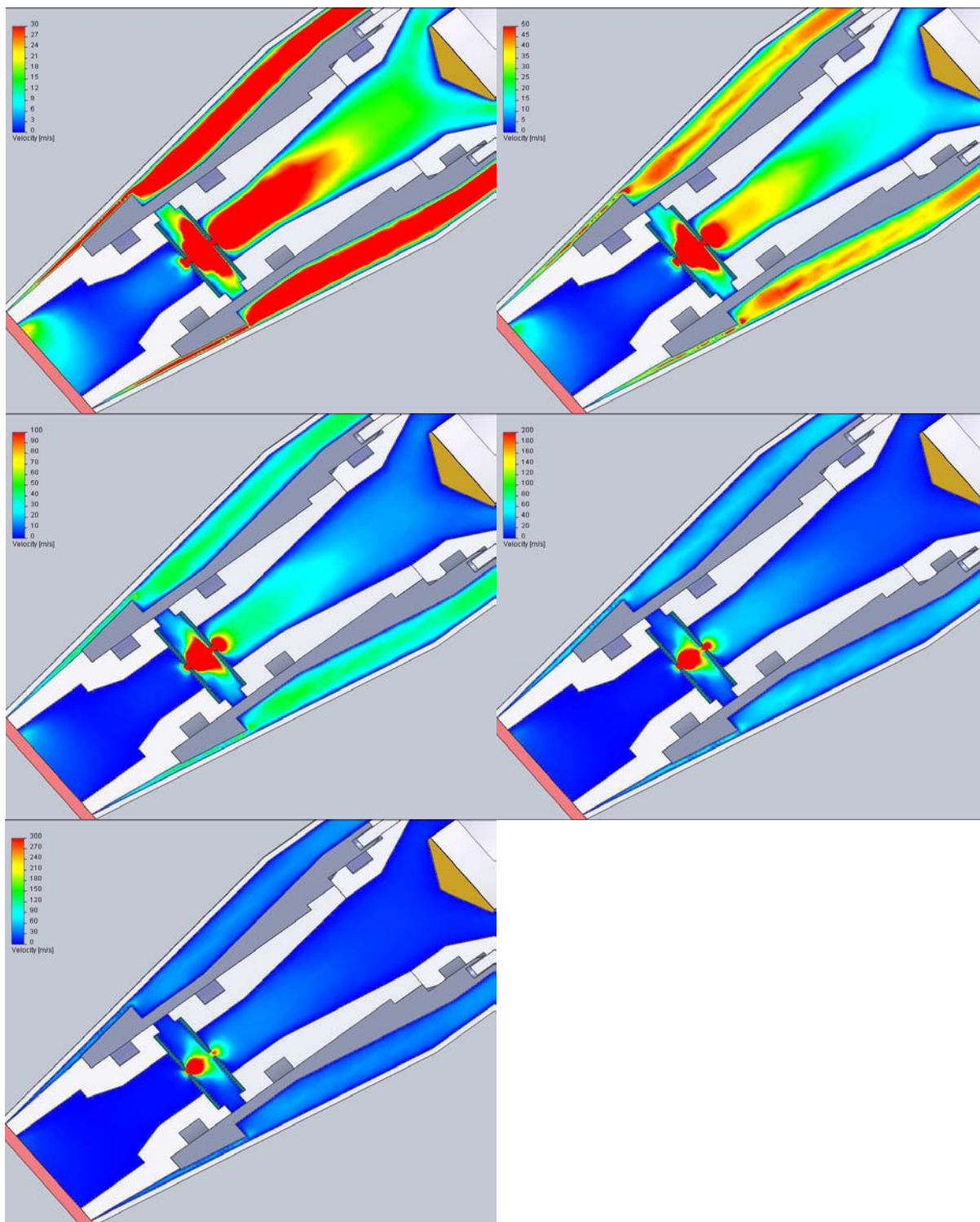
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 79. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm

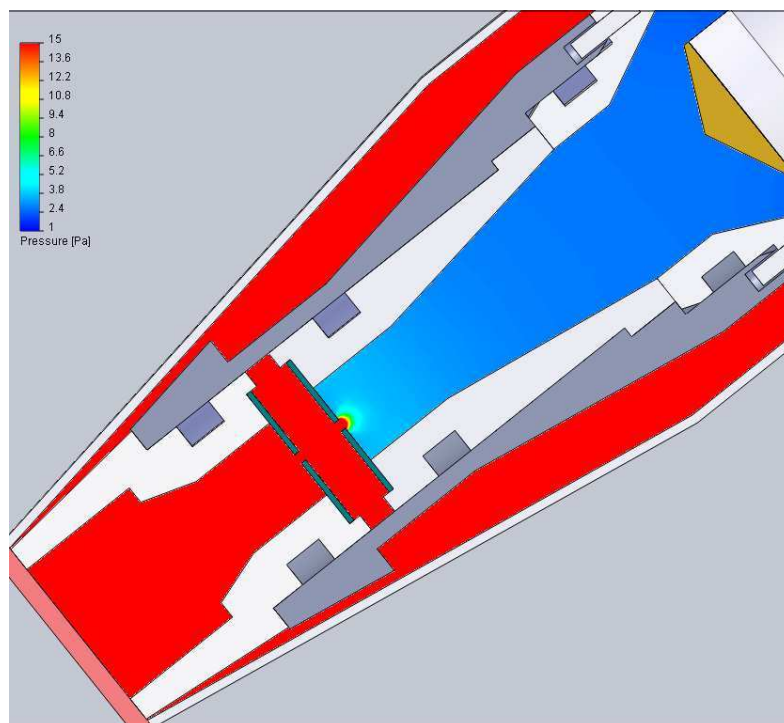
Tlak 800 Pa vzdálenost clonek 2,4 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



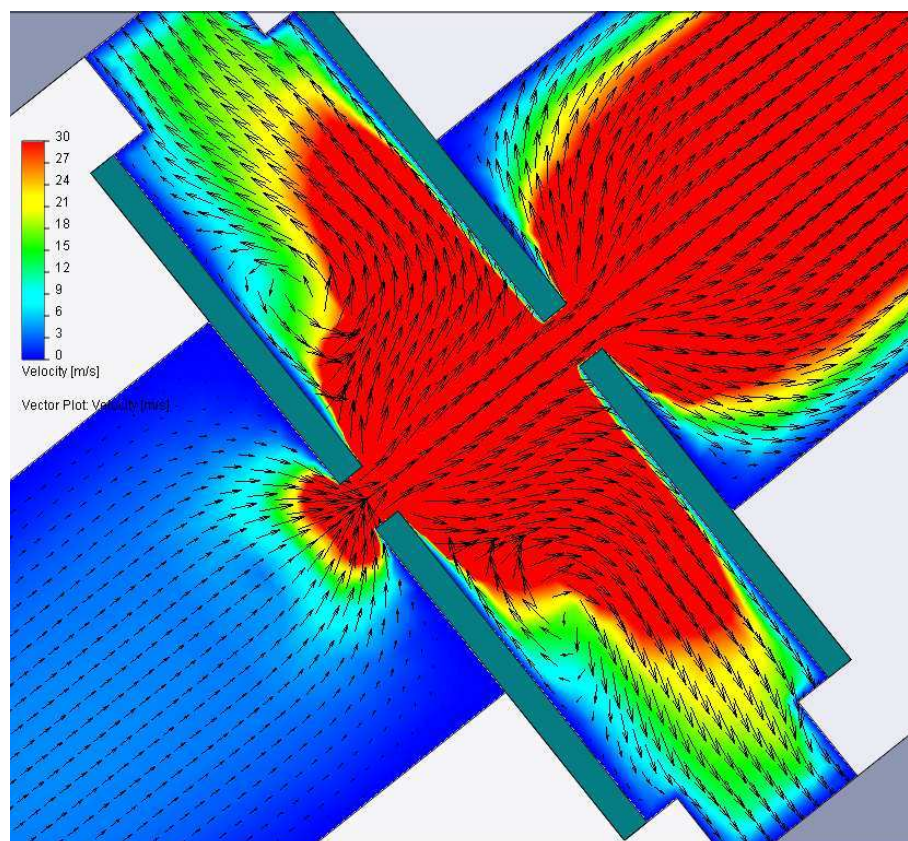
Obr. 80. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 81. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 2,4 mm

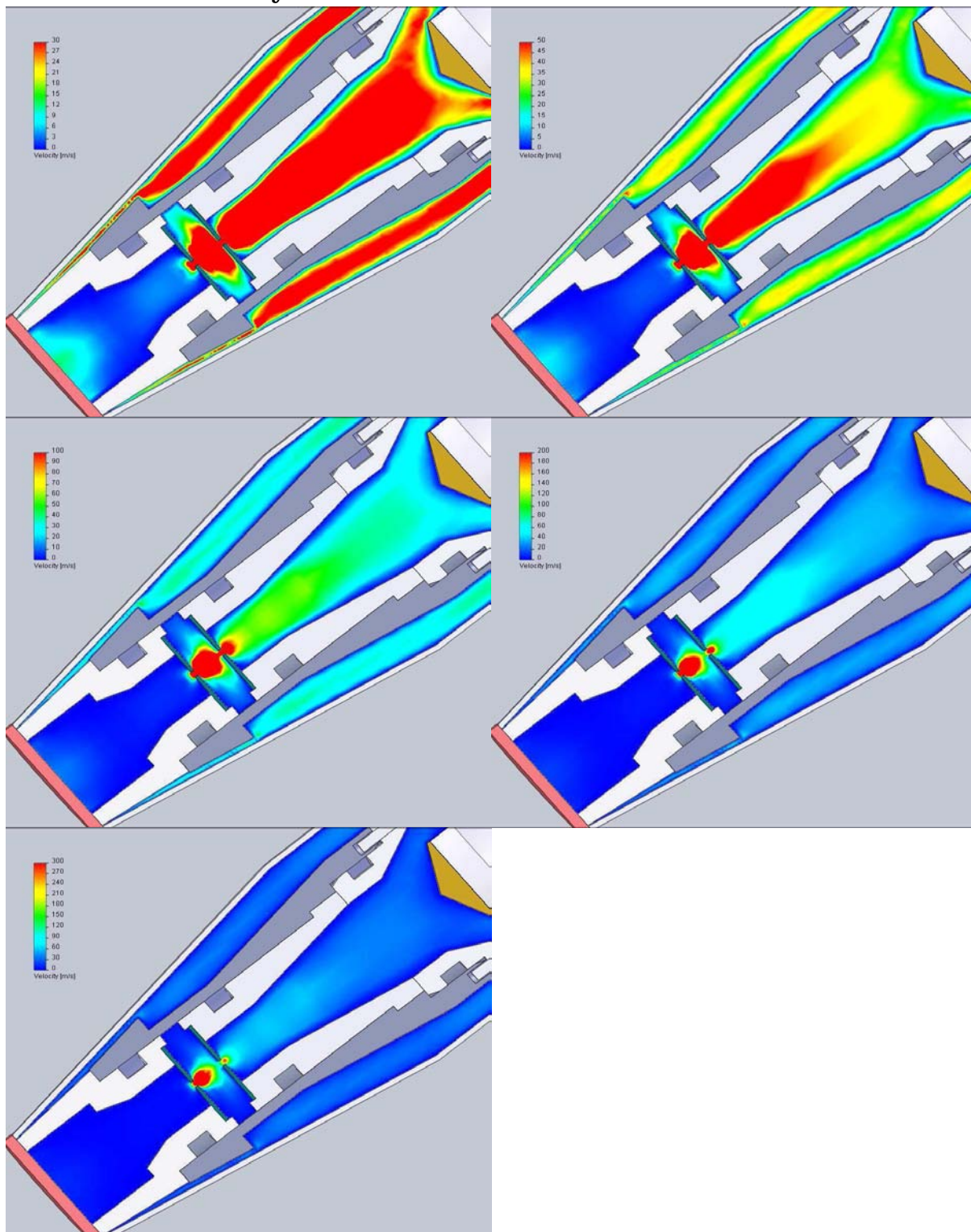
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 82. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm

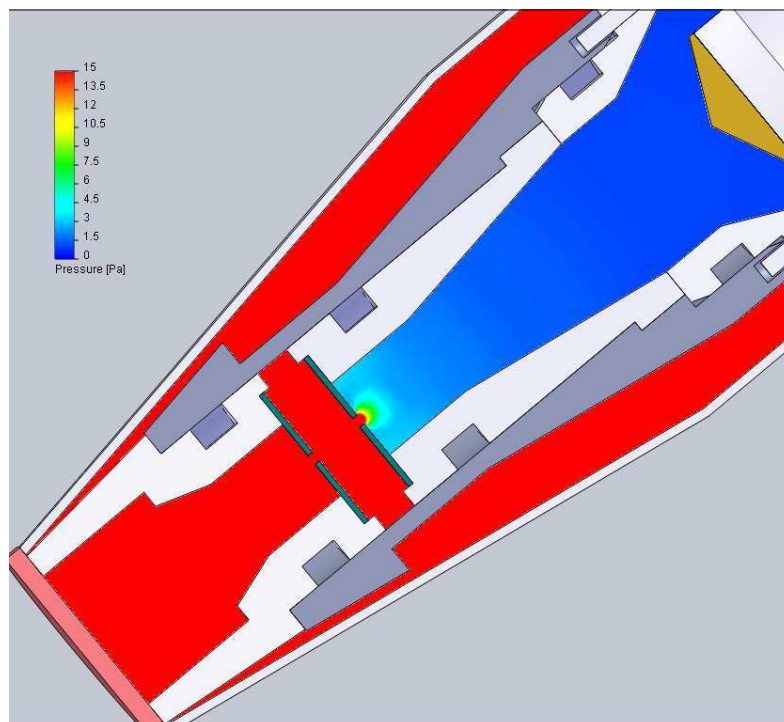
Tlak 800 Pa vzdálenost clonek 2,8 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



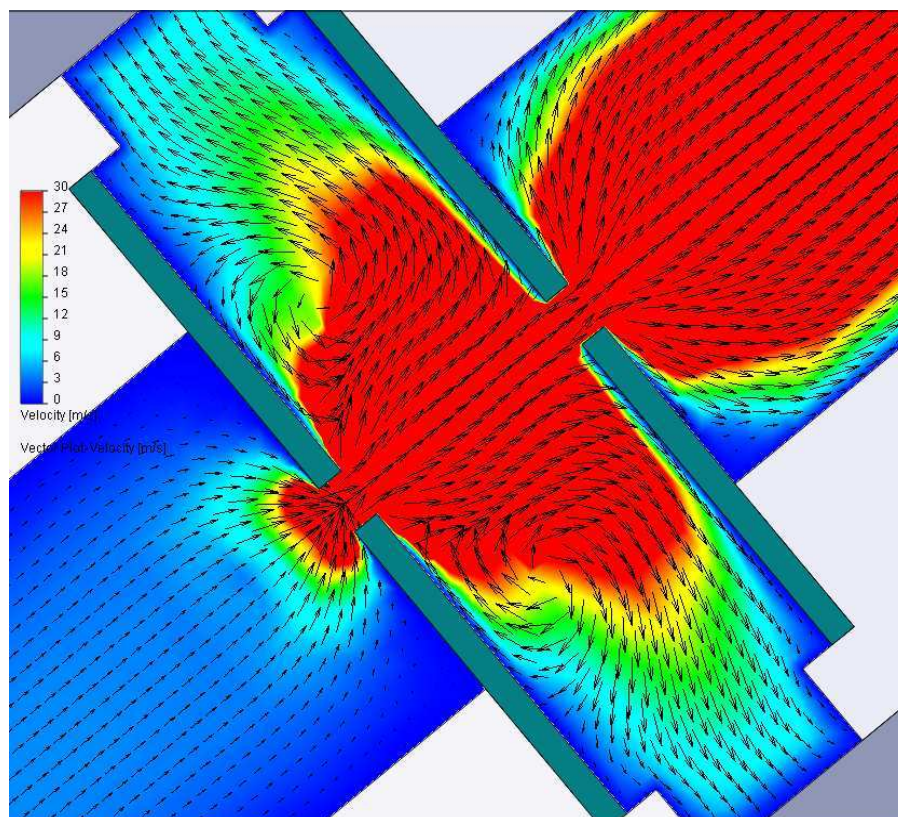
Obr. 83. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 84. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

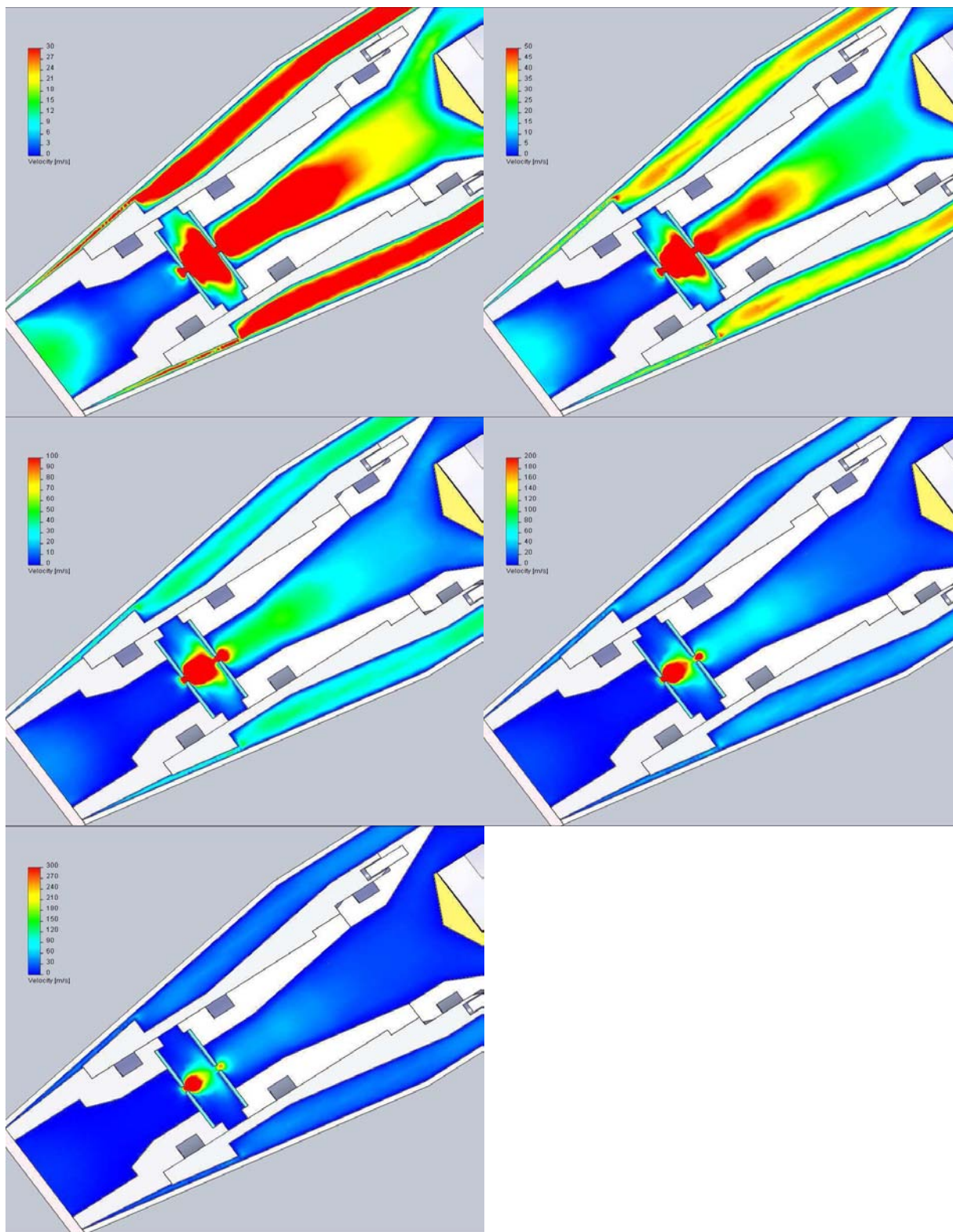
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 85. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 600 Pa a vzdálenosti clonek 2,8 mm

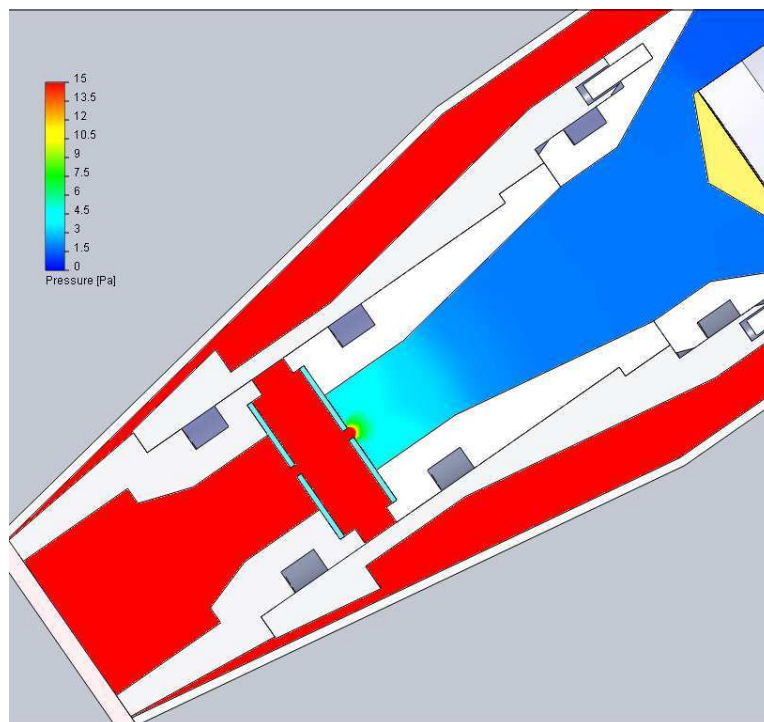
Tlak 800 Pa vzdálenost clonek 3,2 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



