



Řešení odvodu vláknitého materiálu při odstředivém zvlákňování

Diplomová práce

Studijní program: N3106 – Textilní inženýrství

Studijní obor: 3106T018 – Netkané a nanovláknenné materiály

Autor práce: **Bc. Jan Dobruský**

Vedoucí práce: Ing. Jiří Havlíček, CSc.





Solving the transfer of fibrous material during the centrifugal spinning

Master thesis

Study programme: N3106 – Textile Engineering
Study branch: 3106T018 – Nonwoven and Nanomaterials
Author: **Bc. Jan Dobruský**
Supervisor: Ing. Jiří Havlíček, CSc.



Technická univerzita v Liberci
Fakulta textilní
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Dobruský**
Osobní číslo: **T16000083**
Studijní program: **N3106 Textilní inženýrství**
Studijní obor: **Netkané a nanovláknenné materiály**
Název tématu: **Řešení odvodu vláknitého materiálu při odstředivém zvlákňování**
Zadávací katedra: **Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši metod transportu vláknenných útvarů při zvlákňování.
2. Analyzujte podmínky vzniku vláknenné vlečky a toku vzduchu v okolí zvlákňovací hlavy.
3. Navrhněte a na úrovni modelu realizujte uspořádání optimalizující tok vzduchu a vláknenné vlečky tak, aby bylo umožněno následné další zpracování vláken.
4. Výsledky práce zpracujte a okomentujte.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **40-60 dle potřeby**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. RUSSELL, S. J, ed. Handbook of nonwovens. Cambridge: Woodhead, 2007. ISBN 978-1-85573-603-0.
2. BATRA, Subhash a Behnam POURDEYHIMI. Introduction to nonwovens technology. Lancaster: DES tech Publications, 2012. ISBN 978-1-60595-037-2.
3. SARKAR, Kamal, Carlos GOMEZ, Steve ZAMBRANO, Michael RAMIREZ, Eugenio DE HOYOS, Horacio VASQUEZ a Karen LOZANO. Electrospinning to Forcespinning.
4. KOPECKÝ, Václav. Laserové anemometrie. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7083-945-7.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Havlíček, CSc.**

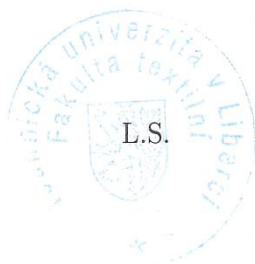
Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání diplomové práce: **19. ledna 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **7. prosince 2018**



Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka



Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 19. ledna 2018

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především panu Ing. Jiřímu Havlíčkovi, CSc., vedoucímu mé diplomové práce, za to, že mi poskytoval odborné konzultace a věnoval svůj čas během jejího vypracovávání.

Velké poděkování patří také doc. Ing. Pavlu Pokornému, Ph.D., za věcné rady, a Ing. Darině Jašíkové, Ph.D. a Ing. Michalu Kotkovi, Ph.D. za jejich ochotu a čas strávený při fyzikálních měřeních a přípravě výsledků.

Dále musím poděkovat také svojí rodině, která mi byla důležitou psychickou oporou.

Řešení odvodu vláknitého materiálu při odstředivém zvlákňování

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá přístrojem, který je založen na principu technologie odstředivého zvlákňování. Tento přístroj byl vymyšlen za účelem použití pro laboratorní účely a jeho struktura se částečně liší od struktury konvenčních přístrojů pro tuto technologii. Jsou zde popsány chemicko-fyzikální procesy, které probíhají při odstředivém zvlákňování. Blíže byl zkoumán proud vzduchu, který se podílí na odvodu vznikajících vláken na tomto přístroji. Tato zkoumání měla pomoci k návrhu modifikace přístroje a jeho realizaci pro zefektivnění odvodu vláken. Z důvodu několika nastalých úskalí však nebylo úspěšného návrhu a realizace modifikace dosaženo. V práci jsou rovněž popsány technologie netkaných textilií, kde proud vzduchu také hraje velkou roli – meltblown a spunbond.

Klíčová slova: *odstředivé zvlákňování, netkané textilie, PVB, vizualizace, proud vzduchu.*

Solving the transfer of fibrous material during the centrifugal spinning

Annotation

This master thesis deals with a device based on the principle of centrifugal spinning technology. This device has been designed for laboratory use and its structure is partially different from that of conventional devices for this technology. The chemical-physical processes that occur in centrifugal spinning are described here. An airflow that is involved in the transfer of the resulting fibers on this device has been investigated closer. These investigations should help to design modification of the device and its implementation to streamline fiber transfer. However, due to some difficulties occurring, the successful design and implementation of the modification was not achieved. The thesis also describes the technology of non-woven textiles, where the airflow also plays a big role – meltblown a spunbond.

Key words: *centrifugal spinning, nonwoven textiles, PVB, visualization, airflow.*

Obsah

Seznam použitých zkratk	10
Úvod	12
1. Teoretická část	13
1.1 Zvlákňovací metody využívající proud vzduchu	13
1.2 Meltblown	13
1.2.1 Princip technologie a transport vláken	13
1.2.2 Vlivy působící na proces zvlákňování a výslednou textili	14
1.3 Spunbond	16
1.3.1 Princip technologie a transport vláken	16
1.3.2 Vlivy působící na proces zvlákňování a výslednou textili	18
1.4 Odstředivé zvlákňování	19
1.4.1 Obecně o technologii	19
1.4.2 Výrobní zařízení	21
1.5 Analýza vzniku vláken při odstředivém zvlákňování	22
1.5.1 První fáze	22
1.5.2 Druhá fáze	23
1.5.3 Třetí fáze	24
1.6 Laboratorní zařízení používané pro praktickou část	28
1.7 Proudění tekutin	34
1.8 Způsoby vizualizace proudu vzduchu	38
1.8.1 Metody zaváděním látek do proudu	38
1.8.2 PIV	39
1.8.3 Metody indikátorů směrů proudů	41
1.8.4 Bezkontaktní metody	42
1.8.5 Optické metody	44
1.9 Používaný polymer a jeho roztok - PVB	45
2. Praktická část	47
2.1 Určení vhodné koncentrace	47
2.2 Studium chování toku vzduchu	49
2.2.1 Pokus se zdrojem kouře / mlhy	49
2.2.2 Měření rychlosti anemometrem	54
2.2.3 Použití laboratoře na CxI – PIV analýza	57

2.3 Návrh modifikace.....	64
2.3.1 Nástavec z části barelu	65
2.3.2 Použití kartonových lopatek	67
2.3.3 Límcový nástavec.....	68
2.3.4 Použití barelu a límce najednou	70
2.3.5 Použití límce a lopatek najednou.....	70
2.4 PIV analýza zkoušených modifikací.....	70
2.4.1 Nástavec z části barelu	71
2.4.2 Použití kartonových lopatek	74
2.4.3 Límcový nástavec.....	77
2.4.4 Použití barelu a límce najednou	80
2.5 Vyhodnocení výsledků.....	83
3. Závěr	84
3.1 Diskuze.....	84
3.2 Doporučení.....	86
Zdroje literatury	88

Seznam použitých zkratek, značek, symbolů

2D – dvourozměrný

3D – trojrozměrný

° – stupeň

Δ – posun, rozdíl

ν – kinematická viskozita

ω – úhlová rychlost

CCD – charge-coupled device (snímací elektronická součástka)

cm – centimetr

CxI – Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace

d – průměr

DP – diplomová práce

esu – electrostatic unit of charge (jednotka elektrostatiky)

F – odstředivá síla

g – gram

h – hodina

L2F – laserová dvojzaostřující anemometrie

LDA – laserová dopplerovská anemometrie

M – zvětšení

m – a) metr, b) hmotnost

m^2 – metr čtvereční

m^3 – metr krychlový

mm – milimetr

Mach – Machovo číslo (poměrová bezrozměrná jednotka rychlosti šíření vzduchu)

MFR – hmotnostní index toku

min – minuta

m/s – metr za sekundu

N – Newton

PDA – fázová dopplerovská anemometrie

PIV – integrální laserová anemometrie

PVA – polyvinylalkohol

PVB – polyvinylbutyral

Q_v – objemový průtok

r – radius, poloměr

Re_k – kritické Reynoldsovo číslo

s – sekunda

S – obsah, průřez

SM – spunbond - meltblown

SMS – spunbond - meltblown - spunbond

u_x, u_y – složky rychlosti

v – rychlost

V – objem

Úvod

Konec 20. a nyní probíhající 21. se z hlediska vědy a techniky nese v duchu obrovského rozmachu. Vznikají nové nápady, objevují se nové technologie, zdokonalují se materiály, zefektivňují se výrobní procesy a zvyšuje se ekonomický zisk z prodeje čím dál většího počtu výrobků či služeb. Aby toto všechno mohlo fungovat, je potřeba, aby jednotlivé subjekty a v nich zainteresovaní lidé, přičinivší se na přidaných hodnotách nápadů, meziproductů a produktů, spolu spolupracovali. Stejně tak je potřeba, aby zkušenější předávali rady méně zkušeným. Aby si jeden vědní obor vyměňoval poznatky s druhým vědním oborem. Aby si výzkumná sféra brala zpětnou vazbu od sféry výrobní, a naopak. A v příkladech by se mohlo pokračovat.

Lidé, kteří se pohybují ve výzkumné sféře a vymýšlejí nové nápady, se často ocitají v situacích, kdy během relativně krátké doby vymyslí nápadů několik či jsou jinak vytíženi, a nestíhají se pak z různých důvodů naplno věnovat nápadům všem. Jednou z možností, jak v těchto chvílích nenechat myšlenky a rozpracované návrhy zapadnout prachem, je podělit se o ně s novými tvářemi a zainteresovat je. Jeden takový případ nastal i před vypracováním této diplomové práce. Na Katedře netkaných textilií a nanovláknenných materiálů byl vymyšlen jeden přístroj na odstředivé zvlákňování. Jeho konstrukce byla bez většího promýšlení sestavena z relativně nízkonákladových komponent a má sloužit pro laboratorní účely. Přístroj v nynější podobě i přes několik much funguje poměrně dobře, jen by bylo potřeba ho zkusit zdokonalit tak, aby z něho vznikající vlákna byla na nespecifický kolektor dopravována v kompaktnější formě.

Již při prvních seznámeních s přístrojem bylo jasné, že pro vypracování této diplomové práce bude potřeba zapojit trochu kreativity a posbírat informace z více vědních oborů. A k tomu získávat rady a tipy od těch zkušenějších. Ti zas si mohou vzít získané poznatky ode mě. Vlastně je to tak trochu v duchu předchozích odstavců.

1. Teoretická část

1.1 Zvlákňovací metody využívající proud vzduchu

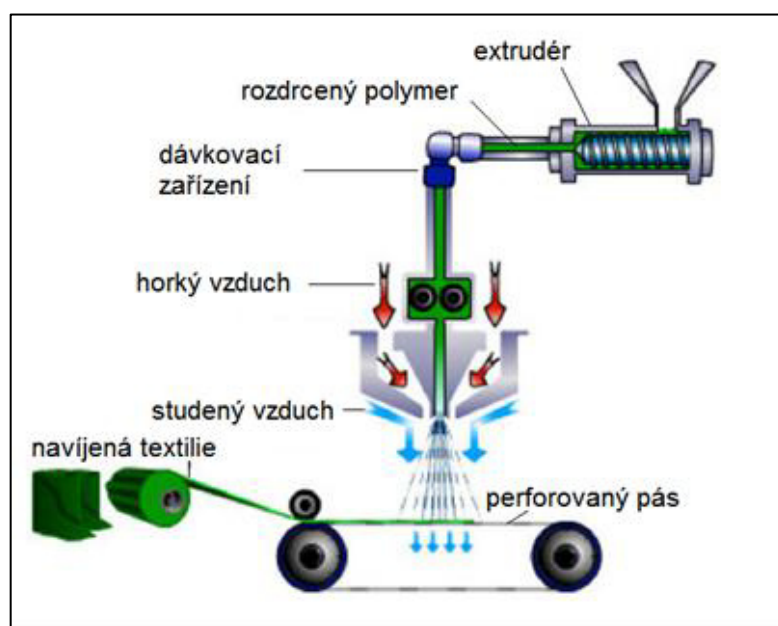
V následujících kapitolách budou popsány dvě nejrozšířenější zvlákňovací metody, kde se jako transportního média používá uměle vytvářeného proudu vzduchu (tedy meltblown a spunbond). Obě tyto metody spadají do kategorie výroby vlákněných vrstev suchou cestou, a to přímo z polymeru. Popsán bude jejich princip a také nejdůležitější parametry, které mají vliv na proces transportu a chování vláken a vznikající vlákněné textilie.

1.2 Meltblown

1.2.1 Princip technologie a transport vláken

Schéma výrobního zařízení lze vidět na obr. 1. Na počátku je polymer (termoplast), obvykle ve formě granulátu, dávkován do extrudéru. Zde je drcen a roztaven. K co nejoptimálnějšímu následnému zvlákňování a transportu vláken je v této fázi výrobního procesu potřeba dostatečné roztavení a homogenizace granulátu, resp. taveniny. Po vytlačení taveniny z extrudéru proběhne odfiltrování nečistot průchodem soustavou sít. Po průchodu filtry je tavenina vytlačena do trysek zvlákňovací hubice. Zde je žádoucí, aby ke každé zvlákňovací trysce byla tavenina přiváděna o stejné požadované teplotě, a pod stejným tlakem. Ve směru osy trysek zvlákňovací hubice je směřován proud horkého vzduchu, který odtrhává vytlačovanou taveninu z vyústění trysek. Odtrhávaná vlákna jsou pak proudem vzduchu unášena, okolním vzduchem ochlazována a tím zpevňována, a kolektivně dopadají na podsávaný porézní buben nebo pás. Pás nebo buben bývá ve vzdálenosti několika desítek centimetrů od hubice. Častá je taky varianta, kdy se vzniklá vlákněná meltblown vrstva ukládá na spunbond textilií (označení SM), případně je vrstvení na výrobní lince několikanásobné (označení SMS apod.)

