Piezoelektrický generátor kapek pro kalibraci metody IPI

Dvořák L., Čížek J., Nováková L.

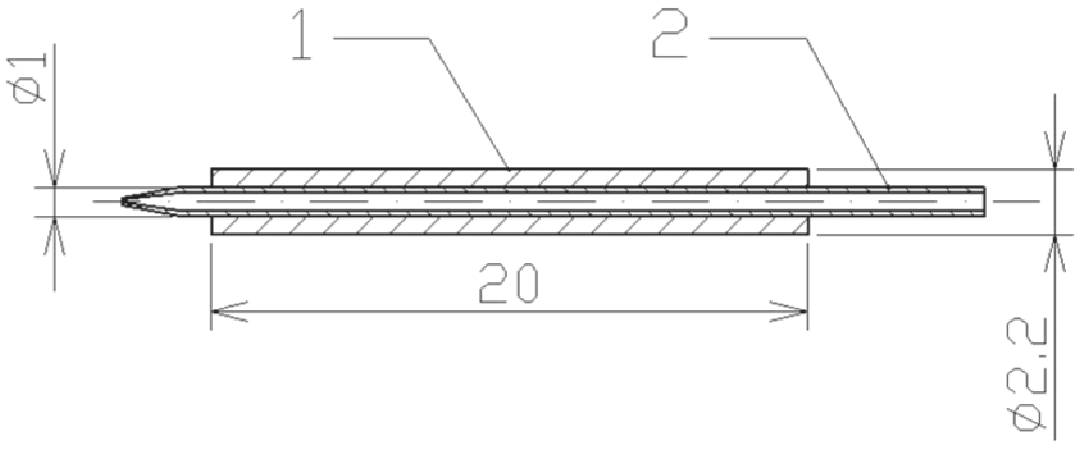
1. Abstrakt

Prezentovaný projekt je zaměřen na konstrukci piezoelektrického generátoru kapek. Navrhovaný generátor kapek bude použit pro simulaci a objasnění dějů, ke kterým dochází v chladicích věžích při dopadu kapky na plochy eliminátorů kapek a tím k snížení vodních ztrát ve věži. Dále může být použit pro kalibraci měřicí metody Interferometric Particle Imaging (IPI), která se používá právě pro měření velikosti a pohybu částic v dvoufázovém proudění. Kalibrace je založena na principu měření koncentrace fluorescenčního barviva (Rhodamin 6G) nakapaného do známého množství vody. Konstrukce generátoru je tvořena válcovitou skleněnou kapilárou uloženou v piezokeramické trubičce. Kapky jsou tvořeny pomocí kapilárních jevů na čele generátoru a pomocí mechanické energie, která je na skleněnou kapiláru přenesena díky podélnému smrštění piezokeramické trubičky.

2. Motivace

V četných aplikacích farmacie, biotechnologie, v pracích zabývajících se optickými metodami měření, ale i v oblasti výzkumu chování aerosolu je potřeba vytváření jednotných, přesných kapiček o konstantním průměru v řádu desítek mikrometrů. Pro měření optickými metodami v tomto rozsahu je stěžejní získat homogenní, kulovité částice s co nejhladším povrchem. Toho lze snadno dosáhnout použitím vodních kapiček, které jsou do 100 µm téměř dokonale sférické. Další výhodou při použití piezoelektrického generátoru je velmi malé množství kapaliny potřebné pro generování kapek. Přesnost a spolehlivost generátoru při tvorbě kapek byla ověřena pomocí experimentálních dat.