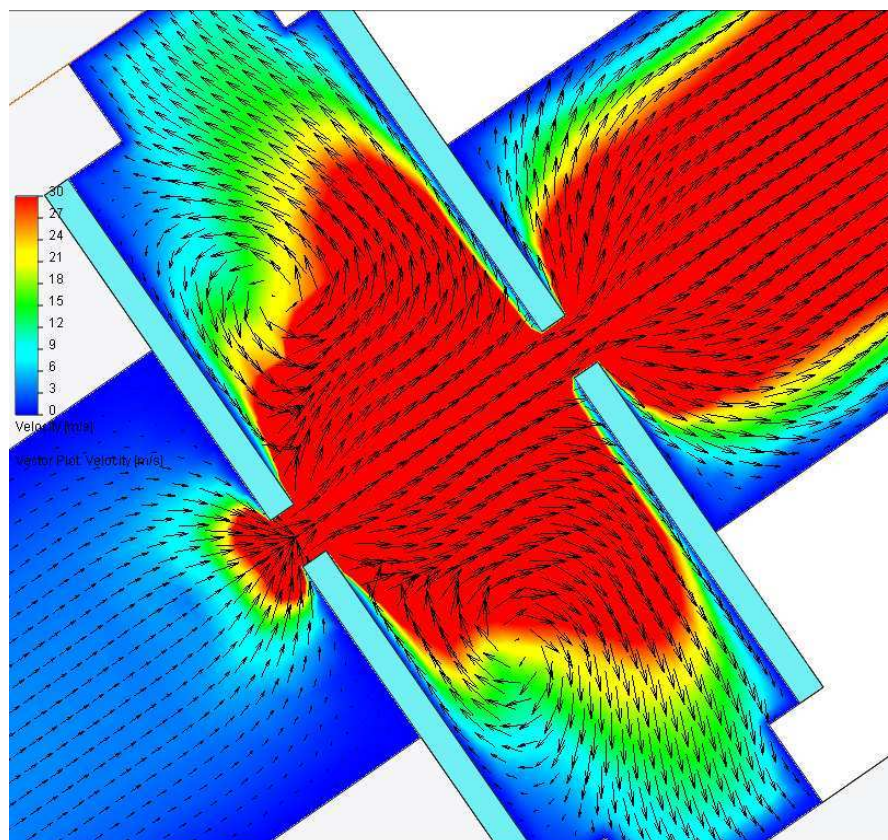
Obr. 86. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 87. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm

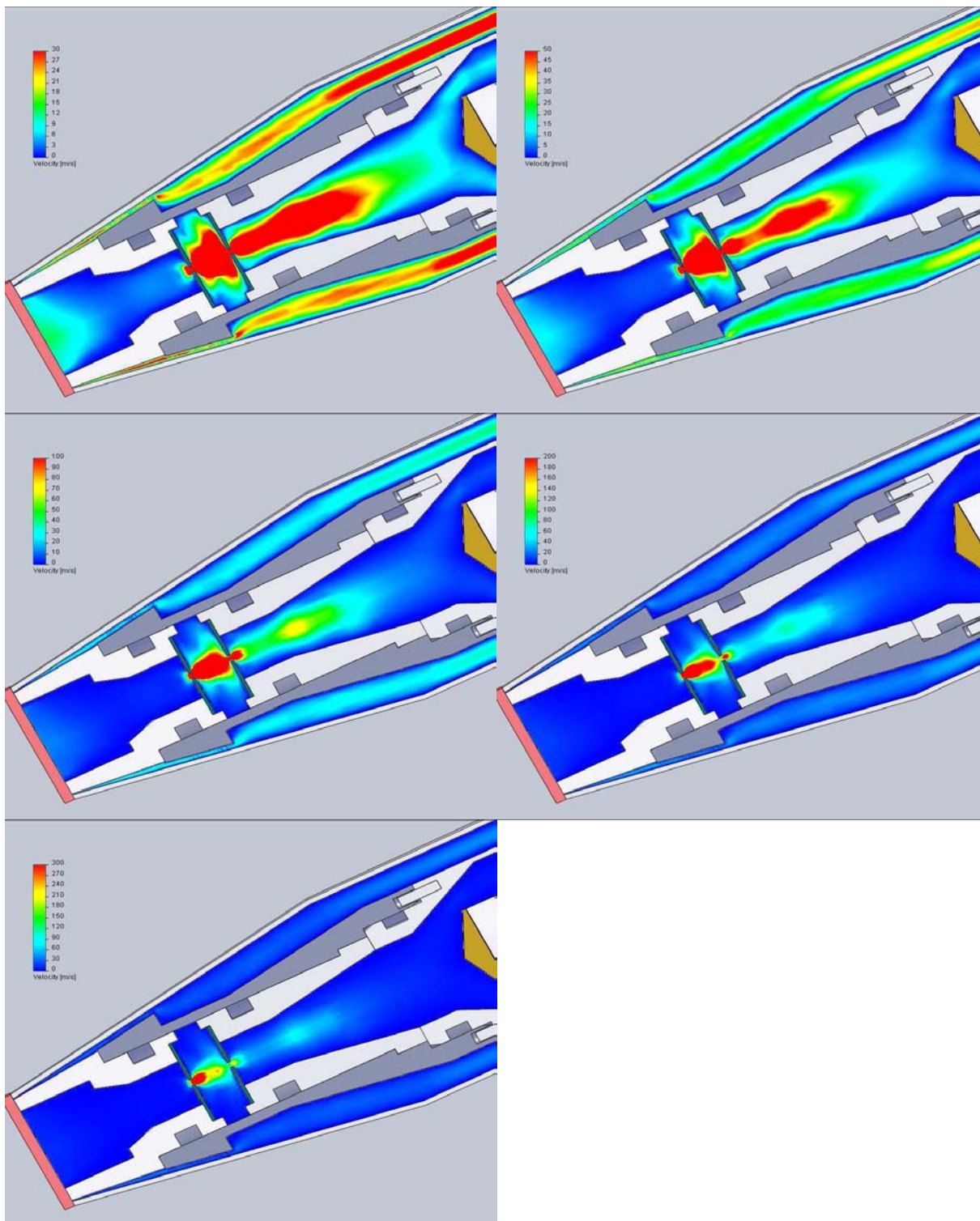
Zobrazení vektorů proudění



Obr. 88. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm

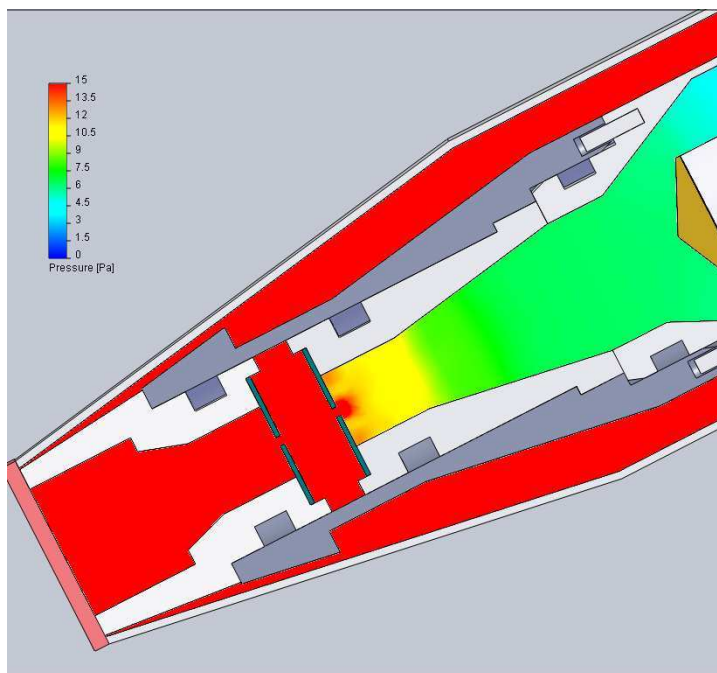
Tlak 800 Pa vzdálenost clonek 3,6 mm

Zobrazení rozložení rychlosti



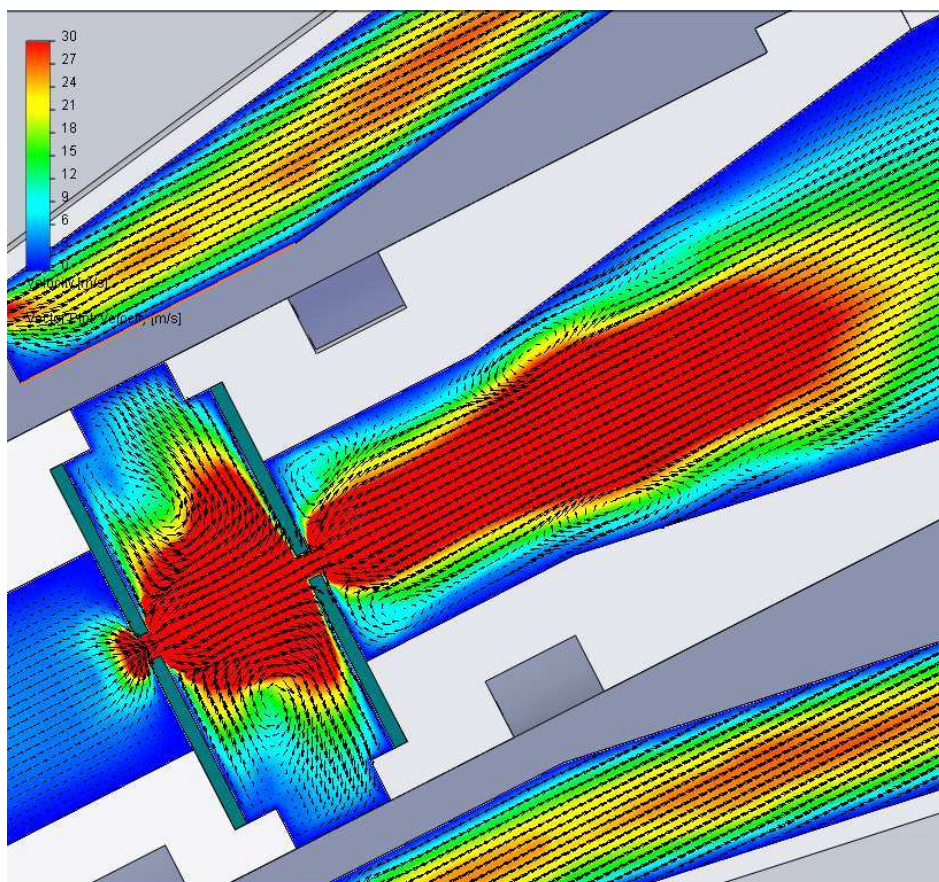
Obr. 89. Grafické zobrazení rozložení rychlosti ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm

Zobrazení rozložení tlaku



Obr. 90. Grafické zobrazení rozložení tlaku ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 3,6 mm

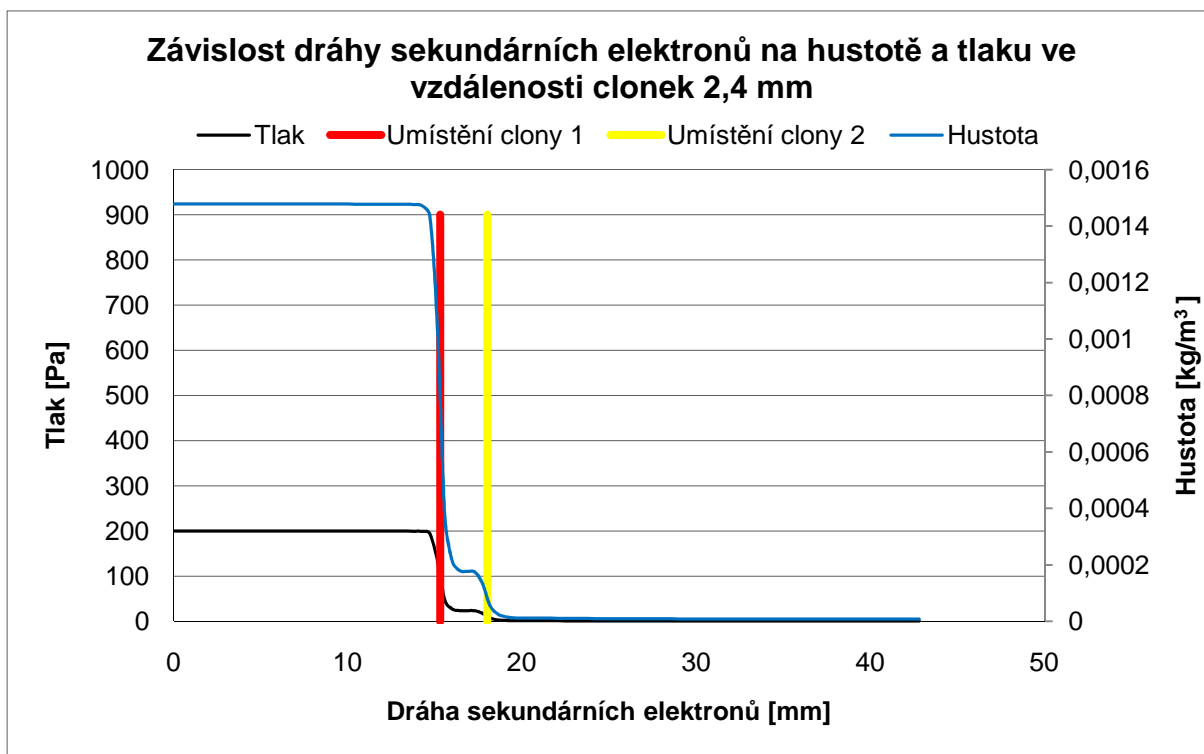
Zobrazení vektorů proudění



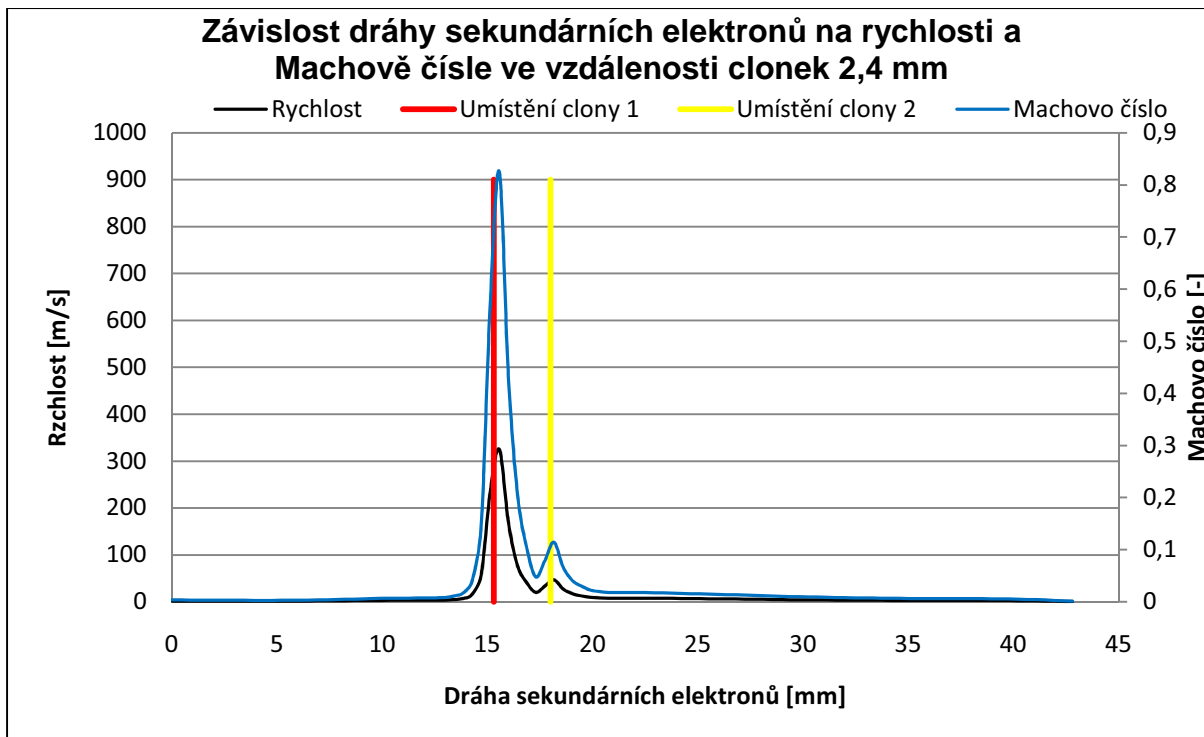
Obr. 91. Grafické zobrazení rozložení vektorů proudění ve scintilátoru při tlaku 800 Pa a vzdálenosti clonek 3,2 mm

Příloha B

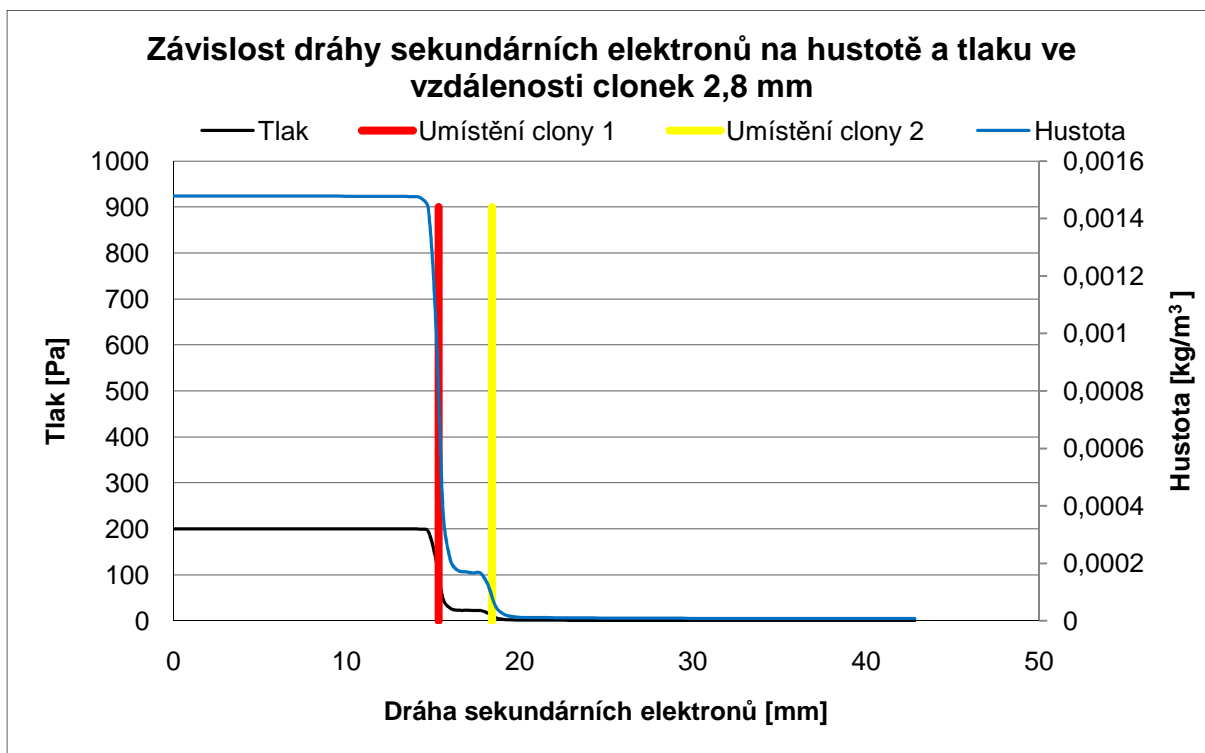
Tlak v komoře vzorku 200 Pa



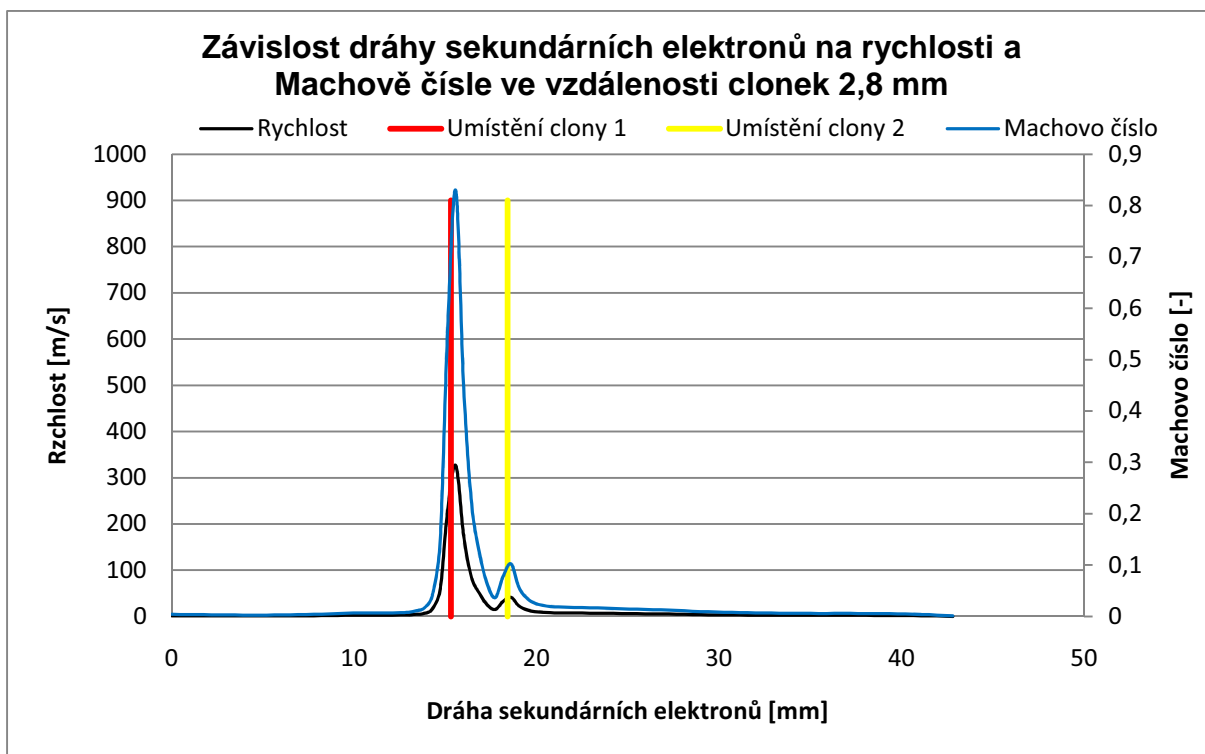
Obr. 92. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,4 mm



