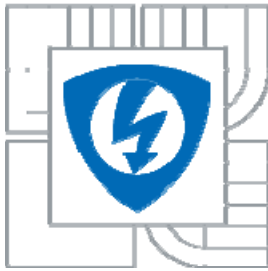




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

VLIV TLAKU V KOMOŘE VZORKU NA PODMÍNKY DIFERENCIÁLNÍHO ČERPÁNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ROMAN PLACZEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Mgr. 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. Roman Placzek

ID: 84195

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Vliv tlaku v komoře vzorku na podmínky diferenciálního čerpání

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou elektronové mikroskopie; zaměřte se na oblast proudění plynů v komorách diferenciálního čerpání.

V systému SolidWorks vytvořte model vybraného tvaru komory diferenciálního čerpání. Pomocí systému Cosmos FloWorks proveďte analýzu čerpání plynu s ohledem na vliv velikosti tlaku v komoře vzorku. Výsledky vyhodnoťte z pohledu dosažení co nejnižšího tlaku na dráze primárního svazku elektronů, zabraňujícího rozptylu odražených elektronů.

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

Abstrakt:

V práci je nejdříve uvedena a popsána stručně problematika elektronové mikroskopie. Následně jsou v systému SolidWorks vymodelovány tři tvary komory diferenciálního čerpání, u kterých je pomocí systému SolidWorks Flow Simulation provedena analýza čerpání plynu při různých tlacích v komoře vzorku EREM. Výsledky analýzy jsou podrobeny zhodnocení vzhledem k požadavku, aby v dráze svazku primárních elektronů byl co nejnižší tlak z důvodu snížení pravděpodobnosti rozptylu svazku.

Abstract:

The paper primarily outlines fundamental issues of electron microscopy. The paper follows with analysing pumping of gas into EREM sample chambers at various pressure levels by using SolidWorks Flow Simulation in SolidWorks system. The results of analyses are assessed with respect to requirements so that the pressure in the track of primarily electrons is as low as possible with the view to reduce probability of its scattering.

Klíčová slova:

CAD, CAE, EREM, SolidWorks, Flow Simulation

Keywords:

CAD, CAE, EREM, SolidWorks, Flow Simulation

Bibliografická citace díla:

PLACZEK, R. *Vliv tlaku v komoře vzorku na podmínky diferenciálního čerpání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 151 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Mgr. 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. května 2010

Roman Placzek

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Mgr. Jiřímu Maxovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci, vstřícný přístup při jednání a ochotu při technických konzultacích.

V Brně dne 27. května 2010

Obsah

OBSAH	5
SEZNAM OBRÁZKŮ	7
1 ÚVOD	10
2 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	12
2.1 Proč se využívají elektrony místo fotonů.....	12
2.2 Elektronová mikroskopie	12
2.3 TEM – Transmisní elektronová mikroskopie	13
2.4 REM – Rastrovací elektronová mikroskopie	14
2.4.1 Princip rastrovacího elektronového mikroskopu.....	15
2.4.2 Jevy vznikající dopadem elektronů na vzorek.....	17
2.4.3 Rozdíl mezi TEM a REM.....	18
2.4.4 Detekce elektronů	20
2.4.5 Zvětšení mikroskopu.....	21
2.4.6 Příprava vzorku.....	21
2.4.7 Práce se vzorkem v mikroskopu	22
2.5 EREM.....	23
2.5.1 EREM typu AQUASEM.....	23
3 POPIS ŘEŠENÉHO PROJEKTU	28
3.1 Komora diferenciálního čerpání	34
4 FYZIKA PLYNŮ	39
4.1 Tlak plynu.....	39
4.2 Proudění	40
4.3 Vakuum.....	42
4.4 Proudění skutečných kapalin	42
4.5 Nestlačitelné a stlačitelné proudění.....	43
4.6 Srážky molekul, střední volná dráha.....	45
4.6.1 Střední volná dráha, přenosové jevy	46
4.6 Závисlost rozptylu na počtu interakcí	46
4.7 Rozptylové režimy svazku primárních elektronů	47
5 POČÍTAČOVÉ SYSTÉMY VYUŽÍVANÉ PŘI ŘEŠENÍ	49
5.1 SolidWorks	49
5.2 Flow Simulation.....	50
6 ANALÝZA KOMORY DIFERENCIÁLNÍHO ČERPÁNÍ	51
6.1 Zadání podmínek ve Flow Simulation	51
6.1.1 Nastavení sítě	51
6.1.2 Nastavení okrajových podmínek	54
Cílové veličiny výpočtu	61
7 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZY	62
7.1 Dráha primárního svazku elektronů	62
7.2 Grafický výstup	62
7.3 Zpracování výsledků výpočtů	65

7.3.1	Charakteristika průběhu rychlosti plynu v čerpané komoře.....	65
7.3.2	Srážky molekul, střední volná dráha	70
7.4	Zhodnocení výsledků analýzy	73
8	ZÁVĚR.....	76
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	78
10	PŘÍLOHA – ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZY.....	79
10.1	Grafické výsledky	79
10.1.1	Tlak v komoře vzorku 200 Pa.....	80
10.1.2	Tlak v komoře vzorku 400 Pa.....	82
10.1.3	Tlak v komoře vzorku 600 Pa.....	84
10.1.4	Tlak v komoře vzorku 800 Pa.....	86
10.1.5	Tlak v komoře vzorku 1000 Pa.....	88
10.2	Výsledky měření otevřené varianty komory	90
10.2.1	Vyhodnocení OV 1000	92
10.2.2	Vyhodnocení OV 800	96
10.2.3	Vyhodnocení OV 600	100
10.2.4	Vyhodnocení OV 400	104
10.2.5	Vyhodnocení OV 200	108
10.3	Výsledky měření uzavřené varianty komory.....	112
10.3.1	Vyhodnocení UV 1000	112
10.3.2	Vyhodnocení UV 800	116
10.3.3	Vyhodnocení UV 600	120
10.3.4	Vyhodnocení UV 400	124
10.3.5	Vyhodnocení UV 200	128
10.4	Výsledky měření kuželové varianty komory	132
10.4.1	Vyhodnocení KV 1000	132
10.4.2	Vyhodnocení KV 800	136
10.4.3	Vyhodnocení KV 600	140
10.4.4	Vyhodnocení KV 400	144
10.4.5	Vyhodnocení KV 200	148

Seznam obrázků

Obr. 2.1	Porovnání principu optického a elektronového mikroskopu TEM.....	14
Obr. 2.2	Schématické znázornění hlavních prvků REM.....	16
Obr. 2.3	Signály vznikající při dopadu el. svazku na povrch pevné látky.....	17
Obr. 2.4	Vnitřní stavba mikroskopů: světelného, TEM a SEM.....	19
Obr. 2.5	Elektronová tryska TEM i SEM.....	20
Obr. 2.6	Fotografie detektorů v komoře mikroskopu SEM.....	21
Obr. 2.7	Přehled metod použitelných pro přípravu preparátů pro SEM.....	22
Obr. 2.8	Stěna kořenového kanálku lidského zubu bez preparační drtě.....	24
Obr. 3.1	Environmentální rastrovací elektronový mikroskop AQUASEM II.....	28
Obr. 3.2	Elektronový mikroskop AQUASEM II – popis projektu.....	29
Obr. 3.3	Elektronový mikroskop AQUASEM II – schéma projektu.....	30
Obr. 3.4	Řez environmentálním rastrovacím elektronovým mikroskopem.....	31
Obr. 3.5	Dráha primárního svazku elektronů a sekundárních elektronů.....	32
Obr. 3.6	Hodnoty tlaků v jednotlivých částech AQUASEM.....	33
Obr. 3.7	Komora diferenciálního čerpání v mikroskopu.....	34
Obr. 3.8	Dráha primárního svazku elektronů při průchodu komorou.....	35
Obr. 3.9	Uzavřená varianta komory.....	35
Obr. 3.10	Otevřená varianta komory.....	36
Obr. 3.11	Otevřená varianta komory s kuželem.....	37
Obr. 4.1	Model pohybu plynu při turbulentním proudění.....	40
Obr. 4.2	Model pohybu plynu při hydrodynamickém (viskózním) proudění.....	40
Obr. 4.3	Model pohybu plynu při molekulárním proudění.....	41
Obr. 4.4	Model pohybu plynu při efúzním proudění.....	41
Obr. 4.5	Úbytek tlakové energie proudící viskózní kapalinou.....	43
Obr. 4.6	Rozptyl svazku primárních elektronů.....	47
Obr. 4.7	Tři základní rozptylové režimy svazku primárních elektronů.....	48
Obr. 6.1	Ukázka nastavení sítě u uzavřené varianty.....	53
Obr. 6.2	Ukázka nastavení sítě u otevřené varianty.....	53
Obr. 6.3	Ukázka nastavení sítě u kuželové varianty.....	54
Obr. 6.4	Hodnoty ze kterých vychází nastavení okrajových podmínek.....	55
Obr. 6.5	Nastavení okrajové podmínky na hrdle čerpání.....	56
Obr. 6.6	Schéma uzavřené varianty.....	57
Obr. 6.7	Schéma otevřené varianty.....	58
Obr. 6.8	Schéma kuželové varianty.....	59
Obr. 6.9	Dráha primárního svazku elektronů při průchodu KDC.....	60
Obr. 6.10	Schéma dráhy primárního svazku elektronů.....	60
Obr. 7.1	Grafické výsledky – průběh tlaku OV 200.....	63
Obr. 7.2	Grafické výsledky – průběh tlaku UV 200.....	63
Obr. 7.3	Grafické výsledky – průběh tlaku KV 200.....	63
Obr. 7.4	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání OV 200.....	64
Obr. 7.5	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání UV 200.....	64
Obr. 7.6	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání KV 200.....	64
Obr. 7.7	Rozložení aritmetických průměrů Machova čísla na křivce všech variant.....	66
Obr. 7.8	Rozložení Machova čísla na křivce u uzavřené a otevřené varianty.....	66
Obr. 7.9	Rozložení Machova čísla na křivce u kuželové varianty.....	67
Obr. 7.10	Grafické zobrazení vektorů rychlosti proudění – uzavřená varianta.....	68

Obr. 7.11	Grafické zobrazení vektorů rychlosti proudění – otevřená varianta.	69
Obr. 7.12	Aritmetické průměry tlaků pro jednotlivé tlaky v komoře vzorku.	70
Obr. 7.13	Aritmetické průměry hustoty média pro jednotlivé tlaky v komoře vzorku.	71
Obr. 7.14	Rozložení aritmetických průměrů tlaku na křivce pro obě varianty.	71
Obr. 7.15	Rozložení tlaku na křivce pro otevřenou a uzavřenou variantu.	72
Obr. 7.16	Rozložení tlaku na křivce pro kuželovou variantu.	72
Obr. 7.17	Znázornění dvojité expanzní vlny u uzavřené varianty.	75
Obr. 10.1	Grafické výsledky – průběh tlaku OV 200.	80
Obr. 10.2	Grafické výsledky – průběh tlaku UV 200.	80
Obr. 10.3	Grafické výsledky – průběh tlaku KV 200.	80
Obr. 10.4	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání OV 200.	81
Obr. 10.5	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání UV 200.	81
Obr. 10.6	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání KV 200.	81
Obr. 10.7	Grafické výsledky – průběh tlaku OV 400.	82
Obr. 10.8	Grafické výsledky – průběh tlaku UV 400.	82
Obr. 10.9	Grafické výsledky – průběh tlaku KV 400.	82
Obr. 10.10	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání OV 400.	83
Obr. 10.11	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání UV 400.	83
Obr. 10.12	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání KV 400.	83
Obr. 10.13	Grafické výsledky – průběh tlaku OV 600.	84
Obr. 10.14	Grafické výsledky – průběh tlaku UV 600.	84
Obr. 10.15	Grafické výsledky – průběh tlaku KV 600.	84
Obr. 10.16	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání OV 600.	85
Obr. 10.17	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání UV 600.	85
Obr. 10.18	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání KV 600.	85
Obr. 10.19	Grafické výsledky – průběh tlaku OV 800.	86
Obr. 10.20	Grafické výsledky – průběh tlaku UV 800.	86
Obr. 10.21	Grafické výsledky – průběh tlaku KV 800.	86
Obr. 10.22	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání OV 800.	87
Obr. 10.23	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání UV 800.	87
Obr. 10.24	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání KV 800.	87
Obr. 10.25	Grafické výsledky – průběh tlaku OV 1000.	88
Obr. 10.26	Grafické výsledky – průběh tlaku UV 1000.	88
Obr. 10.27	Grafické výsledky – průběh tlaku KV 1000.	88
Obr. 10.28	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání OV 1000.	89
Obr. 10.29	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání UV 1000.	89
Obr. 10.30	Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání KV 1000.	89
Obr. 10.31	Dráha primárního svazku elektronů při průchodu DČK.	91
Obr. 10.32	Rozložení tlaku na křivce OV 1000.	94
Obr. 10.33	Rozložení hustoty na křivce OV 1000.	94
Obr. 10.34	Rozložení rychlostí na křivce OV 1000.	95
Obr. 10.35	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze OV 1000.	95
Obr. 10.36	Rozložení tlaku na křivce OV 800.	98
Obr. 10.37	Rozložení hustoty na křivce OV 800.	98
Obr. 10.38	Rozložení rychlostí na křivce OV 800.	99
Obr. 10.39	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze OV 800.	99
Obr. 10.40	Rozložení tlaku na křivce OV 600.	102
Obr. 10.41	Rozložení hustoty na křivce OV 600.	102
Obr. 10.42	Rozložení rychlostí na křivce OV 600.	103
Obr. 10.43	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze OV 600.	103

Obr. 10.44	Rozložení tlaku na křivce OV 400.	106
Obr. 10.45	Rozložení hustoty na křivce OV 400.	106
Obr. 10.46	Rozložení rychlostí na křivce OV 400.	107
Obr. 10.47	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze OV 400.	107
Obr. 10.48	Rozložení tlaku na křivce OV 200.	110
Obr. 10.49	Rozložení hustoty na křivce OV 200.	110
Obr. 10.50	Rozložení rychlostí na křivce OV 200.	111
Obr. 10.51	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze OV 200.	111
Obr. 10.52	Rozložení tlaku na křivce UV 1000.	114
Obr. 10.53	Rozložení hustoty na křivce UV 1000.	114
Obr. 10.54	Rozložení rychlostí na křivce UV 1000.	115
Obr. 10.55	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze UV 1000.	115
Obr. 10.56	Rozložení tlaku na křivce UV 800.	118
Obr. 10.57	Rozložení hustoty na křivce UV 800.	118
Obr. 10.58	Rozložení rychlostí na křivce UV 800.	119
Obr. 10.59	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze UV 800.	119
Obr. 10.60	Rozložení tlaku na křivce UV 600.	122
Obr. 10.61	Rozložení hustoty na křivce UV 600.	122
Obr. 10.62	Rozložení rychlostí na křivce UV 600.	123
Obr. 10.63	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze UV 600.	123
Obr. 10.64	Rozložení tlaku na křivce UV 400.	126
Obr. 10.65	Rozložení hustoty na křivce UV 400.	126
Obr. 10.66	Rozložení rychlostí na křivce UV 400.	127
Obr. 10.67	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze UV 400.	127
Obr. 10.68	Rozložení tlaku na křivce UV 200.	130
Obr. 10.69	Rozložení hustoty na křivce UV 200.	130
Obr. 10.70	Rozložení rychlostí na křivce UV 200.	131
Obr. 10.71	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze UV 200.	131
Obr. 10.72	Rozložení tlaku na křivce KV 1000.	134
Obr. 10.73	Rozložení hustoty na křivce KV 1000.	134
Obr. 10.74	Rozložení rychlostí na křivce KV 1000.	135
Obr. 10.75	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze KV 1000.	135
Obr. 10.76	Rozložení tlaku na křivce KV 800.	138
Obr. 10.77	Rozložení hustoty na křivce KV 800.	138
Obr. 10.78	Rozložení rychlostí na křivce KV 800.	139
Obr. 10.79	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze KV 800.	139
Obr. 10.80	Rozložení tlaku na křivce KV 600.	142
Obr. 10.81	Rozložení hustoty na křivce KV 600.	142
Obr. 10.82	Rozložení rychlostí na křivce KV 600.	143
Obr. 10.83	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze KV 600.	143
Obr. 10.84	Rozložení tlaku na křivce KV 400.	146
Obr. 10.85	Rozložení hustoty na křivce KV 400.	146
Obr. 10.86	Rozložení rychlostí na křivce KV 400.	147
Obr. 10.87	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze KV 400.	147
Obr. 10.88	Rozložení tlaku na křivce KV 200.	150
Obr. 10.89	Rozložení hustoty na křivce KV 200.	150
Obr. 10.90	Rozložení rychlostí na křivce KV 200.	151
Obr. 10.91	Průběh hodnoty Machova čísla na dráze KV 200.	151

1 Úvod

S elektronovými mikroskopy se dnes setkáváme v řadě vědních oborů a průmyslových odvětvích. Vědní disciplína zabývající se těmito mikroskopy se nazývá elektronová mikroskopie. Tato metoda pozorování umožňuje mnohonásobně větší rozlišovací schopnost (větší přiblížení), než klasická optická mikroskopie. Toho je dosaženo použitím svazku urychlených elektronů místo světelného paprsku. Urychlené elektrony mají totiž menší vlnovou délku oproti světlu (fotonům).

Počátky elektronové mikroskopie sahají až k roku 1933, kdy byl sestrojen první funkční elektronový mikroskop. Byl to transmisní elektronový mikroskop – TEM. Dalším krokem v elektronové mikroskopii bylo sestrojení rastrovacího elektronového mikroskopu – REM. Oba typy mikroskopů měly jeden velký nedostatek při pozorování organických vzorků. U nevodivých vzorků docházelo k jejich nabíjení, což se projevovalo různými artefakty při pozorování. Podobné problémy nastávaly při pozorování vzorků obsahujících vodu (např. živé organismy, tkáně). Bylo tedy třeba vzorky různě preparovat, sušit, pokovovat apod., aby se předešlo výskytu artefaktů. Příprava vzorku byla tak velice obtížná a zdlouhavá a docházelo i k jeho znehodnocení. Na popud těchto problémů byl vynalezen environmentální rastrovací mikroskop EREM, který vychází z REM. Tento nový mikroskop umožňuje pozorovat vzorky při tlaku v komoře vzorku až 2000 Pa a tedy i vzorky obsahující vodu v přirozeném stavu bez vysoušení a pozorovat nevodivé vzorky bez nutnosti pokovování. Klíčovou částí je zde komora diferenciálního čerpání, která odděluje tubus mikroskopu (10^{-3} Pa) od komory vzorku (až 2000 Pa) [11].

Tato diplomová práce se zabývá právě analýzou této komory diferenciálního čerpání v oblasti proudění plynů. V práci se především simuluje vliv tlaku v komoře vzorku na průběh čerpání a velikost tlaku v dráze svazku primárních elektronů v komoře diferenciálního čerpání.

První část práce obsahuje teoretický úvod do problematiky elektronové mikroskopie a teorie proudění plynů. Obě kapitoly dávají základ nutný pro pochopení elektronové mikroskopie, principu elektronových mikroskopů a vlivu tlaku na elektronový svazek. Tyto poznatky jsou potom uplatněny při samotném vyhodnocení analýz. Je tu také popsán mikroskop AQUASEM II a komora diferenciálního čerpání, která je u tohoto mikroskopu zkoumaná.

Druhá část práce se zabývá právě analýzou této komory. Komora diferenciálního čerpání byla navržena ve třech variantách. V práci naleznete popis jednotlivých variant komory. Vlastní 3D modely jednotlivých variant byly vytvořeny v CAD systému SolidWorks. Na těchto modelech byla následně provedena simulace pomocí SolidWorks Flow Simulation, což je modul systému SolidWorks vhodný právě pro analýzu proudění plynů. Simulací byl analyzován vliv velikosti tlaku v komoře vzorku na rozložení tlaku v komoře diferenciálního čerpání, průběh tlaku na dráze

primárních elektronů a rychlost proudění plynu na dráze primárních elektronů. Simulace byly provedeny pro tlaky 200, 400, 600, 800 a 1000 Pa v komoře vzorku pro všechny varianty komory diferenciálního čerpání. Pro vyhodnocení výsledků je hlavní kritérium co nejnižší tlak plynu na dráze svazku primárních elektronů. Čím nižší tlak, tím menší pravděpodobnost srážek elektronů s molekulami plynu, což má za následek menší rozptyl svazku elektronů a lepší rozlišovací schopnost mikroskopu.

2 Elektronová mikroskopie

Od ranných počátků lidstva existuje zájem pozorovat vše kolem nás. S nástupem moderní vědy je snaha pozorovat co nejmenší detaily a vytvářet nástroje a systémy umožňující toto detailní zkoumání. Každý vědecký obor má zájem zkoumat jiné struktury a detaily látek. Biologové chtějí pozorovat buňky, bakterie, viry. Vědci zabývající se vlastnostmi materiálů, chtějí pozorovat nehomogenity a poruchy v kovech, krystalech a keramických materiálech. Geologům umožnila detailní studie hornin, minerálů a fosilií pochopit původ naší planety a jejich cenných minerálních zdrojů. Mikroskopie se taktéž využívá v moderní kriminalistice.

2.1 Proč se využívají elektrony místo fotonů

Mezi první zařízení umožňující zkoumání detailů patří optický mikroskop. Počátky optického mikroskopu se datují až do 16. století. Od té doby optické mikroskopy prošly velkým vývojem až do podoby moderního optického mikroskopu (zkráceně LM — z anglického Light Microscope). Nejlepší optické mikroskopy mají zvětšení asi 1000x a umožňují oku rozlišit objekty vzdálené navzájem o 0,0002 mm. Při snaze o dosažení ještě lepšího rozlišení nastaly problémy. Zjistilo se, že rozlišovací schopnost mikroskopu není omezena jen počtem a kvalitou čoček, ale také vlnovou délkou světla použitého pro osvětlení předmětu. Na pozorovaném objektu nebylo možné rozlišit body bližší než několik stovek nanometrů. Použití záření s kratší vlnovou délkou (modré světlo nebo ultrafialové záření) vedlo k malému zlepšení; ponoření preparátu a přední čočky objektivu do kapaliny s vysokým indexem lomu (olej) vedlo k dalšímu malému zlepšení, ale obě tato opatření zlepšila rozlišovací schopnost jen těsně pod 100 nm. Z tohoto důvodu bylo třeba sestavit zařízení na jiném principu, které by umožnilo větší rozlišovací schopnost.

2.2 Elektronová mikroskopie

Roku 1920 bylo objeveno, že vlnové délky urychlených elektronů jsou o mnoho řádů menší (100 000x), než fotonů viditelného světla. Také byl zjištěn vliv elektrického a magnetického pole na elektrony, které jsou těmito poli ovlivňovány, jako viditelné světlo čočkami a zrcadly. Německý fyzik Dr. Ernst Ruska z Berlínské univerzity se těmito jevy a jejich možným zkombinováním zabýval. V roce 1931 postavil první transmisní (prozařovací) elektronový mikroskop (anglicky TEM¹). Tím se Ernst Ruska považuje za vynálezce elektronového mikroskopu. V prvním elektronovém mikroskopu použil dvě magnetické čočky. O tři roky později byla přidána třetí čočka a bylo dosaženo rozlišení 100 nm, které bylo dvakrát větší než

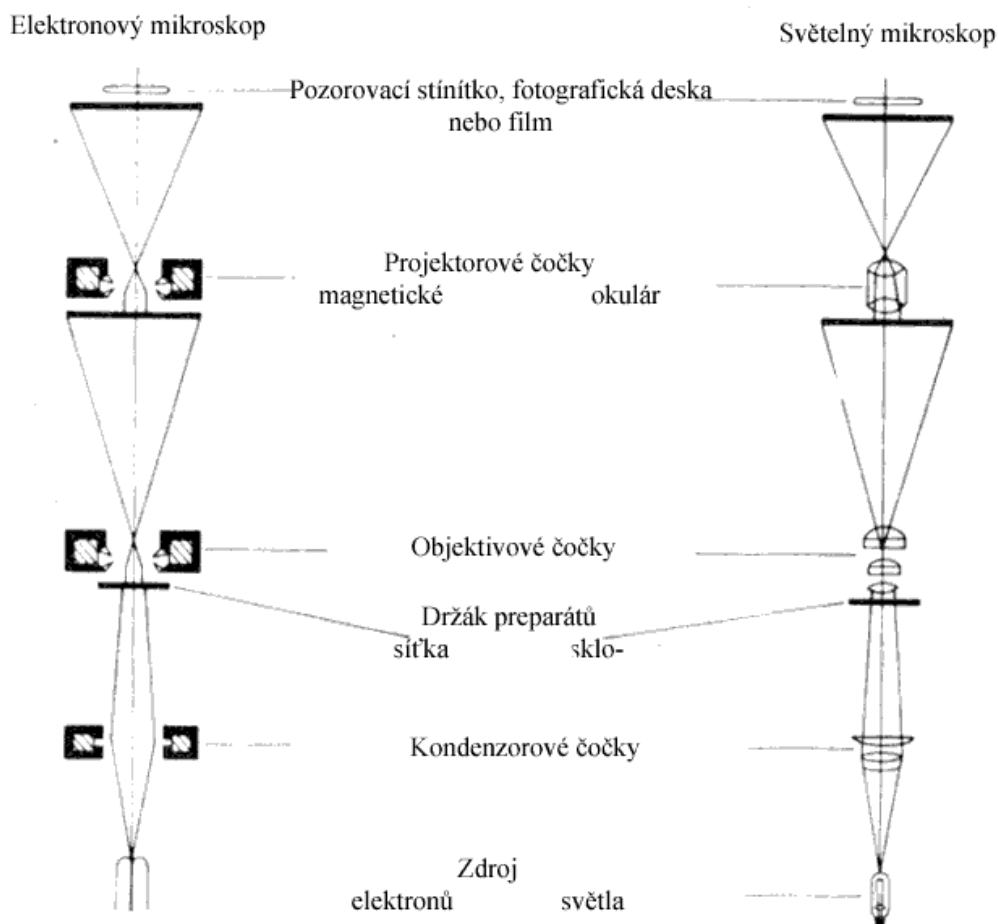
¹ TEM – z anglického **T**ransmission **e**lectron **m**icroscopy

rozlišení optického mikroskopu. V současné době se používá v zobrazovací soustavě pěti magnetických čoček a dosahuje se rozlišovací schopnosti 0,1 nm při zvětšení 1 000 000×.

2.3 TEM – Transmisní elektronová mikroskopie

Transmisní elektronová mikroskopie slouží k vytvoření 1000x až 100 000x zvětšeného obrazu studovaného vzorku pomocí elektronové optické soustavy [3]. K vytvoření obrazu se nevyužívá viditelné světlo, ale elektrony (žhavené wolframové vlákno ve vakuu). Viditelný obraz je vytvořen na fluorescenčním stínítku svazkem elektronů, které prošly studovaným vzorkem nebo které na vzorku difraktovaly. Graficky je princip mikroskopu znázorněn na obr. 1. TEM umožňuje studovat téměř všechny důležité mikrostrukturní charakteristiky krystalických a amorfních látek.

Celá dráha elektronů je ve vakuu a preparát musí být velmi tenký, aby jím mohly elektrony proniknout, tloušťka vzorku může být jen 0,1 až 5 μm . Vhodná tloušťka vzorku závisí na materiálu a energii elektronů. To znamená, že vlnová délka elektronů je velmi malá, rozlišovací schopnost elektronových mikroskopů je proto velmi dobrá, až 0,2 nm. Všechny vzorky však nemohou být zhotoveny tak, aby byly dostatečně tenké pro pozorování metodou TEM. Navíc existuje značný zájem o pozorování větších podrobností na povrchu preparátů. Při prvních pokusech o zobrazení povrchu se preparát nastavoval téměř rovnoběžně s elektronovým svazkem, jenž dopadal na povrch pod velmi malým úhlem. Zobrazila se tak jen velmi omezená oblast vzorku se značným zkreslením. Tato metoda studia povrchů tak nenašla širšího uplatnění.



Obr. 2.1 Porovnání principu optického a elektronového mikroskopu TEM. [2]

Transmisní elektronová mikroskopie poskytuje informace o vnitřní struktuře vzorků, které lze prozářit elektrony.

2.4 REM – Rastrovací elektronová mikroskopie

Počátek výzkumů a vývoje rastrovacího elektronového mikroskopu (anglicky SEM²) je kladen do 50. let 20. století, kdy byl zahájen výzkum v laboratořích univerzity v Cambridgi v Anglii. V roce 1965 pak spatřil světlo světa první rastrovací elektronový mikroskop STEREOSCAN firmy Cambridge Instr. Co. [12]. V České republice začíná výroba těchto přístrojů v roce 1976, kdy byl uveden na trh rastrovací elektronový mikroskop TESLA BS 300. [6] 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 (např. glutaraldehydem). Současné REM mohou mít rozlišovací schopnost 1 nm a zvětšení přes 400 000x.

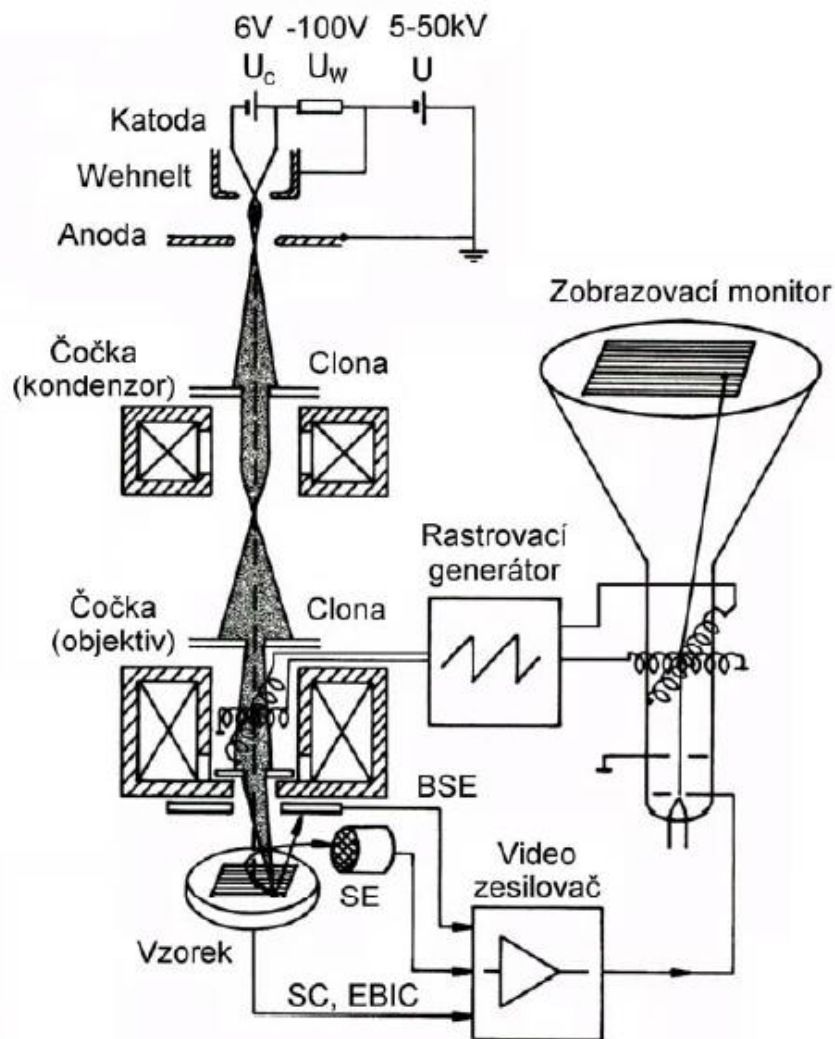
² SEM — z anglického Scanning Electron Microscope

Spojením metody užití v TEM a REM vznikla tzv. jako rastrovací transmisní elektronová mikroskopie (STEM), kterou poprvé popsal v roce 1938 Dr. Manfred von Ardenne. První kombinovaný komerční přístroj sestavený v roce 1969 měl rozlišovací schopnost 25 nm a zvětšení 100 000x. Moderní TEM, vybavené možností STEM, mohou rozlišit 1 nm při zvětšení až 1 000 000x.

2.4.1 Princip rastrovacího elektronového mikroskopu

V rastrovacím elektronovém mikroskopu dopadá na vzorek tenký svazek elektronů. Speciální vychylovací soustava zajistí, že elektronový svazek postupně dopadne na všechna místa povrchu. Obraz jednotlivých míst vzorku je přenesen na televizní obrazovku, kde je pozorován. Pokud je vzorek dostatečně tenký, lze jej pozorovat v uspořádání na průchod, tj. v transmisním uspořádání. Častěji se však používá uspořádání na odraz, tj. reflexní uspořádání. Obraz je obvykle vytvořen elektrony, které jsou odraženy, popř. emitovány z povrchové vrstvy vzorku po dopadu svazku elektronů s vysokou energií [3]. Elektronový svazek si lze představit jako jakousi sondu, která se pohybuje po povrchu vzorku a dává vznik signálu, jenž nese informace o charakteristikách místa vzorku, po kterém tento svazek přešel. Princip činnosti rastrovacího elektronového mikroskopu (REM) je schématicky znázorněn na obr 2.2.

Elektrony jsou emitovány žhavenou wolframovou katodou, urychlovány v elektronové trysce a dále pomocí elektromagnetických čoček usměřovány po povrchu pozorovaného vzorku a současně na stínítku přístroje. Vychylovací cívky řádkovacího systému umožňují, aby tento svazek bod po bodu a řádek po řádku systematicky scanoval vymezenou, většinou čtvercovou plošku, podobným způsobem, jaký se používá v televizní technice. Po dopadu na předmět dochází k jejich částečnému odrazu – rozptylu a dále k uvolnění fotonů a sekundárních elektronů, které po zesílení modulují jas původního elektronového svazku na monitoru a vytvářejí tak obraz. S pohybem primárního elektronového svazku je synchronizován pohyb elektronového svazku obrazovky mikroskopu. Kontrast na obrazovce se tedy vytváří jako výsledek rozdílné intenzity signálu v jednotlivých bodech dopadu primárního svazku a zvětšení je dáno poměrem strany obrazovky k délce úseku řádkovaného na povrchu vzorku. [12]



Obr. 2.2 Schématické znázornění hlavních prvků REM. [12]

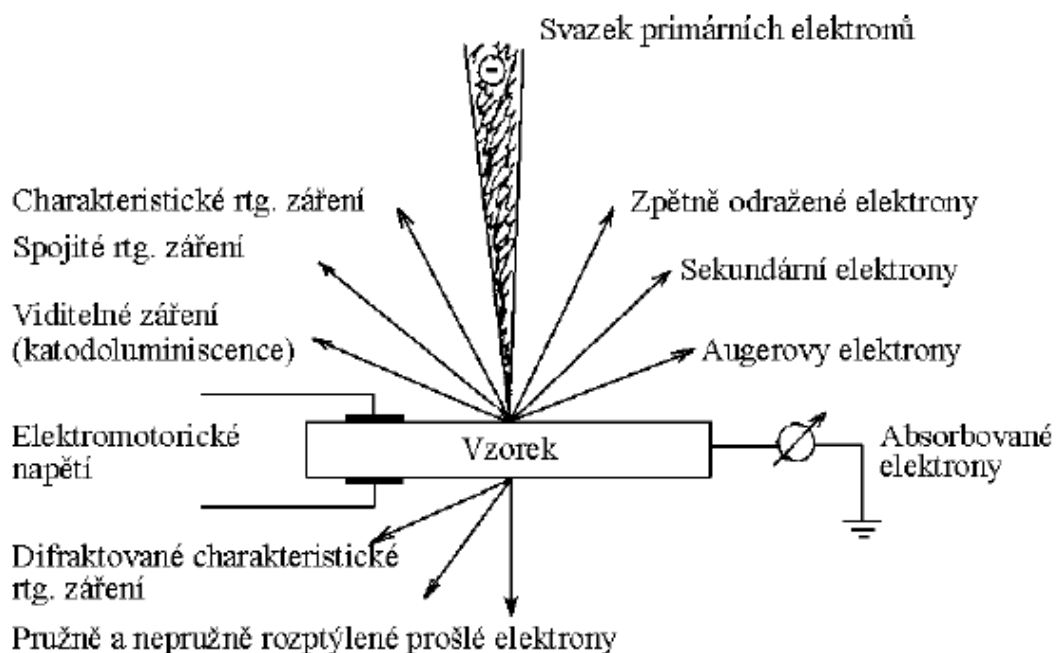
Elektrony primárního svazku (PE) dopadají v REM na povrch vzorku s energií několika tisíc eV. Pronikají do určité hloubky pod povrch a jsou látkou rozptylovány a absorbovány. Rozptyl elektronů je pružný a nepružný.

Při **pružném rozptylu** PE v povrchové vrstvě pevné látky neztrácejí svou energii, mění pouze směr pohybu a pod určitým úhlem jsou odraženy zpět nad povrch vzorku (zpětně odražené elektrony).

Při **nepružném rozptylu** jsou PE v krystalovém prostředí brzděny, přičemž předávají svou energii volným elektronům a krystalové mřížce. Pro účely REM má význam interakce PE s elektrony pevné látky. Elektrony pevné látky jsou předanou energií excitovány, což vede podle způsobu excitace ke vzniku sekundárních elektronů, Augerových elektronů, charakteristického rtg. záření, atd. (viz obr. 2.3).

Fokuseovaný svazek PE tedy vyvolá v místě dopadu řadu signálů, ze kterých je třeba vybrat nejvhodnější signál pro zobrazení určitého požadovaného stavu vzorku (topografie, chemické složení, fyzikální vlastnosti, atd.). To lze provést vhodnou

volbou detekčního systému. Pro běžné účely je jím nejčastěji polovodičový detektor sekundárních elektronů. Jako sekundární elektrony se označují elektrony emitované z povrchu vzorku, které mají energii menší než 50 eV. Jejich intenzita závisí na atomovém čísle pevné látky, na úhlu dopadu a na energii PE. Sekundární elektrony nesou informace o topografii a o chemickém složení sledovaného vzorku. Ty jsou registrovány speciálním detektorem. Amplituda signálu sekundárních elektronů je časově proměnná v závislosti na tvaru povrchu preparátu. Signál po zesílení řídí jas elektronového paprsku v trubici fotomonitoru. Elektronové paprsky v mikroskopu a fotomonitoru mají synchronní řádkování a tím se tvoří vztah mezi každým bodem na obrazovce a odpovídajícím bodem na preparátu. Tak je tedy vytvořen obraz. Poměr mezi velikostí obrazu na monitoru k velikosti snímané plochy na vzorku je zvětšení. Hodnota zvětšení se zvyšuje tím, že se zmenšuje velikost snímané plošky na preparátu. Záznam se provádí fotografováním obrazovky monitoru (nebo, což je obvyklejší, zvláštní obrazovky s vysokým rozlišením), vytvořením videozáznamu nebo uložením digitálního obrazu do paměti počítače.



Obr. 2.3 Signály vznikající při dopadu el. svazku na povrch pevné látky. [13]

2.4.2 Jevy vznikající dopadem elektronů na vzorek

Již bylo zmíněno, že při nárazu elektronu do vzorku nastává několik jevů (obr.2.3). REM využívá pět z těchto jevů :

- Zpětně odražené elektrony – některé z dopadajících elektronů jsou odraženy.

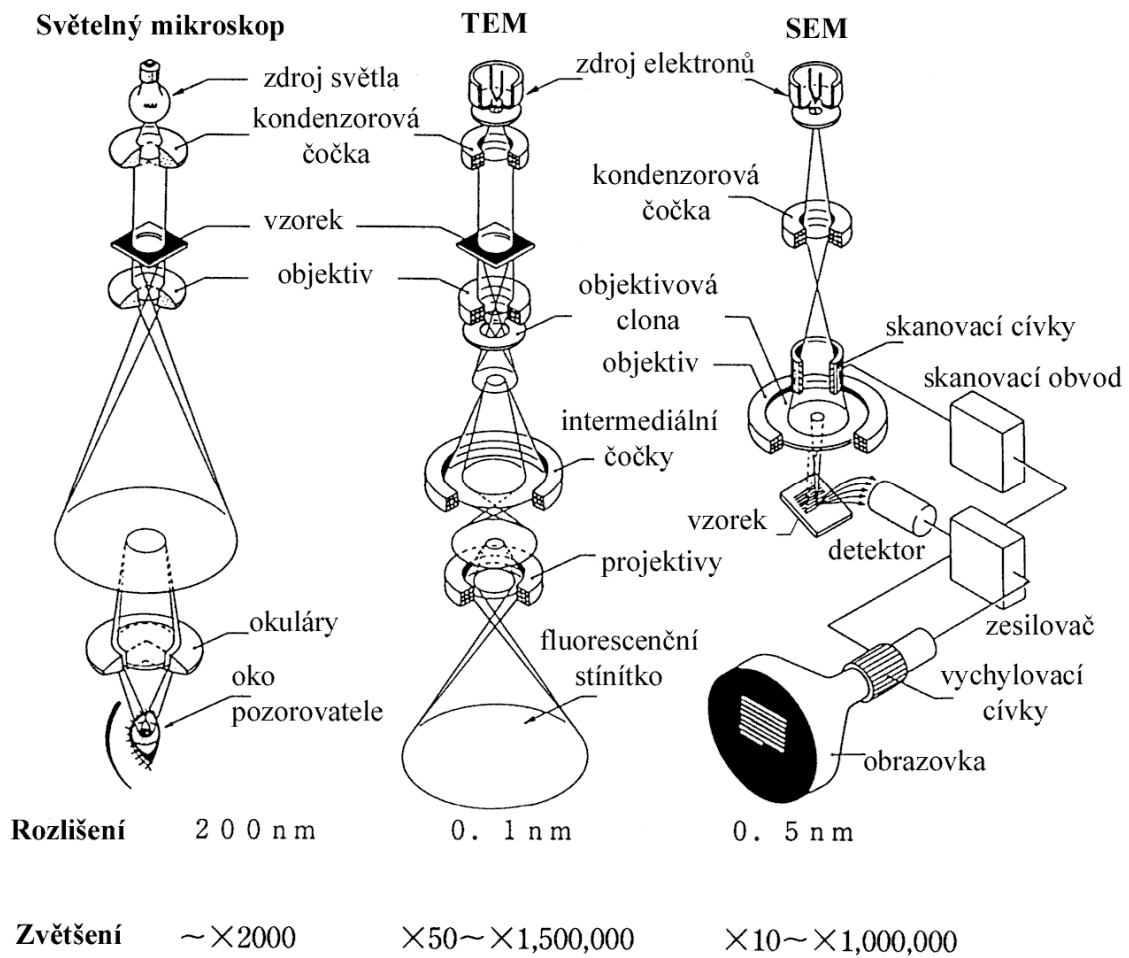
- Vznik a uvolnění sekundárních elektronů.
- Absorbování (pohlcení) elektronů vzorkem.
- Emitování rentgenového záření (paprsky X).
- Emitování fotonů světla.

Uvedené jevy spolu nedílně souvisejí a závisí především na tvaru povrchu vzorku, atomovém čísle a chemickém stavu vzorku.

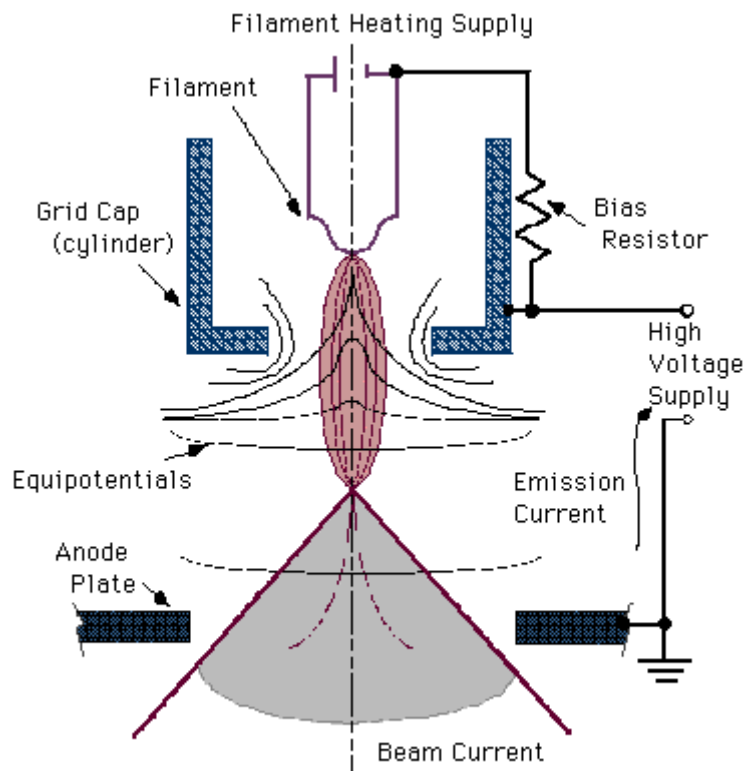
2.4.3 Rozdíl mezi TEM a REM

Nejdůležitější rozdíly mezi TEM a REM jsou:

- svazek elektronů u REM není statický jako u TEM, je vychylován prostřednictvím elektromagnetického pole rastrovacích cívek tak, že přejíždí řádek po řádku po extrémně malé plošce na povrchu vzorku,
- urychlovací napětí v systému REM je mnohem menší než v TEM, protože elektrony nemusí vzorkem pronikat,
- jednodušší příprava vzorku pro REM.



Obr. 2.4 Vnitřní stavba mikroskopů: světelného, TEM a SEM. [2]



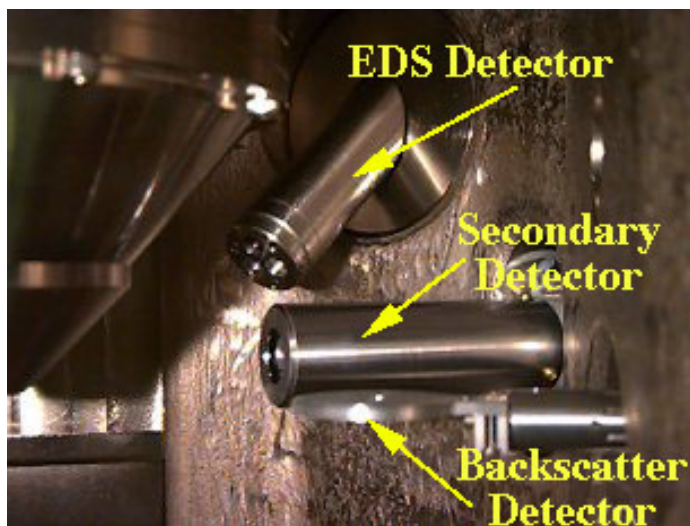
Obr. 2.5 Elektronová tryska TEM i SEM. [7]

2.4.4 Detekce elektronů

Detektory zpětně odražených elektronů a sekundárních elektronů jsou většinou buď scintilační nebo polovodičové detektory.

Detektor sekundárních elektronů (podle Everhart-Thornley). Patří mezi nejčastěji používané. Je tvořen scintilátorem (např. Naton nebo YAG), který po dopadu uvolní záblesk světla ze středu viditelné oblasti (550-650 nm), jehož intenzita je přímo úměrná energii elektronů, které ho vyvolaly. Potenciál 10 kV přivedený na tenký kovový film na přední straně scintilátoru urychlí dopadající elektrony, aby měly energii dostatečnou na vyvolání světelného pulsu. Světlo je dále vedeno světlovodem a komoru SEM opustí průchodem křemenným okénkem. Mimo vakuum je umístěn fotonásobič, který zachytí světelný signál a převede je na elektrický signál, přičemž dojde k zesílení signálu zhruba 1000x až 1000 000x. Nevýhodou tohoto detektoru je skutečnost, že scintilátor postupně ztrácí citlivost a musí být vyměněn. Většinou se umísťuje do komory vzorku pod pólové nástavce, cca 10-20 mm od vzorku. Protože v tomto uspořádání by napětí na scintilátoru mohlo negativně ovlivňovat dopadající svazek primárních elektronů, zvláště při nízkých energiích, umísťuje se detektor do Faradyovy klece s předpětím 200 V. Toto uspořádání zabezpečí, že na detektor dopadne 60 % uvolněných sekundárních elektronů, ale nedojde k ovlivnění primárního svazku elektronů. [2]

Detektor zpětně odražených elektronů. Existuje několik typů. Jedním z nich je výše popsáný detektor podle Everhart-Thornleye v uspořádání na, kdy scintilátor detektoru je připevněn na okraj pólových nástavců poslední elektromagnetické čočky, v nejvýhodnější geometrické poloze pro záchyt odražených elektronů. Jeho účinnost záchytu přesahuje 50 %. Dalším oblíbeným typem je polovodičový detektor využívající p-n přechodu nebo Schottkyho diodu. [2]



Obr. 2.6 Fotografie detektorů v komoře mikroskopu SEM. [7]

2.4.5 Zvětšení mikroskopu

Na rozdíl od TEM je v SEM zvětšení ovlivněno především přesností a rozlišením rastrováním elektronového paprsku po povrchu vzorku. Na rastrování mají největší vliv elektronické obvody, které rastrování zajišťují.

Principiálně závisí zvětšení na průměru elektronového vzorku, které může být až 300 000x. V praxi však rozlišení závisí i na vlastnostech vzorku, na přípravě vzorku a také na parametrech celkového mikroskopu (intenzita paprsku, urychlovací napětí, rychlost řádkování, vzdálenost vzorku od poslední čočky – pracovní). Za optimálních podmínek může být dosaženo rozlišení 1 nm.

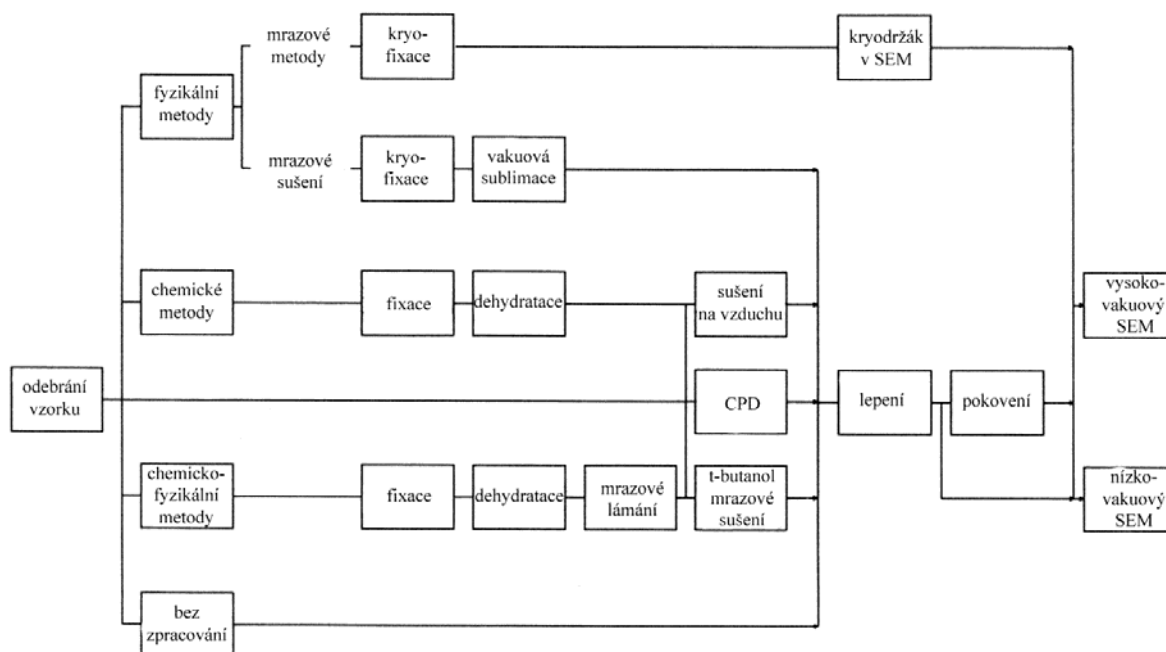
2.4.6 Příprava vzorku

Mnoho vzorků může být vloženo do komory mikroskopu bez jakékoliv přípravy. Pokud vzorek obsahuje jakoukoliv těkavou složku, jako např., vodu, bude nutné ji odstranit sušicím procesem (nebo v některých případech může být vymražena). Nevodivé vzorky se při bombardování elektrony nabíjejí, a proto musí být povlečeny vodivou vrstvou. Těžké prvky, jako je zlato, vykazují dobrou sekundární emisi. Proto se velmi hodí jako materiál pro vodivý povlak. Navíc je tento povlak jemnozrný a snadno se nanáší rozprašováním. Vodivý povlak musí být dost tenký (asi 10 nm). Vcelku však není příprava vzorku pro REM tak složitá jako příprava vzorku pro TEM. [2]

Preparát vhodný pro prohlížení v rastrovacím elektronovém mikroskopu musí splňovat následující kritéria:

- na povrchu vzorku se nesmí vyskytovat cizorodé částice, např. prach,
- stabilita vzorku ve vakuu,
- stabilita vzorku při ozáření elektronovým svazkem,
- produkování dostatečného množství požadovaného signálu, např. sekundárních elektronů,
- při expozici primárními elektrony by nemělo docházet k nabíjení vzorku.

Některé biologické objekty tyto předpoklady bez problémů splňují, jako např. různé mineralizované struktury, zuby, kosti, schránky rozsivek, ale i rostlinný materiál typu dřevo, pylová zrna apod. Ve většině případů však biologické vzorky obsahují vodu, která z nich musí být před prohlížením odstraněna, což znamená jejich úpravu. Přípravě preparátů pro SEM musí být věnována náležitá pozornost, neboť často bývá zdrojem artefaktů.



Obr. 2.7 Přehled metod použitelných pro přípravu preparátů pro SEM. [2]

2.4.7 Práce se vzorkem v mikroskopu

Kvalita obrazu v REM závisí na orientaci a vzdálenosti vzorku od detektorů a poslední čočky. Častokrát je potřeba se vzorkem pohybovat a otáčet během pozorování. Držák vzorku umožňuje jeho pohyb ve vodorovné rovině, nahoru a dolů a případné naklánění a otáčení vzorku. Tyto pohyby jsou prováděny buď manuálně a nebo elektronicky.

Každý model REM je trochu odlišný a především se liší velikostí komory pro vzorky. Maximální velikost vzorku často určuje cenu, protože větší komora vyžaduje pohybový systém a větší soustavu vývěv pro dosažení dobrého vakua.

Na trhu jsou k dostání speciální držáky umožňující zahřívání, chlazení a deformaci vzorků.

2.5 EREM

Velkou nevýhodou systému REM je, že vzorky musí být čisté, suché, elektricky vodivé a musí vydržet vakuum.

Environmentální rastrovací elektronový mikroskop se nejčastěji používá pro „problematické“ vzorky. To jsou nevodivé nebo vodu obsahující vzorky, bavlněné tkaniny, kosmetické přípravky, biologické vzorky a jiné. Tyto vzorky nemusejí být na rozdíl od klasického rastrovacího elektronového mikroskopu nijak preparovány či fixovány a díky tomu je studována jejich přirozená povrchová struktura bez poškození.

Konstrukčně EREM vychází ze základu REM. Liší se pouze oddělením vakuového prostředí v tubusu mikroskopu od prostředí komory vzorku s vyšším tlakem pomocí komory diferenciálního čerpání.

Technickým problémem u EREM byly detektory elektronů z REM, které v plynné atmosféře nepracovaly. Bylo tedy třeba vyvinout nové detektory, které jsou schopné pracovat v atmosféře komory.

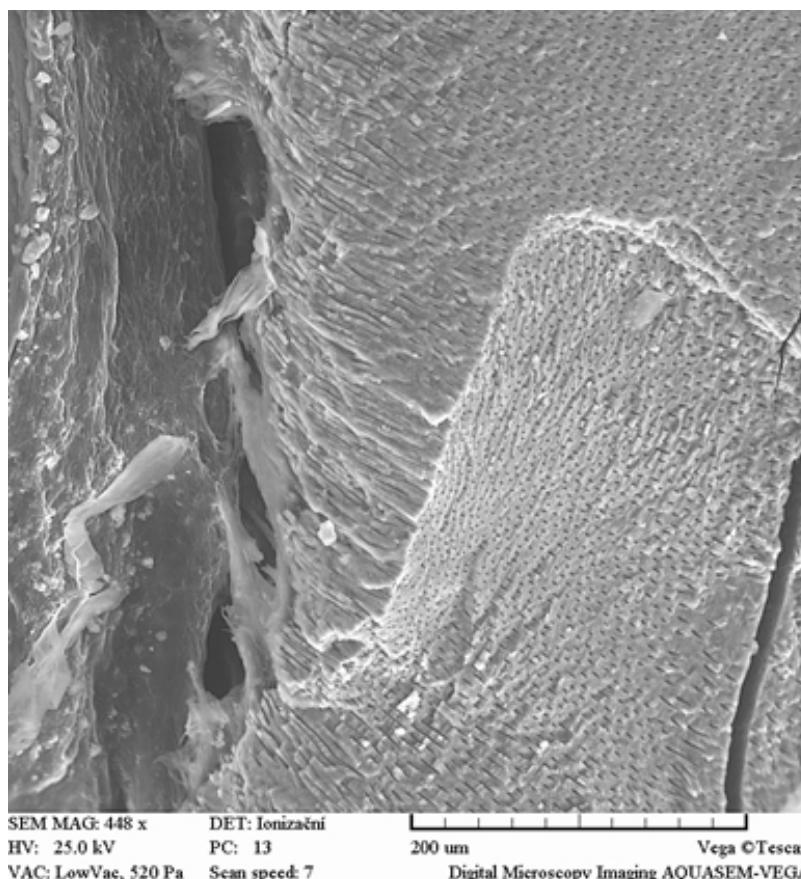
Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie představuje jeden z posledních vývojových trendů mikroskopických metod. Použití EREM je tedy všestranné a umožňuje zkoumat vzorky živých organismů nebo neživé prvky v podmínkách vysokého tlaku plynů, až 2000 Pa oproti tlaku pod 0,001 Pa v klasickém rastrovacím elektronovém mikroskopu REM.

Mikroskop EREM byl vyvinut na Ústavu přístrojové techniky AV ČR ve spolupráci s Ústavem elektrotechnologie FEKT VUT. [1]

2.5.1 EREM typu AQUASEM

Nový typ konstrukce EREM, jehož jedna část (komora diferenciálního čerpání) bude řešena v práci, je založena na zdokonalené elektronově-optické části tubusu, se stopou primárního svazku v jednotkách nanometrů. Změněna je koncepce komory diferenciálního čerpání, která umožňuje dosáhnout většího zorného pole při menší pracovní vzdálenosti a na účinnějším čerpacím systému, včetně tlak oddělujících aperturních clon. Je možné pracovat do tlaku 2000 Pa, zatímco v tubusu mikroskopu

je vakuum 10^{-3} Pa a v **diferenciálně čerpané komoře** (kap.3.1) tlak 30 Pa.³ Mikroskop je vybaven kombinovaným detekčním systémem signálních elektronů, který umožňuje záznam obrazu vzorku v různých kontrastních módech. Originálním prvkem je zejména monokrystalický detektor zpětně odražených elektronů se zabudovaným krystalem YAG nového typu. Krystal tvoří nejen tlak oddělující clonu, ale je i nosnou částí pro elektrodový systém ionizačního detektoru pracujícího na principu srážkového mechanismu mezi signálními elektrony a molekulami plynu. Prostřednictvím změny napětí na elektrodách je možné dosáhnout změnu kontrastu



Obr. 2.8 Stěna kořenového kanálku lidského zubu bez preparační drtě. [6]

obrazu. Součástí mikroskopu je zařízení pro připouštění vodních par a jejich regulaci v komoře vzorku v libovolném rozmezí tlaku. Omezení destrukce měkkých tkání během procesu čerpání je dosahováno vypracovanou metodou cyklického zavodňování vzorku pomocí vodní injekce zabudované ke komoře vzorku. [14] Mikroskop je univerzální a tedy může pracovat jak ve vakuu, tak i za zvýšeného tlaku ve vzorkové komoře.