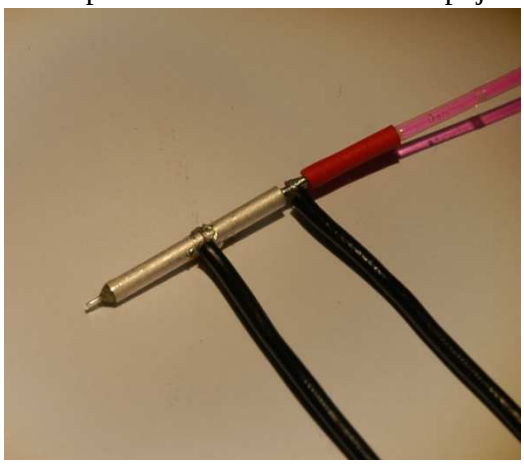
3. Konstrukce a výroba generátoru



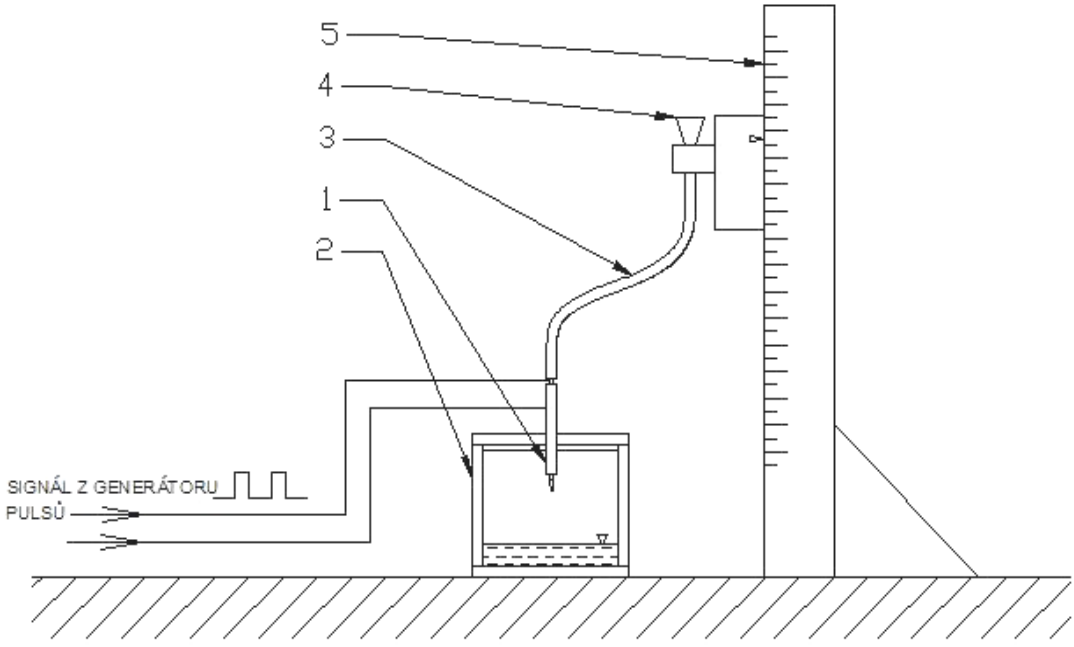
Obr 3.1. Generátor: 1 – Piezokeramická trubička, 2 – skleněná kapilára.

Samotný generátor je tvořen válcovitou skleněnou kapilárou uloženou v piezokeramické trubičce (obr. 3.1). Celý vnitřní a vnější povrch piezokeramické trubičky