Celková šíře trysek u současných zařízení činí až 3 metry, a ty často bývají řazeny za sebou pro zvýšení plošné hmotnosti, pro získání vrstev s rozdílnými vlastnostmi, nebo pro získání více vrstev z různých typů polymerů. Ve výjimečných případech, kdy je potřeba, aby vzniklá textilie byla širší, než je celková šíře zvláknovacích hubic, koná perforovaný pás nebo buben přímočarý vratný pohyb do stran v rovině kolmé na rovinu dopadu vláken. Na závěr jsou vlákna v textilii termicky pojena v kalandrovacím válci, případně v několika dvojicích kalandrovacích válců. [1], [2], [3], [4], [5]



obr. 1: Schéma výrobního zařízení metody meltblown [6]

1.2.2 Vlivy působící na proces zvláknování a výslednou textilií

Materiálové parametry

Technologie meltblown je poměrně univerzální, co se týče škály možných používaných polymerů. Bez ohledu na použitý polymer, na zvláknovací proces mají vliv materiálové vlastnosti. Čím je vyšší teplota taveniny a tím i hmotnostní index toku, a čím nižší dávkování, tím jemnější vlákna a vláknenné vrstvy s vyšším měrným povrchem budou vznikat. Dávkování se pohybuje v hodnotách od 0,2 do 3 g/trysku/min. S vysokými hodnotami dávkování se obecně obtížněji získá kvalitní vláknenná vrstva.

Nižší hodnota dávkování a nižší objemová hmotnost textilie s sebou však přináší i zvyšující se poměr vzduch : vlákna a tím rostoucí energetické náklady. Vyšší teplota taveniny také způsobí i větší opotřebení trysky a zvýší množství defektů ve vlákenné vrstvě.

Parametry procesu a prostředí

Chlazení vláken během transportu je v základním uspořádání zajišťováno pouze okolním vzduchem. V rozvinutějším uspořádání je k chlazení použito sekundárního studeného proudu vzduchu, působícího v trase mezi hubicí a sběrným bubnem/pásem.

Velmi efektivně chladit je možno i vodním sprejem; to je realizováno jemnými paprsky vody v těsné blízkosti vyústění trysek, jež dohromady vytváří jakousi mlhu. Tímto způsobem je možno na vlákna nanést i hydrofilní činidlo.

V určitém rozmezí lze nastavovat i teplotu proudícího vzduchu okolo zvlákňovací hubice. Obvykle má teplotu stejnou nebo o trochu vyšší, než je teplota taveniny. Zatímco studenější vzduch lépe ochladí vlákna a sníží množství defektů v textilií, teplejší vzduch sníží průměry vláken a zvýší energetické náklady.

Rychlost proudu vzduchu má vliv na zaplétání vláken (větší vliv má na jemnější vlákna). Vyšší průtok vzduchu sníží zaplétání vláken, obzvláště při krátké vzdálenosti mezi hubicí a sběrným bubnem/pásem, a také zvyšuje orientaci vláken ve směru výstupu ze stroje a tím krytí pórů. Rychlost proudícího vzduchu se pohybuje až v hodnotách okolo rychlosti Mach 1, čili cca 340 m/s, a jeho objem je asi 500 – 1500 m³/h/m textilie. Ve vysokých hodnotách se pak vliv rychlosti vzduchu už snižuje. Při nezamezení výskytu turbulencí v proudu vzduchu se mohou ve vlákenné vrstvě vytvořit „provazcové“ defekty, tedy jakési nepravidelné pruhy tlustých a tenkých vláken. Ty se mohou objevit také při nedostatečném proudu vzduchu v důsledku toho, že letící vlákna spolu přicházejí do kontaktu a slepují se.

Proudící vzduch působí na z trysek vytlačovanou taveninu pod jistým úhlem (sklonem), obvykle v rozmezí 30 až 90°. Při úhlu 30° jsou vlákna unášena paralelně, přímo ke kolektoru, jen s minimálním vzájemným zaplétáním. Tato vlákna však vykazují vyšší míru „provazcových“ defektů a volně vinutých svazků. Při úhlu působení

vzduchu 90° nastává vyšší míra oddělování a separace vláken, a také větší izotropie při ukládání.

Použití sběrného pásu poskytuje lepší podklad a dopad vláknům, snazší sejmutí vlákenné vrstvy a jen malé ovlivnění průtoku vzduchu. U sběrného bubnu je pak problém s odváděním tepla; je používán u méně náročných operací, zato je však levnější a méně náročný na manipulaci a prostor. Podsáváním pod sběrným bubnem či pásem je zajištěno odvádění proudícího vzduchu od zvlákňovací hubice, a vlákna tak lépe ulpí na jeho povrchu, případně na spunbond textilií.

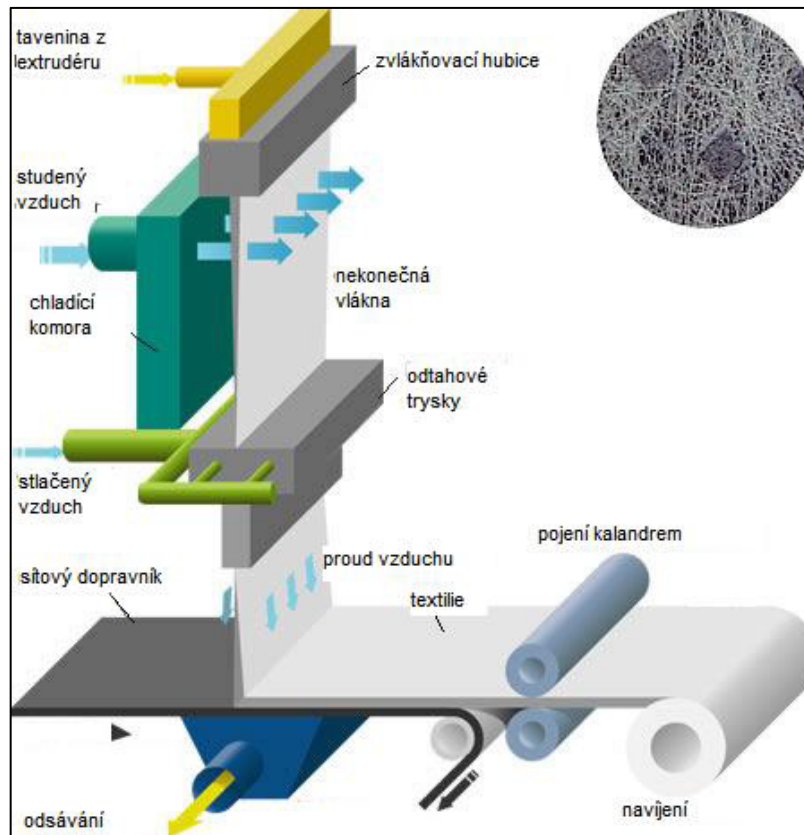
Vliv má také vzdálenost zvlákňovací hubice od sběrného pásu/bubnu. Při větší vzdálenosti se zvýší zaplétání vláken, orientace vláken ve směru výstupu ze stroje, objemnost („nadýchanost“) vlákenné vrstvy, zvětší se velikost pórů, více se ochladí vlákna, ale sníží se uniformita vlákenné vrstvy. Při menší vzdálenosti uniformita vzroste, sníží se zaplétání, vzroste objemová hustota, zvýší pevnost, neboť vlákna se nestačí dostatečně ochladit a přitavují se k sobě i po dopadu. A také se podsáváním lépe odstraní proudící vzduch. Vyšší rychlost sběrného pásu či bubnu může způsobit mírnou anizotropii uložení vláken ve směru odvádění textilie. [1], [3], [5]

1.3 Spunbond

1.3.1 Princip technologie a transport vláken

První fáze této metody jsou velmi podobné těm, které jsou u metody meltblown. Čili nejdříve je polymer (termoplast), obvykle ve formě granulátu, dávkován do extrudéru. V něm je drcen, roztaven a odtud jako tavenina následně v odměřených dávkách protlačován soustavou filtračních sít. Z nich je pak tavenina vytlačována do zvlákňovací hubice. Ke zvlákňování dochází tak, že z trysek zvlákňovací hubice se z taveniny různými způsoby odtažují vlákna, viz další odstavec. Oproti technologii meltblown tedy vlákna nejsou z taveniny odtrhávána, nýbrž pouze vydlužována. Při vydlužování dochází k napřimování polymerních řetězců a tím k následné pevnosti vlákenné vrstvy.

Vláknenná vrstva je ukládána na sítový dopravník a zpevněna - obvykle kalandrem, a poté navíjena. Schéma výrobního zařízení lze vidět na obr. 2:



obr. 2: Schéma výrobního zařízení technologie spunbond [7]

ad Způsoby odtahu vláken:

K samotnému zvlákňování dochází při odtahu vláken ze zvlákňovací hubice na dopravník. To může být realizováno:

- a) samovolně, pouze vlivem gravitační síly (vlákna pak nemají velkou pevnost)
- b) proudem studeného vzduchu z odtahové trysky (kdy vlákna jsou dloužena a současně chlazena, aby se na dopravník ukládala alespoň částečně ztuhlá) – případ viz **obr. 2**
- c) případně jedním nebo více páry galet (vláknenná vrstva je pak vysoce pevná)

1.3.2 Vlivy působící na proces zvlákňování a výslednou textilií

Materiálové parametry

Obecně jsou obdobné, jako u technologie meltblown. Zvlákňovány teoreticky mohou být jakékoliv polymery, které jsou schopny dosáhnout v plastickém stavu požadované viskozity, jsou vláknotvorné a při ochlazení a dlužení se dají dostatečně zpevnit.

Důležitým parametrem polymeru pro spunbond technologii je mírně vyšší střední molekulová hmotnost a širší distribuce molekulové hmotnosti polymeru k zajištění uniformity textilie. Oproti meltblown technologii je pak žádoucí nižší hmotnostní index toku (MFR).

S rostoucí teplotou (a tím klesající viskozitou) z hubice vycházející taveniny klesá průměr odtahovaných vláken, neboť nižší viskozita umožní delší protažení a dlužení vláken. S rostoucí hodnotou dávkování se zvyšuje průměr dlužených vláken, neboť se tím zvyšuje poměr složek polymer : vzduch a působení vzduchu na dlužení vláken není tak efektivní.

Parametry procesu a prostředí

Silný vliv na průměr vznikajících vláken má teplota primárního proudu vzduchu v okolí zvlákňovací hubice. S jeho rostoucí teplotou klesá průměr vláken, neboť k ochlazení dostatečnému na to, aby polymerní řetězce ve vláknech zkrystalizovaly, dochází až ve větší vzdálenosti od zvlákňovací hubice (v závislosti i na sekundárním vzduchu). Tím se ovlivňuje míra dlužení.

S tím souvisí i rychlost proudícího primárního vzduchu. S vyšší hodnotou rychlosti se taktéž zmenšuje průměr vznikajících filamentů. S rostoucí rychlostí dochází vlivem pneumatické akcelerace také k větší míře napřimování řetězců v dlužených vláknech. Sekundární vzduch v chladicí komoře má pak ještě větší vliv na konečnou krystalizaci a mikrostrukturu filamentů. Odvíjí se to od rozdílu hodnot rychlosti a teploty oproti primárnímu vzduchu. Rychlost sekundárního vzduchu bývá okolo 100 m/s. Podle míry dlužení se odvíjejí i mechanické vlastnosti. U více dlužených vláken a tím větší orientaci řetězců se zvyšuje pevnost a snižuje tažnost textilie.

Čím je vyšší intenzita podsávání pod dopravníkem, tím je lepší aerodynamika proudícího vzduchu a tím jemnější vlákna mohou vznikat kvůli většímu dloužení. Podobně jako u technologie meltblown, má rychlost pohybujícího se dopravníku mírný vliv na anizotropii uložení vláken s větší tendencí ukládání vláken ve směru pohybu dopravníku.

Při následném zpevňování vlákenné vrstvy se obvykle používá kalandrovacích válců. Čím větší teplota a vyšší tlak jsou při průchodu válci použity, tím tužší, pevnější a méně prodyšná textilie vznikne.

Důležitým krokem pro dobrou kvalitu a uniformitu vznikající textilie je zamezení zaplétání a vzájemného přitahování sousedních dloužených vláken před dopadem na dopravník. Tomu se předchází obvykle elektrostatickým nabitím dloužených filamentů. Náboje se při dloužení dá dosáhnout buď triboelektricky, nebo pomocí zdroje vysokého napětí. Triboelektricky se získání náboje dosahuje třením filamentů o uzemněný, vodivý povrch materiálu (musí vzniknout náboj alespoň $30\,000\text{ esu/m}^2$). Při styku filamentů s uzemněným dopravníkem pak elektrostatický náboj zanikne. [1], [2], [6]

1.4 Odstředivé zvlákňování

Jelikož v praktické části této diplomové práce bude pracováno s přístrojem na odstředivé zvlákňování (dále jen odstředivka), bude v následující kapitole představena tato zvlákňovací metoda a analýza procesu.

1.4.1 Obecně o technologii

Technologie odstředivého zvlákňování je v oblasti netkaných textilií relativně novou metodou, která byla vyvinuta pro tvorbu (nano)vláken z široké škály materiálů. Ke zvlákňování je využito odstředivých sil působících na roztok polymeru (případně na viskózní taveninu), z kterého jsou následně tvořena mikro či nanovlákna. Klíčovými parametry k ovlivnění výsledné vlákenné vrstvy jsou rychlost otáčení a uspořádání zvlákňovací hlavy, teplota, transportní prostředí, typ kolektoru, reologické vlastnosti.

Tvarem otvorů zvlákňovací hlavy pak teoreticky lze ovlivňovat i průřez vznikajících vláken. Zvlákněná vlákna v pavučině se mohou pohybovat v měřítku od nanorozměrů, po sub-mikronová až po mikronová. Na škále možných požitých materiálů lze najít polymerní, ale i kovové, keramické a kompozitní materiály.