³ V předložené práci bude řešena problematika vlivu tlaku v komoře vzorku na podmínky diferenciálního čerpání – velikost tlaku v komoře dif. čerpání

Hlavní přednosti:

- čisté a rychle dosažitelné vakuum pomocí turbomolekulární a rotační vývěvy
- automatizované nastavování mikroskopu a mnoho dalších automatizovaných funkcí
- dálkové ovládání mikroskopu s možností diagnostiky na dálku
- intuitivní ovládání prostřednictvím software v operačním systému MS Windows, důmyslný archivační systém, zpracování obrazu a odměřování v obraze
- vhodné podmínky pro komplexní analýzu vodivých i nevodivých vzorků
- široký výběr příslušenství
- hydratační systém s možností regulace teploty vodní páry
- možnost pozorování vzorků v prostředí různých plynů (vzduch, dusík, vodní pára aj.)
- Chlazený držák vzorku - Peltierův článek (min -20°C) pro pozorování biologických a jiných silně hydratovaných vzorků
- Možnost "in situ" dynamických experimentů
- Možnost studia vzorků v kapalně fázi

Základní sestava mikroskopu AQUASEM II:

- SE detektor
- Měření absorbovaného proudu
- Ionizační detektor
- BSE - pravý a levý detektor s možností sčítání a odčítání signálu
- Hydratační systém pro připouštění vodní páry do komory vzorku
- Chlazení vzorku do -20°C
- Nízkovakuový SE detektor

Specifikace AQUASEM II [6]:

Rozlišení

Ve vysokovakuovém módu (SE)	3,5 nm
V nízkovakuovém a středním módu (BSE)	10 nm

Pracovní vakuum

Mód vysokého vakua	~ 5×10^{-3} Pa
Mód středního vakua	do 350 Pa
Mód nízkého vakua	~ 2000 Pa

Zobrazovací módy optického systému

Resolution

Min. zvětšení

přibližně 350x

Urychlovací napětí

500 V až 30 kV

Elektronová tryska

Wolframová přímo žhavená katoda

Proud ve stopě

1 pA až 2 μ A

Rastrování

Rastrovací rychlost: Od 600 ns do 10 ms na pixel, nastavitelná po krocích nebo plynule

Fokuzální okno: Tvar, velikost a poloha plynule nastavitelná

Velikost obrazu

Až do 4 096 x 4 096 pixelů, nastavitelná zvlášť pro živý obraz (ve 4 stupních) a pro ukládané obrázky (v 9 stupních), volitelně čtverec nebo obdélník 3:4

Řízení mikroskopu

Všechny funkce mikroskopu jsou řízeny pomocí myši a trackballu prostřednictvím programu VEGA TC v operačním systému MS Windows

Dálkové řízení

Přes TCP/IP

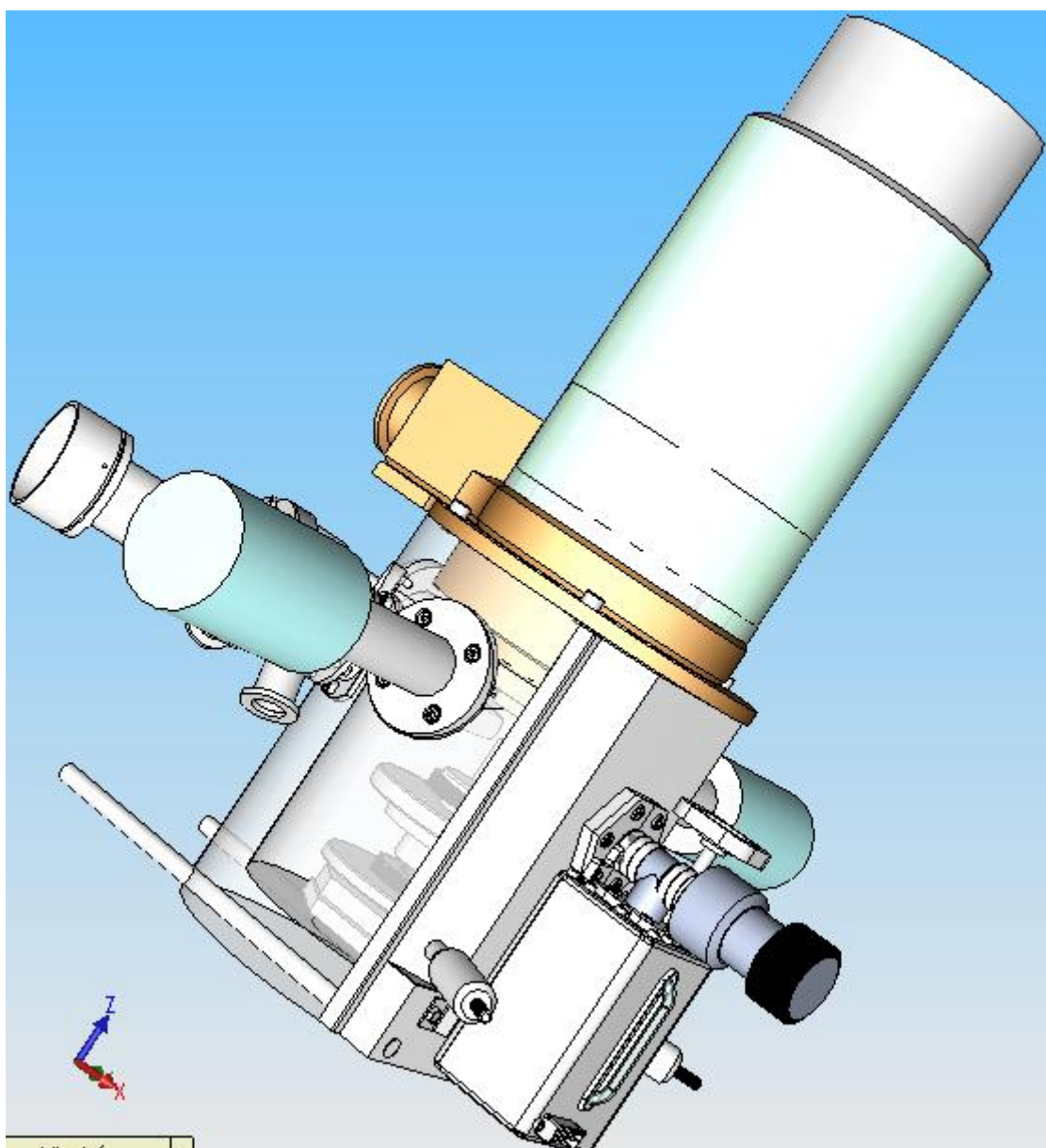
Automatické operace

Řízení vakuové soustavy, Vyžhavení katody, Seřízení trysky, Kompenzace na změnu urychlovacího napětí, Optimalizace proudu ve stopě pro zadanou velikost stopy, Optimalizace rychlosti pro rastrování, Nastavení kontrastu a jasu, Ostření a korekce astigmatismu, Nastavení Look Up Table

Popis elektronové mikroskopie by zabral jistě mnohonásobně více stránek, než je uvedeno výše. Pro tuto práci však není třeba znát detailní princip a popis celé elektronové mikroskopie, proto je teorie svým obsahem zaměřena především na oblasti, kterými je nutné se při řešení práce zabývat. Následující kapitoly jsou již zaměřeny na popis projektu a řešení zadaného úkolu.

3 Popis řešeného projektu

V této práci se řeší problematika čerpání plynu pro vytvoření vakua v některých zařízeních EREM typu AQUASEM II, který byl popsán v závěru předchozí kapitoly. Práce se týká především části mikroskopu zvané komora diferenciálního čerpání.

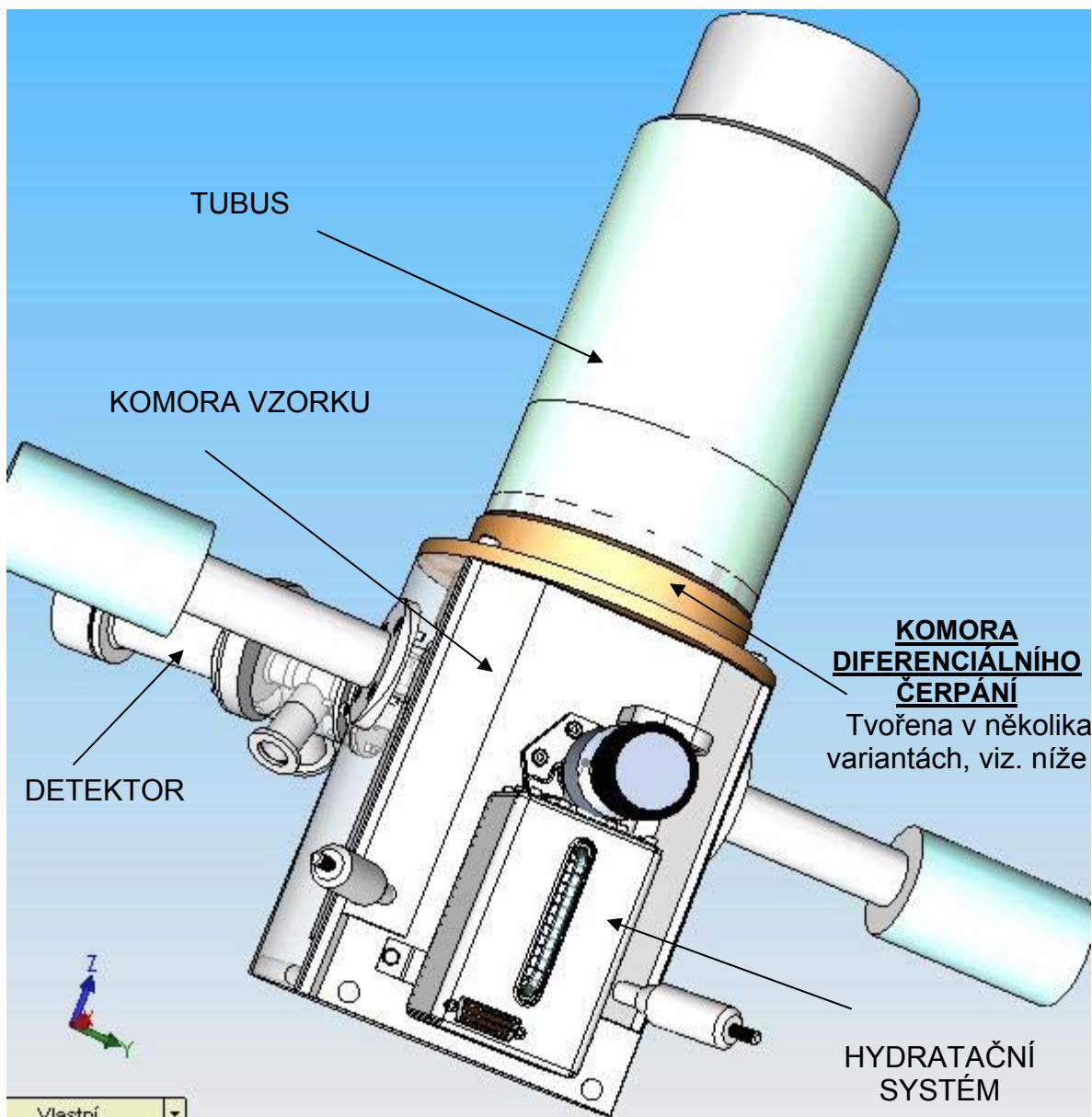


Obr. 3.1 Environmentální rastrovací elektronový mikroskop AQUASEM II.

Hlavní oblast zájmu je čerpání plynu. Tyto mikroskopy musí být konstruovány tak, aby v dráze letících elektronů byl co nejnižší tlak plynu (vzduchu). Čím nižší tlak, tím menší výskyt nežádoucích molekul plynu v prostředí průletu elektronů. Snažíme se tedy o to, aby v dráze letícího elektronu byla co nejmenší pravděpodobnost výskytu molekuly nějakého plynu. Srážka elektronu s molekulou plynu je velice

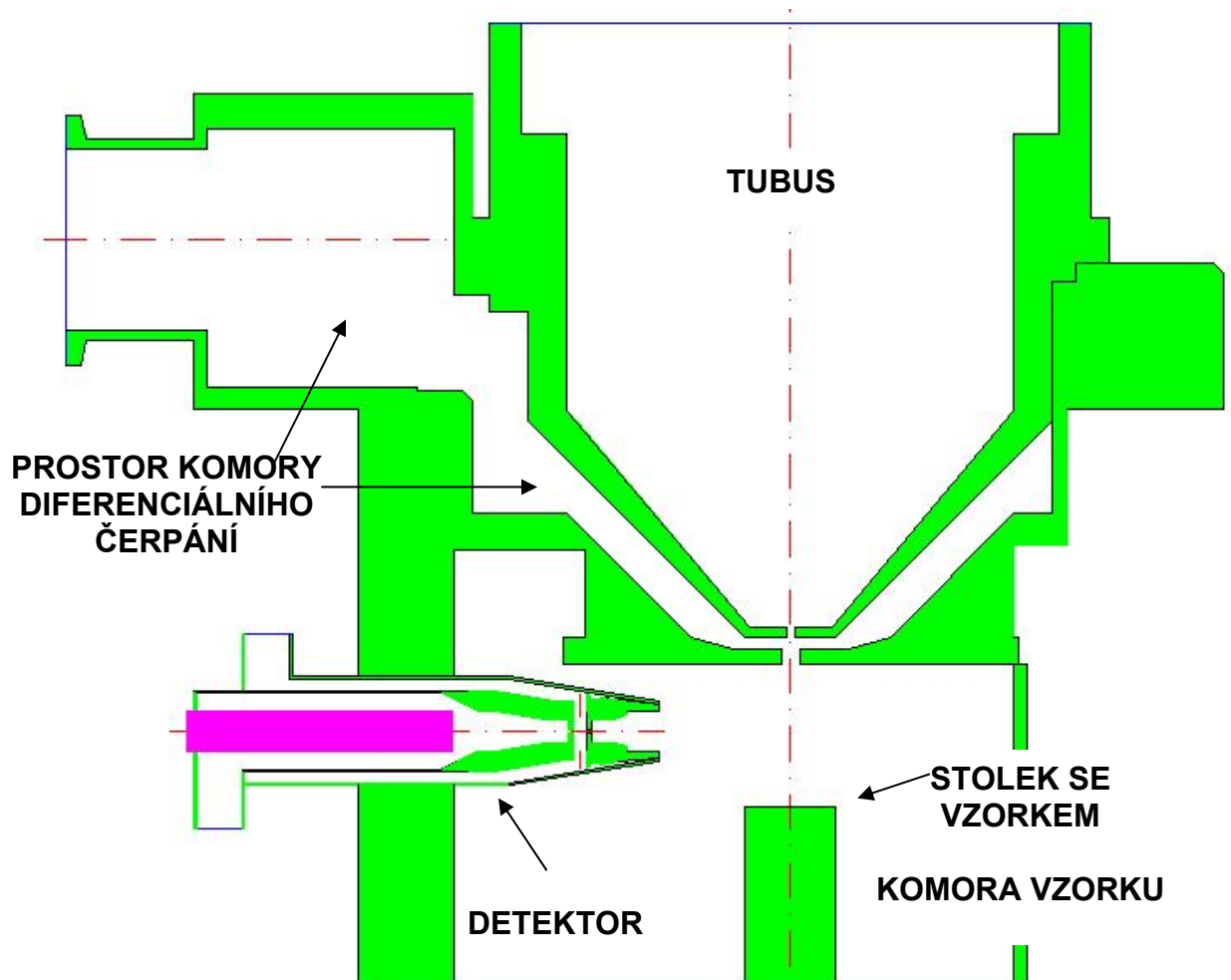
nežádoucí a způsobuje artefakty při měření, zvětšuje šum a zmenšuje rozlišení mikroskopu.

Mikroskop AQUASEM II, vytvořený v CAD systému SolidWorks, je na obr. 3.1 a 3.2, schématicky na obr. 3.3.



Obr. 3.2 Elektronový mikroskop AQUASEM II – popis projektu.

Cílem řešení je především analýza tlakových podmínek v prostoru dráhy elektronů procházející komorou diferenciálního čerpání a vliv tlaku plynu v komoře vzorku na svazek elektronů.



Obr. 3.3 Elektronový mikroskop AQUASEM II – schéma projektu.

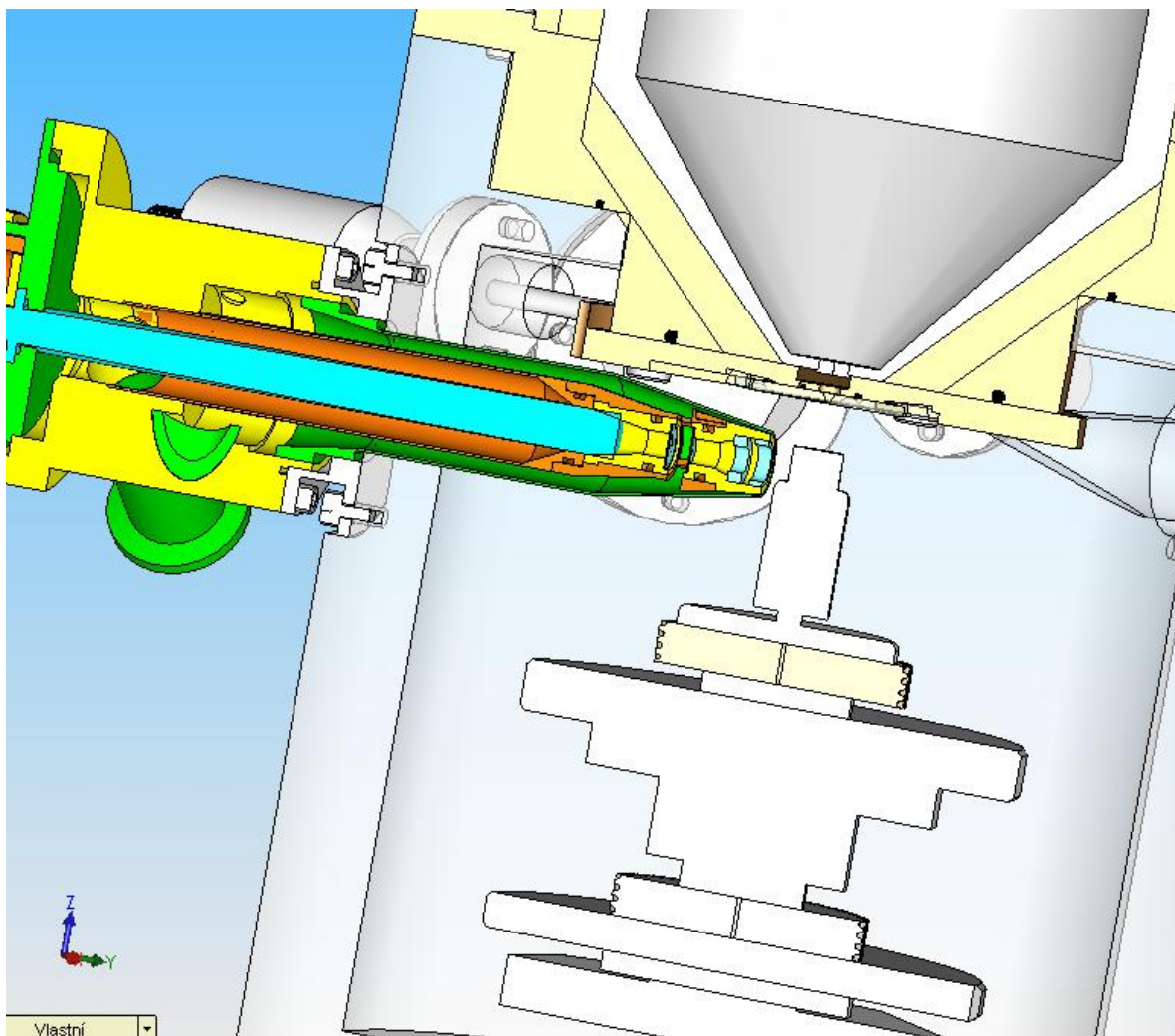
Na obr. 3.4 a obr. 3.5 je vidět řez uvedeným mikroskopem vedený přes tubus, komoru diferenciálního čerpání, komoru vzorku a detektor tak, aby bylo na obr. 3.5 možno naznačit dráhy elektronů :

- Červeně značenou dráhu primárního svazku elektronů. Tento svazek vychází z tubusu, prochází komorou diferenciálního čerpání a vstupuje do komory vzorku, kde končí na vzorku umístěném na stolku.
- Modře označenou dráhu sekundárních elektronů putující od vzorku do detektoru.

V komoře vzorku může být tlak až 2000 Pa. Práce řeší problematiku vyplývající z této vlastnosti popsání Environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu (EREM).

Jak již bylo uvedeno, problém je, že primární svazek elektronů nemůže procházet plynným prostředím, protože srážky elektronů s molekulami plynu by elektrony rozptylovaly. Z tohoto důvodu je v tubusu, kde je elektronová tryska s žhavenou katodou, tlak 0,01 Pa. Podobně je tomu u detektoru, kde není možné,

aby tlak byl vyšší jak 8 Pa. Kdyby tlak byl vyšší, docházelo by v detektoru k elektrickým výbojům.



Obr. 3.4 Řez environmentálním rastrovacím elektronovým mikroskopem.

Z důvodu, že elektrony nemohou procházet pevnými látkami (prostředím), je nutné používat otvory, jimiž prochází elektrony z prostředí nízkého tlaku do prostředí vysokého tlaku. Vzhledem k velké rozdílnosti tlaků nelze používat obyčejné clonky s malými otvory.

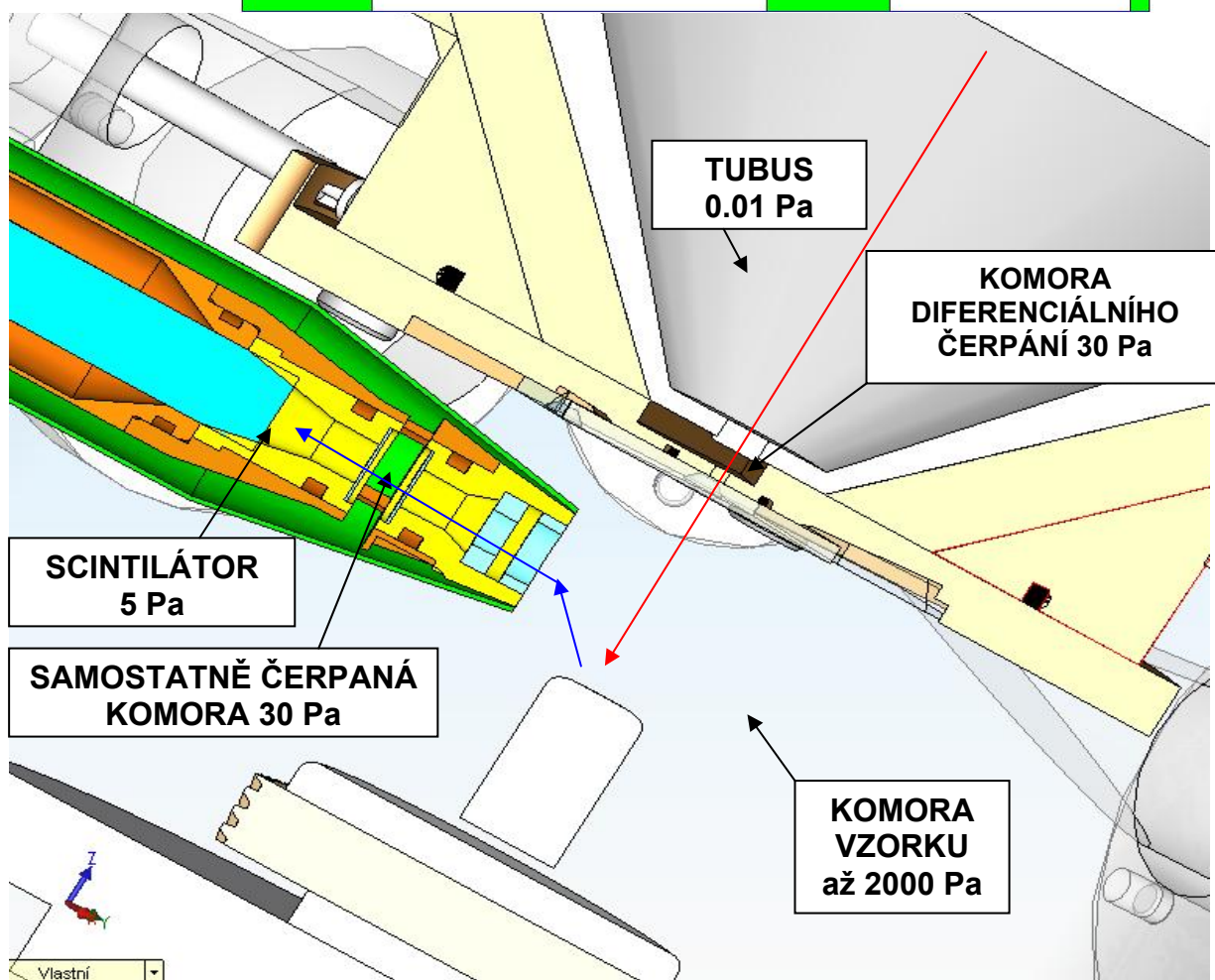
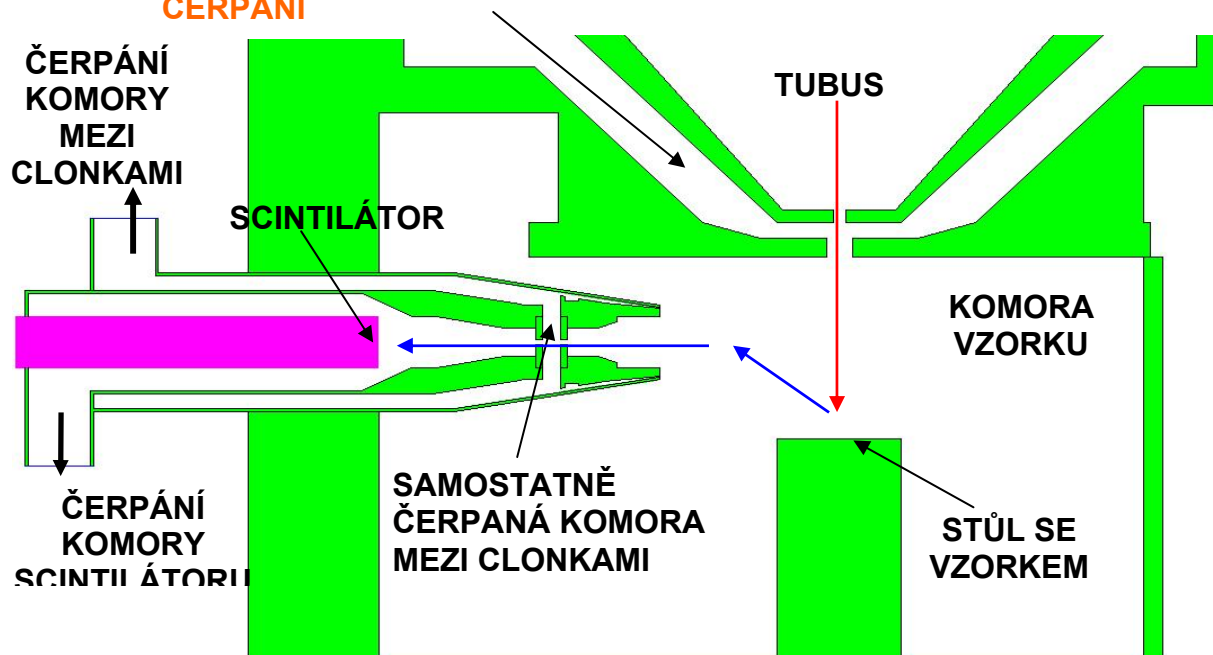
Tento problém je řešen následujícím způsobem :

Mezi tubus a komoru vzorku je vložena uvedená komora diferenciálního čerpání, kde je tlak snížen přibližně na 30 Pa.

Podobně je i v detektoru vytvořena analogická samostatně čerpaná komora oddělující scintilátor od komory vzorku, ve které je samostatným čerpáním snížen tlak na 30 Pa.

Schéma uvedeného řešení a velikosti tlaků v jednotlivých prostředích jsou uvedeny na obr. 3.5.

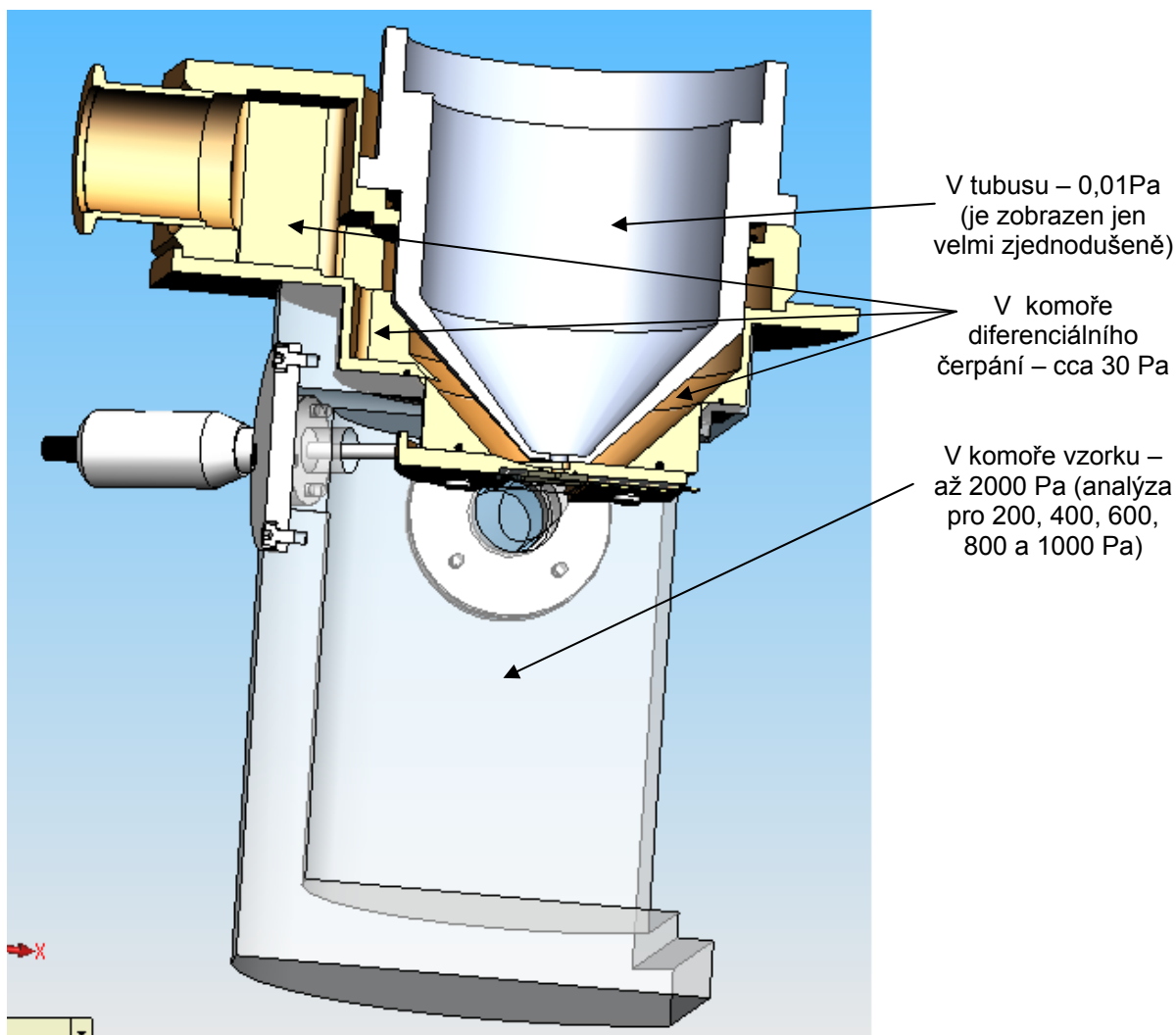
KOMORA DIFERENCIÁLNÍHO ČERPÁNÍ



Obr. 3.5 Dráha primárního svazku elektronů a sekundárních elektronů.

Na obr. 3.6 je opět vidět řez mikroskopem – tubusem, komorou diferenciálního čerpání a komorou vzorku. Tentokrát však z jiného úhlu, než byl na obr. 3.5,

kde bylo třeba vést řez tak, aby byl viděn v řezu i detektor. Na obr. 3.6 je řez veden naopak tak, aby byla vidět v řezu naplno diferenciálně čerpaná komora.

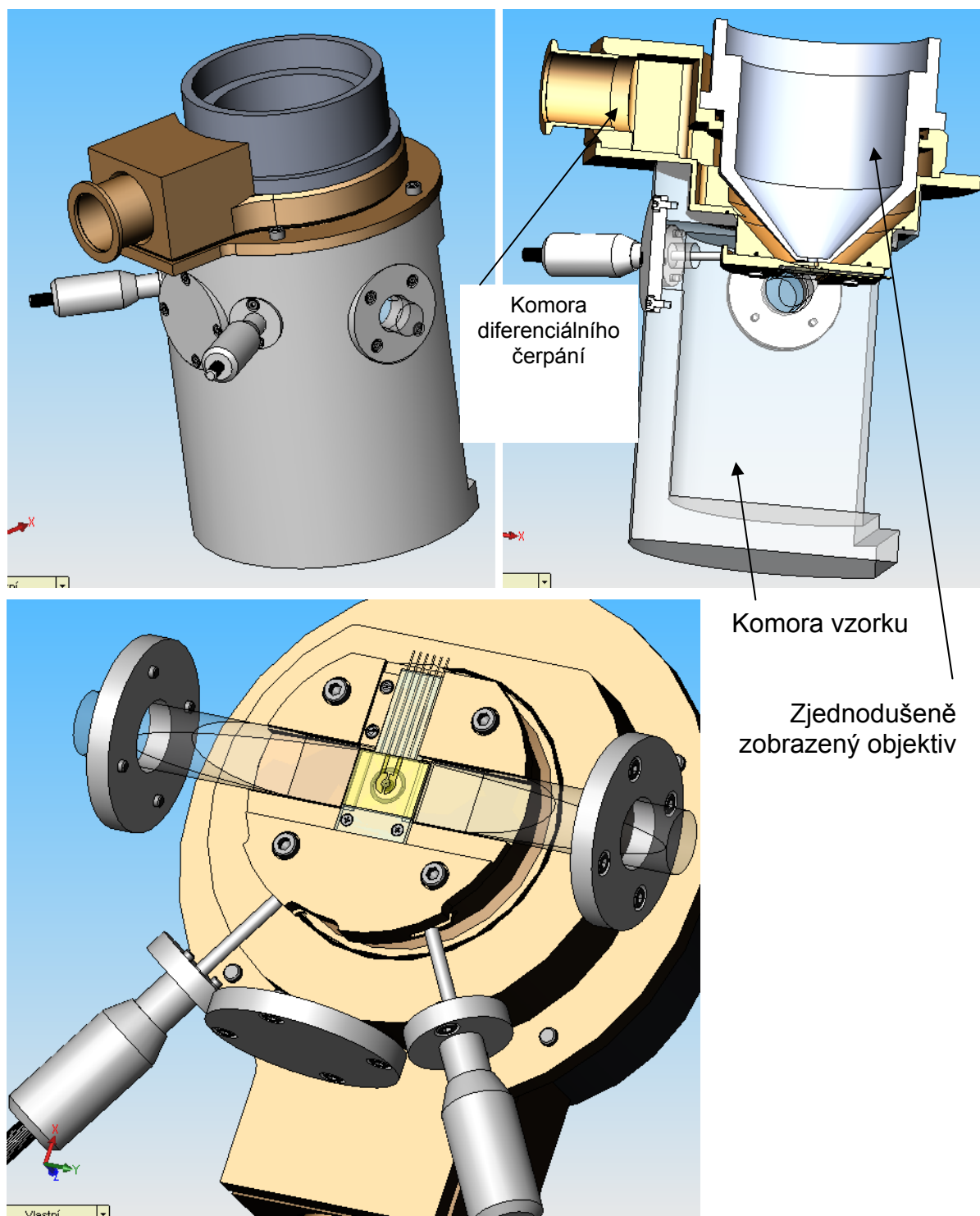


Obr. 3.6 Hodnoty tlaků v jednotlivých částech AQUASEM.

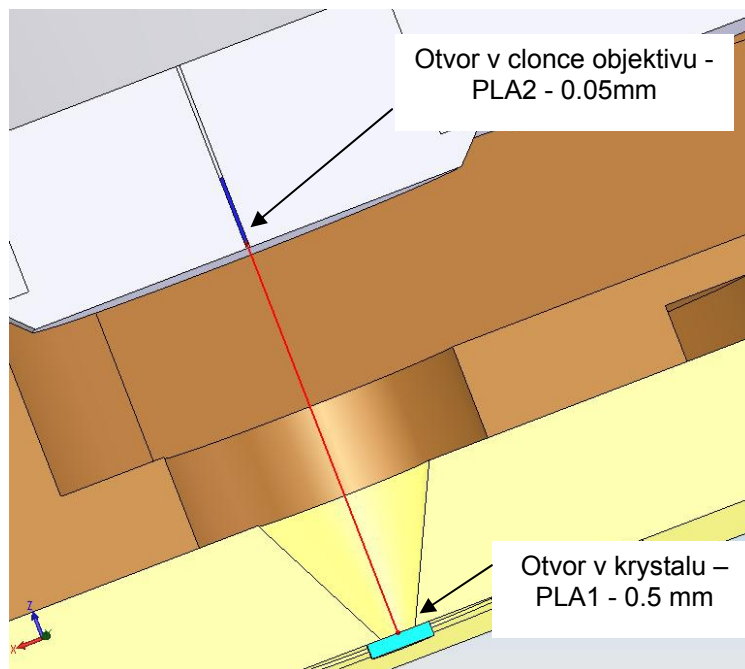
V následujících kapitolách je podrobněji popsána komora diferenciálního čerpání. Uvedený popis není zaměřen na vyložení problematiky elektronové mikroskopie, ale je zaměřen především na důsledky, které ovlivňují řešenou konstrukci.

3.1 Komora diferenciálního čerpání

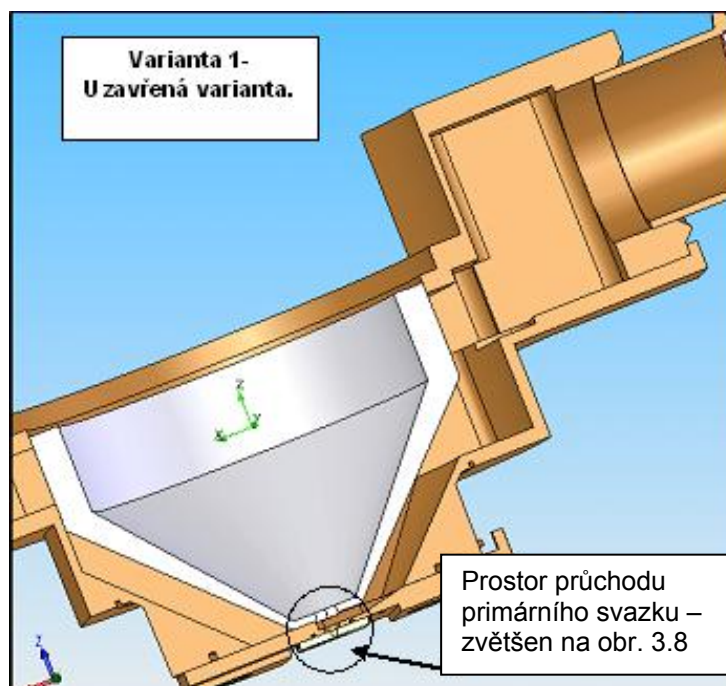
Komora diferenciálního čerpání (obr. 3.7) je samostatně čerpanou komorou (cca 30 Pa). Jejím úkolem je oddělit prostředí velice nízkého tlaku (0,01 Pa) a prostředí komory vzorku s mnohem vyšším tlakem (až 2000 Pa).



Obr. 3.7 Komora diferenciálního čerpání v mikroskopu.



Obr. 3.8 Dráha primárního svazku elektronů při průchodu komorou diferenciálního čerpání.

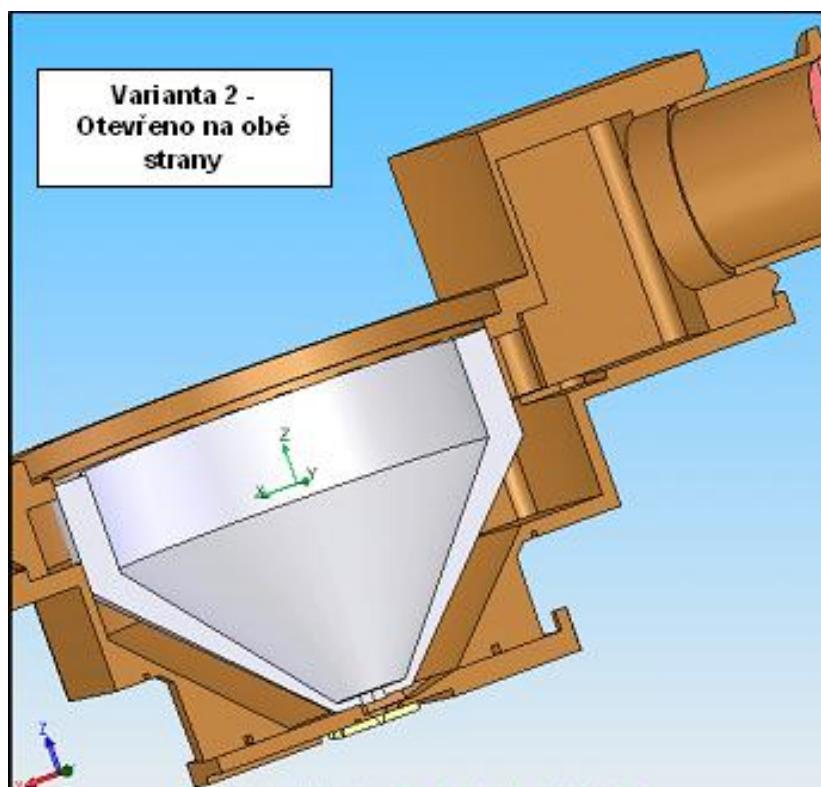


Obr. 3.9 Uzavřená varianta komory.

Vzhledem k tlaku plynu až 2000 Pa v komoře vzorku (viz. obr. 3.6) elektronového rastrovacího mikroskopu nastávají velice specifické nároky na stavbu a konstrukci celého mikroskopu a především na jeho čerpací systém. Především komora diferenciálního čerpání musí být navržena a konstruována tak, aby vyhovovala definovaným požadavkům na účinné čerpání jejího vnitřního prostoru a minimalizaci tlaku v ní. Náročnost konstrukce mikroskopu EREM je vykompenzována velkou nabídkou možností jeho využití.

Velké tlakové rozdílnosti mezi tubusem se zdrojem elektronů a komorou se vzorkem, lze realizovat pomocí systému komory diferenciálního čerpání, tlaku omezujících clon PLA1 a PLA2 (obr. 3.8) a díky účinnému systému čerpání plynu. Clony jsou opatřeny otvory s průměrem řádově desítek až stovek mikrometrů. To umožňují velice účinné omezení proudění plynů mezi jednotlivými částmi mikroskopu a rovněž clony dovolují průchod elektronů od jejich zdroje až ke vzorku. Na obr. 3.8 jsou tyto otvory ve clonkách PLA1 a PLA2 označeny - clonka PLA1 zeleně a clonka PLA2 modře. V těchto místech jsou zadány okrajové podmínky na vstupních a výstupních otvorech zkoumaného systému.

Barevná označení obložení na obrázku netvoří žádné zaslepení, slouží pouze pro zadání okrajových podmínek v místech otvorů pro výpočty.



Obr. 3.10 Otevřená varianta komory.

Při vysokém tlaku plynu v komoře vzorku EREM dochází ke zvýšení interakcí elektronů s molekulami plynu. Důsledkem je rozptyl primárního elektronového

svazku. Velikost rozptylu roste se zvyšujícím se tlakem a středním atomovým číslem plynu. Dále také je ovlivněna pracovní vzdáleností (vzdálenosti vzorku) a velikostí urychlovacího napětí elektronového svazku. Se snižujícím se napětím vzrůstá rozptyl. Důsledkem rozptylu svazku je zvětšení průměru primárního elektronového svazku, což má za následek zhoršení poměru signál – šum. V konečném stádiu to může vést ke zmenšení rozlišovací schopnosti mikroskopu.

Z výše uvedených důvodů se tedy hledala při konstrukci čerpané komory optimální varianta tvaru této komory. Účinné čerpání této komory je hlavním požadavkem, který ovlivňuje parametry mikroskopu, jako je například maximální velikost tlaku plynu v komoře vzorku, velikost šumu v detekovaném signálu a tím i rozlišení mikroskopu. Jeden z hlavních požadavků na výslednou komoru je minimální tlak plynu v oblasti optické osy mikroskopu – okolí primárního svazku elektronů, který prochází touto komorou. Na obr. 3.5 a 3.8 je tato dráha označena červenou čarou. Tento prostor průchodu primárního svazku elektronů je stejný u všech variant (viz. obr. 3.9., 3.10. a 3.11). Rozdíly jsou pouze ve tvaru a způsobu čerpání jednotlivých variant. Vzhledem k předešlým zkušenostem byly navrženy tři základní tvary komory diferenciálního čerpání, které se následně podrobily analýze a analyzoval se neoptimálnější tvar komory.



Obr. 3.11 Otevřená varianta komory s kuželem.

Součástí práce je i vyhodnocení uvedených variant, která z nich nejvíce vyhovuje požadavku na čerpání plynu, tak aby svazek elektronů červeně označený na obr. 3.8 byl co nejméně rozptýlen – docházelo co nejméně ke srážkám s molekulami plynu. Tvar komory ovlivňuje rozptyl uvedeného svazku elektronů.

Varianta č.1 – uzavřená varianta (obr. 3.9). V této variantě je plyn z prostoru pro průchod primárního elektronového svazku komoru diferenciálního čerpání čerpán jednosměrně a dále odváděn vymezeným prostorem mezi objektivem mikroskopu a diferenciálně čerpanou komorou. Vymezený prostor pro odvádění plynu je v této variantě realizován tak, aby plyn odcházel po nejkratší možné dráze směrem k rotační vývěvě.

Varianta č.2 – otevřená varianta (obr. 3.10). V této variantě je plyn z prostoru pro průchod primárního elektronového svazku komoru diferenciálního čerpání čerpán jednosměrně, stejně jako v případě varianty 1. Odváděn je však celým objemem prostoru mezi objektivem mikroskopu a diferenciálně čerpanou komorou.

Varianta č.3 – kuželová varianta (obr. 3.11). V této variantě je plyn z prostoru pro průchod primárního elektronového svazku komoru diferenciálního čerpání čerpán všemi směry a maximálním možným objemem volného prostoru a stejně tak je i odváděn. Odvod plynu v této variantě je koncipován stejně jako v případě varianty 2.

4 Fyzika plynů

V následující kapitole bude stručně popsáno chování plynů a teorie vakua. Tyto fyzikální popisy bylo třeba brát ve zřetel při vyhodnocení analýzy a výběru vhodné varianty. Vzhledem k tomu, že v mikroskopu EREM se vyskytuje jak vakuum, tak i plynné prostředí, je nutné uvést obě kapitoly.

Kapaliny a plyny mají společnou vlastnost a to tekutost → tekutiny. Zapříčiňuje ji snadná vzájemná pohyblivost částic, z nichž se kapalná a plynná tělesa skládají → nemají stálý tvar (tvar určuje nádoba).

Příčinou různé tekutosti je vnitřní tření (viskozita) - při pohybu do sebe částice (ze kterých se plyn i kapaliny skládají) narážejí a způsobují odpor svého pohybu → příčina vnitřního tření.

Základní pojmy:

Plyny - nemají stálý tvar ani objem, velmi snadno stlačitelné

Kapaliny - nestálý tvar, stálý objem, velmi malá stlačitelnost

Ideální plyn - dokonale tekutý, bez vnitřního tření a dokonale stlačitelný

Ideální kapalina - dokonale tekutá, bez vnitřního tření a zcela nestlačitelná

4.1 Tlak plynu

Nárazy molekul plynu na rovinnou stěnu o povrchu S se projevují jako tlaková síla F na stěnu, což vyjadřuje následující vztah:

$$p = \frac{F}{S} \quad (4.1)$$

Základní jednotkou tlaku je Pascal [Pa]. Jeden Pascal je tlak, který vyvolá síla 1 newtonu rovnoměrně rozložená na rovinné ploše s obsahem jednoho čtverečního metru, kolmé ke směru síly. [4]

Další jednotky tlaku:

Torr (1 Torr = 1 mmHg) - jedna z nejstarších jednotek pro vyjádření tlaku, stále se však používá v USA a v Japonsku. Od ní je odvozená jednotka 1 micron Hg = 1 milliTorr. *Přepočít:* 1 Torr = 133.3 Pa, 1 Pa = 7.5x10⁻³ torr

mbar – jednotka odvozená od jednotky bar se ještě často používá v Evropě, především v německy mluvících zemích. *Přepočít:* 1 millibar = 100 Pa = 0.75 Torr

atm – atmosféra, starší jednotka (1 atm = 760 Torr), ve vakuové technice se nepoužívá. Standardní atmosféra byla nahrazena novou jednotkou Pascal v roce 1971. *Přepočít:* 1 atm = 10⁵ Pa [N/m²].

PSI - pound per square inch (libra na čtvereční palec) se používá v anglosaských zemích pro vyjádření tlaku, ne však ve vakuové technice.

4.2 Proudění

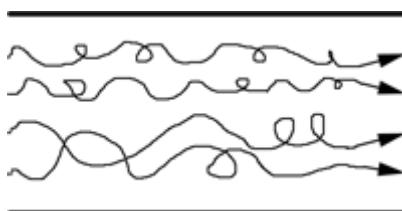
Převažuje-li pohyb kapaliny (plynu) v jednom směru, pak hovoříme o **proudění**. Kapalina (plyn) mezi dvěma místy proudí tehdy, jestliže je mezi nimi rozdíl tlaků.

V praxi se při snížených tlacích rozeznávají zpravidla čtyři druhy proudění plynu, a to:

Turbulentní proudění

Přetlak, rychlé zavzdušnění

Turbulentní proudění plynů nastává při vysokém tlaku. Je charakteristické vytvářením vírů a vratných proudů. Při turbulenci se vodivost potrubí zmenšuje. Ve vakuové technice turbulentní proudění nastává především na začátku čerpání při tlaku větším než přibližně 20 kPa.

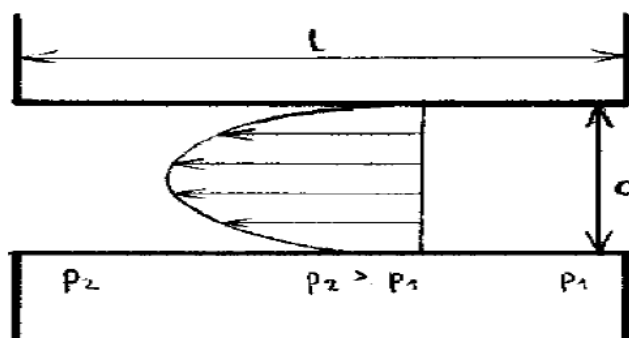


Obr. 4.1 Model pohybu plynu při turbulentním proudění.

Hydrodynamické proudění

Hrubé a střední vakuum

U hydrodynamického proudění se plyn pohybuje ve vrstvách rovnoběžných s osou trubice. Pohyb plynu se zpomaluje třením o stěny, jednotlivé vrstvy mají proto různé rychlosti. U stěny je rychlost pohybu plynu minimální, u osy maximální. Změna rychlosti proudění mezi jednotlivými vrstvami závisí na viskozitě plynu. Tento typ proudění se také označuje jako laminární nebo viskózní (bez vírů).

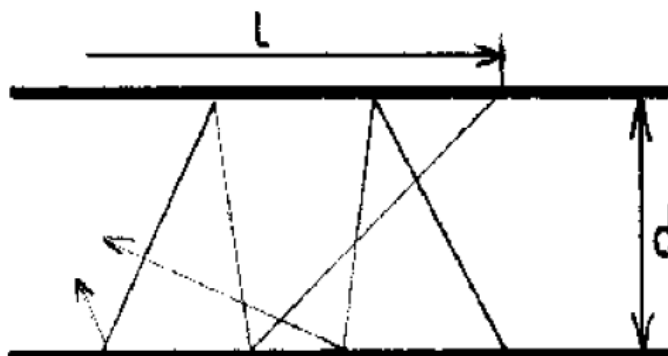


Obr. 4.2 Model pohybu plynu při hydrodynamickém (viskózním) proudění. [4]

Molekulární proudění

Vysoké vakuum

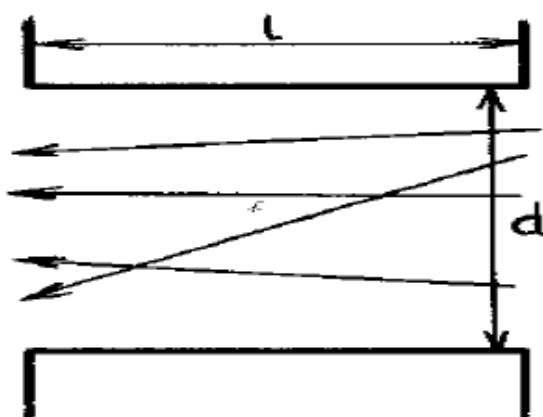
O molekulárním proudění má smysl uvažovat u trubic, jejichž délka je větší než jejich průměr. Střední volná dráha musí být větší než průměr trubice. Mechanismus molekulárního proudění je zřejmý z obr. 4.3. Je zřejmé, že pro molekulární proudění musí být splněna podmínka $d \ll l \ll l_d$. Pro běžné rozměry trubic odpovídá tomuto kritériu tlak menší než 1 Pa. Molekulární vodivost není závislá na tlaku, je určena pouze rozměry trubice.



Obr. 4.3 Model pohybu plynu při molekulárním proudění. [4]

Efúzní proudění

Efúzní proudění nastává u velmi krátkých trubic, jejichž délka je mnohem menší než průměr trubice. Střední volná dráha musí být přitom větší než průměr trubice. Prakticky se jedná o vakuovou vodivost otvoru. Mechanismus Efúzního proudění molekulárního proudění je zřejmý z obr. 4.4. Většina molekul projde bez srážky s potrubím.



Obr. 4.4 Model pohybu plynu při efúzním proudění. [4]

4.3 Vakuum

Vakuum je označení pro stav systému, který obsahuje plyny nebo páry, pokud je jejich tlak (koncentrace) menší než tlak atmosférický. Vysoké nebo velmi vysoké vakuum (ultra vakuum) je takové vakuum, kdy je tlak mnohonásobně menší než atmosférický tlak.

Klasifikace vakua [4]:

- Hrubé (nízké) vakuum ($100 - 10^{-1}$ Pa),
- Střední vakuum ($10^{-1} \div 10^{-3}$ Pa),
- Vysoké vakuum ($10^{-3} \div 10^{-6}$ Pa),
- Ultravakuum (pod 10^{-6} Pa).

Snižujeme-li celkový tlak v potrubí při zachování určitého spádu podél potrubí, zvětšujeme střední volnou dráhu, až se její hodnota přibližuje rozměrům daného potrubí. Molekuly pak již nenarážejí na sebe, nýbrž největším dílem pouze na stěny tohoto potrubí. Při dostatečně nízkých tlacích se tedy molekuly pohybují každá samostatně, nezávisle na ostatních. Jedná se o molekulární proudění.

Mezi laminárním a molekulárním prouděním nenastává tak náhlý přechod jako mezi prouděním laminárním a turbulentním. Oblast, v níž neplatí přímo ani zákony proudění viskózního ani molekulárního, nazýváme přechodovou oblastí proudění, nebo též prouděním Knudsenovým.

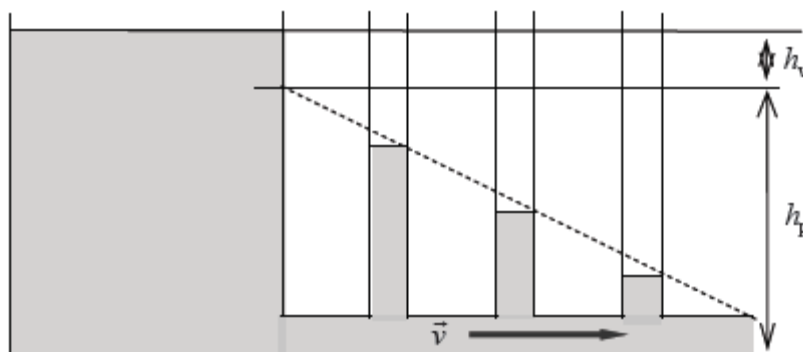
Při dalším snížení tlaku, tj. zvláště v oblasti ultra vysokého vakua, jsou již při proudění rozdíly tlaků v potrubí velmi nepatrné. Střední volná dráha molekul při těchto tlacích je již větší než rozměr celého systému. Za těchto podmínek dochází k proudění efúznímu, při němž vodivost potrubí nezávisí na délce potrubí a stejně jako u molekulárního proudění ani na tlaku.

V práci je řešen především první případ hrubého (nízkého) vakua.

4.4 Proudění skutečných kapalin

Skutečné tekutiny, zejména kapaliny, se vyznačují větší či menší viskozitou, která ovlivňuje jejich proudění. Viskozita neboli vnitřní tření patří k disipativním silám. Její působení se projevuje snížením celkové energie kapaliny.

Na obr.3.1 je znázorněn výtok kapaliny otvorem u dna nádrže vodorovnou trubicí. Za ideálního stavu by volná hladina kapaliny ve všech manometrických trubicích měla být ve stejné výši, samozřejmě níže, než volná hladina kapaliny v nádobě. Tento pokles, tzv. rychlostní výška h_v je mírou dynamického tlaku p_d , příslušejícího rychlosti proudění tekutiny trubicí. [12]



Obr. 4.5 Úbytek tlakové energie proudící viskózní kapalinou. [12]

Platnost rovnice kontinuity musí být ve všech místech vodorovné trubice zachována, projevuje se podél trubice úbytek mechanické energie následkem viskozity proudící kapaliny postupným poklesem jejího statického tlaku p_d . Výšku h_v , která je mírou tohoto úbytku mechanické energie proudící viskózní kapaliny, označujeme jako ztracenou výšku.

4.5 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

$$M = \frac{v}{c} , \quad (4.2)$$

kde v je rychlost tekutiny, c je rychlost zvuku.

Pro rychlost zvuku v ideálním plynu platí vztah

$$c = \sqrt{\kappa RT} , \quad (4.3)$$

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

Pro κ platí vztah

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} . \quad (4.4)$$

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

$$M \leq (0,2 - 0,3) . \quad (4.5)$$

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

$$p = R \rho T \quad . \quad (4.6)$$

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 $M_{kr} = 1$.

V případě jednorozměrného spojitého proudění ideálního plynu v trubici proměnného průtočného průřezu A platí pro určovací veličiny stavu proudu tekutiny rychlost v , tlak p , hustotu ρ a teplotu T parametrické závislosti na Machově čísle M a Poissonově konstantě κ

$$\frac{A}{A_{kr}} = \frac{1}{M} \left[\frac{2}{\kappa + 1} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} \quad , \quad (4.7)$$

$$\frac{v}{v_{kr}} = \frac{M}{\left[\frac{2}{\kappa + 1} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad , \quad (4.8)$$

$$\frac{p}{p_{kr}} = \frac{1}{\left[\frac{2}{\kappa + 1} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}} \quad , \quad (4.9)$$

$$\frac{\rho}{\rho_{kr}} = \frac{1}{\left[\frac{2}{\kappa + 1} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{1}{\kappa - 1}}} \quad , \quad (4.10)$$

$$\frac{T}{T_{kr}} = \frac{1}{\left[\frac{2}{\kappa + 1} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]} \quad . \quad (4.11)$$

Při uvažovaném jednorozměrném spojitém proudění v trubici proměnného průřezu definujeme následující tři charakteristické stavy proudění.

Stav celkový (zbrzdění) $v_0 = 0$, p_0 , ρ_0 , T_0 , $M_0 = 0$.

Stav kritický v_{kr} , p_{kr} , ρ_{kr} , T_{kr} , $M_{kr} = 1$.

Stav mezný $v_m, p_m = 0, \rho_m = 0, T_m = 0, M_m = \infty$.

Z rozboru charakteristických stavů proudění vyplývají významné poměry charakteristických veličin ve stavu celkovém, kritickém a mezním:

$$\frac{p_0}{p_{kr}} = \left(\frac{\kappa + 1}{2} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}, \quad (4.12)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_{kr}} = \left(\frac{\kappa + 1}{2} \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}, \quad (4.13)$$

$$\frac{T_0}{T_{kr}} = \frac{\kappa + 1}{2}, \quad (4.14)$$

$$\frac{v_m}{v_{kr}} = \left(\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4.15)$$

Z rozboru rovnic popisujících jednorozměrné spojitě proudění ideálního plynu v trubici proměnného průřezu plyne důležitý závěr: „Zmenšování průtočného průřezu vede proudící plyn k jeho kritickému stavu, zatímco zvětšování průtočného průřezu proudící plyn od jeho kritického stavu oddaluje.“

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

V případě konvergentní dýzy (pouze zužující trubice) lze na výstupu z dýzy dosáhnout snížení tlaku v proudu plynu pouze na hodnotu kritického tlaku. V případě, že dle okrajových podmínek je k dispozici vyšší tlakový spád, nastává v oblasti za výstupem v minimálním průřezu trubice neřízená expanze v rozšiřujícím se paprsku proudu plynu z kritického tlaku na tlak okolního prostředí (plní se okrajová tlaková podmínka). [12]

4.6. Srážky molekul, střední volná dráha

Na problematiku, uvedenou v této kapitole, je nutno upozornit z důvodu, že se stává jedním z kritérií vyhodnocení výsledků získaných pomocí dále prováděné simulace proudění pomocí systému SolidWorks Flow Simulation, neboť jejím smyslem je vyhodnotit optimální podmínky pro průchod primárního svazku elektronů diferenciálně čerpanou komorou tak, aby elektrony měly co nejméně srážek s molekulami čerpaného plynu.

Střední volná dráha je průměrná vzdálenost mezi dvěma po sobě následujícími srážkami molekul plynu.

Lze konstatovat, že:

- zdvojnásobí-li se počet částic v jednotce objemu – tedy tlak plynu, střední volná dráha klesne na polovinu.
- střední volná dráha nezávisí na teplotě.

4.6.1. Střední volná dráha, přenosové jevy

Jak vyplývá z předchozího, jedna určitá molekula koná v plynu složitý pohyb. Při srážkách s ostatními molekulami se mění velikost i směr její rychlosti, mezi dvěma srážkami se pohybuje rovnoměrně přímočaře a urazí tak určitou dráhu, kterou lze nazvat volnou dráhou. Tyto dráhy jsou obecně různě velké, jejich průměrná střední hodnota se nazývá střední volná dráha (l).

Bereme v potaz, že závislost tlaku na pravděpodobnosti počtu srážek molekul čerpaného vzduchu z komory diferenciálního čerpání s elektrony primárního svazku je lineární. Nejde tedy o nelineární průběh, který by se musel brát v úvahu.

Z tohoto důvodu lze brát jako jedno z kritérií výběru nejvýhodnější varianty tvaru diferenciálně čerpané komory aritmetický průměr tlaků a hustoty čerpaného média zjištěných na dráze primárního svazku.

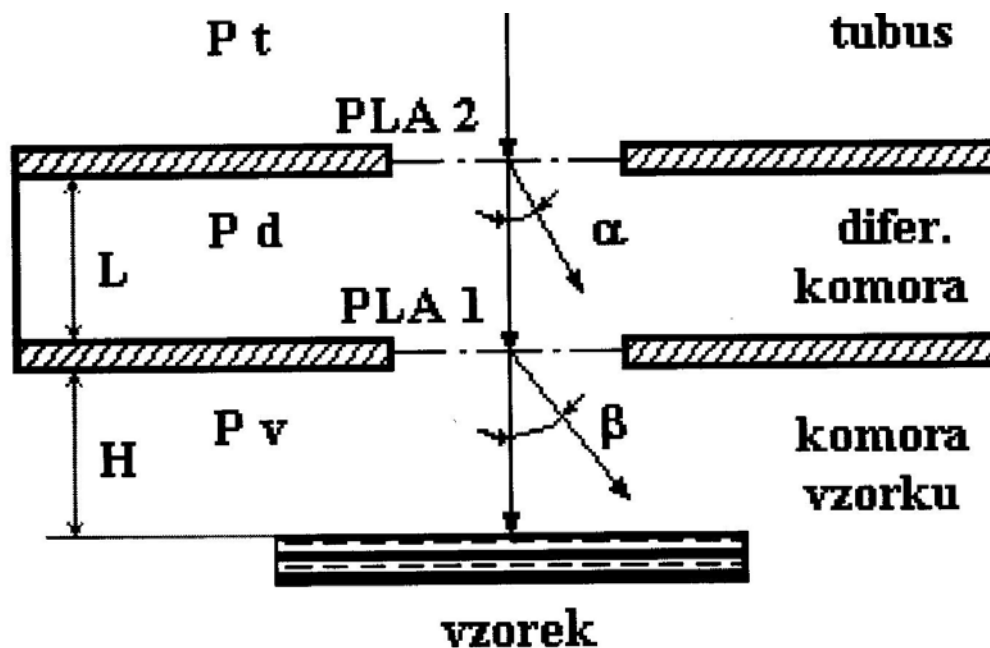
Dalším kritériem bude závislost rozptylu na počtu interakci. Princip popisuje následující kapitola.

4.6 Závislost rozptylu na počtu interakcí

Základním požadavkem kladeným na mikroskopy pracující s vyšším tlakem v komoře vzorku, jako je uvedený případ, je tedy 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, což lze řešit zvýšením hodnoty jeho proudu. Tím dosáhneme stejného poměru signálu k šumu jako ve vakuu.

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. Všechny tři komory jsou odděleny aperturní clonou PLA1, přičemž vzdálenost mezi ní a povrchem vzorku je nutné pokud možno co nejvíce minimalizovat. Na obrázku 4.6 je zjednodušeně znázorněn pohyb elektronového svazku oběma komorami.



Obr. 4.6 Rozptyl svazku primárních elektronů.

Rozptyl svazku primárních elektronů zde charakterizují úhly α v komoře diferenciálního čerpání a β komoře vzorku.