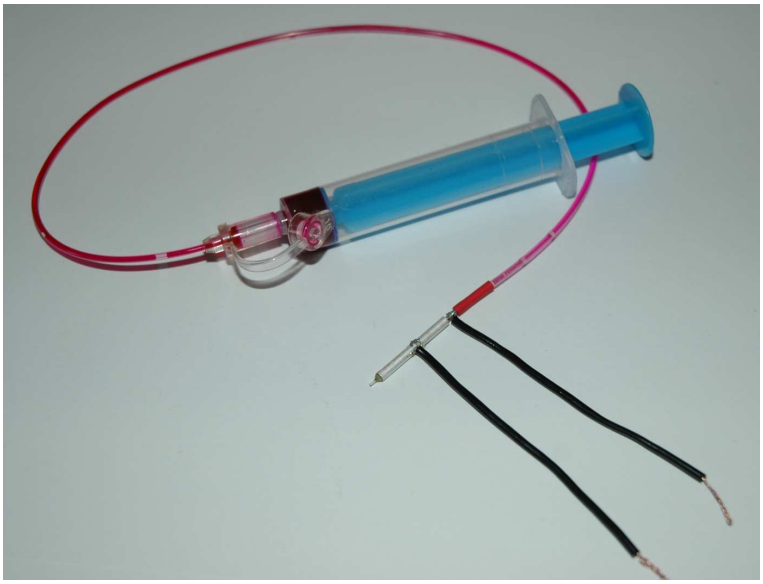
tvoří elektrody. Svorkové napětí mezi vnitřním a vnějším povrchem má za následek kontrakci v podélném (cca. 4µm/500V) i příčném (cca. 0,4µm/500V) směru. Energie elektrického pulzu je tedy přenesena z piezokrystalu, v podobě mechanické energie, pomocí kapiláry do kapaliny. Prvořadý význam pro vytvoření přetlaku v kapalině tvoří mechanické spojení kapiláry a piezokeramiky. Vhodné spojení trubičky s kapilárou je zaručeno použitím epoxidového dvousložkového lepidla Araldit AY103 s vytvrzovačem HY991 s následným vytvrzením v peci při 100°C po dobu 30min. Kapilára byla vyrobena z boritokřemičitého skla (pro jeho vysokou tepelnou odolnost a nízkou teplotní roztažnost). Vnitřní průměr kapiláry je přibližně 0,6mm). Přenos elektrické energie na vnitřní elektrodu piezokeramické trubičky je zaručen vsunutím tenké (20µm), srolované, stříbrné folie mezi trubičku a kapiláru. Teprve k vyčnívajícímu konci folie je připájen přívodní drátek. Piezokeramická trubička je i s kapilárou chráněna před mechanickým poničením a elektricky izolována vsunutím do plastové trubičky a je zalita v silikonu. Elektrickou řídící jednotkou je generátor pulzů, u kterých můžeme plynule měnit jejich šířku, amplitudu a frekvenci. Tyto hodnoty ovlivňují kvalitativní i kvantitativní vlastnosti kapek. Další parametr, kterým je možno ovlivnit tvorbu kapek, je hydrostatický tlak na výstupu z kapiláry, který regulujeme nastavením výšky hladiny reservoáru s kapalinou.



Obr 3.2. Generátor kapek



Obr 3.3. Soustava pro generování kapek: 1 – Generátor kapek, 2 – kádinka pro zachycování kapek, 3 – hadička pro přívod kapaliny, 4 – reservoár kapaliny, 5 – zařízení pro přesné řízení výšky hladiny.



Obr 3.4. Generátor kapek s přiletovanými dráty, přívodní hadičkou a injekční stříkačkou

4. Dokončování trysky

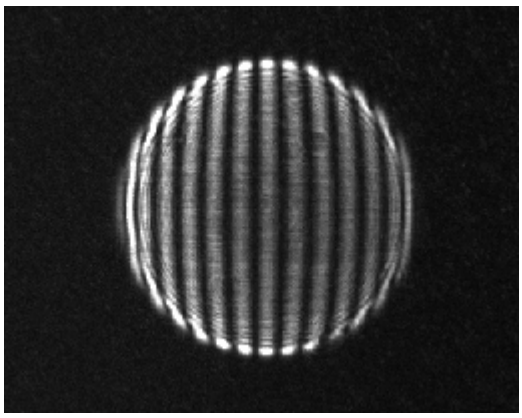
Pro tvorbu kapek je stěžejní tvar čela trysky, kde se kapky tvoří. Čelo je po výrobě kapiláry olámané. Rovného čela kapiláry bylo dosaženo jejím zbroušením na brusce vyrobené z běžného harddisku používaného v PC, na který byl nalepen smirkový papír s drsností 2000. Tato provizorní bruska má výhodu v nízkém axiálním házení a poměrně vysokých otáčkách. Po zbroušení je čelo trysky ještě mírně zataveno nad plamenem pro zaoblení ostrých hran. Tvar čela trysky je zobrazen na Obr. 4.1 pořízeném mikroskopem. Tato technologie opracování čela trysky přinesla nejlepší výsledky při generování kapek.