Tato metoda se vyvinula jako určitá alternativa a zjednodušení technologie elektrostatického zvlákňování, které je technologií nejrozšířenější. Při něm je nutno použít rozpouštědlo polymeru, které musí mít vhodný odpařovací tlak, viskozitu a povrchové napětí k zajištění následné celistvosti vláken. Dále je nutno pro správný běh procesu porozumět parametrům a jevům, které se podílí na vzniku Taylorova kuželu a tryskové nestability, jako je vodivost roztoku/taveniny, elektrostatika, intenzita elektrostatického pole, povrchové napětí, ionizační pole apod. Tyto faktory jsou při elektrostatickém zvlákňování někdy limitující při výběru uvažovaného polymerního roztoku. Při odstředivém zvlákňování jsou oproti elektrostatickému zvlákňování elektrostatické síly nahrazeny silami odstředivými. Tím se nemalou měrou snižuje množství fyzikálních procesů a jevů, které je potřeba hlídat a zkoumat, aby zvlákňování mohlo vůbec (hladce) probíhat. Z tohoto důvodu se tak odstředivé zvlákňování jeví jako univerzálnější metoda.

Kombinace odstředivých sil společně s množstvím konfigurací a jednoduše měnitelnými zvlákňovacími hlavami dělá z odstředivého zvlákňování všestrannou metodu, překonávající limity fyzikálních procesů a dějů u elektrostatického zvlákňování. Díky tomu je možno zvlákňovat i málo vodivé polymery, resp. polymerní roztoky. V případě potřeby udržení vyšší teploty polymerního roztoku je možno zahřívat i zvlákňovací hlavu. V některých případech lze zvlákňovat i vysoce viskózní materiály bez nutnosti použít rozpouštědlo. Velkou výhodou je i to, že obecně se při odstředivém zvlákňování používají koncentrovanější polymerní roztoky, než u elektrostatického zvlákňování, a tím se snižuje množství rozpouštědla, které je nutno při zvlákňování odpařit.

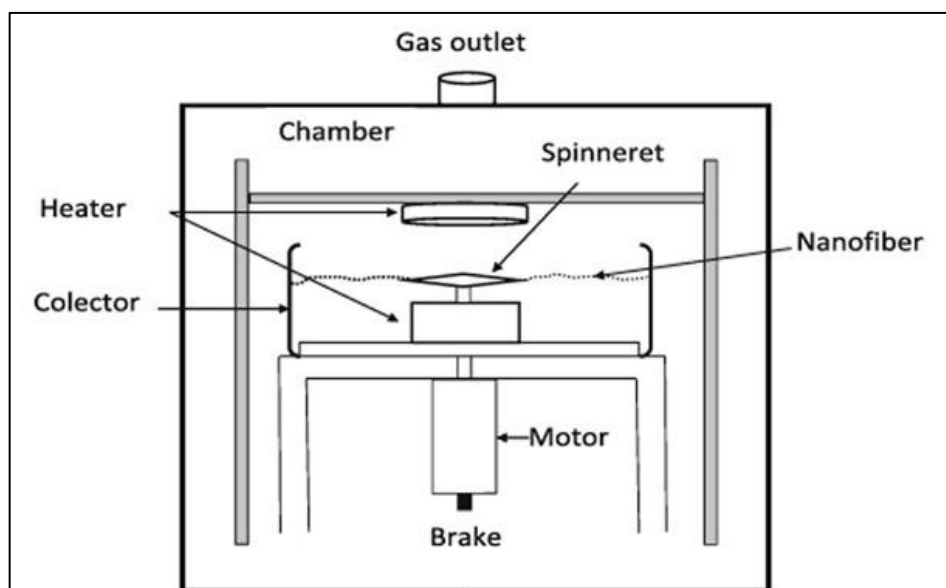
Současné odstředivé zvlákňovačky jsou schopny prakticky již masové výroby. Jejich výrobnost dosahuje hodnot okolo 1 g/min na jeden otvor zvlákňovací hlavy. Vznikající nanovláknennou pavučinu lze při modifikaci sběrného zařízení přetvářet také do příze.

Takové příze nacházejí stále nové aplikace pro jejich uplatnění. Tato technologie vzhledem ke své univerzálnosti, nízkým nákladům a relativně vysoké produktivitě tedy postupně rozšiřuje možnosti uplatnění nanovláken a dává prostor k dalšímu výzkumu a vývoji v této oblasti. Mezi nejčastěji takto zvlákňované materiály patří polypropylen, polystyren, polykarbonát, kyselina polymléčná, akrylonitrilbutadienstyren, polyvinylpyrrolidon, polyethylenglykol, bismut a kompozity s nano výztuží. [8], [9]

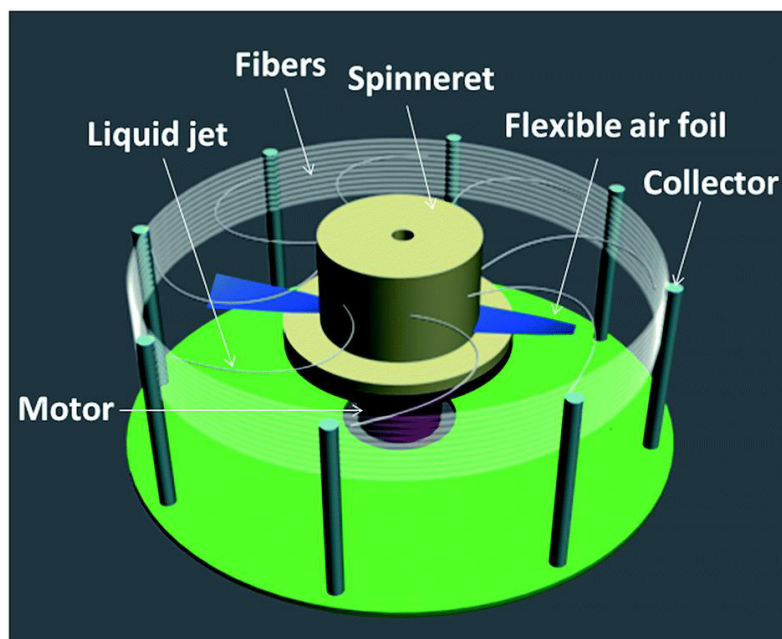
1.4.2 Výrobní zařízení

Typické schéma programovatelného výrobního zařízení lze vidět na obr. 3 a 4 (*pozn: toto schéma se však liší od laboratorního zařízení používaného v praktické části této DP*). Hlavními částmi jsou zvlákňovací hlava, tepelný systém, sběrný kolektor, uzavřená komora, řídicí systém, motor a brzda.

Polymerní roztok či tavenina je protlačován otvory do jedné nebo více plošek zvlákňovací hlavy, ze které je vlivem odstředivých sil zvlákňován na okolní kolektor. Řídicí systém udržuje frekvenci otáček zvlákňovací hlavy a teplotu, nastavené uživatelem. Ten může skrz interaktivní displej sledovat a ovládat celý proces, případně ho v případě poruchy či výměny hlavy zastavit pomocí brzdy. [7], [8].



obr. 3: Obvyklé schéma výrobního zařízení na odstředivé zvlákňování [9]



obr. 4: Obvyklé schéma výrobního zařízení na odstředivé zvlákňování [10]

1.5 Analýza vzniku vláken při odstředivém zvlákňování

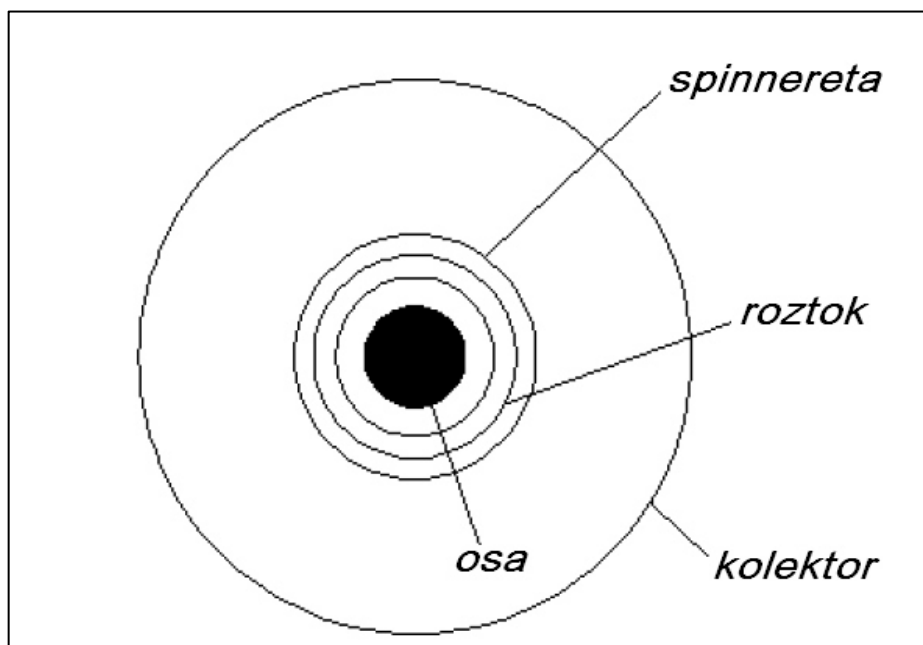
Při procesu odstředivého zvlákňování dochází k několika zásadním chemicko-fyzikálním dějům, které se týkají polymerního roztoku a spinnerety. Tyto děje jsou ovlivněny různými parametry, které budou popsány v následující kapitole. Probíhají ve 3 fázích zvlákňování:

1. Vstup polymerního roztoku na spinneretu.
2. Průchod polymerního roztoku rotující spinneretou k otvorům.
3. Průchod otvory a vznik vláken.

1.5.1 První fáze

První fáze zahrnuje přívod polymerního roztoku na spinneretu. Motor pohonné jednotky roztáčí spinneretu do rotace. Jakmile se roztok dostane na rotující spinneretu, začne na něj působit několik vlivů. Nejvíce na něj působí odstředivá síla a povrchové napětí, dále

pak tření a gravitace – tyto poslední dva však budou považovány za velmi malé a tudíž zanedbány. Přiváděný roztok se začne vlivem odstředivých sil posouvat ve formě kapek otvory spinnerety až na její vnější hranu. Schéma z horního pohledu lze vidět na obr. 5. V okamžiku, kdy roztok dorazí až k vyústění otvorů na vnější straně spinnerety, začíná druhá fáze.



obr. 5: Schéma první fáze odstředivého zvlákňování – horní pohled [9]

1.5.2 Druhá fáze

Polymerní roztok na vnější hraně otvoru spinnerety je pod působením maximální odstředivé síly. Tato odstředivá síla překoná povrchové napětí v roztoku polymeru, a díky tomu v tuto chvíli polymerní roztok vylétává ven ze spinnerety. Velikost odstředivé síly působící na materiál lze popsat vztahem (1):

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad [\text{N}] \quad (1),$$

kde:

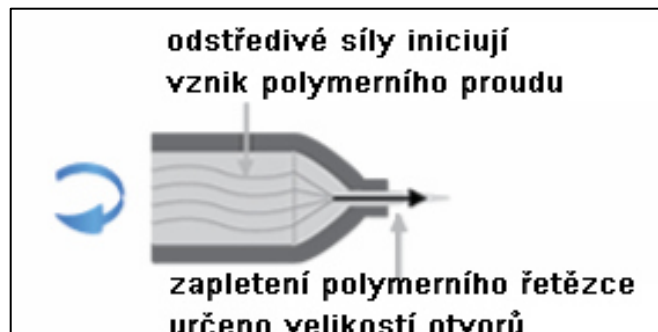
m je hmotnost materiálu [kg],

r je poloměr spinnerety [m],

ω je rychlost otáčení spinnerety (úhlová rychlost) [rad/s].

Existuje kritická úhlová rychlost, kdy dosažení či překročení její hodnoty vede k tvorbě trysek (třetí fáze). Pod její hodnotou není vyvinuta dostatečná odstředivá síla, aby se trysky tvořily.

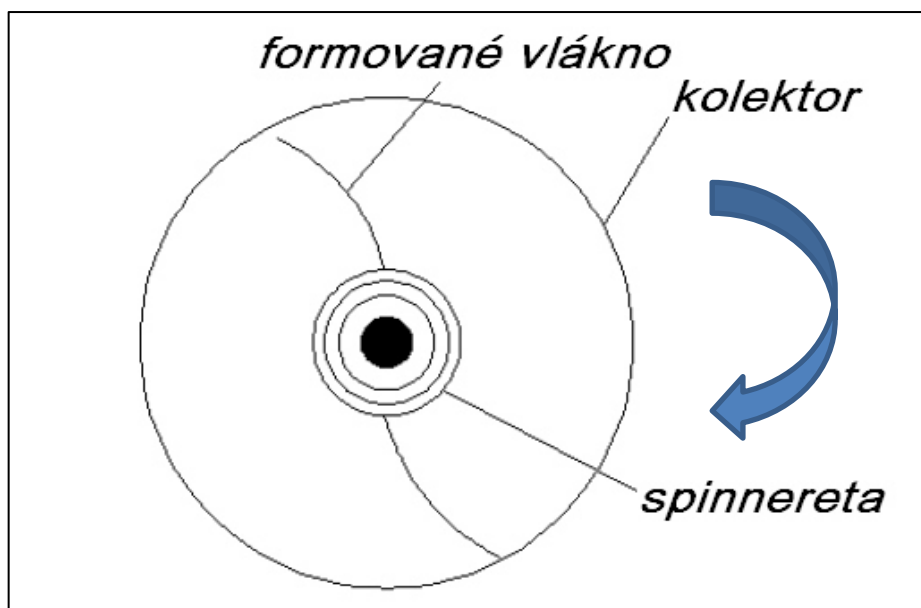
Průchodem otvorem spinnerety se začínají napřimovat polymerní řetězce, viz obr. 6:



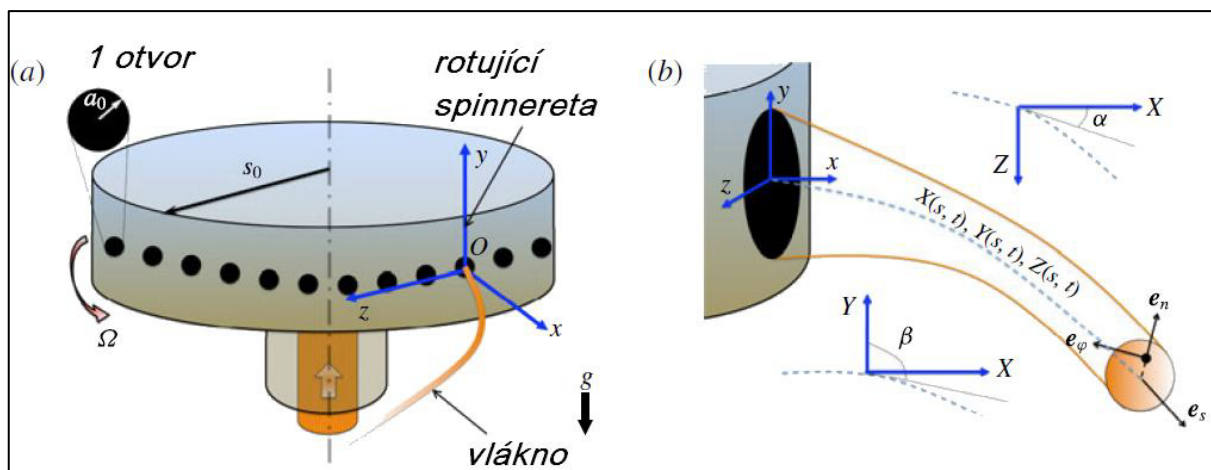
obr. 6: Průchod polymerního roztoku / taveniny otvory spinneretu [11]

1.5.3 Třetí fáze

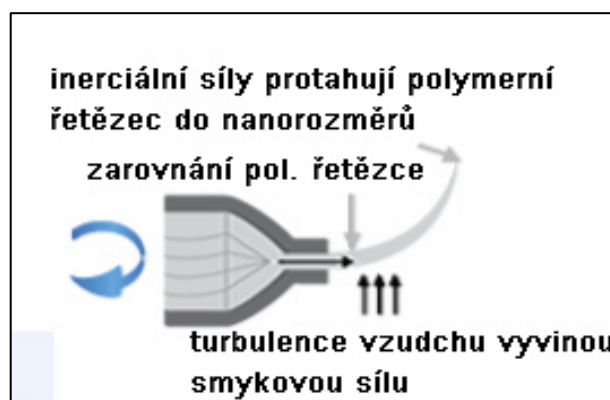
V této fázi se z trysek formují (nano)vlákna. Poté, co polymerní roztok vyletí ze spinnerety, začne na něj působit odpor a turbulence vzduchu smykovým namáháním. Roztok bude pohybu pokračovat po křivkové trajektorii. Působení setrvačné síly způsobí protahování polymerního materiálu, postupné zmenšování průměru a formování na tvar vlákna. V tuto chvíli se výrazně zvýší měrný povrch roztoku, načež se z povrchu vláken začne odpařovat rozpouštědlo. Transport a formování vlákna končí v okamžiku dopadu na kolektor. Schéma a geometrický popis lze vidět na obr. 7, 8 a 9:



obr. 7: Schéma třetí fáze odstředivého zvlákňování [9]



obr. 8: a) Schéma třetí fáze odstředivého zvlákňování; b) Bližší pohled na otvor a trysku s křivočarým souřadným systémem, osou vlákna a úhly vlákna v horizontální a vertikální rovině [12]



obr. 9: Napřimování polymerního řetězce při třetí fázi [11]

1.5.4 Ovlivňující parametry

Výše zmíněné fáze odstředivého zvlákňování a parametry vznikající pavučiny jsou ovlivňovány několika hlavními faktory. Mezi ně patří především viskozita, povrchové napětí, úhlová rychlost, teplota, tvar zvlákňovací hlavy a způsob zachytávání vláken, případně tvar kolektoru. Tyto parametry však spolu většinou souvisí a nelze oddělit jejich vlivy samostatně. Změna jednoho se promítne i do vlivu jiného parametru.

Povrchové napětí

Je to jeden z nejdůležitějších faktorů. Jeho velikost totiž při druhé fázi musí být překonána velikostí odstředivé síly, aby došlo k formování vláken. Bez překonání sil povrchového napětí by polymerní roztok nemohl v otvorech spinnerety vytvářet

Taylorův kužel. Povrchové napětí způsobí nižší povrchovou energii v polymerním roztoku, což povede ke vzniku spíše kapkovitých útvarů namísto vláknitých. Kapkovité útvary však mohou být propojeny, jelikož na ně působí odstředivá síla. Za předpokladu vhodných hodnot ostatních ovlivňujících parametrů znamená nižší povrchové napětí lepší vytváření (nano)vláken.

Viskozita

Také tento parametr se podílí na procesu vzniku vláken. Pokud jde o polymerní taveninu, tak při příliš vysoké viskozitě materiálu nemusí být síly působící na tažení vláken dostatečné, aby se vytvořila tryska. Naopak, při příliš nízké viskozitě může dojít k přetržení taženého vlákna a dojde k perličkovému efektu.

Pokud jde o polymerní roztok, tak jeho příliš vysoká viskozita bude znamenat i velkou gravitaci mezi molekulami a molekuly se budou vzájemně zaplétat. Odstředivá síla nebude dostatečně velká na to, aby roztok dostatečnou rychlostí opustil otvory spinneretu a tudíž nedojde ke zvláknění. Příliš nízká viskozita zase způsobí, že se budou vytvářet nesouvislé kapky, nebo se materiál bude porušovat během třetí fáze zvláknování.

Viskozita silně závisí na teplotě a vlastnostech roztoku, a ovlivňuje rychlost transportu roztoku a morfologii vláken (čím vyšší rychlost, tím menší průměr vláken).

Rychlost otáčení spinneretu

Tento parametr je důležitý z důvodu toho, že jeho velikost největší měrou udává výslednou odstředivou sílu působící na zvláknovaný materiál, která překonává povrchové napětí (viz *vztah (1)*). Pokud budou otáčky příliš malé, materiál bude zůstat ve spinneretu. Obecně lze tvrdit, že se zvyšující rychlostí se bude prodlužovat trajektorie setrvačného pohybu vláken a tím víc se bude zmenšovat jejich průměr a zvýší se jeho uniformita.

Vzdálenost kolektoru

Pokud se změní vzdálenost kolektoru od spinneretu, nebude to mít až takový vliv na průměr vláken, nýbrž bude to mít vliv na jejich morfologii. Vlákna mohou být zkroucená či zlomená. Pokud se zvýší rychlost otáčení spinneretu a tím se prodlouží trajektorie vláken, musí se zvýšit vzdálenost kolektoru. Naopak, vzdálenost se musí

snížit při zvýšení viskozity materiálu. Pokud je však vzdálenost příliš krátká, nedojde k dostatečnému dloužení vláken a jejich průměry budou značně větší.

Při určování ideální vzdálenosti kolektoru hraje hlavní roli to, jak rychle se dokáže odpařit rozpouštědlo polymerního roztoku, kolik prostoru potřebují vlákna k dostatečnému prodloužení, a také způsob zachytávání vláken.

Rychlost odpařování rozpouštědla

Parametr ovlivňující třetí část. V momentě, kdy polymerní roztok opustí otvor spinnerety a míří na kolektor, probíhá masivní odpařování rozpouštědla z povrchu dloužených vláken. Pokud je rychlost odpařování příliš nízká, mohou se vlákna při dopadu na kolektor přeměňovat na překryvné tenké vrstvy, tvořící na kolektoru film. Pokud je naopak rychlost odpařování příliš vysoká, pak je třetí fáze narušena a vlákna kvůli malé míře dloužení pak mají velké průměry.

Rychlost odpařování závisí na teplotních podmínkách procesu, teplotě varu rozpouštědla, povrchovém napětí roztoku, interakcích mezi molekulami rozpouštědla a polymeru, a na pohybu vzduchu v okolí povrchu roztoku.

Velikost otvorů spinneretu

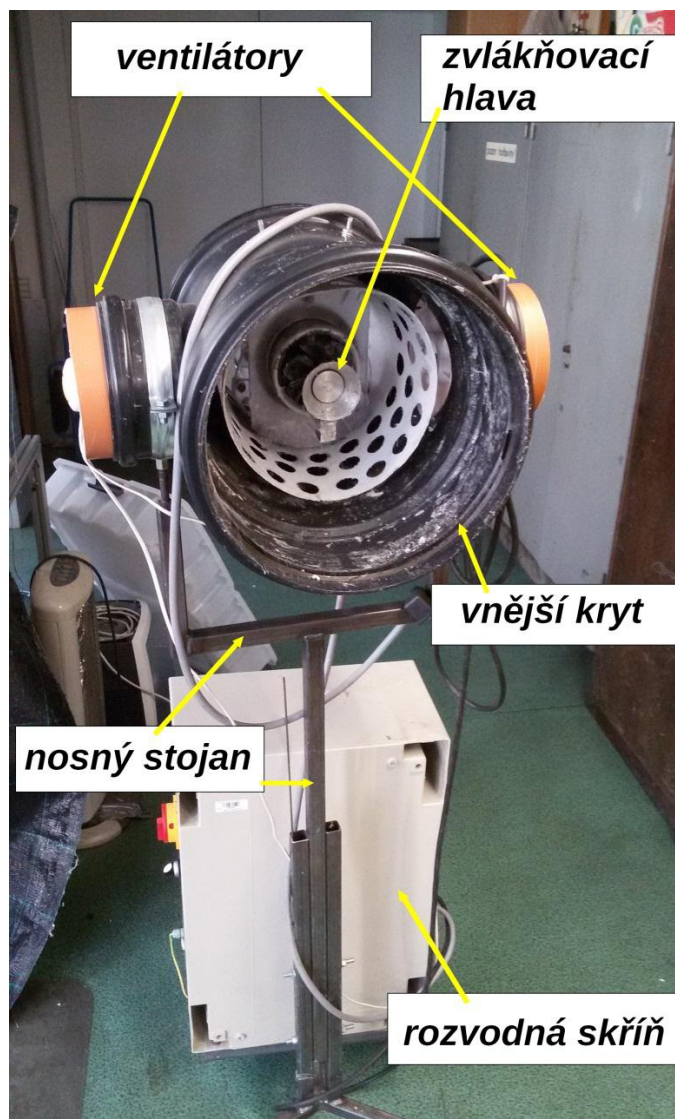
Průměry otvorů spinnerety přímo ovlivňují průtok a určují prvotní průměr vláken při opuštění spinnerety materiálem. Se zvětšujícím se průměrem otvorů se zvyšuje i průměr vzniklých vláken. Pokud jsou jejich velikosti příliš velké, bude materiál tvořit spíše kapky.

Vzhledem k variabilitě hlavně fyzikálních vlastností různých zvlákňovaných materiálů je proto vhodné pro optimalizaci průběhu zvlákňování mít k dispozici více typů zvlákňovacích hlav. [9]

1.6 Laboratorní zařízení pro praktickou část

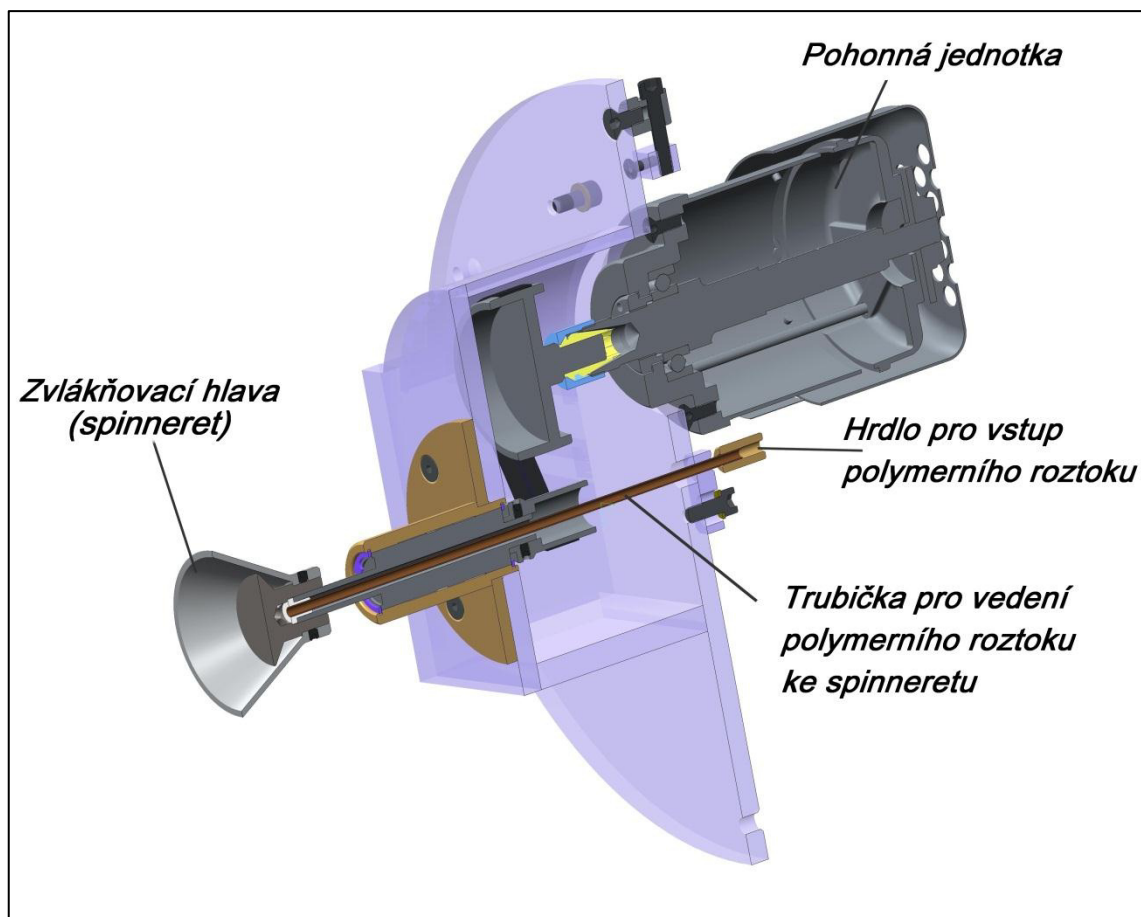
Laboratorní zařízení na odstředivé zvlákňování, se kterým bude pracováno v praktické části, se od konvenčního schématu trochu liší. Prvním rozdílem je to, že svou osou je polohováno vodorovným směrem namísto obvyklého vertikálního směru. Druhým rozdílem je zvlákňovací hlava (spinneret). Ta nemá tvar disku či válce s otvory, nýbrž jakéhosi kalíšku, připomínající svým tvarem dutý komolý kužel. A třetím podstatným rozdílem je to, že vznikající vlákněná pavučinka není zachytávána na okolní kolektor v rovině spinneretu. Zpoza spinneretu totiž proudí vzduch, který je iniciován dvěma ventilátory a usměrňován vnějším válcovitým krytem. Vnitřní perforovaný bílý kryt má pak zmírnit případné vírové struktury proudění. Proudící vzduch má za úkol odvádět vlákněnou pavučinu a přivádět ji na blíže nespecifikovaný kolektor. Návrh pro lepší transportní systém bude úkolem praktické části této diplomové práce.