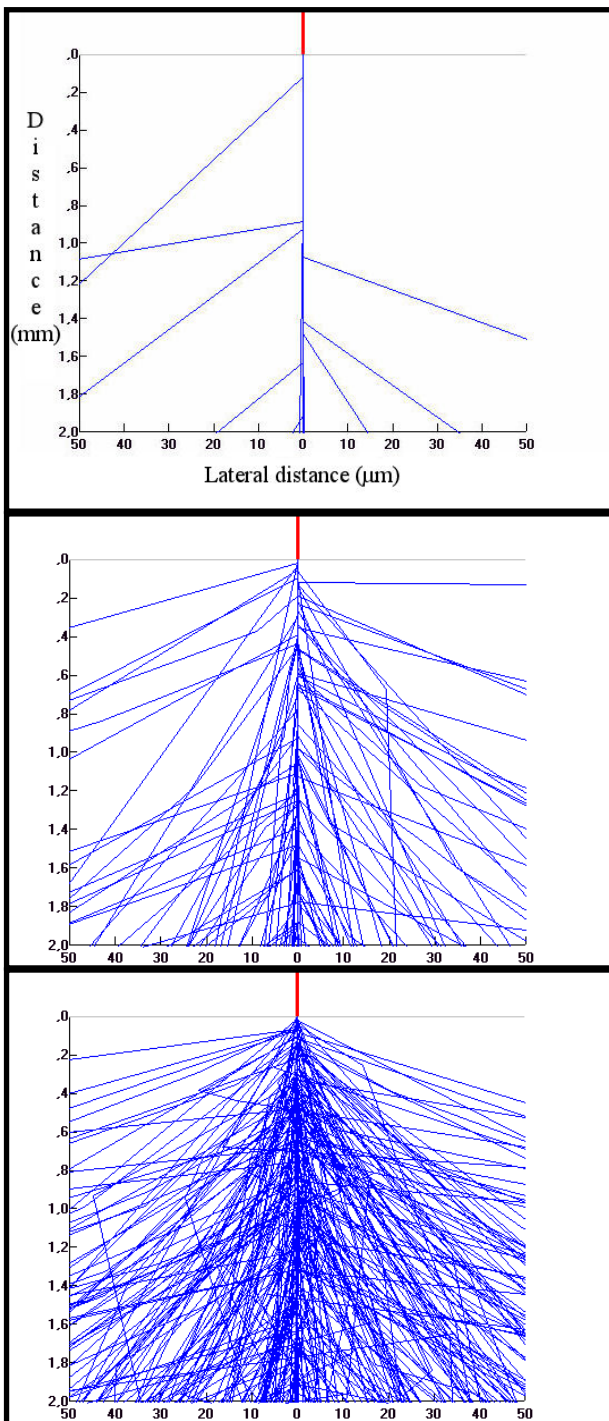
4.7 Rozptylové režimy svazku primárních elektronů

Závislost rozptylu na počtu interakci elektronů primárního svazku šířících se plynným prostředím je určována průměrným počtem srážek připadajících na jeden elektron, značena M . Od této veličiny, lze odvodit tři rozptylové režimy, viz obr. 4.7.

Režim charakterizovaný velikosti M , kde M nabývá hodnot v rozmezí od 0 do 0,05 je režimem minimálního rozptylu. Rovná-li se M hodnotě 0,05 je procentuelní vyjádření počtu elektronů majících při průchodu prostředím s vyšším tlakem kolizi rovno 5. Tento režim je využíván především při zkoumání látek běžnou metodou SEM, při níž se hodnota M blíží velmi nule, tedy účinky rozptylu na svazek jsou minimální.

Režim úplného rozptylu, na obr. 4.7, je charakterizován hodnotou M větší než 3. Zde se elektrony procházející plynným prostředím sráží s atomy a molekulami z více než 95%, což je z hlediska zobrazení v mikroskopu nevyhovující.

Kompromisním režimem je režim částečného rozptylu, na obr.4.7 uprostřed, pro nějž jsou charakteristické hodnoty M v rozmezí od 0,05 do 3.



Minimální rozptyl

50 Pa

Rozptyl < 5%

$M < 0.05$

Částečné rozptylování

1000 Pa

Rozptyl 5% - 95%

M od 0.05 do 3

Úplný rozptyl

3000 Pa

Rozptyl > 95%

$M > 3$

Obr. 4.7 Tři základní rozptylové režimy svazku primárních elektronů.

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

5 Počítačové systémy využívané při řešení

5.1 SolidWorks

Model mikroskopu byl vytvořen v programu SolidWorks. Jedná se o 3D CAD systém umožňující pokročilé modelování v 3D, práci s velkými sestavami a automatické generování výrobních výkresů.

V SolidWorks jsou k dispozici intuitivní a lehce zvládnutelné modelovací nástroje. Modely lze 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 vícetělesovém prostředí, včetně booleovských operací, konturových skic, posouvání, kopírování atd. [8]

SolidWorks disponuje velkým výkonem pro rychlou a hladkou práci 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.

Rychlý návrh a editaci sestavy umožňují nástroje pro zrcadlení komponentů, vytváření polí z polí komponentů, nahrazování dílů podsestavami a naopak, rozhozené pohledy či diagnostikování vazeb.

Pro tvarově náročné úlohy jsou připraveny 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.

Program SolidWorks běžně funguje na novějších počítačích, není tedy třeba kupovat žádné drahé vybavení. I na běžném počítači program umožňuje solidní výkon.

V SolidWorks jsou k dispozici nástroje pro kinematiku: dynamickou i statickou detekci kolizí, dynamickou detekci vůlí, kontaktní přenos pohybu, kinematické vazby či celé pohybové simulace.

SolidWorks umožňuje neustálou aktualizaci všech dílů a sestav a aktualizace je promítnuta do všech dalších souvisejících modelů, sestav a výkresy. To ulehčuje práci a odstraňuje lidské chyby.

SolidWorks Simulation jednoduše pomáhá zlepšit kvalitu navrhovaných produktů tak, že ukáže, jak se bude model chovat při reálném zatížení. Tím umožňuje přejít od jednoduchých ručních výpočtů k realistickým simulacím a ověřování různých konstrukčních variant návrhu bez nutnosti být i jen na chvíli opustit prostředí SolidWorks.

Program se řadí mezi nejlepší systémy pro návrh a vývoj veškerých zařízení.

5.2 Flow Simulation

Jedná se o nadstavbu (doplněk) systému SolidWorks. Dříve se nazýval tento modul COSMOSFloWorks, nyní po sloučení obou firem Flow Simulation a je přímo součástí systému SolidWorks. Modul umožňuje simulovat proudění plynů, kapalin a přenos tepla. Tento doplněk je jednoduchý na obsluhu a vyžaduje jen minimální znalosti složité problematiky proudění tekutin.

Narozdíl od konkurenčních produktů Flow Simulation kombinuje velmi pokročilou funkcionalitu s přesností a snadným používáním. Plně integrovaný do SolidWorks kombinuje vysokou úroveň funkcionality, přesnosti výpočtu s rychlým a snadným ovládáním. [8]

Protože je velice flexibilní, lze 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.

Možnosti programu [9]:

- Nestlačitelné a stlačitelné, podzvukové i nadzvukové proudění kapalin a plynů.
- Laminární a turbulentní proudění podle modelu.
- Vnitřní a vnější proudění.
- Přenos tepla kondukcí, konvekcí (přirozená, nucená) a radiací.
- Stacionární a nestacionární proudění.
- Zahrnutí drsnosti stěn.
- Nahrazení části modelů porézními médii.
- Model rotace MRF.
- Neneutronovské kapaliny jako je např. krev nebo pasta.
- Zooming – detailní výpočet vybrané části s okrajovými podmínkami určenými výpočtem na zjednodušeném komplexním modelu.

A další.

6 Analýza komory diferenciálního čerpání

V následující kapitole bude problematika komory diferenciálního čerpání řešena pomocí počítačových podpor, především systému SolidWorks Flow Simulation. Analýze bude podrobena otevřená, uzavřená i kuželová varianta komory diferenciálního čerpání.

6.1 Zadání podmínek ve Flow Simulation

6.1.1 Nastavení sítě

System u symetrických tvarů, jako je uváděný případ diferenciální komory, umožňuje nastavit výpočtovou síť pouze pro polovinu symetrické oblasti a výpočet tak tvořit symetricky za poloviční výpočtový čas.

Při vytváření sítě pro komoru diferenciálního čerpání je nejprve nastaven počet buněk základní sítě v osách X, Y a Z a následně je provedeno zjemnění oblastí, kde lze očekávat složitější podmínky proudění. Jak je vidět (obr. 6.1, 6.2 a 6.3), v celé oblasti výpočtu otevřené varianty komory diferenciálního čerpání (u dalších variant je to zcela analogické) je velikost buněk nastavena podle základního nastavení buněk (tab. 6.1) s ohledem na rozměry výpočtové oblasti, ale ve spodní kuželové oblasti, kudy prochází primární svazek elektronů a očekávají se také náročnější podmínky proudění, je dvojnásobně jemnější nastavení (obr. 6.1, 6.2 a 6.3):

Tabulka 6.1 Základní nastavení velikosti sítě

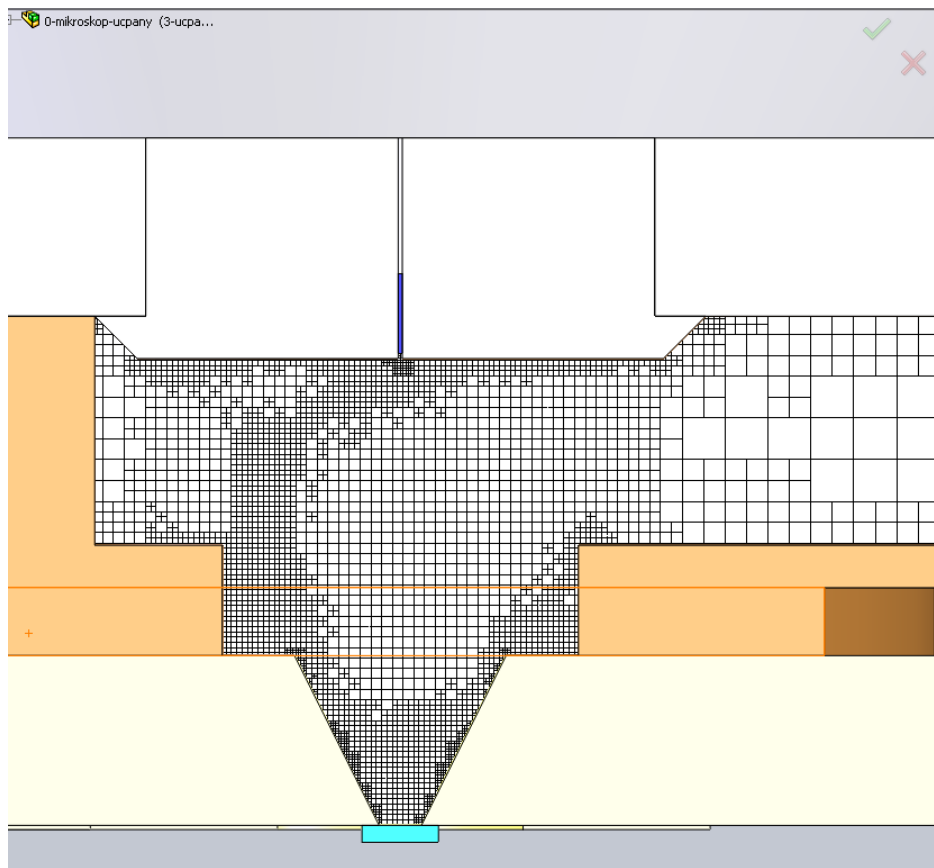
	X	Y	Z	ROZMĚR X	ROZMĚR Y	ROZMĚR Z
KOMORA UZAVŘENÁ	40	13	30	161.9 mm	35 mm	118 mm
KOMORA OTEVŘENÁ	60	25	30	224.4 mm	66.1 mm	118 mm
KOMORA KUŽELOVÁ	60	25	30	227.5 mm	66.1 mm	118 mm

V nastavení sítě se také určuje jak má být nastavena síť v oblasti zúžení, kanálků, ostřejších přechodů, oblasti zakřivených ploch a další prvky, viz. tab. 6.2.

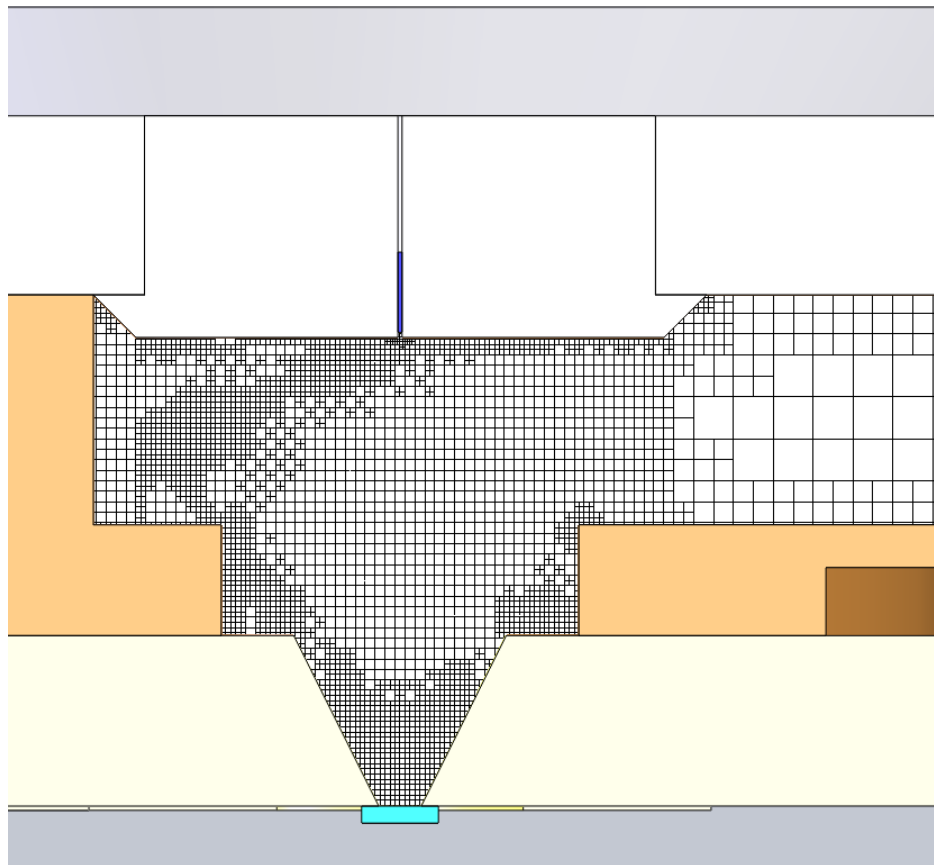
Tabulka 6.2 Doplnující nastavení sítě	
Solid/Fluid Interface (Oblast přechodu těles a tekutin)	
Small solid features refinement level (Úroveň zjemnění v oblasti malých částic)	2
Curvature refinement level (Úroveň zjemnění v oblasti zakřivených ploch)	1
Curvature refinement criterion (Kriterium zjemnění v oblasti zakřivených ploch)	0.157878012
Tolerance refinement level (Úroveň tolerance zjemnění)	1
Tolerance refinement criterion (Kriterium tolerance zjemnění)	1.265e-005 m
Narrow channels (oblast úzkých kanálků)	
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

System dále umožňuje i nastavení tzv. adaptivního zjemňování, kdy sám během výpočtu provede doplňující zjemňování oblasti podle předem nastavených kritérií – (viz. tab. 6.3).

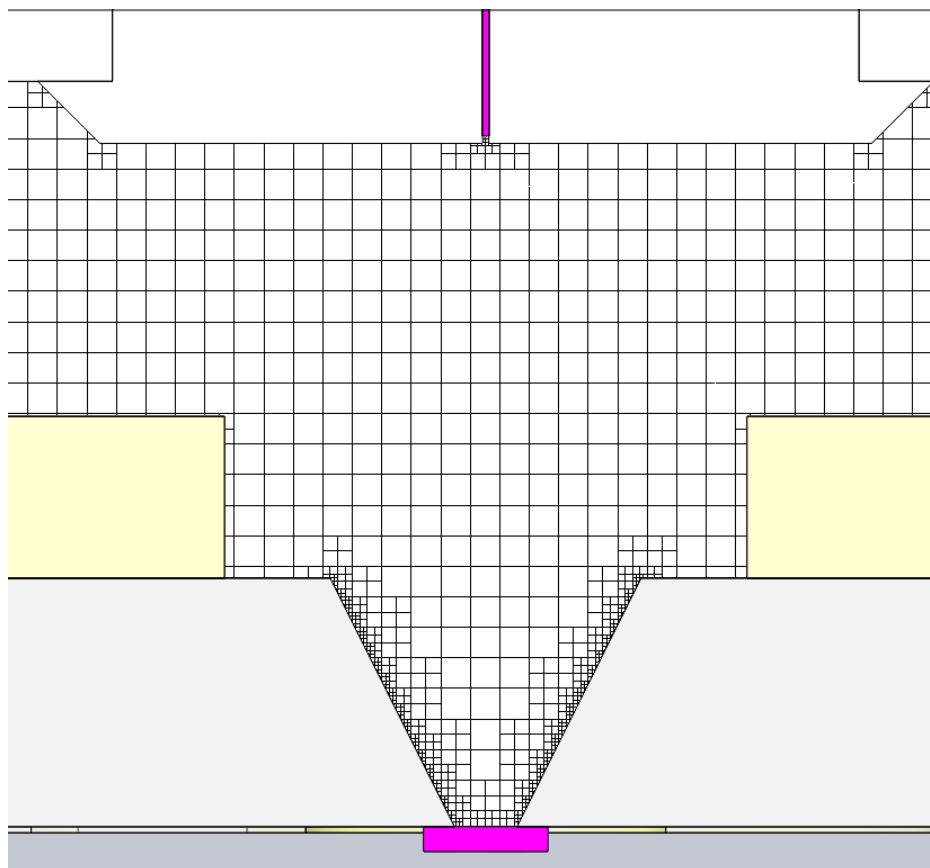
Tabulka 6.3 Nastavení adaptivního zjemnění sítě	
Refinement level (Úroveň zjemnění)	1
Refinement criterion (Kriterium zjemnění)	1.5
Unrefinement criterion (Kriterium rušení zjemnění)	0.15
Adaptive refinement in fluid (Úroveň adaptivního zjemnění v oblasti proudění)	On
Use global parameter variation (Využití globálního parametru kolísání)	Off
Approximate maximum cells (Maximální počet buněk)	1650000
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. 6.1 Ukázka nastavení sítě u uzavřené varianty.



Obr. 6.2 Ukázka nastavení sítě u otevřené varianty.

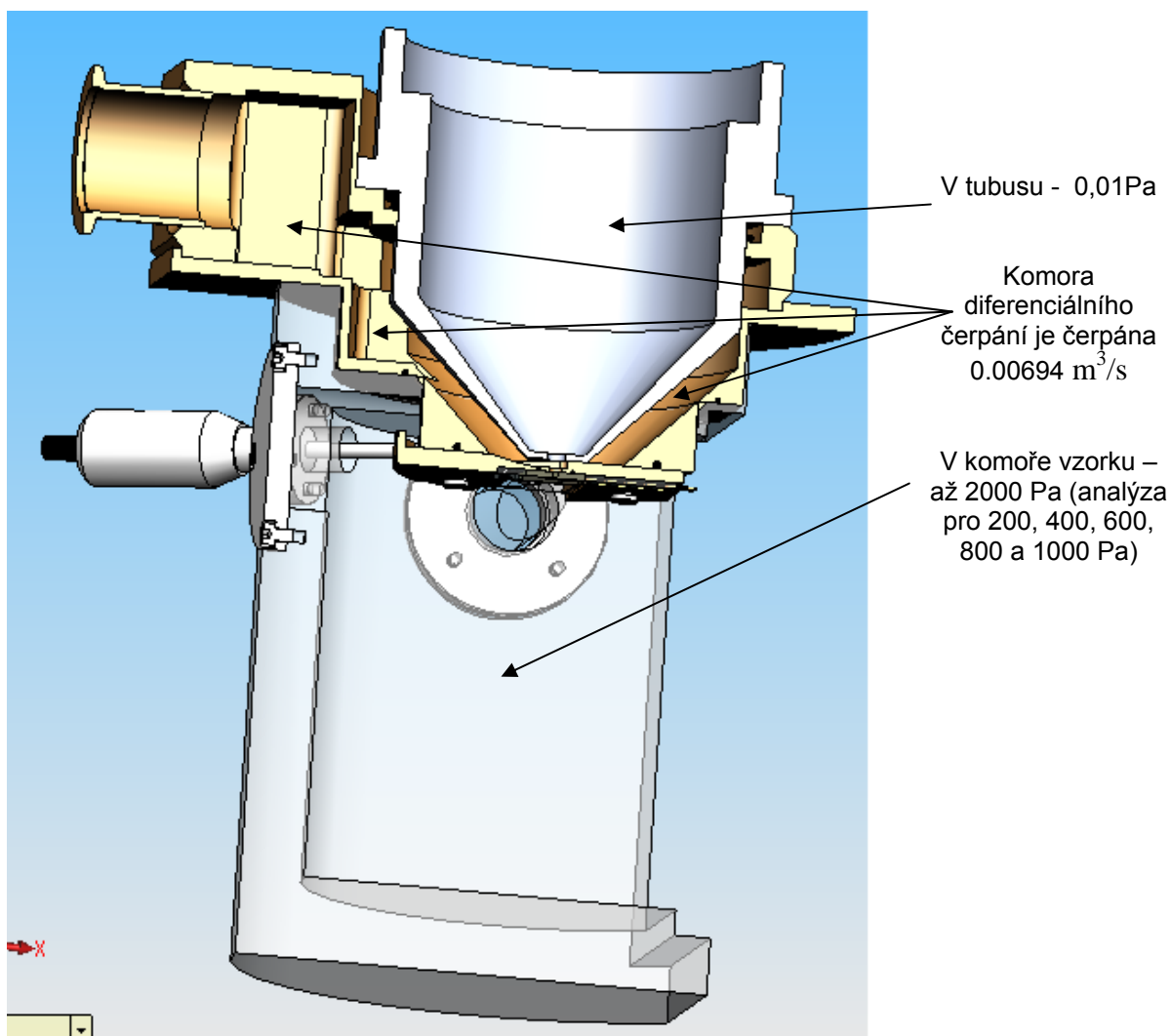


Obr. 6.3 Ukázka nastavení sítě u kuželové varianty.

6.1.2 Nastavení okrajových podmínek

Nastavení okrajových podmínek vyplývá z kapitoly 3 popisující podmínky a funkci komory. Z toho vyplývá, že okrajové podmínky limitují otvory vstupující do komory diferenciálního čerpání. Do komory diferenciálního čerpání vedou tři otvory:

- **Přechod tubusu do komory diferenciálního čerpání**, který tvoří clonka PLA2 (obr.6.5). V tubusu je tlak 0.01 Pa.
- **Přechod komory vzorku do komory diferenciálního čerpání**, který tvoří clonka PLA1 (obr. 6.5). V komoře vzorku je tlak různý (dle analýzy – 200, 400, 600, 800 nebo 1000 Pa).
- **Hrdlo – čerpací otvor**, kterým je pomocí rotační olejové vývěvy Lavat RV 100/1 čerpán prostor čerpací rychlostí $0.00694 \text{ m}^3/\text{s}$.



Obr. 6.4 Hodnoty ze kterých vychází nastavení okrajových podmínek

Z uvedeného tedy vyplývá toto nastavení okrajových podmínek:

V oblasti přechodu objektivu do komory diferenciálního čerpání byla nastavena okrajová podmínka – **statický tlak 0.01 Pa**, která vyplývá z existujícího tlaku v objektivu.

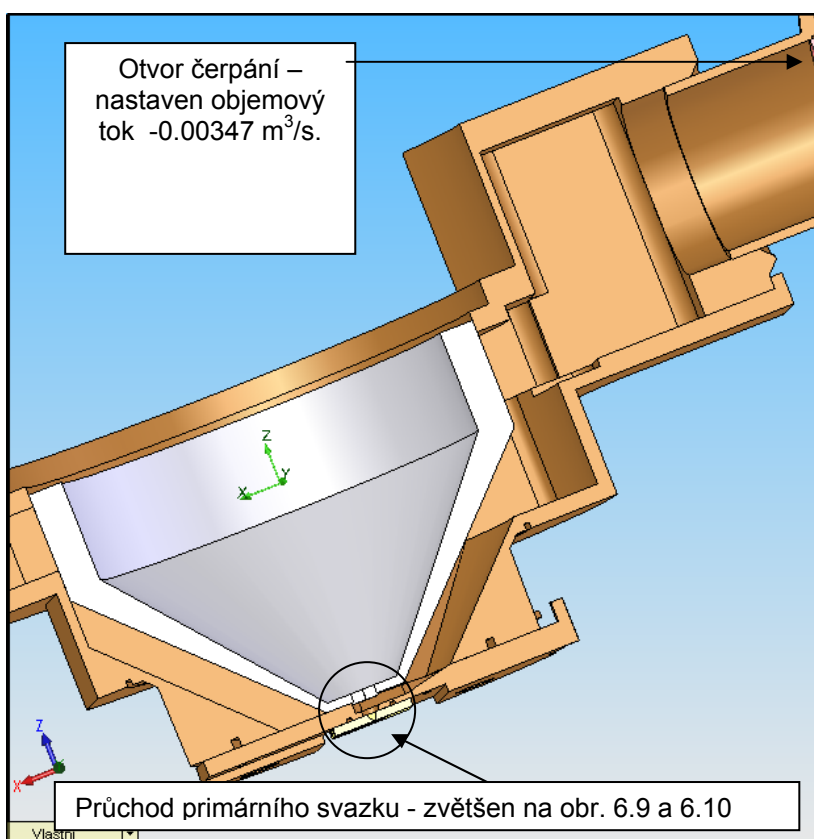
V oblasti přechodu komory vzorku do komory diferenciálního čerpání byla nastavena okrajová podmínka – **statický tlak dle analýzy – 200, 400, 600, 800 nebo 1000 Pa**), která vyplývá z existujícího tlaku v komoře vzorku.

V oblasti hrdla – čerpacího otvoru byla nastavena podle použité vývěvy okrajová podmínka **objemového toku směrem z komory diferenciálního čerpání 0.00347 m³/s**. Ve skutečnosti, jak bylo uvedeno, je tok dvojnásobný, ale vzhledem k uvedené výhodě systému, kdy se počítá symetrická oblast, se proto nastavuje tok s poloviční hodnotou.

Čerpání v praxi probíhá až do chvíle dosažení okrajových podmínek.

Okrajové podmínky se zadávají na uměle vytvořené plochy v místech otvorů, které netvoří zaslepení otvorů, ale slouží pouze pro umístění okrajových podmínek. Na existujících otvorech jsou umístěny tyto plošky pro umístění okrajových podmínek:

- Hrdlo čerpání je na obr. 6.5 označeno červeně.
- Přejechod tubusu do komory diferenciálního čerpání, který tvoří clonka PLA2 (obr. 6.9), je označeno modře.
- Přejechod komory vzorku do komory diferenciálního čerpání, který tvoří clonka PLA1 (obr.6.9), je označeno zeleně.



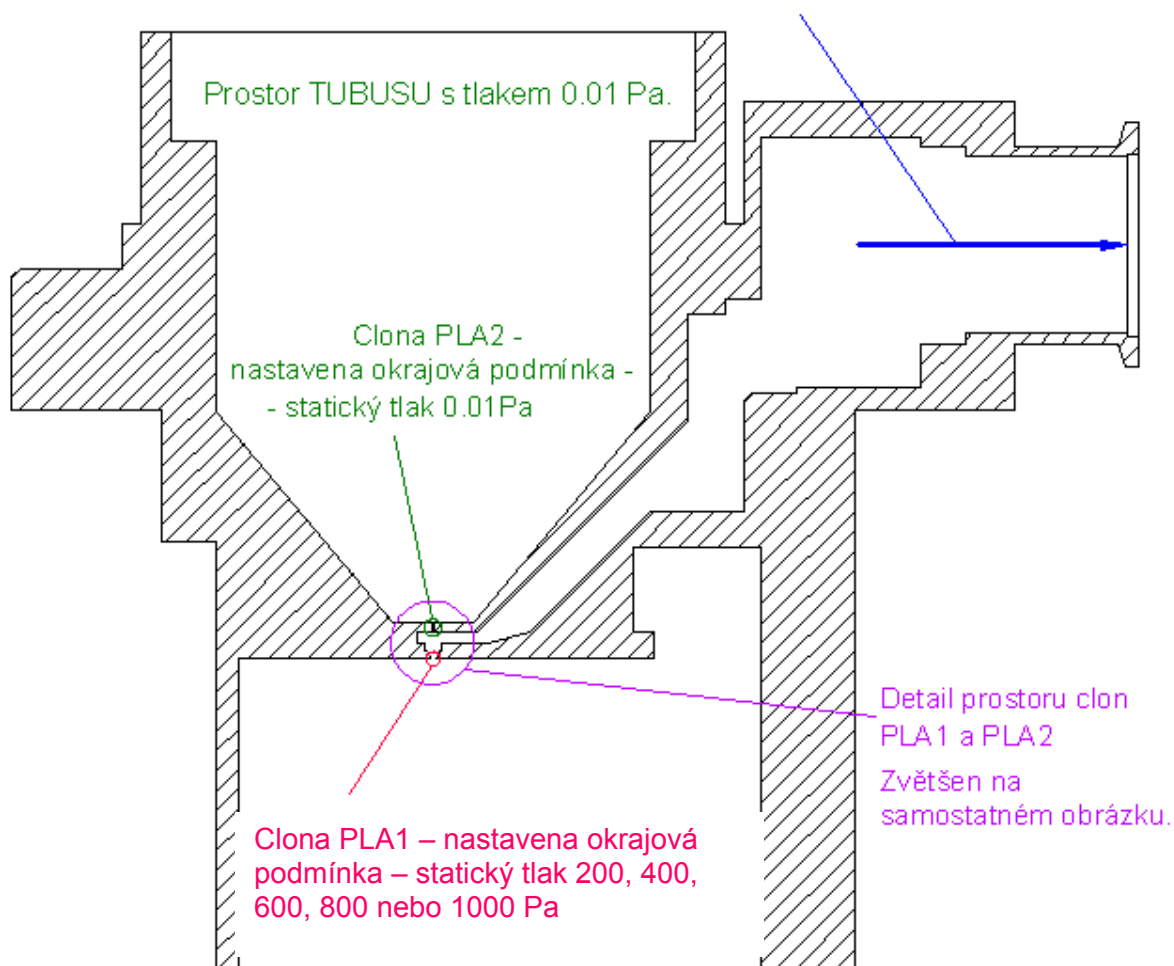
Obr. 6.5 Nastavení okrajové podmínky na hrdle čerpání

Na dalších obrázcích (obr. 6.6, 6.7, 6.8) jsou uvedena schémata všech tří variant s umístěním okrajových podmínek.

U všech variant je toto umístění stejné, odlišný je pouze čerpaný tvar komory.

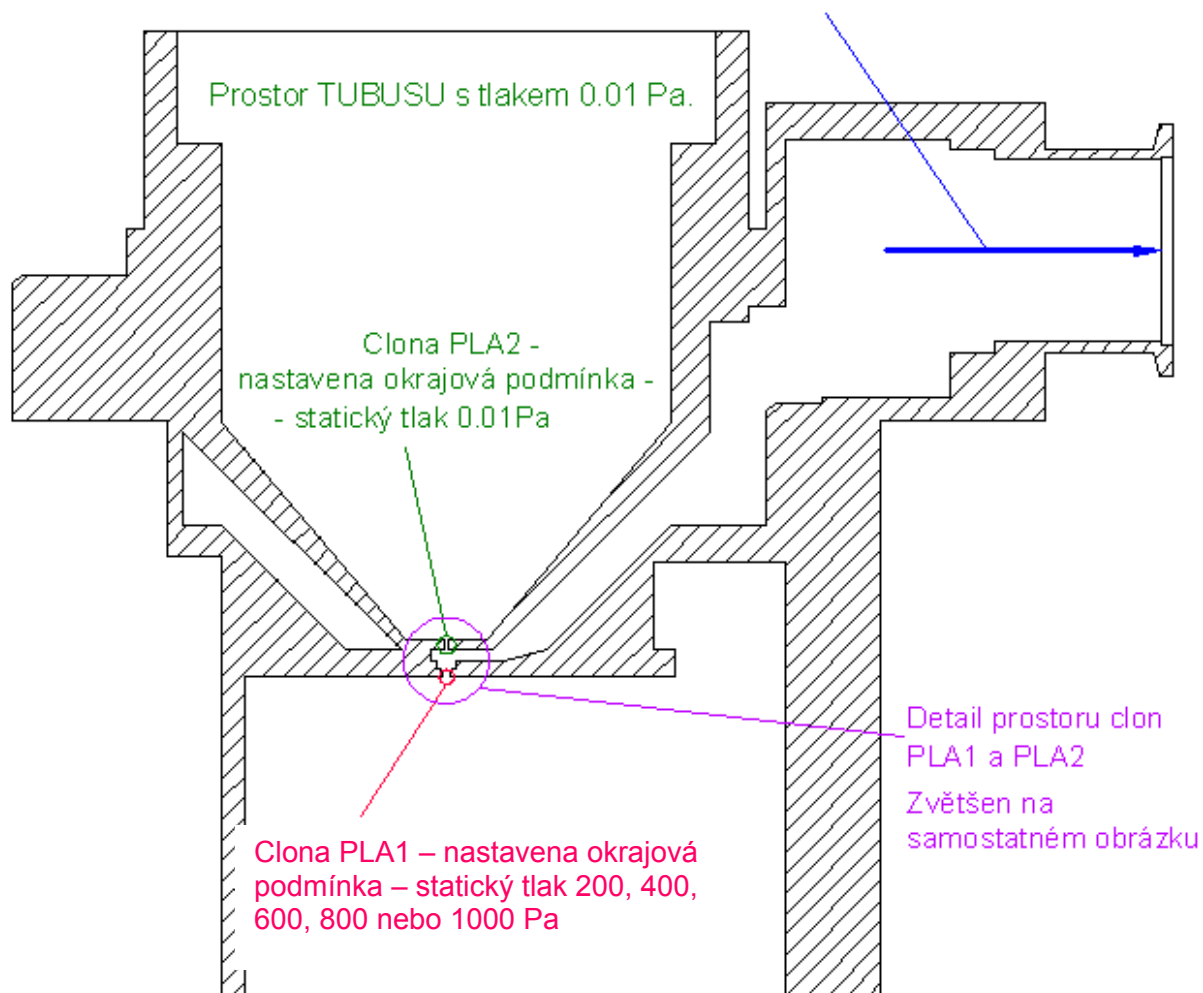
Na obr. 6.9 a 6.10 je oblast průchodu primárního svazku komorou diferenciálního čerpání mezi clonkami PLA1 a PLA2 zvětšen.

OTVOR ČERPÁNÍ prostoru komory diferenciálního čerpání.
Jde o otvor mezi clonkami PLA1 a PLA2.
Na hrdle okrajová podmínka objemový tok $0.00347 \text{ m}^3/\text{s}$.



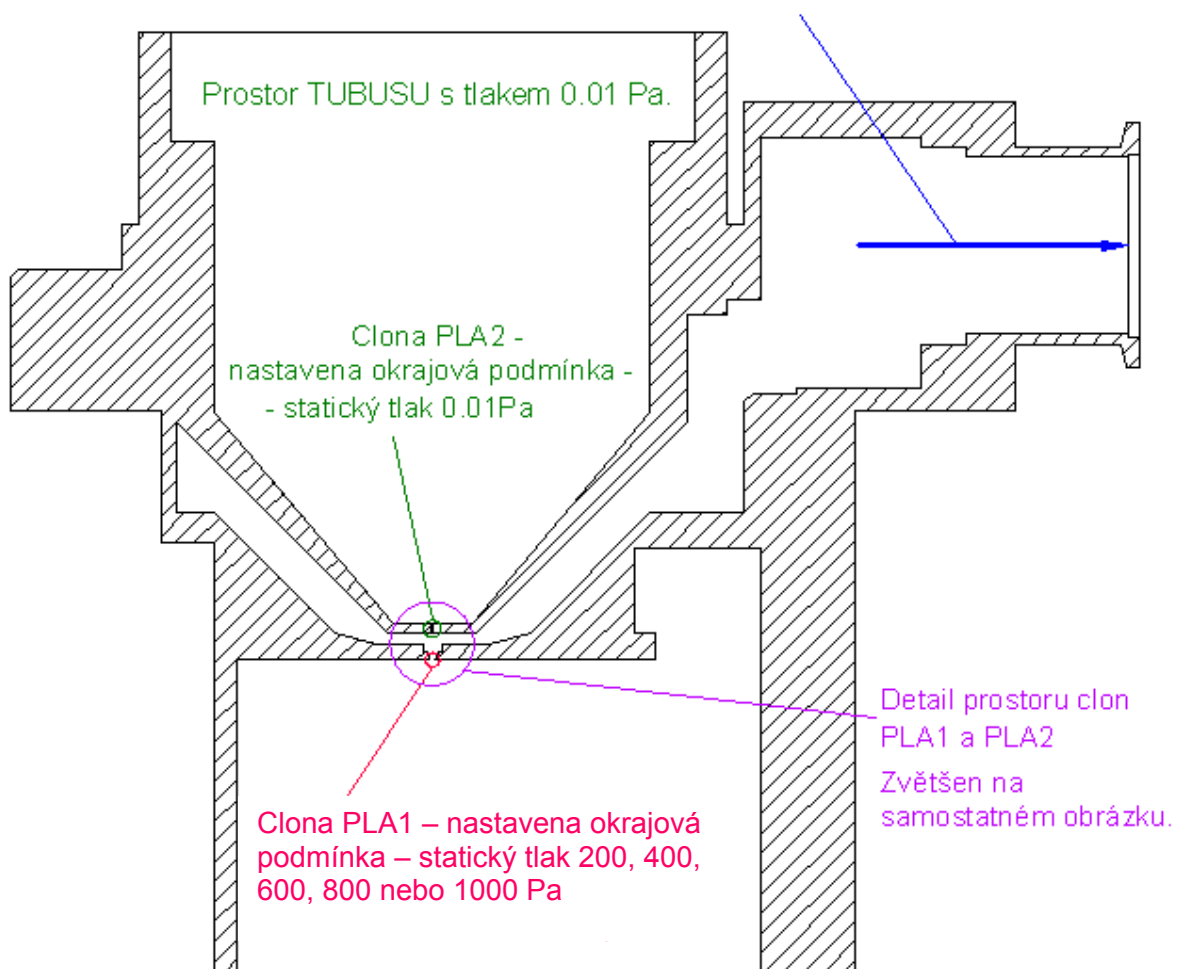
Obr. 6.6 Schéma uzavřené varianty.

OTVOR ČERPÁNÍ prostoru komory diferenciálního čerpání.
Jde o otvor mezi clonkami PLA1 a PLA2.
Na hrdle okrajová podmínka objemový tok $0.00347 \text{ m}^3/\text{s}$.

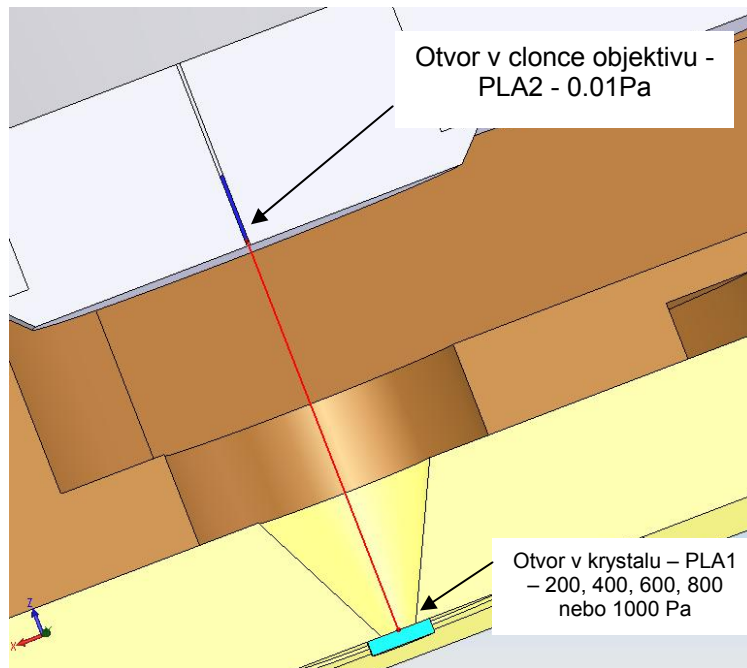


Obr. 6.7 Schéma otevřené varianty.

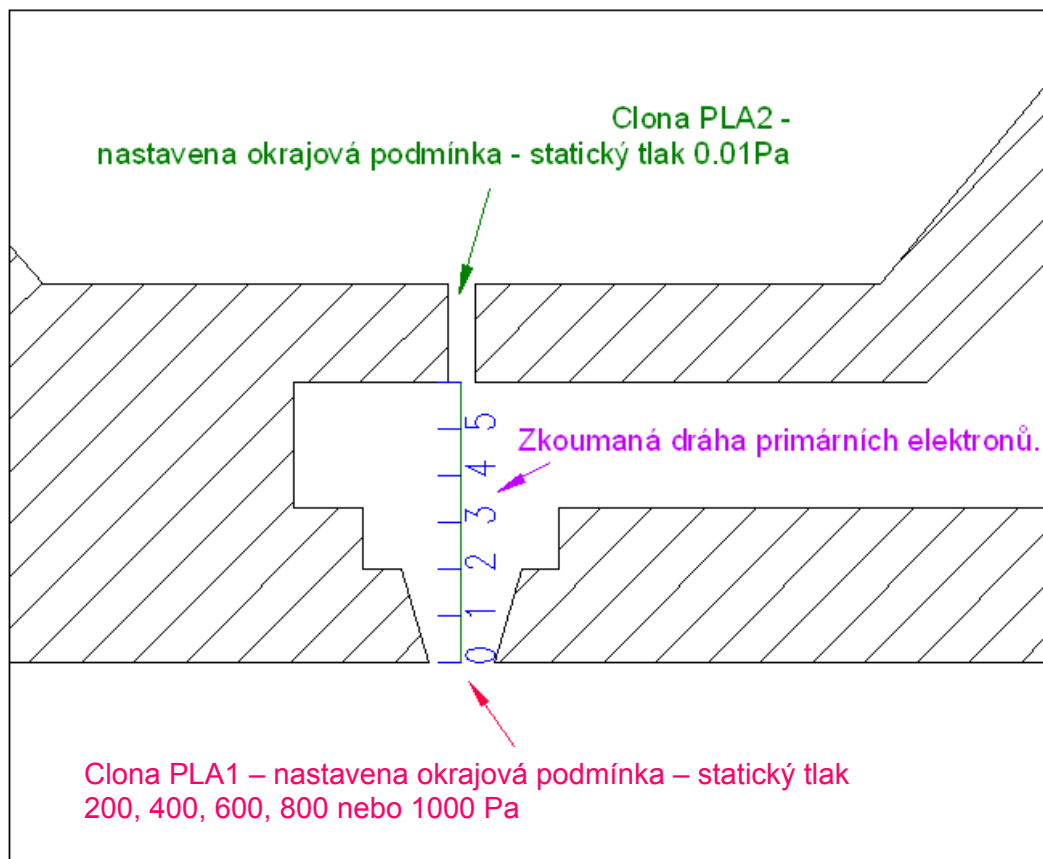
OTVOR ČERPÁNÍ prostoru komory diferenciálního čerpání.
Jde o otvor mezi clonkami PLA1 a PLA2.
Na hrdle okrajová podmínka objemový tok $0.00347 \text{ m}^3/\text{s}$.



Obr. 6.8 Schéma kuželové varianty.



Obr. 6.9 Dráha primárního svazku elektronů při průchodu KDČ.



Obr. 6.10 Schéma dráhy primárního svazku elektronů.

Cílové veličiny výpočtu

Na závěr je třeba v systému Cosmos Flow Simulation nastavit veličiny výpočtu, které má systém výpočtem vyhodnotit. V uvedeném případě je sledován:

- průběh statického tlaku v komoře,
- průběh rychlosti toku média v komoře, včetně Machova čísla,
- průběh hmotnostního toku na otvorech komory, včetně čerpacího otvoru,
- průběh teploty média,
- průběh hustoty média.

Tyto veličiny jsou v systému nastaveny jako cíle vlastního výpočtu.

7 Zpracování výsledků analýzy

Systém SolidWorks Flow Simulation umožňuje zpracovávat výsledky mnoha způsoby. V uvedeném případě jsou využity především výsledky, podle kterých je možné určit vlivy tlaku v komoře vzorku u všech třech variant komory diferenciálního čerpání na průběh tlaku na dráze primárního svazku elektronů v této komoře.

7.1 Dráha primárního svazku elektronů

Analýzujeme průběh tlaku na dráze primárního svazku elektronů při průchodu komorou diferenciálního čerpání (na obr. 6.7 vyznačena červenou přímkou). Příмка byla tvořena směrem od otvoru hrdla vstupujícího do komory vzorku směrem k otvoru vstupujícího do tubusu. To znamená, že na dále uvedených grafech hodnota délky nula začíná u komory vzorku a zvyšující hodnota směřuje směrem k tubusu (viz. obr. 6.8).

Na níže uvedených grafech jsou vyneseny závislosti, kde na ose X je vždy vynesena délka přímkou zobrazující dráhu sekundárních elektronů a na ose Y průběh zkoumaných veličin.

Výsledky tohoto měření systém vynáší do tabulkových podob. Tyto výsledky jsou z důvodu přehlednosti práce uvedeny v Příloze. V následujících kapitolách je uvedeno pouze vyhodnocení výsledků.

7.2 Grafický výstup

V první řadě můžeme sledovat průběh tlaků v komoře diferenciálního čerpání – především v místě průchodu primárního svazku – na grafickém výstupu. Tento výstup je částečně uveden (pro tlak 200 Pa) zde na obrázcích 7.1 a 7.6 a podrobněji na obrázcích 10.1 - 10.30 v Příloze. Tato grafická znázornění slouží pro první orientaci.

I když především sledujeme průběh hodnoty tlaků, pro popis proudění jsou nutné i ostatní veličiny. Proto např. na obr. 7.4 je znázorněn průběh rychlostí čerpaného plynu v komoře.

Vysvětlivky zkratk uváděných níže:

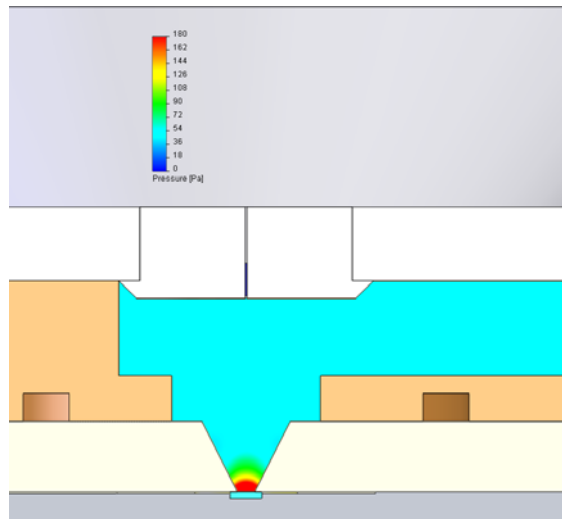
UV ... uzavřená varianta

KV ... kuželová varianta

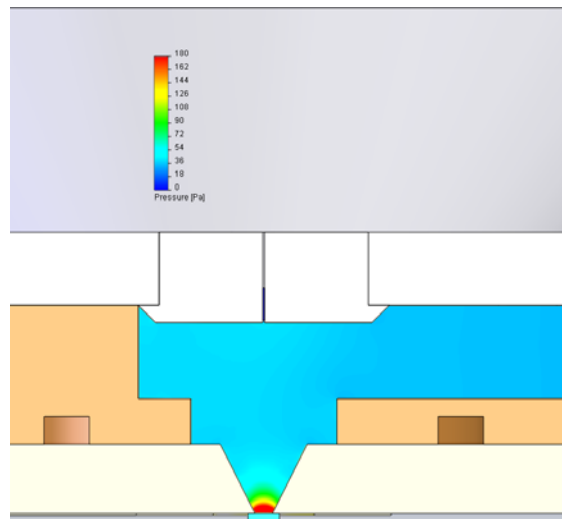
OV ... otevřená varianta

Číslo ... značí velikost tlaku v komoře vzorku

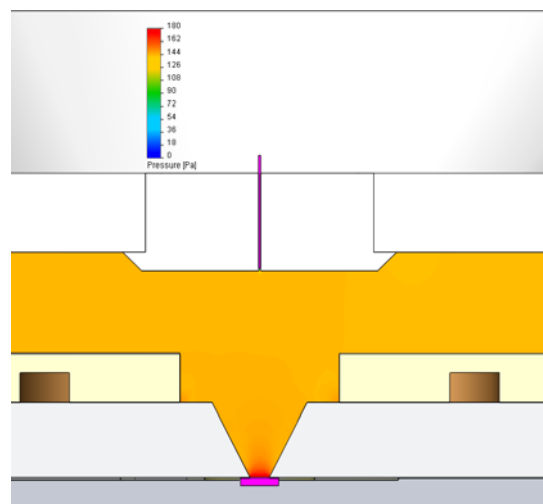
Např.: UV 600 ~ Uzavřená varianta s tlakem v komoře vzorku 600 Pa



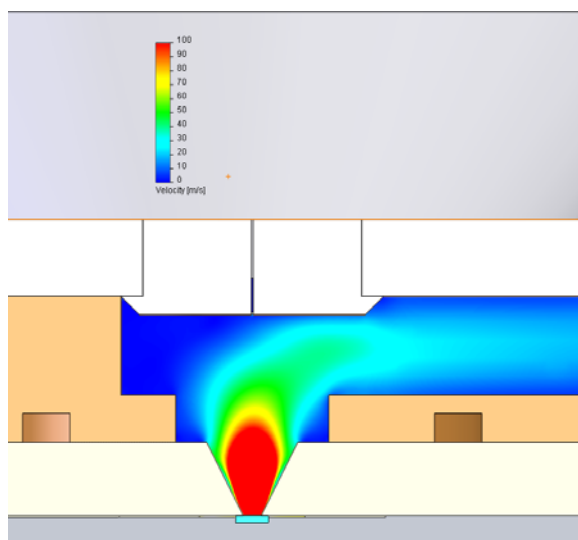
Obr. 7.1 Grafické výsledky – průběh tlaku OV 200



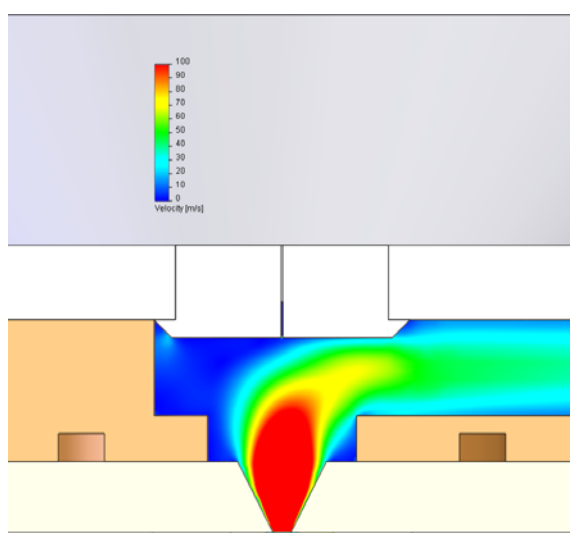
Obr. 7.2 Grafické výsledky – průběh tlaku UV 200



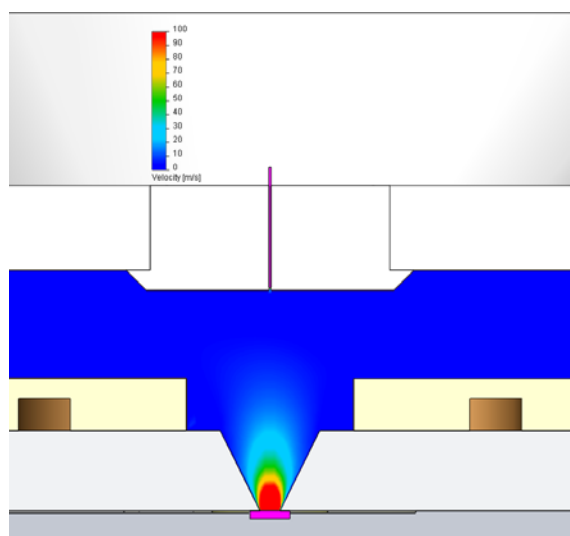
Obr. 7.3 Grafické výsledky – průběh tlaku KV 200



Obr. 7.4 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání OV 200



Obr. 7.5 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání UV 200



Obr. 7.6 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání KV 200

7.3 Zpracování výsledků výpočtů

Jak bylo uvedeno, systém umožňuje vytvořit křivku – v tomto případě přímku – ve sledované oblasti a následně vyčíst a vynést do grafu požadované hodnoty. Především nás zajímá závislost průběhu statického tlaku a hustoty plynu podél načrtnuté křivky. Pro úplnost je třeba připomenout, že křivka byla tvořena směrem od otvoru mezi komorou diferenciálního čerpání (od clonky PLA1) a komorou vzorku směrem k tubusu (ke clonce PLA2) (obr. 6.7 a obr. 6.8). To znamená, že hodnota délky nula začíná u komory vzorku (u clonky PLA1) a zvyšující hodnota směřuje k tubusu (ke clonce PLA2).

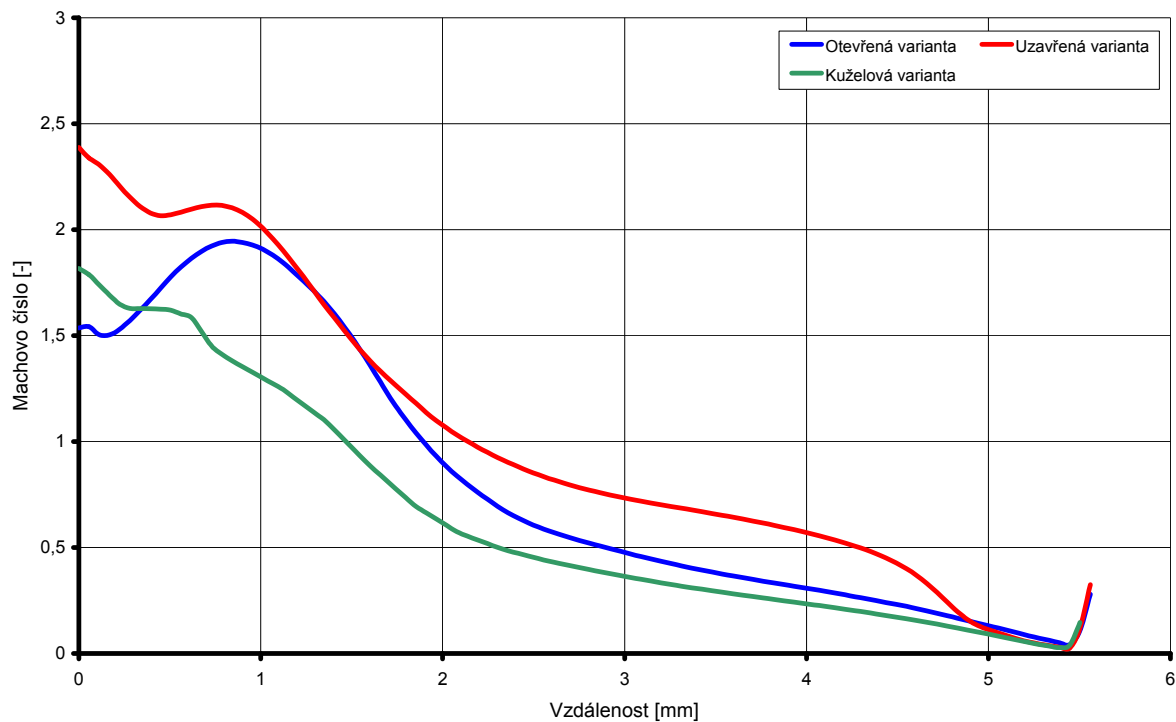
Z prostoru komory vzorku (tlak 200, 400, 600, 800 nebo 1000 Pa) je nasáván vzduch přes clonku PLA1 do prostoru komory diferenciálního čerpání, ve které je tlak cca 30 Pa udržován pomocí rotační vývěvy. Část vzduchu z této samostatně čerpané komory pak vytéká přes clonku PLA2 do tubusu odsávaného turbomolekulární vývěvou, ve kterém je udržován tlak 0,01 Pa.

7.3.1 Charakteristika průběhu rychlosti plynu v čerpané komoře

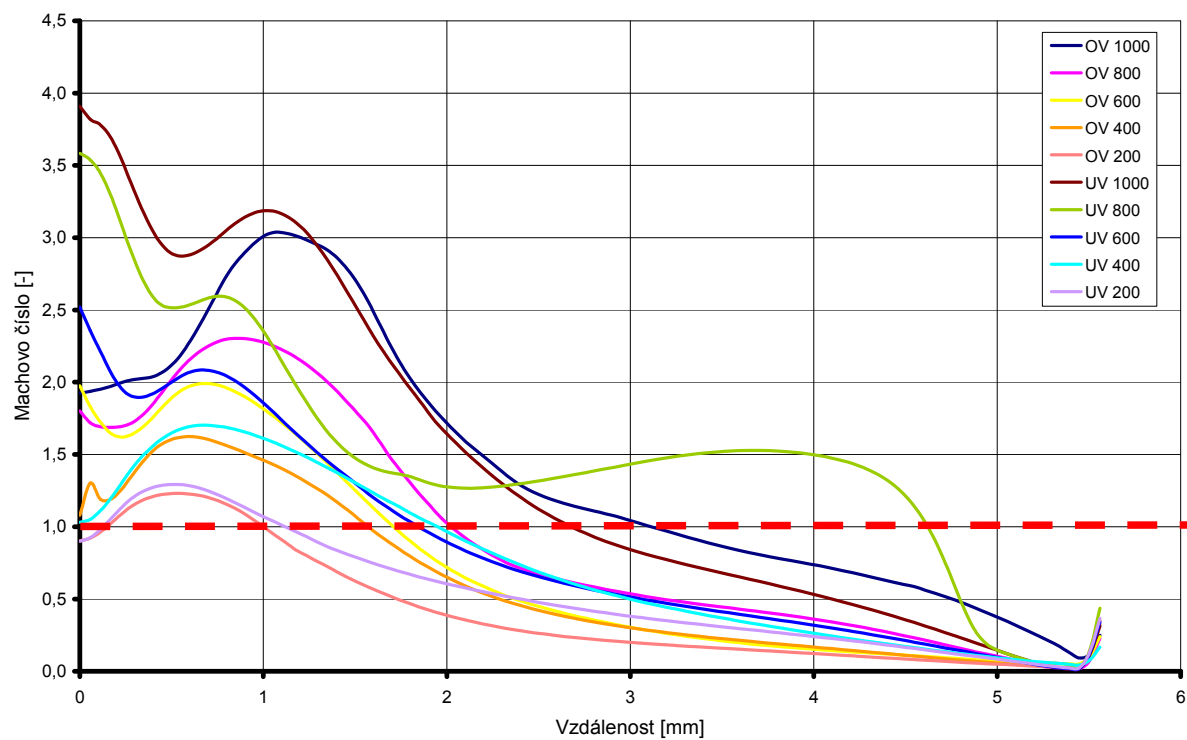
Ve clonce PLA1 je dosaženo nadkritického (nadzvukového) stavu proudění⁴. Za tímto hrdlem dochází v komoře k nadzvukovému proudu plynu až do polohy 1 – 3 mm (dle varianty a tlaku v komoře vzorku - obr. 7.8 a obr. 7.9), kde přechází paprsek do podzvukového proudění. V clonce PLA2 je dosaženo podzvukového stavu proudění.

Z grafu (Obr. 7.7) je vidět, že u uzavřené varianty je dosaženo nejvyšší rychlosti proudění a tedy i odsávání. Nadzvukové proudění je zde dosaženo až do vzdálenosti cca 2,3 mm od clonky PLA1. Z tohoto hlediska se jeví uzavřená varianta jako nejvhodnější.

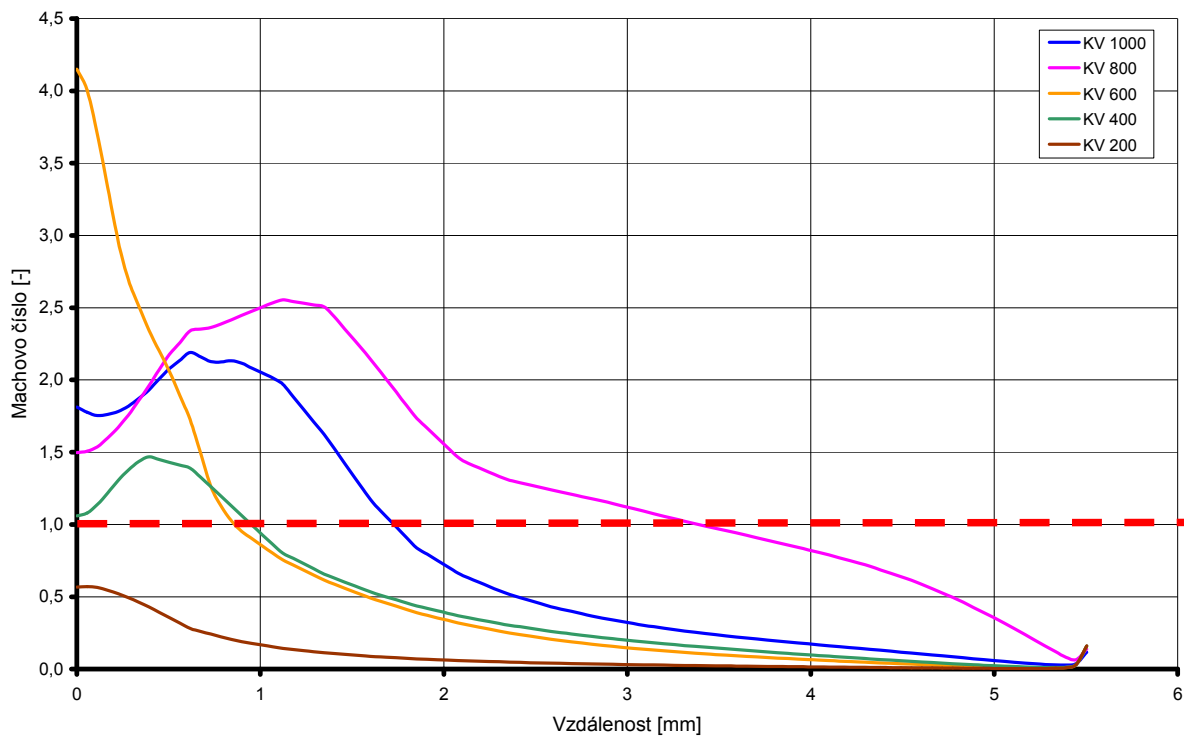
⁴ Kritériem pro určení stavu proudění je rychlost 1 Mach. Při této rychlosti nastává kritický stav proudění. Při hodnotě menší, jak 1 Mach, se jedná o podkritické (podzvukové) proudění. Při vyšší hodnotě, jak 1 Mach, je stav proudění nadkritický (nadzvukový).