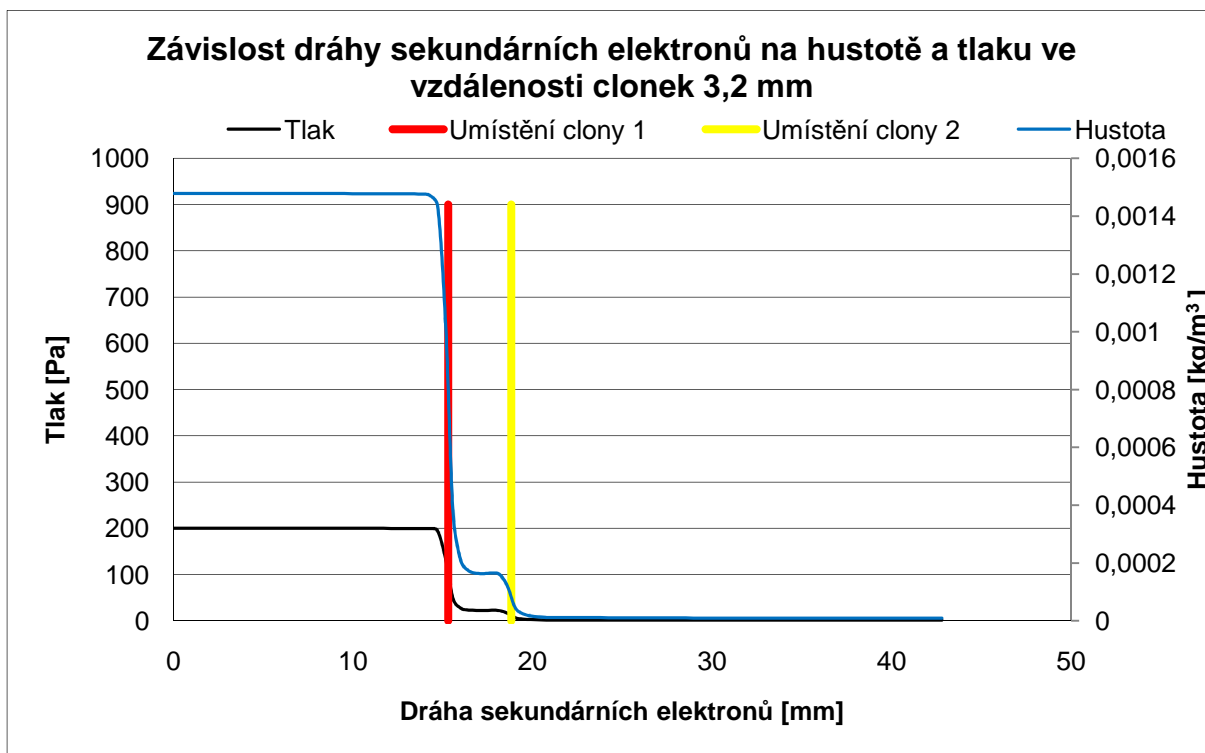
Obr. 93. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,4 mm



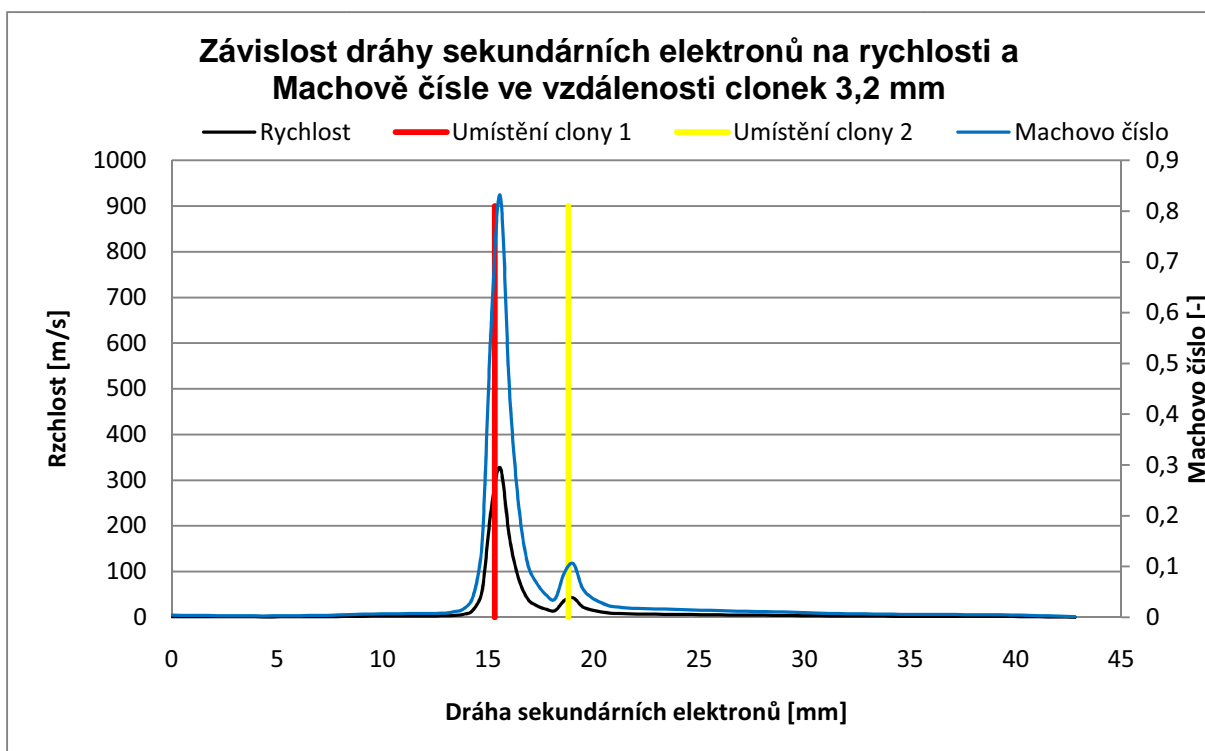
Obr. 94. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,8 mm



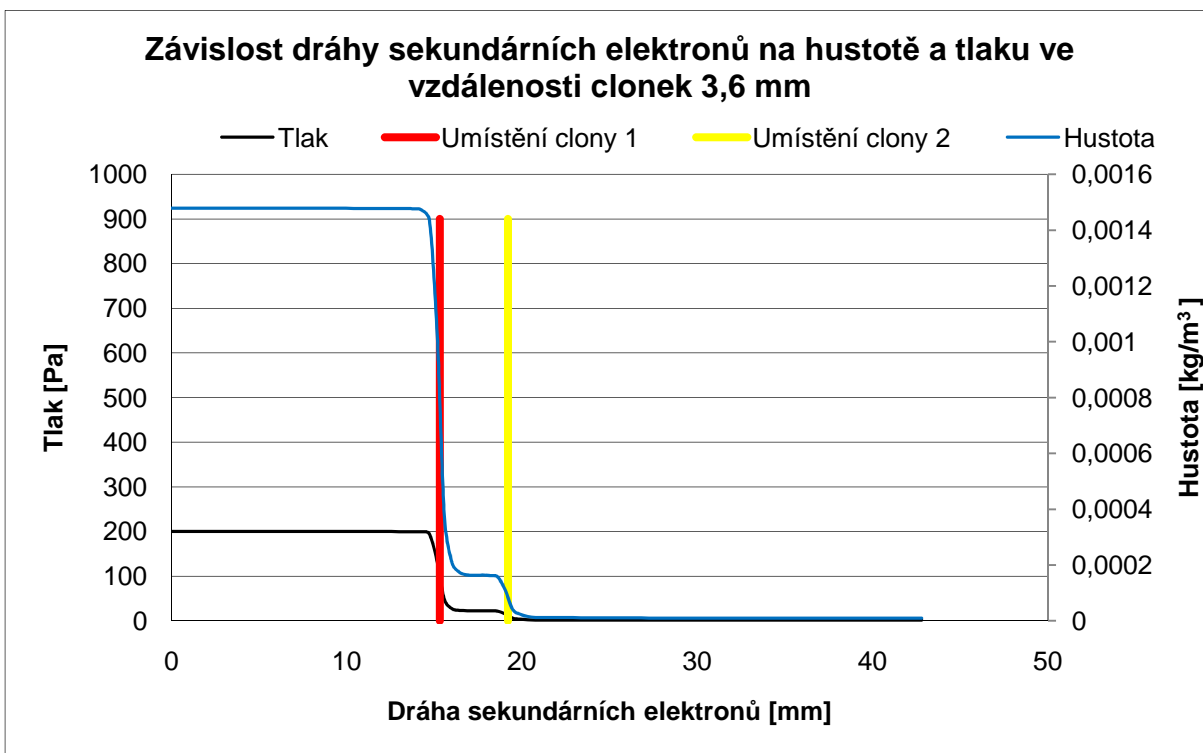
Obr. 95. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,8 mm



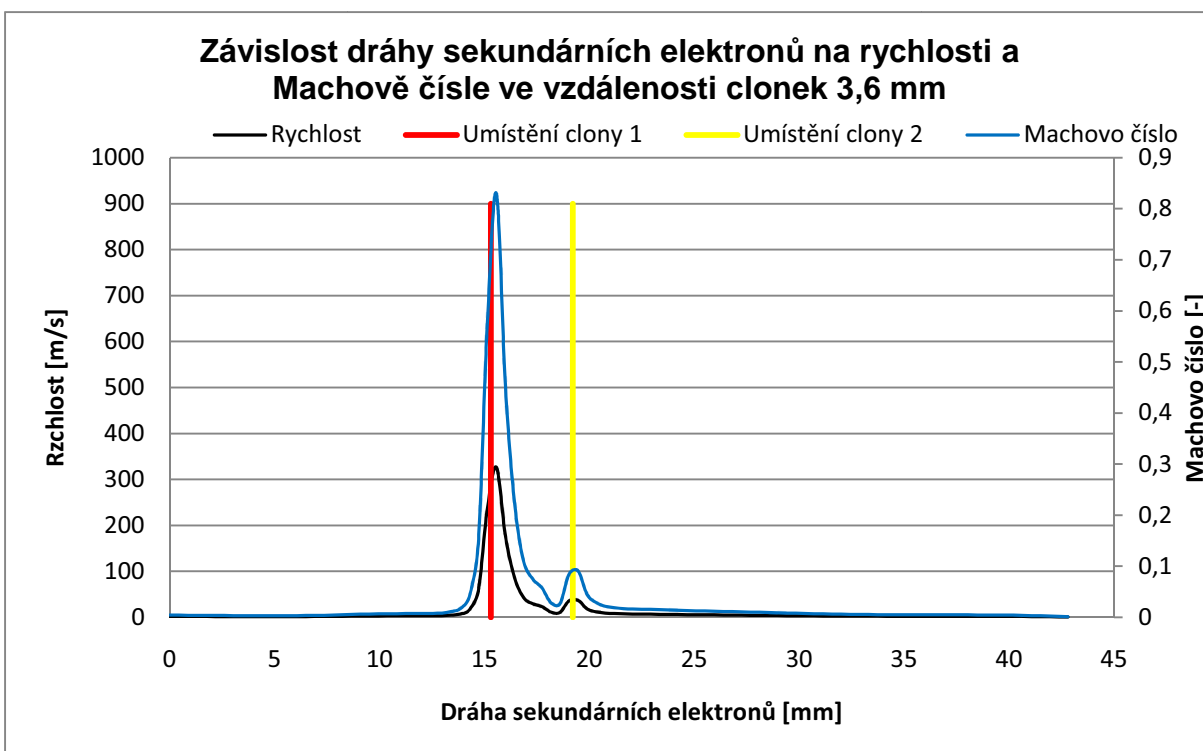
Obr. 96. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,2 mm



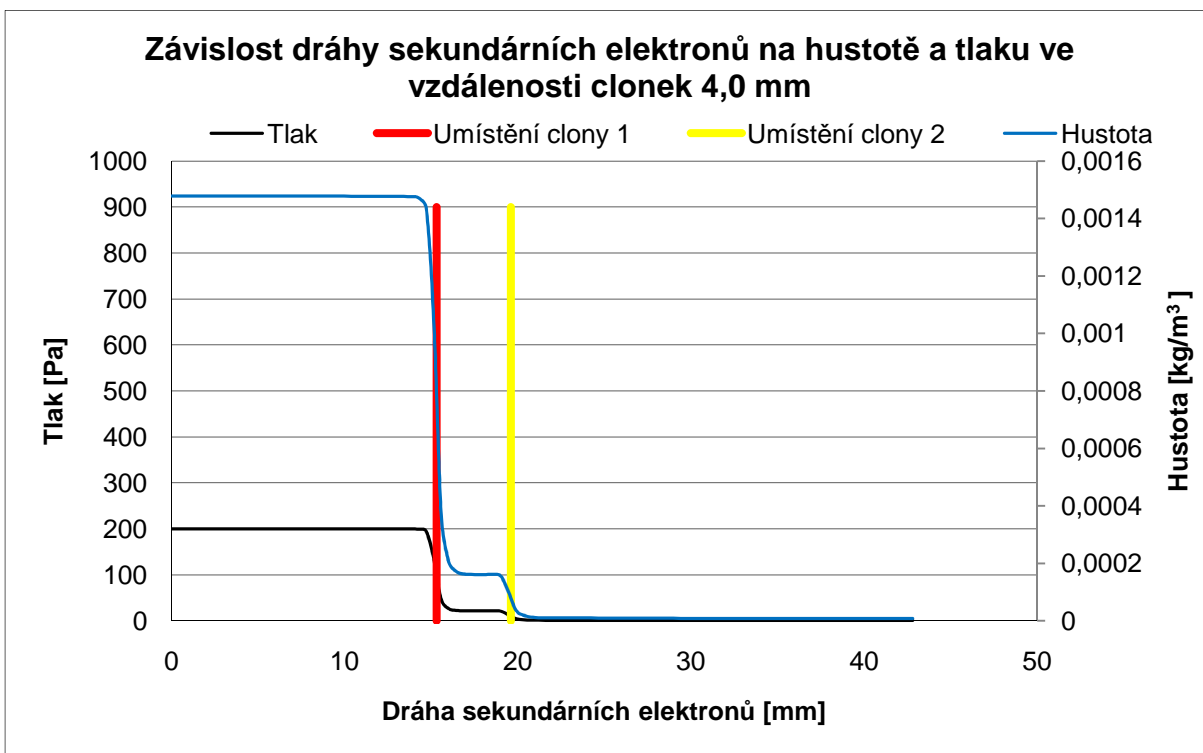
Obr. 97. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,2 mm



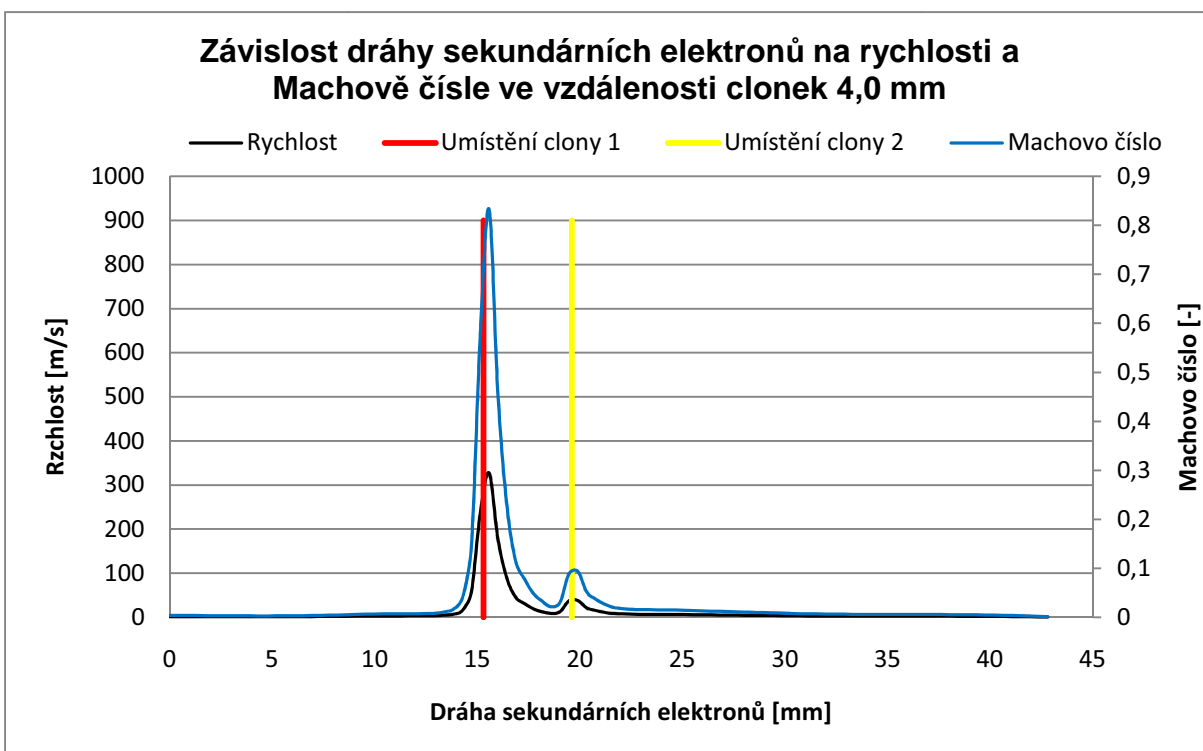
Obr. 98. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti cloněk 3,6 mm



Obr. 99. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti cloněk 3,6 mm

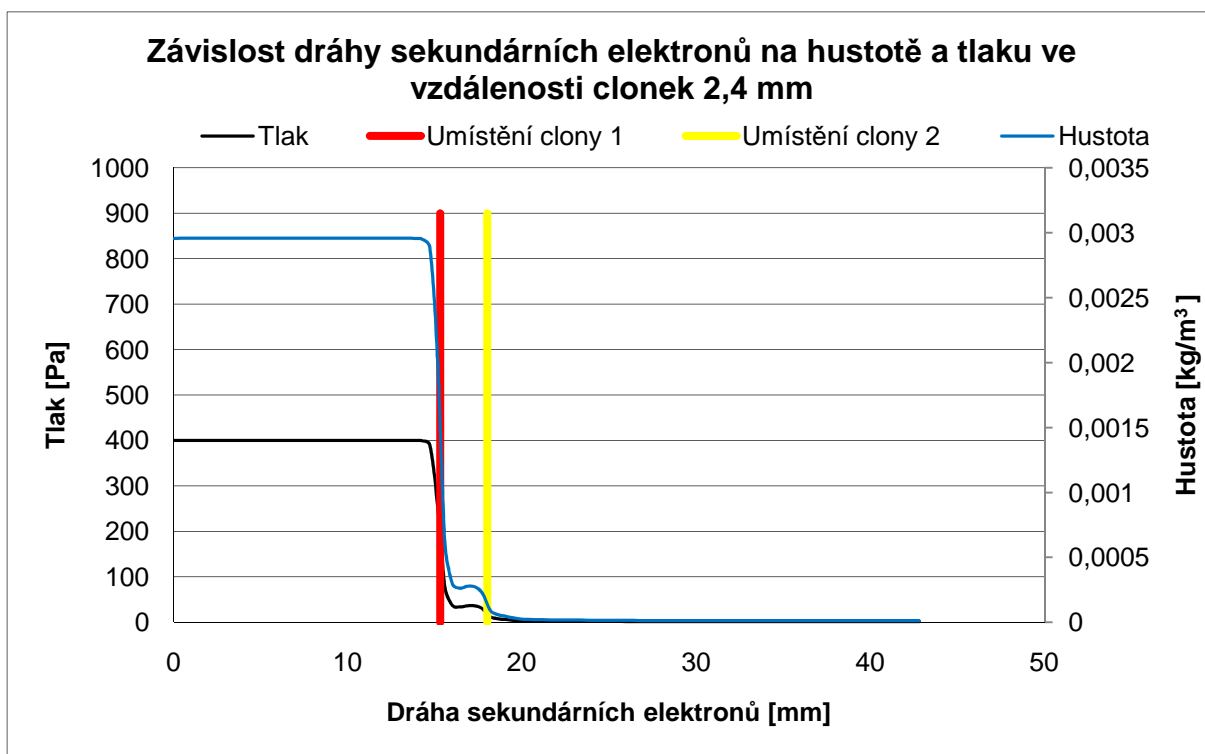


Obr. 100. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 4,0 mm

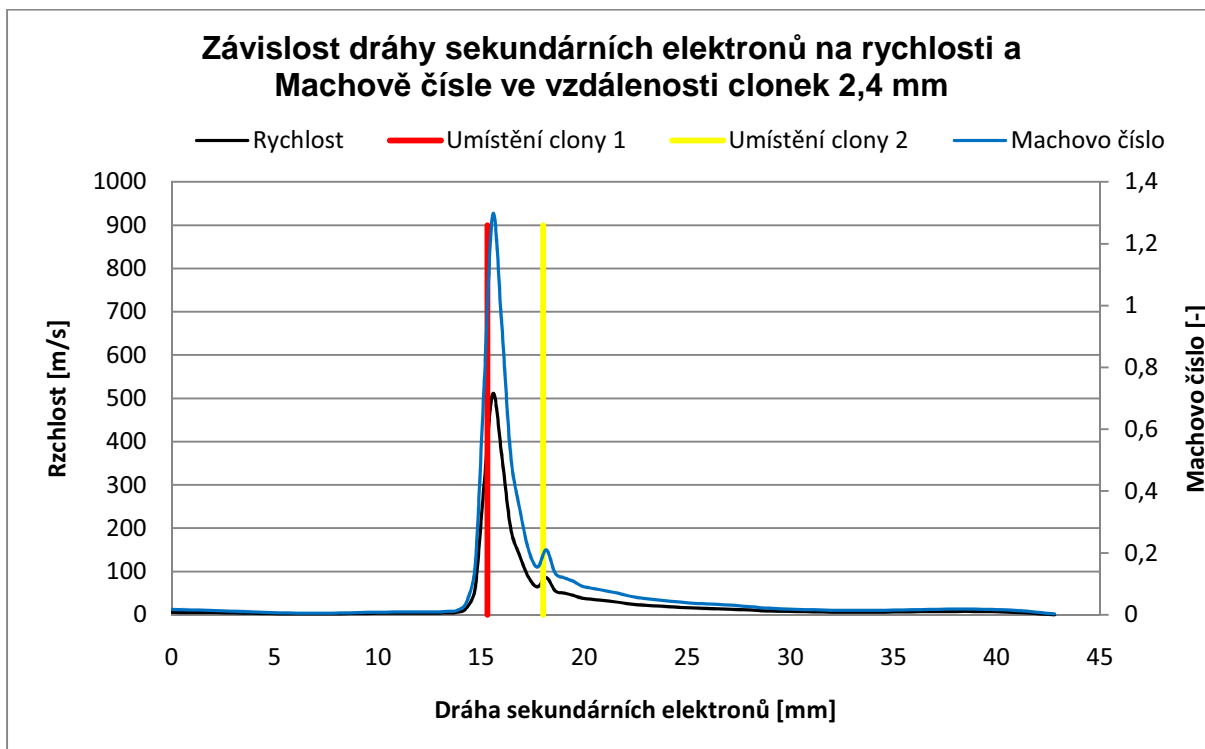


Obr. 101. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 200 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 4,0 mm