Na obr. 10 lze vidět celé zařízení včetně stojanu:



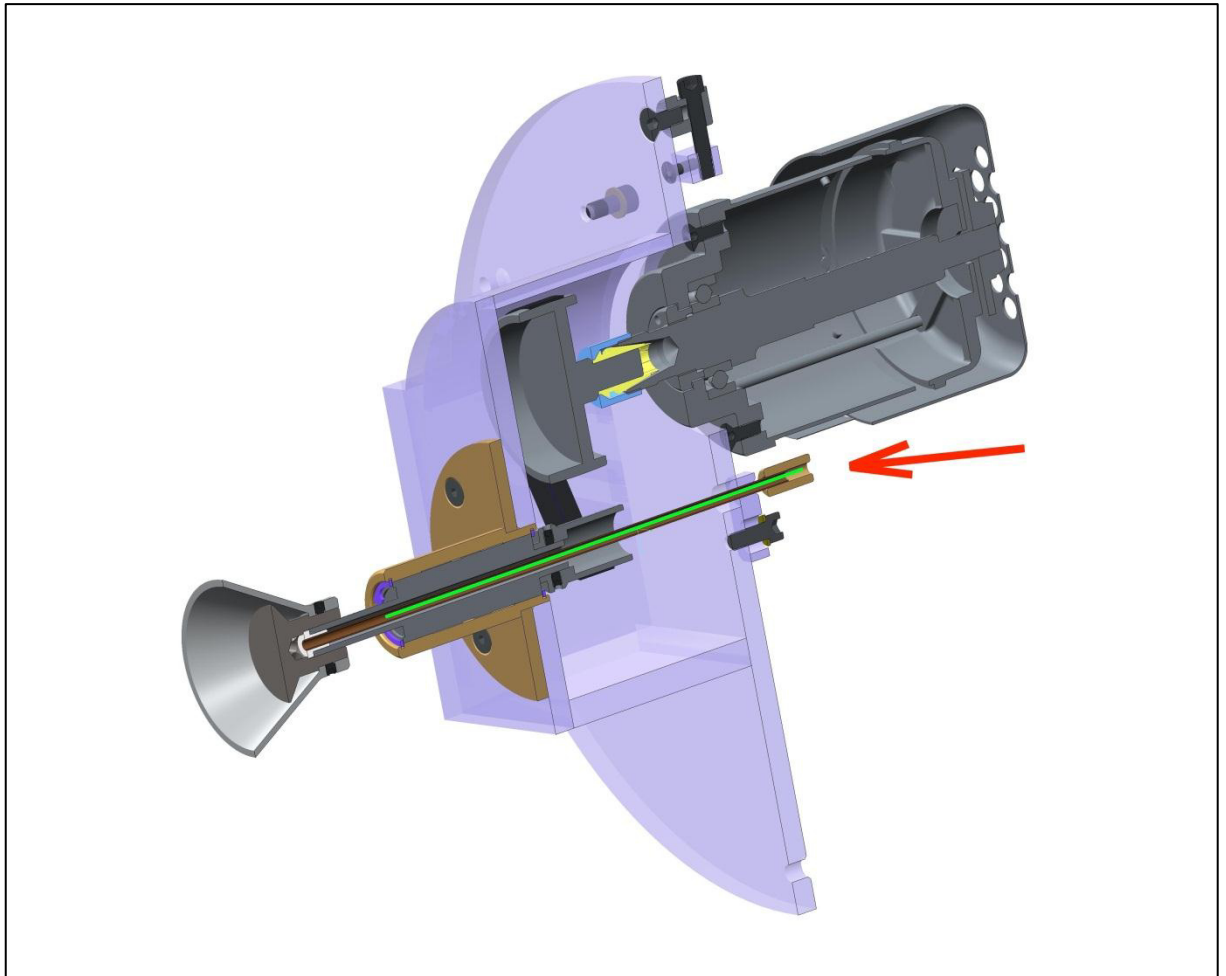
obr. 10: Celá konstrukce zařízení na odstředivé zvlákňování z předního pohledu [13]

Schéma a popis nejdůležitějších částí laboratorního přístroje lze vidět na obr. 11:



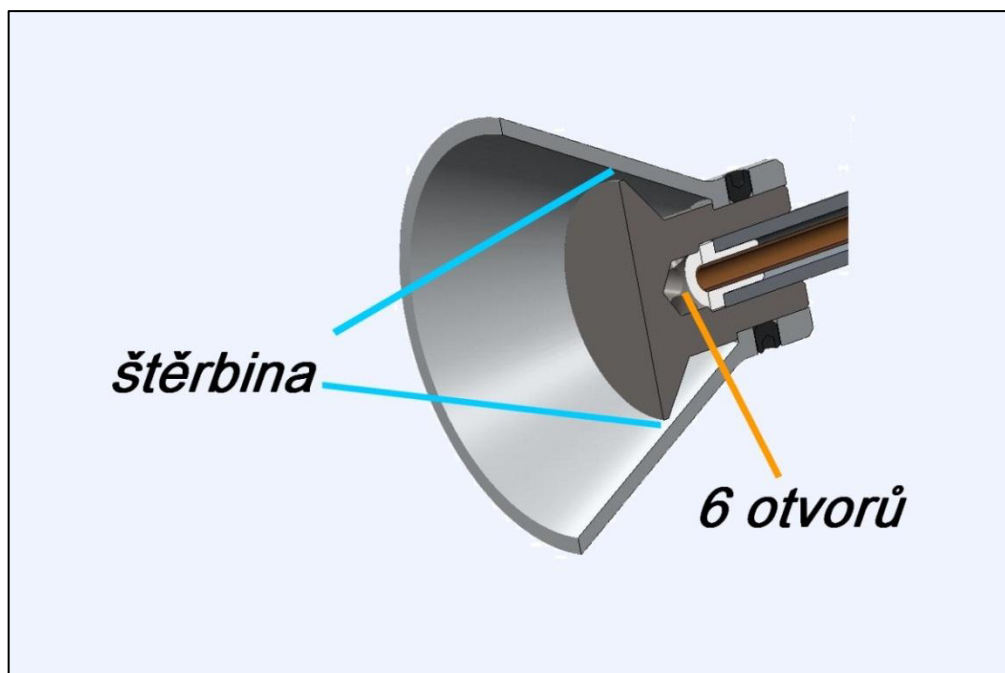
obr. 11: Schéma a popis nejdůležitějších částí laboratorního přístroje (řez vertikální osou) [13]

Do injekční tuby se nechá dávkovat polymerní roztok. Vyústění injekční tuby se nasadí na hrdlo trubičky a poté je do ní manuálně nebo pomocí dávkovače polymerní roztok vtlačován, viz obr. 12:

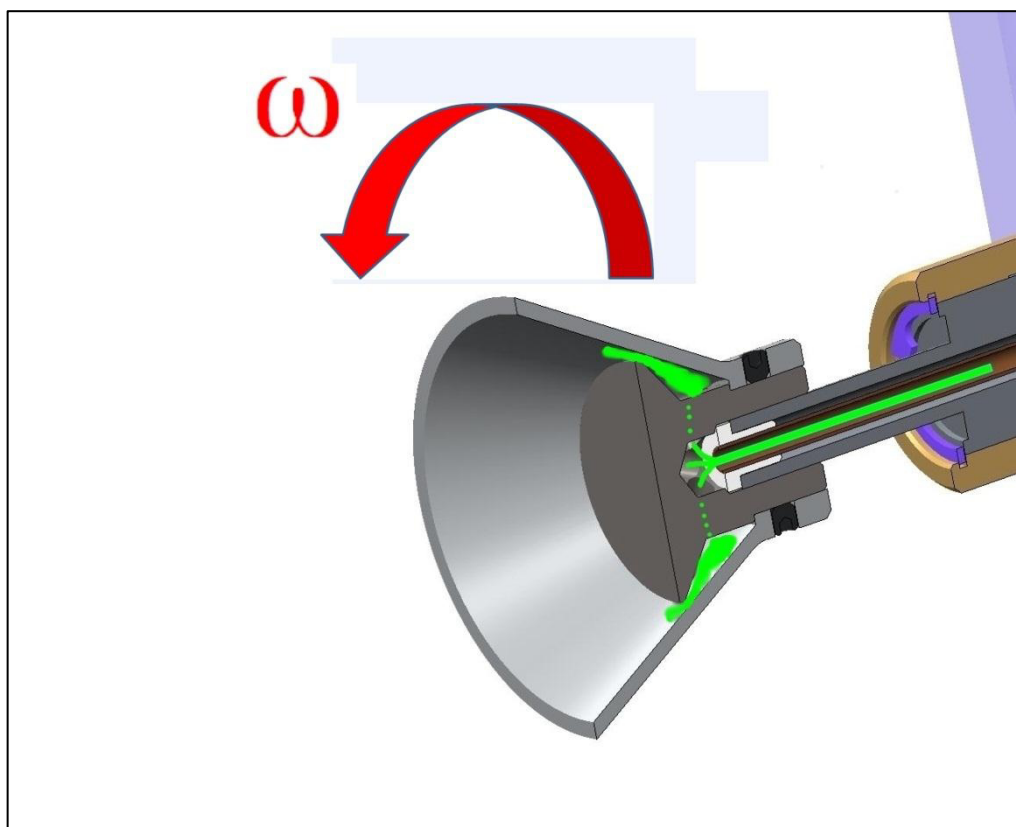


obr. 12: Průchod polymerního roztoku trubičkou [13]

Polymerní roztok poté tlakovou silou doputuje až na konec trubičky, odkud následně vtéká do 6 otvorů rotující zvlákňovací hlavy. Ta je tvořena dvojicí přírub. V tuto chvíli již na polymerní roztok začíná působit odstředivá síla. Po průchodu otvory se polymerní roztok dostane na vnitřní plošku vnější příruby zvlákňovací hlavy. Vlivem odstředivé síly je roztok posouván po plošce směrem ke zvětšujícímu se poloměru vnější příruby, která je ve tvaru komolého kužele. Při posouvání putuje skrz štěrbinu mezi vnější a vnitřní přírubou, čímž se zajistí, že po plošce bude dále putovat jen tenká vrstva polymerního roztoku. Viz obr. 13 a 14:

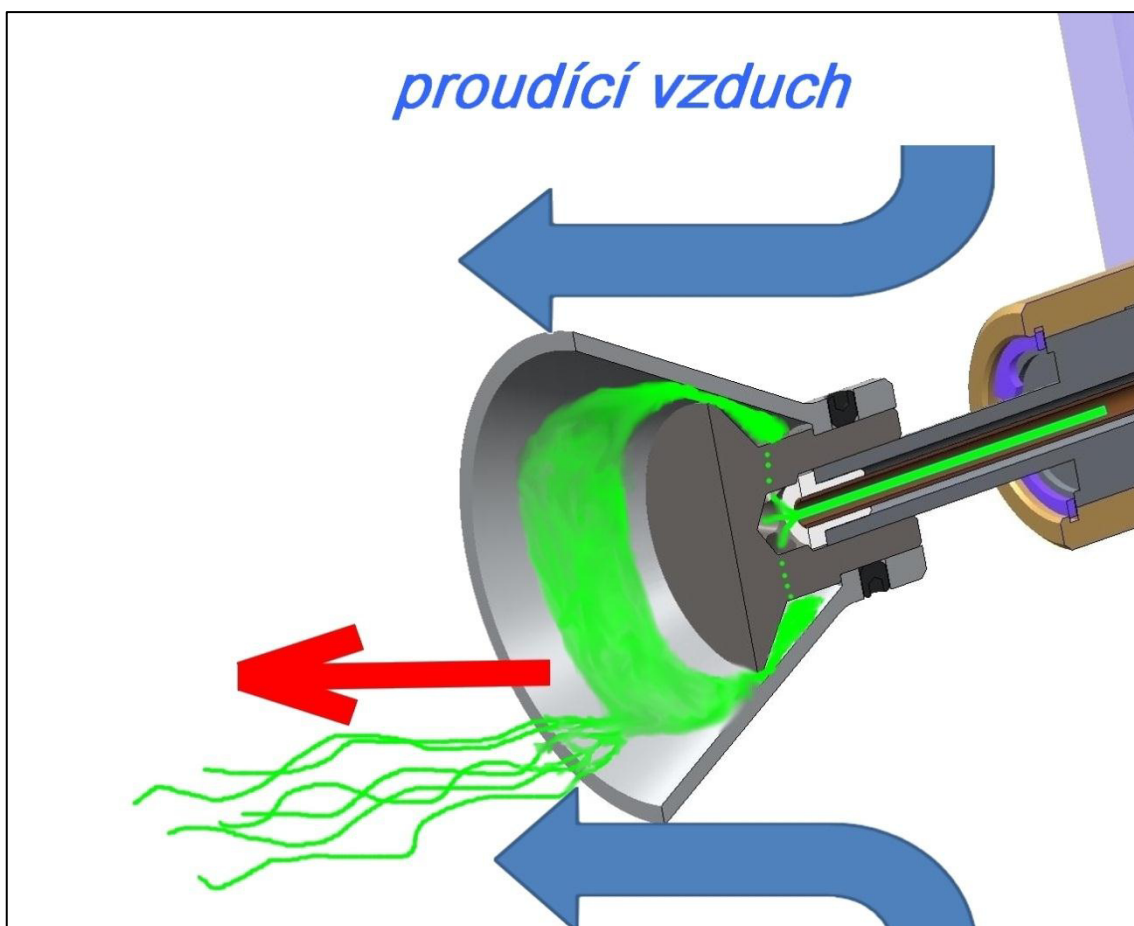


obr. 13: Detail zvlákňovací hlavy s 6 otvory a štěrbinou po celém obvodu vnější přírubby zvlákňovací hlavy [13]



obr. 14: Schéma průchodu polymerního roztoku zvlákňovací hlavou [13]

Po průchodu štěrbinou se vrstva polymerního roztoku vlivem odstředivé síly posouvá po plošce zvlákňovací hlavy ve směru zvětšujícího se poloměru. Dochází ke zvětšení povrchu, odpařování rozpouštědla a následně v kritickém bodě, kdy odstředivá síla překoná povrchové napětí mezi polymerním materiálem a plošky spinneretu, dojde ke zvláknění. Viz obr. 15:



obr. 15: Schéma průběhu v momentě, kdy odstředivá síla překoná povrchové napětí mezi polymerním roztokem a spinneretem. Vlákna se začínají odtrhávat [13]

Následně jsou vlákna setrvačnou silou a okolo proudícím vzduchem unášena do prostoru před zvlákňovací hlavou, kde mají být zachytávána na bližší nespecifikovaný kolektor.