Obr. 7.7 Rozložení aritmetických průměrů Machova čísla na křivce všech variant.



Obr. 7.8 Rozložení Machova čísla na křivce u uzavřené a otevřené varianty.



Obr. 7.9 Rozložení Machova čísla na křivce u kuželové varianty.

Vysvětlivky k legendám:

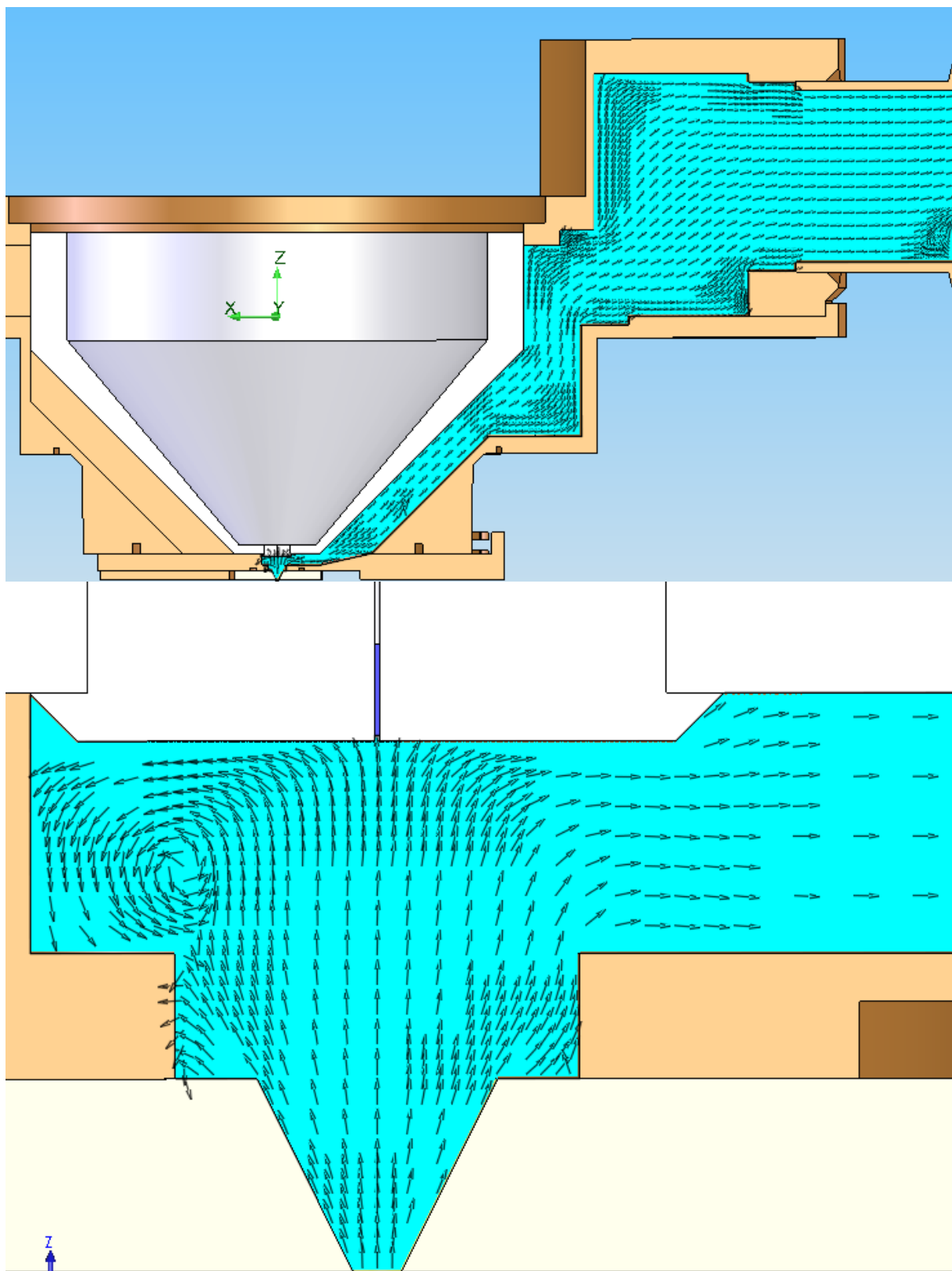
UV ... uzavřená varianta

KV ... kuželová varianta

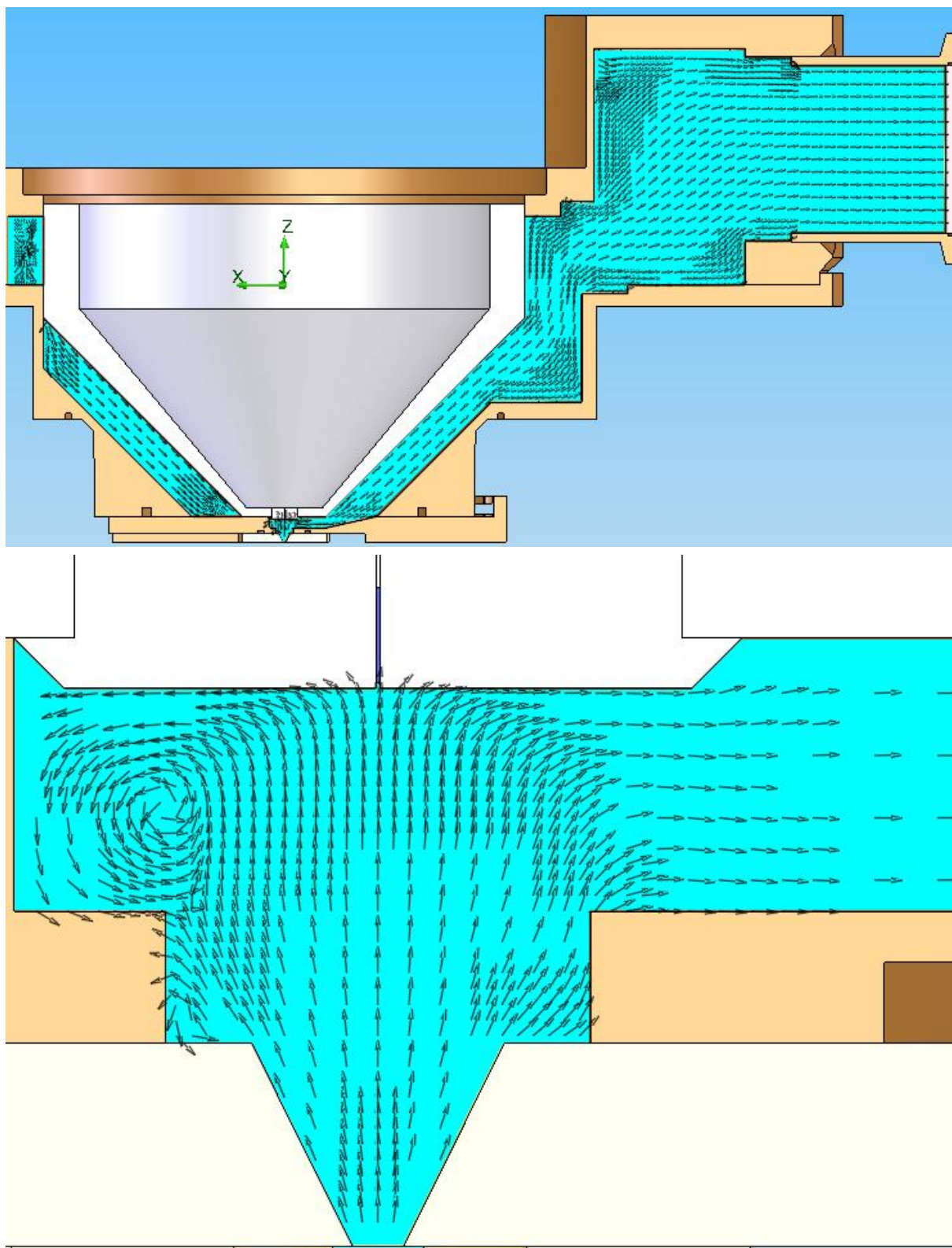
OV ... otevřená varianta

Číslo ... značí velikost tlaku v komoře vzorku

Např.: UV 600 – Uzavřená varianta s tlakem v komoře vzorku 600 Pa



Obr. 7.10 Grafické zobrazení vektorů rychlosti proudění – uzavřená varianta.



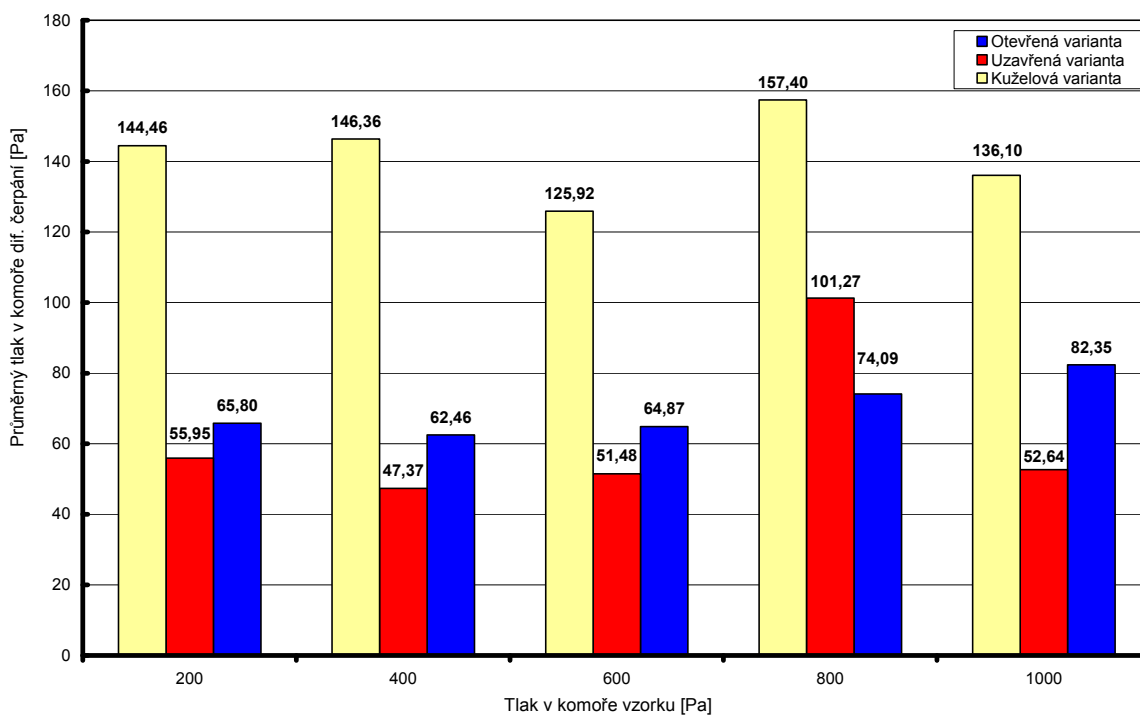
Obr. 7.11 Grafické zobrazení vektorů rychlosti proudění – otevřená varianta.

7.3.2 Srážky molekul, střední volná dráha

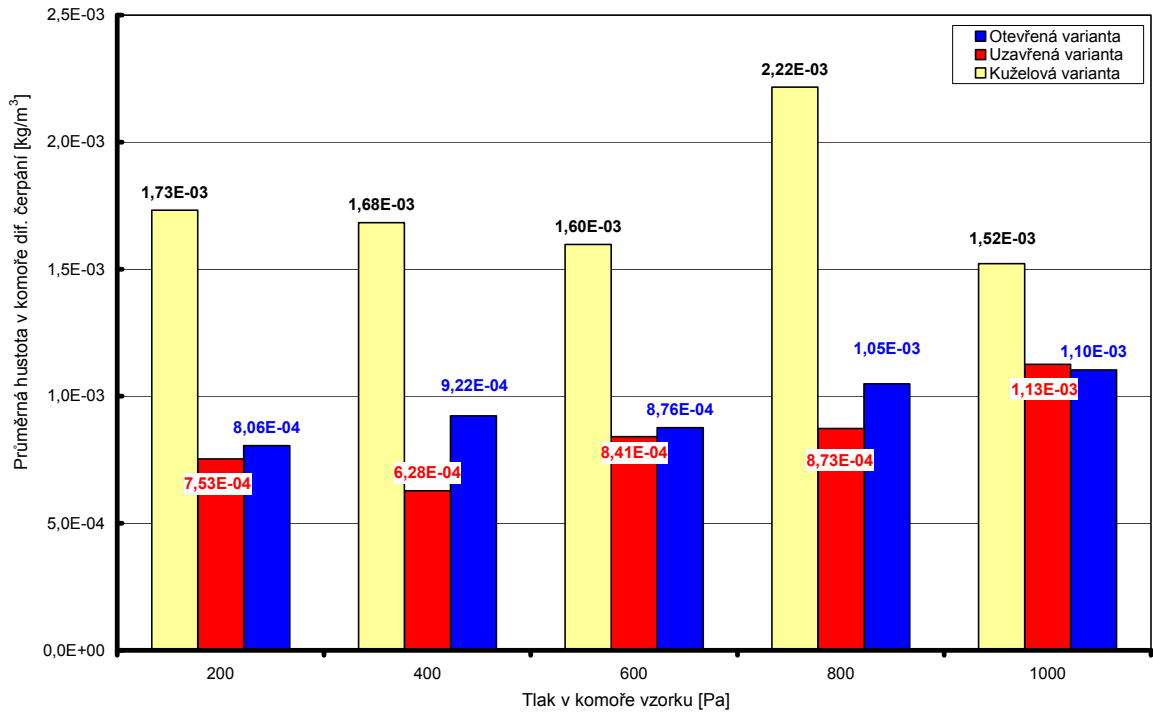
Jak bylo uvedeno, při průchodu primárního svazku elektronů komorou diferenciálního čerpání je třeba, aby tento svazek elektronů neměl ve své dráze žádnou překážku. Ideálním prostředím by bylo dokonalé vakuum, kterého ale není reálně dosáhnout. Srážkou elektronů s molekulami vzduchu dochází k jejich rozptýlu.

Z tohoto důvodu lze proto považovat jako hlavní kritérium výběru nejvýhodnější varianty tvaru komory diferenciálního čerpání aritmetický průměr tlaků a hustoty čerpaného média zjištěných na dráze primárního svazku.

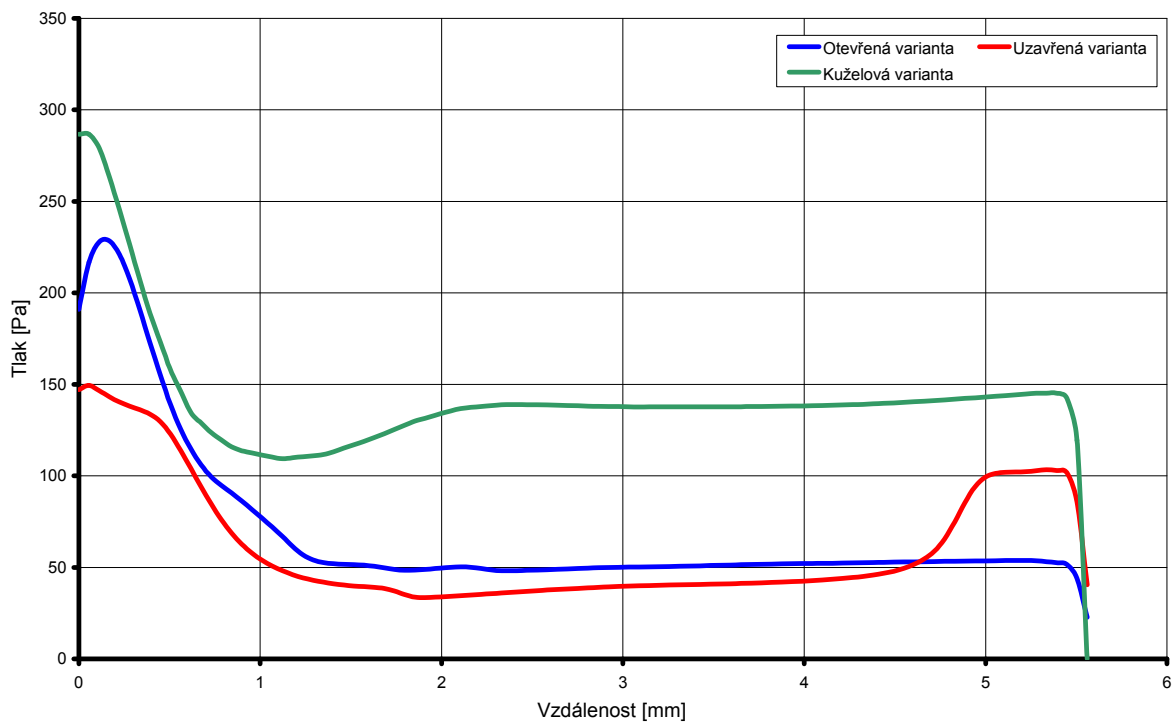
Průběhy tlaků na dráze primárního svazku procházejícího komorou diferenciálního čerpání u jednotlivých variant komor a tlaků v komoře vzorků jsou vyneseny na Obr. 7.15. Z něj vychází Obr. 7.14, který je výsledkem aritmetického průměru jednotlivých variant tlaků v komoře vzorku. Je tak dobře vidět porovnání obou variant na dráze primárního svazku. Obr. 7.12 je dalším porovnáním aritmetických průměrů tlaků, tentokrát však pro jednotlivé tlaky v komoře vzorku. Kompletní tabulkové hodnoty z analýzy jsou uvedeny v Příloze.



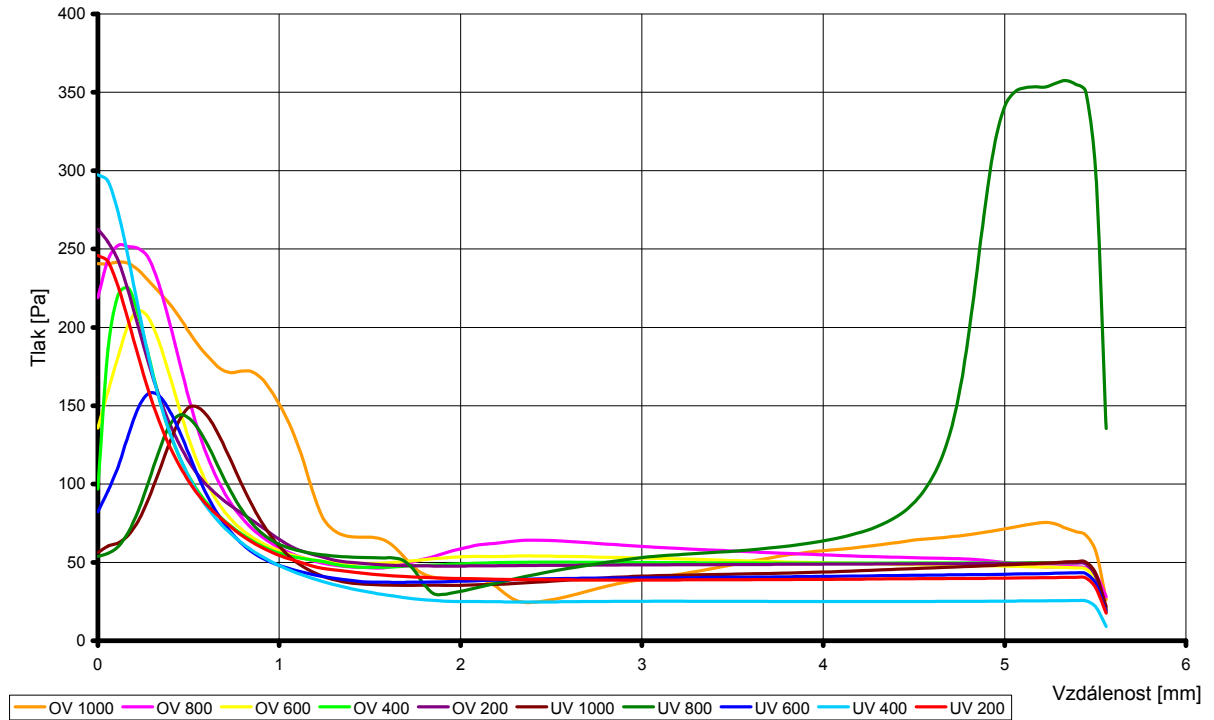
Obr. 7.12 Aritmetické průměry tlaků pro jednotlivé tlaky v komoře vzorku.



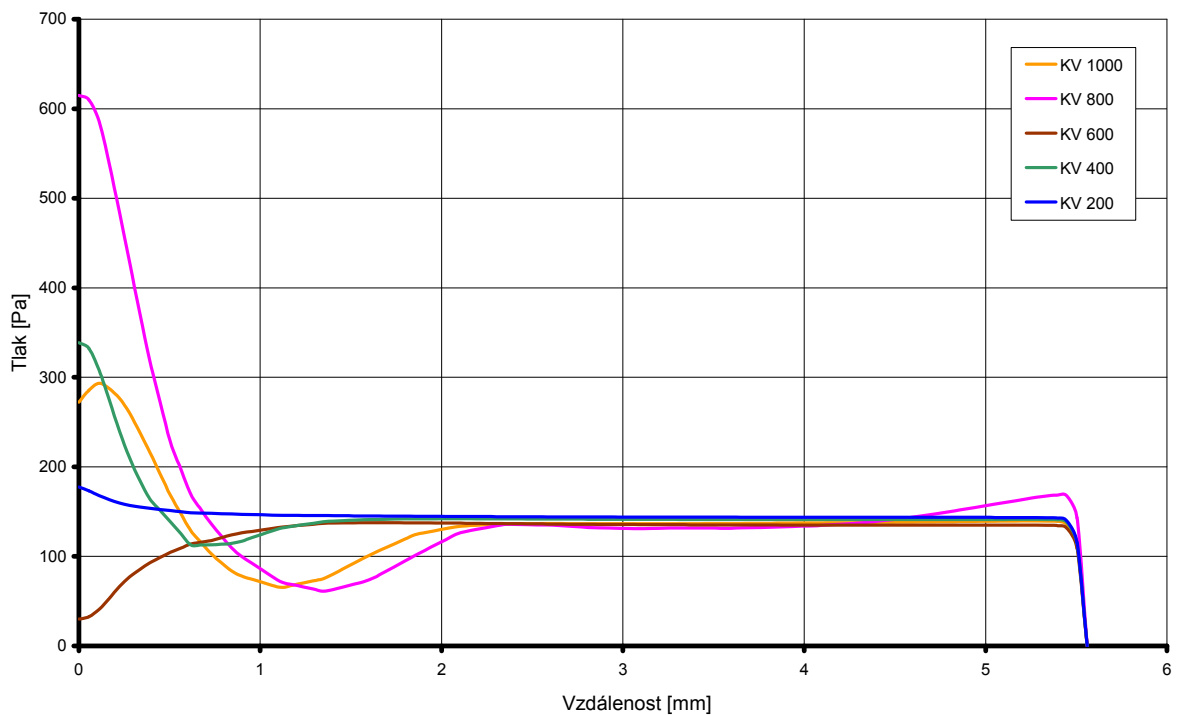
Obr. 7.13 Aritmetické průměry hustoty média pro jednotlivé tlaky v komoře vzorku.



Obr. 7.14 Rozložení aritmetických průměrů tlaku na křivce pro obě varianty.



Obr. 7.15 Rozložení tlaku na křivce pro otevřenou a uzavřenou variantu.



Obr. 7.16 Rozložení tlaku na křivce pro kuželovou variantu.

Tabulka 7.1 Hodnoty hlavního kritéria (tlak) výběru varianty

TLAK V KOMOŘE VZORKU	OTEVŘENÁ VARIANTA		UZAVŘENÁ VARIANTA	
	ARITMERICKÝ PRŮMĚR TLAKU	ARITMERICKÝ PRŮMĚR HUSTOTY MEDIA	ARITMERICKÝ PRŮMĚR TLAKU	ARITMERICKÝ PRŮMĚR HUSTOTY MEDIA
[Pa]	[Pa]	[KG/M ³]	[Pa]	[KG/M ³]
200	65,80	0,00081	55,95	0,00075
400	62,46	0,00092	47,37	0,00063
600	64,87	0,00088	51,48	0,00084
800	74,09	0,00105	101,27	0,00087
1000	82,35	0,00110	52,64	0,00113

Tabulka 7.1 porovnává jen otevřenou a uzavřenou variantu. Z Obr. 7.12 a Obr. 7.13 je patrné, že kuželová varianta zcela nevyhovuje – tlak i hustota je mnohem vyšší než u dalších variant. Kuželová varianta je tak v práci spíše uvedená jen pro názornost.

7.4 Zhodnocení výsledků analýzy

Jak již bylo uvedeno v kap. 7.1, zajímá nás především tlak na dráze svazku primárních elektronů. Čím je tlak v této oblasti nižší, tím je průchod elektronů optimálnější s menší pravděpodobností srážek s elektrony a tím i rozptylu svazku. Tlak v dráze elektronů v komoře diferenciálního čerpání lze tedy považovat za hlavní kritérium při výběru vhodné varianty.

Z uvedených výsledků vyplývá, že podle hlavního kritéria výběru se nejvhodnější jeví uzavřená varianta komory diferenciálního čerpání, oproti otevřené a kuželové variantě. U uzavřené varianty primární svazek na své dráze prochází v průměru nejnižším tlakem a tedy má nejmenší pravděpodobnost srážek s molekulami čerpaného vzduchu. U otevřené varianty je tlak o něco vyšší než u uzavřené varianty a je tak pravděpodobnost srážek větší. U kuželové varianty je tlak v oblasti průchodu svazku v průměru výrazně nejvyšší a tedy tato varianta je nejméně vhodná. Obdobně je tomu, když srovnáme výsledky hustoty (tab. 7.1, Obr. 7.13). Nejnižší hustota media znamená, že se zde vyskytuje nejmenší množství plynu, čemuž je tak u uzavřené varianty.

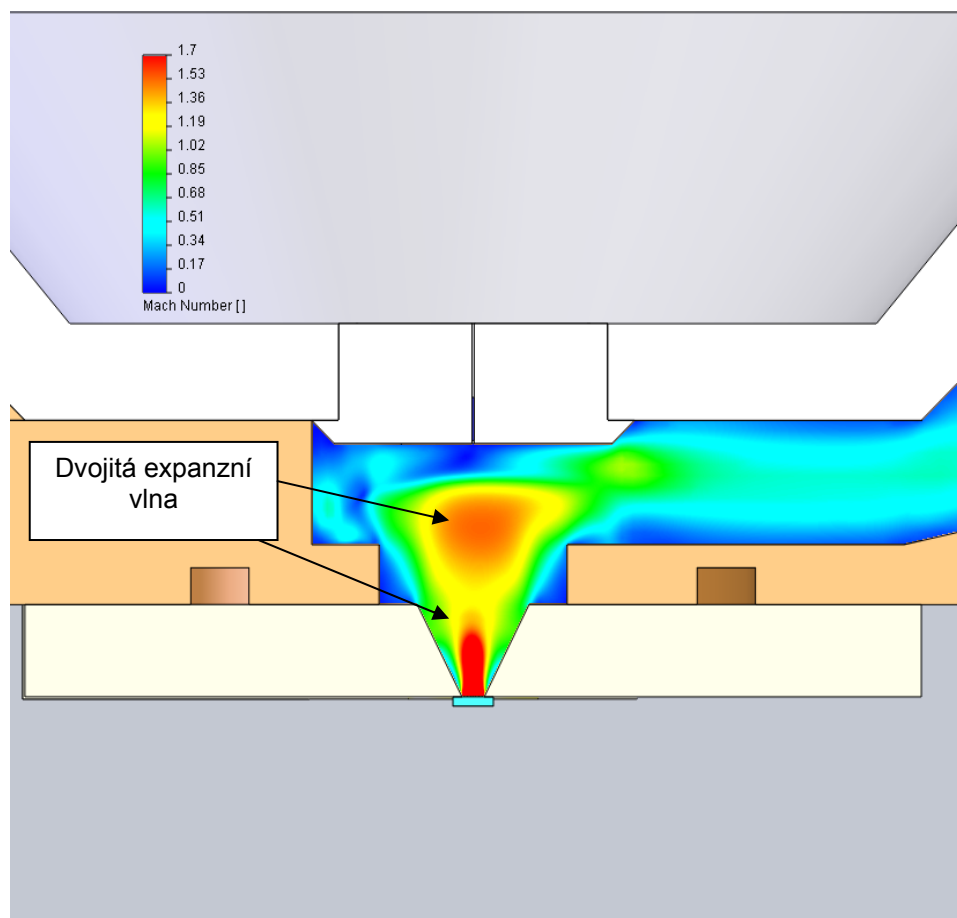
Důležitým výsledkem analýzy je to, že změna tlaku v komoře vzorku nemá podstatný vliv na tlak v komoře diferenciálního čerpání (Obr. 7.12). Napohled by bylo

možné předpokládat, že při zvýšení tlaku v komoře vzorku, dojde i ke zvýšení tlaku v komoře diferenciálního čerpání. Ve skutečnosti tomu tak není. I když se mění tlak v komoře vzorku, tlak v komoře diferenciálního čerpání zůstává téměř neměnný. Je to díky kompenzování fyzikálním jevem nazývaným se kritické proudění. Kritické proudění se objevuje u otvorů malých dimenzí oddělující oblasti s velmi rozdílnými tlaky, jako je náš případ. Z grafů rychlostí proudění (obr. 7.8 a 7.9) je vidět, že se zde dané kritické proudění opravdu vyskytuje. Clona PLA 1 (průměr otvoru 0,5 mm) odděluje komoru vzorku s tlakem až 1000 Pa od komory diferenciálního čerpání s tlakem okolo 50 Pa (dle varianty). Tímto otvorem malého rozměru může protéct jen takzvané kritické množství plynu za určitý časový úsek, ne více. Maximální průtok je při rychlosti zvuku na hraně této clonky. Dosáhne-li proudění rychlosti zvuku na clonce, jde o maximální průtok. V tomto okamžiku nastává jev, kdy za clonkou v komoře diferenciálního čerpání rychlost proudění vzrůstá do nadzvukové rychlosti (> 1 Mach), ale objem proudícího plynu do komory clonkou zůstává stejný. Z tohoto důvodu za clonkou vzniká oblast s nižším tlakem. Z tohoto důvodu tlak v komoře vzorku tedy nemá výraznější vliv na průměrný tlak v dráze primárního svazku elektronů procházející komorou diferenciálního čerpání. Zvýšení tlaku v komoře vzorku má naopak za následek vyšší tlakový spád mezi komorami, z čehož plyne vyšší nadzvukové proudění za clonkou PLA1 a tedy vznik oblasti se sníženým tlakem, které kompenzuje zvýšení tlaku v komoře vzorku. Rychlosti proudění v jednotlivých částech komory diferenciálního čerpání jsou vidět na obrázcích v kapitole 7.2.

Analýzy byly provedeny pro tlaky 200, 400, 600, 800 a 1000 Pa v komoře vzorku. Tlak v komoře diferenciálního čerpání zůstával u každé varianty komory přibližně stejný pro všechny analyzované tlaky v komoře vzorku. Je samozřejmé, že určité změny tlaku nastaly, ale ne se zásadním vlivem na svazek elektronů. Výjimku tvoří výsledek analýzy uzavřené komory pro tlak 800 Pa, tento výsledek bude rozebrán níže. Srovnání otevřené a uzavřené varianty při všech tlacích je na Obr. 7.15. Kuželová varianta je na Obr. 7.16. Z uvedených obrázků (grafů) je vidět, že u uzavřené a otevřené varianty ve většině případů klesne tlak v komoře diferenciálního čerpání k hodnotě okolo 50 Pa do vzdálenosti 1,5 mm od ústí do komory vzorku (clona PLA1). V dráze 0 – 1,5 mm (viz. obr. 6.8) dochází k prudkému poklesu tlaku až k uvedené hodnotě cca 50 Pa (dle tlaku a varianty). V další části dráhy je tlak již většinou „konstantní“, s mírnou klesající tendencí. U kuželové varianty klesá tlak jen k hodnotě přibližně 140 Pa. Podrobné výsledky jsou uvedeny v Příloze.

U uzavřené komory došlo při tlaku 800 Pa v komoře vzorků k velkému nárůstu tlaku na dráze primárních elektronů v blízkosti clony PLA2 (přechod mezi komorou diferenciálního čerpání a tubusem). Tento nárůst je způsoben vznikem víru a turbulencí v tomto místě u ústí clony PLA2 z důvodu, že podmínky pro proudění způsobily vznik dvojité expanzní vlny, jak je patrné z obr. 7.17. Tento vysoký tlak

(cca 350 Pa) je na dráze 0,5 mm, což představuje asi 10 % celkové dráhy primárních elektronů v komoře diferenciálního čerpání. I přes tuto skutečnost se uzavřená varianta komory jeví jako nevhodnější.



Obr. 7.17 Znárodnění dvojitě expanzní vlny u uzavřené varianty

Lze tedy konstatovat, že nejlépe z uvedených simulací vychází uzavřená varianta komory diferenciálního čerpání. Tlak a hustota média u této varianty byly na dráze primárních elektronů nejmenší a je tedy teoreticky nejmenší pravděpodobnost srážek elektronů s molekulami plynu, což znamená i nejmenší rozptyl primárního svazku elektronů.

8 Závěr

Tato práce se zabývá elektronovou mikroskopií, především pak environmentálním rastrovacím mikroskopem AQuSEM II, u něhož je analyzována komora diferenciálního čerpání. Vlastní analýza využívá posledních vývojových trendů v oblasti přípravy výroby. Díky velkému rozvoji výpočetních technologií je nyní možné využívat tzv. elektronické definice výrobku (EPD), která umožňuje analyzovat výrobek pomocí 3D modelů vytvořených v CAD systému. Obrovskou výhodou tohoto postupu je, že výrobek můžeme podrobit kompletní analýze všech jeho součástí a funkcí dříve, než je fyzicky vyroben. To šetří nemalé peníze. V duchu tohoto trendu je v práci analyzována uvedená komora mikroskopu EREM.

Teoretická část práce stručně popisuje princip elektronové mikroskopie a odlišnosti jednotlivých typů (TEM, REM, EREM). Také jsou zde uvedeny základní poznatky o vakuu a vlastnosti plynů. Teoretickou částí je tak položen vědomostní základ nutný pro pochopení elektronové mikroskopie a vlivu tlaku na elektronový svazek, který je uplatněn při samotném vyhodnocení analýzy.

V CAD programu SolidWorks byly vytvořeny 3D modely tří variant komory diferenciálního čerpání (otevřená, uzavřená, kuželová). Následně byly všechny tři varianty podrobeny simulaci v modulu Flow Simulation, který je součástí programu SolidWorks. Simulace byla provedena u každé varianty pro pět různých tlaků v komoře vzorku (200, 400, 600, 800 a 1000 Pa). Nejdůležitějším výsledkem analýzy je rozložení tlaku na dráze primárních elektronů v komoře diferenciálního čerpání, neboť svazek primárních elektronů by se měl pohybovat v prostředí s co nejmenším tlakem, aby pravděpodobnost srážek elektronů s molekulami plynů byla co nejmenší.

Na základě provedených analýz lze říci, že změna tlaku v komoře vzorku nemá podstatný vliv na průběh tlaku v komoře diferenciálního čerpání. Tlak v komoře vzorku se při analýze měnil v rozsahu 200 – 1000 Pa a tlak v komoře diferenciálního čerpání zůstával prakticky neměnný. Rozdíly tlaku u jednotlivých variant jsou při komplexním zhodnocení zanedbatelné. Nejlépe z uvedených simulací vychází uzavřená varianta komory diferenciálního čerpání, kde tlak na dráze primárních elektronů byl nejmenší a tedy teoreticky i nejmenší rozptyl svazku elektronů. U této uzavřené komory došlo při tlaku 800 Pa v komoře vzorků k velkému nárůstu tlaku na dráze primárních elektronů v blízkosti clony PLA2 (přechod mezi komorou diferenciálního čerpání a tubusem). Tento nárůst je způsoben vznikem víru a turbulencí v tomto místě u ústí clony PLA2 z důvodu vzniku dvojité expanzní vlny. Tento vysoký tlak (cca 350 Pa) je na dráze 0,5 mm, což představuje asi 10 % celkové dráhy primárních elektronů v komoře diferenciálního čerpání. I přes tuto skutečnost se uzavřená varianta komory jeví jako nejvhodnější ze všech tří variant.

Závěrem lze říci, že práce názorně ukazuje možnosti a široké využití systémů CAE⁵ při návrhu a výzkumu nových výrobků a zařízení a podtrhuje současný trend zavádění počítačové podpory do všech průmyslových odvětví.

⁵ Computer Aided Engineering – počítačová podpora inženýrských prací

9 Seznam použité literatury

- [1] NEDĚLA, V., AUTRATA, R.: Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie, Československý časopis pro fyziku, (3) (2005) 251.
- [2] NEBESÁŘOVÁ, J. *Elektronová mikroskopie pro biology* [online], 2002 [cit. 2010-02-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.paru.cas.cz/lem/book/>>.
- [3] JIRÁK, J; HAVLÍČEK, S; ROZSÍVALOVÁ, Z. *Diagnostika a zkušebnictví*. FEKT VUT, Brno, 2009. 53 s.
- [4] BOUŠEK, J. *Vakuová technika*. FEKT VUT, Brno, 2005. 97 s.
- [5] KOVAČIČ, V; MILITKÝ, J; RUBNEROVÁ, J. *Technická univerzita v Liberci* [online]. 2004 [cit. 2010-02-14]. Rastrovací elektronový mikroskop jako prostředek moderní výuky v oboru textilním. Dostupné z WWW: <<http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/?q=cs/rem>>.
- [6] ÚPT AVČR : *Laboratoře elektronové mikroskopie* [online]. [cit. 2010-02-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.isibrno.cz/lem/>>.
- [7] Iowa State University : *Scanning Electron Microscopy* [online]. [cit. 2010-02-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.mse.iastate.edu/microscopy/college.html>>.
- [8] *SolidVision : 3D CAD CAM CAE PDM - SolidWorks* [online]. [cit. 2010-03-01]. Dostupné z WWW: <www.solidvision.cz>.
- [9] *SolidWorks Simulation Software : Product description* [online]. [cit. 2010-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.solidvision.cz/download/pdf/solidworks-simulation-eng.pdf>>.
- [10] MAXA, J. *Třírozměrné modelování a simulace*. FEKT VUT, Brno, 2006. 127 s.
- [11] 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.
- [12] JAŠEK, M. *Analýza komory diferenciálního čerpání EREM pomocí systému Cosmos Floworks-diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Maxa, Ph.D.
- [13] FRANK, L.; JIRÁK, J; REK, A; ROZSÍVALOVÁ, Z. *Speciální diagnostika*. FEKT VUT, Brno, 2009. 79 s.
- [14] NEDĚLA, V., MAXA, J.: *Hydratační systém pro environmentální rastrovací elektronové mikroskopy*, *Fine mechanics and optics* (11-12) (2006) 329-331.

10 Příloha – Zpracování výsledků analýzy

10.1 Grafické výsledky

V první řadě můžeme sledovat průběh tlaků v komoře diferenciálního čerpání – především v místě primárního svazku – na grafickém výstupu. Na obrázcích 10.1 - 10.30 je vidět rozložení tlaku a rychlosti proudění v této komoře.

Tato grafická znázornění slouží pro první orientaci.

Průběh rychlostí čerpaného plynu v komoře má pomocnou výpovědní hodnotu, neboť rychlost proudění nesledujeme jako hlavní veličinu, ale pro plnohodnotný popis proudění je nutné sledovat všechny veličiny.

Vysvětlivky ke značení obrázků a kapitol :

UV ... uzavřená varianta

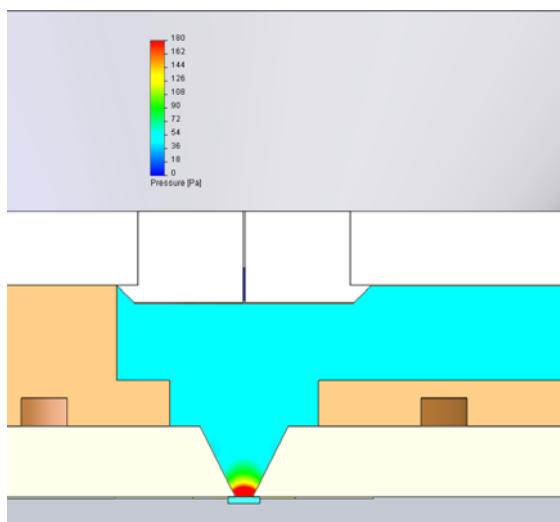
OV ... otevřená varianta

KV ... kuželová varianta

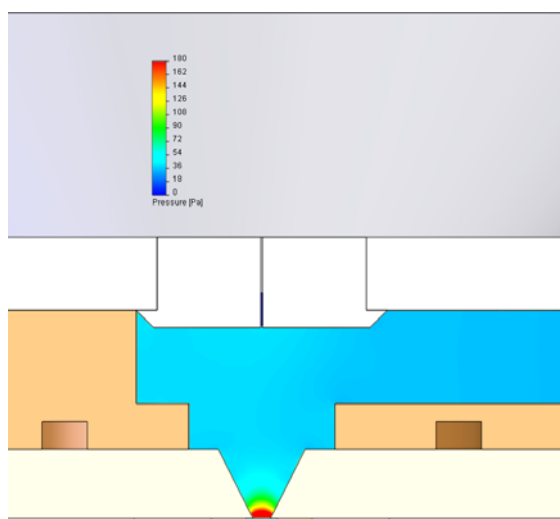
Číslo ... značí velikost tlaku v komoře vzorku

Např.: UV 600 – Uzavřená varianta s tlakem v komoře vzorku 600 Pa

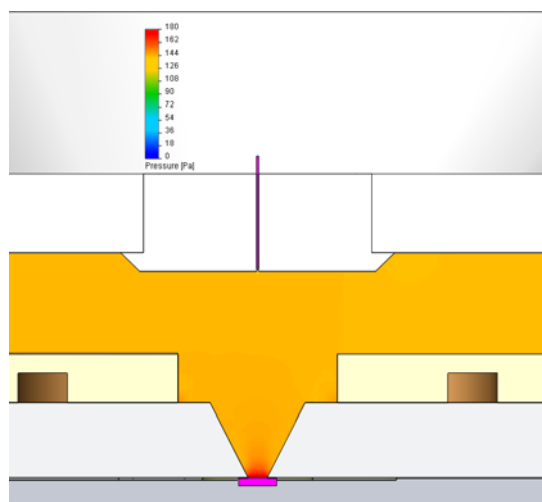
10.1.1 Tlak v komoře vzorku 200 Pa



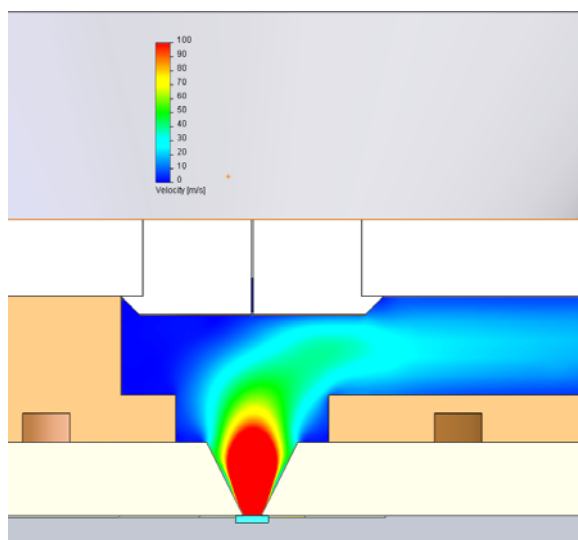
Obr. 10.1 Grafické výsledky – průběh tlaku OV 200



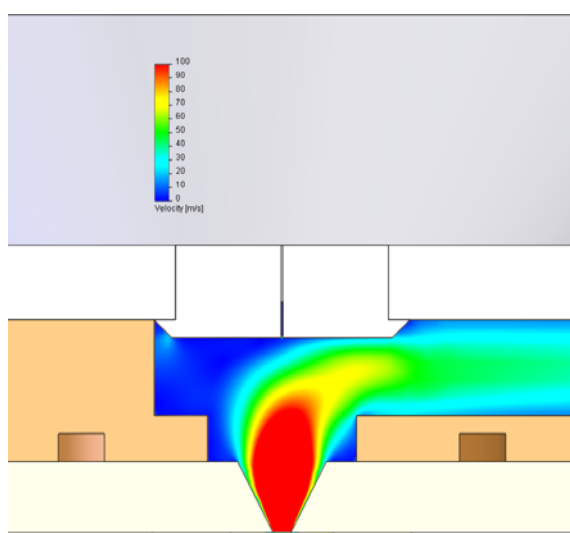
Obr. 10.2 Grafické výsledky – průběh tlaku UV 200



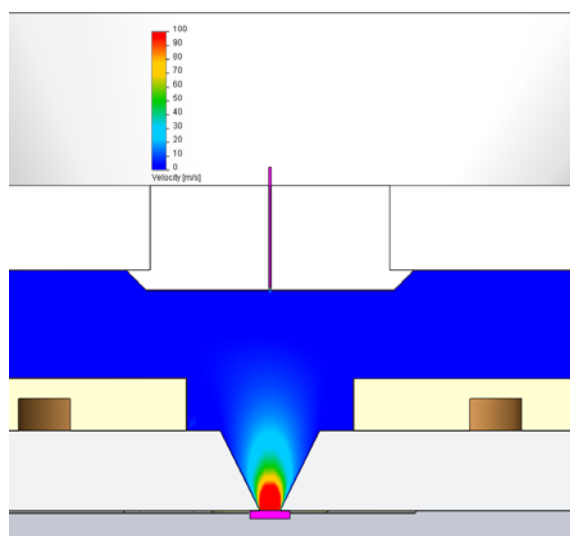
Obr. 10.3 Grafické výsledky – průběh tlaku KV 200



Obr. 10.4 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání OV 200

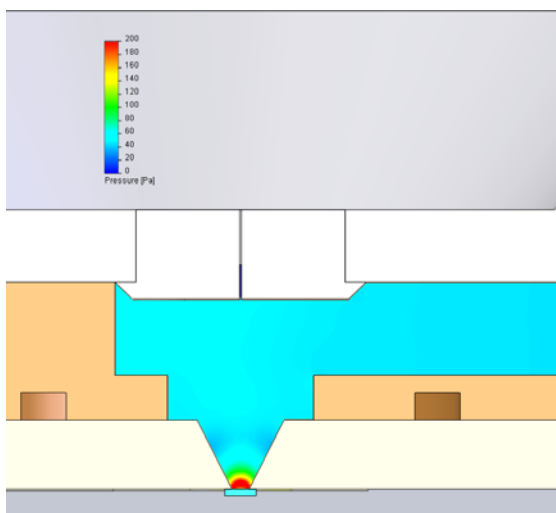


Obr. 10.5 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání UV 200

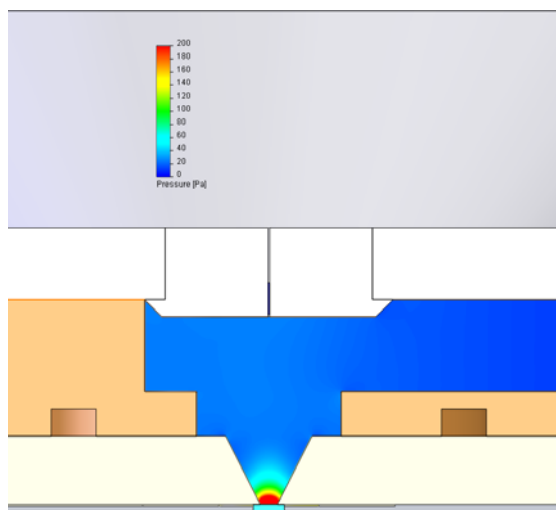


Obr. 10.6 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání KV 200

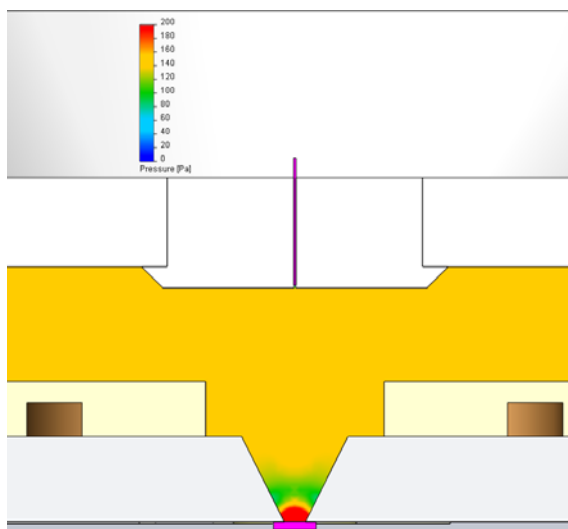
10.1.2 Tlak v komoře vzorku 400 Pa



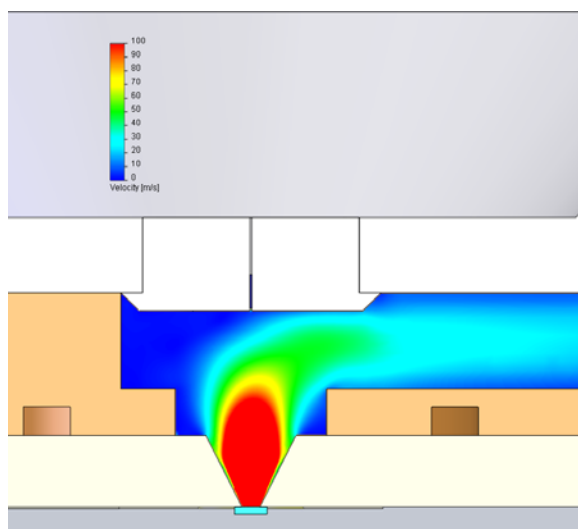
Obr. 10.7 Grafické výsledky – průběh tlaku OV 400



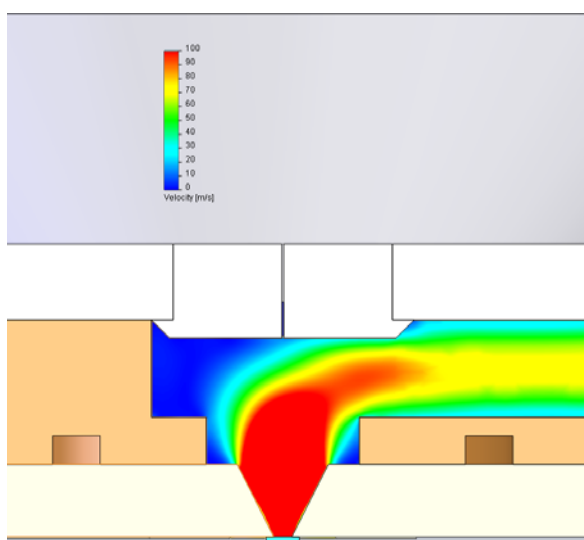
Obr. 10.8 Grafické výsledky – průběh tlaku UV 400



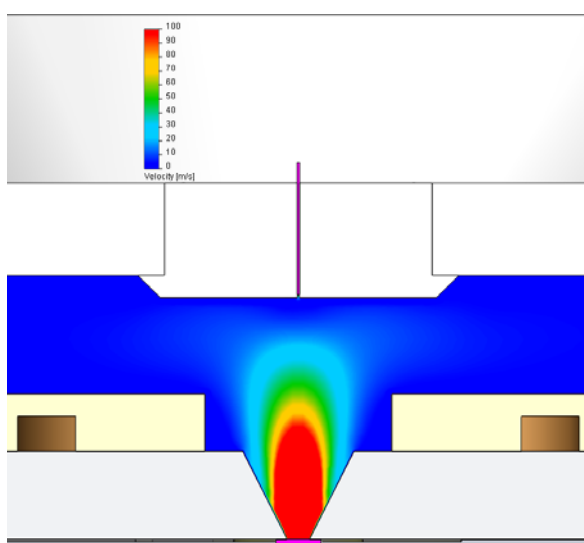
Obr. 10.9 Grafické výsledky – průběh tlaku KV 400



Obr. 10.10 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání OV 400

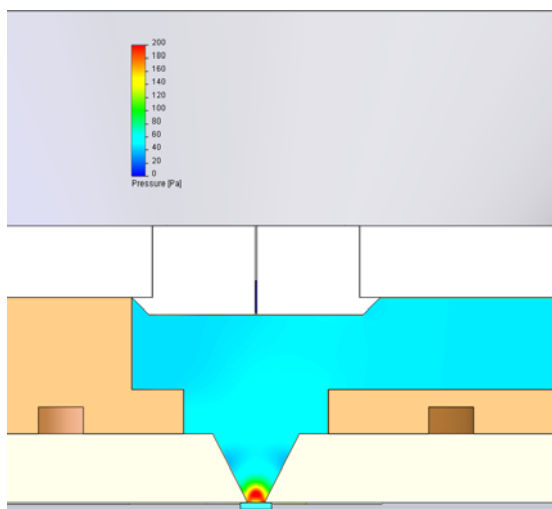


Obr. 10.11 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání UV 400

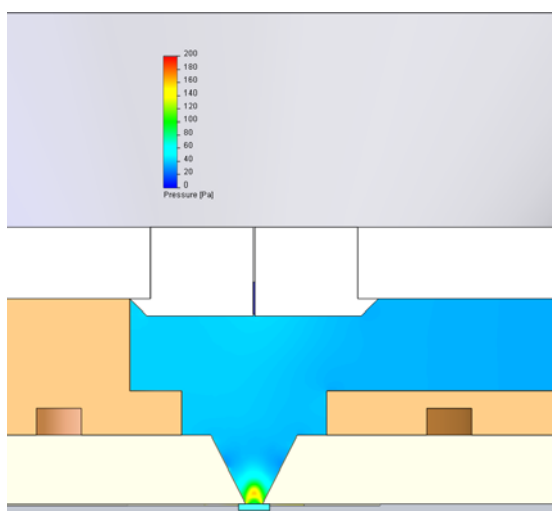


Obr. 10.12 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání KV 400

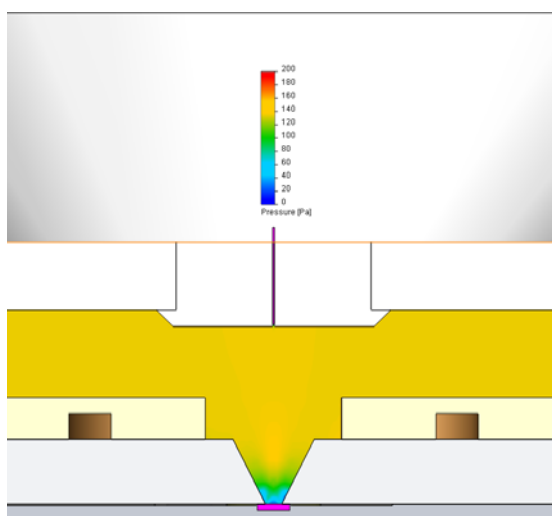
10.1.3 Tlak v komoře vzorku 600 Pa



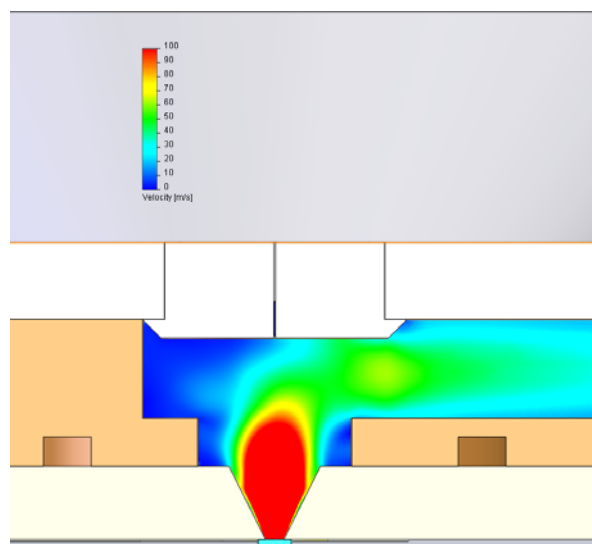
Obr. 10.13 Grafické výsledky – průběh tlaku OV 600



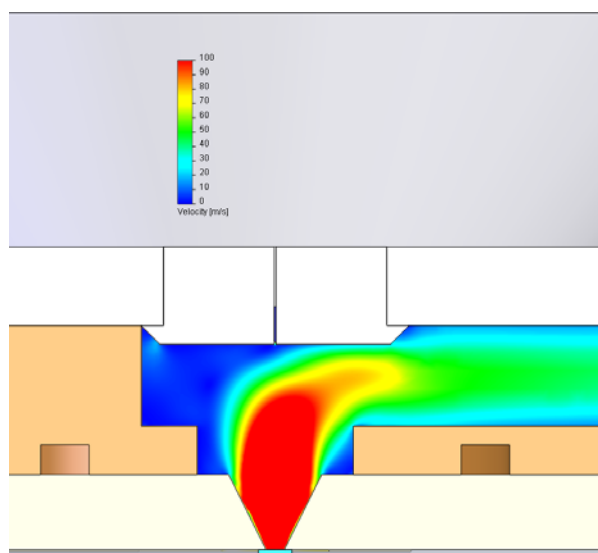
Obr. 10.14 Grafické výsledky – průběh tlaku UV 600



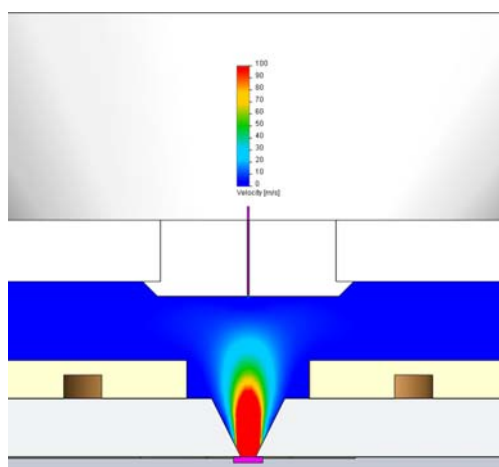
Obr. 10.15 Grafické výsledky – průběh tlaku KV 600



Obr. 10.16 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání OV 600

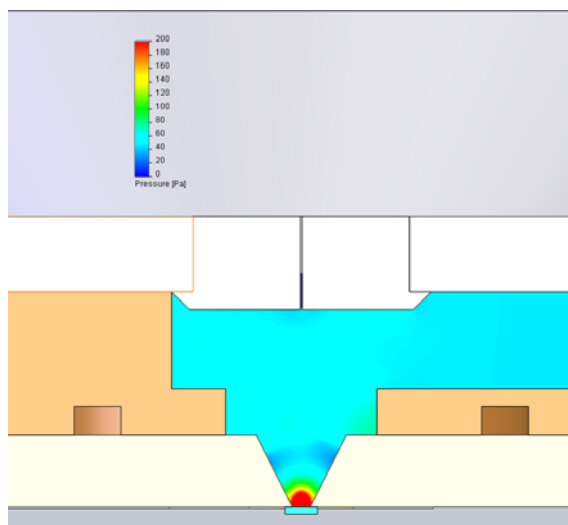


Obr. 10.17 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání UV 600

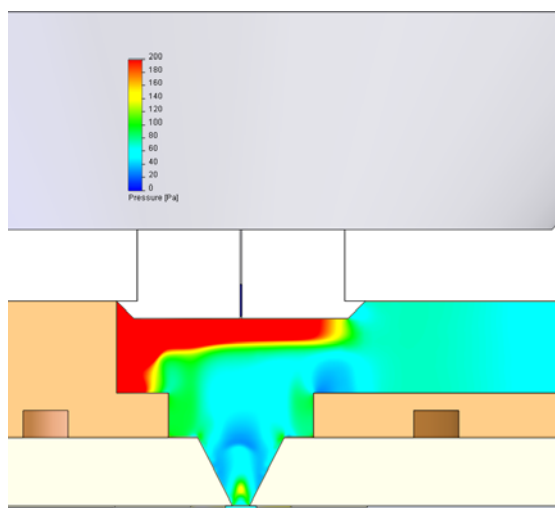


Obr. 10.18 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání KV 600

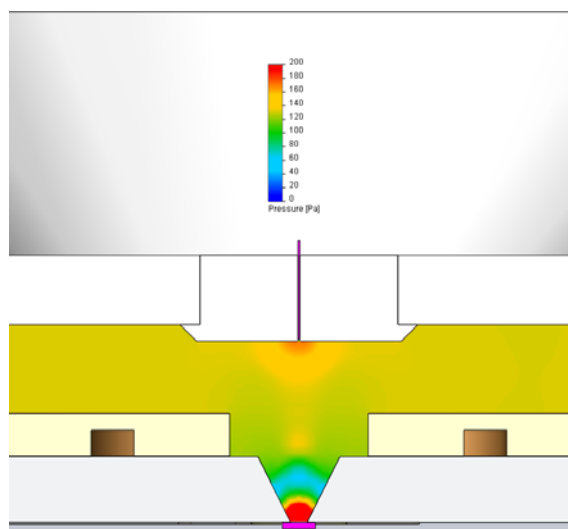
10.1.4 Tlak v komoře vzorku 800 Pa



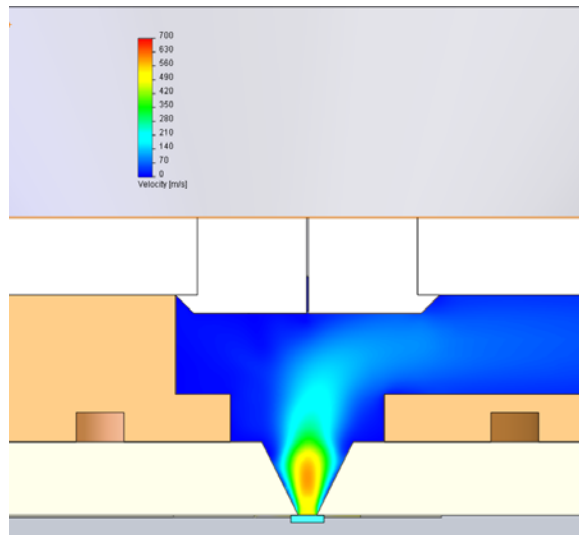
Obr. 10.19 Grafické výsledky – průběh tlaku OV 800



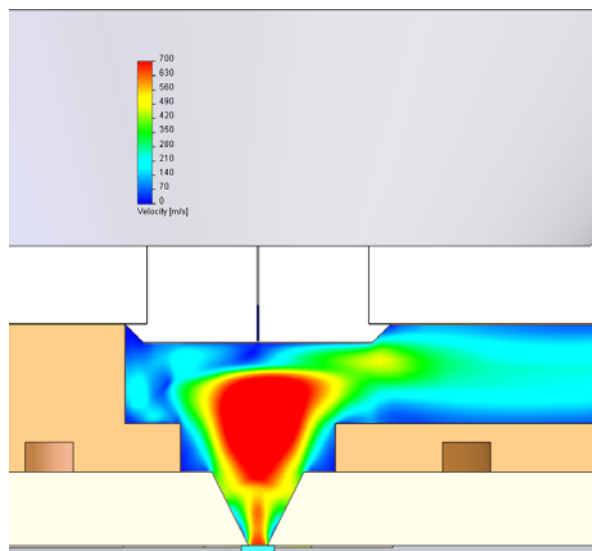
Obr. 10.20 Grafické výsledky – průběh tlaku UV 800