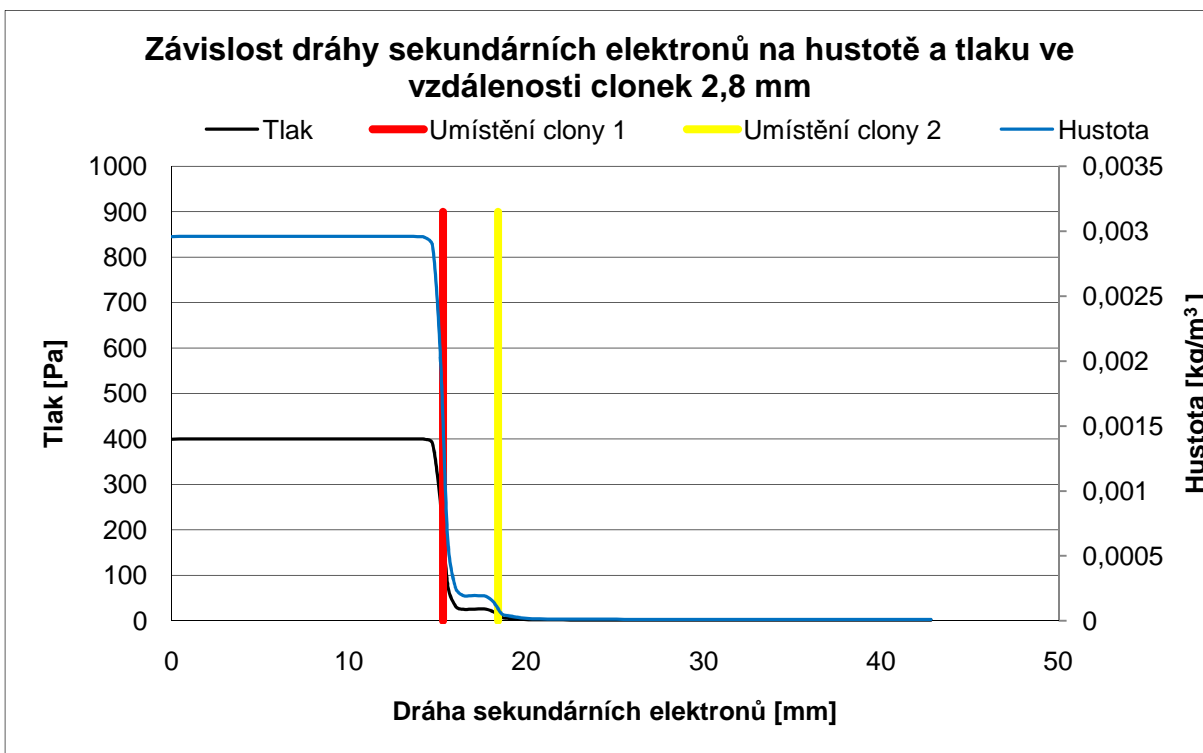
Tlak v komoře vzorku 400 Pa



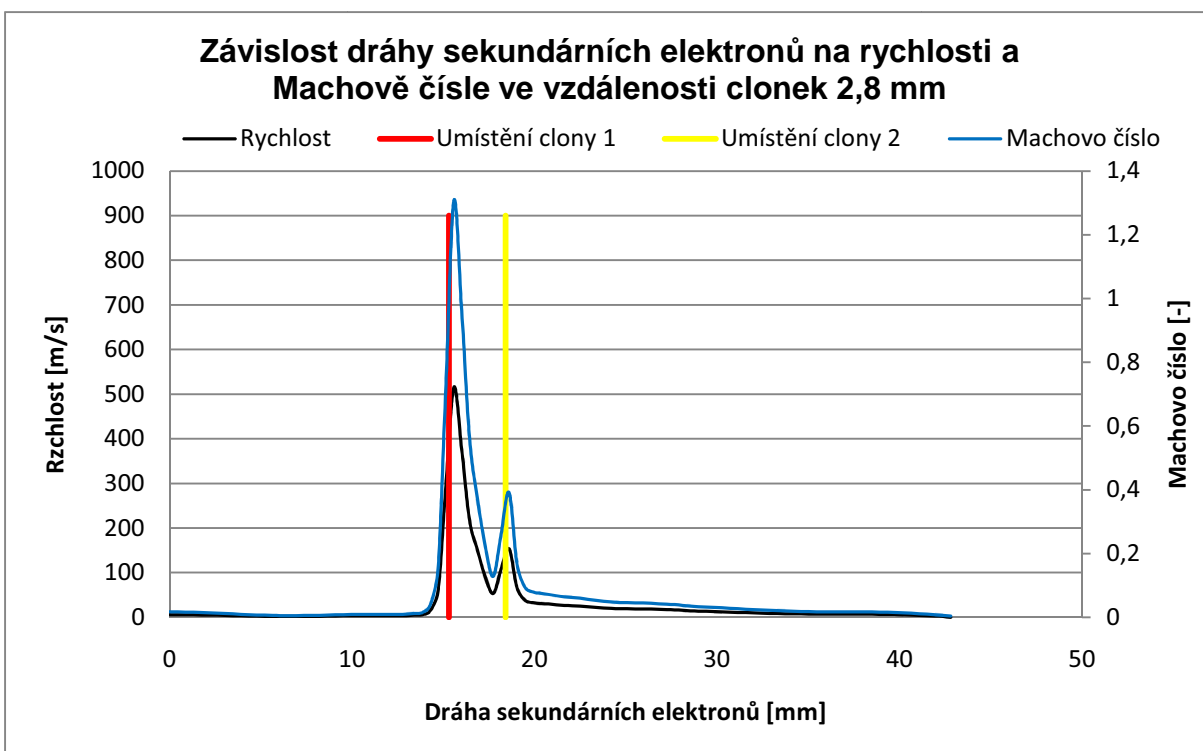
Obr. 102. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,4 mm



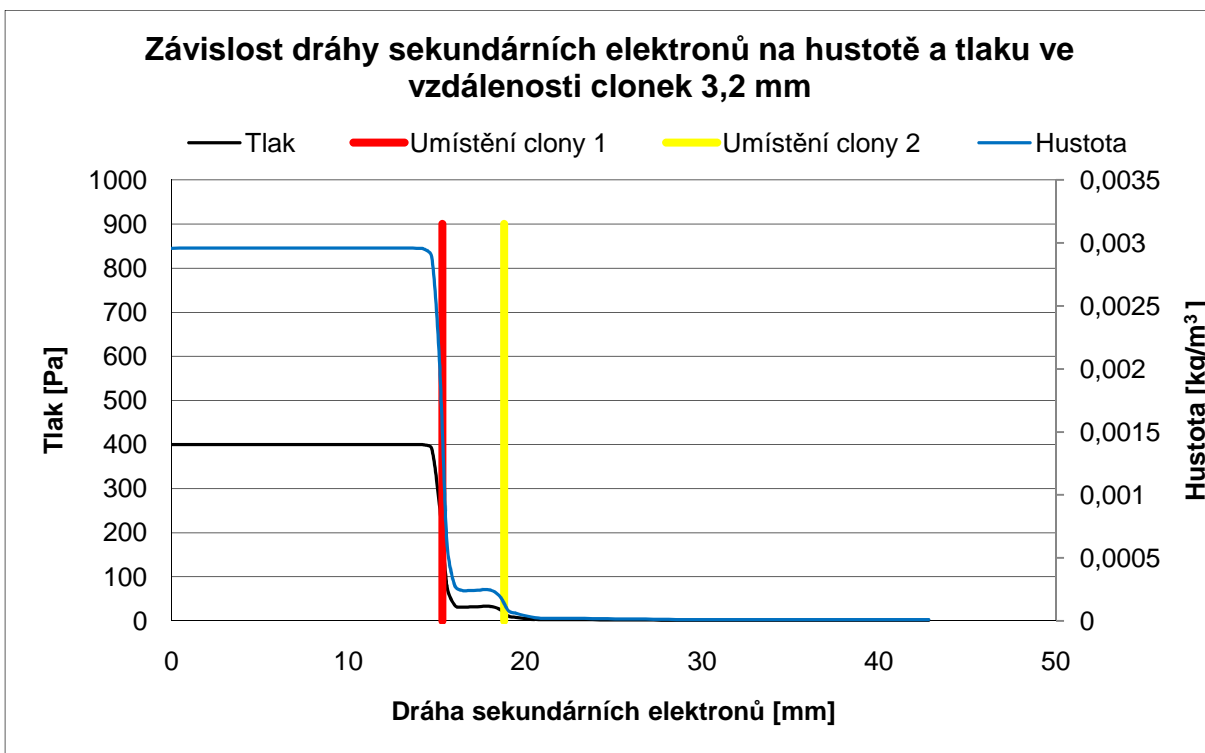
Obr. 103. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,4 mm



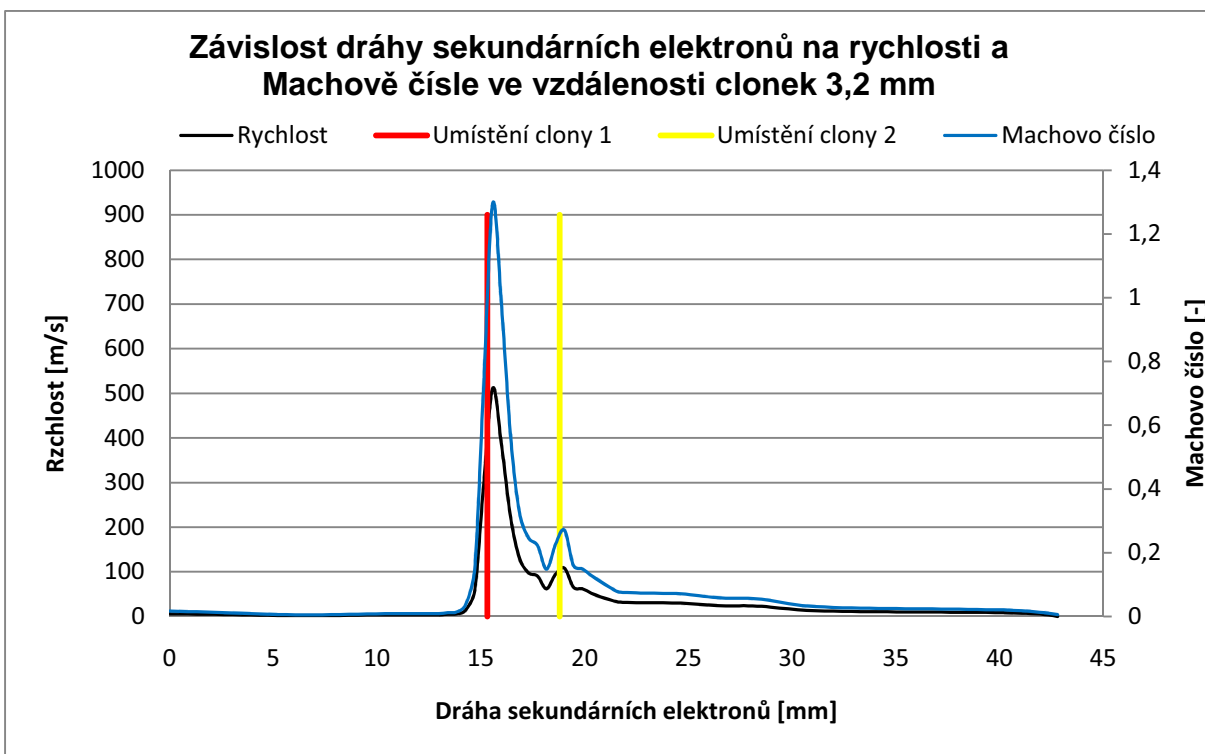
Obr. 104. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,8 mm



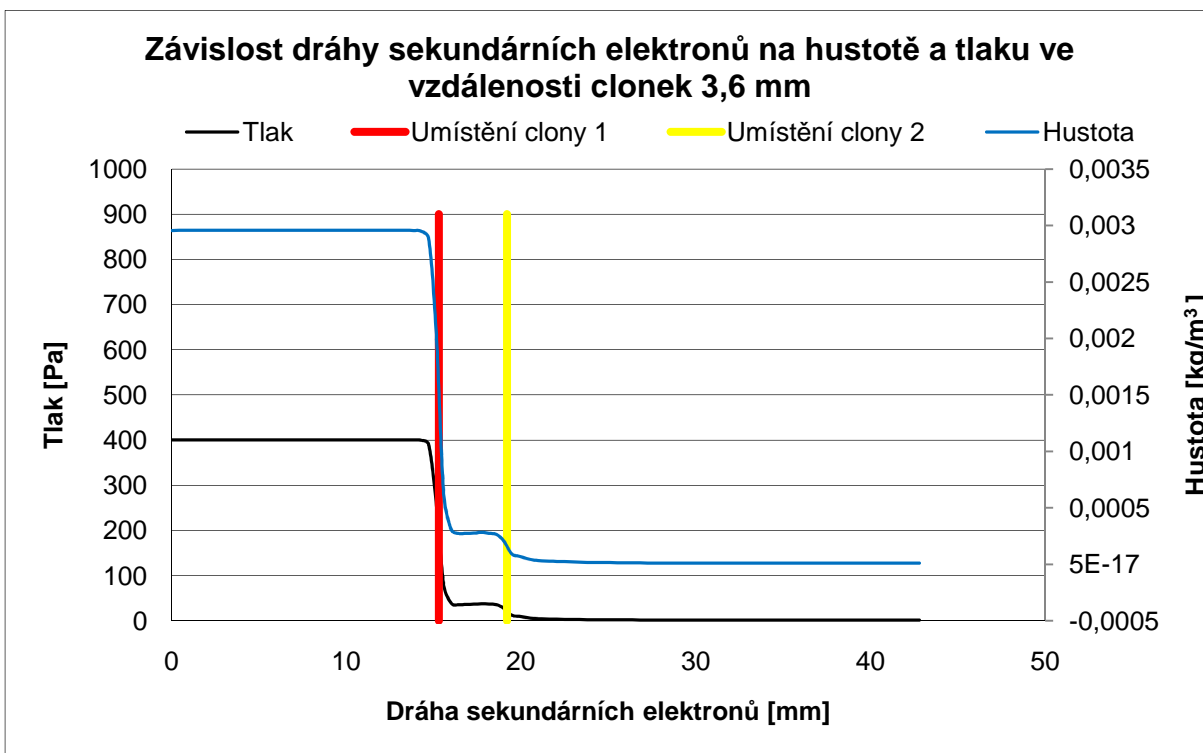
Obr. 105. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,8 mm



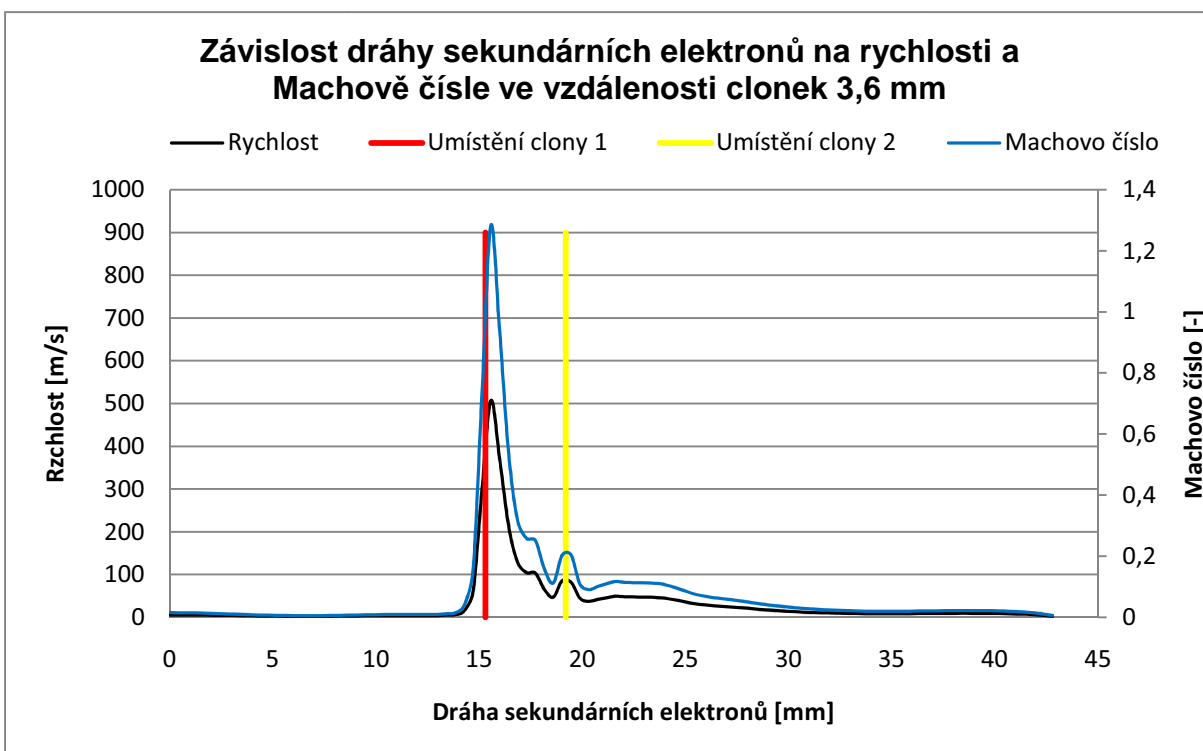
Obr. 106. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,2 mm



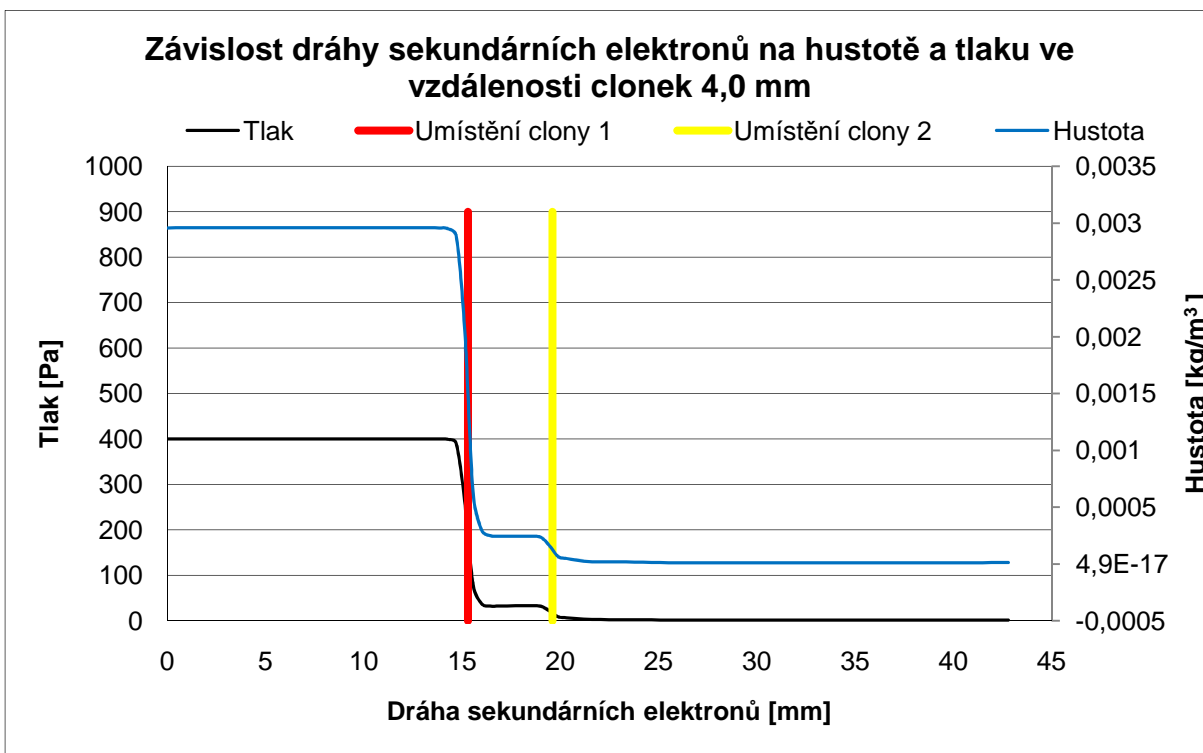
Obr. 107. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,2 mm