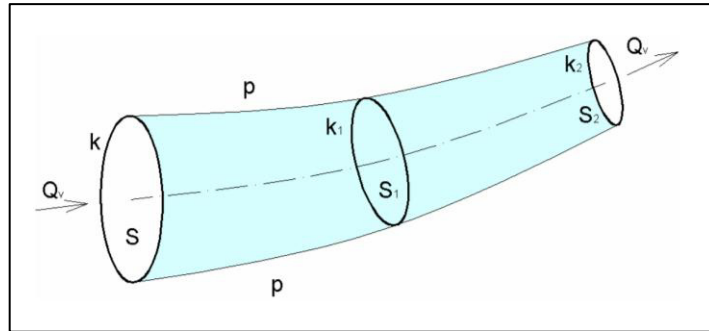
1.7 Proudění tekutin

V následující kapitole budou představeny základní pojmy ohledně proudění tekutin, jelikož v praktické části diplomové práce bude jedním z hlavních bodů pochopit proudící vzduch ze zadní části odstředivky a vymyslet zařízení pro jeho usměrnění.

Pod pojmem tekutina se obecně označují látky v plynném a kapalném skupenství. V tomto skupenství jsou látky nevratně deformovatelné. Jsou-li tekutiny v klidu vůči povrchu země a za běžných podmínek, není jejich fyzikální popis až tak složitý. To ovšem neplatí, jsou-li tekutiny v pohybu. Jejich pohyb neboli proudění je poměrně složitým dynamickým procesem, a k jeho popisu a chápání se často používá některých zjednodušení a zanedbání. Nejjednodušší popis nabízí pohyb ideální (nevazké) kapaliny nebo ideálního plynu.

K proudění tekutiny mezi 2 místy dochází v případě, že je mezi těmito místy rozdíl tlaků. Proudění se může vyšetřovat po křivce, v rovině, nebo v prostoru, kdy je sledován pohyb jisté částice tekutiny jakožto hmotného bodu. Případně může být sledován proud jako celek během definovaného časového úseku. Tato sledovaná částice se pak při pohybu tekutiny pohybuje po určité dráze neboli *trajektorii*. Obálky vektorů rychlostí pak tvoří *proudnice*. V našem případě praktické části DP se jedná o *ustálené proudění*, kdy se nemění rychlosti proudění s časem, tudíž proudnice mají stejný tvar a jsou totožné s drahami částic.

Proudovou trubici pak tvoří svazek všech proudnic, které procházejí zvolenou uzavřenou křivkou k . Platí, že všechny částice, které protékají průřezem S proudové trubice, protékají libovolnými průřezy S_1 , S_2 této trubice. Viz obr. 16. Tuto proudovou trubici lze chápat jako potrubí. [14], [15], [16]

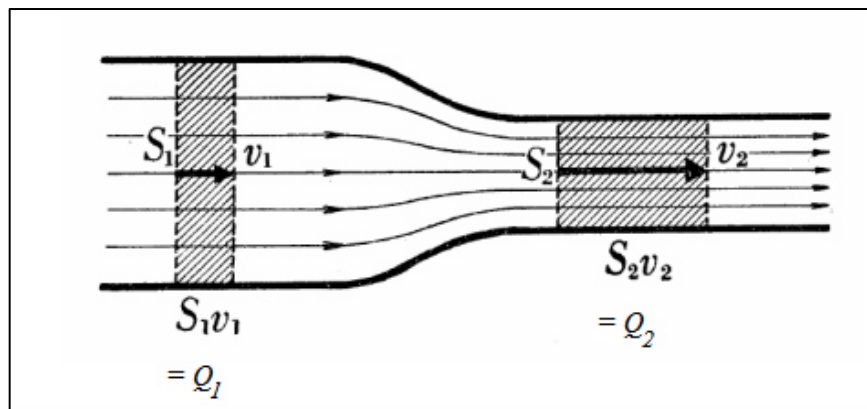


obr. 16: Schéma pomyslné proudové trubice [14]

Množství tekutiny, která při ustáleném proudění proteče při rychlosti v průřezem potrubí S za jednotku času t , se pak označuje jako *objemový průtok* Q_v , a vypočteme ho ze vztahu (2):

$$Q_v = \frac{V [m^3]}{t [s]} = \frac{S [m^2] \cdot v \left[\frac{m}{s}\right] \cdot t [s]}{t [s]} \quad (2).$$

Objemový průtok ustáleného proudění ideální tekutiny je při různých průřezech trubice vždy stejný. V místech s užším průřezem procházejí částice tekutiny vyšší rychlostí, a naopak, viz obr. 17:



obr. 17: Objemové průtoky se rovnají při různých průřezech potrubí [17]

Tento vztah (3) se označuje jako zjednodušená rovnice kontinuity či spojitosti, a jeho tvar lze tedy zapsat takto:

$$Q_v \left[\frac{m^3}{s}\right] = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (3),$$

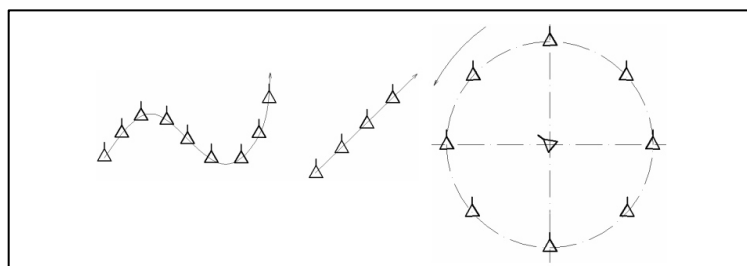
kde:

S_1, S_2 jsou průřezy v různých místech potrubí [m^2],

v_1, v_2 jsou rychlosti proudění v daných místech potrubí [m/s].

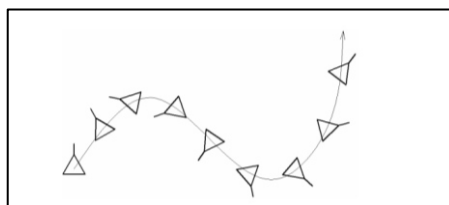
Proudění lze rozdělit na několik typů, a také dle toho, zda se jedná o tekutiny ideální či nikoliv – tedy reálné. V případě **ideální** tekutiny rozlišujeme proudění *potenciální* (nevířivé) a *vířivé*.

U potenciálního proudění se proudící částice tekutiny pohybují po drahách přímočaře nebo křivočaře, a to tak, že se netočí kolem vlastní osy vůči pozorovateli. Natočení částice po křivočaře je kompenzováno natočením o stejné velikosti kolem vlastní osy, ale v opačném smyslu. Případem tohoto proudění je i potenciální vír, při němž částice krouží kolem vřového vlákna (s výjimkou té částice, která tvoří vlákno). Viz obr. 18:



obr. 18: Vlevo: potenciální proudění; vpravo: potenciální vír [14]

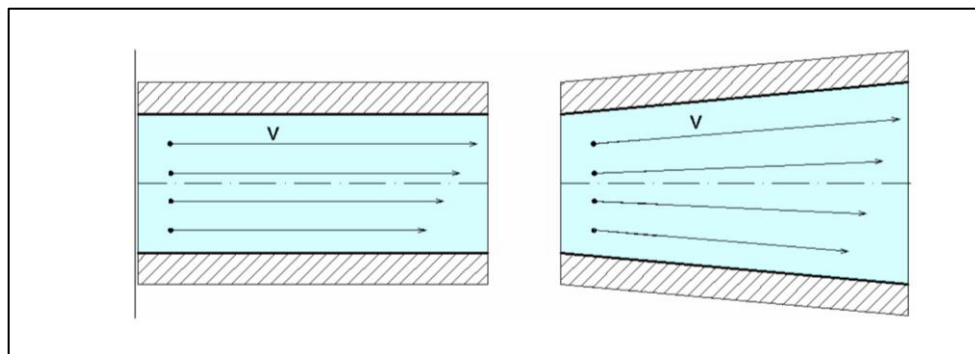
Druhým případem je proudění vířivé, při němž se částice tekutiny natáčí kolem vlastních os vůči pozorovateli. Viz obr. 19:



obr. 19: Ilustrace vířivého proudění [14]

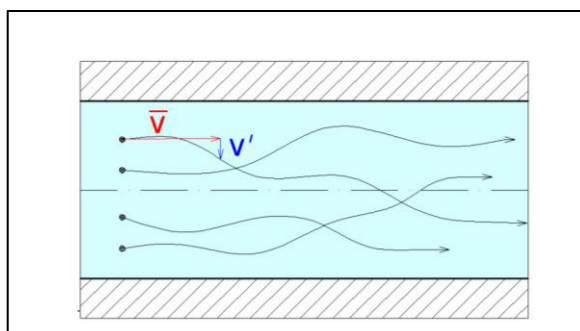
Pokud uvažujeme **reálnou** (vazkou) tekutinu, rozlišujeme u ní proudění *laminární* a *turbulentní*.

Laminární (vrstevnaté) proudění je takové, při němž nedochází k mísení jednotlivých vrstev tekutiny, resp. částice se nepřemísťují po průřezu potrubí. Zjednodušeně můžeme říct, že se jedná o proudění bez vzniku vírů. Schéma lze vidět na obr. 20:



obr. 20: Schéma laminárního proudění [14]

Naproti tomu proudění turbulentní je takové, kdy je rozdíl tlaků na dvou místech potrubí tak velký, že při něm mají částice rychlost nejen podélnou, ale také flukтуаční. Pohybují se tedy i po průřezu potrubím. Částice jednotlivých vrstev se začnou promíchávat vlivem vyšších smykových napětí působících mezi vrstvami. Schéma lze vidět na obr. 21:



obr. 21: Schéma turbulentního proudění [14]

O tom, zda v potrubí dojde k laminárnímu, nebo turbulentnímu proudění, rozhoduje tzv. Reynoldsovo kritické číslo Re . Toto číslo je bezrozměrné a je definováno vztahem:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} [-] \quad (4),$$

kde:

v = střední rychlost tekutiny [m/s],

d = průměr potrubí, případně jiný charakteristický rozměr [m],

ν = kinematická viskozita tekutiny [m^2/s].

Pro laminární proudění platí, že $Re < Re_k$.

Pro turbulentní proudění platí, že $Re > Re_k$.

Nejčastěji se kritické Reynoldsovo číslo Re_k pohybuje v rozmezí $\langle 1000; 20000 \rangle$. Je závislé na typu tekutiny, a na podmínkách prostředí a tvaru potrubí. Pro kruhové potrubí se jako jeho spodní mez považuje hodnota $Re_k = 2300$.

U kapalin lze jejich proudění popsat dalšími vztahy jako odvozená Bernoulliho rovnice, Navierova-Stokesova rovnice, apod., u plynů je to složitější díky jejich stlačitelnosti. [15], [16], [17]

1.8 Způsoby vizualizace proudění vzduchu

V praktické části této diplomové práce bude jedním ze stěžejních úkolů vizualizovat nějakým způsobem proudění vzduchu, který v odstředivce unáší vznikající vlákna. V této kapitole bude představen stručný souhrn vybraných metod, pomocí kterých se se dá proudění vzduchu vizualizovat.