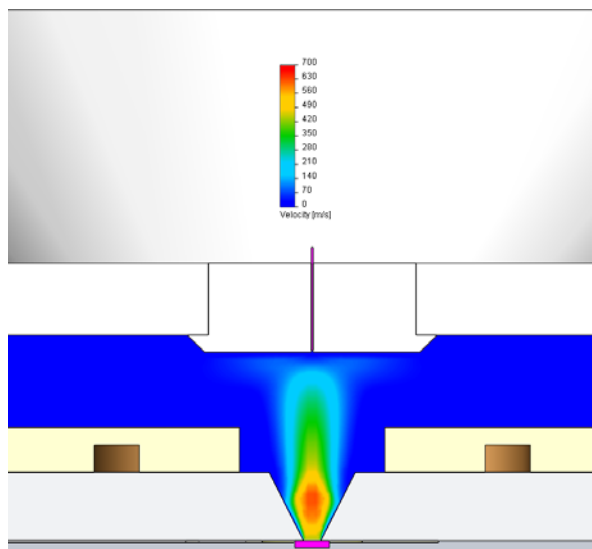
Obr. 10.21 Grafické výsledky – průběh tlaku KV 800



Obr. 10.22 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání OV 800

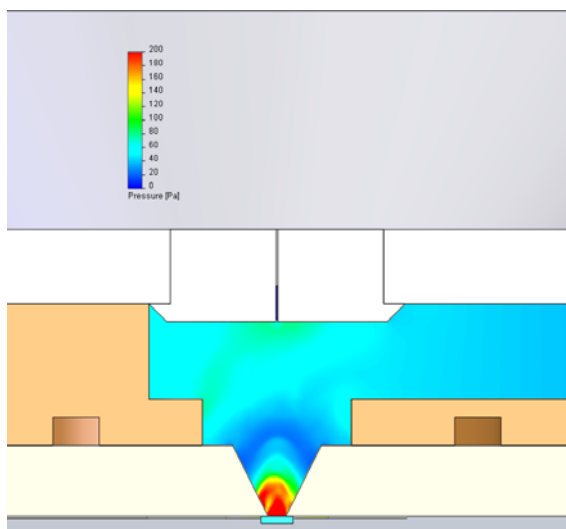


Obr. 10.23 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání UV 800

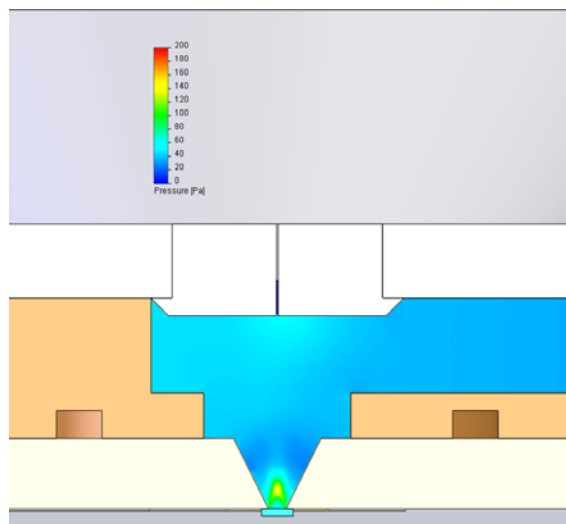


Obr. 10.24 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání KV 800

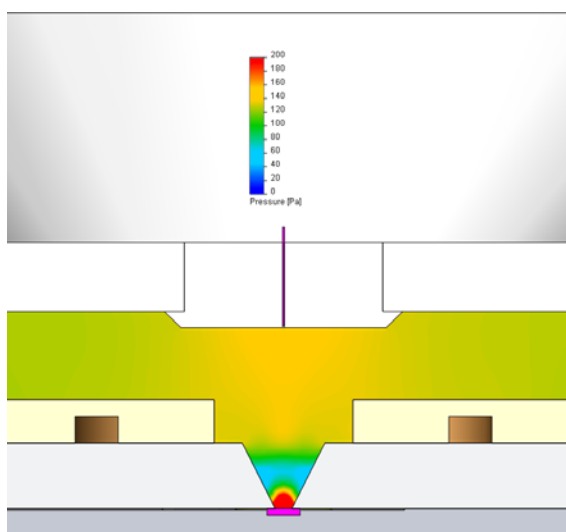
10.1.5 Tlak v komoře vzorku 1000 Pa



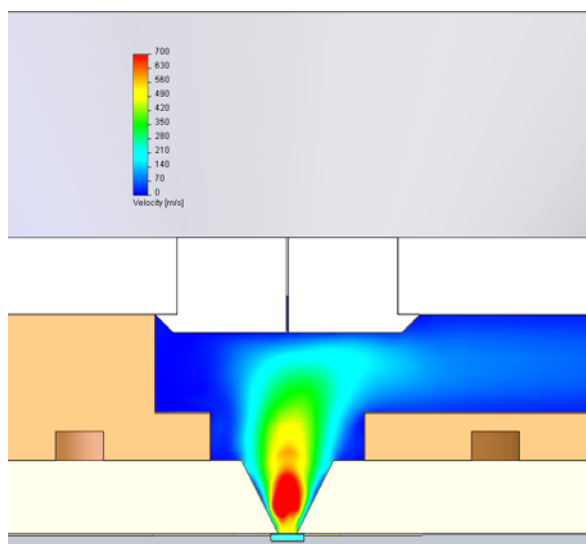
Obr. 10.25 Grafické výsledky – průběh tlaku OV 1000



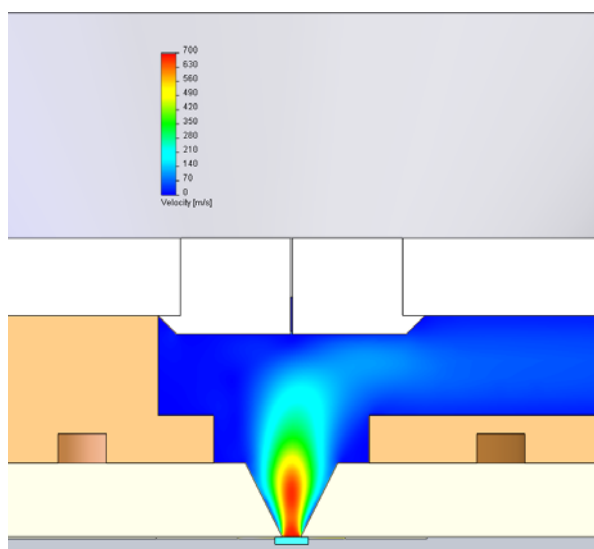
Obr. 10.26 Grafické výsledky – průběh tlaku UV 1000



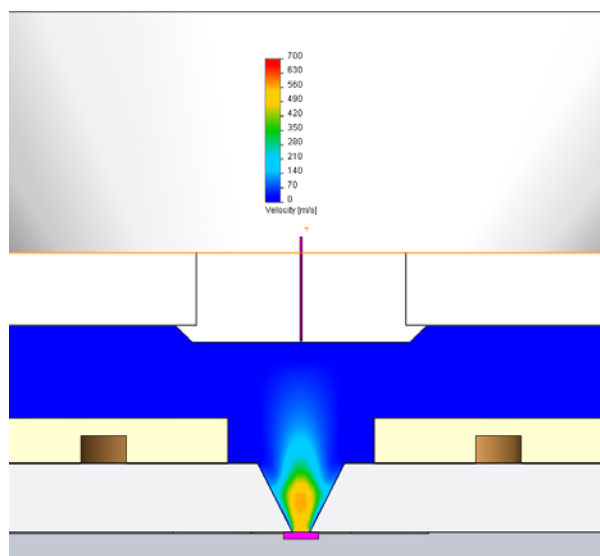
Obr. 10.27 Grafické výsledky – průběh tlaku KV 1000



Obr. 10.28 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání OV 1000



Obr. 10.29 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání UV 1000



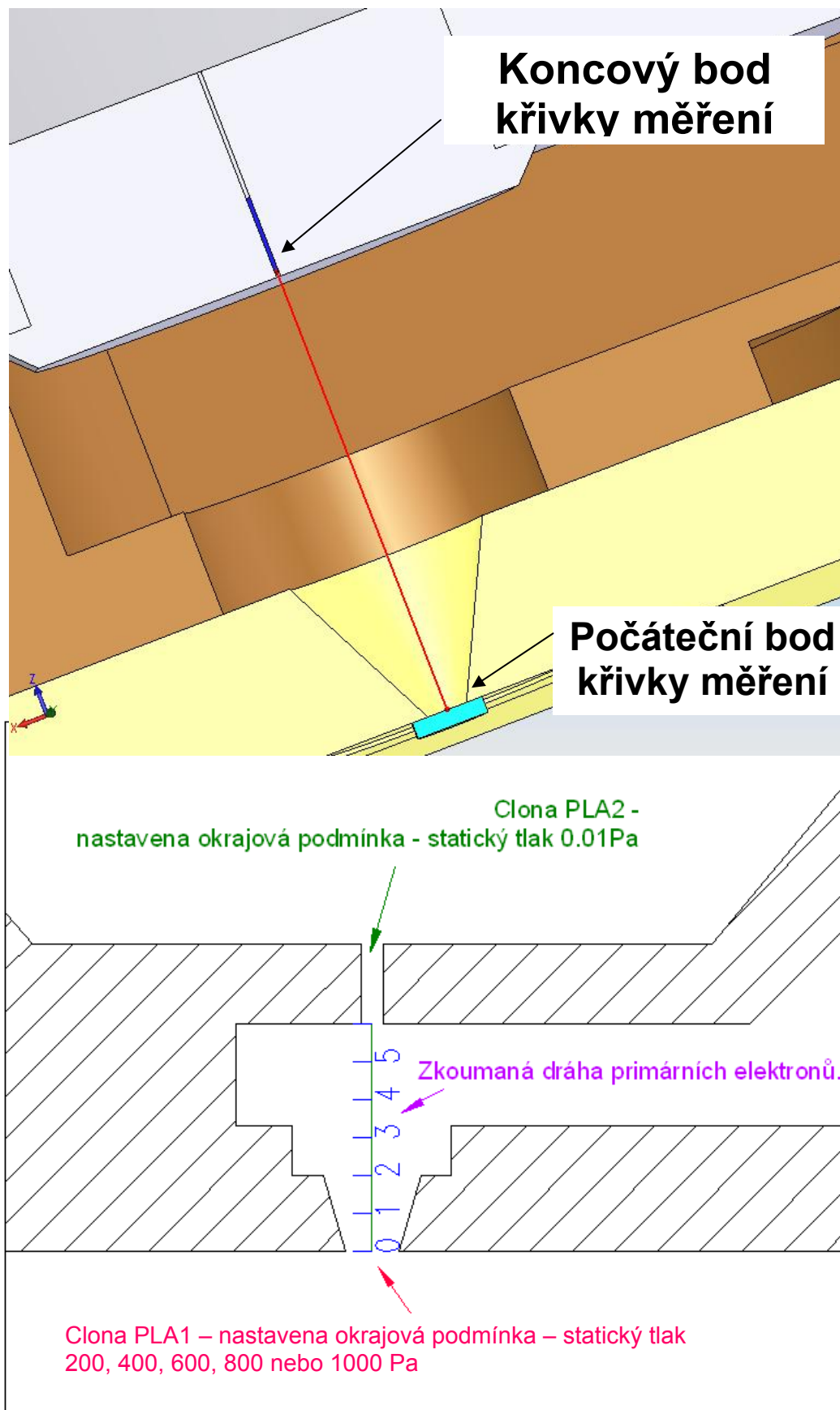
Obr. 10.30 Grafické výsledky – průběh rychlosti čerpání KV 1000

10.2 Výsledky měření otevřené varianty komory

V následující části jsou uvedeny výsledky pro otevřenou variantu komory diferenciálního čerpání (obr. 3.10).

Jak bylo uvedeno, systém umožňuje vytvořit křivku – v tomto případě přímku – ve sledované oblasti a následně vyčíst a vynést do grafu požadované hodnoty. Pro úplnost je třeba připomenout, že křivka byla tvořena směrem od otvoru mezi diferenciálně čerpanou komorou a komorou vzorku směrem k tubusu (obr. 10.31). To znamená, že hodnota délky nula začíná u komory vzorku a zvyšující hodnota směřuje k tubusu.

Pro naši analýzu a měření jsou nejpodstatnější závislosti statického tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla v komoře diferenciálního čerpání. Primárně sledovanou veličinou je tlak. Avšak ostatní veličiny nelze považovat za nepotřebné, neboť tyto další zobrazené veličiny slouží k popisu proudění. Analýza je provedena pro tlaky 200, 400, 600, 800 a 1000 Pa v komoře vzorku. Změřené hodnoty pro jednotlivé tlaky jsou uvedeny v následujících tabulkách. Dále jsou uvedeny grafy těchto závislostí, kde na ose X je vynesena délka křivky zobrazující dráhu průchodu primárního svazku elektronů komorou diferenciálního čerpání a na ose Y průběh tlaku, hustoty, rychlosti nebo Machova čísla (dle typu grafu).



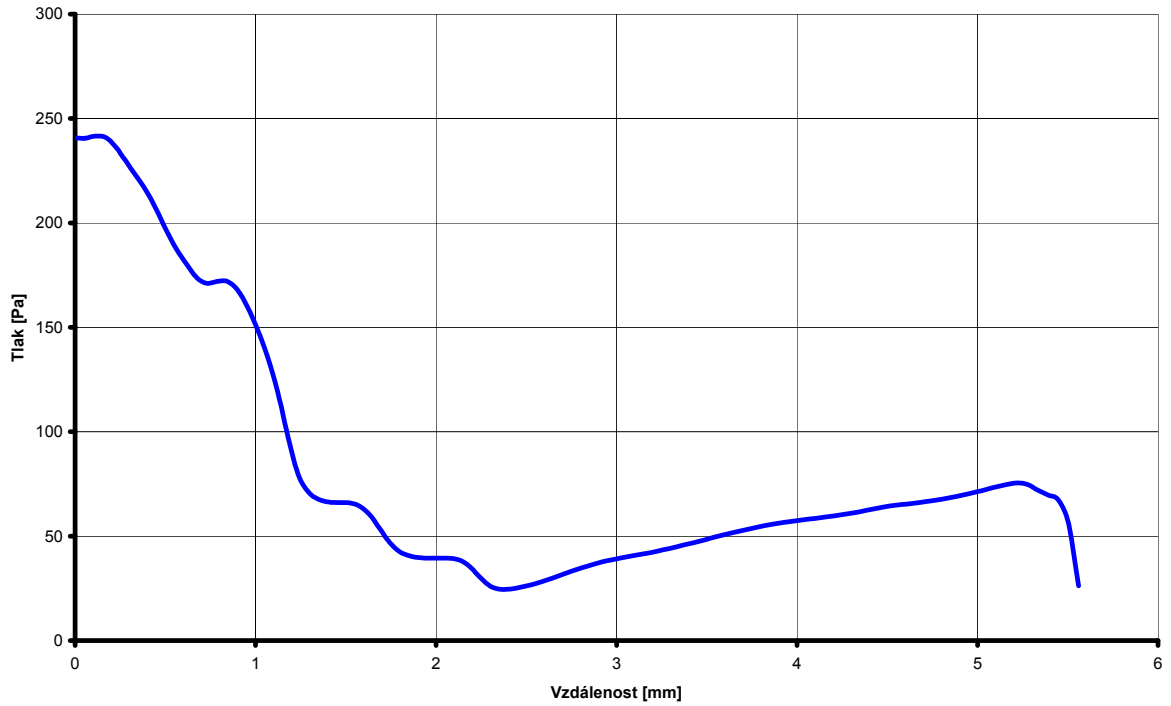
Obr. 10.31 Dráha primárního svazku elektronů při průchodu DČK.

10.2.1 Vyhodnocení OV 1000

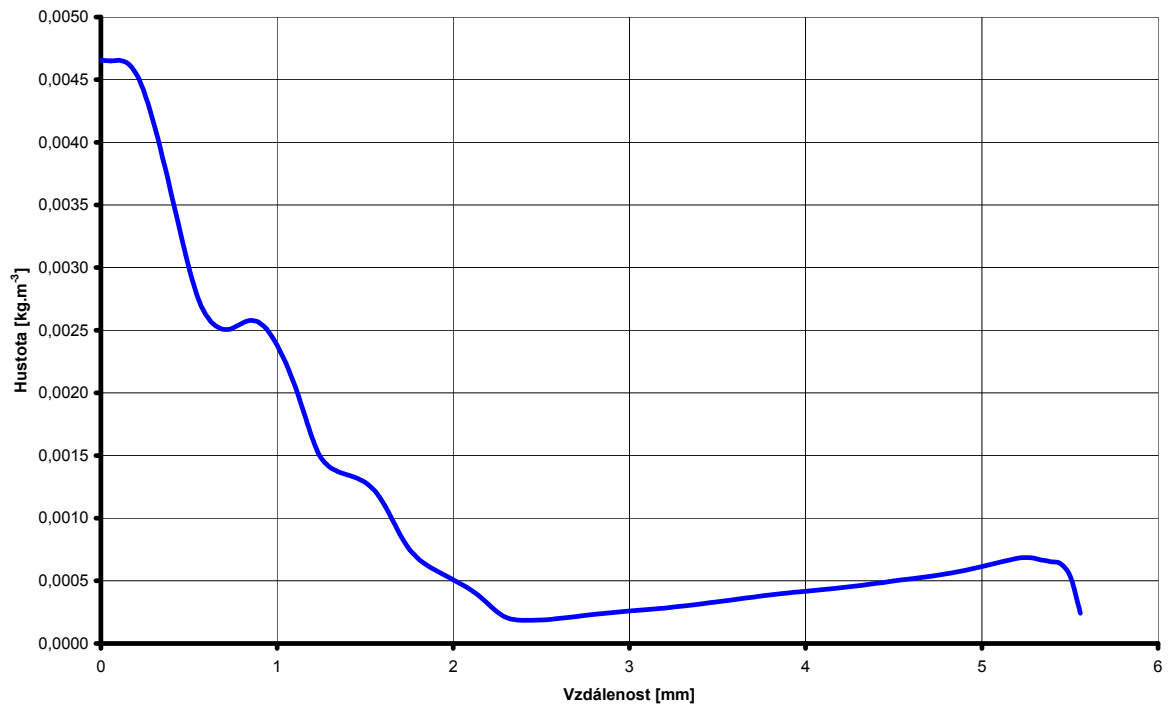
Tabulka 10.1 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	240,62	0,00466	517,29	1,92
0,06	240,53	0,00465	521,00	1,94
0,11	241,66	0,00465	525,72	1,95
0,17	240,90	0,00461	533,03	1,97
0,22	236,43	0,00448	542,68	2,00
0,28	229,64	0,00425	554,51	2,02
0,34	222,65	0,00396	568,93	2,02
0,39	215,40	0,00363	587,82	2,04
0,45	206,54	0,00330	613,96	2,07
0,51	196,47	0,00297	648,19	2,12
0,56	187,52	0,00272	687,63	2,21
0,62	180,15	0,00258	725,28	2,32
0,67	173,80	0,00252	759,73	2,44
0,73	171,14	0,00251	796,19	2,58
0,79	171,95	0,00254	832,59	2,71
0,84	172,01	0,00258	859,71	2,81
0,90	167,95	0,00256	876,43	2,90
0,95	159,71	0,00248	888,32	2,96
1,01	148,84	0,00235	896,61	3,02
1,07	135,67	0,00218	895,08	3,04
1,12	118,64	0,00197	877,73	3,03
1,18	97,50	0,00172	844,34	3,01
1,24	79,60	0,00152	808,13	2,98
1,29	71,30	0,00142	783,45	2,95
1,35	67,68	0,00137	765,70	2,92
1,40	66,31	0,00134	750,62	2,86
1,46	66,05	0,00132	736,18	2,78
1,52	65,91	0,00127	721,32	2,68
1,57	64,56	0,00119	704,84	2,56
1,63	60,56	0,00106	683,98	2,42
1,68	53,96	0,00090	656,84	2,27
1,74	47,08	0,00077	626,39	2,14
1,80	42,56	0,00068	600,20	2,03
1,85	40,47	0,00062	582,38	1,93
1,91	39,63	0,00058	571,63	1,84
1,97	39,42	0,00053	566,27	1,76
2,02	39,47	0,00049	565,12	1,69
2,08	39,38	0,00045	568,15	1,62
2,13	38,42	0,00039	575,09	1,56
2,19	35,09	0,00033	583,06	1,50
2,25	30,01	0,00026	585,43	1,44
2,30	25,91	0,00021	578,49	1,38
2,36	24,47	0,00019	565,84	1,32
2,41	24,69	0,00018	553,74	1,28
2,47	25,52	0,00019	543,92	1,24
2,53	26,66	0,00019	536,10	1,21
2,58	28,11	0,00020	529,29	1,18
2,64	29,76	0,00021	523,35	1,16
2,70	31,50	0,00021	517,93	1,14
2,75	33,19	0,00022	512,54	1,12
2,81	34,87	0,00023	506,59	1,11

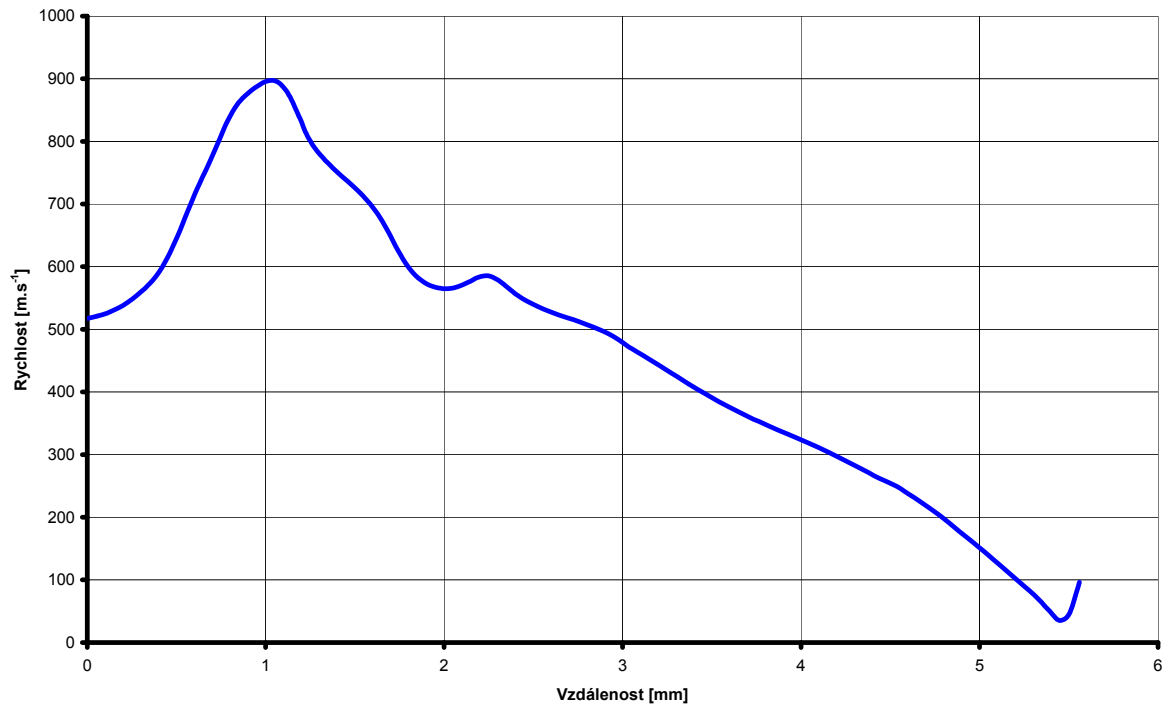
2,86	36,38	0,00024	500,19	1,09
2,92	37,62	0,00025	492,91	1,07
2,98	38,68	0,00026	483,50	1,05
3,03	39,69	0,00026	472,39	1,03
3,09	40,60	0,00027	462,62	1,01
3,15	41,47	0,00028	452,87	0,99
3,20	42,35	0,00028	443,12	0,97
3,26	43,42	0,00029	433,03	0,95
3,31	44,50	0,00030	422,93	0,93
3,37	45,68	0,00031	413,05	0,91
3,43	46,89	0,00032	403,24	0,89
3,48	48,12	0,00033	393,90	0,87
3,54	49,37	0,00034	384,88	0,85
3,59	50,60	0,00035	376,24	0,84
3,65	51,78	0,00036	368,15	0,82
3,71	52,94	0,00037	360,23	0,81
3,76	53,98	0,00038	352,91	0,79
3,82	55,02	0,00039	345,63	0,78
3,88	55,83	0,00040	338,83	0,77
3,93	56,64	0,00041	332,05	0,75
3,99	57,29	0,00042	325,15	0,74
4,04	57,90	0,00042	318,24	0,73
4,10	58,52	0,00043	310,91	0,71
4,16	59,13	0,00044	303,35	0,70
4,21	59,81	0,00045	295,48	0,68
4,27	60,57	0,00046	287,25	0,67
4,32	61,36	0,00046	279,04	0,65
4,38	62,25	0,00048	270,84	0,63
4,44	63,19	0,00049	262,58	0,62
4,49	64,17	0,00050	255,24	0,60
4,55	64,84	0,00051	247,38	0,59
4,61	65,31	0,00052	236,50	0,56
4,66	65,90	0,00053	226,16	0,54
4,72	66,59	0,00054	215,01	0,52
4,77	67,30	0,00055	203,43	0,49
4,83	68,15	0,00056	191,00	0,46
4,89	69,13	0,00058	177,74	0,43
4,94	70,16	0,00060	164,57	0,41
5,00	71,31	0,00061	151,58	0,38
5,05	72,53	0,00063	138,38	0,35
5,11	73,75	0,00065	124,43	0,31
5,17	74,76	0,00067	110,56	0,28
5,22	75,56	0,00068	96,77	0,25
5,28	74,67	0,00068	83,03	0,21
5,34	71,94	0,00067	67,91	0,17
5,39	69,63	0,00065	50,74	0,13
5,45	67,34	0,00064	35,22	0,09
5,50	56,51	0,00053	45,96	0,12
5,56	26,26	0,00024	96,28	0,25



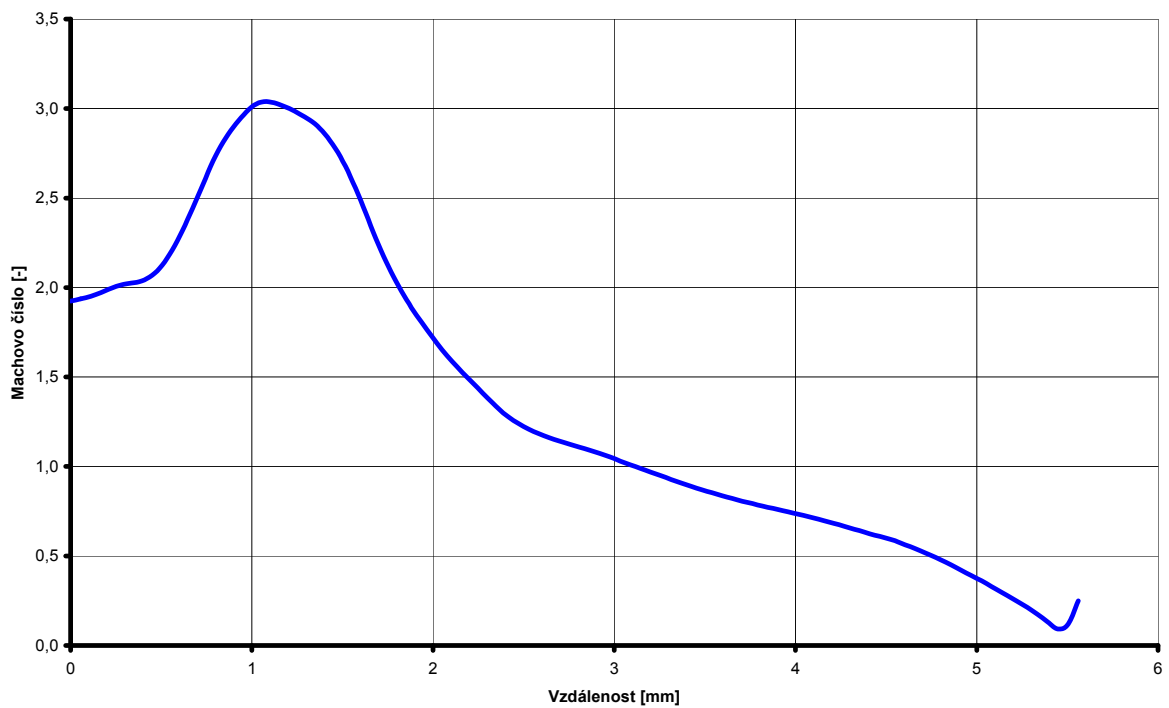
Obr. 10.32 Rozložení tlaku na křivce OV 1000.



Obr. 10.33 Rozložení hustoty na křivce OV 1000.



Obr. 10.34 Rozložení rychlostí na křivce OV 1000.



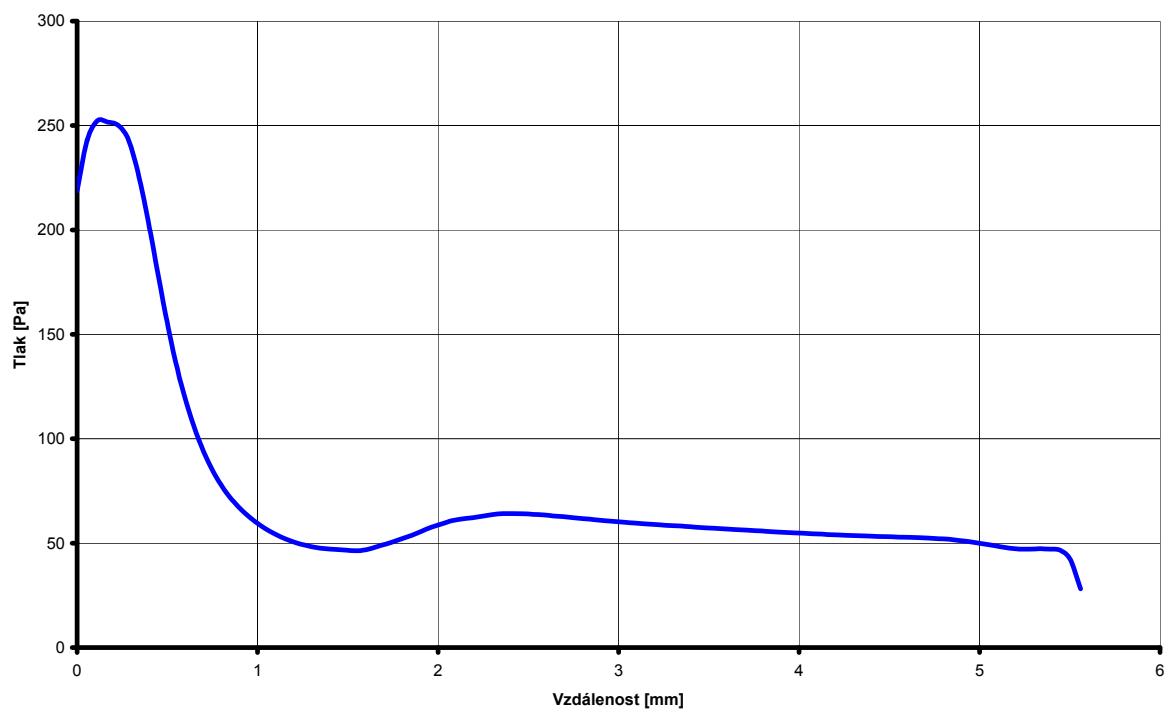
Obr. 10.35 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze OV 1000.

10.2.2 Vyhodnocení OV 800

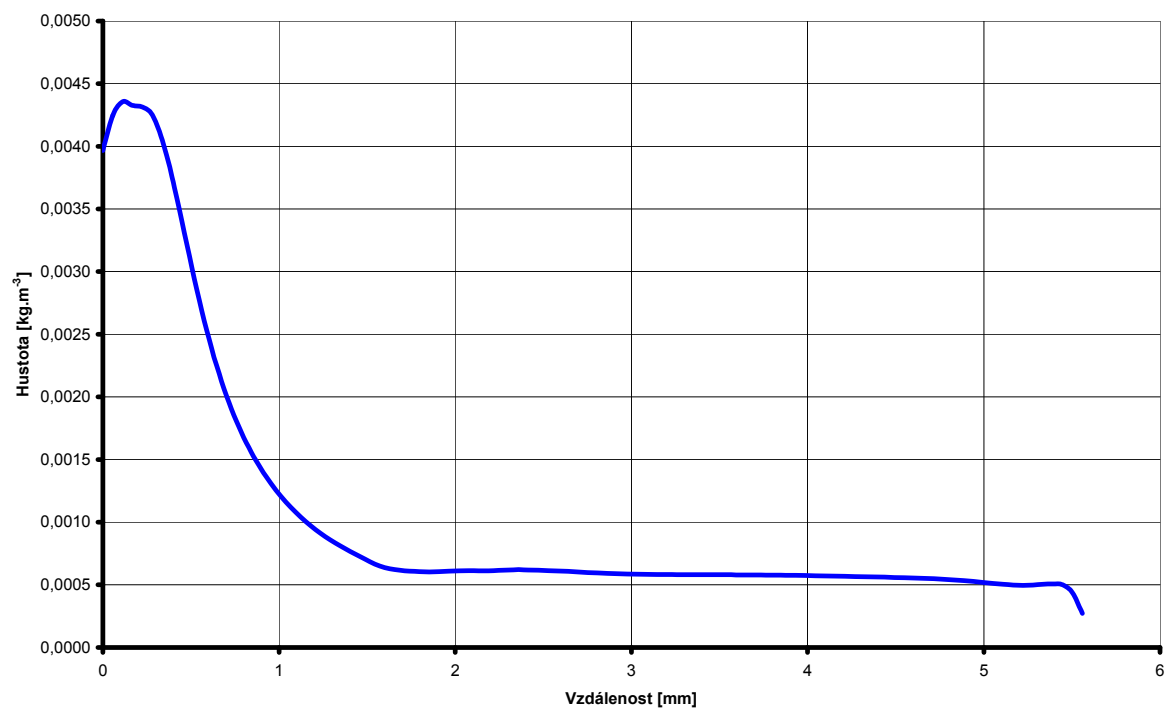
Tabulka 10.2 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	218,81	0,00397	500,63	1,80
0,06	243,05	0,00425	486,44	1,72
0,11	252,29	0,00436	481,51	1,69
0,17	251,60	0,00433	481,18	1,69
0,22	250,22	0,00431	482,32	1,69
0,28	243,98	0,00425	486,30	1,72
0,34	227,66	0,00405	495,06	1,77
0,39	204,41	0,00375	507,48	1,84
0,45	178,19	0,00340	521,96	1,93
0,51	152,94	0,00303	537,16	2,03
0,56	131,28	0,00269	550,89	2,11
0,62	113,69	0,00238	561,74	2,18
0,67	99,59	0,00212	570,72	2,23
0,73	88,37	0,00190	577,92	2,27
0,79	79,51	0,00172	583,47	2,29
0,84	72,51	0,00156	587,57	2,30
0,90	66,93	0,00142	590,40	2,30
0,95	62,44	0,00131	592,13	2,29
1,01	58,76	0,00121	592,85	2,27
1,07	55,71	0,00112	592,59	2,24
1,12	53,22	0,00104	591,32	2,21
1,18	51,19	0,00097	588,96	2,17
1,24	49,61	0,00091	585,49	2,12
1,29	48,43	0,00086	580,67	2,07
1,35	47,65	0,00081	574,37	2,00
1,40	47,09	0,00077	566,86	1,93
1,46	46,81	0,00073	558,04	1,86
1,52	46,51	0,00068	548,57	1,78
1,57	46,51	0,00065	536,78	1,70
1,63	47,37	0,00063	518,10	1,60
1,68	48,89	0,00062	494,83	1,49
1,74	50,37	0,00061	474,41	1,40
1,80	52,07	0,00061	452,67	1,31
1,85	53,78	0,00060	430,94	1,22
1,91	55,75	0,00061	408,96	1,14
1,97	57,73	0,00061	387,00	1,07
2,02	59,27	0,00061	367,74	1,00
2,08	60,74	0,00061	351,27	0,95
2,13	61,58	0,00061	335,03	0,89
2,19	62,20	0,00061	319,62	0,85
2,25	62,94	0,00061	304,61	0,81
2,30	63,70	0,00062	290,29	0,77
2,36	64,14	0,00062	278,59	0,73
2,41	64,13	0,00062	269,33	0,71
2,47	64,08	0,00062	260,30	0,68
2,53	63,78	0,00061	252,97	0,66
2,58	63,48	0,00061	245,66	0,64
2,64	63,05	0,00061	239,37	0,63
2,70	62,61	0,00060	233,20	0,61
2,75	62,14	0,00060	227,35	0,60
2,81	61,66	0,00059	221,64	0,58

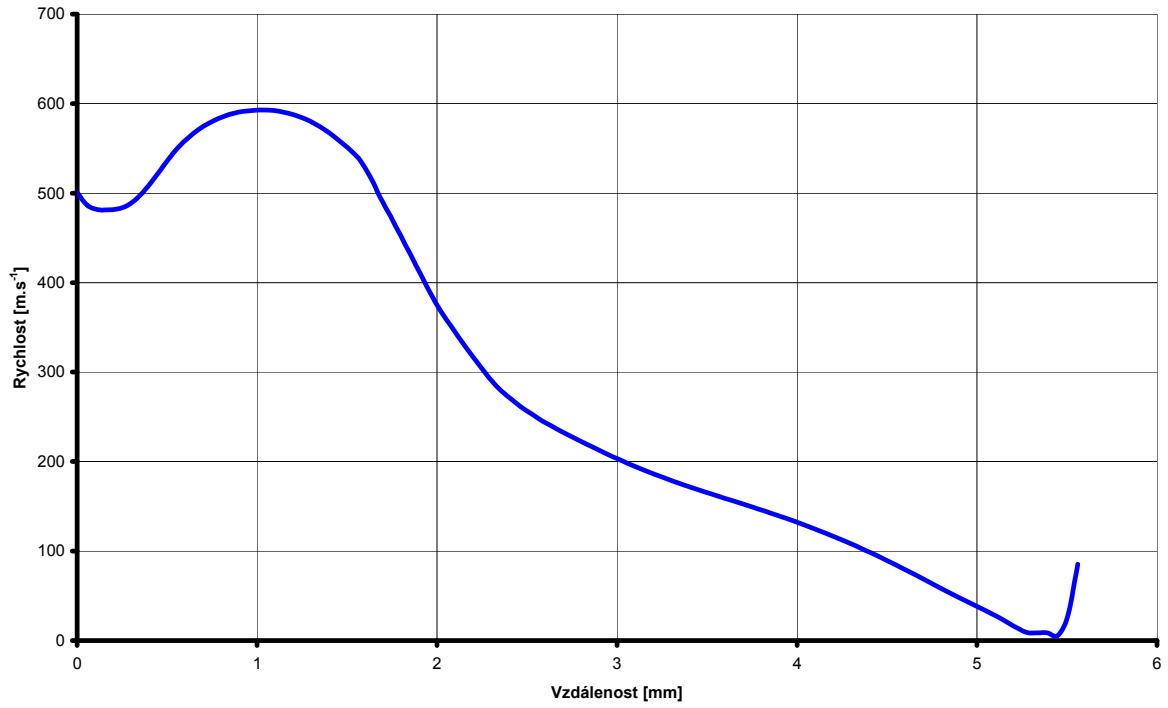
2,86	61,22	0,00059	216,11	0,57
2,92	60,80	0,00059	210,72	0,55
2,98	60,39	0,00059	205,47	0,54
3,03	60,01	0,00059	200,44	0,53
3,09	59,64	0,00058	195,50	0,52
3,15	59,28	0,00058	190,88	0,51
3,20	58,92	0,00058	186,28	0,49
3,26	58,60	0,00058	182,10	0,48
3,31	58,28	0,00058	177,95	0,47
3,37	57,97	0,00058	174,05	0,47
3,43	57,66	0,00058	170,23	0,46
3,48	57,36	0,00058	166,52	0,45
3,54	57,06	0,00058	162,88	0,44
3,59	56,77	0,00058	159,27	0,43
3,65	56,48	0,00058	155,68	0,42
3,71	56,19	0,00058	152,08	0,41
3,76	55,91	0,00058	148,43	0,40
3,82	55,63	0,00058	144,78	0,39
3,88	55,37	0,00058	140,94	0,38
3,93	55,10	0,00058	137,11	0,37
3,99	54,85	0,00057	133,05	0,36
4,04	54,61	0,00057	128,95	0,35
4,10	54,38	0,00057	124,62	0,34
4,16	54,15	0,00057	120,19	0,33
4,21	53,94	0,00057	115,58	0,32
4,27	53,74	0,00057	110,78	0,30
4,32	53,55	0,00056	105,89	0,29
4,38	53,37	0,00056	100,73	0,28
4,44	53,20	0,00056	95,54	0,26
4,49	53,05	0,00056	90,05	0,25
4,55	52,90	0,00056	84,57	0,23
4,61	52,76	0,00055	78,83	0,22
4,66	52,63	0,00055	73,05	0,20
4,72	52,42	0,00055	67,06	0,18
4,77	52,18	0,00054	60,96	0,17
4,83	51,84	0,00054	54,93	0,15
4,89	51,32	0,00053	49,17	0,13
4,94	50,68	0,00053	43,69	0,12
5,00	49,96	0,00052	38,24	0,10
5,05	49,17	0,00051	32,68	0,09
5,11	48,35	0,00050	26,86	0,07
5,17	47,62	0,00050	20,62	0,06
5,22	47,15	0,00050	14,20	0,04
5,28	47,10	0,00050	8,84	0,03
5,34	47,30	0,00050	8,54	0,03
5,39	47,18	0,00051	8,61	0,03
5,45	46,54	0,00050	5,46	0,02
5,50	42,09	0,00044	27,25	0,08
5,56	28,13	0,00027	85,22	0,23



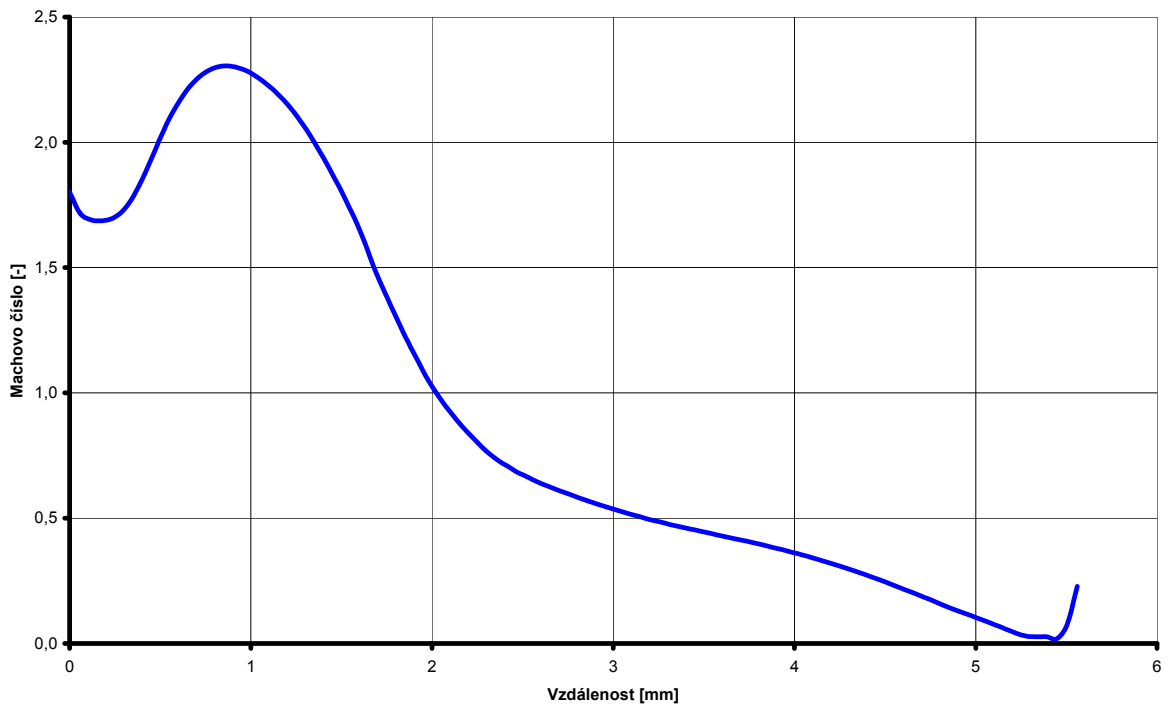
Obr. 10.36 Rozložení tlaku na křivce OV 800.



Obr. 10.37 Rozložení hustoty na křivce OV 800.



Obr. 10.38 Rozložení rychlostí na křivce OV 800.



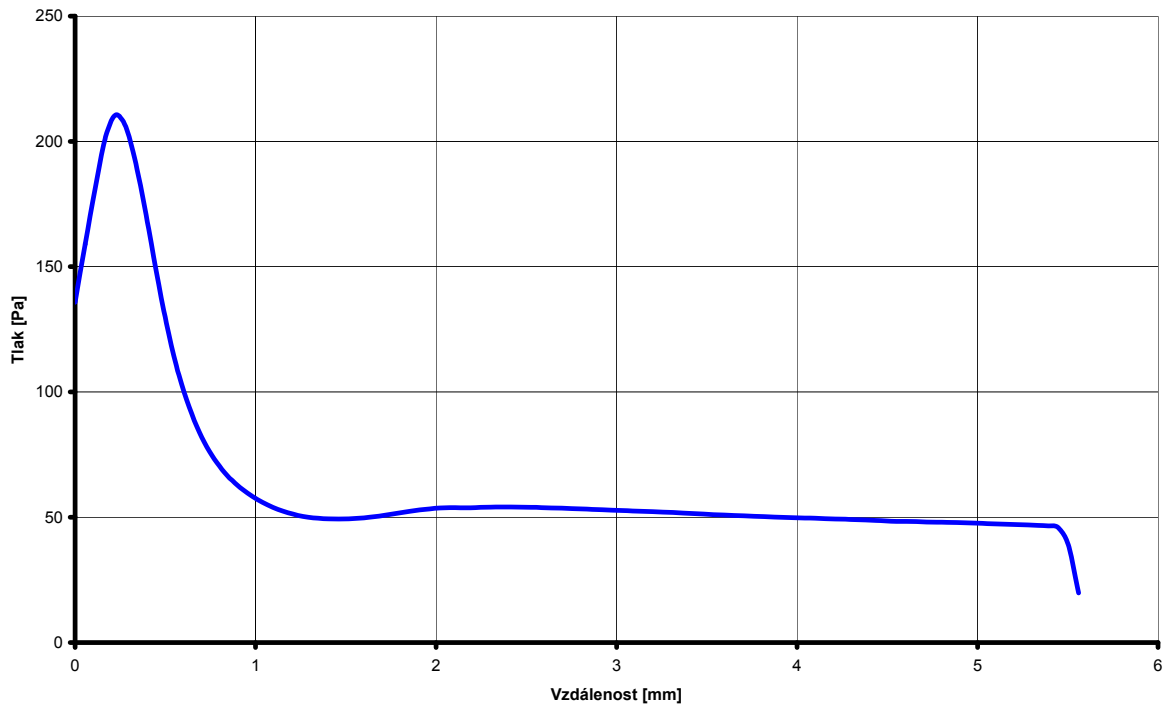
Obr. 10.39 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze OV 800.

10.2.3 Vyhodnocení OV 600

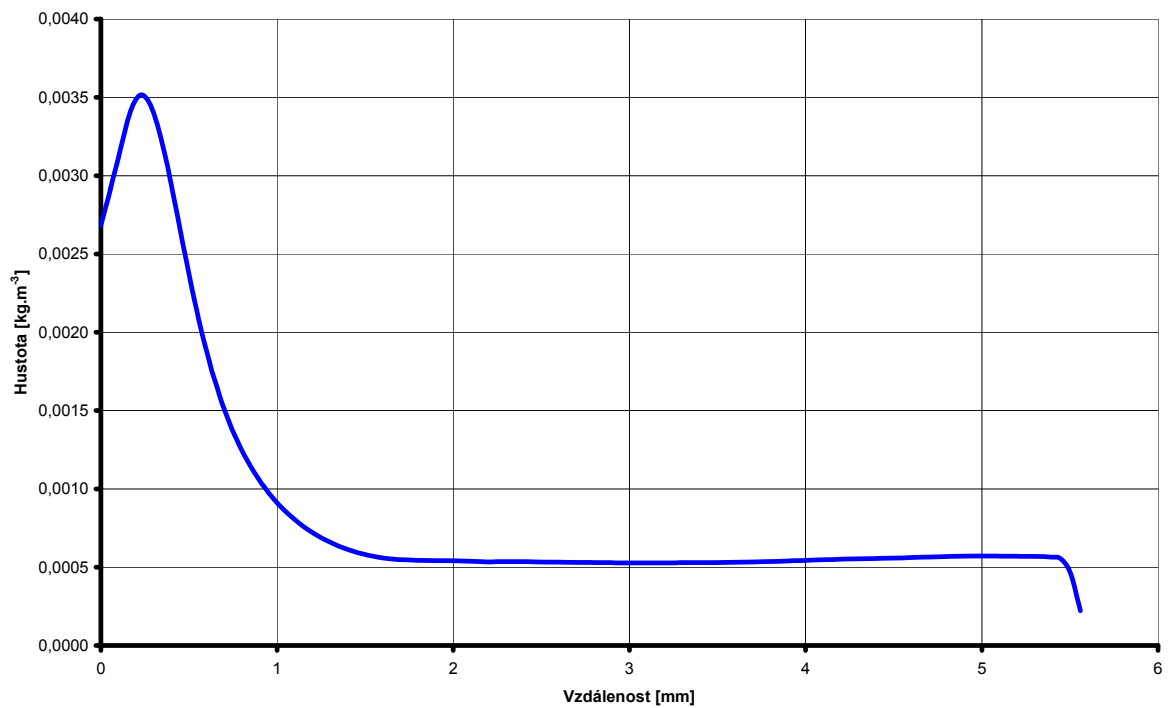
Tabulka 10.3 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	135,78	0,00268	525,60	1,98
0,06	159,03	0,00292	504,34	1,83
0,11	181,40	0,00317	486,90	1,73
0,17	201,79	0,00341	473,34	1,65
0,22	210,56	0,00352	468,87	1,62
0,28	205,87	0,00345	472,54	1,64
0,34	191,09	0,00326	481,77	1,68
0,39	170,57	0,00298	494,60	1,75
0,45	148,16	0,00266	509,06	1,83
0,51	127,51	0,00234	523,03	1,90
0,56	110,42	0,00205	534,33	1,95
0,62	96,84	0,00180	542,24	1,98
0,67	86,30	0,00160	547,48	1,99
0,73	78,10	0,00142	550,35	1,99
0,79	71,74	0,00128	551,17	1,97
0,84	66,74	0,00116	550,15	1,94
0,90	62,79	0,00106	547,48	1,90
0,95	59,61	0,00097	543,34	1,86
1,01	56,99	0,00090	537,84	1,81
1,07	54,85	0,00084	531,00	1,75
1,12	53,12	0,00078	522,78	1,70
1,18	51,78	0,00074	513,19	1,64
1,24	50,74	0,00070	502,20	1,58
1,29	50,04	0,00066	489,64	1,51
1,35	49,58	0,00064	475,76	1,44
1,40	49,33	0,00061	460,54	1,37
1,46	49,26	0,00059	444,13	1,30
1,52	49,34	0,00058	426,49	1,23
1,57	49,60	0,00056	407,78	1,16
1,63	50,00	0,00056	388,36	1,10
1,68	50,51	0,00055	368,64	1,03
1,74	51,12	0,00055	349,01	0,96
1,80	51,73	0,00054	329,91	0,90
1,85	52,34	0,00054	311,44	0,85
1,91	52,89	0,00054	293,88	0,80
1,97	53,34	0,00054	277,40	0,75
2,02	53,67	0,00054	261,98	0,70
2,08	53,84	0,00054	247,50	0,66
2,13	53,82	0,00054	234,43	0,63
2,19	53,82	0,00053	222,66	0,59
2,25	53,92	0,00053	211,09	0,56
2,30	54,06	0,00054	199,78	0,53
2,36	54,11	0,00054	189,91	0,51
2,41	54,07	0,00053	181,28	0,48
2,47	54,02	0,00053	172,78	0,46
2,53	53,93	0,00053	165,32	0,44
2,58	53,84	0,00053	157,86	0,42
2,64	53,72	0,00053	151,20	0,40
2,70	53,59	0,00053	144,60	0,38
2,75	53,45	0,00053	138,47	0,37
2,81	53,30	0,00053	132,51	0,35

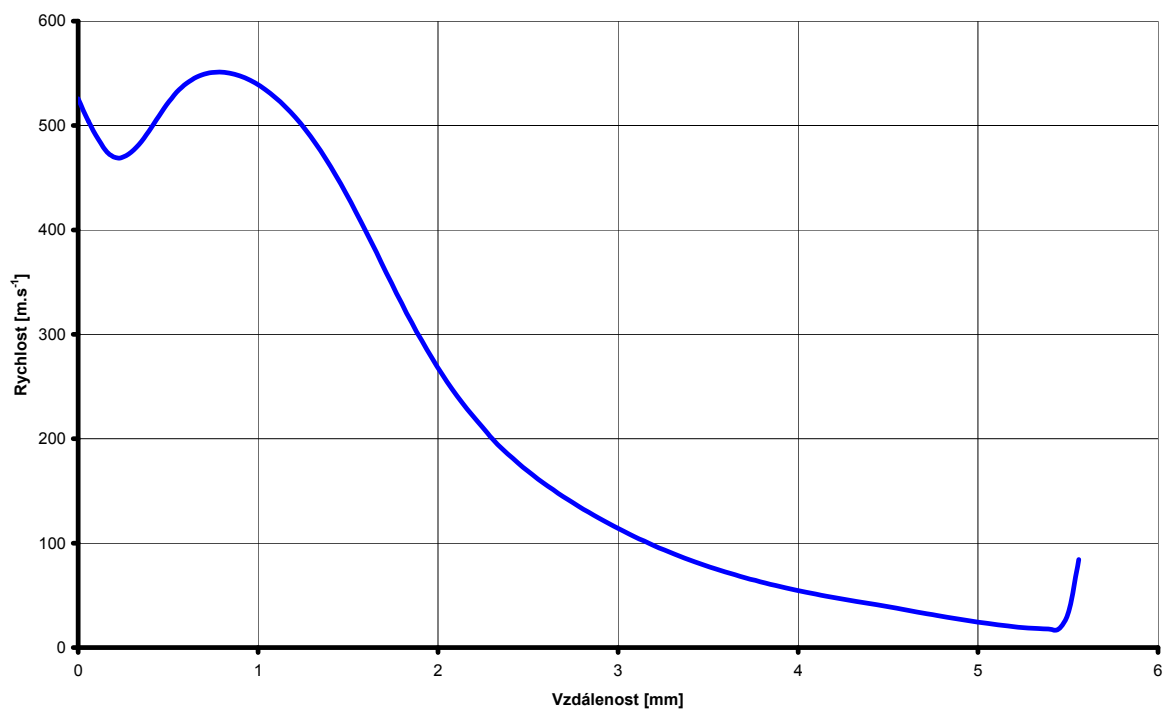
2,86	53,15	0,00053	126,84	0,34
2,92	52,99	0,00053	121,41	0,32
2,98	52,84	0,00053	116,16	0,31
3,03	52,69	0,00053	111,24	0,30
3,09	52,54	0,00053	106,39	0,29
3,15	52,38	0,00053	101,93	0,27
3,20	52,23	0,00053	97,48	0,26
3,26	52,06	0,00053	93,46	0,25
3,31	51,89	0,00053	89,47	0,24
3,37	51,68	0,00053	85,74	0,23
3,43	51,47	0,00053	82,10	0,22
3,48	51,26	0,00053	78,73	0,21
3,54	51,06	0,00053	75,55	0,21
3,59	50,87	0,00053	72,50	0,20
3,65	50,70	0,00053	69,62	0,19
3,71	50,53	0,00053	66,83	0,18
3,76	50,38	0,00054	64,28	0,18
3,82	50,23	0,00054	61,75	0,17
3,88	50,09	0,00054	59,46	0,16
3,93	49,96	0,00054	57,19	0,16
3,99	49,83	0,00054	55,09	0,15
4,04	49,71	0,00055	53,06	0,15
4,10	49,58	0,00055	51,11	0,14
4,16	49,45	0,00055	49,24	0,14
4,21	49,31	0,00055	47,45	0,13
4,27	49,18	0,00055	45,76	0,13
4,32	49,03	0,00055	44,12	0,13
4,38	48,87	0,00056	42,55	0,12
4,44	48,72	0,00056	41,07	0,12
4,49	48,49	0,00056	39,40	0,11
4,55	48,38	0,00056	37,58	0,11
4,61	48,31	0,00056	35,81	0,10
4,66	48,24	0,00056	34,07	0,10
4,72	48,14	0,00057	32,38	0,09
4,77	48,04	0,00057	30,69	0,09
4,83	47,96	0,00057	29,01	0,08
4,89	47,89	0,00057	27,38	0,08
4,94	47,81	0,00057	25,85	0,08
5,00	47,66	0,00057	24,47	0,07
5,05	47,51	0,00057	23,15	0,07
5,11	47,35	0,00057	21,86	0,06
5,17	47,20	0,00057	20,65	0,06
5,22	47,06	0,00057	19,56	0,06
5,28	46,93	0,00057	18,66	0,06
5,34	46,76	0,00057	18,11	0,05
5,39	46,51	0,00056	17,86	0,05
5,45	45,78	0,00055	17,76	0,05
5,50	38,97	0,00046	34,47	0,10
5,56	19,82	0,00022	84,23	0,24



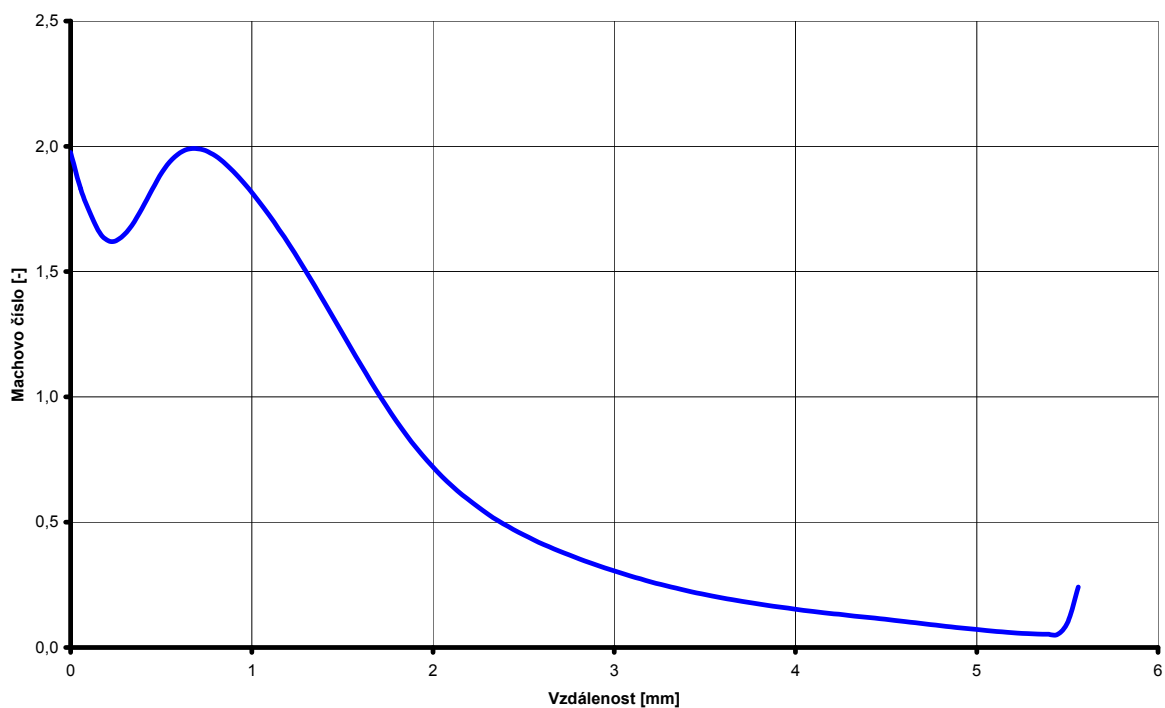
Obr. 10.40 Rozložení tlaku na křivce OV 600.



Obr. 10.41 Rozložení hustoty na křivce OV 600.



Obr. 10.42 Rozložení rychlostí na křivce OV 600.



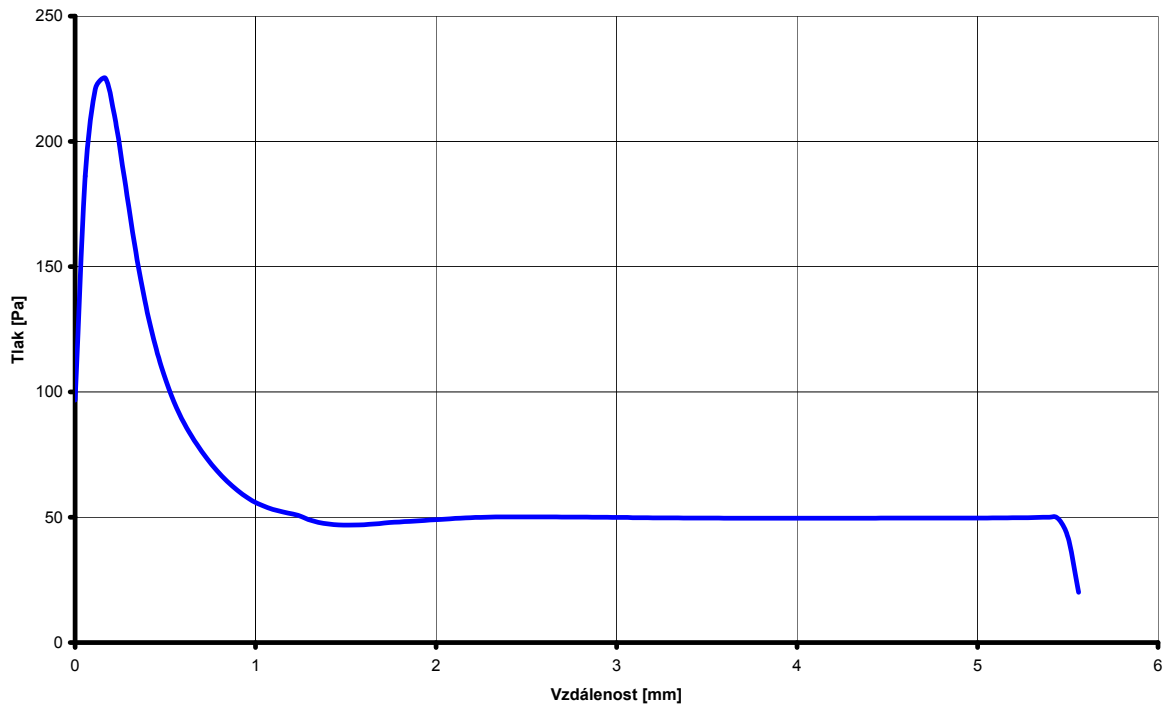
Obr. 10.43 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze OV 600.