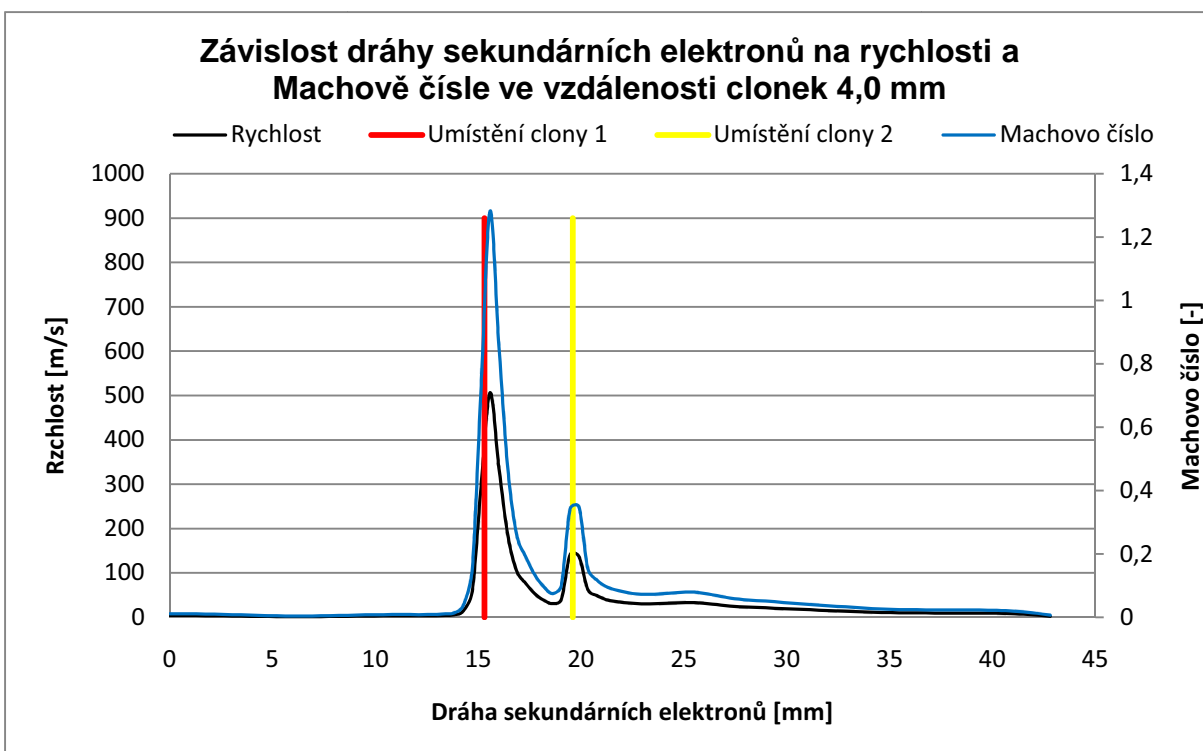
Obr. 108. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,6 mm



Obr. 109. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,6 mm

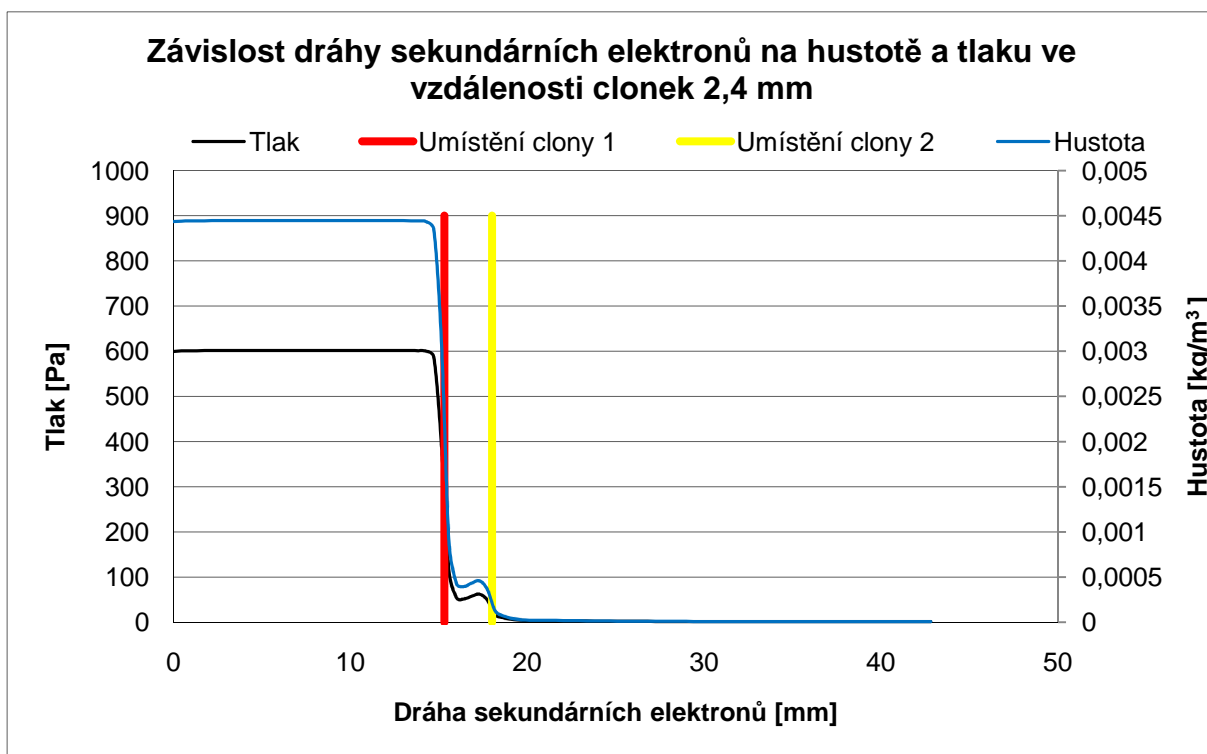


Obr. 110. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 4,0 mm

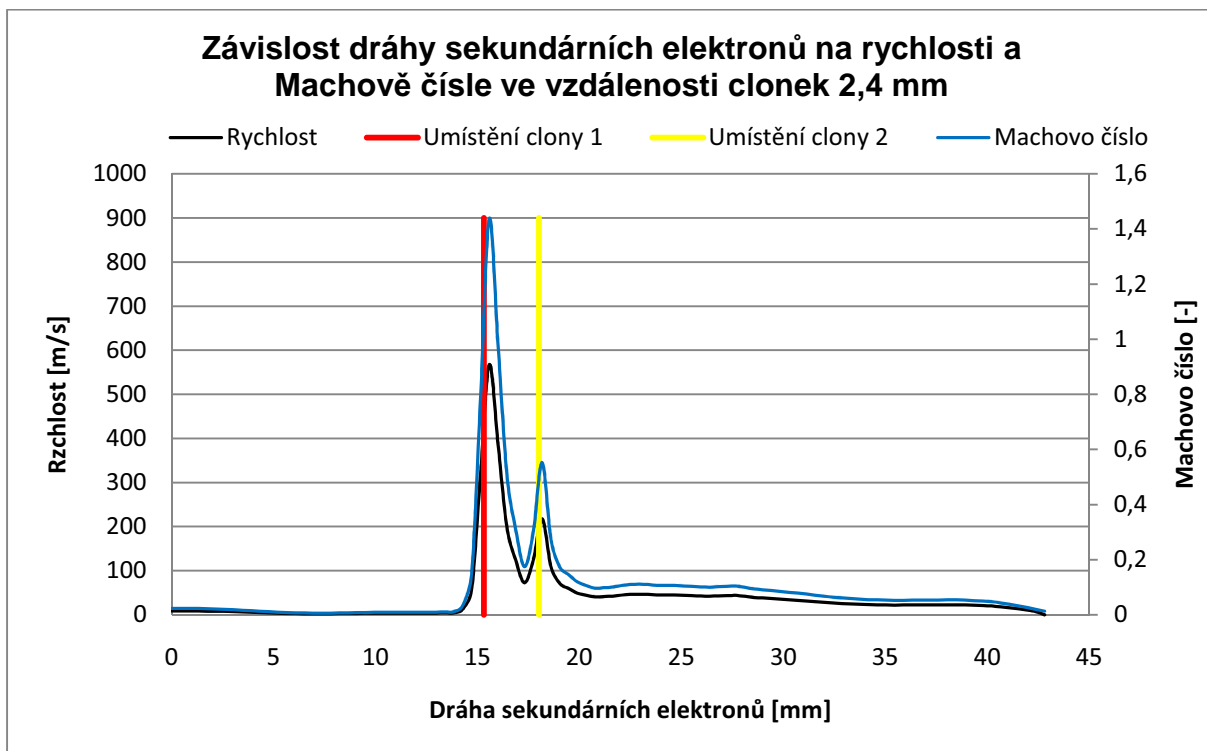


Obr. 111. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 400 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 4,0 mm

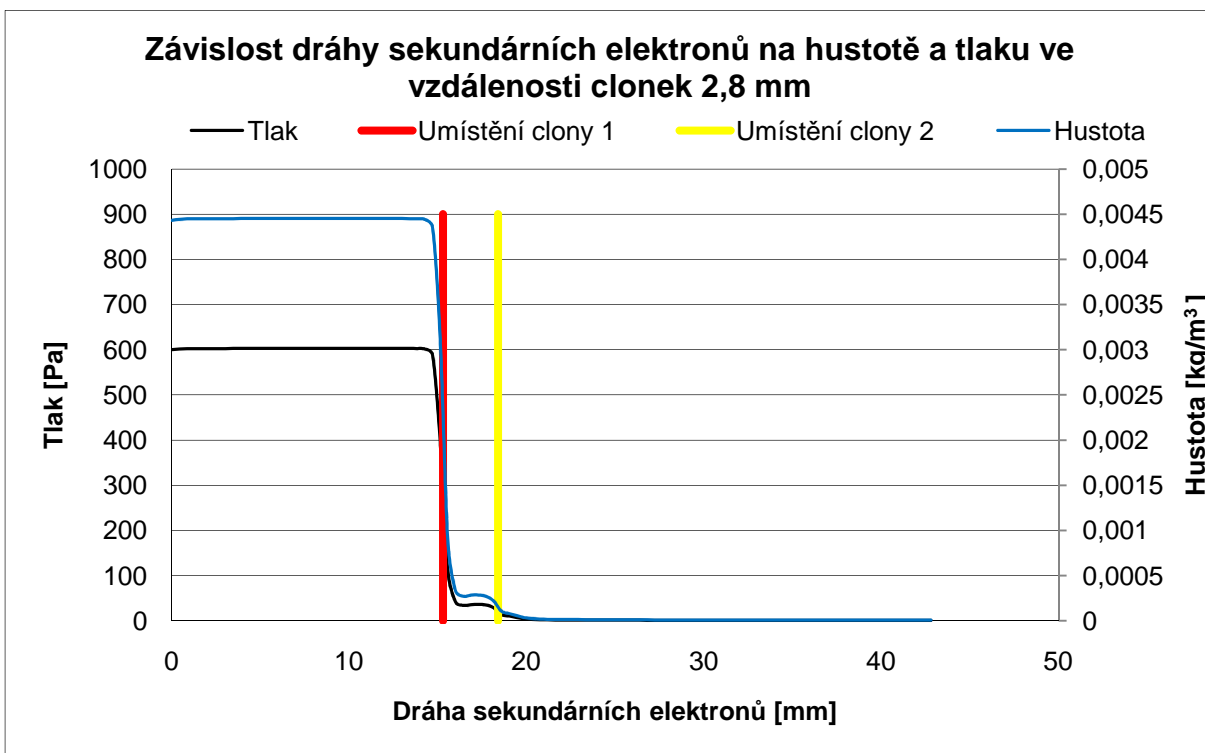
Tlak v komoře vzorku 600 Pa



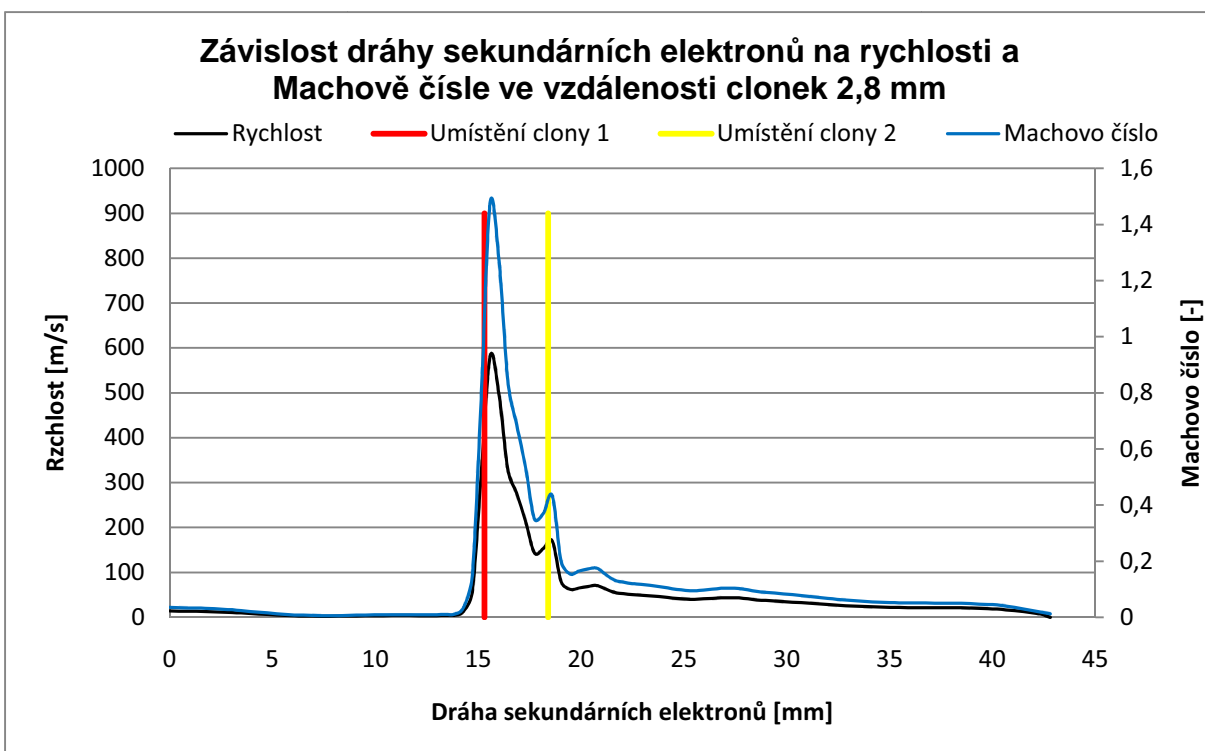
Obr. 112. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonok 2,4 mm



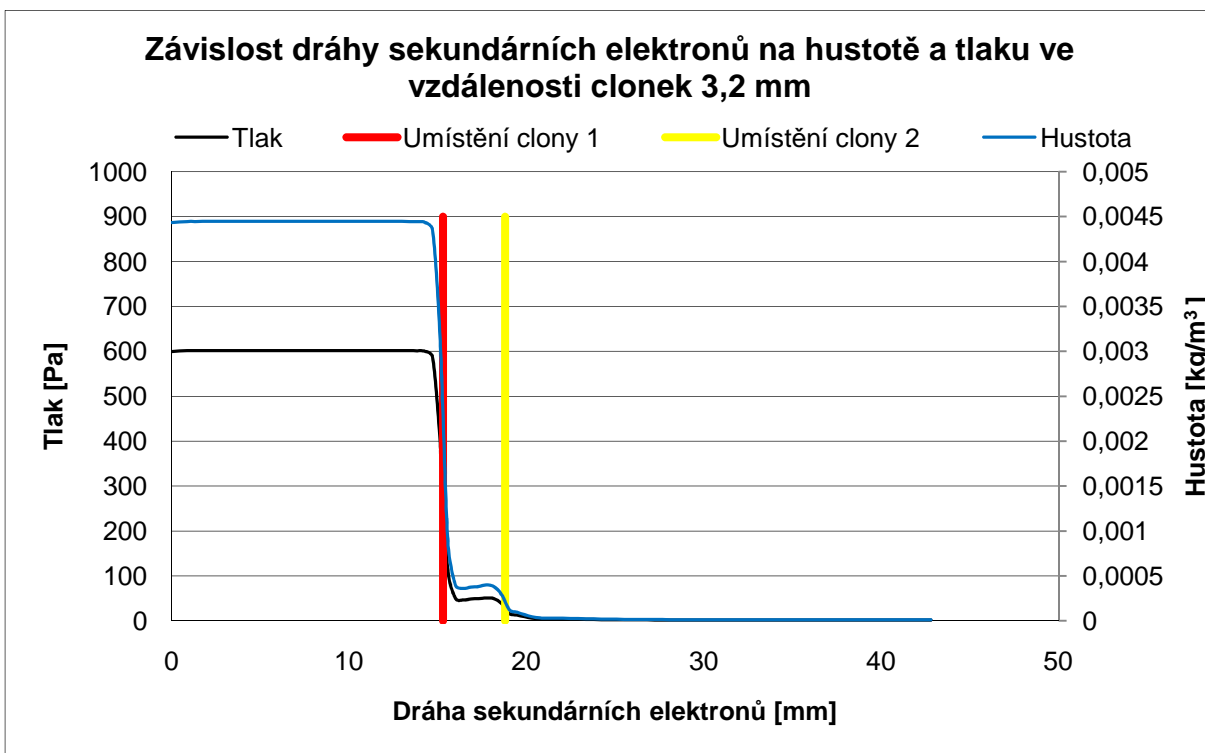
Obr. 113. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonok 2,4 mm



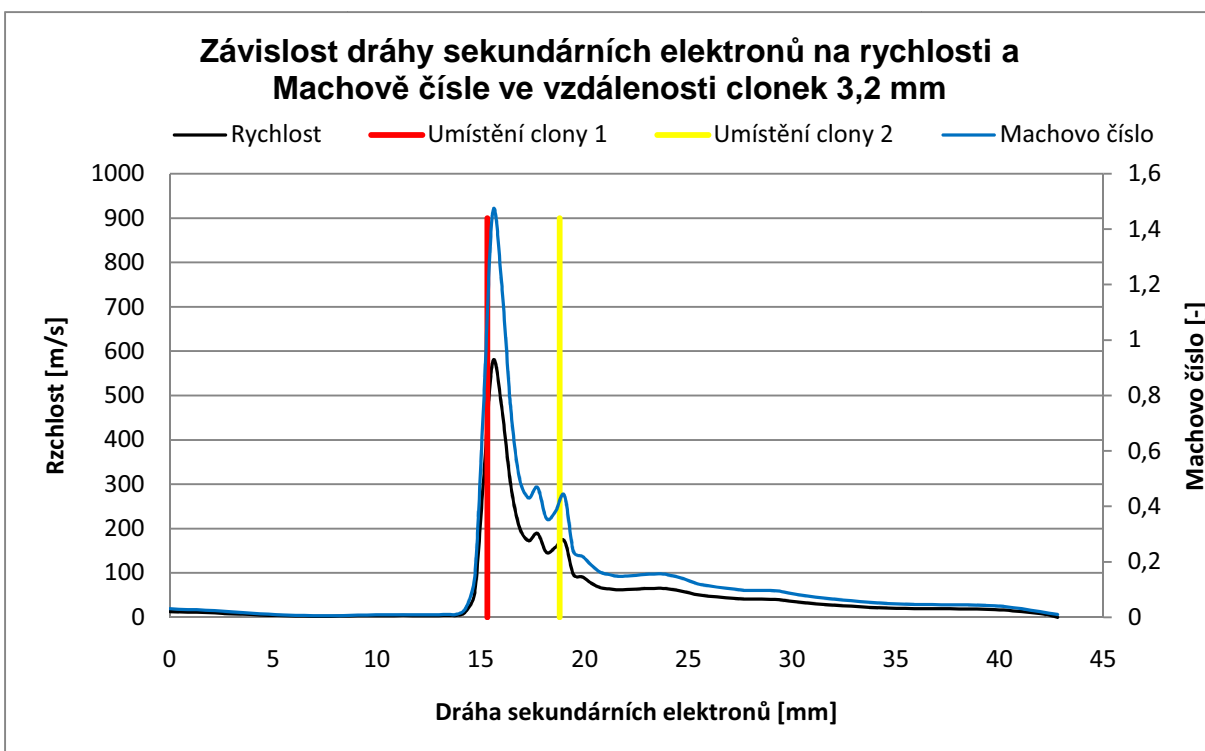
Obr. 114. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,8 mm