Obr 4.1. Mikroskopický snímek výstupního čela kapiláry

5. Měřicí metoda

Tento generátor je konstruován pro kalibraci měřicí metody Interferometric Particle Imaging (IPI). Pomocí této metody jsme schopni měřit velikost průhledných částic sférického tvaru, přičemž velikost částice je charakterizována počtem tzv. interferenčních proužků zachycených na snímku pořízeného CCD kamerou (kamera s CCD čipem - Charged Coupled Device - snímací zařízení obrazu). Podmínkou pro použití této měřicí metody je alespoň částečná průsvitnost měřeného elementu.

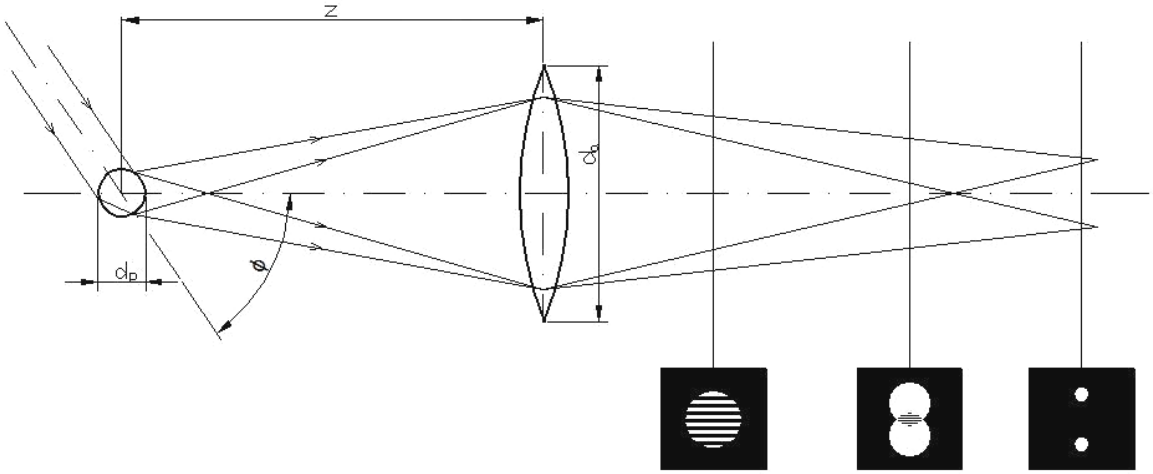
Vznik interferenčních proužků je způsoben skládáním (interferencí) dvou světelných paprsků. Při osvětlení částice část světla touto projde a část světla se od povrchu částice odrazí. Tyto paprsky po



Obr 5.1. Interferenční obrazec

průchodu optikou vytvoří interferenční obraz. Na snímku se objeví ekvidistantní tmavé a světlé proužky, kterých je možno, v případě monochromatického osvětlení, pozorovat značné množství. Světlé proužky na snímku jsou důsledkem konstruktivní interference světelných vln a jde vlastně o dílčí lokální interferenční maxima. Zatímco tmavé proužky (interferenční minima) vznikají destruktivní interferencí těchto vln. Velikost částice je tedy funkcí počtu těchto proužků a počet proužků je závislý na použité optice. Na obrázku (Obr. 5.2) je vidět, že při úplném zaostření objektivu můžeme částici pozorovat jako dva světlé body, které se při rozostření spojí v jediný kruh pokrytý interferenčními proužky (Obr. 5.1).

Nutnou podmínkou pro vytvoření interferenčního obrazce na snímku, je, aby se fázový rozdíl světelných vln, dopadajících do společného bodu neměnil s časem (tj. aby byly koherentní). Tuto vlastnost světelného zdroje zajistíme použitím laseru, jehož světlo je koherentní a monochromatické (jednobarevné – má jen jednu vlnovou délku).