10.2.4 Vyhodnocení OV 400

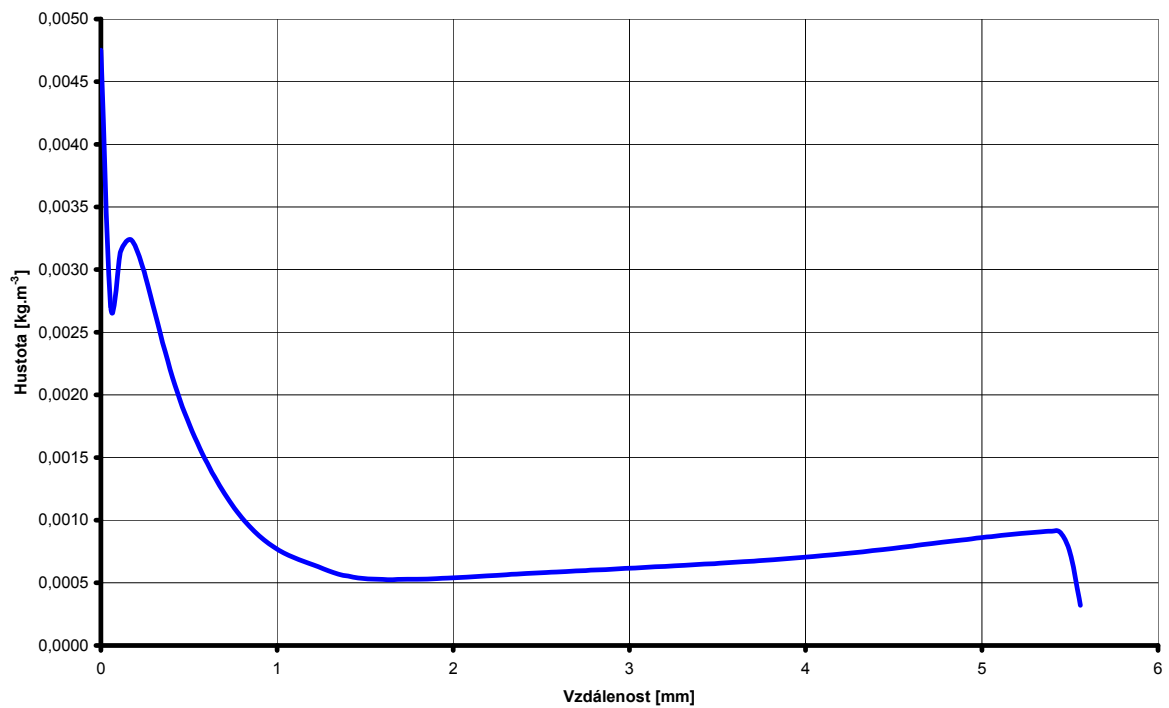
Tabulka 10.4 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	96,80	0,00475	182,39	1,08
0,06	186,12	0,00270	401,79	1,30
0,11	220,92	0,00314	372,80	1,19
0,17	225,13	0,00324	370,93	1,19
0,22	207,62	0,00308	385,13	1,26
0,28	181,78	0,00280	404,99	1,35
0,34	155,78	0,00249	425,30	1,44
0,39	133,96	0,00220	442,44	1,52
0,45	117,16	0,00196	454,56	1,57
0,51	104,09	0,00175	462,47	1,61
0,56	93,77	0,00157	468,12	1,62
0,62	85,63	0,00142	471,97	1,62
0,67	79,16	0,00128	474,53	1,61
0,73	73,54	0,00115	475,85	1,59
0,79	68,61	0,00104	475,65	1,57
0,84	64,38	0,00095	474,09	1,54
0,90	60,75	0,00088	471,53	1,51
0,95	57,77	0,00081	468,29	1,48
1,01	55,51	0,00076	464,52	1,45
1,07	53,87	0,00072	460,19	1,42
1,12	52,63	0,00069	454,96	1,39
1,18	51,64	0,00066	448,08	1,35
1,24	50,75	0,00063	439,26	1,31
1,29	49,16	0,00060	430,22	1,27
1,35	47,92	0,00057	418,47	1,22
1,40	47,34	0,00055	403,83	1,17
1,46	46,89	0,00054	388,73	1,12
1,52	46,84	0,00053	370,27	1,06
1,57	46,95	0,00053	351,53	1,00
1,63	47,13	0,00053	334,31	0,95
1,68	47,51	0,00053	317,13	0,89
1,74	47,86	0,00053	300,31	0,84
1,80	48,10	0,00053	284,56	0,80
1,85	48,34	0,00053	268,90	0,75
1,91	48,61	0,00053	254,51	0,71
1,97	48,88	0,00054	240,13	0,67
2,02	49,14	0,00054	227,28	0,64
2,08	49,40	0,00055	214,65	0,60
2,13	49,62	0,00055	203,31	0,57
2,19	49,81	0,00056	192,57	0,54
2,25	49,96	0,00056	182,69	0,52
2,30	50,06	0,00057	173,68	0,49
2,36	50,13	0,00057	165,09	0,47
2,41	50,16	0,00057	157,49	0,45
2,47	50,18	0,00058	150,01	0,43
2,53	50,17	0,00058	143,53	0,41
2,58	50,15	0,00059	137,05	0,40
2,64	50,13	0,00059	131,40	0,38
2,70	50,10	0,00059	125,83	0,37
2,75	50,07	0,00060	120,78	0,35
2,81	50,04	0,00060	115,93	0,34

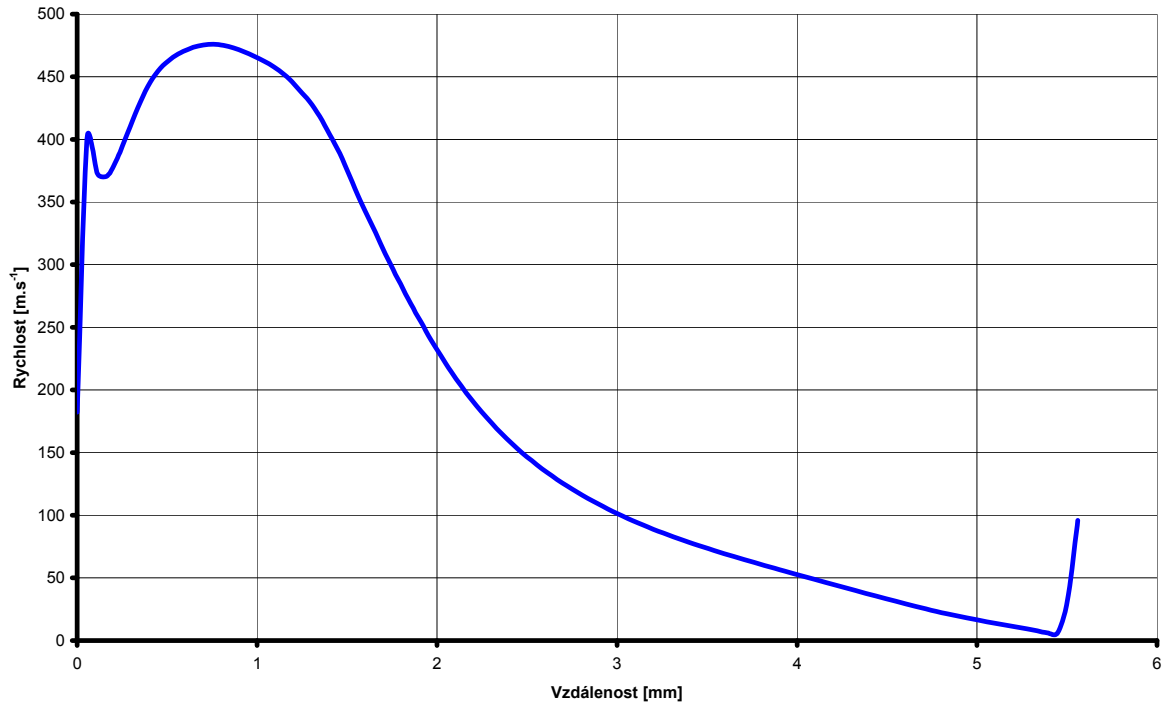
2,86	50,01	0,00061	111,40	0,33
2,92	49,97	0,00061	107,14	0,32
2,98	49,94	0,00061	103,06	0,31
3,03	49,90	0,00062	99,29	0,30
3,09	49,87	0,00062	95,59	0,29
3,15	49,83	0,00063	92,23	0,28
3,20	49,80	0,00063	88,87	0,27
3,26	49,77	0,00064	85,82	0,26
3,31	49,74	0,00064	82,79	0,25
3,37	49,72	0,00064	79,96	0,24
3,43	49,69	0,00065	77,19	0,24
3,48	49,67	0,00065	74,53	0,23
3,54	49,65	0,00066	71,96	0,22
3,59	49,64	0,00066	69,44	0,21
3,65	49,62	0,00067	67,01	0,21
3,71	49,61	0,00067	64,60	0,20
3,76	49,60	0,00068	62,26	0,19
3,82	49,59	0,00069	59,95	0,19
3,88	49,59	0,00069	57,67	0,18
3,93	49,59	0,00070	55,41	0,18
3,99	49,59	0,00070	53,17	0,17
4,04	49,59	0,00071	50,95	0,16
4,10	49,59	0,00072	48,73	0,16
4,16	49,60	0,00072	46,53	0,15
4,21	49,60	0,00073	44,33	0,14
4,27	49,61	0,00074	42,13	0,14
4,32	49,62	0,00075	39,96	0,13
4,38	49,63	0,00076	37,77	0,12
4,44	49,64	0,00077	35,62	0,12
4,49	49,65	0,00077	33,46	0,11
4,55	49,66	0,00078	31,34	0,11
4,61	49,66	0,00079	29,24	0,10
4,66	49,67	0,00080	27,18	0,09
4,72	49,67	0,00081	25,17	0,09
4,77	49,66	0,00082	23,18	0,08
4,83	49,66	0,00083	21,38	0,07
4,89	49,66	0,00084	19,79	0,07
4,94	49,67	0,00085	18,19	0,06
5,00	49,69	0,00086	16,49	0,06
5,05	49,71	0,00087	14,98	0,05
5,11	49,75	0,00088	13,53	0,05
5,17	49,80	0,00089	12,10	0,04
5,22	49,84	0,00089	10,67	0,04
5,28	49,88	0,00090	9,23	0,03
5,34	49,95	0,00091	7,71	0,03
5,39	50,02	0,00091	6,23	0,02
5,45	49,47	0,00090	6,12	0,02
5,50	41,45	0,00073	33,35	0,12
5,56	20,03	0,00032	95,92	0,33



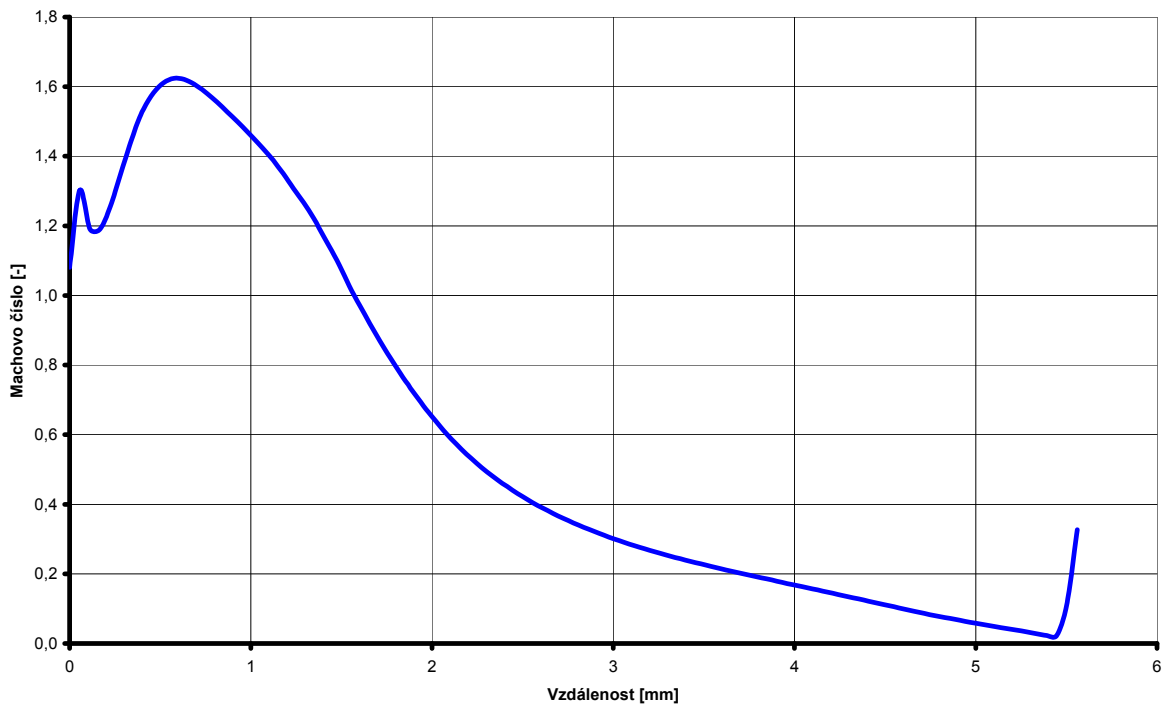
Obr. 10.44 Rozložení tlaku na křivce OV 400.



Obr. 10.45 Rozložení hustoty na křivce OV 400.



Obr. 10.46 Rozložení rychlostí na křivce OV 400.



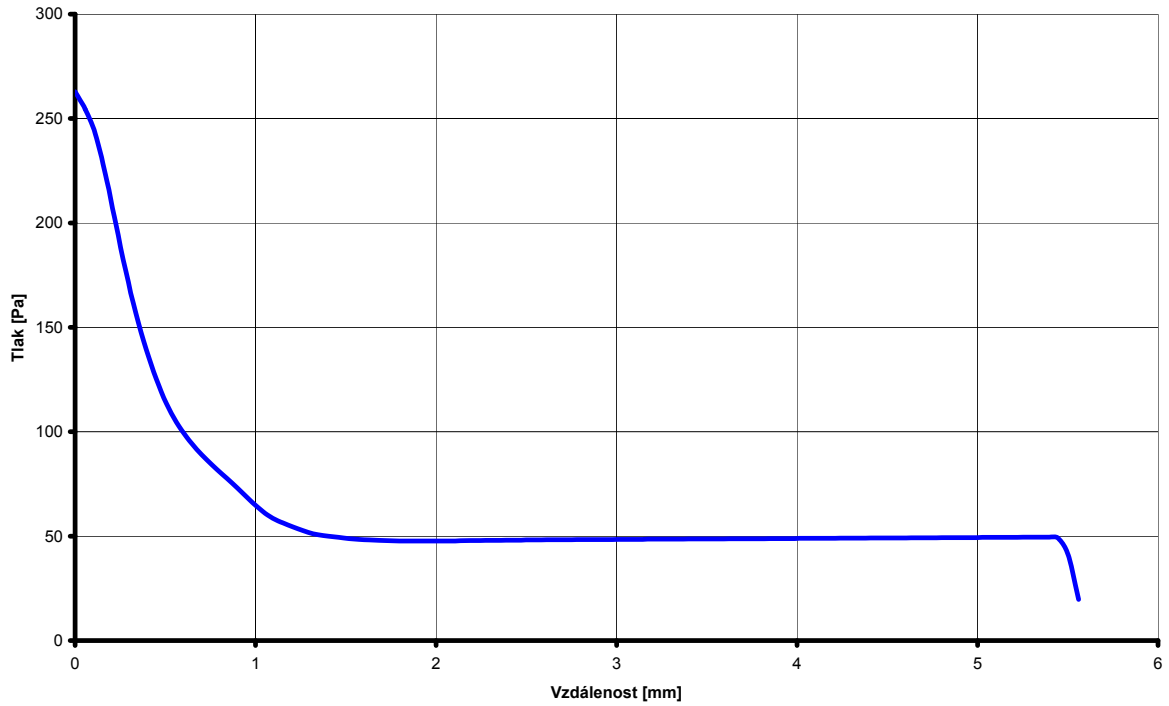
Obr. 10.47 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze OV 400.

10.2.5 Vyhodnocení OV 200

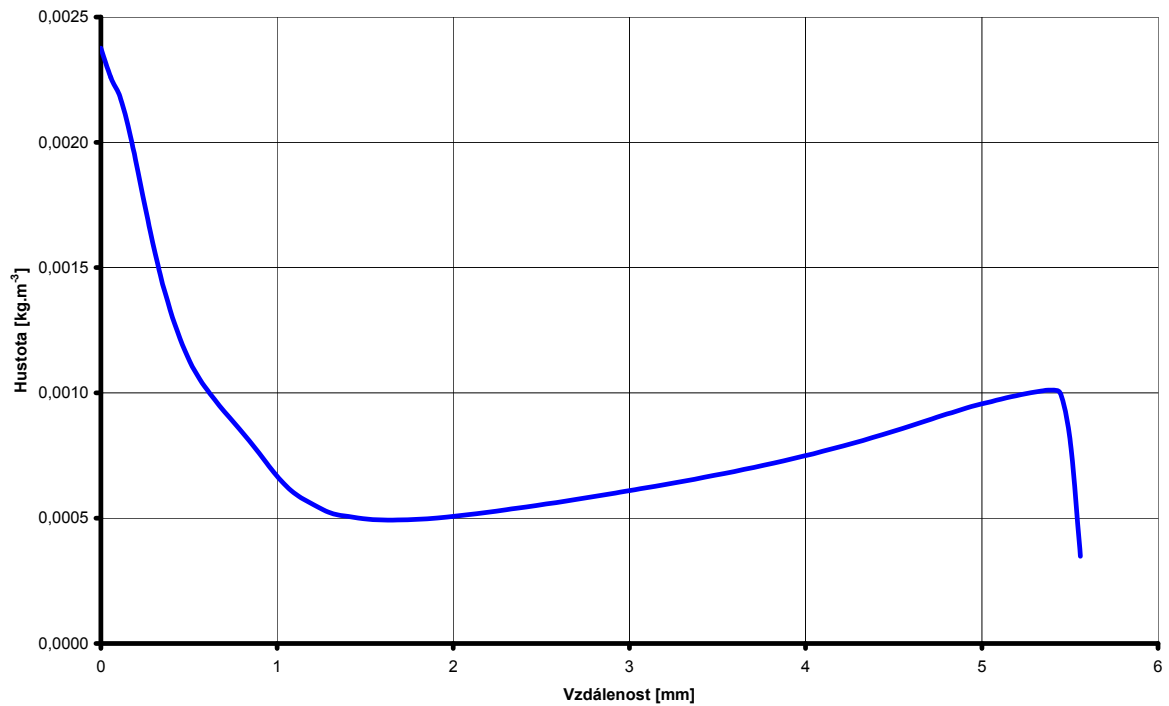
Tabulka 10.5 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	262,79	0,00238	355,13	0,90
0,06	254,48	0,00226	365,99	0,92
0,11	242,62	0,00217	380,32	0,96
0,17	223,03	0,00202	401,40	1,02
0,22	199,79	0,00183	423,69	1,09
0,28	176,93	0,00164	442,35	1,14
0,34	156,58	0,00147	455,03	1,18
0,39	139,51	0,00133	461,57	1,21
0,45	125,27	0,00122	463,52	1,22
0,51	113,57	0,00112	462,08	1,23
0,56	104,54	0,00105	457,85	1,23
0,62	97,38	0,00100	451,77	1,22
0,67	91,48	0,00095	444,25	1,21
0,73	86,47	0,00090	435,45	1,19
0,79	81,94	0,00086	425,27	1,16
0,84	77,57	0,00081	413,35	1,13
0,90	73,03	0,00076	399,22	1,09
0,95	68,36	0,00071	382,64	1,04
1,01	63,87	0,00066	364,35	0,99
1,07	60,07	0,00062	346,02	0,94
1,12	57,31	0,00059	328,37	0,89
1,18	55,34	0,00057	309,49	0,84
1,24	53,46	0,00054	296,64	0,80
1,29	51,75	0,00052	282,57	0,76
1,35	50,59	0,00051	269,91	0,73
1,40	50,00	0,00051	254,45	0,69
1,46	49,36	0,00050	240,43	0,65
1,52	48,84	0,00050	227,86	0,62
1,57	48,43	0,00049	215,69	0,58
1,63	48,13	0,00049	203,98	0,55
1,68	47,95	0,00049	192,87	0,52
1,74	47,80	0,00049	182,08	0,50
1,80	47,73	0,00050	172,25	0,47
1,85	47,66	0,00050	162,49	0,44
1,91	47,66	0,00050	153,93	0,42
1,97	47,66	0,00050	145,36	0,40
2,02	47,70	0,00051	137,87	0,38
2,08	47,74	0,00051	130,53	0,36
2,13	47,79	0,00052	123,98	0,35
2,19	47,85	0,00052	117,80	0,33
2,25	47,90	0,00053	112,13	0,31
2,30	47,96	0,00053	106,98	0,30
2,36	48,01	0,00054	102,09	0,29
2,41	48,06	0,00055	97,79	0,28
2,47	48,11	0,00055	93,57	0,27
2,53	48,15	0,00056	89,95	0,26
2,58	48,19	0,00056	86,33	0,25
2,64	48,23	0,00057	83,21	0,24
2,70	48,26	0,00057	80,13	0,23
2,75	48,29	0,00058	77,36	0,23
2,81	48,32	0,00059	74,70	0,22

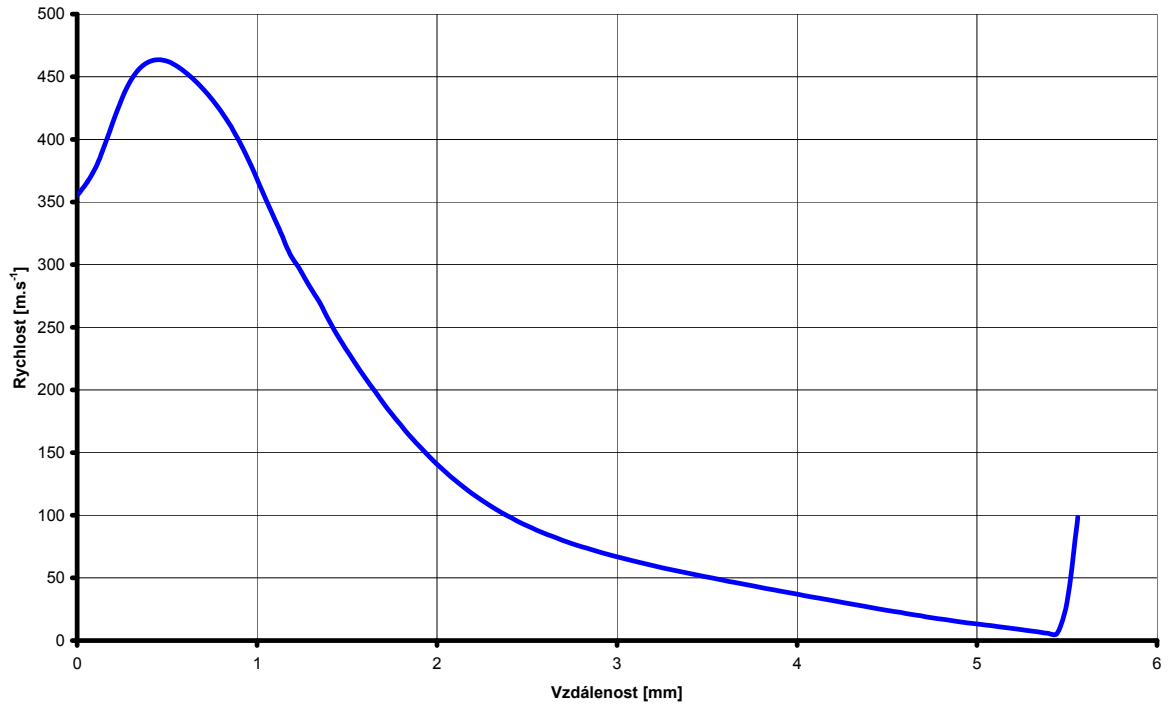
2,86	48,35	0,00059	72,22	0,21
2,92	48,38	0,00060	69,89	0,21
2,98	48,41	0,00061	67,64	0,20
3,03	48,43	0,00061	65,56	0,20
3,09	48,46	0,00062	63,51	0,19
3,15	48,48	0,00063	61,62	0,19
3,20	48,50	0,00063	59,72	0,18
3,26	48,53	0,00064	57,95	0,18
3,31	48,55	0,00065	56,20	0,17
3,37	48,57	0,00066	54,51	0,17
3,43	48,60	0,00066	52,84	0,17
3,48	48,62	0,00067	51,21	0,16
3,54	48,65	0,00068	49,61	0,16
3,59	48,67	0,00069	48,03	0,15
3,65	48,70	0,00069	46,47	0,15
3,71	48,72	0,00070	44,92	0,14
3,76	48,75	0,00071	43,39	0,14
3,82	48,78	0,00072	41,88	0,14
3,88	48,80	0,00073	40,36	0,13
3,93	48,83	0,00074	38,86	0,13
3,99	48,86	0,00075	37,36	0,12
4,04	48,89	0,00076	35,88	0,12
4,10	48,91	0,00077	34,40	0,12
4,16	48,94	0,00078	32,93	0,11
4,21	48,97	0,00079	31,47	0,11
4,27	49,00	0,00080	30,02	0,10
4,32	49,03	0,00081	28,58	0,10
4,38	49,06	0,00082	27,15	0,09
4,44	49,08	0,00083	25,75	0,09
4,49	49,11	0,00085	24,34	0,09
4,55	49,14	0,00086	22,97	0,08
4,61	49,16	0,00087	21,60	0,08
4,66	49,19	0,00088	20,27	0,07
4,72	49,21	0,00090	18,97	0,07
4,77	49,24	0,00091	17,71	0,06
4,83	49,26	0,00092	16,51	0,06
4,89	49,29	0,00093	15,33	0,06
4,94	49,32	0,00095	14,21	0,05
5,00	49,34	0,00096	13,29	0,05
5,05	49,37	0,00097	12,37	0,05
5,11	49,39	0,00098	11,27	0,04
5,17	49,41	0,00098	10,30	0,04
5,22	49,45	0,00099	9,19	0,03
5,28	49,47	0,00100	8,06	0,03
5,34	49,53	0,00101	6,91	0,03
5,39	49,53	0,00101	5,84	0,02
5,45	48,90	0,00100	6,38	0,03
5,50	40,78	0,00080	34,13	0,13
5,56	19,69	0,00035	98,40	0,35



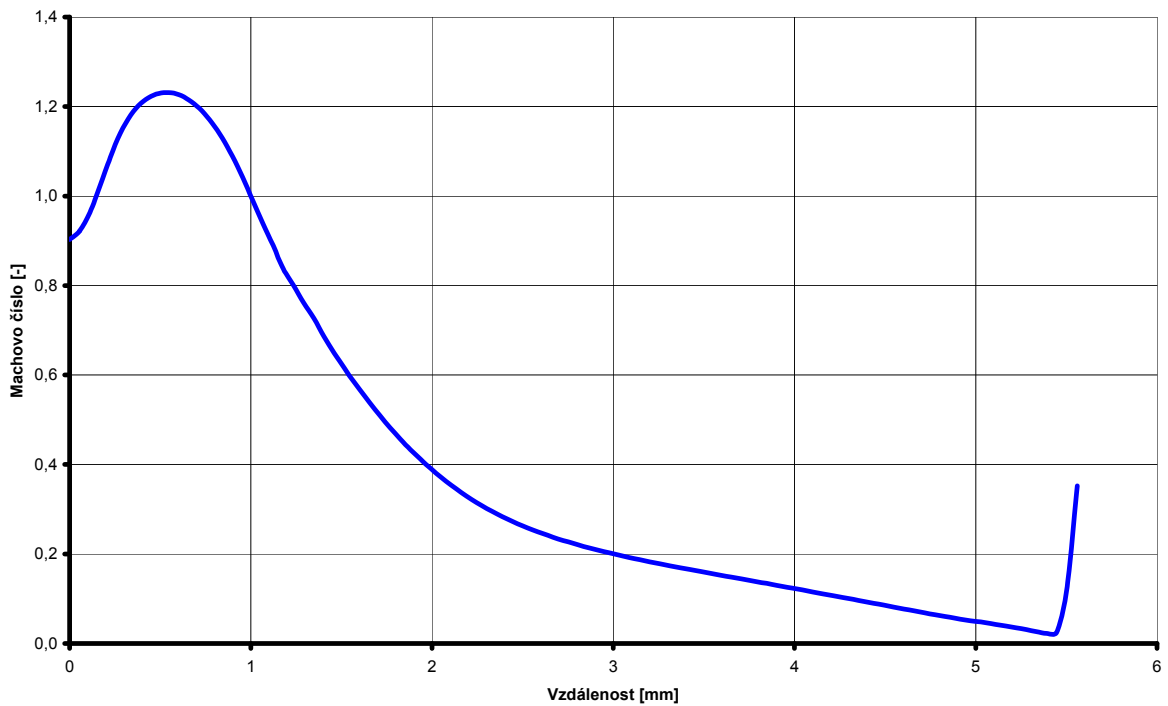
Obr. 10.48 Rozložení tlaku na křivce OV 200.



Obr. 10.49 Rozložení hustoty na křivce OV 200.



Obr. 10.50 Rozložení rychlostí na křivce OV 200.



Obr. 10.51 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze OV 200.

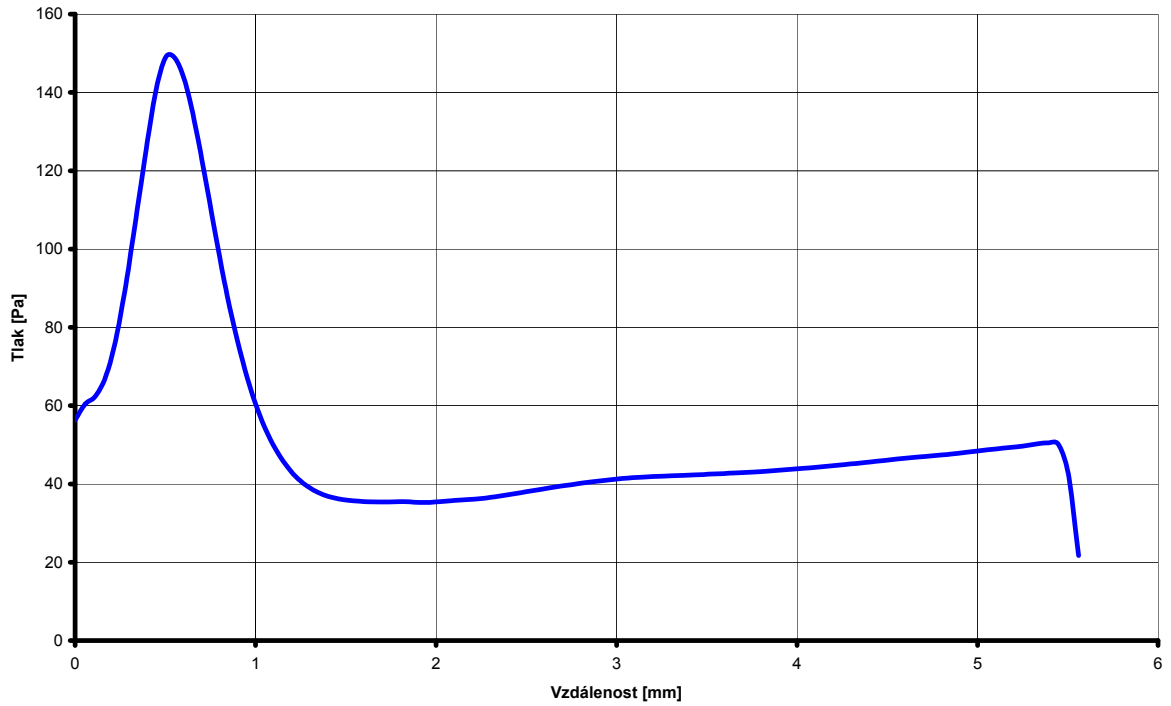
10.3 Výsledky měření uzavřené varianty komory

Zcela analogicky jsou zpracovány výsledky u varianty uzavřené komory diferenciálního čerpání (obr. 3.9).

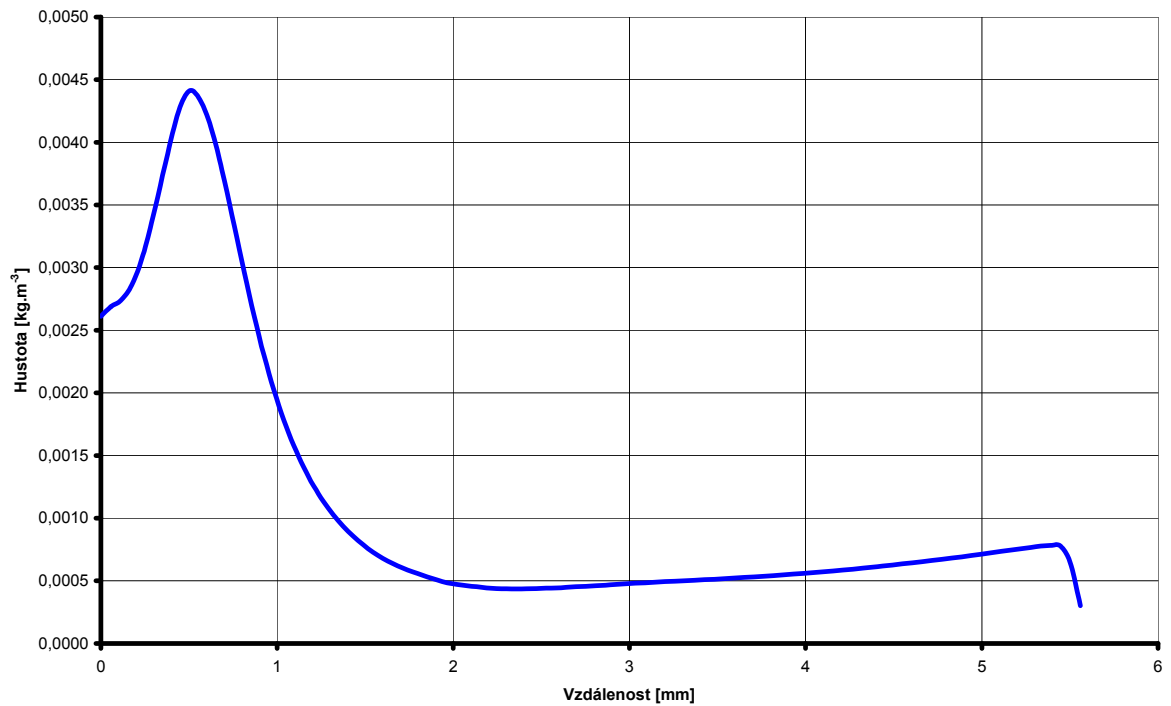
10.3.1 Vyhodnocení UV 1000

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	56,34	0,00261	679,22	3,91
0,06	60,41	0,00269	675,93	3,82
0,11	62,40	0,00274	674,61	3,78
0,17	67,35	0,00284	671,15	3,69
0,22	76,78	0,00303	664,86	3,55
0,28	90,75	0,00332	656,55	3,37
0,34	107,72	0,00365	647,61	3,20
0,39	125,36	0,00399	639,13	3,06
0,45	140,83	0,00428	632,05	2,95
0,51	149,27	0,00441	628,37	2,89
0,56	148,26	0,00434	628,49	2,87
0,62	141,15	0,00415	630,45	2,89
0,67	129,65	0,00386	634,21	2,93
0,73	115,94	0,00351	639,16	2,98
0,79	101,69	0,00315	644,99	3,04
0,84	88,29	0,00278	650,94	3,09
0,90	76,61	0,00245	656,25	3,14
0,95	66,88	0,00215	660,67	3,17
1,01	59,00	0,00190	664,18	3,19
1,07	52,77	0,00168	666,65	3,18
1,12	47,92	0,00149	668,05	3,15
1,18	44,17	0,00133	668,35	3,10
1,24	41,31	0,00119	667,44	3,04
1,29	39,28	0,00108	665,16	2,95
1,35	37,80	0,00098	661,57	2,85
1,40	36,78	0,00089	656,47	2,74
1,46	36,17	0,00082	649,81	2,62
1,52	35,80	0,00076	641,64	2,50
1,57	35,57	0,00070	631,83	2,38
1,63	35,44	0,00066	620,82	2,26
1,68	35,37	0,00062	609,22	2,16
1,74	35,39	0,00059	597,03	2,06
1,80	35,49	0,00056	584,08	1,96
1,85	35,41	0,00053	570,64	1,87
1,91	35,29	0,00051	552,86	1,77
1,97	35,30	0,00048	537,90	1,69
2,02	35,49	0,00047	522,64	1,62
2,08	35,70	0,00046	507,32	1,54
2,13	35,87	0,00045	491,65	1,48
2,19	36,02	0,00044	475,81	1,41
2,25	36,25	0,00044	459,79	1,35
2,30	36,58	0,00044	443,59	1,30
2,36	36,93	0,00044	427,67	1,24
2,41	37,35	0,00044	412,40	1,19
2,47	37,77	0,00044	397,30	1,14

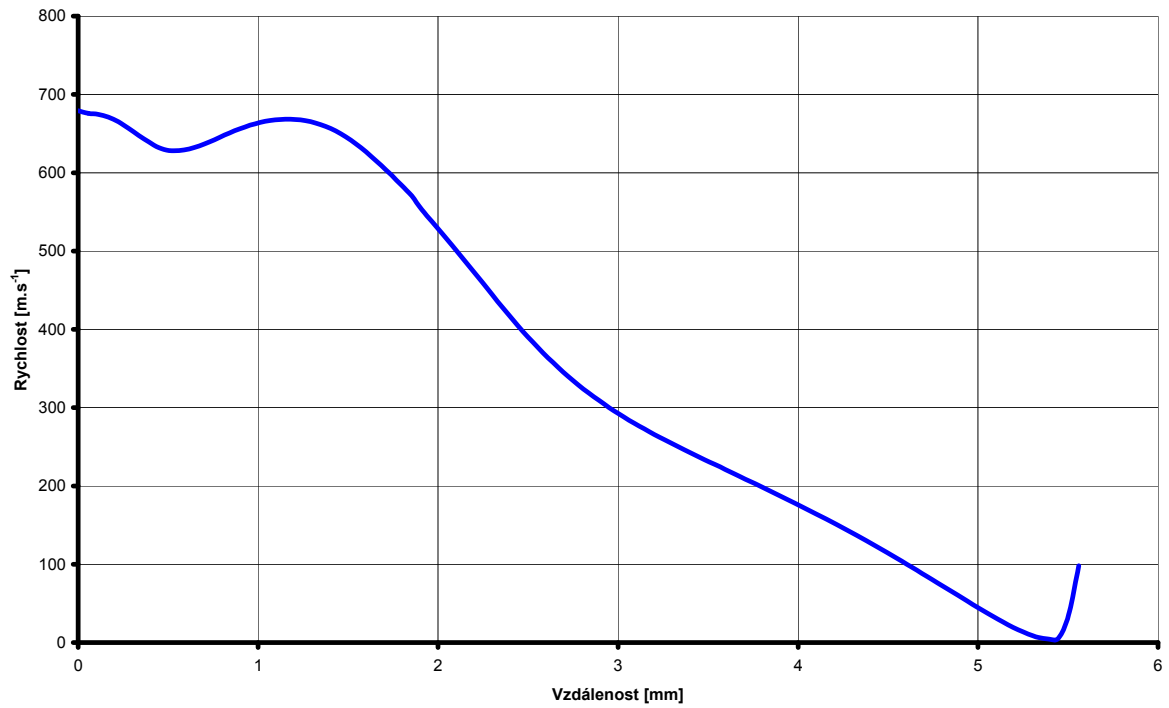
2,53	38,20	0,00044	383,63	1,10
2,58	38,63	0,00044	369,97	1,06
2,64	39,05	0,00045	357,69	1,02
2,70	39,46	0,00045	345,53	0,99
2,75	39,84	0,00046	334,48	0,96
2,81	40,21	0,00046	323,84	0,93
2,86	40,55	0,00047	313,97	0,90
2,92	40,86	0,00047	304,77	0,87
2,98	41,14	0,00048	295,99	0,85
3,03	41,37	0,00048	287,98	0,83
3,09	41,58	0,00048	280,12	0,81
3,15	41,73	0,00049	272,97	0,79
3,20	41,87	0,00049	265,82	0,77
3,26	41,99	0,00050	259,14	0,75
3,31	42,10	0,00050	252,50	0,74
3,37	42,20	0,00050	246,08	0,72
3,43	42,31	0,00051	239,72	0,70
3,48	42,42	0,00051	233,46	0,69
3,54	42,53	0,00052	227,26	0,67
3,59	42,65	0,00052	221,07	0,65
3,65	42,78	0,00053	214,91	0,64
3,71	42,92	0,00053	208,75	0,62
3,76	43,07	0,00054	202,55	0,60
3,82	43,23	0,00054	196,37	0,59
3,88	43,41	0,00055	190,08	0,57
3,93	43,59	0,00055	183,80	0,55
3,99	43,80	0,00056	177,39	0,54
4,04	44,01	0,00057	170,96	0,52
4,10	44,23	0,00057	164,40	0,50
4,16	44,47	0,00058	157,76	0,48
4,21	44,71	0,00059	151,00	0,46
4,27	44,97	0,00059	144,11	0,44
4,32	45,23	0,00060	137,14	0,42
4,38	45,50	0,00061	129,96	0,40
4,44	45,77	0,00062	122,76	0,38
4,49	46,04	0,00063	115,27	0,36
4,55	46,31	0,00063	107,79	0,34
4,61	46,57	0,00064	100,04	0,31
4,66	46,83	0,00065	92,26	0,29
4,72	47,06	0,00066	84,32	0,27
4,77	47,28	0,00067	76,31	0,24
4,83	47,50	0,00068	68,42	0,22
4,89	47,78	0,00069	60,59	0,20
4,94	48,10	0,00070	52,67	0,17
5,00	48,40	0,00071	44,77	0,15
5,05	48,69	0,00072	37,13	0,12
5,11	48,97	0,00074	29,76	0,10
5,17	49,25	0,00075	22,80	0,08
5,22	49,53	0,00076	16,43	0,06
5,28	49,87	0,00077	10,90	0,04
5,34	50,27	0,00078	6,68	0,02
5,39	50,47	0,00078	4,58	0,02
5,45	50,18	0,00078	5,91	0,02
5,50	42,57	0,00064	35,83	0,12
5,56	21,72	0,00030	98,29	0,31



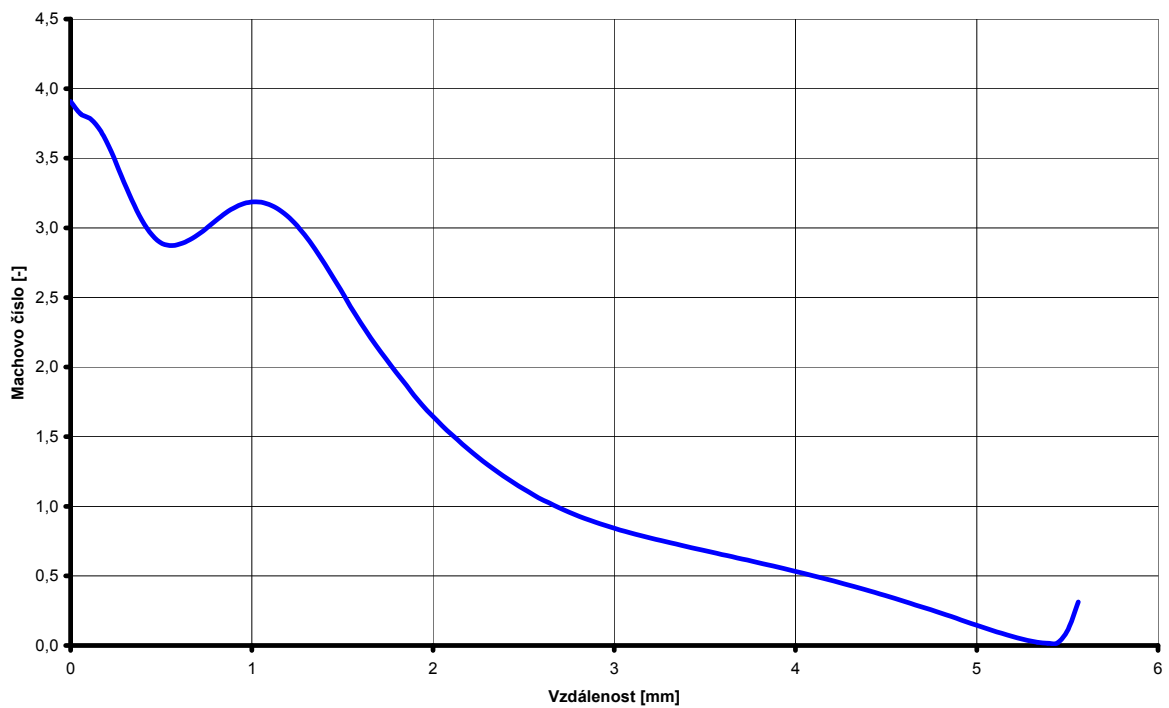
Obr. 10.52 Rozložení tlaku na křivce UV 1000.



Obr. 10.53 Rozložení hustoty na křivce UV 1000.



Obr. 10.54 Rozložení rychlostí na křivce UV 1000.



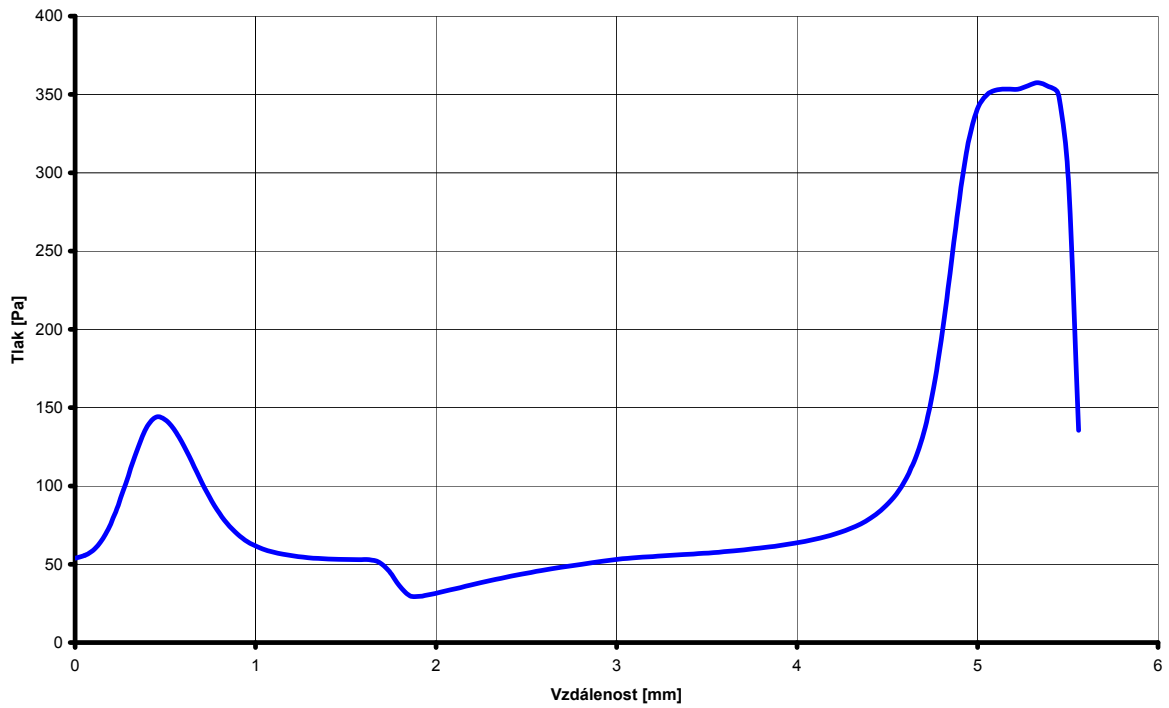
Obr. 10.55 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze UV 1000.

10.3.2 Vyhodnocení UV 800

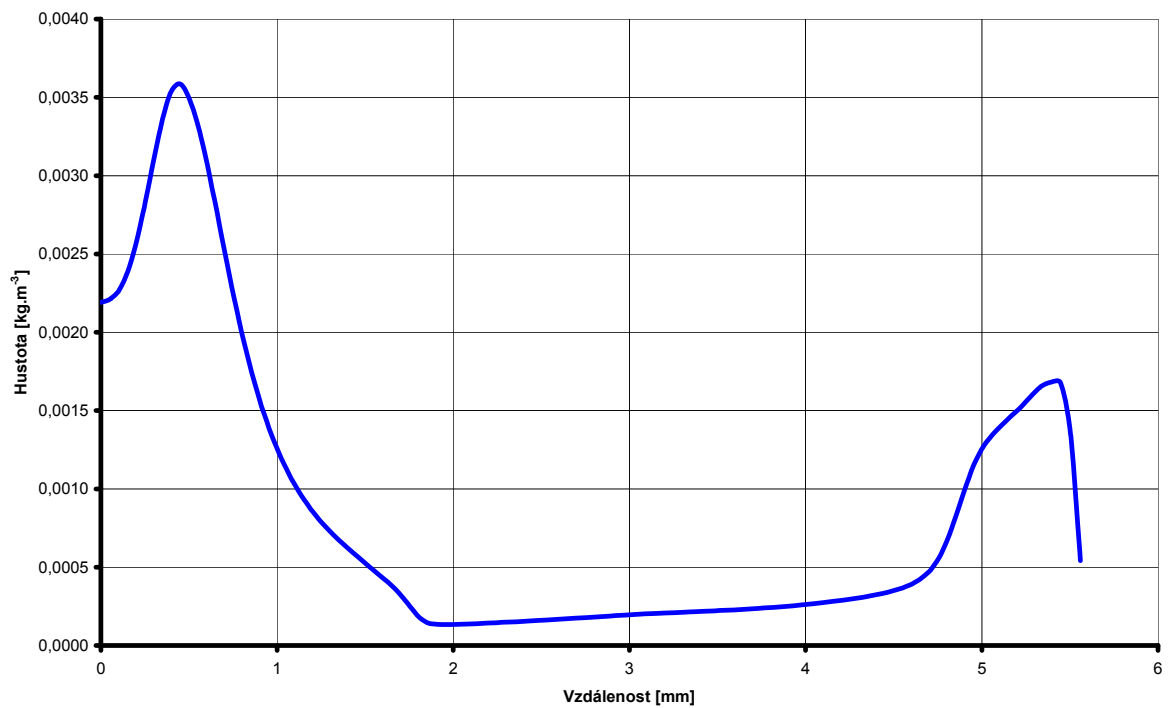
Tabulka 10.7 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	53,92	0,00219	665,09	3,58
0,06	55,76	0,00221	663,82	3,54
0,11	60,13	0,00229	660,28	3,45
0,17	69,13	0,00244	652,59	3,29
0,22	83,41	0,00269	641,34	3,10
0,28	101,52	0,00299	628,30	2,90
0,34	120,80	0,00330	615,26	2,73
0,39	136,73	0,00352	604,90	2,60
0,45	144,01	0,00359	600,12	2,53
0,51	141,70	0,00348	600,31	2,51
0,56	133,86	0,00328	602,63	2,52
0,62	122,10	0,00300	606,90	2,54
0,67	108,85	0,00268	612,06	2,57
0,73	95,98	0,00236	617,34	2,59
0,79	84,94	0,00207	621,45	2,59
0,84	76,07	0,00180	623,47	2,57
0,90	69,27	0,00158	623,07	2,51
0,95	64,38	0,00139	620,04	2,43
1,01	61,03	0,00123	614,34	2,33
1,07	58,69	0,00110	606,23	2,22
1,12	57,06	0,00098	596,13	2,10
1,18	55,85	0,00089	584,68	1,98
1,24	54,93	0,00081	572,67	1,86
1,29	54,20	0,00074	561,44	1,76
1,35	53,70	0,00068	552,43	1,66
1,40	53,33	0,00062	547,63	1,58
1,46	53,12	0,00056	548,86	1,51
1,52	52,98	0,00051	557,01	1,46
1,57	52,93	0,00046	573,16	1,42
1,63	52,85	0,00040	598,17	1,40
1,68	51,21	0,00034	631,34	1,38
1,74	45,46	0,00027	667,82	1,36
1,80	36,17	0,00019	697,47	1,35
1,85	29,95	0,00014	712,72	1,32
1,91	29,59	0,00014	719,51	1,30
1,97	30,71	0,00013	725,92	1,28
2,02	32,07	0,00013	733,45	1,27
2,08	33,55	0,00014	742,18	1,27
2,13	35,10	0,00014	751,77	1,27
2,19	36,66	0,00014	761,92	1,27
2,25	38,17	0,00015	772,34	1,27
2,30	39,63	0,00015	782,78	1,28
2,36	41,02	0,00015	793,07	1,29
2,41	42,35	0,00016	803,06	1,30
2,47	43,61	0,00016	812,67	1,31
2,53	44,82	0,00016	821,83	1,32
2,58	45,96	0,00017	830,48	1,34
2,64	47,04	0,00017	838,66	1,35
2,70	48,07	0,00017	846,37	1,36
2,75	49,06	0,00018	853,64	1,37
2,81	50,02	0,00018	860,53	1,39

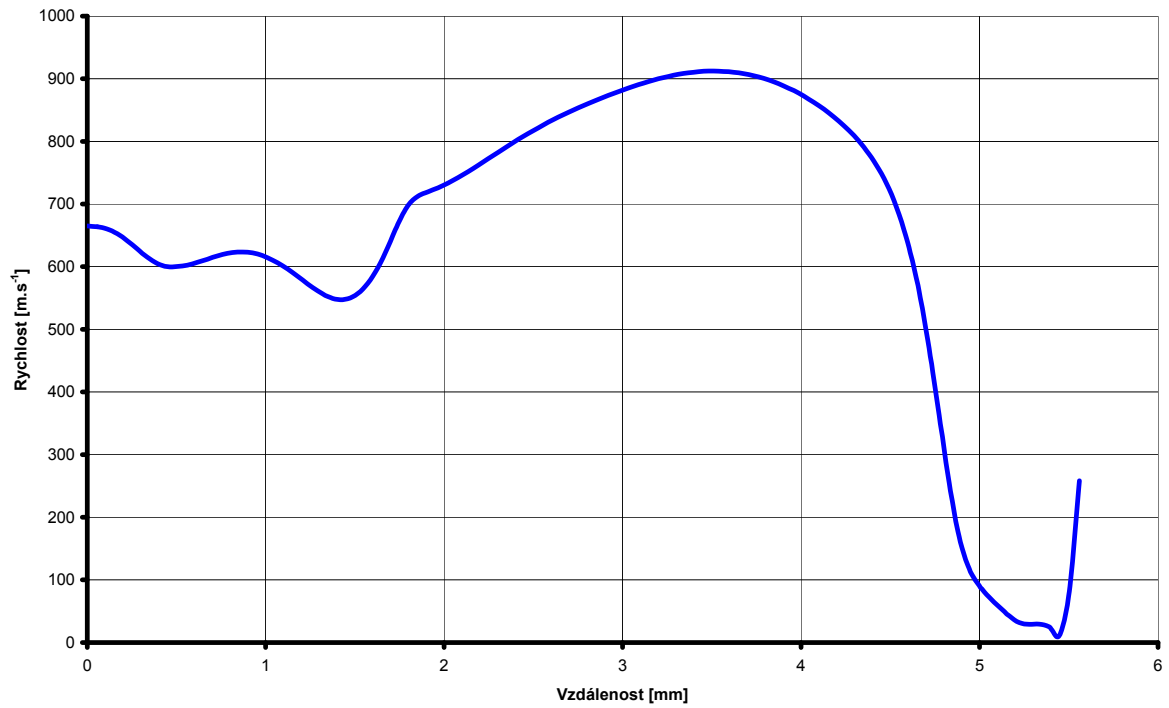
2,86	50,98	0,00019	867,08	1,40
2,92	51,92	0,00019	873,38	1,41
2,98	52,76	0,00019	879,45	1,43
3,03	53,46	0,00020	885,25	1,44
3,09	54,03	0,00020	890,68	1,45
3,15	54,52	0,00020	895,66	1,47
3,20	54,95	0,00021	900,11	1,48
3,26	55,36	0,00021	903,93	1,49
3,31	55,75	0,00021	907,11	1,50
3,37	56,16	0,00022	909,58	1,51
3,43	56,57	0,00022	911,28	1,51
3,48	57,00	0,00022	912,15	1,52
3,54	57,47	0,00022	912,14	1,52
3,59	58,00	0,00023	911,24	1,53
3,65	58,58	0,00023	909,41	1,53
3,71	59,21	0,00024	906,61	1,53
3,76	59,90	0,00024	902,81	1,53
3,82	60,65	0,00024	897,99	1,52
3,88	61,48	0,00025	892,04	1,52
3,93	62,41	0,00025	884,99	1,51
3,99	63,46	0,00026	876,85	1,50
4,04	64,65	0,00027	867,60	1,49
4,10	66,00	0,00027	857,21	1,47
4,16	67,56	0,00028	845,56	1,46
4,21	69,39	0,00029	832,46	1,44
4,27	71,57	0,00030	817,57	1,41
4,32	74,22	0,00031	800,37	1,38
4,38	77,54	0,00032	780,03	1,34
4,44	81,76	0,00033	755,32	1,29
4,49	87,27	0,00035	724,26	1,22
4,55	94,77	0,00037	683,62	1,14
4,61	105,00	0,00039	630,37	1,03
4,66	119,37	0,00043	560,20	0,90
4,72	140,66	0,00049	470,03	0,75
4,77	173,57	0,00060	362,69	0,57
4,83	219,60	0,00075	254,32	0,40
4,89	271,36	0,00094	168,64	0,27
4,94	314,90	0,00112	117,57	0,19
5,00	340,27	0,00125	90,60	0,15
5,05	350,01	0,00134	72,52	0,12
5,11	352,89	0,00140	56,79	0,10
5,17	353,47	0,00147	42,40	0,07
5,22	353,34	0,00152	31,81	0,06
5,28	355,59	0,00159	28,99	0,06
5,34	357,52	0,00165	29,44	0,06
5,39	355,10	0,00168	25,03	0,05
5,45	350,16	0,00168	11,41	0,02
5,50	296,03	0,00135	81,33	0,15
5,56	135,51	0,00054	258,24	0,44



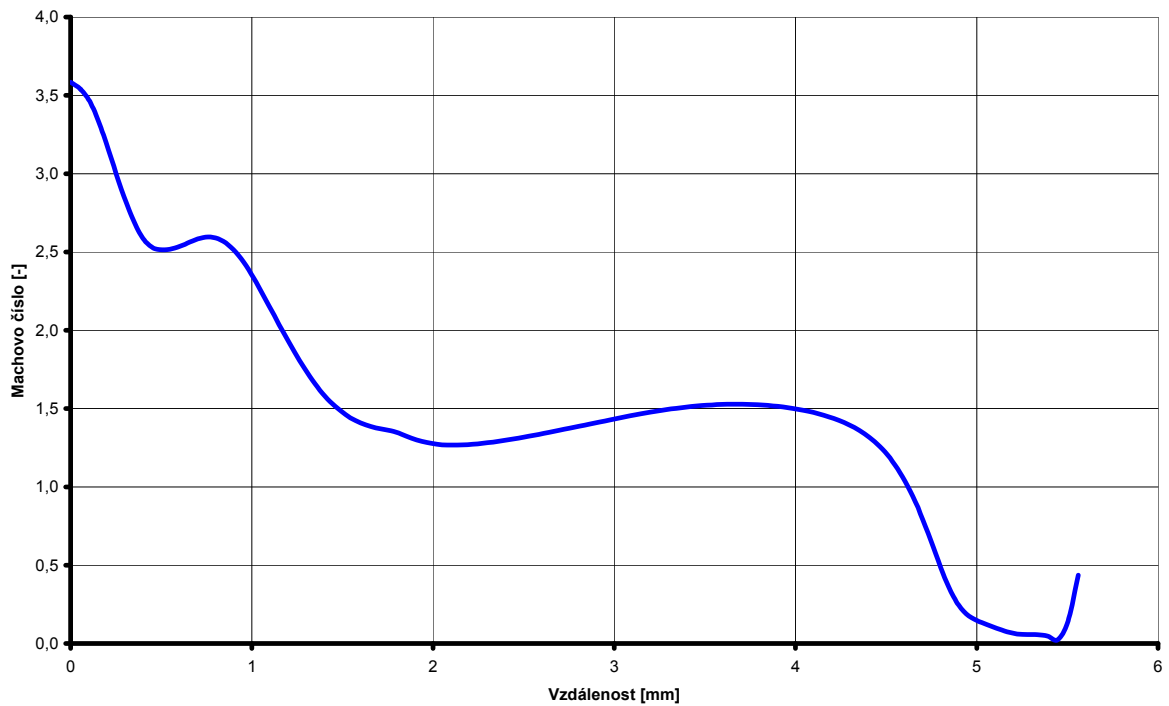
Obr. 10.56 Rozložení tlaku na křivce UV 800.



Obr. 10.57 Rozložení hustoty na křivce UV 800.



Obr. 10.58 Rozložení rychlostí na křivce UV 800.



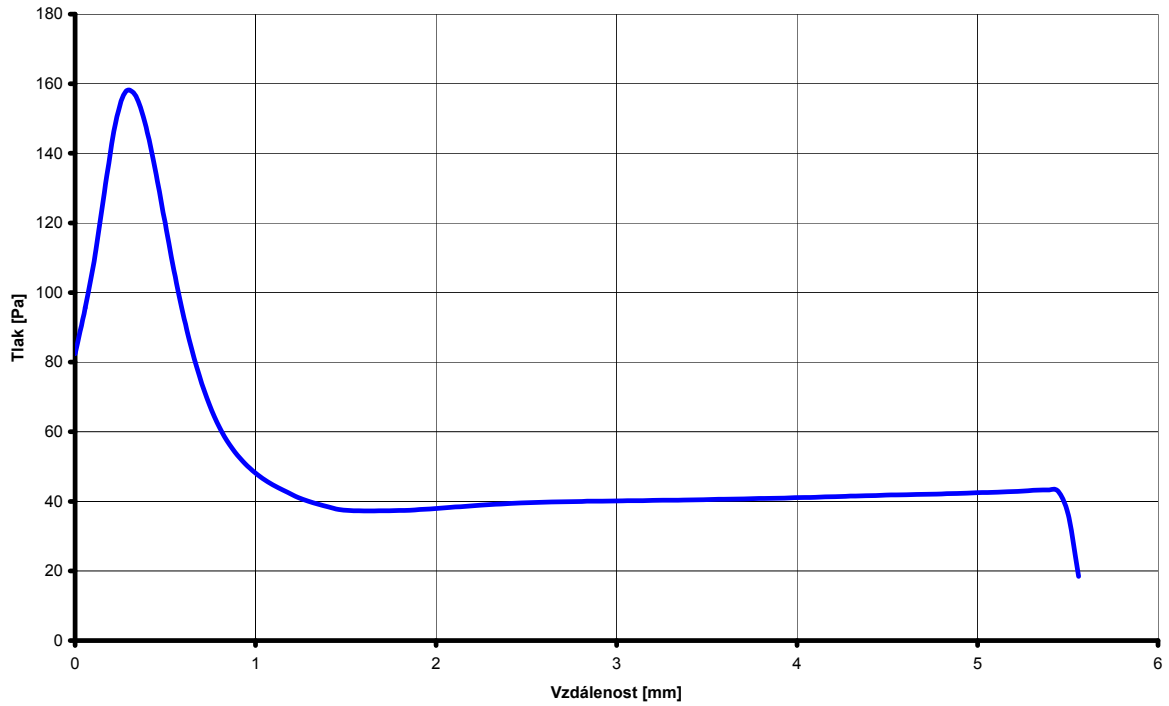
Obr. 10.59 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze UV 800.