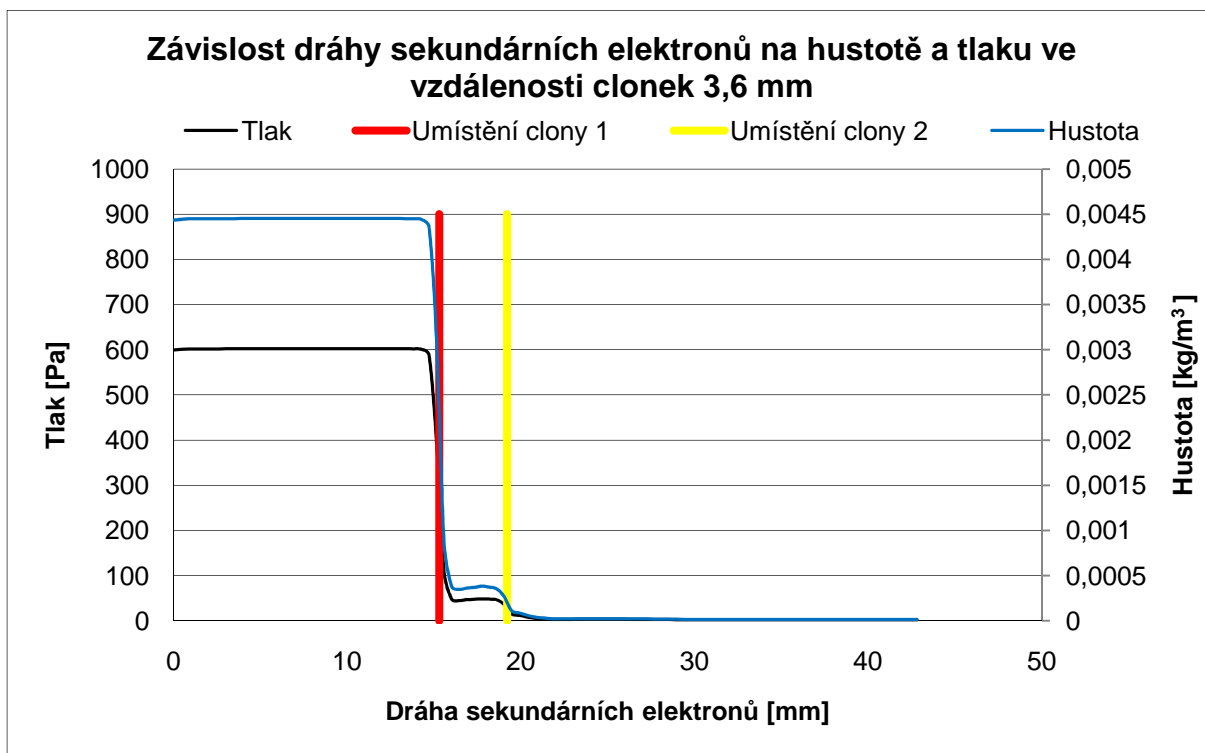
Obr. 115. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,8 mm



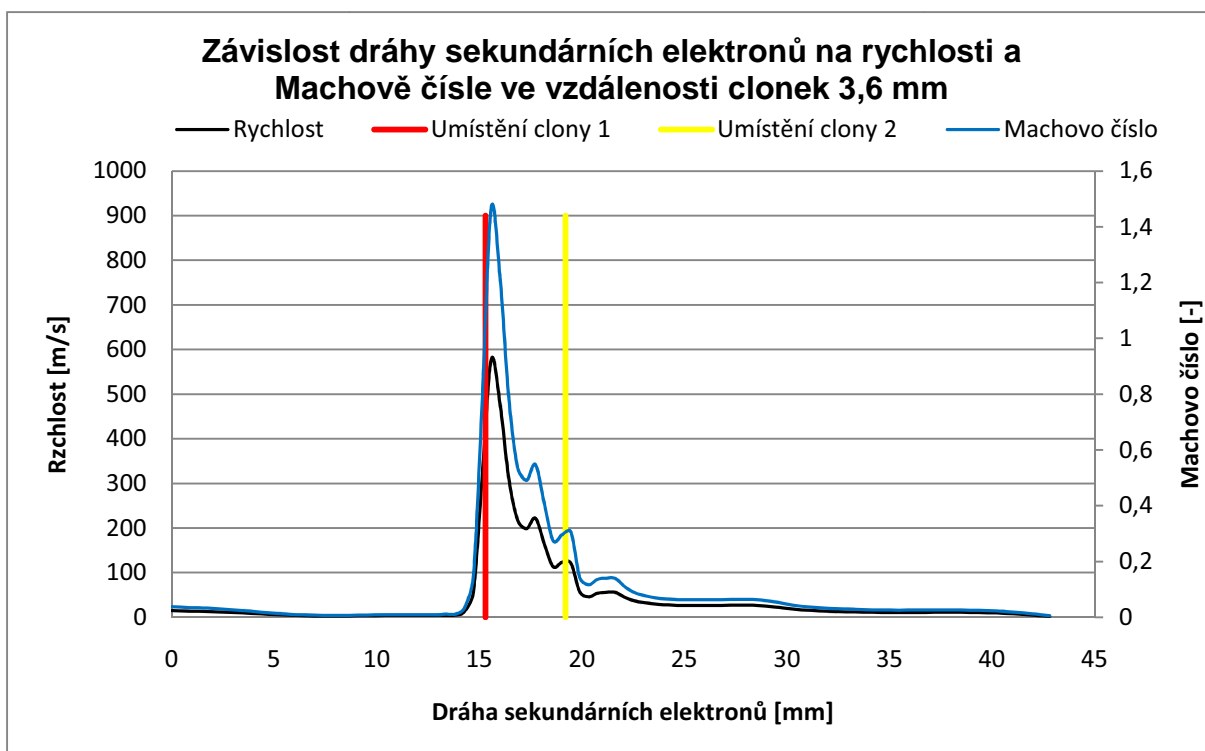
Obr. 116. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,2 mm



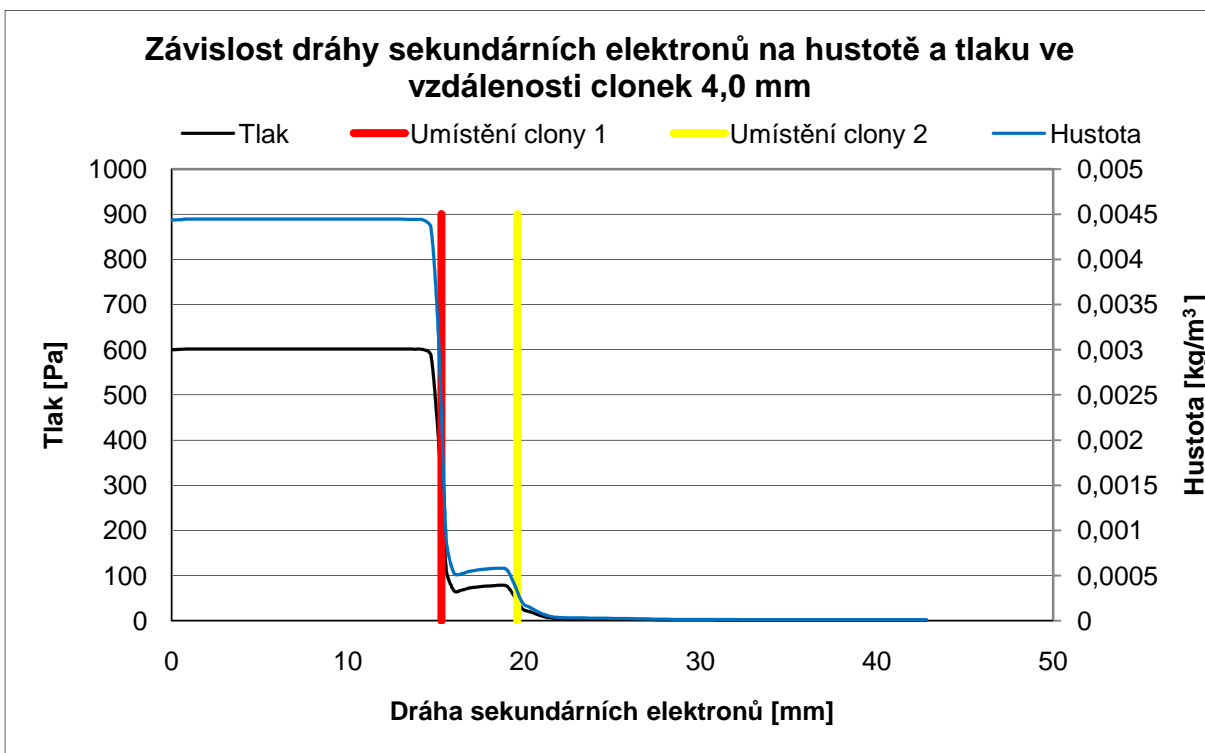
Obr. 117. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,2 mm



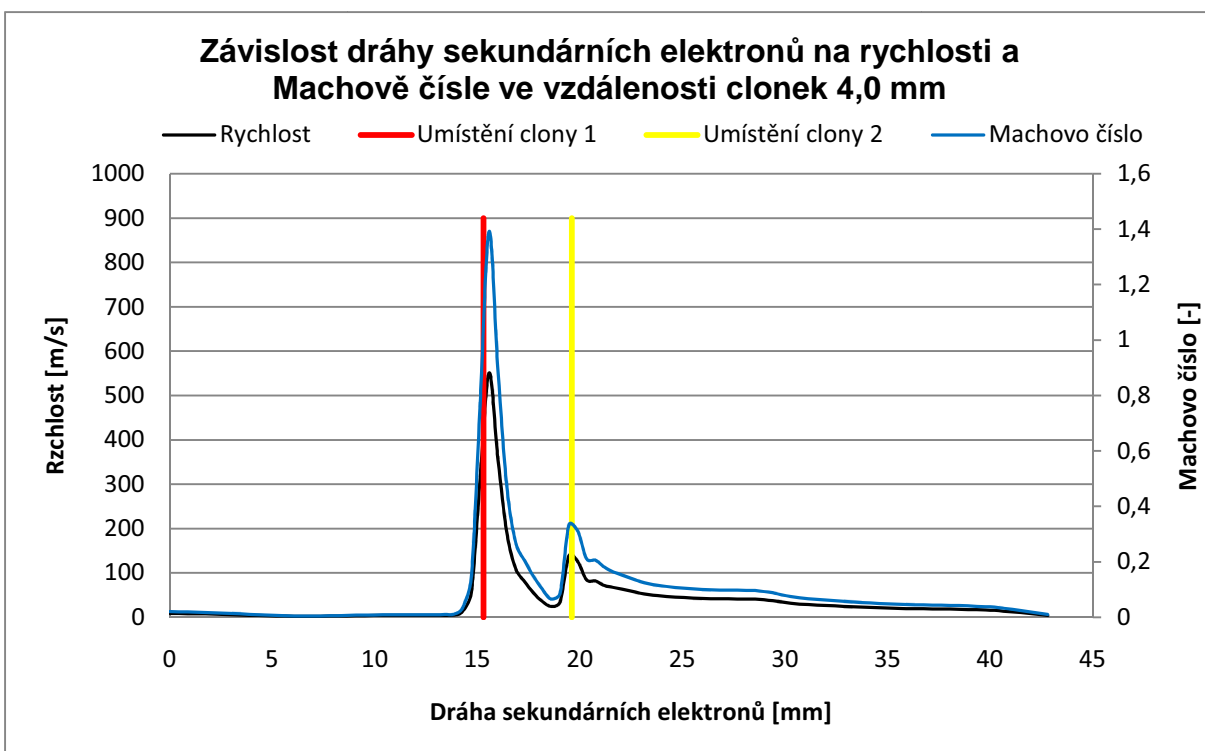
Obr. 118. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,6 mm



Obr. 119. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,6 mm

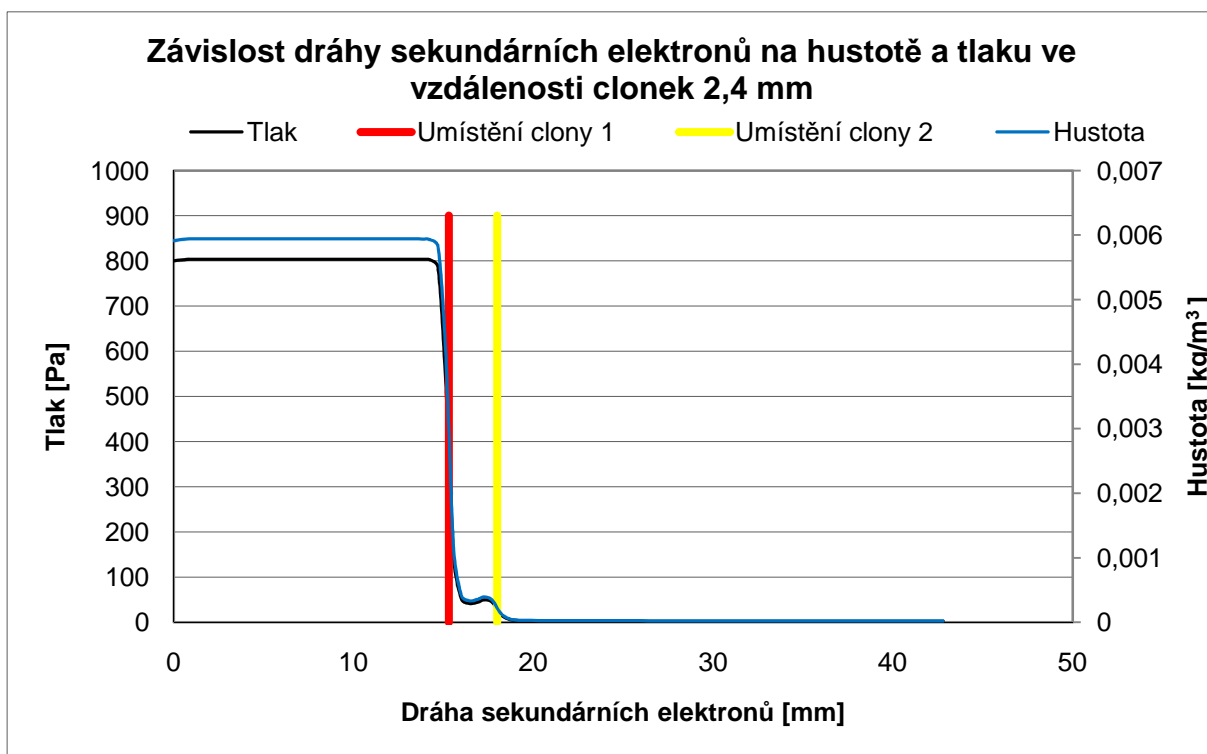


Obr. 120. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 4,0 mm

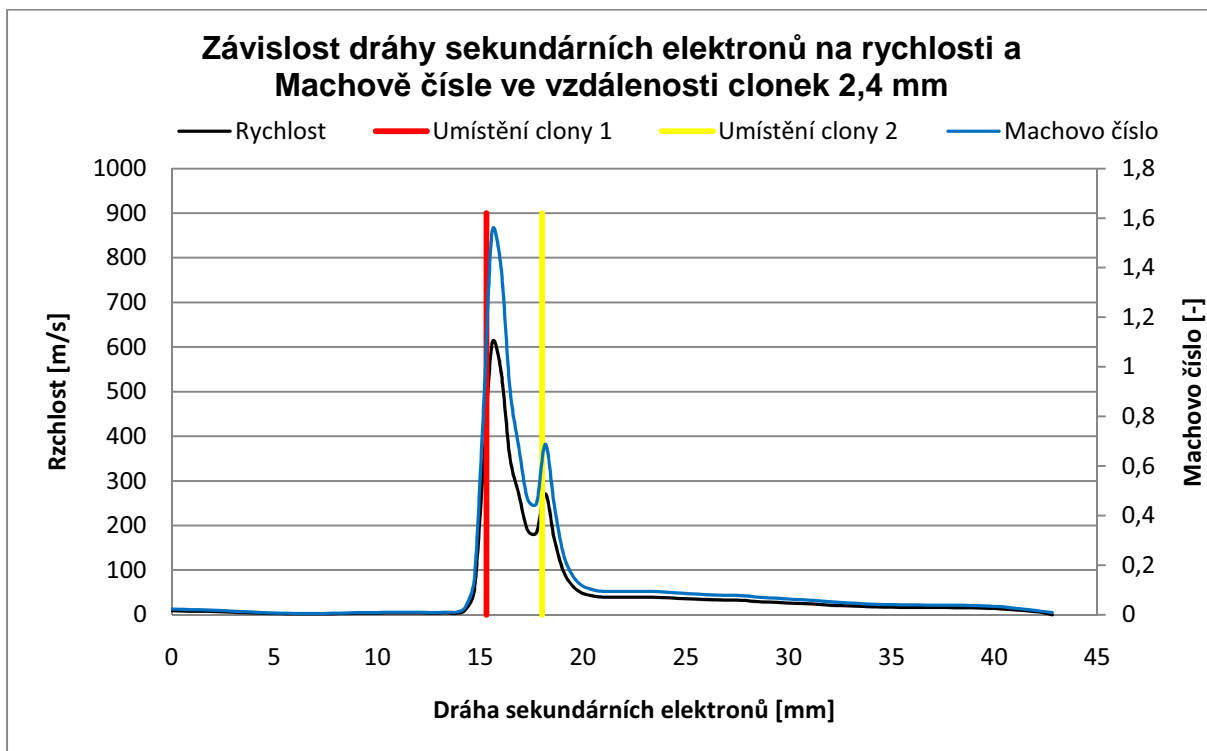


Obr. 121. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 600 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 4,0 mm

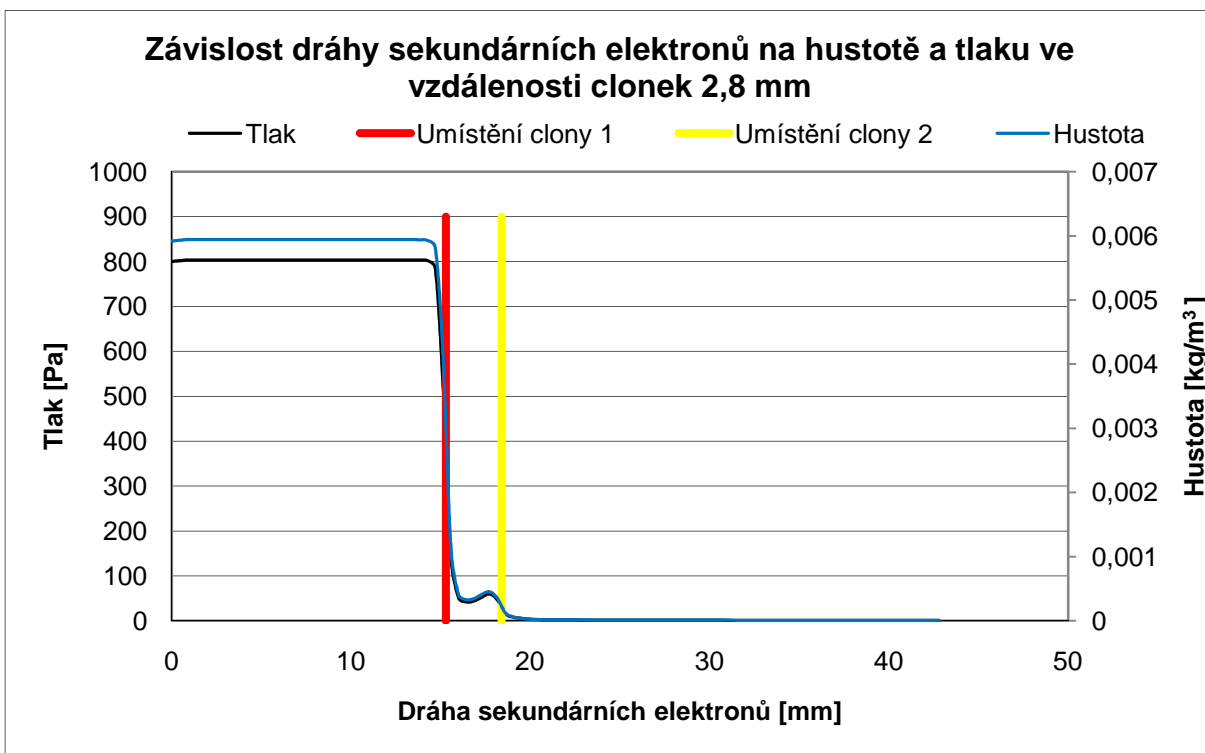
Tlak v komoře vzorku 800 Pa



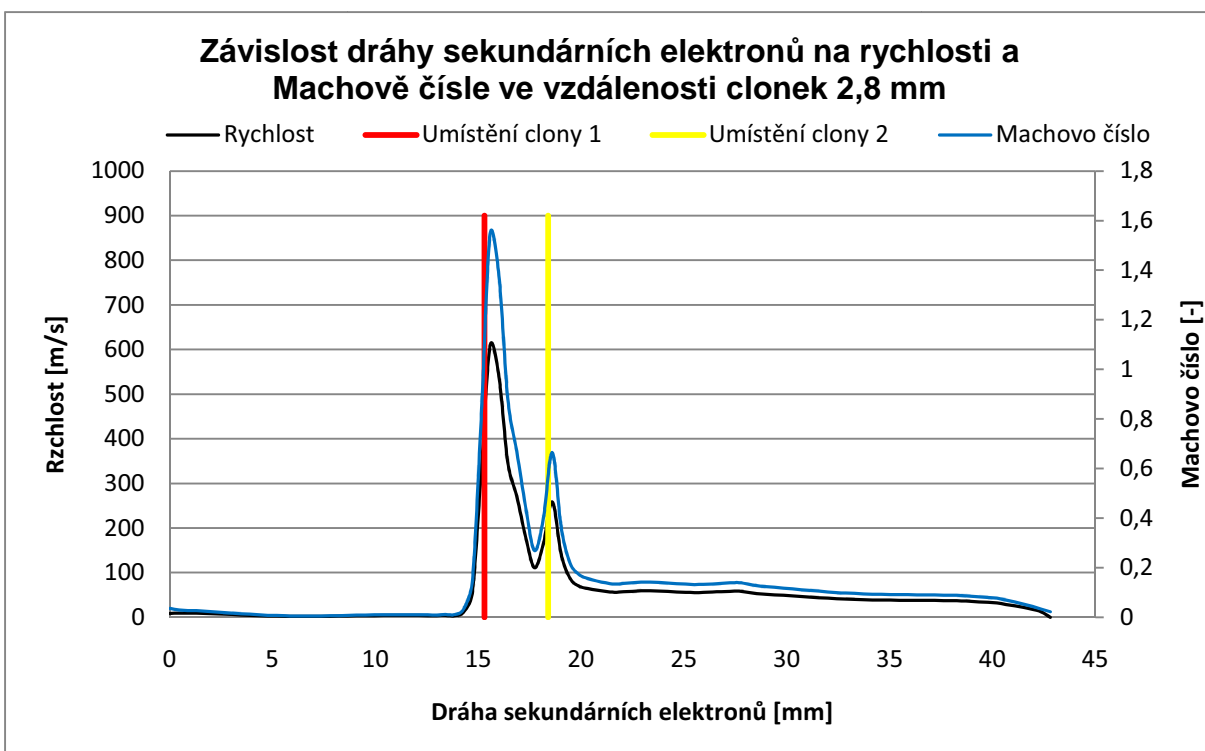
Obr. 122. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,4 mm