Obr 5.2. Odraz a lom na částici a koherence paprsků za optikou

6. Vyhodnocování dat

Na pořízeném snímku nejdříve detekujeme polohu interferenčního obrazce, určíme jeho střed a velikost. Pro zajištění přibližně stejné polohy interferenčního obrazce na snímku jsme synchronizovali frekvenci, při které jsou generovány kapky, s frekvencí laseru a frekvencí otevírání kamery, při pořizování obrázků. Po nalezení polohy částice a určení počtu interferenčních proužků určíme průměr částice ze vztahu:

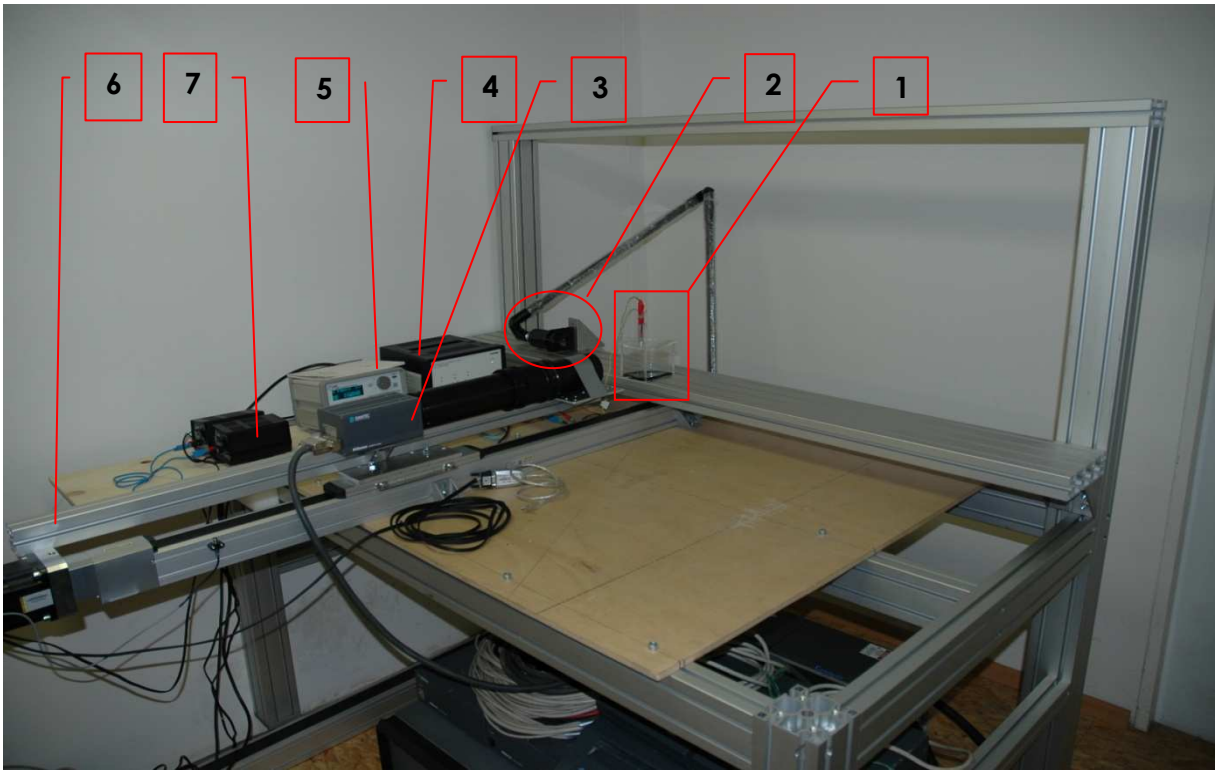
$$d_p = \frac{N_{fr}}{\kappa}$$

Pro částice s poměrným indexem lomu $\underline{m > 1}$ počítáme součinitel κ ze vztahu:

$$\kappa = \frac{\arcsin\left(\frac{d_a}{2z}\right)}{\lambda}\left(\cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + \frac{m \cdot \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}{m^2 + 1 - 2m \cdot \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)}\right),$$

a pro částice s $\underline{m < 1}$:

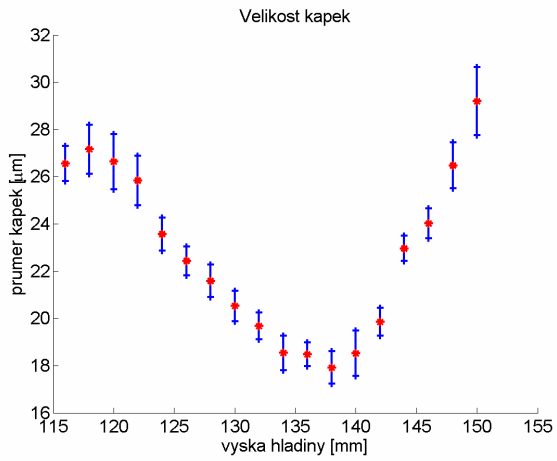
$$\kappa = \frac{\arcsin\left(\frac{d_a}{2z}\right)}{\lambda}\left(m \cdot \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) - \frac{m \cdot \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}{m^2 + 1 - 2m \cdot \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)}\right).$$