10.3.3 Vyhodnocení UV 600

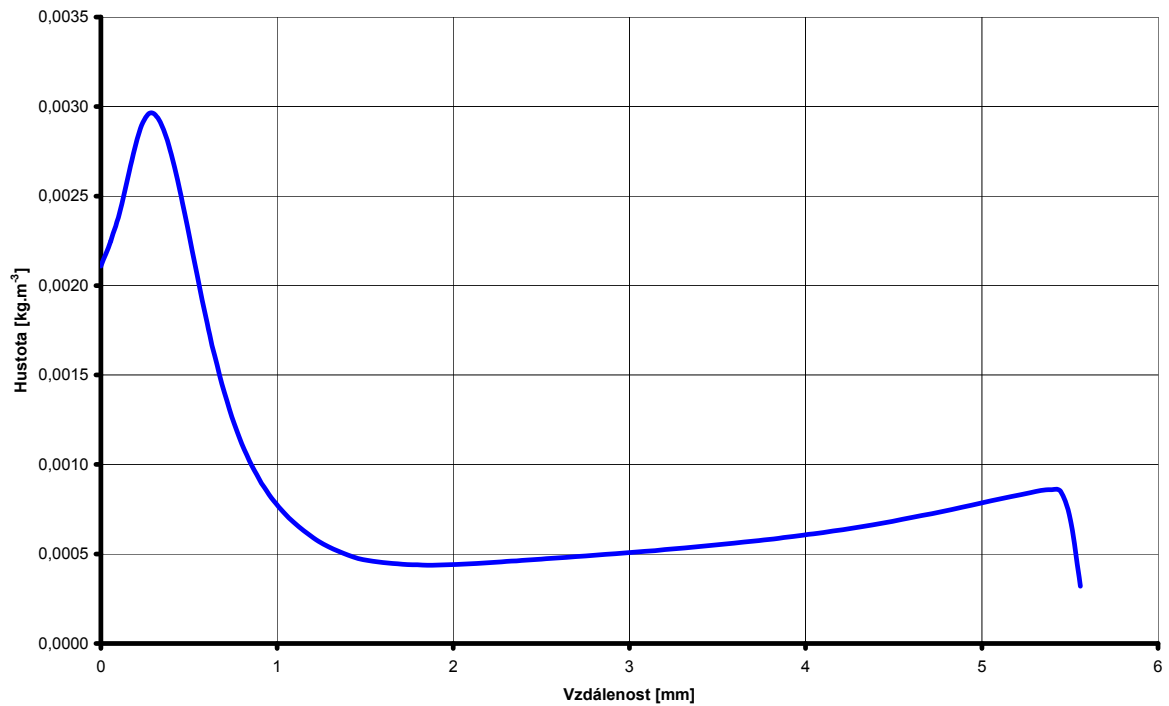
Tabulka 10.8 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	82,38	0,00211	589,11	2,52
0,06	95,62	0,00225	573,83	2,36
0,11	111,15	0,00243	558,10	2,21
0,17	131,22	0,00267	540,20	2,07
0,22	148,92	0,00288	526,15	1,96
0,28	157,82	0,00296	519,45	1,90
0,34	156,45	0,00291	519,67	1,90
0,39	147,46	0,00276	524,44	1,92
0,45	133,84	0,00253	532,05	1,96
0,51	118,06	0,00226	541,23	2,00
0,56	102,69	0,00198	550,73	2,05
0,62	89,39	0,00172	558,54	2,08
0,67	78,53	0,00150	563,41	2,08
0,73	69,72	0,00131	565,87	2,08
0,79	62,74	0,00115	565,89	2,05
0,84	57,38	0,00102	563,58	2,01
0,90	53,28	0,00092	559,22	1,96
0,95	50,12	0,00083	553,08	1,91
1,01	47,62	0,00076	545,27	1,85
1,07	45,61	0,00070	535,79	1,78
1,12	43,98	0,00065	524,82	1,71
1,18	42,50	0,00061	513,16	1,64
1,24	41,11	0,00057	500,89	1,58
1,29	40,05	0,00054	487,61	1,52
1,35	39,20	0,00052	473,77	1,45
1,40	38,37	0,00049	460,31	1,40
1,46	37,65	0,00048	446,83	1,34
1,52	37,38	0,00046	430,84	1,29
1,57	37,31	0,00046	414,74	1,23
1,63	37,26	0,00045	400,05	1,18
1,68	37,29	0,00044	385,69	1,13
1,74	37,32	0,00044	371,46	1,08
1,80	37,38	0,00044	357,60	1,04
1,85	37,44	0,00044	343,78	0,99
1,91	37,63	0,00044	330,64	0,95
1,97	37,82	0,00044	317,51	0,92
2,02	38,03	0,00044	305,57	0,88
2,08	38,25	0,00044	293,82	0,85
2,13	38,47	0,00045	282,94	0,82
2,19	38,68	0,00045	272,47	0,79
2,25	38,89	0,00045	262,60	0,76
2,30	39,07	0,00046	253,34	0,73
2,36	39,25	0,00046	244,42	0,71
2,41	39,39	0,00047	236,26	0,69
2,47	39,53	0,00047	228,20	0,67
2,53	39,63	0,00047	220,97	0,65
2,58	39,73	0,00048	213,75	0,63
2,64	39,80	0,00048	207,23	0,61
2,70	39,87	0,00049	200,78	0,59
2,75	39,92	0,00049	194,79	0,58
2,81	39,97	0,00049	188,96	0,56

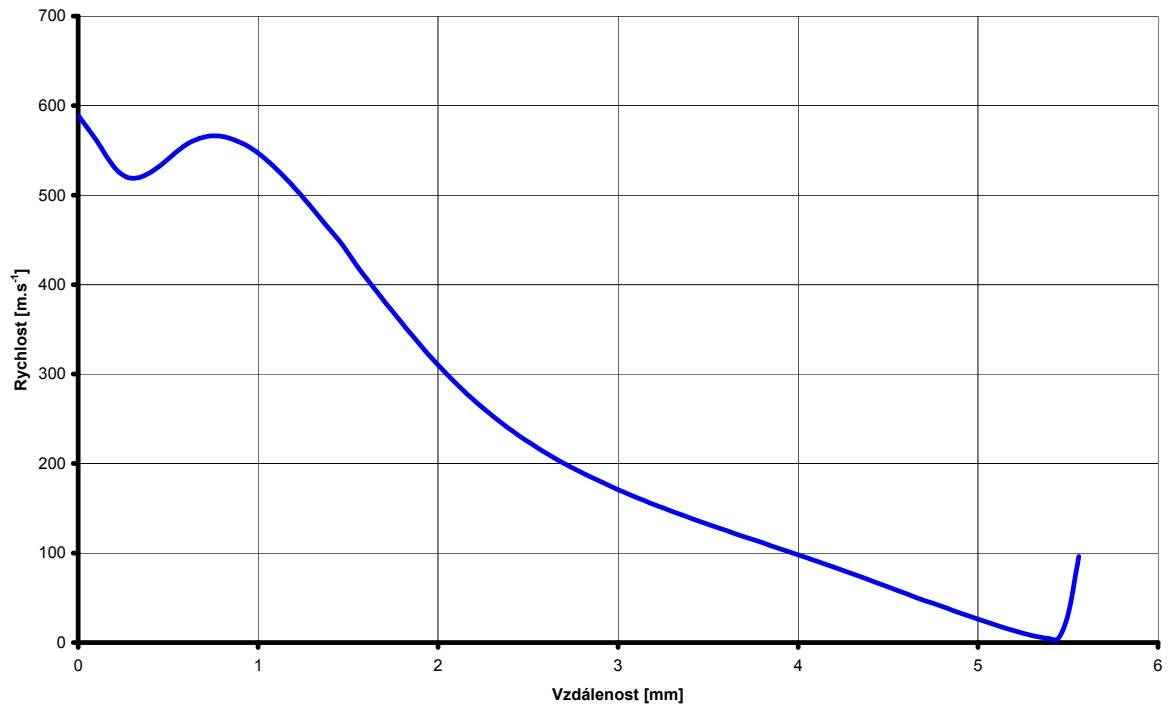
2,86	40,01	0,00050	183,41	0,55
2,92	40,05	0,00050	178,10	0,53
2,98	40,09	0,00051	172,94	0,52
3,03	40,13	0,00051	168,04	0,51
3,09	40,17	0,00051	163,21	0,49
3,15	40,21	0,00052	158,66	0,48
3,20	40,26	0,00052	154,12	0,47
3,26	40,30	0,00053	149,83	0,46
3,31	40,34	0,00053	145,56	0,45
3,37	40,39	0,00054	141,44	0,44
3,43	40,44	0,00054	137,37	0,43
3,48	40,49	0,00055	133,38	0,42
3,54	40,54	0,00055	129,45	0,40
3,59	40,59	0,00056	125,57	0,39
3,65	40,65	0,00057	121,73	0,38
3,71	40,70	0,00057	117,91	0,37
3,76	40,77	0,00058	114,11	0,36
3,82	40,83	0,00058	110,33	0,35
3,88	40,89	0,00059	106,52	0,34
3,93	40,96	0,00060	102,74	0,33
3,99	41,03	0,00061	98,90	0,32
4,04	41,10	0,00061	95,06	0,31
4,10	41,18	0,00062	91,17	0,30
4,16	41,26	0,00063	87,25	0,29
4,21	41,34	0,00064	83,29	0,28
4,27	41,42	0,00064	79,27	0,26
4,32	41,51	0,00065	75,23	0,25
4,38	41,60	0,00066	71,09	0,24
4,44	41,68	0,00067	66,98	0,23
4,49	41,77	0,00068	62,76	0,21
4,55	41,85	0,00069	58,57	0,20
4,61	41,91	0,00070	54,27	0,19
4,66	41,97	0,00072	49,95	0,17
4,72	42,02	0,00073	45,94	0,16
4,77	42,08	0,00074	42,13	0,15
4,83	42,16	0,00075	38,16	0,14
4,89	42,26	0,00076	34,08	0,12
4,94	42,36	0,00077	30,16	0,11
5,00	42,45	0,00078	26,30	0,10
5,05	42,55	0,00080	22,51	0,08
5,11	42,65	0,00081	18,78	0,07
5,17	42,76	0,00082	15,22	0,06
5,22	42,86	0,00083	11,90	0,04
5,28	43,03	0,00084	8,87	0,03
5,34	43,22	0,00085	6,37	0,02
5,39	43,28	0,00086	4,54	0,02
5,45	42,85	0,00085	5,07	0,02
5,50	36,03	0,00069	34,47	0,13
5,56	18,46	0,00032	96,28	0,34



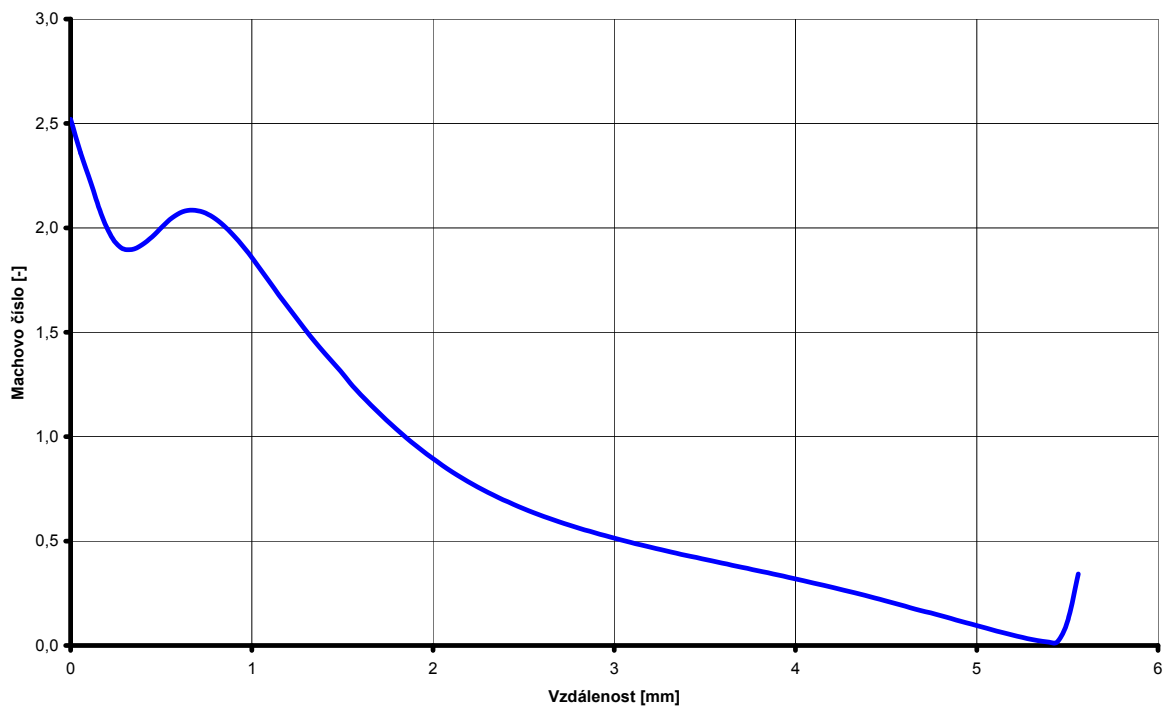
Obr. 10.60 Rozložení tlaku na křivce UV 600.



Obr. 10.61 Rozložení hustoty na křivce UV 600.



Obr. 10.62 Rozložení rychlostí na křivce UV 600.



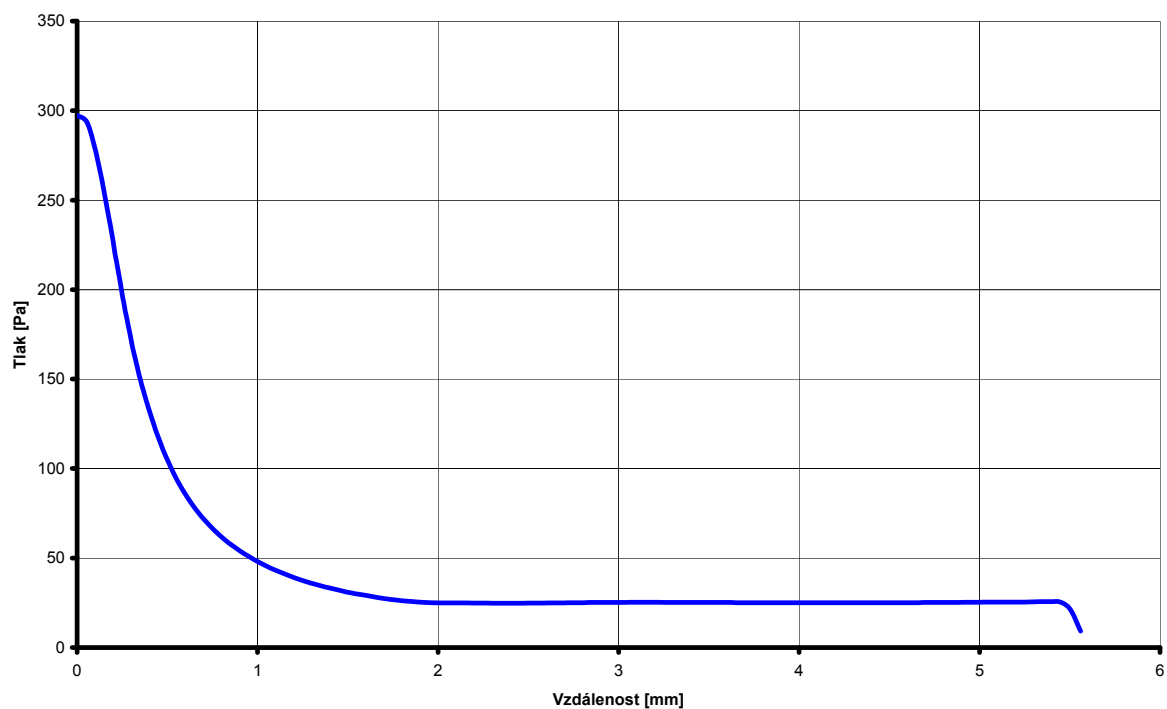
Obr. 10.63 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze UV 600.

10.3.4 Vyhodnocení UV 400

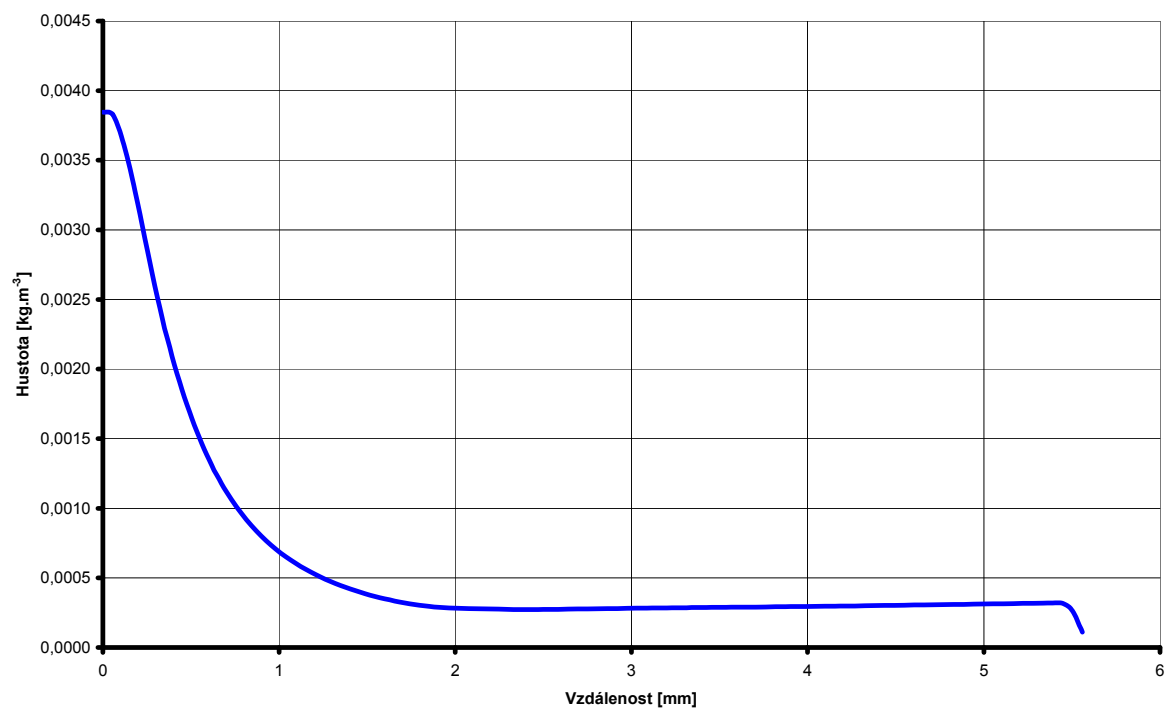
Tabulka 10.9 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	297,33	0,00385	338,90	1,03
0,06	293,29	0,00383	343,97	1,05
0,11	273,24	0,00364	359,26	1,11
0,17	244,26	0,00336	380,65	1,20
0,22	211,77	0,00303	404,68	1,30
0,28	181,01	0,00268	428,12	1,40
0,34	155,12	0,00237	448,49	1,48
0,39	134,36	0,00209	465,07	1,55
0,45	117,52	0,00185	478,62	1,61
0,51	103,64	0,00165	489,69	1,65
0,56	92,16	0,00146	498,22	1,68
0,62	82,77	0,00131	504,29	1,70
0,67	75,09	0,00118	508,25	1,70
0,73	68,63	0,00106	510,51	1,70
0,79	63,11	0,00096	511,31	1,69
0,84	58,34	0,00088	510,79	1,68
0,90	54,22	0,00080	509,07	1,66
0,95	50,63	0,00074	506,29	1,63
1,01	47,46	0,00068	502,57	1,61
1,07	44,65	0,00063	497,97	1,58
1,12	42,16	0,00058	492,56	1,55
1,18	39,92	0,00054	486,37	1,52
1,24	37,92	0,00051	479,41	1,48
1,29	36,13	0,00047	471,67	1,45
1,35	34,52	0,00045	463,32	1,41
1,40	33,08	0,00042	454,56	1,37
1,46	31,78	0,00040	445,38	1,33
1,52	30,59	0,00038	435,61	1,29
1,57	29,54	0,00036	425,24	1,25
1,63	28,58	0,00034	414,70	1,21
1,68	27,63	0,00033	404,17	1,18
1,74	26,81	0,00031	393,13	1,14
1,80	26,21	0,00030	381,40	1,10
1,85	25,74	0,00030	369,79	1,06
1,91	25,30	0,00029	358,76	1,02
1,97	25,06	0,00028	347,71	0,99
2,02	25,00	0,00028	335,31	0,95
2,08	25,01	0,00028	323,51	0,92
2,13	24,96	0,00028	312,33	0,88
2,19	24,88	0,00028	301,34	0,85
2,25	24,82	0,00028	290,53	0,82
2,30	24,77	0,00027	279,92	0,79
2,36	24,74	0,00027	269,50	0,76
2,41	24,76	0,00027	259,52	0,73
2,47	24,78	0,00027	249,63	0,70
2,53	24,83	0,00027	240,49	0,68
2,58	24,88	0,00027	231,35	0,65
2,64	24,93	0,00028	223,01	0,63
2,70	24,99	0,00028	214,74	0,60
2,75	25,04	0,00028	207,07	0,58
2,81	25,10	0,00028	199,61	0,56

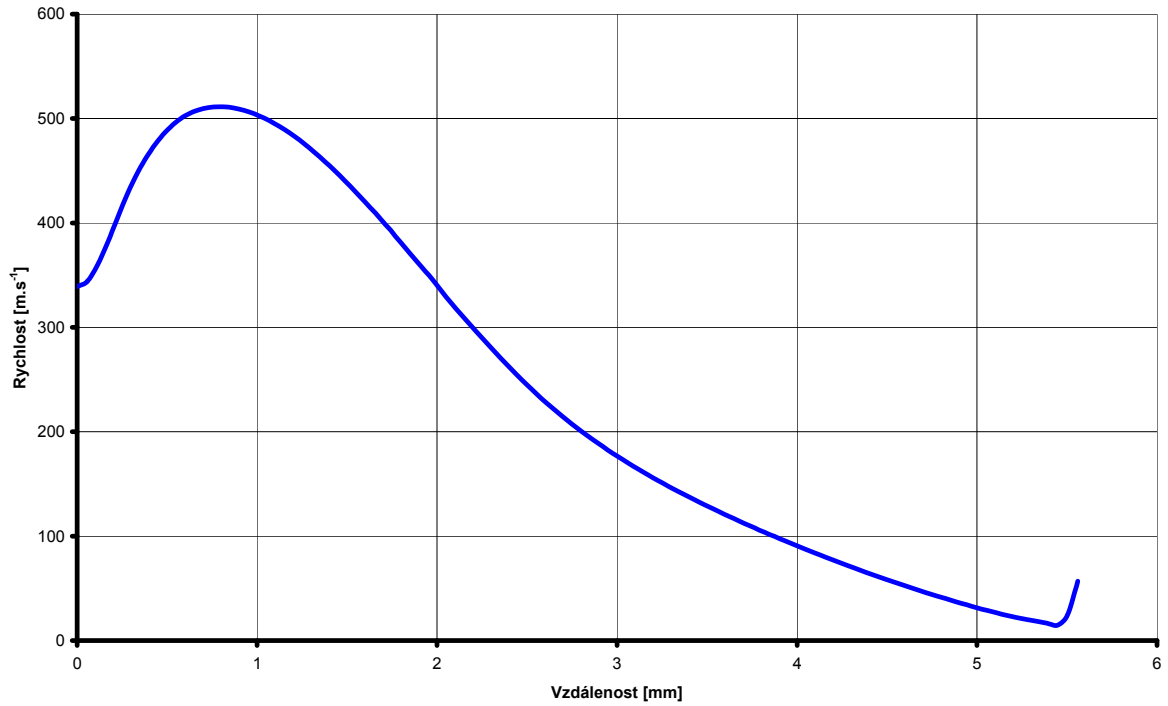
2,86	25,14	0,00028	192,54	0,54
2,92	25,18	0,00028	185,80	0,52
2,98	25,21	0,00028	179,27	0,51
3,03	25,22	0,00028	173,13	0,49
3,09	25,24	0,00028	167,07	0,47
3,15	25,24	0,00028	161,41	0,46
3,20	25,24	0,00028	155,76	0,44
3,26	25,23	0,00028	150,48	0,43
3,31	25,22	0,00029	145,23	0,41
3,37	25,20	0,00029	140,21	0,40
3,43	25,18	0,00029	135,28	0,39
3,48	25,17	0,00029	130,48	0,37
3,54	25,15	0,00029	125,80	0,36
3,59	25,13	0,00029	121,21	0,35
3,65	25,11	0,00029	116,73	0,34
3,71	25,09	0,00029	112,32	0,32
3,76	25,07	0,00029	108,03	0,31
3,82	25,06	0,00029	103,79	0,30
3,88	25,05	0,00029	99,66	0,29
3,93	25,04	0,00029	95,58	0,28
3,99	25,03	0,00029	91,60	0,27
4,04	25,02	0,00030	87,67	0,25
4,10	25,02	0,00030	83,82	0,24
4,16	25,02	0,00030	80,03	0,23
4,21	25,02	0,00030	76,31	0,22
4,27	25,02	0,00030	72,66	0,21
4,32	25,03	0,00030	69,08	0,20
4,38	25,04	0,00030	65,56	0,19
4,44	25,04	0,00030	62,10	0,18
4,49	25,06	0,00030	58,72	0,17
4,55	25,07	0,00030	55,40	0,16
4,61	25,09	0,00030	52,15	0,15
4,66	25,11	0,00031	48,97	0,14
4,72	25,13	0,00031	45,86	0,14
4,77	25,16	0,00031	42,81	0,13
4,83	25,19	0,00031	39,85	0,12
4,89	25,22	0,00031	36,97	0,11
4,94	25,26	0,00031	34,18	0,10
5,00	25,31	0,00031	31,50	0,09
5,05	25,35	0,00031	28,91	0,09
5,11	25,39	0,00031	26,43	0,08
5,17	25,42	0,00032	24,00	0,07
5,22	25,45	0,00032	22,01	0,07
5,28	25,51	0,00032	20,15	0,06
5,34	25,59	0,00032	18,30	0,05
5,39	25,63	0,00032	16,50	0,05
5,45	25,44	0,00032	14,73	0,04
5,50	21,32	0,00026	25,02	0,08
5,56	9,14	0,00011	56,84	0,17



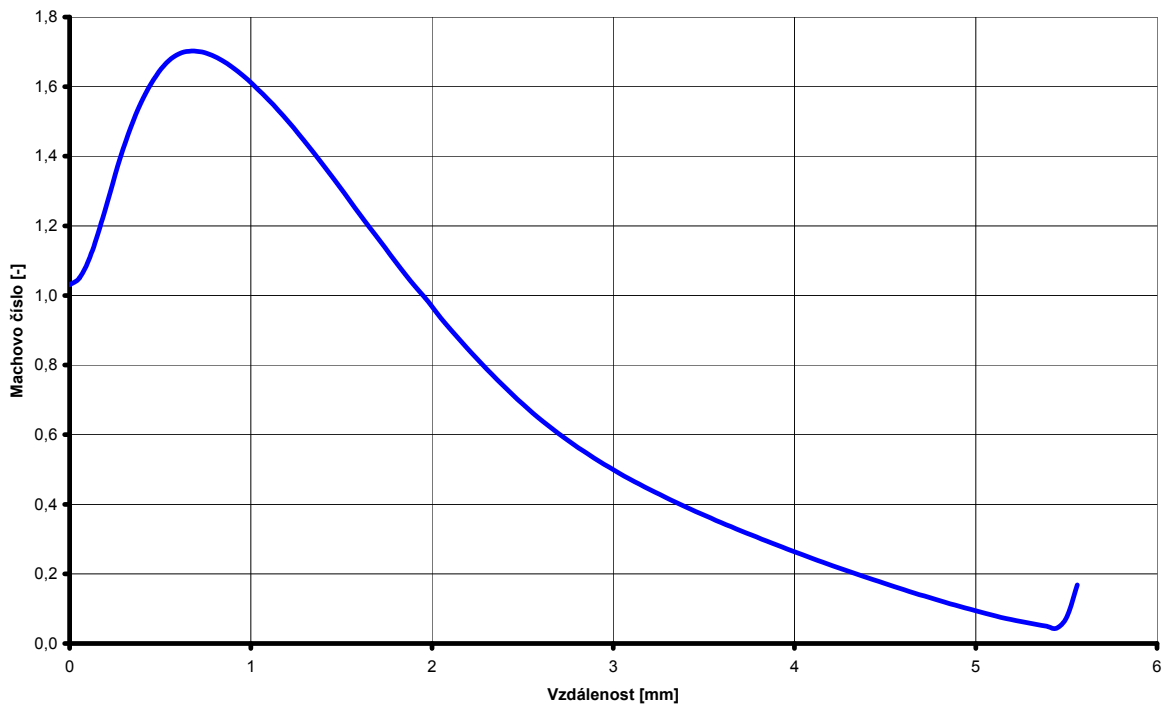
Obr. 10.64 Rozložení tlaku na křivce UV 400.



Obr. 10.65 Rozložení hustoty na křivce UV 400.



Obr. 10.66 Rozložení rychlostí na křivce UV 400.



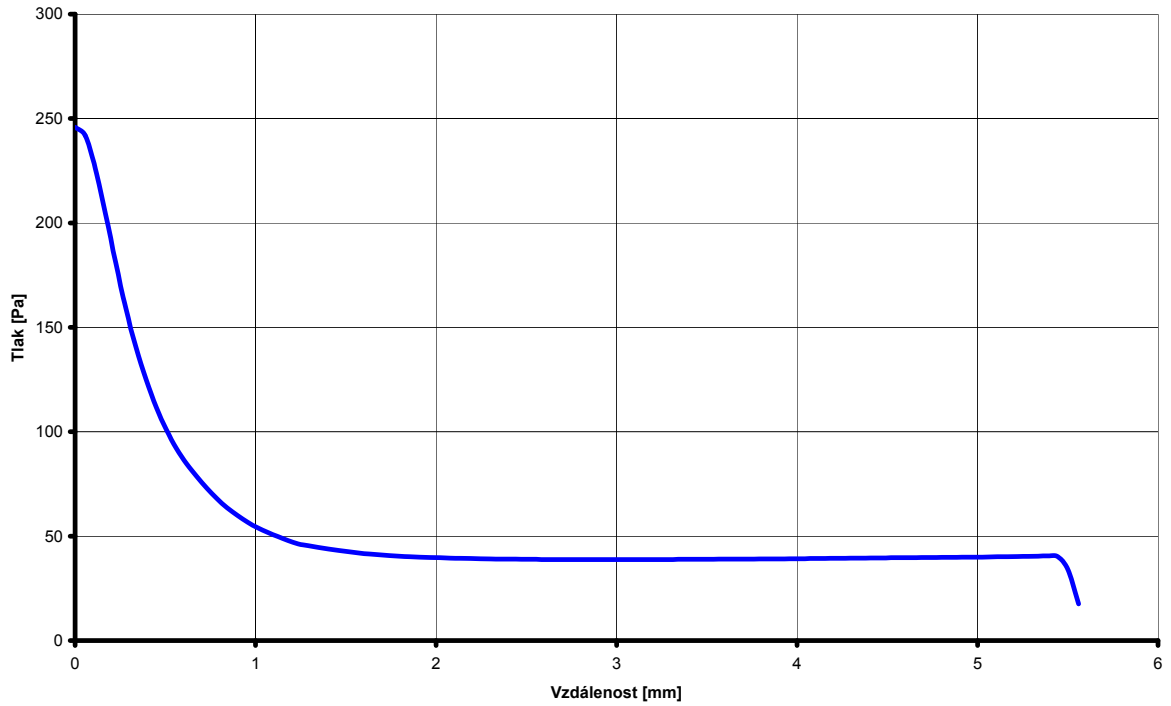
Obr. 10.67 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze UV 400.

10.3.5 Vyhodnocení UV 200

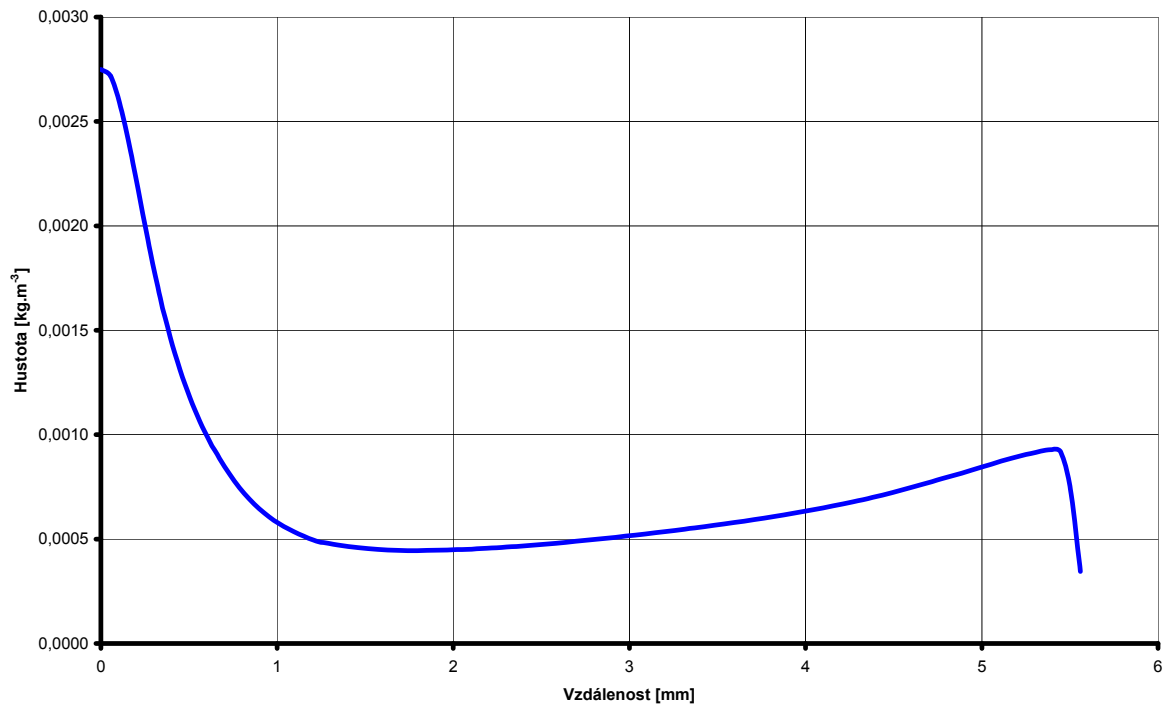
Tabulka 10.10 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	245,82	0,00275	318,12	0,90
0,06	241,93	0,00272	326,49	0,93
0,11	226,04	0,00257	343,96	0,98
0,17	204,26	0,00236	366,62	1,05
0,22	180,95	0,00212	390,28	1,13
0,28	159,22	0,00187	411,37	1,19
0,34	140,55	0,00166	427,26	1,24
0,39	124,94	0,00147	437,51	1,27
0,45	111,80	0,00131	443,68	1,29
0,51	100,94	0,00118	447,19	1,29
0,56	91,97	0,00106	448,35	1,29
0,62	84,60	0,00097	446,95	1,28
0,67	78,52	0,00089	443,00	1,26
0,73	72,93	0,00081	436,73	1,23
0,79	67,91	0,00075	428,40	1,20
0,84	63,56	0,00069	418,65	1,17
0,90	59,87	0,00065	408,09	1,13
0,95	56,73	0,00061	397,11	1,10
1,01	54,07	0,00057	385,87	1,06
1,07	51,80	0,00055	374,48	1,03
1,12	49,80	0,00052	363,00	1,00
1,18	47,84	0,00050	351,43	0,96
1,24	46,32	0,00049	339,34	0,93
1,29	45,44	0,00048	325,49	0,89
1,35	44,57	0,00047	313,43	0,86
1,40	43,84	0,00047	303,00	0,84
1,46	43,14	0,00046	292,89	0,81
1,52	42,51	0,00045	283,23	0,78
1,57	41,93	0,00045	273,82	0,76
1,63	41,43	0,00045	264,71	0,74
1,68	41,04	0,00045	255,96	0,71
1,74	40,69	0,00044	247,42	0,69
1,80	40,43	0,00045	239,50	0,67
1,85	40,17	0,00045	231,62	0,65
1,91	39,97	0,00045	224,48	0,63
1,97	39,77	0,00045	217,35	0,62
2,02	39,62	0,00045	210,74	0,60
2,08	39,47	0,00045	204,20	0,58
2,13	39,35	0,00045	197,99	0,57
2,19	39,25	0,00046	191,93	0,55
2,25	39,16	0,00046	186,07	0,54
2,30	39,08	0,00046	180,41	0,52
2,36	39,01	0,00046	174,86	0,51
2,41	38,96	0,00047	169,57	0,50
2,47	38,91	0,00047	164,33	0,48
2,53	38,88	0,00048	159,40	0,47
2,58	38,85	0,00048	154,48	0,46
2,64	38,83	0,00048	149,90	0,45
2,70	38,81	0,00049	145,34	0,44
2,75	38,80	0,00049	141,04	0,43
2,81	38,79	0,00050	136,84	0,41

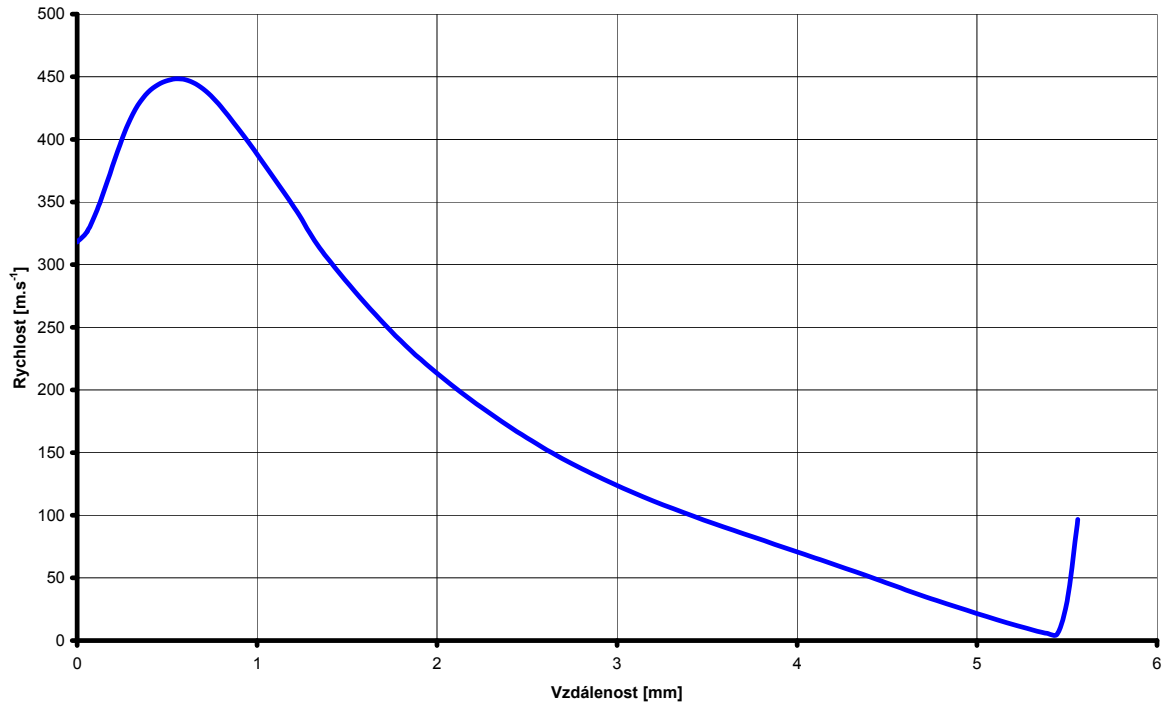
2,86	38,79	0,00050	132,82	0,40
2,92	38,79	0,00051	128,95	0,39
2,98	38,79	0,00051	125,18	0,39
3,03	38,79	0,00052	121,60	0,38
3,09	38,80	0,00052	118,07	0,37
3,15	38,81	0,00053	114,73	0,36
3,20	38,82	0,00054	111,41	0,35
3,26	38,83	0,00054	108,27	0,34
3,31	38,84	0,00055	105,15	0,33
3,37	38,86	0,00055	102,15	0,33
3,43	38,88	0,00056	99,18	0,32
3,48	38,90	0,00057	96,28	0,31
3,54	38,92	0,00057	93,43	0,30
3,59	38,95	0,00058	90,61	0,30
3,65	38,97	0,00059	87,83	0,29
3,71	39,00	0,00059	85,08	0,28
3,76	39,03	0,00060	82,34	0,27
3,82	39,06	0,00061	79,62	0,27
3,88	39,10	0,00062	76,89	0,26
3,93	39,13	0,00062	74,19	0,25
3,99	39,17	0,00063	71,45	0,24
4,04	39,21	0,00064	68,73	0,23
4,10	39,25	0,00065	65,98	0,23
4,16	39,29	0,00066	63,22	0,22
4,21	39,33	0,00067	60,45	0,21
4,27	39,38	0,00068	57,64	0,20
4,32	39,42	0,00069	54,84	0,19
4,38	39,47	0,00070	51,97	0,19
4,44	39,52	0,00071	49,14	0,18
4,49	39,56	0,00072	46,22	0,17
4,55	39,61	0,00074	43,33	0,16
4,61	39,65	0,00075	40,41	0,15
4,66	39,69	0,00076	37,51	0,14
4,72	39,73	0,00078	34,71	0,13
4,77	39,77	0,00079	31,97	0,12
4,83	39,80	0,00080	29,34	0,11
4,89	39,84	0,00082	26,81	0,10
4,94	39,90	0,00083	24,26	0,09
5,00	39,96	0,00084	21,64	0,08
5,05	40,03	0,00086	19,08	0,07
5,11	40,11	0,00087	16,59	0,07
5,17	40,17	0,00089	14,18	0,06
5,22	40,23	0,00090	11,84	0,05
5,28	40,29	0,00091	9,60	0,04
5,34	40,39	0,00092	7,49	0,03
5,39	40,46	0,00093	5,63	0,02
5,45	40,00	0,00092	5,72	0,02
5,50	33,48	0,00074	34,32	0,13
5,56	17,50	0,00034	96,74	0,37



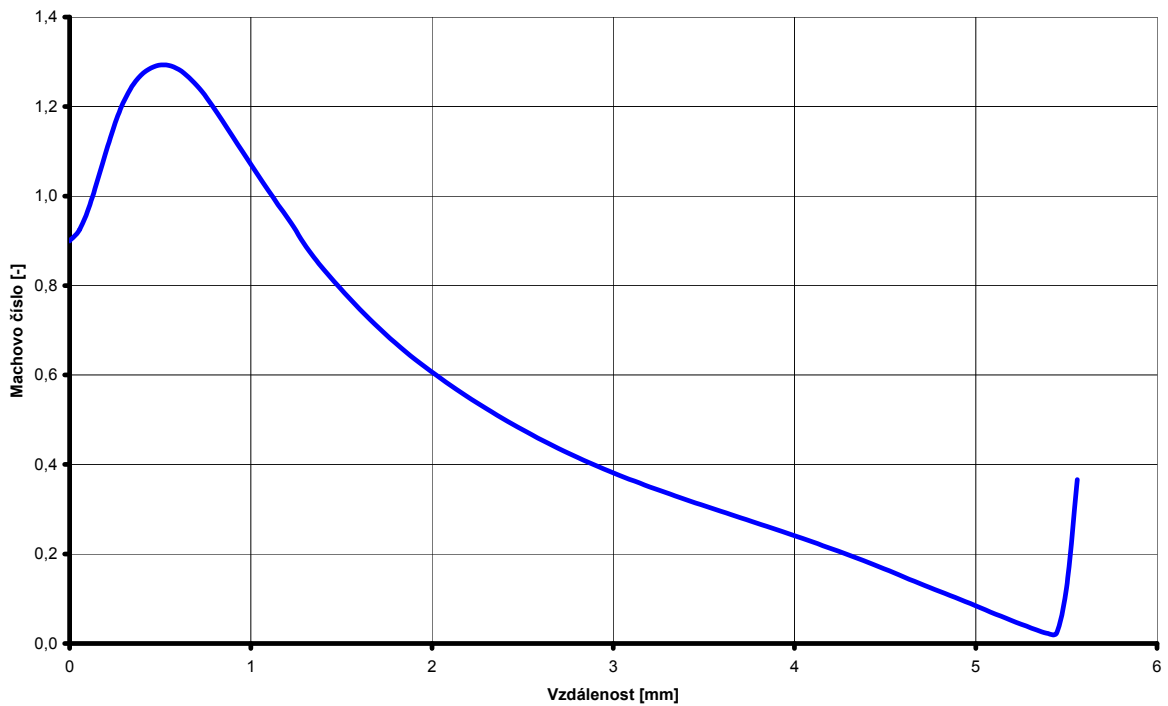
Obr. 10.68 Rozložení tlaku na křivce UV 200.



Obr. 10.69 Rozložení hustoty na křivce UV 200.



Obr. 10.70 Rozložení rychlostí na křivce UV 200.



Obr. 10.71 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze UV 200.

10.4 Výsledky měření kuželové varianty komory

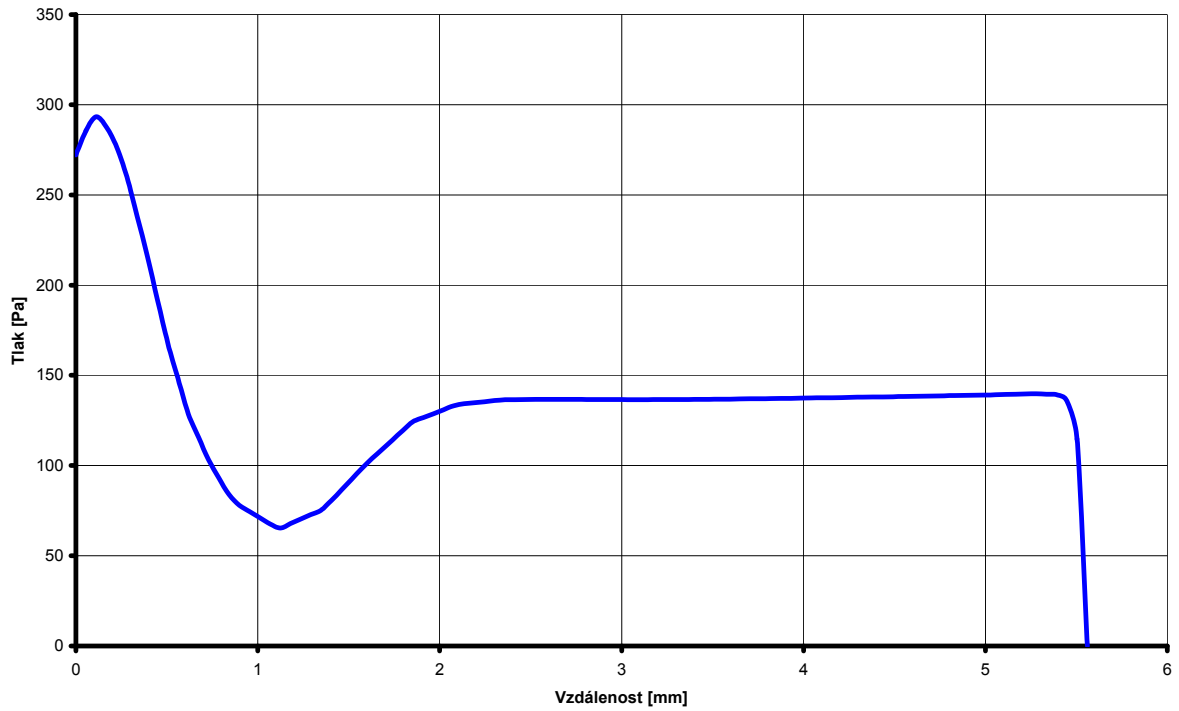
Zcela analogicky jsou zpracovány výsledky u kuželové varianty komory diferenciálního čerpání (obr. 3.11).

10.4.1 Vyhodnocení KV 1000

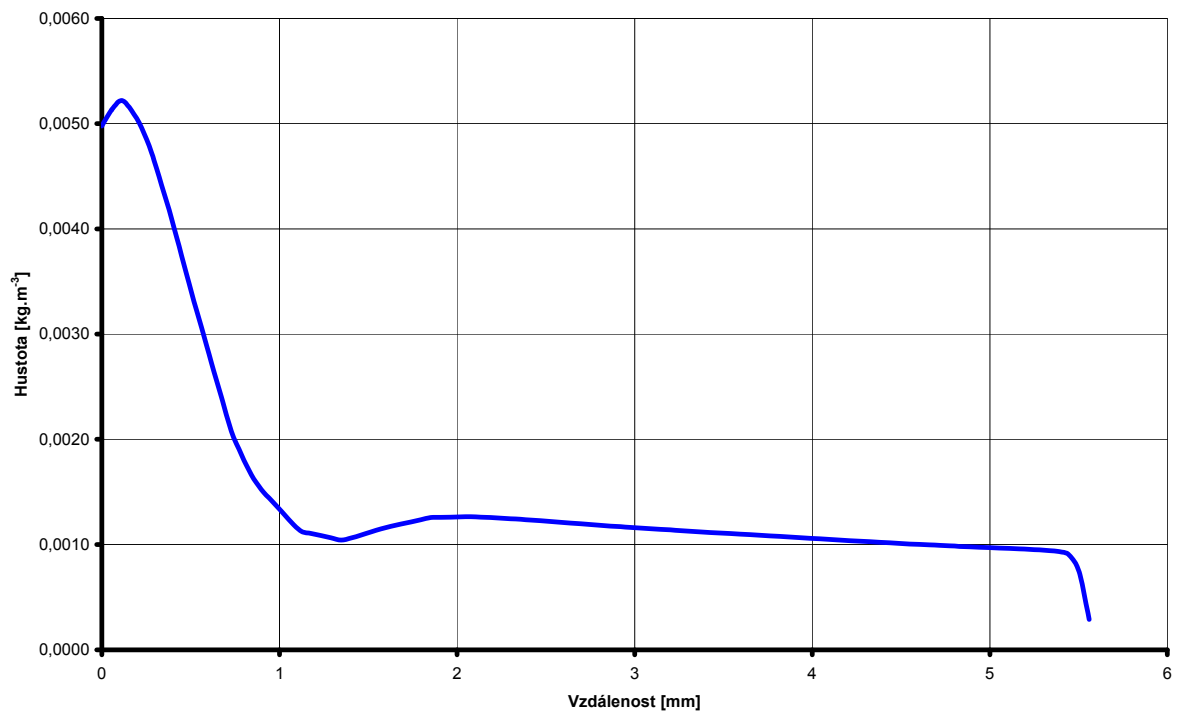
Tabulka 10.11 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	272,18	0,00498	501,38	1,81
0,06	285,65	0,00513	495,35	1,78
0,11	293,34	0,00522	491,97	1,75
0,17	287,42	0,00512	493,63	1,76
0,22	276,52	0,00496	497,28	1,78
0,28	259,99	0,00472	503,74	1,82
0,34	238,40	0,00442	512,60	1,87
0,39	215,88	0,00410	522,22	1,93
0,45	191,53	0,00375	533,34	2,01
0,51	167,89	0,00340	544,12	2,08
0,56	148,25	0,00306	552,98	2,14
0,62	128,62	0,00273	561,84	2,19
0,67	115,71	0,00240	560,09	2,16
0,73	103,09	0,00208	557,88	2,13
0,79	93,09	0,00185	559,54	2,13
0,84	83,87	0,00166	562,35	2,13
0,90	77,99	0,00152	562,87	2,12
0,95	74,54	0,00142	561,73	2,08
1,01	71,10	0,00132	560,58	2,05
1,07	67,65	0,00121	559,43	2,01
1,12	65,38	0,00113	556,03	1,97
1,18	67,84	0,00111	543,59	1,88
1,24	70,31	0,00108	531,15	1,80
1,29	72,78	0,00106	518,71	1,71
1,35	75,24	0,00104	506,26	1,62
1,40	80,55	0,00106	484,59	1,52
1,46	86,49	0,00109	460,88	1,42
1,52	92,43	0,00112	437,17	1,32
1,57	98,37	0,00115	413,47	1,22
1,63	103,95	0,00117	391,13	1,13
1,68	109,08	0,00119	370,54	1,06
1,74	114,21	0,00122	349,94	0,98
1,80	119,33	0,00124	329,34	0,91
1,85	124,28	0,00126	309,15	0,84
1,91	126,49	0,00126	295,23	0,79
1,97	128,70	0,00126	281,31	0,75
2,02	130,91	0,00126	267,38	0,71
2,08	133,12	0,00126	253,46	0,66
2,13	134,23	0,00126	242,02	0,63
2,19	134,82	0,00126	231,73	0,60
2,25	135,41	0,00125	221,45	0,57
2,30	136,00	0,00125	211,16	0,54
2,36	136,44	0,00124	201,66	0,52
2,41	136,51	0,00123	193,95	0,50
2,47	136,59	0,00123	186,25	0,47

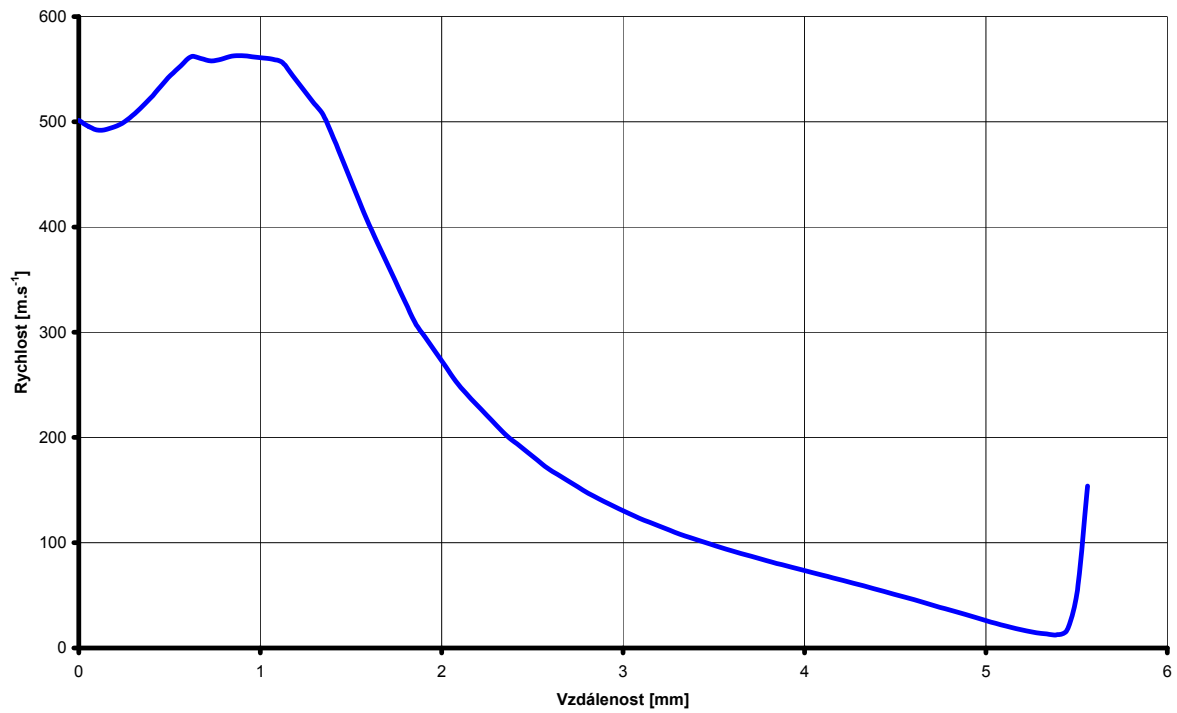
2,53	136,66	0,00122	178,55	0,45
2,58	136,73	0,00121	170,85	0,43
2,64	136,71	0,00120	164,78	0,42
2,70	136,67	0,00120	158,85	0,40
2,75	136,63	0,00119	152,92	0,38
2,81	136,60	0,00118	146,99	0,37
2,86	136,57	0,00118	141,73	0,35
2,92	136,55	0,00117	137,05	0,34
2,98	136,53	0,00116	132,37	0,33
3,03	136,51	0,00116	127,69	0,32
3,09	136,49	0,00115	123,16	0,30
3,15	136,51	0,00114	119,39	0,29
3,20	136,53	0,00114	115,62	0,28
3,26	136,55	0,00113	111,86	0,27
3,31	136,57	0,00113	108,09	0,26
3,37	136,62	0,00112	104,83	0,25
3,43	136,67	0,00112	101,70	0,25
3,48	136,72	0,00111	98,58	0,24
3,54	136,77	0,00110	95,45	0,23
3,59	136,83	0,00110	92,50	0,22
3,65	136,90	0,00109	89,79	0,22
3,71	136,98	0,00109	87,08	0,21
3,76	137,05	0,00108	84,37	0,20
3,82	137,12	0,00108	81,66	0,19
3,88	137,20	0,00107	79,15	0,19
3,93	137,29	0,00107	76,64	0,18
3,99	137,37	0,00106	74,12	0,17
4,04	137,45	0,00105	71,61	0,17
4,10	137,53	0,00105	69,10	0,16
4,16	137,62	0,00104	66,60	0,16
4,21	137,70	0,00104	64,09	0,15
4,27	137,79	0,00103	61,59	0,14
4,32	137,87	0,00103	59,05	0,14
4,38	137,97	0,00102	56,42	0,13
4,44	138,07	0,00102	53,79	0,12
4,49	138,16	0,00101	51,16	0,12
4,55	138,26	0,00101	48,52	0,11
4,61	138,37	0,00100	45,75	0,10
4,66	138,49	0,00100	42,96	0,10
4,72	138,60	0,00099	40,16	0,09
4,77	138,71	0,00099	37,37	0,09
4,83	138,83	0,00098	34,57	0,08
4,89	138,94	0,00098	31,75	0,07
4,94	139,04	0,00097	28,93	0,07
5,00	139,15	0,00097	26,12	0,06
5,05	139,27	0,00097	23,34	0,05
5,11	139,41	0,00096	20,85	0,05
5,17	139,55	0,00096	18,40	0,04
5,22	139,65	0,00095	16,35	0,04
5,28	139,76	0,00095	14,36	0,03
5,34	139,84	0,00094	13,22	0,03
5,39	139,90	0,00093	12,40	0,03
5,45	139,95	0,00090	17,37	0,04
5,50	114,70	0,00074	54,86	0,12
5,56	0,02	0,00029	153,79	22,72



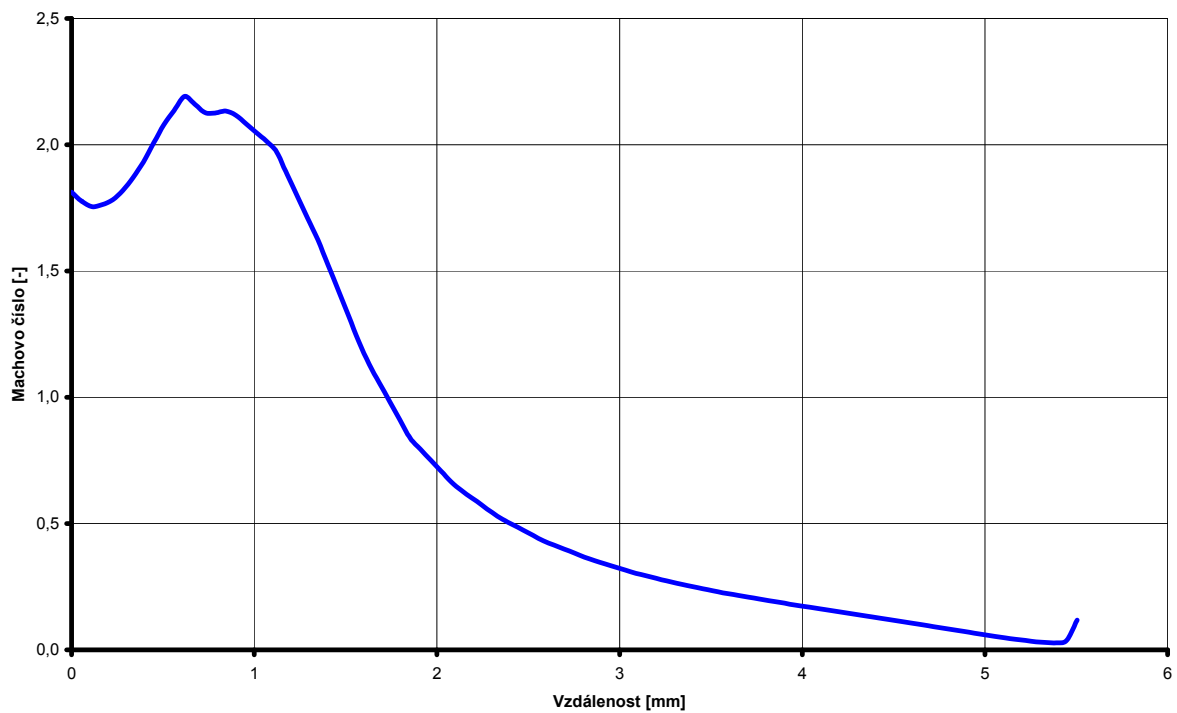
Obr. 10.72 Rozložení tlaku na křivce KV 1000.



Obr. 10.73 Rozložení hustoty na křivce KV 1000.



Obr. 10.74 Rozložení rychlostí na křivce KV 1000.