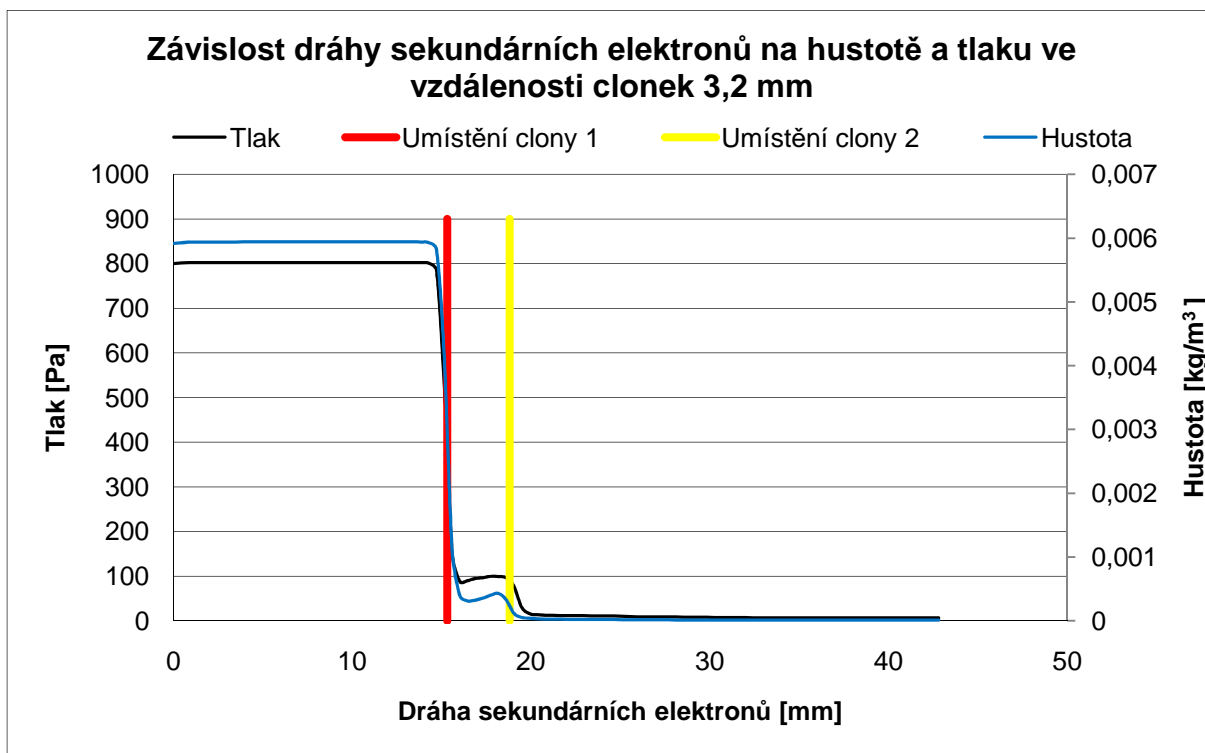
Obr. 123. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,4 mm



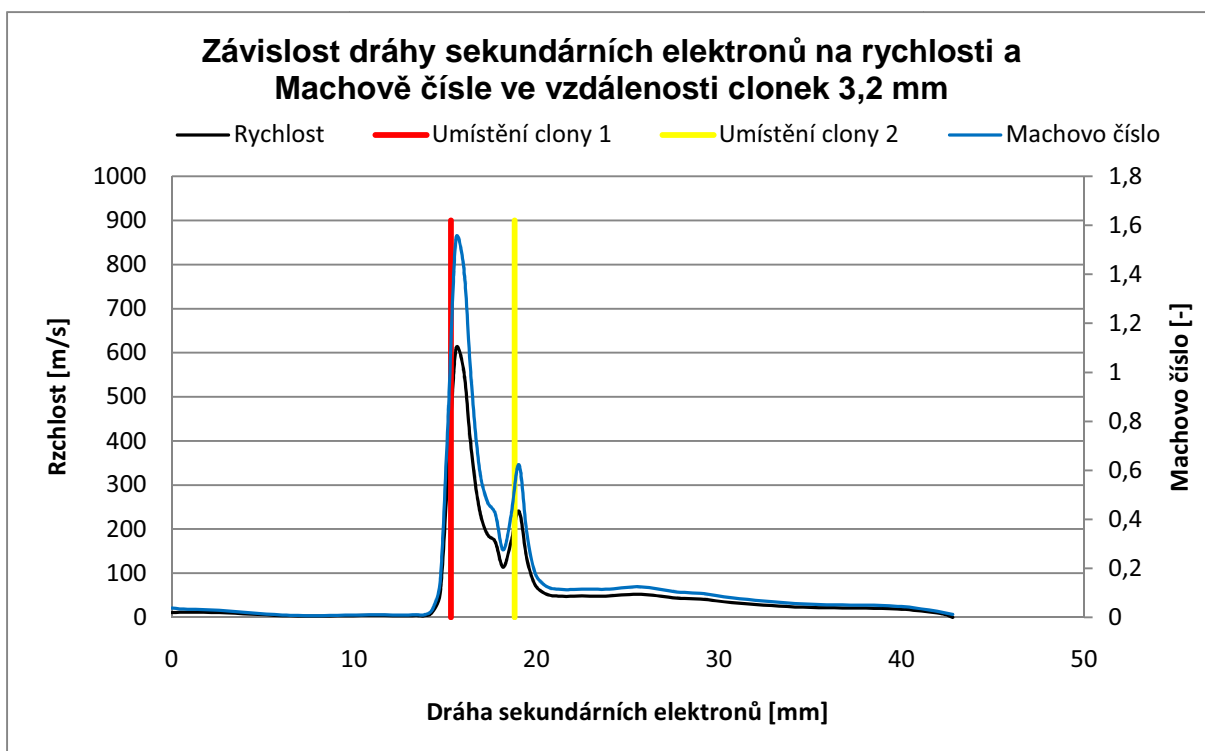
Obr. 124. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,8 mm



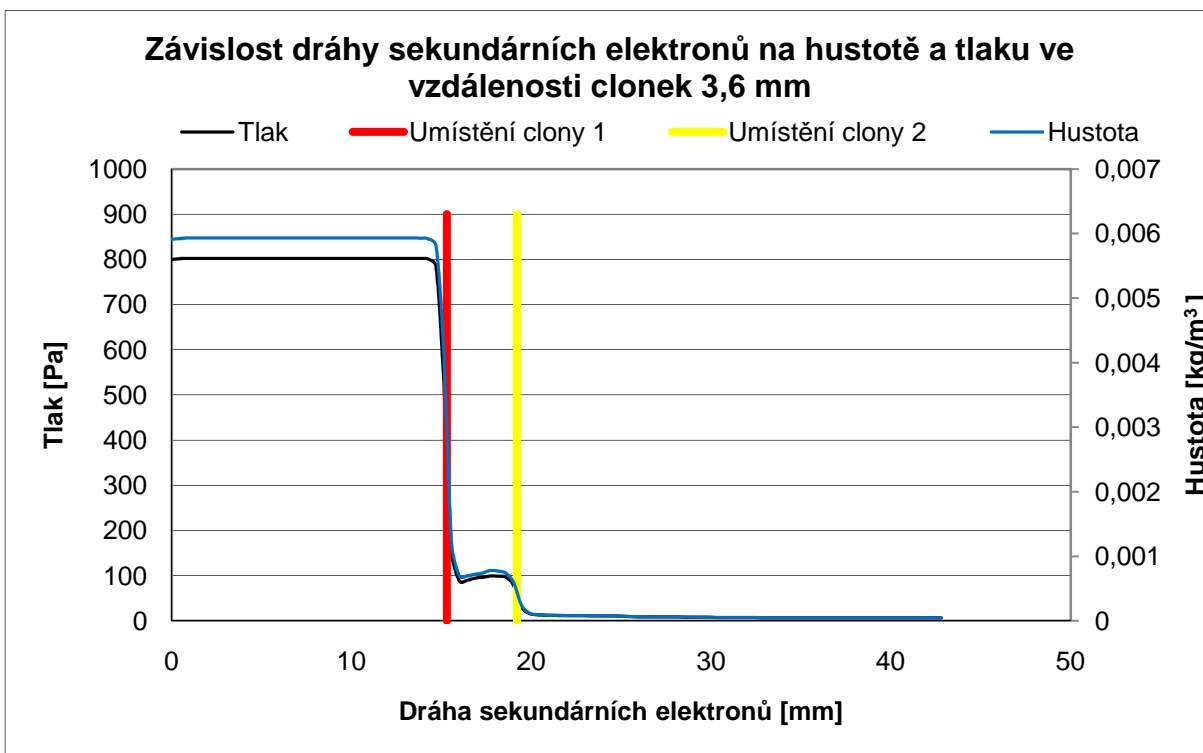
Obr. 125. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,8 mm



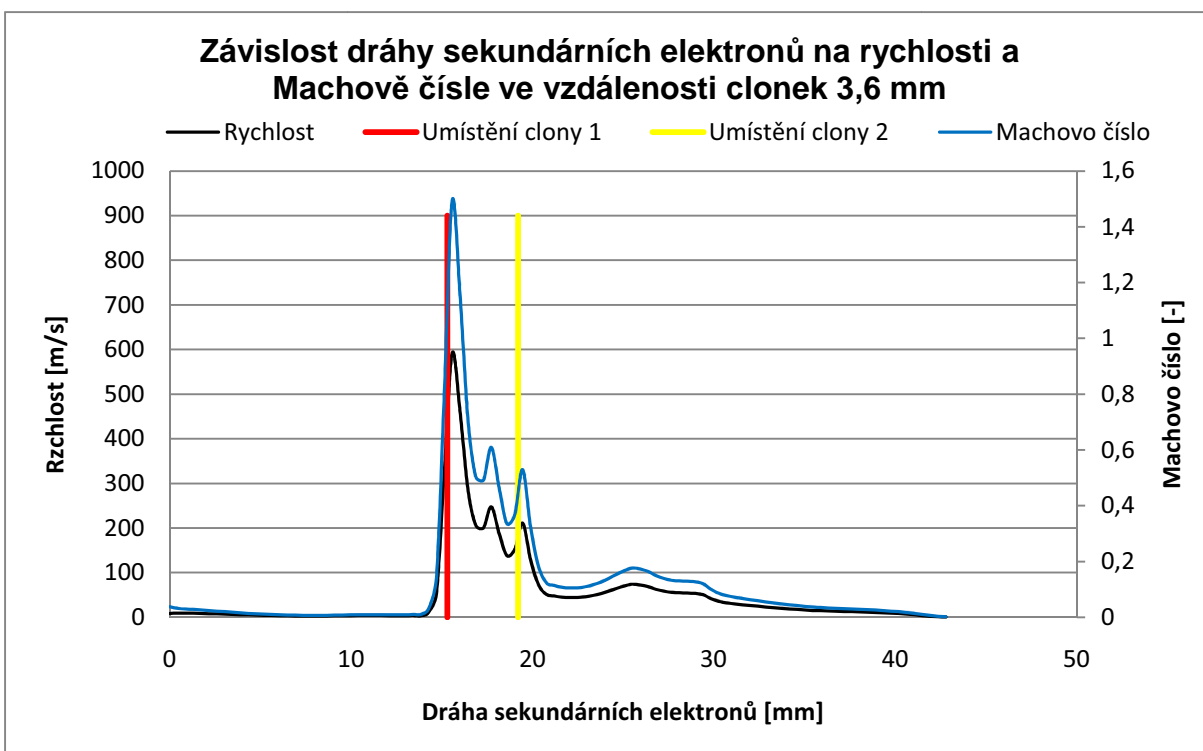
Obr. 126. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,2 mm



Obr. 127. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,2 mm

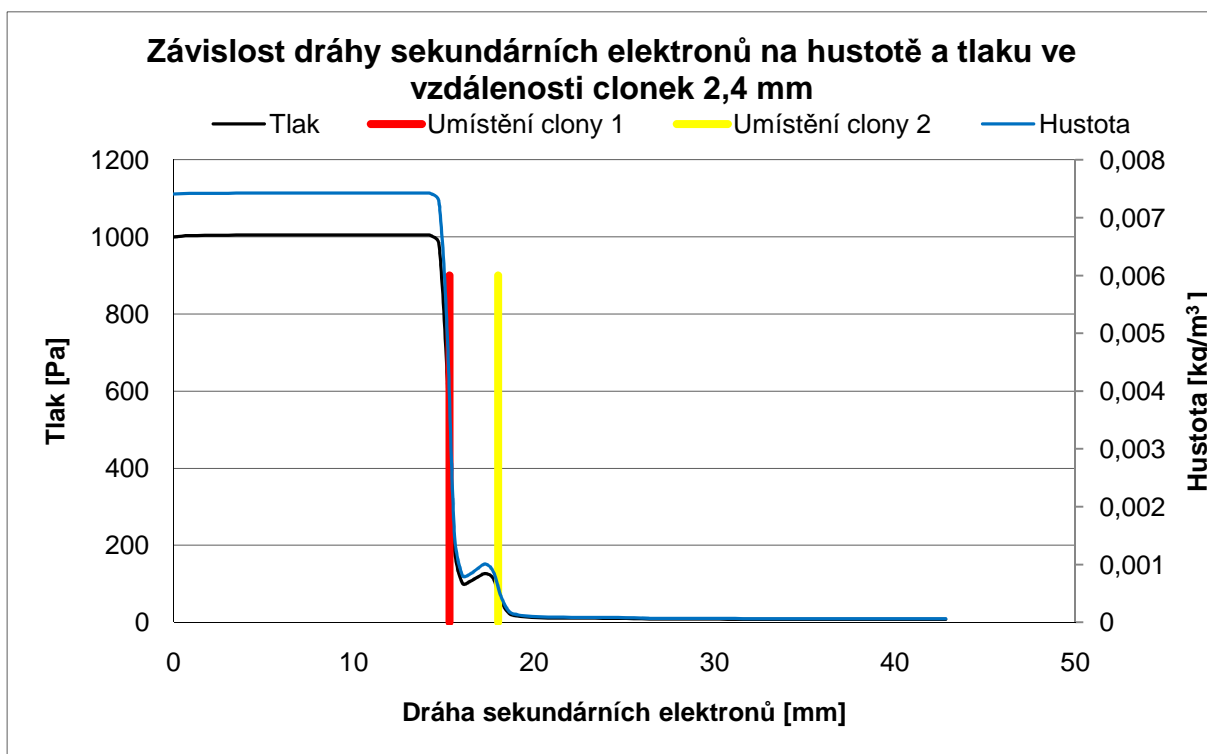


Obr. 128. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,6 mm

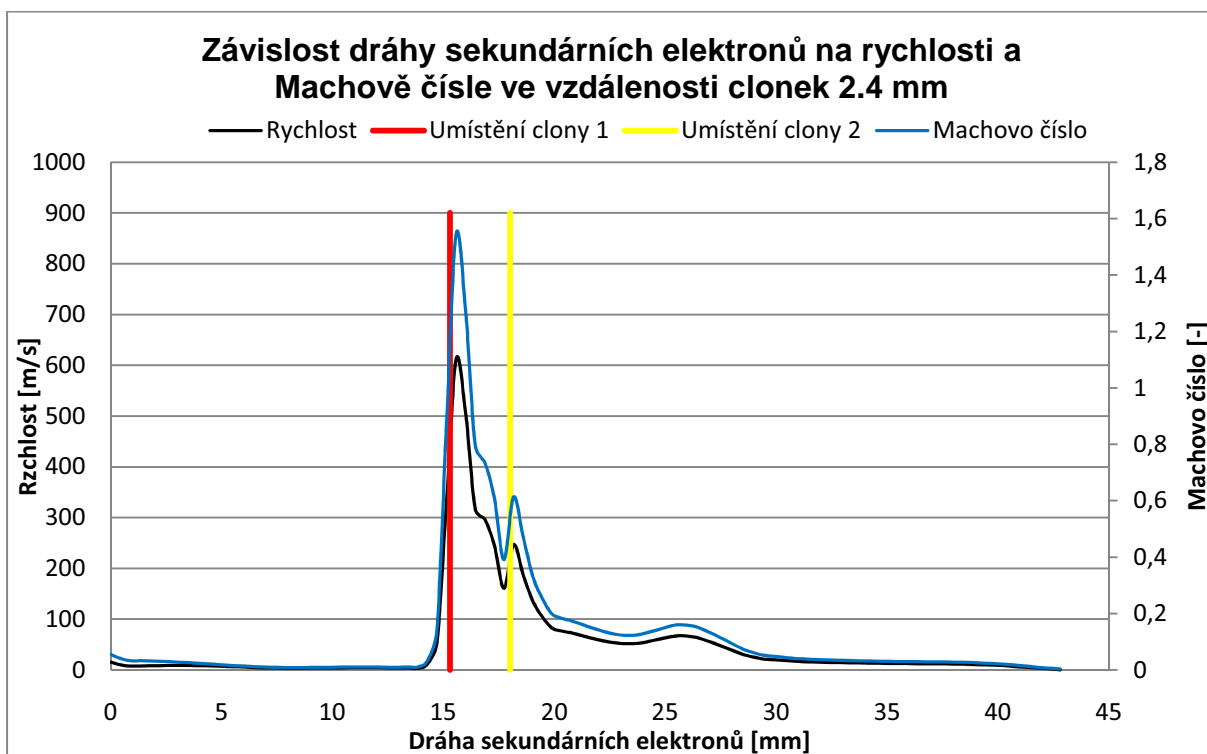


Obr. 129. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 800 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,6 mm