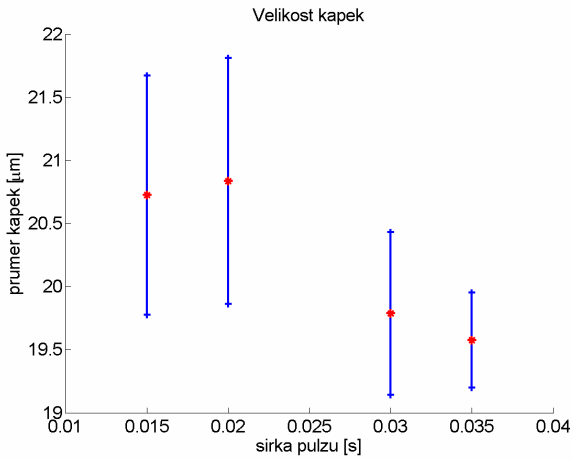
Obr 6.1. Měřicí soustava: 1 – generátor kapek, 2 – zdroj laserového listu, 3 – CCD kamera s objektivem, 4 – zdroj stejnosměrného napětí pro generátor kapek, 5 – generátor pulzů, 6 – traverzér pro posuv snímacího zařízení, 7 – zdroj stejnosměrného napětí pro traverzér

7. Naměřená data a jejich vyhodnocení

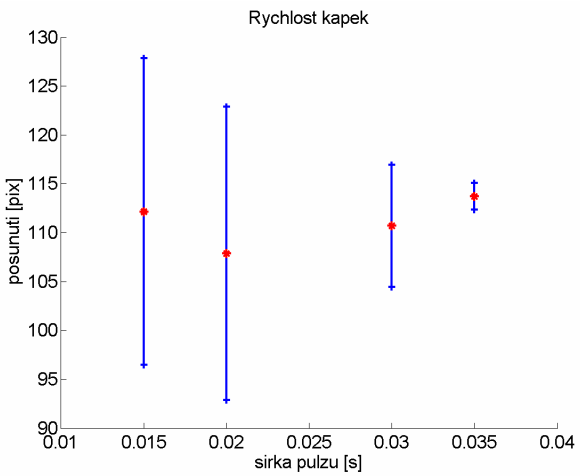
Při různém hydrostatickém tlaku na výstupním čele kapiláry (různé výšky hladiny) a šířky pulzu řídícího signálu jsme proměřili rychlost a velikost generovaných kapek. Z těchto dat jsme vytvořili závislosti (viz. Obr 7.1 – 7.4). Modrou vertikální čarou je vyznačena příslušná standardní odchylka.



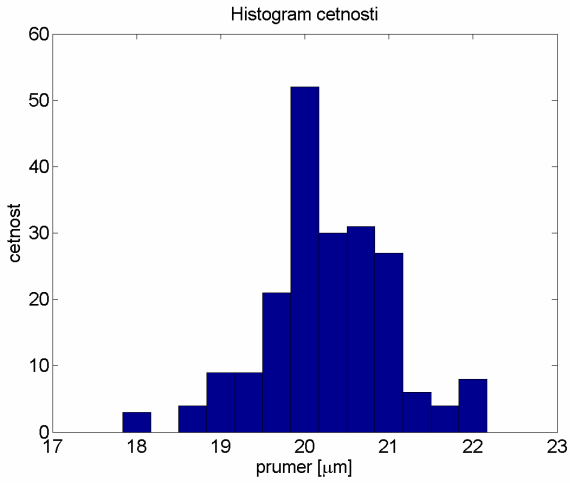
Obr 7.1. Graf závislosti velikosti kapek na výšce hladiny