1.8.1 Metody zaváděním látek do proudu

Do proudu vzduchu se nejčastěji zavádějí buď částice, nebo látky tvořící souvislá vlákna, případně větší souvislé oblasti ve sledovaném proudu. Pro nižší a střední rychlosti proudění se jako forma částic používají bílé vločky teplem vysublimovaného metylaldehydu, niťové sondy, balzové piliny, lokální ohřevy plynů, nebo třeba jiskry. Novou metodou je použití saponátových bublinek, které se v generátoru naplňují héliem (viz obr. 22). U vyšších rychlostí proudění se častěji používá hliníkový prach. [18], [19]



obr. 22: Ukázky vizualizace pomocí héliových bublinek o velikosti 0,75 – 5 mm [18]

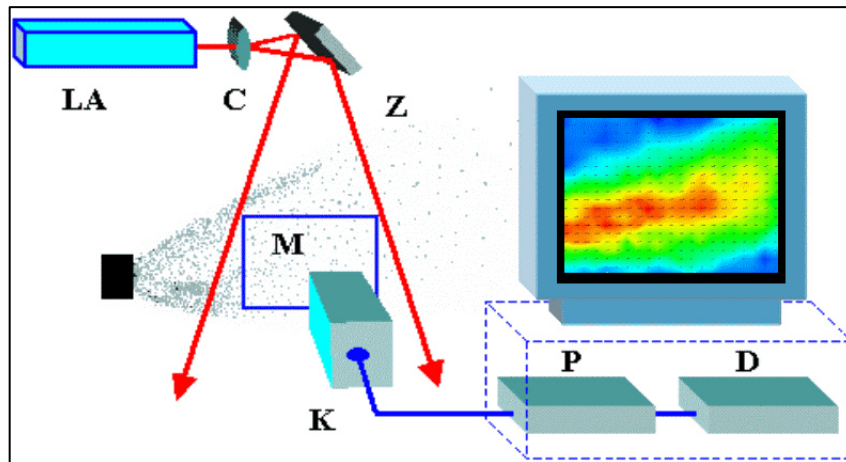
Po tuto skupinu metod spadají i metody *laserové anemometrie*. Jak již název napovídá, tyto metody využívají laserové světlo, a pracují na opto-elektronickém principu. Do laserové anemometrie lze zařadit metody PIV (particle image velocimetry), 3D-PIV, LDA (laser Doppler anemometry), PDA (phase Doppler anemometry) a L2F (laser two-focus anemometry). Měření jsou lineární v celém rozsahu jimi zkoumaných rychlostí. Výsledky těchto metod nejsou závislé na okolních vlivech jako teplota, vlhkost, tlak apod. [18], [20]

V praktické části bude použita PIV metoda, proto bude představena samostatně v následující kapitole.

1.8.2 PIV

Tato poměrně nová metoda umožňuje experimentálně zkoumat proudová pole v určené rovině prostoru, a navíc může sledovat i vývoj těchto proudových polí v čase.

Metoda funguje na principu získávání snímků částic a jejich pohybů v proudění během krátkých časových intervalů. Z po sobě jdoucích snímků se následně v počítači zpracovává pohyb jednotlivých částic a vyhodnocují se vektorové mapy lokálních rychlostí částic, resp. tekutiny. Metoda lze provádět ve 2D i 3D prostoru. Schéma metody lze vidět na obr. 23:



obr. 23: Schéma PIV metody. LA – laser, C – válcová čočka, Z – zrcadlo, M – měřící prostor, K – kamera, P – procesor PIV, D – datový procesor [18]

Laserový paprsek je pomocí válcové čočky formován do laserového řezu. Ten definuje osvětlenou měřící rovinu v oblasti pozorovaného proudění. Částice unášené v proudění rozptylují světlo do objektivu kamery, příp. fotoaparátu, a jsou promítnuty do obrazové roviny objektivu. Následně jsou zaznamenány CCD maticovým detektorem v kameře.

Postupně se pořizují série snímků s daným časovým rozestupem (intervalem). Expozice mohou být pořizovány jak jednotlivě, kdy každý záznam poloh částic je exponován do jednoho obrazu, tak dvojnásobně, kdy jsou do jednoho obrazu exponovány dva snímky poloh částic. Obrazy jsou děleny na menší čtvercové oblasti – tzv. *vyšetřovací*. Stanovuje se průměrné posunutí částic v každé této vyšetřovací oblasti. [18], [20]

Vyhodnocení snímků se získává dle elementární rovnice:

$$\text{rychlost} = \frac{\text{vzdálenost}}{\text{čas}} \quad [\text{m/s}] \quad (5),$$

kde:

vzdálenost = posuv unášených částic v proudění [m],

čas = nastavený interval [s].

Platí pravidlo, že průměrné posunutí částic o Δx , Δy v objektové rovině odpovídá posunutí v obrazové rovině o ΔX , ΔY , neboli:

$$\Delta x = \frac{1}{M} \Delta X, \quad \Delta y = \frac{1}{M} \Delta Y \quad (6),$$

kde M je zvětšení. Při znalosti časového intervalu mezi jednotlivými záznamy jsou pak vypočteny složky rychlosti u_x , u_y v objektové rovině:

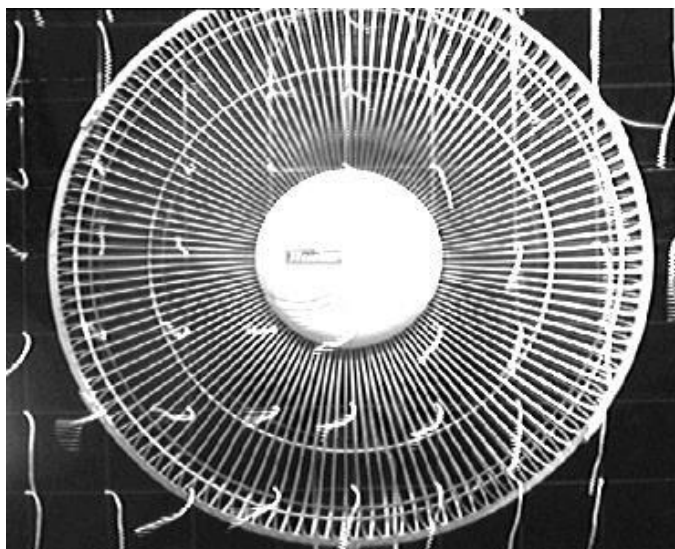
$$u_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad u_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (7).$$

Tím se stanovují vektory rychlostí pro každou oblast, souhrnné výsledky jsou pak znázorňovány ve vektorové mapě. Vhodnou technikou pro vyhodnocení v případě jednotlivé (samostatné) expozice je pak vzájemná korelace, v případě dvojnásobné expozice je to pak autokorelace.

Chyba hodnot měřených veličin u PIV analýzy se pohybuje většinou mezi 3 - 5 %. Je ovlivněna dynamickým rozsahem, mírou zasyčení vizualizovaného prostoru a charakterem sytících částic. V ideálním, avšak jen teoretickém případě, by sytící částice měly dokonale sledovat proudící médium, čili by musely mít stejnou hustotu jako médium a nulový aerodynamický odpor. [20]

1.8.3 Metody indikátorů směrů proudů

Nejčastěji je toto realizováno nitřovými sondami. Do oblasti proudění se umístí tyčinka nebo drátěná mříž se soustavou nití. Ty mají roztržené konce, případně na sobě pířka či balsu. Viz obr. 24.



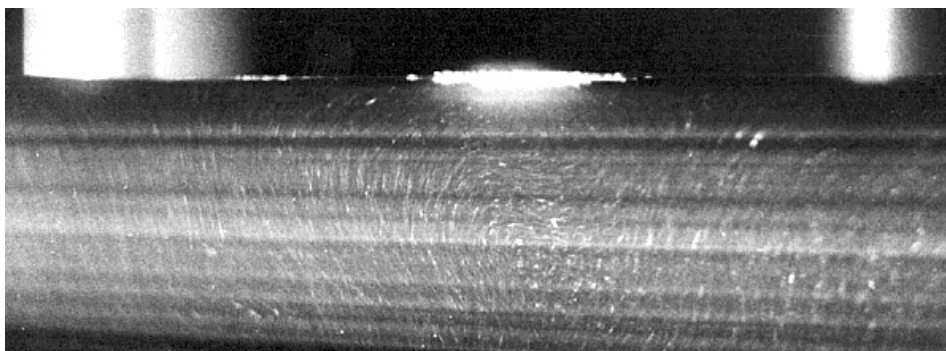
obr. 24: Připevněné nitě na drátěné mřížce, skrz kterou jde proudění [18]

Dále to může být realizováno pomocí plamene, např. i z obyčejné svíčky (pro nízké rychlosti proudění). Jako výstup těchto metod má být dokázání existence proudění a jeho směru. Vlákny se poměrně dobře zjišťují oblastí s turbulentním, případně laminárním charakterem proudění. [18], [19]

1.8.4 Bezkontaktní metody

Tyto „metody“ lze uplatnit v případech, kdy se v tekutině přirozeně vyskytují odlišitelné heterogenní částice nebo látky tvořící souvislá vlákna, jež lze vizualizovat bez nutnosti zavádění jiných částic. Hovoříme pak o tzv. bezkontaktních metodách. Nejčastějšími takovými případy jsou:

- mlha ve vzduchu
- plamen nebo plazma ve vzduchu
- vzduchové bubliny ve vodě či jiné kapalině (viz obr. 25)
- prachové částice ve vzduchu
- optické metody.



obr. 25: Proudící bublinky ve vodě pod rotujícím diskem [18]

Pro uskutečnění *zavedení souvislých vláken* se používá:

- *vizualizace plamenem*, vycházející z hořáku ve tvaru trubky s množstvím otvorů, který musí vytvářet dlouhá, tenká plamenná vlákna
- *vizualizace kouřem či mlhou*, které se přivádí hřebenovou tryskou, otvory na povrchu modelu, nebo vzniká fyzikálně-chemickou reakcí v okolním prostředí. Viz obr. 26:



obr. 26: Vizualizace odsávání vzduchu z prostoru pomocí kouře [18]

Pozn.: V případech, kdy je intenzita kouře nebo mlhy malá, se jejich vizualizace mapuje pomocí funkce skládání dvou obrazů a pomocí funkce interferogram.

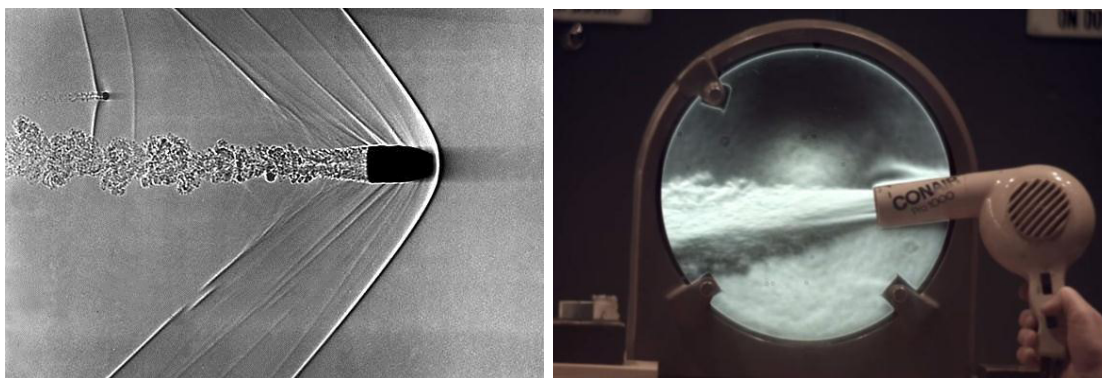
Jako výstup těchto metod je získání zobrazení tvarů trajektorií a rozložení vektorů rychlostí, a zobrazení oblastí turbulentního proudění. [18], [19]

1.8.5 Optické metody

Specifickou skupinou jsou pak *optické* metody. Z nich lze k vizualizaci proudění plynů použít hlavně *stínovou* metodu a *Šlírovu* metodu.

Stínová metoda je používána k vizualizaci nehomogenit v transparentních tekutinách. Je založena na zakřivení trajektorie světelných paprsků, jejichž zakřivení je způsobeno průchodem transparentním nehomogenním objektem. Procházející paprsek pak na stínítko dopadá o jiné hustotě, čímž se změní intenzita stínů a kontur (viz obr. 27). Uplatňuje se hlavně v prostředích, kde je výskyt velkých změn indexu lomu v daných transparentních prostředích.

Šlírova (clonková) metoda pracuje na podobném principu jako stínová metoda, principem je rovněž zakřivování trajektorie světelného paprsku po průchodu transparentním nehomogenním objektem (viz obr. 28). Oproti ní je však vkládána clona do ohniskové roviny zobrazovací čočky (optický nůž), čímž se realizuje filtrace. V místech, kde je první derivace indexu lomu v jistém rozmezí, vznikají pruhy a souvislé oblasti, čímž vzniká obraz. Tato metoda se využívá při řešení vizualizace hybnosti, přenosu tepla, transportu látek apod. U proudění je použitelná při rychlostech 100 m/s a vyšších. [18], [19]

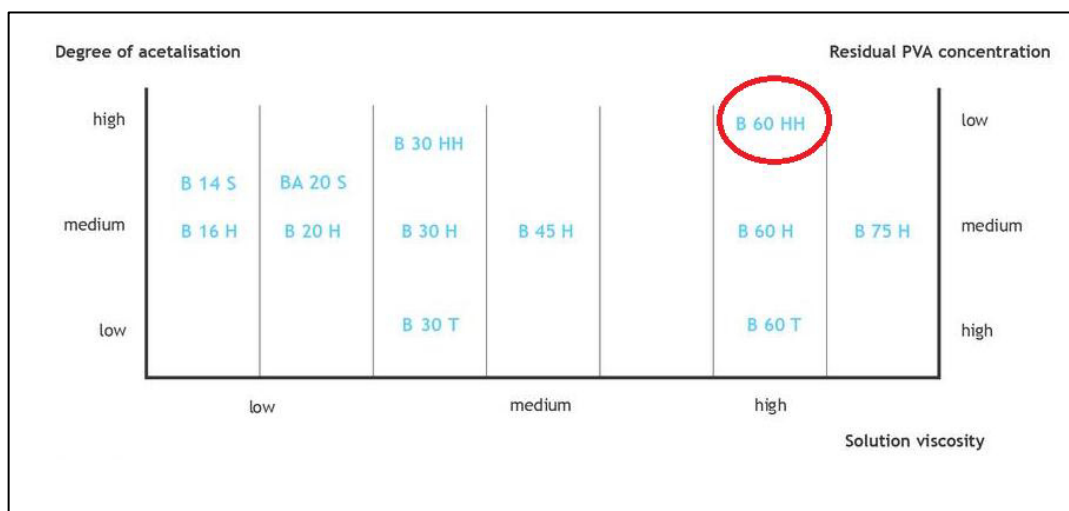


obr. 27 a 28: vizualizace stínovou metodou [21];
vizualizace Šlírovou metodou [22]

1.9 Používaný polymer a jeho roztok – PVB

V následující kapitole bude představen polymer, resp. polymerní roztok, s nímž bude pracováno během praktické části této diplomové práce. Jedná se o PVB, což je zkrácený název pro polyvinylbutyral. Tento polymer je pro potřeby našeho odstředivého zvláknování rozpouštěn v ethanolu. Primárně před započítím této diplomové práce byl používán roztok PVB v ethanolu o hmotnostní koncentraci 10%. Jeho příprava probíhala tak, že příslušné hmotnosti obou látek byly vloženy do plastové chemické lahvičky a poté po dostatečně dlouhou dobu promíchávány magnetickým míchadlem, dokud se PVB v ethanolu dokonale nerozpustil.