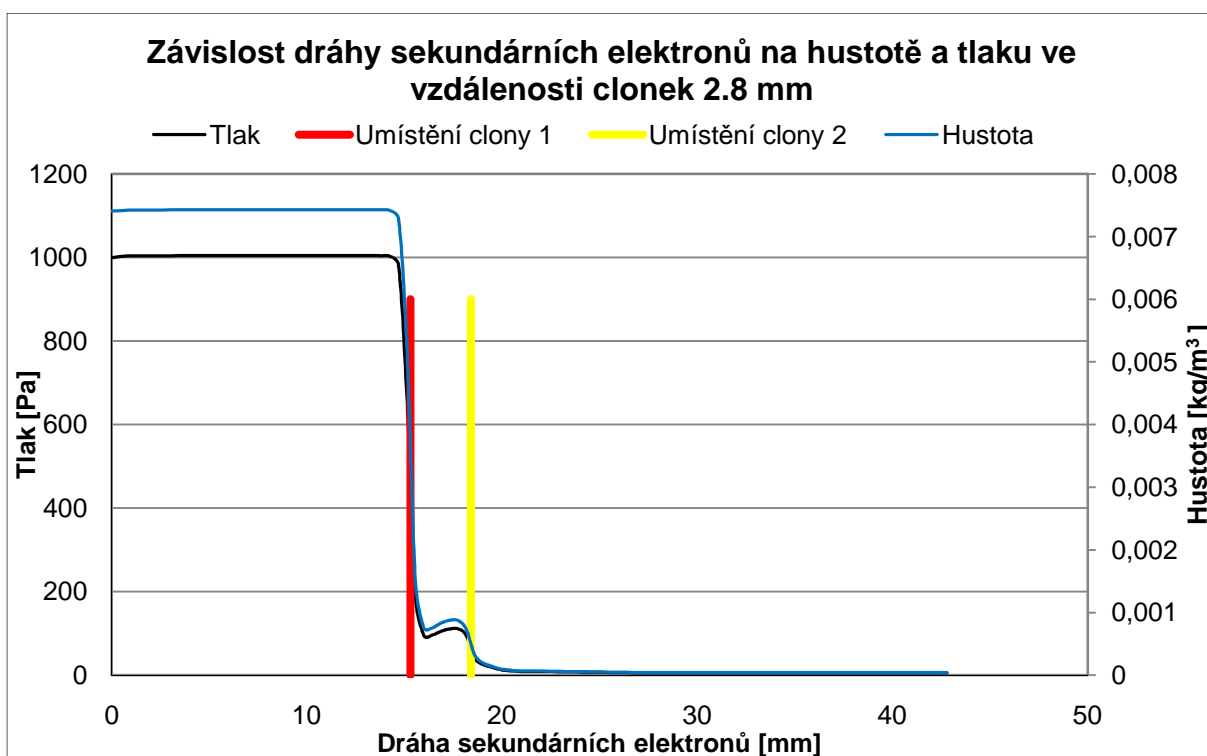
Tlak v komoře vzorku 1000 Pa



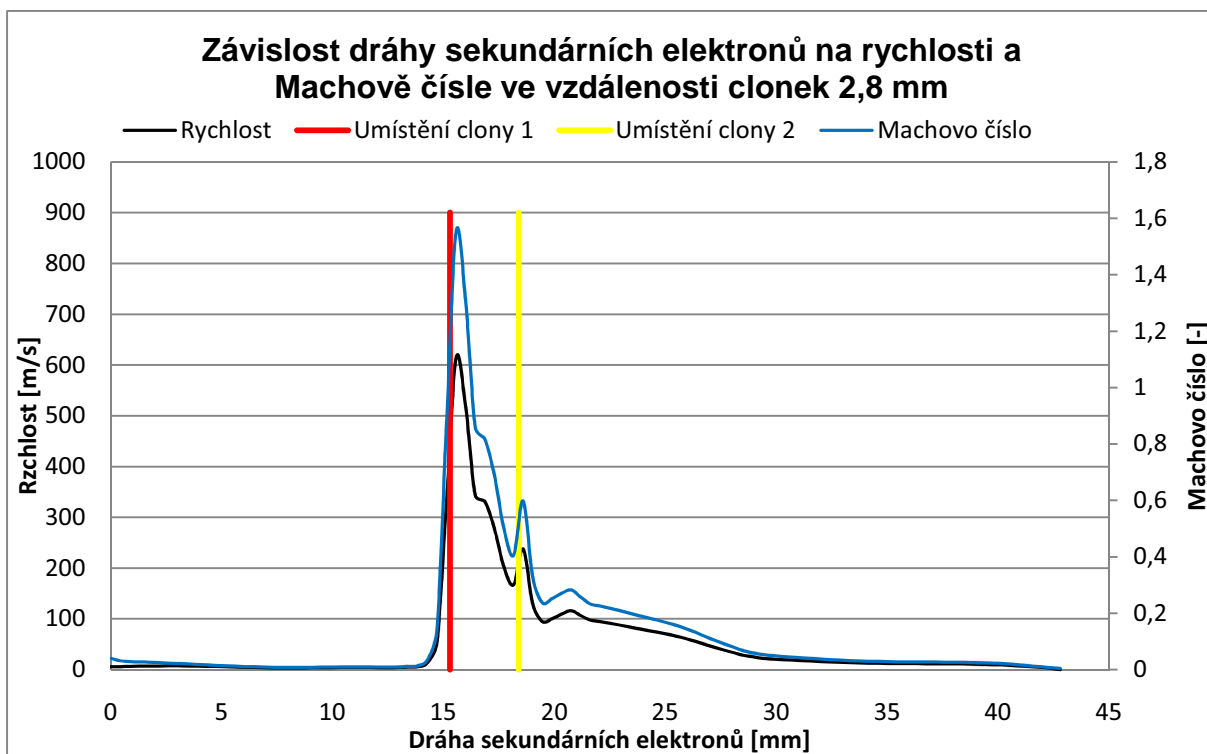
Obr. 130. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,4 mm



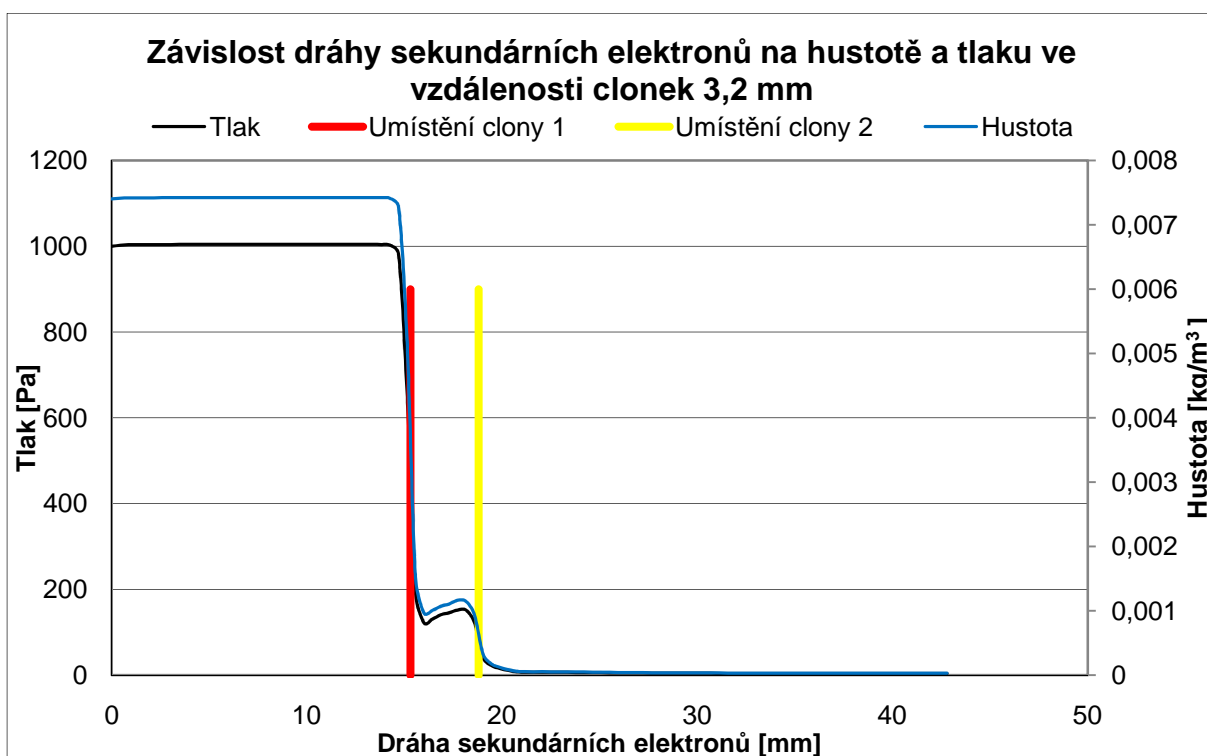
Obr. 131. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,4 mm



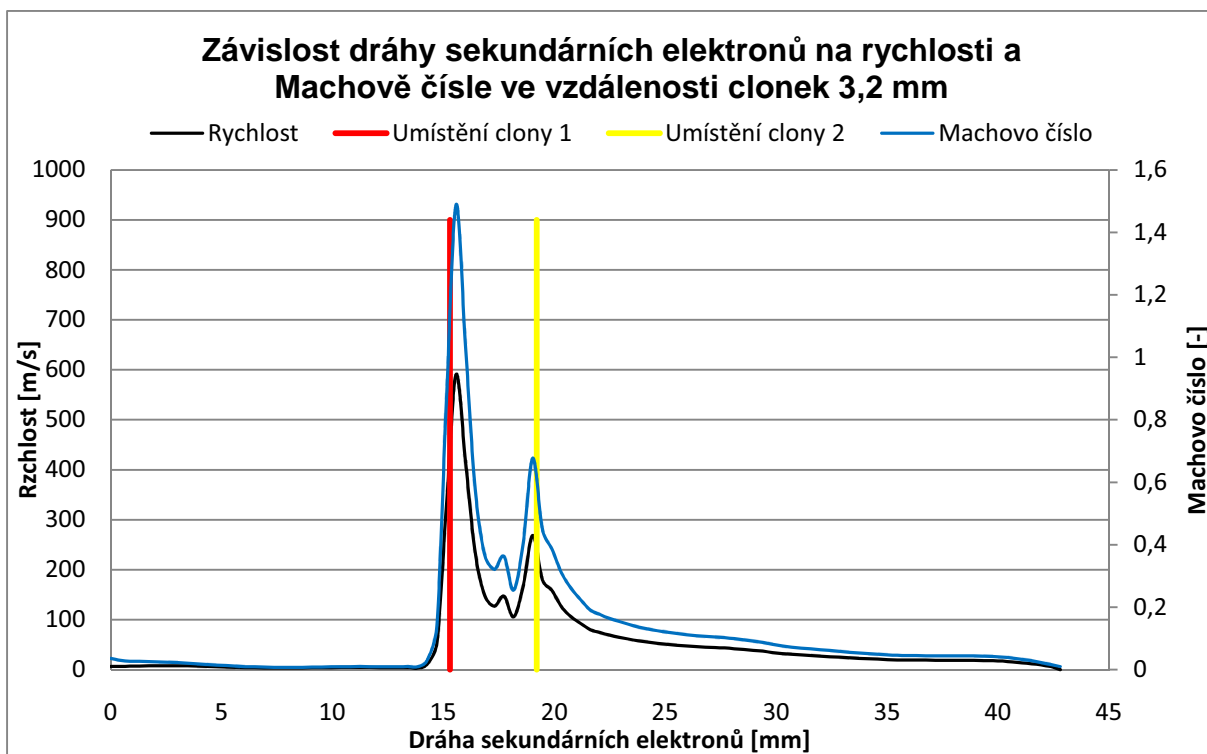
Obr. 132. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 2,8 mm



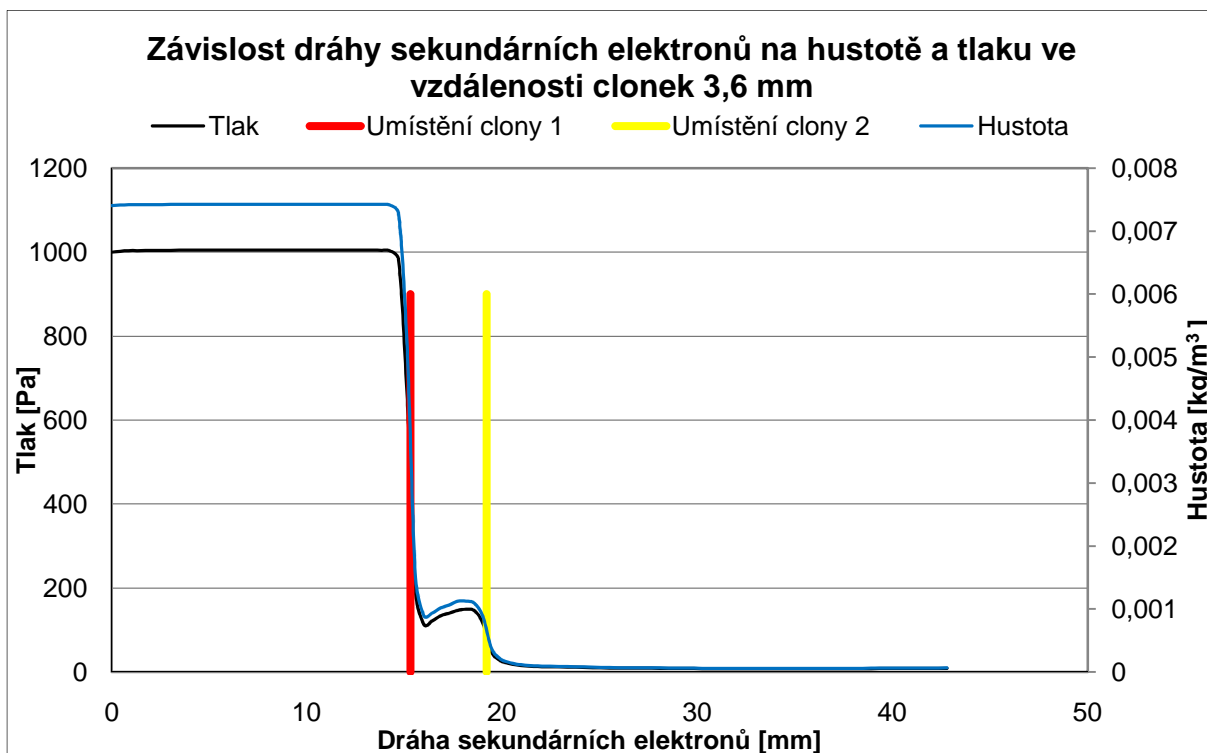
Obr. 133. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 2,8 mm



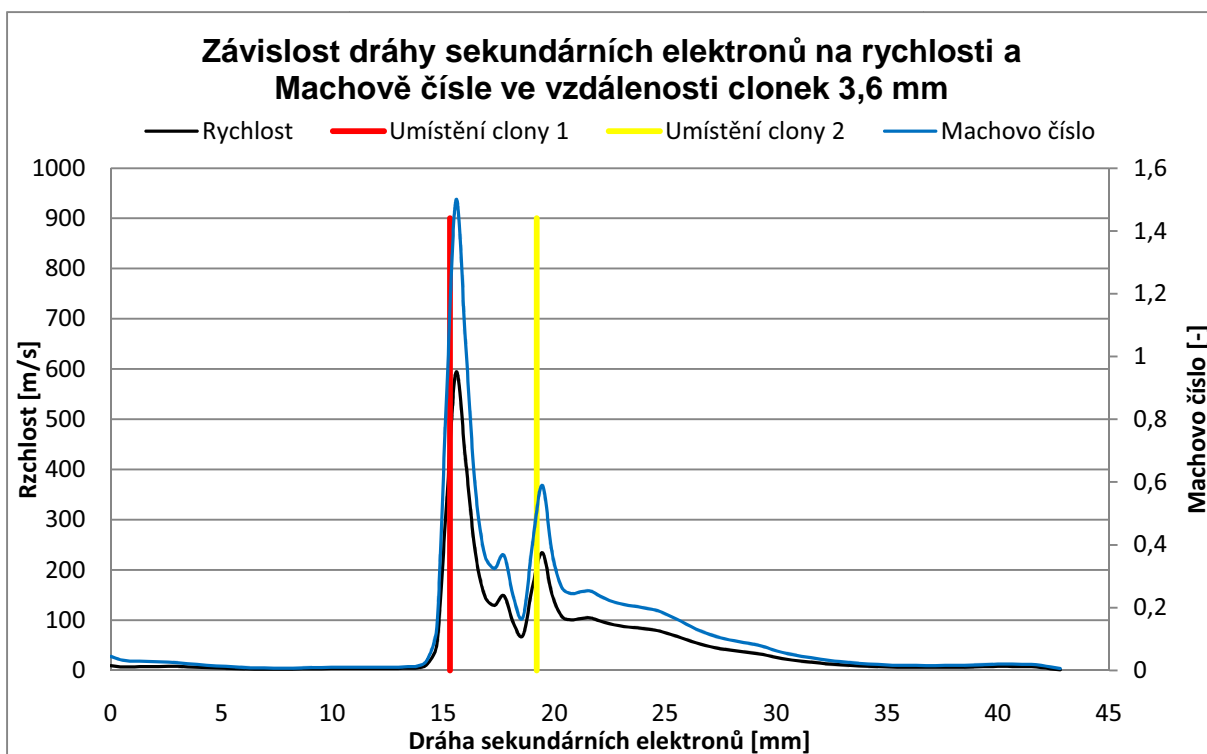
Obr. 134. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,2 mm



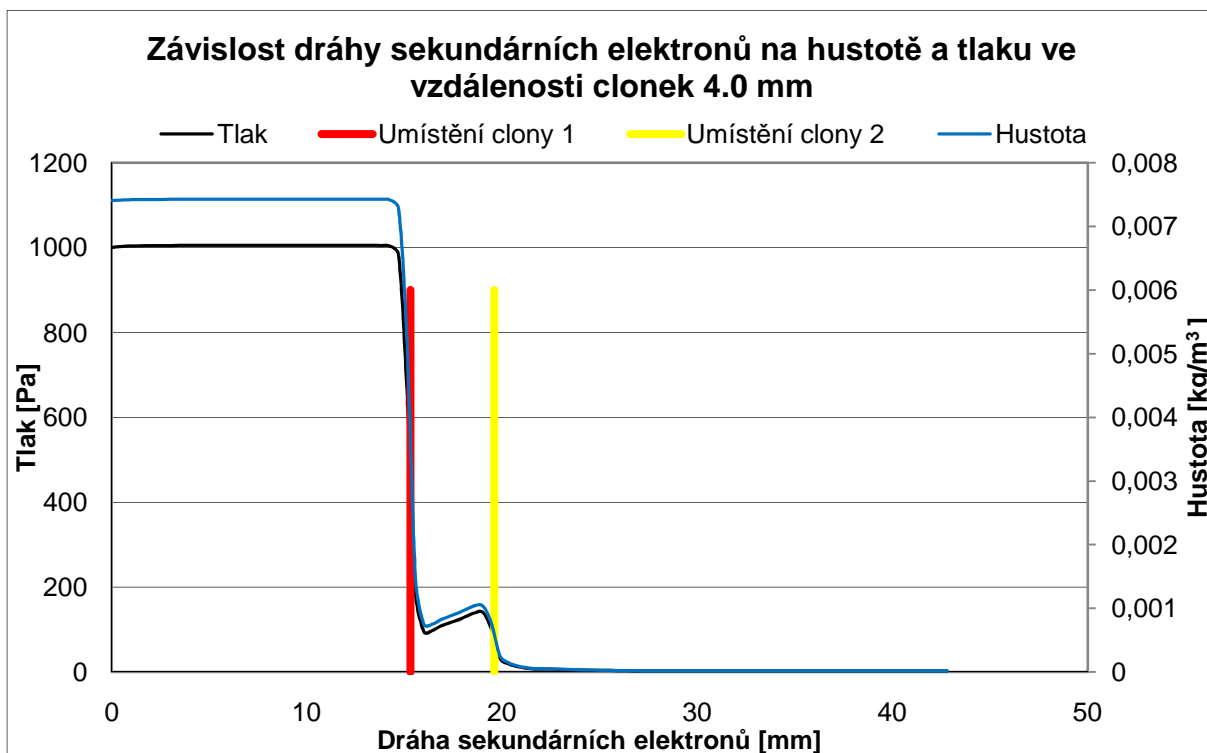
Obr. 135. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,2 mm



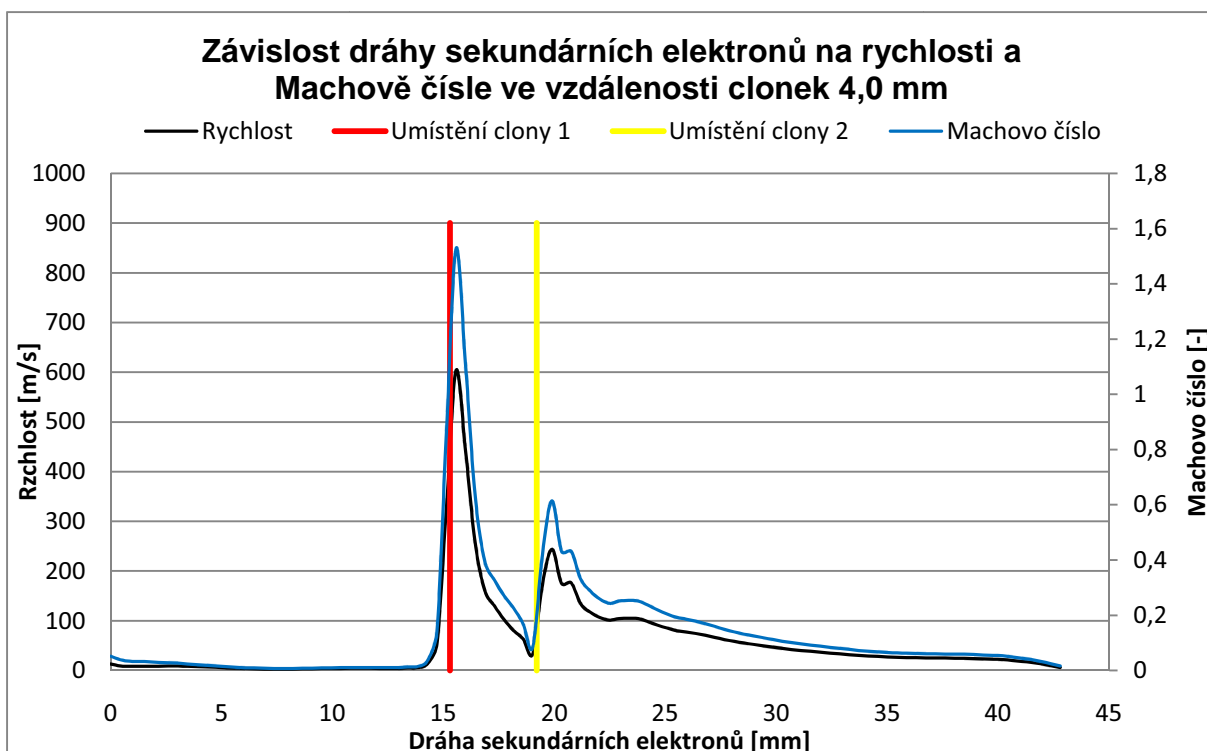
Obr. 136. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 3,6 mm



Obr. 137. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 3,6 mm



Obr. 138. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na hustotě a tlaku ve vzdálenosti clonek 4,0 mm



Obr. 139. Závislost dráhy sekundárních elektronů při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa na rychlosti a Machově čísle ve vzdálenosti clonek 4,0 mm