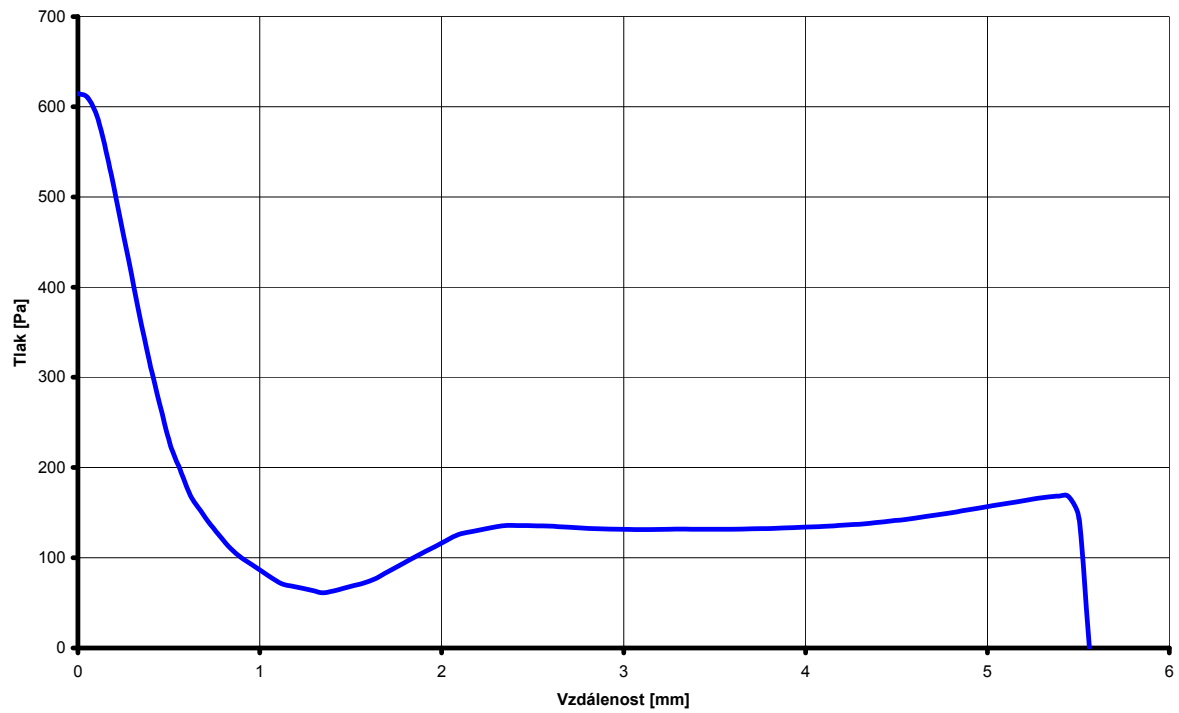
Obr. 10.75 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze KV 1000.

10.4.2 Vyhodnocení KV 800

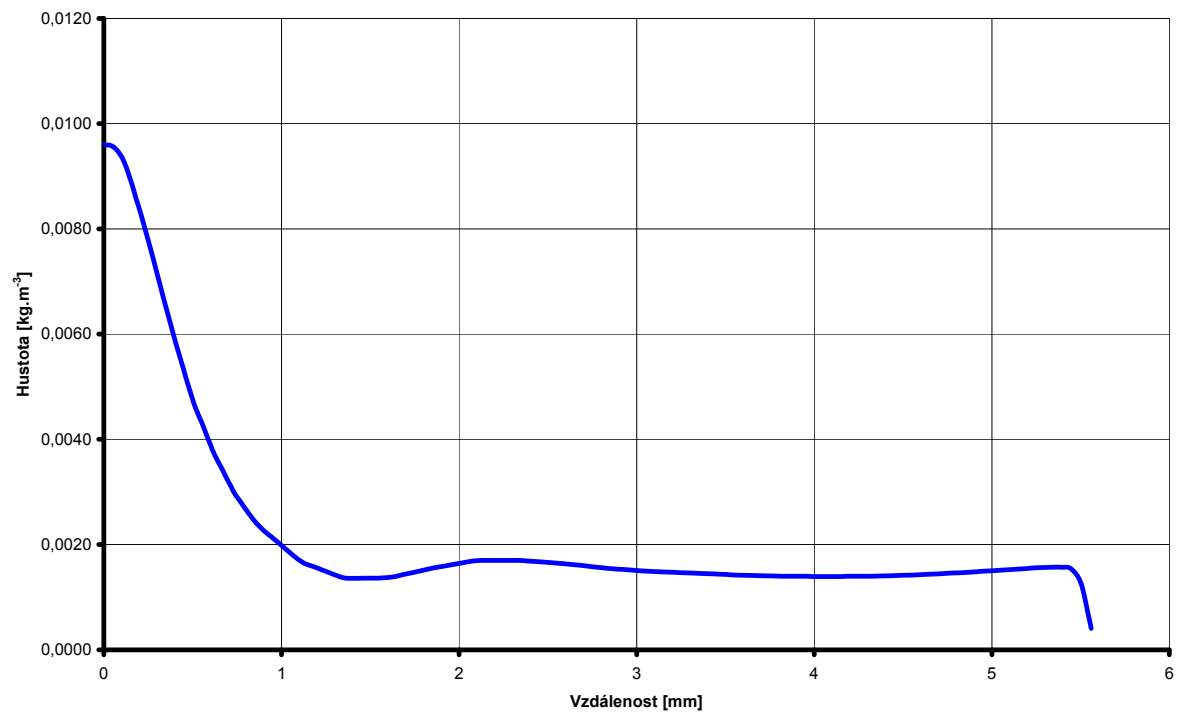
Tabulka 10.12 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	614,82	0,00960	448,32	1,50
0,06	609,68	0,00956	450,35	1,51
0,11	585,67	0,00929	456,47	1,54
0,17	538,29	0,00873	467,92	1,60
0,22	483,97	0,00809	481,03	1,67
0,28	428,32	0,00740	496,13	1,76
0,34	371,20	0,00668	513,02	1,86
0,39	317,64	0,00598	529,80	1,96
0,45	271,05	0,00533	546,36	2,07
0,51	227,07	0,00471	562,11	2,18
0,56	198,07	0,00423	573,22	2,26
0,62	169,07	0,00376	584,32	2,34
0,67	152,46	0,00338	586,82	2,35
0,73	136,39	0,00301	588,96	2,36
0,79	122,71	0,00273	592,89	2,39
0,84	109,74	0,00247	597,36	2,42
0,90	99,94	0,00227	601,99	2,45
0,95	92,43	0,00211	606,72	2,48
1,01	84,92	0,00195	611,45	2,50
1,07	77,41	0,00179	616,18	2,53
1,12	70,92	0,00165	620,03	2,55
1,18	68,49	0,00158	620,33	2,54
1,24	66,06	0,00151	620,64	2,53
1,29	63,63	0,00144	620,95	2,52
1,35	61,20	0,00137	621,25	2,51
1,40	63,16	0,00136	613,32	2,44
1,46	66,09	0,00136	603,58	2,35
1,52	69,01	0,00136	593,84	2,27
1,57	71,93	0,00137	584,10	2,19
1,63	76,28	0,00139	572,40	2,10
1,68	82,44	0,00143	558,23	2,01
1,74	88,61	0,00147	544,05	1,92
1,80	94,77	0,00151	529,88	1,82
1,85	100,92	0,00155	515,83	1,73
1,91	106,82	0,00159	503,76	1,67
1,97	112,72	0,00162	491,69	1,60
2,02	118,63	0,00166	479,62	1,53
2,08	124,53	0,00169	467,55	1,47
2,13	127,89	0,00170	459,76	1,42
2,19	130,06	0,00170	453,96	1,39
2,25	132,23	0,00170	448,17	1,36
2,30	134,39	0,00170	442,37	1,33
2,36	135,86	0,00170	437,07	1,31
2,41	135,68	0,00168	432,93	1,29
2,47	135,51	0,00167	428,79	1,27
2,53	135,34	0,00165	424,65	1,26
2,58	135,17	0,00164	420,51	1,24
2,64	134,52	0,00162	416,82	1,22
2,70	133,82	0,00160	413,17	1,21
2,75	133,13	0,00158	409,53	1,19
2,81	132,44	0,00156	405,88	1,18

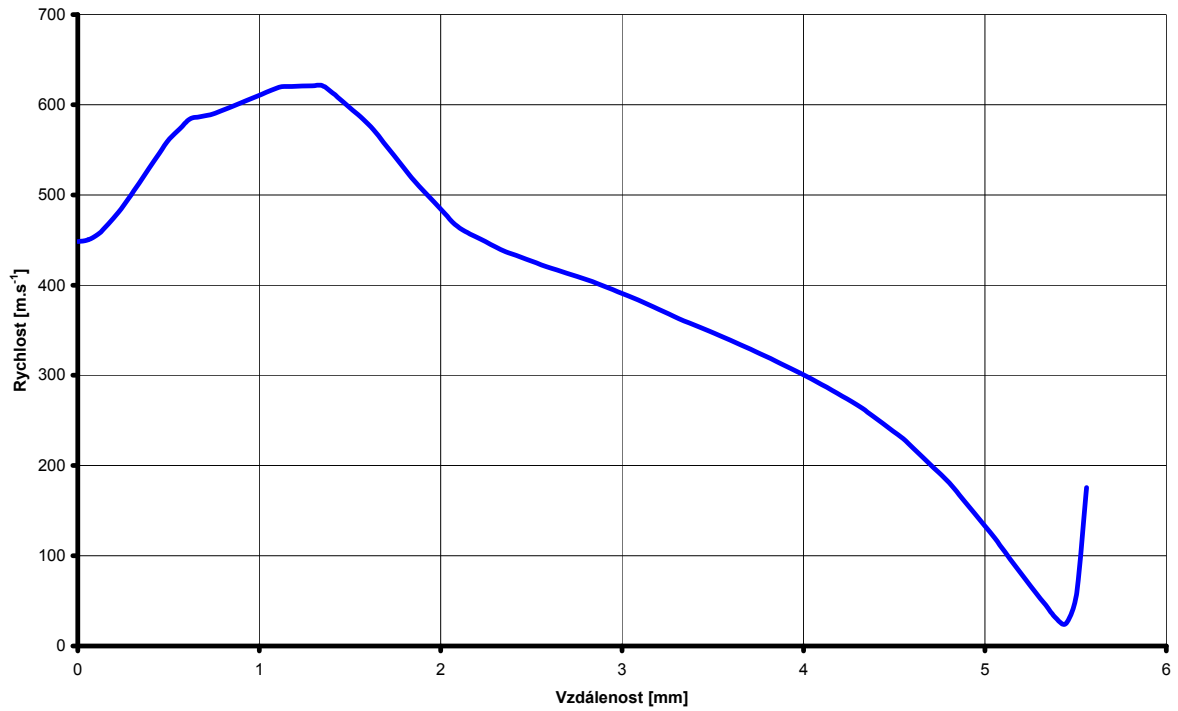
2,86	131,99	0,00154	401,76	1,16
2,92	131,76	0,00153	397,23	1,14
2,98	131,52	0,00151	392,70	1,13
3,03	131,29	0,00150	388,17	1,11
3,09	131,12	0,00149	383,54	1,09
3,15	131,27	0,00148	378,39	1,08
3,20	131,43	0,00147	373,23	1,06
3,26	131,58	0,00147	368,07	1,04
3,31	131,74	0,00146	362,92	1,02
3,37	131,72	0,00145	358,14	1,01
3,43	131,64	0,00144	353,48	0,99
3,48	131,57	0,00143	348,81	0,97
3,54	131,50	0,00142	344,14	0,96
3,59	131,56	0,00142	339,27	0,94
3,65	131,82	0,00141	334,10	0,93
3,71	132,07	0,00141	328,92	0,91
3,76	132,33	0,00140	323,75	0,89
3,82	132,59	0,00140	318,56	0,88
3,88	132,99	0,00140	312,97	0,86
3,93	133,39	0,00140	307,37	0,84
3,99	133,80	0,00139	301,77	0,82
4,04	134,20	0,00139	296,18	0,81
4,10	134,78	0,00139	289,98	0,79
4,16	135,46	0,00139	283,46	0,77
4,21	136,14	0,00140	276,93	0,75
4,27	136,81	0,00140	270,41	0,73
4,32	137,63	0,00140	263,39	0,71
4,38	138,83	0,00140	255,00	0,69
4,44	140,03	0,00141	246,61	0,66
4,49	141,23	0,00141	238,22	0,64
4,55	142,44	0,00142	229,83	0,62
4,61	144,04	0,00143	219,28	0,59
4,66	145,70	0,00144	208,46	0,56
4,72	147,35	0,00145	197,64	0,53
4,77	149,01	0,00146	186,82	0,50
4,83	150,81	0,00147	174,53	0,46
4,89	152,74	0,00148	160,81	0,43
4,94	154,68	0,00149	147,09	0,39
5,00	156,62	0,00150	133,38	0,36
5,05	158,53	0,00151	119,44	0,32
5,11	160,28	0,00153	104,04	0,28
5,17	162,05	0,00154	88,71	0,24
5,22	164,08	0,00155	74,04	0,20
5,28	166,15	0,00156	59,48	0,16
5,34	167,38	0,00157	45,18	0,12
5,39	168,33	0,00157	31,00	0,08
5,45	167,41	0,00154	25,27	0,07
5,50	143,25	0,00125	56,69	0,14
5,56	0,02	0,00041	175,64	30,83



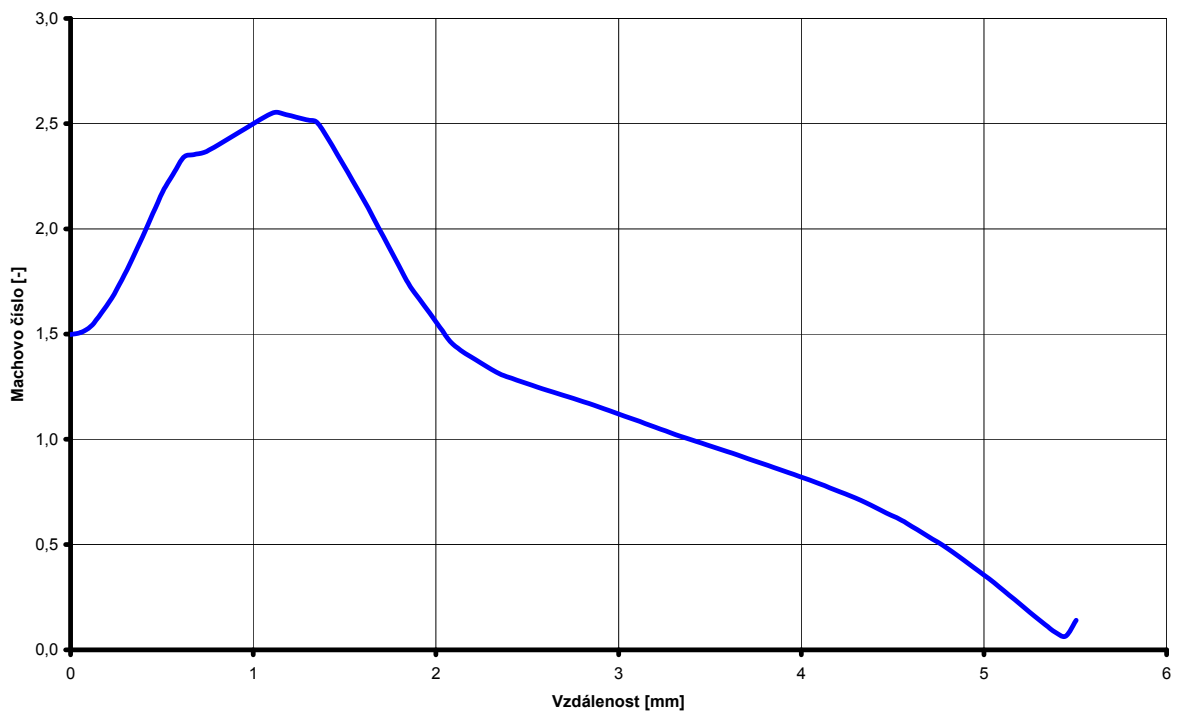
Obr. 10.76 Rozložení tlaku na křivce KV 800.



Obr. 10.77 Rozložení hustoty na křivce KV 800.



Obr. 10.78 Rozložení rychlostí na křivce KV 800.



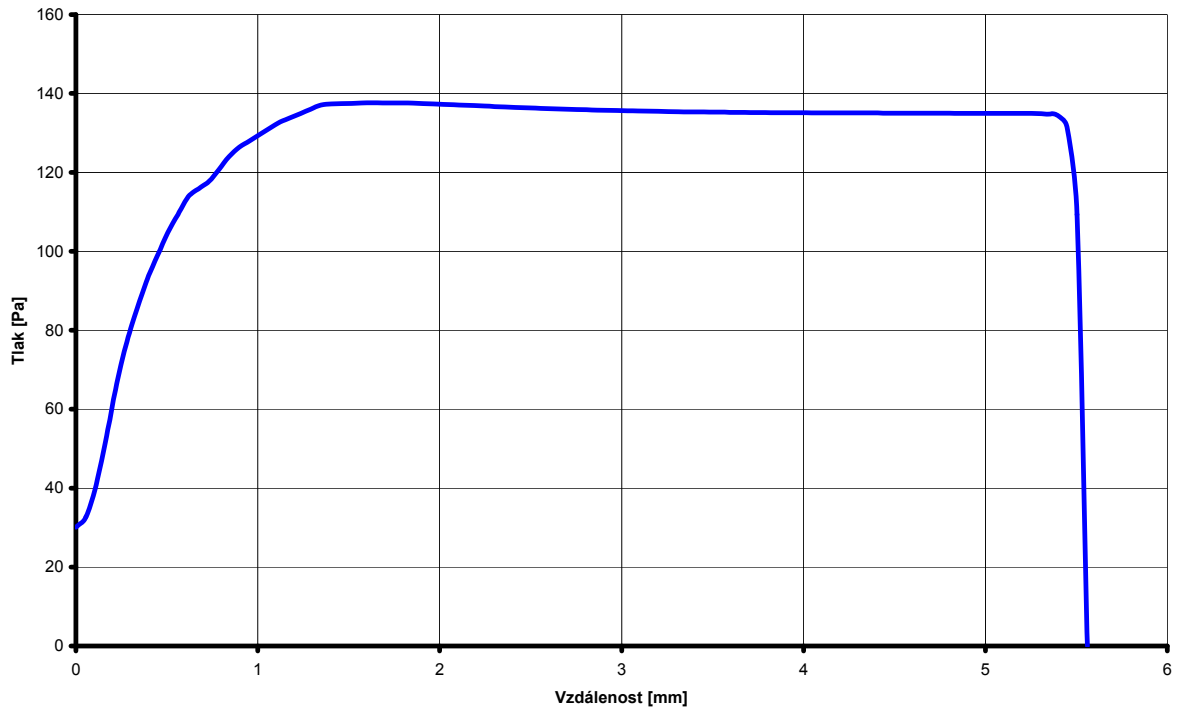
Obr. 10.79 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze KV 800.

10.4.3 Vyhodnocení KV 600

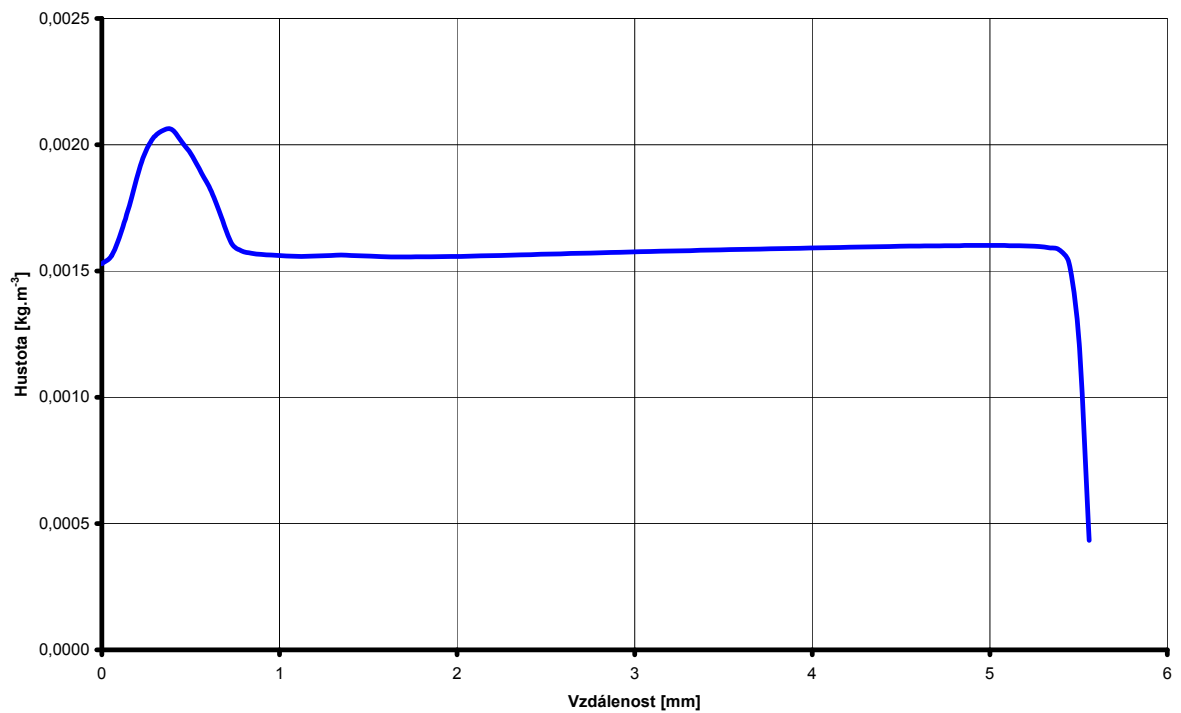
Tabulka 10.13 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	30,07	0,00153	688,61	4,15
0,06	32,72	0,00156	684,33	4,00
0,11	40,84	0,00166	673,08	3,70
0,17	53,21	0,00179	653,66	3,33
0,22	66,48	0,00193	632,50	2,96
0,28	77,08	0,00202	614,95	2,70
0,34	85,45	0,00205	600,19	2,51
0,39	93,01	0,00206	586,24	2,34
0,45	98,98	0,00201	573,90	2,20
0,51	104,74	0,00196	559,55	2,06
0,56	109,32	0,00189	533,73	1,89
0,62	113,89	0,00181	507,91	1,73
0,67	115,84	0,00171	452,72	1,50
0,73	117,67	0,00161	396,27	1,26
0,79	120,67	0,00158	363,05	1,13
0,84	124,02	0,00157	336,80	1,02
0,90	126,38	0,00157	317,34	0,95
0,95	128,00	0,00156	302,79	0,90
1,01	129,63	0,00156	288,25	0,85
1,07	131,25	0,00156	273,71	0,80
1,12	132,77	0,00156	259,83	0,76
1,18	133,85	0,00156	248,61	0,72
1,24	134,93	0,00156	237,38	0,69
1,29	136,00	0,00156	226,16	0,65
1,35	137,08	0,00156	214,94	0,62
1,40	137,34	0,00156	205,21	0,59
1,46	137,43	0,00156	195,80	0,56
1,52	137,51	0,00156	186,39	0,53
1,57	137,59	0,00156	176,98	0,51
1,63	137,63	0,00156	168,23	0,48
1,68	137,61	0,00156	160,33	0,46
1,74	137,59	0,00156	152,42	0,43
1,80	137,57	0,00156	144,52	0,41
1,85	137,54	0,00156	136,71	0,39
1,91	137,44	0,00156	130,45	0,37
1,97	137,35	0,00156	124,19	0,35
2,02	137,25	0,00156	117,92	0,34
2,08	137,15	0,00156	111,66	0,32
2,13	137,04	0,00156	106,33	0,30
2,19	136,93	0,00156	101,43	0,29
2,25	136,81	0,00156	96,53	0,28
2,30	136,70	0,00156	91,64	0,26
2,36	136,59	0,00156	87,06	0,25
2,41	136,49	0,00156	83,22	0,24
2,47	136,38	0,00157	79,38	0,23
2,53	136,28	0,00157	75,54	0,22
2,58	136,18	0,00157	71,70	0,21
2,64	136,10	0,00157	68,62	0,20
2,70	136,02	0,00157	65,60	0,19
2,75	135,94	0,00157	62,59	0,18
2,81	135,86	0,00157	59,57	0,17

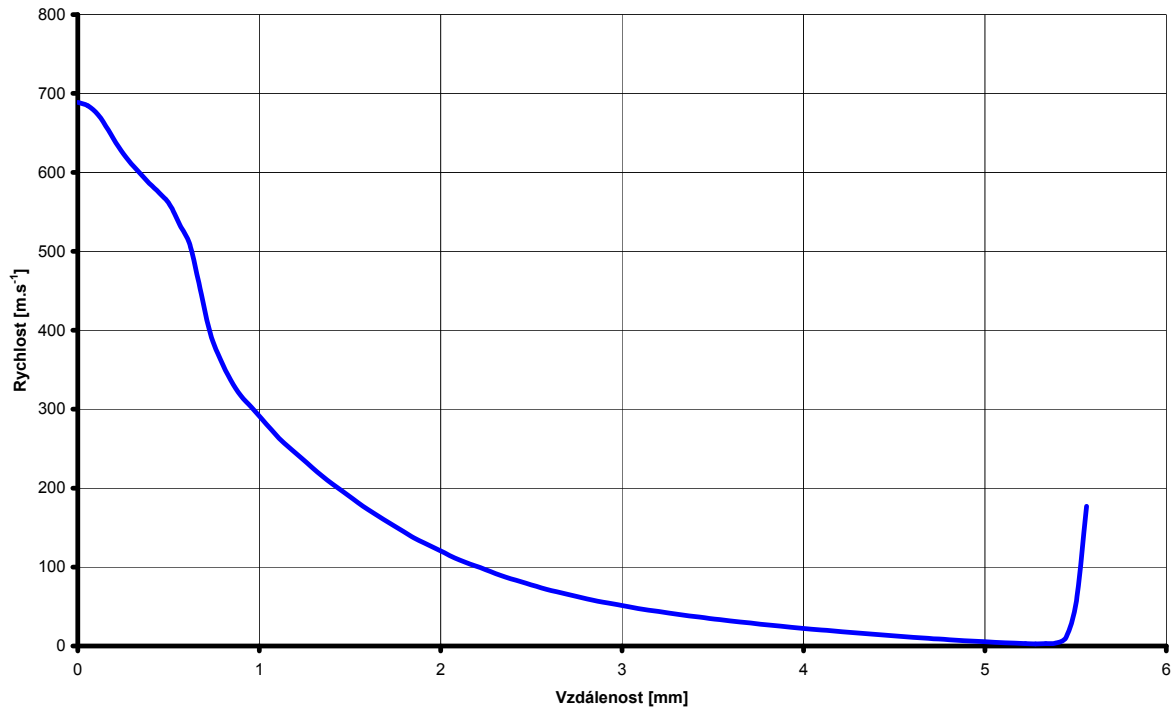
2,86	135,79	0,00157	56,90	0,16
2,92	135,73	0,00157	54,52	0,16
2,98	135,67	0,00158	52,14	0,15
3,03	135,61	0,00158	49,76	0,14
3,09	135,55	0,00158	47,45	0,14
3,15	135,51	0,00158	45,53	0,13
3,20	135,46	0,00158	43,61	0,13
3,26	135,42	0,00158	41,69	0,12
3,31	135,38	0,00158	39,77	0,12
3,37	135,34	0,00158	38,10	0,11
3,43	135,31	0,00158	36,50	0,11
3,48	135,28	0,00158	34,89	0,10
3,54	135,25	0,00158	33,29	0,10
3,59	135,22	0,00159	31,78	0,09
3,65	135,20	0,00159	30,39	0,09
3,71	135,18	0,00159	29,00	0,08
3,76	135,16	0,00159	27,62	0,08
3,82	135,14	0,00159	26,23	0,08
3,88	135,12	0,00159	25,01	0,07
3,93	135,11	0,00159	23,78	0,07
3,99	135,10	0,00159	22,55	0,07
4,04	135,09	0,00159	21,32	0,06
4,10	135,08	0,00159	20,17	0,06
4,16	135,07	0,00159	19,07	0,06
4,21	135,06	0,00159	17,96	0,05
4,27	135,06	0,00159	16,86	0,05
4,32	135,05	0,00160	15,78	0,05
4,38	135,04	0,00160	14,78	0,04
4,44	135,04	0,00160	13,78	0,04
4,49	135,03	0,00160	12,79	0,04
4,55	135,02	0,00160	11,79	0,03
4,61	135,02	0,00160	10,89	0,03
4,66	135,01	0,00160	10,00	0,03
4,72	135,00	0,00160	9,11	0,03
4,77	134,99	0,00160	8,23	0,02
4,83	134,99	0,00160	7,41	0,02
4,89	134,98	0,00160	6,67	0,02
4,94	134,97	0,00160	5,93	0,02
5,00	134,97	0,00160	5,19	0,02
5,05	134,96	0,00160	4,48	0,01
5,11	134,97	0,00160	3,94	0,01
5,17	134,97	0,00160	3,41	0,01
5,22	134,95	0,00160	3,02	0,01
5,28	134,93	0,00160	2,64	0,01
5,34	134,76	0,00159	3,06	0,01
5,39	134,55	0,00158	3,75	0,01
5,45	131,56	0,00153	11,30	0,03
5,50	109,34	0,00121	57,10	0,16
5,56	0,02	0,00043	176,98	32,02



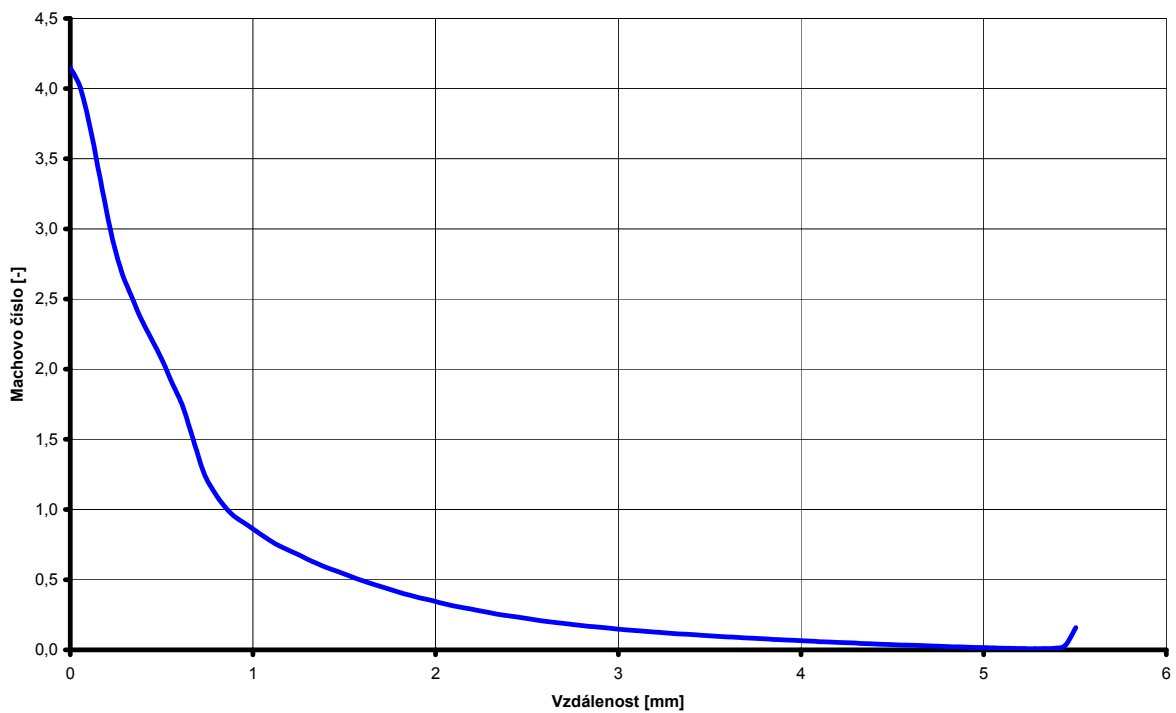
Obr. 10.80 Rozložení tlaku na křivce KV 600.



Obr. 10.81 Rozložení hustoty na křivce KV 600.



Obr. 10.82 Rozložení rychlostí na křivce KV 600.



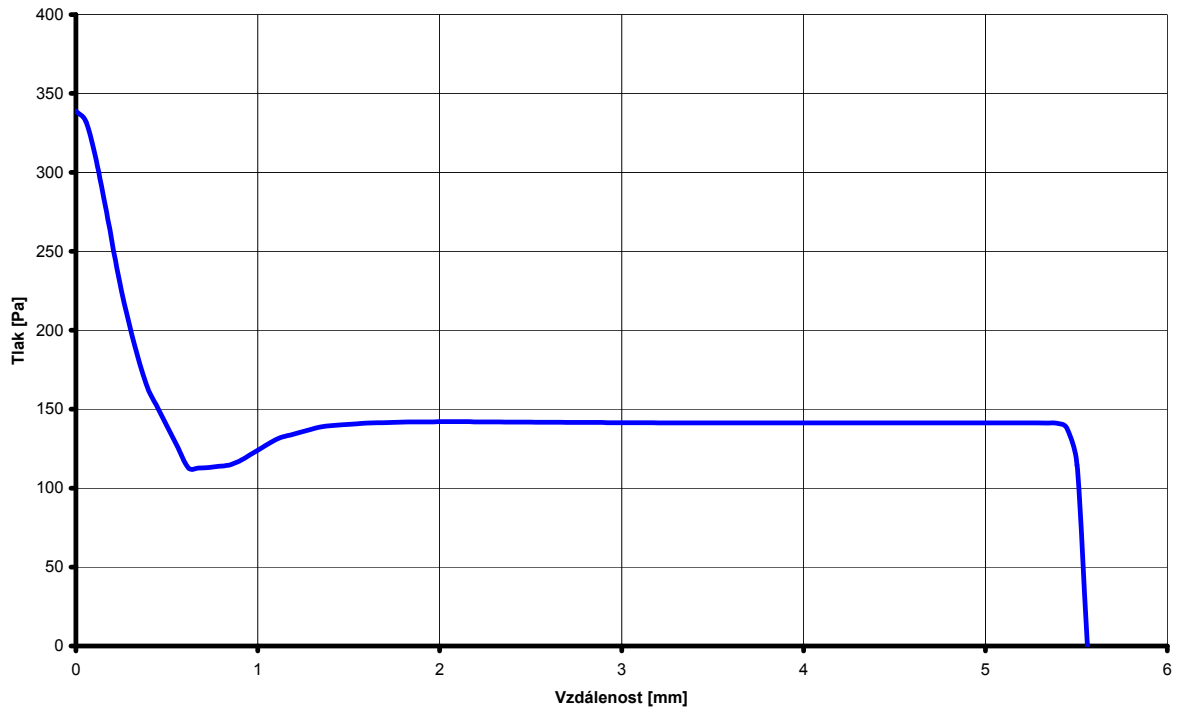
Obr. 10.83 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze KV 600.

10.4.4 Vyhodnocení KV 400

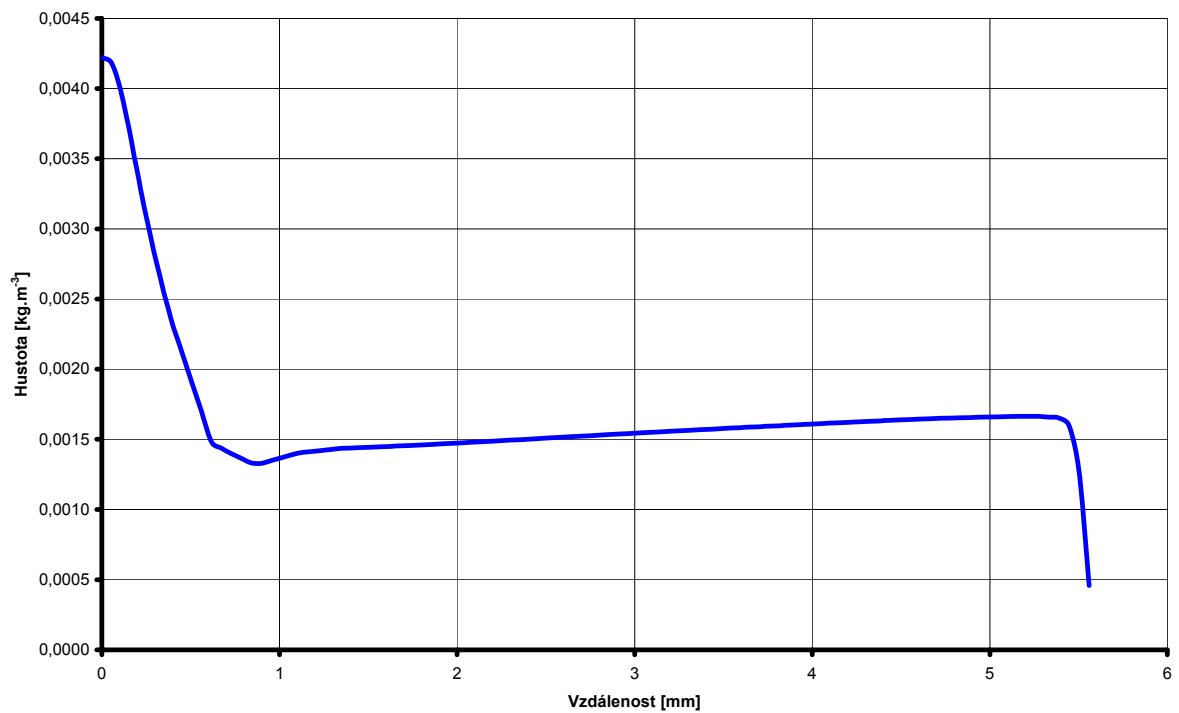
Tabulka 10.14 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	338,74	0,00422	355,10	1,06
0,06	332,17	0,00418	360,10	1,08
0,11	307,80	0,00395	374,78	1,14
0,17	274,72	0,00361	395,19	1,22
0,22	239,77	0,00324	417,20	1,30
0,28	210,01	0,00291	435,22	1,38
0,34	184,81	0,00261	449,60	1,44
0,39	163,83	0,00234	458,60	1,47
0,45	151,09	0,00213	457,06	1,45
0,51	138,34	0,00191	455,53	1,43
0,56	125,60	0,00170	453,99	1,41
0,62	112,85	0,00148	452,45	1,39
0,67	112,70	0,00144	437,17	1,33
0,73	113,09	0,00140	421,30	1,26
0,79	113,77	0,00136	404,69	1,20
0,84	114,54	0,00133	387,87	1,13
0,90	117,08	0,00133	368,95	1,06
0,95	120,90	0,00135	348,53	1,00
1,01	124,73	0,00137	328,10	0,93
1,07	128,55	0,00139	307,67	0,86
1,12	131,96	0,00141	288,94	0,80
1,18	133,68	0,00141	277,00	0,77
1,24	135,40	0,00142	265,06	0,73
1,29	137,13	0,00143	253,12	0,69
1,35	138,85	0,00143	241,19	0,66
1,40	139,54	0,00144	230,96	0,63
1,46	140,01	0,00144	221,11	0,60
1,52	140,48	0,00144	211,26	0,57
1,57	140,94	0,00145	201,41	0,55
1,63	141,28	0,00145	192,37	0,52
1,68	141,46	0,00145	184,37	0,50
1,74	141,63	0,00146	176,38	0,48
1,80	141,81	0,00146	168,38	0,46
1,85	141,97	0,00146	160,49	0,44
1,91	141,99	0,00147	154,20	0,42
1,97	142,01	0,00147	147,91	0,40
2,02	142,03	0,00147	141,62	0,39
2,08	142,05	0,00148	135,33	0,37
2,13	142,03	0,00148	129,93	0,36
2,19	141,99	0,00149	124,95	0,34
2,25	141,95	0,00149	119,97	0,33
2,30	141,92	0,00149	114,99	0,32
2,36	141,88	0,00150	110,30	0,30
2,41	141,83	0,00150	106,28	0,29
2,47	141,79	0,00151	102,27	0,28
2,53	141,74	0,00151	98,26	0,27
2,58	141,70	0,00151	94,24	0,26
2,64	141,66	0,00152	90,90	0,25
2,70	141,62	0,00152	87,61	0,24
2,75	141,59	0,00153	84,33	0,23
2,81	141,55	0,00153	81,04	0,23

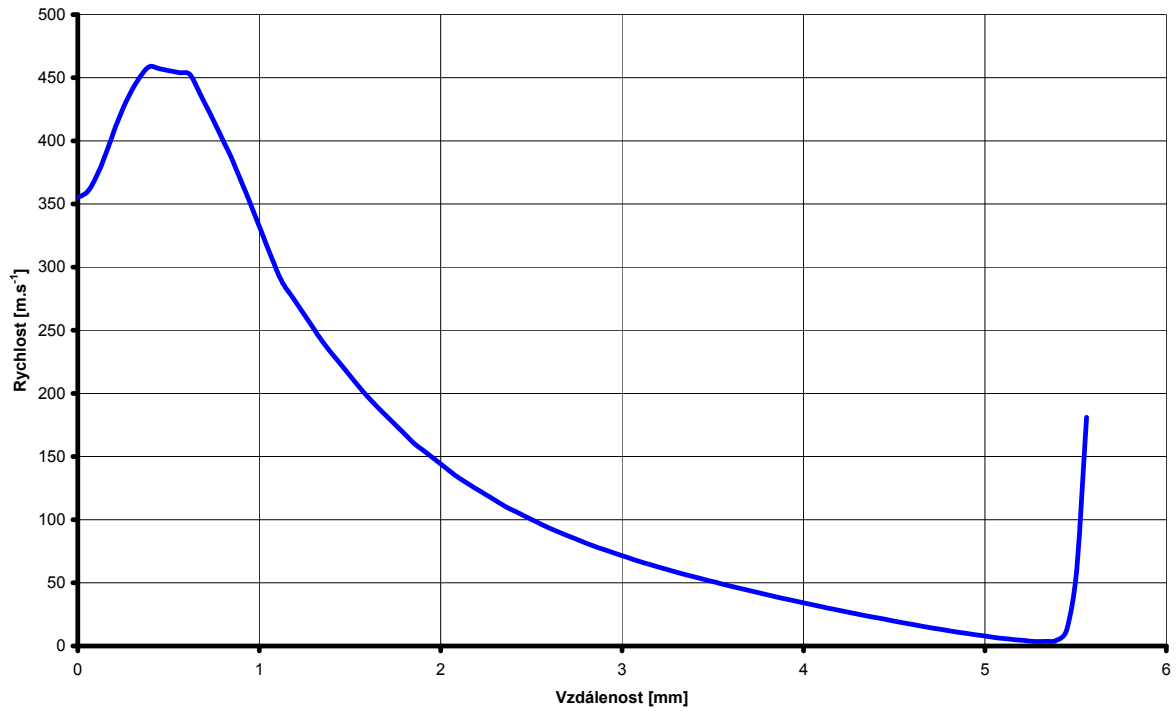
2,86	141,52	0,00153	78,06	0,22
2,92	141,49	0,00154	75,32	0,21
2,98	141,47	0,00154	72,59	0,20
3,03	141,44	0,00155	69,86	0,20
3,09	141,42	0,00155	67,19	0,19
3,15	141,40	0,00155	64,85	0,18
3,20	141,38	0,00156	62,51	0,18
3,26	141,36	0,00156	60,17	0,17
3,31	141,35	0,00156	57,83	0,16
3,37	141,33	0,00157	55,69	0,16
3,43	141,32	0,00157	53,61	0,15
3,48	141,31	0,00158	51,54	0,15
3,54	141,30	0,00158	49,46	0,14
3,59	141,29	0,00158	47,45	0,13
3,65	141,28	0,00159	45,55	0,13
3,71	141,28	0,00159	43,65	0,12
3,76	141,27	0,00159	41,75	0,12
3,82	141,27	0,00160	39,85	0,11
3,88	141,27	0,00160	38,08	0,11
3,93	141,27	0,00160	36,31	0,10
3,99	141,27	0,00161	34,54	0,10
4,04	141,27	0,00161	32,77	0,09
4,10	141,27	0,00161	31,07	0,09
4,16	141,27	0,00162	29,41	0,08
4,21	141,27	0,00162	27,75	0,08
4,27	141,27	0,00163	26,10	0,08
4,32	141,27	0,00163	24,47	0,07
4,38	141,28	0,00163	22,93	0,07
4,44	141,28	0,00163	21,39	0,06
4,49	141,28	0,00164	19,85	0,06
4,55	141,29	0,00164	18,30	0,05
4,61	141,29	0,00164	16,89	0,05
4,66	141,29	0,00165	15,49	0,05
4,72	141,29	0,00165	14,10	0,04
4,77	141,29	0,00165	12,70	0,04
4,83	141,30	0,00165	11,41	0,03
4,89	141,30	0,00166	10,22	0,03
4,94	141,31	0,00166	9,03	0,03
5,00	141,31	0,00166	7,84	0,02
5,05	141,32	0,00166	6,69	0,02
5,11	141,35	0,00166	5,81	0,02
5,17	141,37	0,00166	4,94	0,01
5,22	141,38	0,00166	4,22	0,01
5,28	141,38	0,00166	3,53	0,01
5,34	141,23	0,00166	3,71	0,01
5,39	141,02	0,00165	4,19	0,01
5,45	137,90	0,00159	11,66	0,03
5,50	114,59	0,00126	58,00	0,16
5,56	0,02	0,00046	181,02	33,75



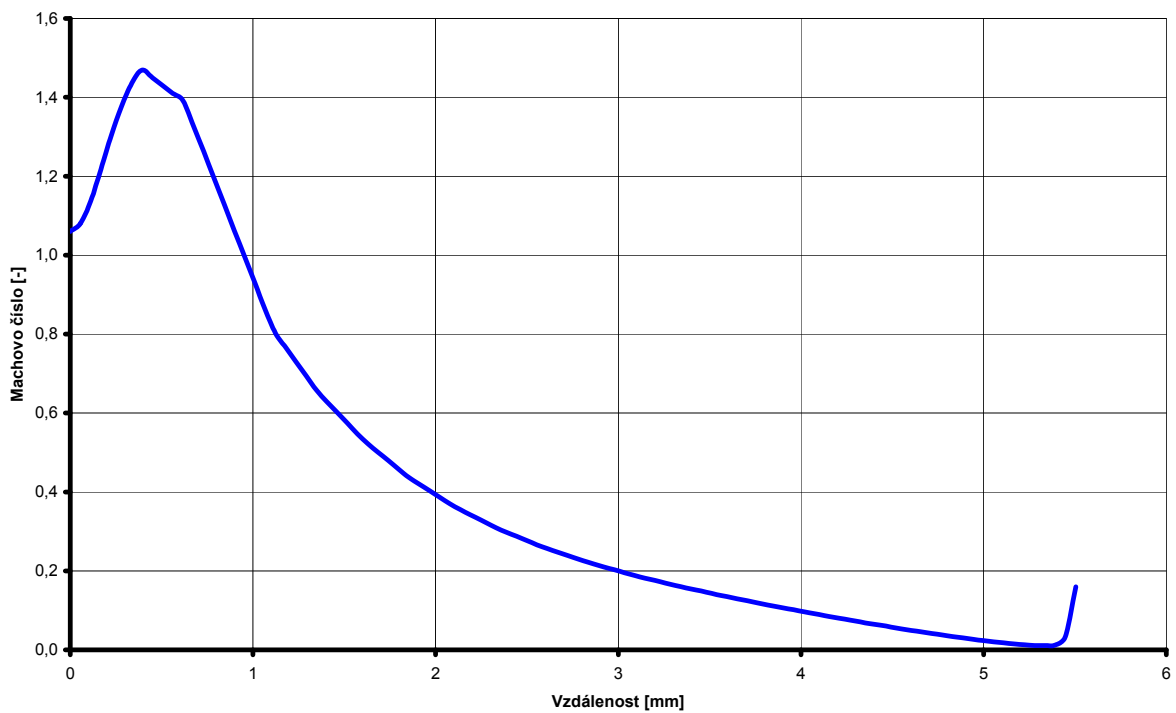
Obr. 10.84 Rozložení tlaku na křivce KV 400.



Obr. 10.85 Rozložení hustoty na křivce KV 400.



Obr. 10.86 Rozložení rychlostí na křivce KV 400.



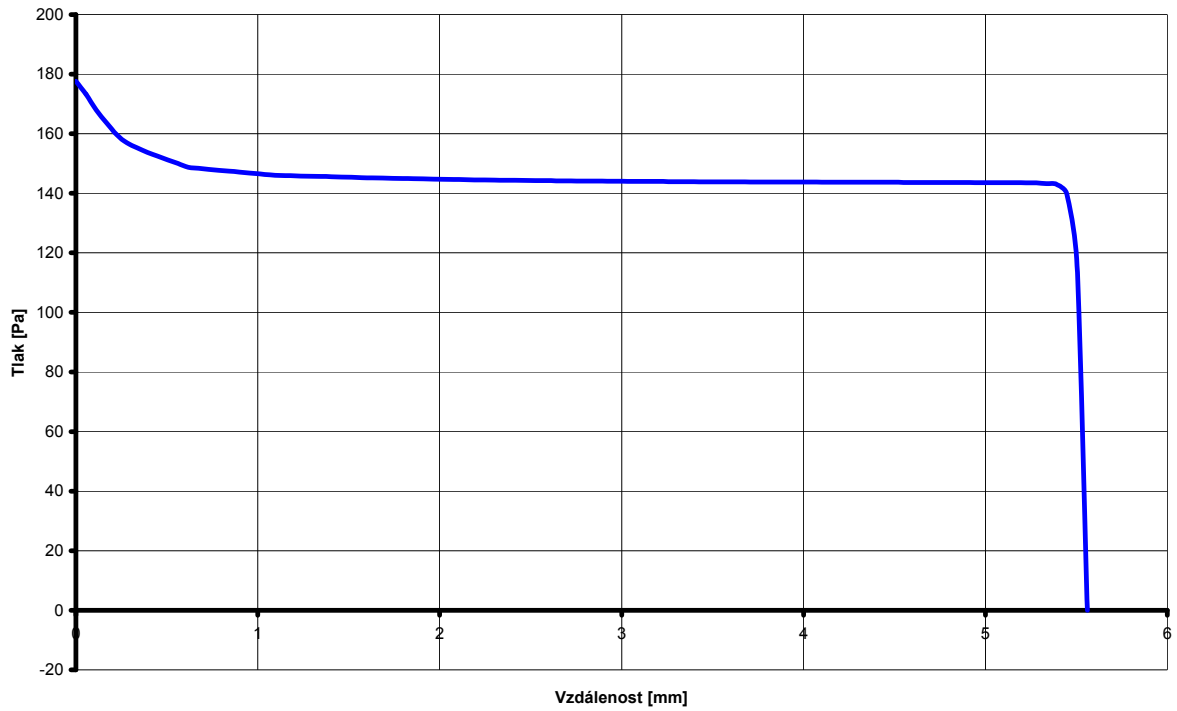
Obr. 10.87 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze KV 400.

10.4.5 Vyhodnocení KV 200

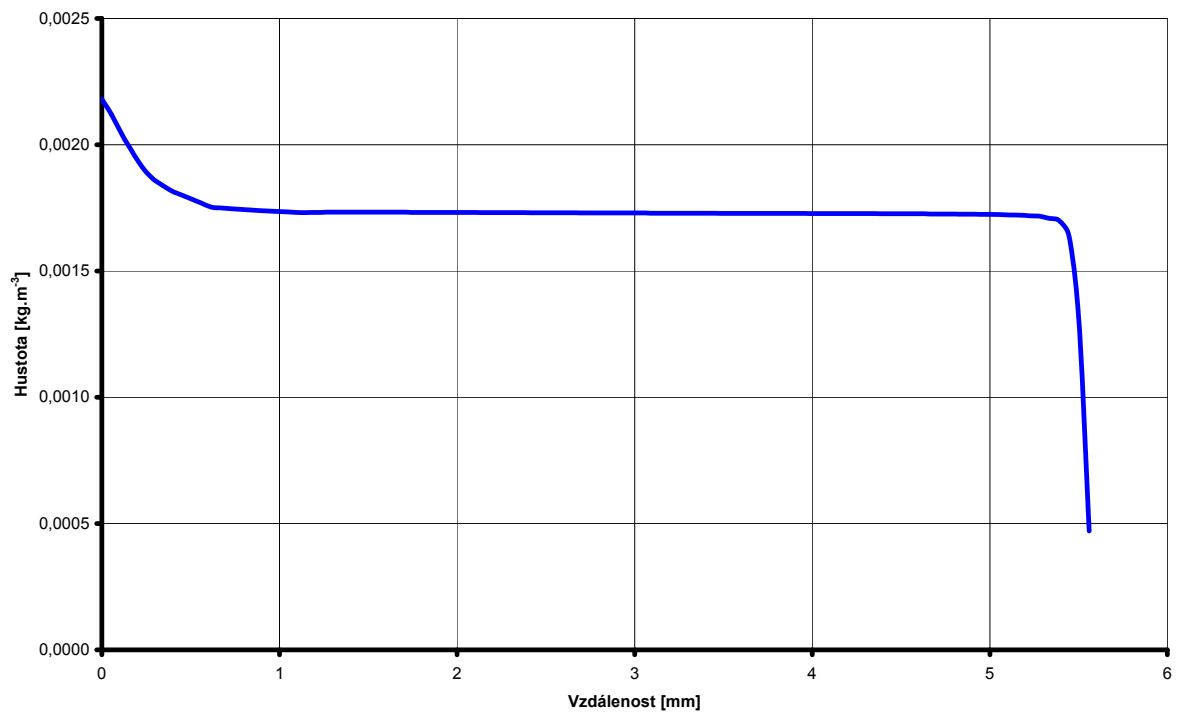
Tabulka 10.15 Rozložení tlaku, hustoty, rychlosti a Machova čísla pro vynesení křivky

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Hustota [kg.m ⁻³]	Rychlost [m.s ⁻¹]	Machovo číslo [-]
0,00	177,57	0,00218	191,49	0,567
0,06	173,25	0,00212	192,87	0,570
0,11	167,99	0,00204	191,73	0,565
0,17	163,59	0,00198	185,61	0,546
0,22	159,67	0,00191	178,06	0,522
0,28	156,93	0,00187	169,10	0,494
0,34	155,25	0,00184	158,73	0,463
0,39	153,71	0,00182	147,50	0,430
0,45	152,46	0,00180	134,59	0,393
0,51	151,22	0,00178	121,69	0,355
0,56	149,97	0,00177	108,78	0,318
0,62	148,72	0,00175	95,87	0,281
0,67	148,37	0,00175	89,18	0,261
0,73	148,05	0,00175	82,74	0,242
0,79	147,73	0,00174	76,38	0,224
0,84	147,41	0,00174	70,04	0,205
0,90	147,10	0,00174	64,97	0,190
0,95	146,80	0,00174	60,83	0,178
1,01	146,50	0,00173	56,68	0,166
1,07	146,20	0,00173	52,53	0,154
1,12	145,95	0,00173	48,70	0,143
1,18	145,87	0,00173	46,13	0,135
1,24	145,80	0,00173	43,55	0,128
1,29	145,73	0,00173	40,98	0,120
1,35	145,66	0,00173	38,41	0,113
1,40	145,56	0,00173	36,43	0,107
1,46	145,45	0,00173	34,59	0,101
1,52	145,35	0,00173	32,75	0,096
1,57	145,25	0,00173	30,91	0,091
1,63	145,16	0,00173	29,30	0,086
1,68	145,09	0,00173	28,00	0,082
1,74	145,02	0,00173	26,69	0,078
1,80	144,95	0,00173	25,39	0,074
1,85	144,88	0,00173	24,11	0,071
1,91	144,81	0,00173	23,14	0,068
1,97	144,75	0,00173	22,18	0,065
2,02	144,69	0,00173	21,22	0,062
2,08	144,63	0,00173	20,26	0,059
2,13	144,57	0,00173	19,44	0,057
2,19	144,52	0,00173	18,69	0,055
2,25	144,47	0,00173	17,93	0,053
2,30	144,42	0,00173	17,18	0,050
2,36	144,37	0,00173	16,47	0,048
2,41	144,34	0,00173	15,87	0,047
2,47	144,30	0,00173	15,26	0,045
2,53	144,26	0,00173	14,66	0,043
2,58	144,22	0,00173	14,05	0,041
2,64	144,19	0,00173	13,56	0,040
2,70	144,16	0,00173	13,07	0,038
2,75	144,13	0,00173	12,58	0,037
2,81	144,10	0,00173	12,09	0,035

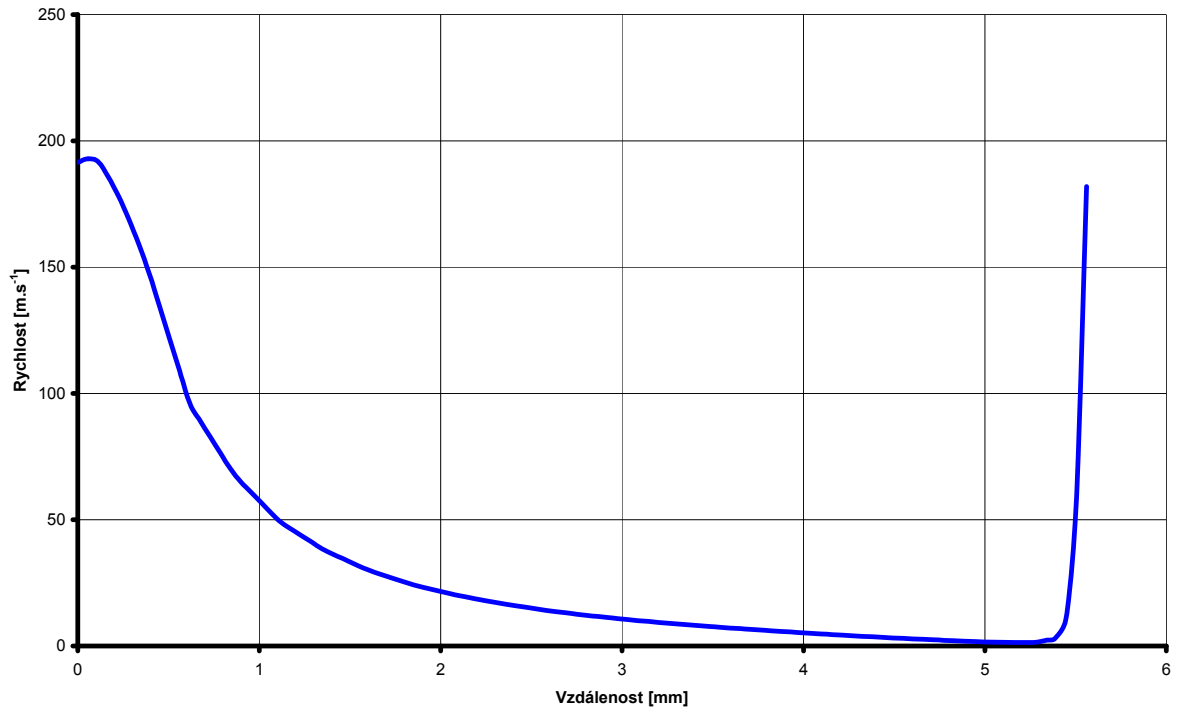
2,86	144,07	0,00173	11,64	0,034
2,92	144,05	0,00173	11,24	0,033
2,98	144,02	0,00173	10,83	0,032
3,03	144,00	0,00173	10,43	0,031
3,09	143,97	0,00173	10,03	0,029
3,15	143,95	0,00173	9,69	0,028
3,20	143,93	0,00173	9,34	0,027
3,26	143,91	0,00173	8,99	0,026
3,31	143,89	0,00173	8,65	0,025
3,37	143,88	0,00173	8,33	0,024
3,43	143,86	0,00173	8,02	0,024
3,48	143,84	0,00173	7,71	0,023
3,54	143,83	0,00173	7,40	0,022
3,59	143,81	0,00173	7,11	0,021
3,65	143,80	0,00173	6,83	0,020
3,71	143,79	0,00173	6,55	0,019
3,76	143,78	0,00173	6,27	0,018
3,82	143,77	0,00173	5,99	0,018
3,88	143,76	0,00173	5,74	0,017
3,93	143,75	0,00173	5,49	0,016
3,99	143,74	0,00173	5,23	0,015
4,04	143,73	0,00173	4,98	0,015
4,10	143,72	0,00173	4,74	0,014
4,16	143,71	0,00173	4,51	0,013
4,21	143,71	0,00173	4,28	0,013
4,27	143,70	0,00173	4,05	0,012
4,32	143,69	0,00173	3,82	0,011
4,38	143,68	0,00173	3,61	0,011
4,44	143,67	0,00173	3,40	0,010
4,49	143,67	0,00173	3,19	0,009
4,55	143,66	0,00173	2,98	0,009
4,61	143,65	0,00173	2,79	0,008
4,66	143,64	0,00173	2,60	0,008
4,72	143,63	0,00173	2,42	0,007
4,77	143,62	0,00173	2,23	0,007
4,83	143,61	0,00172	2,06	0,006
4,89	143,60	0,00172	1,91	0,006
4,94	143,60	0,00172	1,76	0,005
5,00	143,59	0,00172	1,61	0,005
5,05	143,58	0,00172	1,46	0,004
5,11	143,56	0,00172	1,38	0,004
5,17	143,55	0,00172	1,31	0,004
5,22	143,51	0,00172	1,37	0,004
5,28	143,47	0,00172	1,44	0,004
5,34	143,24	0,00171	2,22	0,007
5,39	142,94	0,00170	3,28	0,010
5,45	139,60	0,00164	11,32	0,033
5,50	115,70	0,00128	58,23	0,161
5,56	0,02	0,00047	181,90	34,373



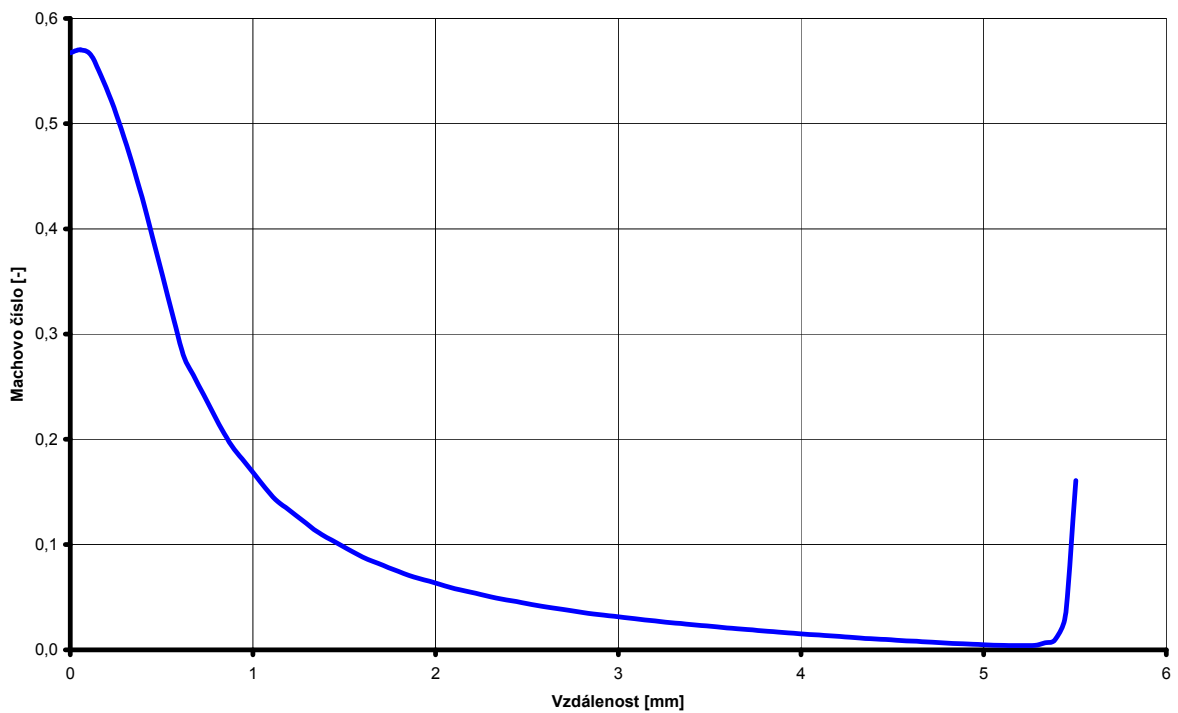
Obr. 10.88 Rozložení tlaku na křivce KV 200.



Obr. 10.89 Rozložení hustoty na křivce KV 200.



Obr. 10.90 Rozložení rychlostí na křivce KV 200.



Obr. 10.91 Průběh hodnoty Machova čísla na dráze KV 200.