Obr 7.2. Graf závislosti velikosti kapek na šířce pulzu řídícího signálu



Obr 7.3. Graf závislosti rychlosti generovaných kapek na šířce pulzu



Obr 7.4. Histogram četnosti generovaných kapek v závislosti na průměru kapek

8. Závěr

Z první závislosti (Obr 7.1) je patrné, že na velikost kapek má podstatný vliv tlak na čele kapiláry. Generátor je funkční jen určitém rozsahu hodnot tohoto tlaku. V mezních polohách reservoáru kapaliny, ve kterých bylo dosaženo minimální nebo maximální možné hodnoty tlaku, se snižuje jednotnost velikosti kapek. Z druhého respektive třetího grafu (Obr 7.2 a Obr 7.3) je patrné, že šířka pulzu nemá velký vliv na velikost respektive rychlost kapek. Se snižující se šířkou pulzu, která má vliv na kontrakci kapiláry, se zvyšují rozdíly v průměrech generovaných kapek. Obrázek 7.4 znázorňuje četnost průměrů generovaných kapek při jednom nastavení generátoru. Průměry částic se pohybují v rozmezí od 18 do 22µm, 75% všech částic se nachází v intervalu od 20 do 21 µm. Histogram byl vytvořen z cca 200 snímků.

V dalším postupu je třeba se zaměřit na lepší elektrickou izolaci. Při čištění kapiláry se na generátoru tvoří vodní kapka, která propojí elektrody piezokeramiky na krátko. Tento zkrat vede ke ztrátě potřebných vlastností piezokeramiky. Bude také nutné navrhnout účinnější mechanickou ochranu velmi křehkého generátoru. Dále je třeba provést důkladnou kalibraci měřicí metody a tím zpřesnit měřené hodnoty. Princip kalibrace této měřicí metody je založen na měření koncentrace rozpuštěného barviva ve známém množství vody. Jako barvivo bude použit Rhodamin 6G, jehož kapičky mají dopadat do předem určeného vodního objemu. Z koncentrace barviva a známého množství kapek určíme přesně objem jedné kapky a z toho pak její průměr.

Výsledky prezentované v tomto článku jsou získány z prvních ověřovacích experimentů. Dále je nutné lépe proměřit celé spektrum závislosti na stěžejních parametrech ovlivňujících vlastnosti generovaných kapek a tím vytvořit charakteristiky generátoru, z kterých bude možno zjistit optimální nastavení pro požadovanou velikost a rychlost kapek.

Tento projekt je hrazen z prostředků centra Progresivní technologie a systémy pro energetiku, 1M06059.

Použité symboly:

d_p průměr částice
κ geometrický součinitel
N_{fr} počet interferenčních proužků
z vzdálenost optického nože od čočky objektivu
d_a průměr optiky
m poměrný index lomu
Φ úhel pozorování

Literatura:

[1] Ulmke H., Wriedt T., Lohner H., Bauckhage K.: The Piezoelectric Droplet Generator - A Versatile Tool for Dispensing Applications and Calibration of Particle Sizing Instruments, (Pat McKeown etal., ed.) : Precision Engineering - Nanotechnology, Proceedings of the 1st Int.euspen Conf., Vol. 2, Shaker Verlag, Aachen 1999, pp. 290 – 293.
[2] Ulmke, H.; Wriedt, T.; Bauckhage, K., Piezoelectric Droplet Generator for the Calibration of Particle-Sizing Instruments, Chem. Eng. Technol. 24 (2001) 3, WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69469 Weinheim, 2001, pp. 265 – 268.
[3] Ulmke, H.; Mietschke; M.; Bauckhage; K., Piezoelectric Single Nozzle Droplet Generator for Production of Monodisperse Droplets of Variable Diameter, Chem. Eng. Technol. 24 (2001) 1, WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69469 Weinheim, 2001, pp. 69 – 70.
[4] Novotný, J.; Nováková, L., Interferometric Particle Imaging - (IPI), ČVUT, Praha 2001.
[5] Yoshio Zama, Y.; Masaaki Kawahashi, M.; Hiroyuki Hirahara, H., Simultaneous measurement method of size and 3D velocity components of droplets in a spray field illuminated with a thin laser-light sheet, Saitama 2005.