Konkrétně byl používán PVB v práškové formě s označením Mowital B60 HH od německé firmy Kuraray. Firma tento polymer vyrábí v několika variantách lišících se svými chemickými vlastnostmi. Konkrétní chemické údaje firma neposkytuje. Námi používaná varianta by však v porovnání s ostatními variantami měla mít vysoký stupeň polymerizace a vysokou molární hmotnost, a tím i vysokou viskozitu a nízký stupeň zbytkového PVA. Vzhledem k vysokému stupni acetalizace má PVB ve variantě B60 HH jen minimální polaritu, a je tak dobře rozpustný v nepolárních rozpouštědlech. Vzhledem k vysokému stupni acetalizace je pak také nejlépe voděodolný. Orientační porovnání jednotlivých variant lze vidět na obr. 29:



obr. 29: Porovnání variant PVB vyráběného firmou Kuraray [23]

PVB Mowital se používá v širokém portfoliu aplikací a produktů, jimiž jsou třeba lepidla a pojiva k substrátům, smaltování, příprava inkoustových barev na obaly potravin, nátěrové hmoty a značení – např. na dopravních komunikacích, atd. [23]

2. Praktická část

2.1 Určení vhodné koncentrace

Prvním dílčím úkolem bylo zjistit, jaká hmotnostní koncentrace roztoku PVB v ethanolu se bude jevit jako nejvhodnější ke zvlákňování. Primárně, ještě před započítím této diplomové práce, byl používán roztok o hmotnostní koncentraci 10%. V plánu bylo vyzkoušet i koncentrovanější roztoky, předběžným odhadem do 20%. Experiment probíhal tak, že se jednotlivé koncentrace polymerního roztoku nechaly odstředivkou zvláknit. Ve vzdálenosti cca 50-70 cm před vyústěním krytu odstředivky byl umístěn provizorní kolektor. Ten se skládal z mřížky kancelářského ventilátoru, přes který byla potažena prodyšná spunbond textilie. Tím se docílilo toho, že proud vzduchu byl jen nepatrně, nebo dokonce nebyl vůbec tlumen či ovlivněn. Pomocí výkyvných ručních pohybů kolektoru bylo zajištěno zachycení vláken na spunbond textilií do plošného útvaru, z kterého byla následně vizuálně hodnocena struktura vzniklé pavučiny. Posuzovány byly hmotnostní koncentrace 10, 12, 14, 16, 18 a 20 %.

Po provedení experimentů se ukázalo, že původně používaná 10% koncentrace roztoku je asi příliš nízká, neboť vlákenná vrstva, resp. pavučina, na zachytávajícím kolektoru obsahovala určité množství kapek a ne zcela zvlákněných „kapkovitých“ defektů. Je patrné, že vzniklá pavučina se jeví jako ne zcela stejnoměrná. Poměr množství rozpouštědla a polymeru je tedy asi příliš vysoký, viskozita příliš nízká. V důsledku toho se rozpouštědlo tudíž nestačí při zvlákňování na rotujícím spinneretu a při jeho opouštění zcela odpařit.

Koncentrace polymerního roztoku 12% se oproti předchozí koncentraci jevila již lépe. Kapek a kapkovitých defektů již poměrně značně ubylo, vlákenná pavučina vypadala mnohem lépe, co se týče stejnoměrnosti a tvaru vláken.

Polymerní roztok o koncentraci 14% se jevil velmi podobně, jako předchozí koncentrace 12%. Vlákenná pavučina obsahovala jen malé množství defektů, nebyly

zjištěny viditelné kapky neodpařeného rozpouštědla. Stejnouměrnost se jevila také poměrně dobře.

Při použití 16% koncentrace se již polymerní roztok méně ochotně odtrhával z plochy rotujícího spinneretu. Zároveň se některé části odtrhávajícího polymeru neunášely proudem vzduchu směrem ke kolektoru, ale přichytávaly se na okolní plastové části. Zvlákňování tedy nebylo úplně kontinuální. Vznikající vrstva pavučiny nebyla úplně stejnoměrná a měla horší kvalitu, než u předchozích dvou koncentrací. Při zvýšení otáček motoru a tím větší rychlosti otáčení rotujícího spinneretu se zvýšila efektivita a intenzita zvlákňování, stejně tak i kvalita pavučiny. Zvýšená viskozita tohoto polymerního roztoku již tedy potřebuje vyšší odstředivé síly, aby došlo ke kontinuálnímu zvlákňování. Nicméně vyšší otáčky motoru mohou po chvíli způsobit jeho přetížení a vyřazení elektrického obvodu jističem, takže řešení zvýšení otáček je jen polovičaté a krátkodobé.

Při testování 18% koncentrace polymerního roztoku již zvlákňování probíhalo obtížně. Roztok z plochy rotující příruby spinneretu zvlákňoval pouze 2-3 sekundy. Poté buď zůstával na ploše příruby a vůbec neodlétával, nebo se nenechal unášet proudícím vzduchem a přichytával se na okolní plastové kryty provizorního tunelu. Navíc ulpěné části měly ve velké míře formu viskózní kapaliny, a jen z malé části polymerního roztoku docházelo ke zvlákňování a vzniku pavučiny na kolektoru. Ta navíc nebyla příliš stejnoměrná. Nepomohlo ani zvýšení otáček motoru, kdy vznikající vlákna spojená s nezvlákňovanými částmi viskózního roztoku vlivem větší odstředivé síly odlétávala ještě ve větší míře na okolní kryty. Lze tedy konstatovat, že tento polymerní roztok už má asi příliš vysokou viskozitu a hustotu, a dosavadní proud vzduchu v prozatímním tunelu nedokáže odtrhávající vlákna usměrnit do potřebného směru na umístění kolektoru.

Koncentrace polymerního roztoku 20% ještě více umocnila chování předchozí koncentrace roztoku. Roztok ve formě viskózní kapaliny jen stěží opouštěl rotující kalíšek, případně ulpíval na okolní kryt. Ke zvlákňování je tedy již zcela nevhodná.

Závěrem lze tedy konstatovat, že při aktuálních podmínkách a stavu tohoto zařízení na odstředivé zvlákňování se v případě používání polymerního roztoku PVB v ethanolu nejlépe jeví používat tento roztok o jeho koncentraci 12-14 hm. %.

Pokud se při vypracování této diplomové práce zadaří vytvořit efektivnější tok vzduchu v okolí zvlákňovací hlavy, bude možná možno použít i o něco vyšší koncentrace daného roztoku. Tím by se dosáhlo vyšší efektivity zvlákňování, co se týče množství používaného rozpouštědla.

2.2 Studium chování toku vzduchu

V dalším kroku bylo potřeba blíže zjistit, jak se chová proudící vzduch v okolí zvlákňovací hlavy a prostoru před ní. To mělo pomoci při následném navrhování nástavce či modifikaci odstředivky. V úvahu mohly však přicházet pouze ty metody či pokusy, které by bylo možno realizovat pomocí prostředků a techniky, dostupných v rámci laboratoře, případně univerzity.

2.2.1 Pokus se zdrojem kouře / mlhy

Dalším nápadem bylo použití nějakého zdroje kouře nebo mlhy, který by byl umístěn do prostoru před zvlákňovací hlavu. Sledováno mělo být chování kouře, který by byl unášen po trajektoriích při proudění vzduchu, vycházejícího z odstředivky.

Jako zdroj kouře, který by zároveň nezamořil prostory laboratoře a nespustil hlásič požáru, byly zvoleny *vonné orientální tyčinky*. Bohužel, nepodařilo se takto vytvořit dostatečně silný kouř, který by se při působení proudu vzduchu nerozplynul po uražení již krátké trajektorie. Ukázku pokusu lze vidět na obr. 30:



obr. 30: Ukázka pokusu s kouřem z vonných tyčinek

Dalším v pořadí byl tedy pokus se zdrojem mlhy. Jako zdroj byl použit *tvořič vodní páry*, který se používá např. pro udržování požadované vzdušné vlhkosti v laboratorním zařízení Nanospider pro elektrostatické zvlákňování. Bohužel, ačkoli na první pohled se zdálo, že množství vytvářené vodní mlhy, resp. páry by mohlo být dostačující, tato se při působení proudu vzduchu rozptýlila a po výstupu z odstředivky nebyla vůbec viditelná. Nepomohlo ani snížení otáček motoru a tím snížení intenzity množství proudícího vzduchu. Tudíž i tento pokus se nepodařil úspěšně. Ukázku lze vidět na obr. 31:



obr. 31: Pokus s vodní párou: vhánění do zadní části odstředivky



obr. 32: Pokus s vodní párou: vhnání do ventilátoru odstředivky

Po těchto nevydařených pokusech přišel ještě nápad vytvořit zdroj kouřového média pomocí sublimace suchého ledu. Tento způsob je totiž často při podobných experimentech používán.

Experiment probíhal tak, že hluboce zmražený suchý led (oxid uhličitý, CO_2) byl v termoboxu nadrcen na menší granulky, a ty byly vsypávány do velkopřůměrové nádoby. Do nádoby byla postupně nalévána horká voda, což způsobovalo rychlou sublimaci zmrazků oxidu uhličitého. Tyto plynné částice o stále ještě nízké teplotě ochlazovaly okolní vzdušnou vlhkost a ta v jejich okolí kondenzuje. Díky tomu pak dohromady vzniká jakýsi dým.

Fota z experimentu lze vidět na následujících obrázcích č. 33 - 38:



obr. 33-35: Ukázka pokusů se suchým ledem. Nahoře nasávání plynu do odstředivky přes ventilátor, dole jeho výstup



obr. 36-38: Výstup plynu z odstředivky. Lze vidět tendenci oxidu uhličitého klesat dolů

Závěr po pokusech se suchým ledem:

Použití suchého ledu jako zdroje sice ukázalo jako vhodnější zdroj vizualizačního media, než ty předchozí, ale nesplnilo to potřebné požadavky. Vytvářet dostatečné množství mlhy nebylo možné na dostatečně dlouhé časové intervaly a její množství výrazně kolísalo. Navíc se projevil fyzikální fakt, že plynný oxid uhličitý je těžší než vzduch, tudíž měla mlha tendenci klesat dolů – proudící vzduch nebyl dostatečně rychlý na to, aby tuto skutečnost eliminoval. Tuto vizualizaci nelze tedy brát za zcela objektivní. Nicméně i přesto šlo vypořádat, že v oblasti vyústění z odstředivky se proudění dýmu chovalo ne zcela klidně. Zatímco od vzdálenosti 40 - 50 cm od vyústění se proudění dýmu jevílo klidněji a jako plynulejší. Lze vyvodit, že v první fázi je proudění více nestacionární, poté se nestacionarita snižuje.

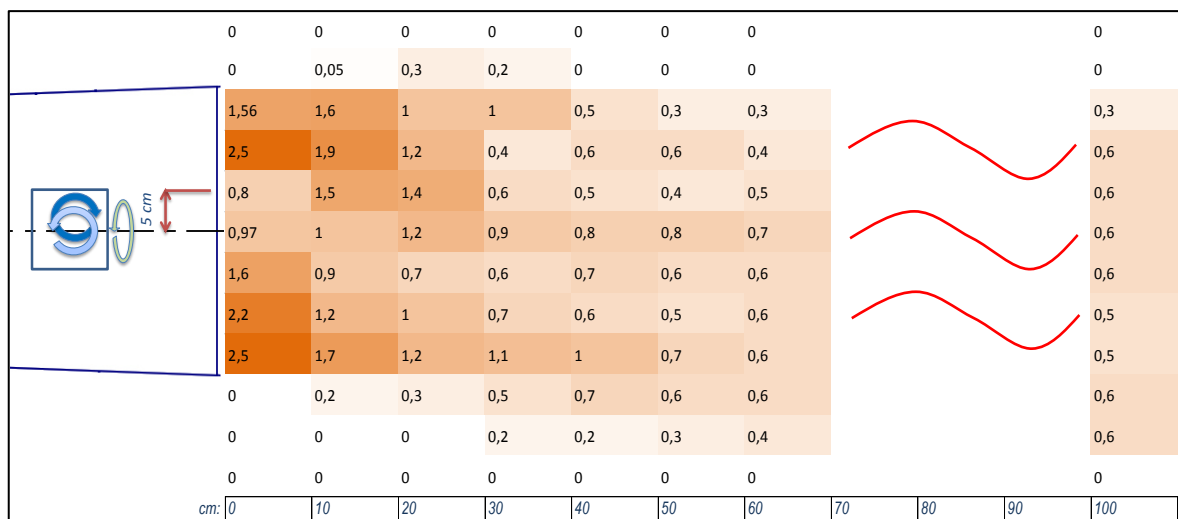
2.2.2 Měření rychlosti anemometrem

Dalším nápadem pro nějakou dostupnou analýzu proudu vzduchu bylo použít anemometr. Anemometr je zařízení, které měří rychlost proudění vzduchu. V laboratoři Katedry netkaných textilií a nanovláknenných materiálů k tomu byl k dispozici digitální anemometr, který měří rychlost proudícího vzduchu na základě ztráty/dodání tepla čidlu na sondě od proudícího vzduchu. Měření probíhala ve vodorovné ose odstředivky v předem stanovených výškách a vzdálenostech ve směru proudu vzduchu jdoucího z odstředivky, resp. ve směru výstupu pavučiny. Nutno říci, že vlivem lidského faktoru mohly být naměřené hodnoty mírně zkreslené, zejména ve větších vzdálenostech. Nicméně pro orientační zjištění jsou dostačující. Ukázkou lze vidět na obr. 39:



obr. 39: Ukázkou měření rychlostí vzduchu anemometrem

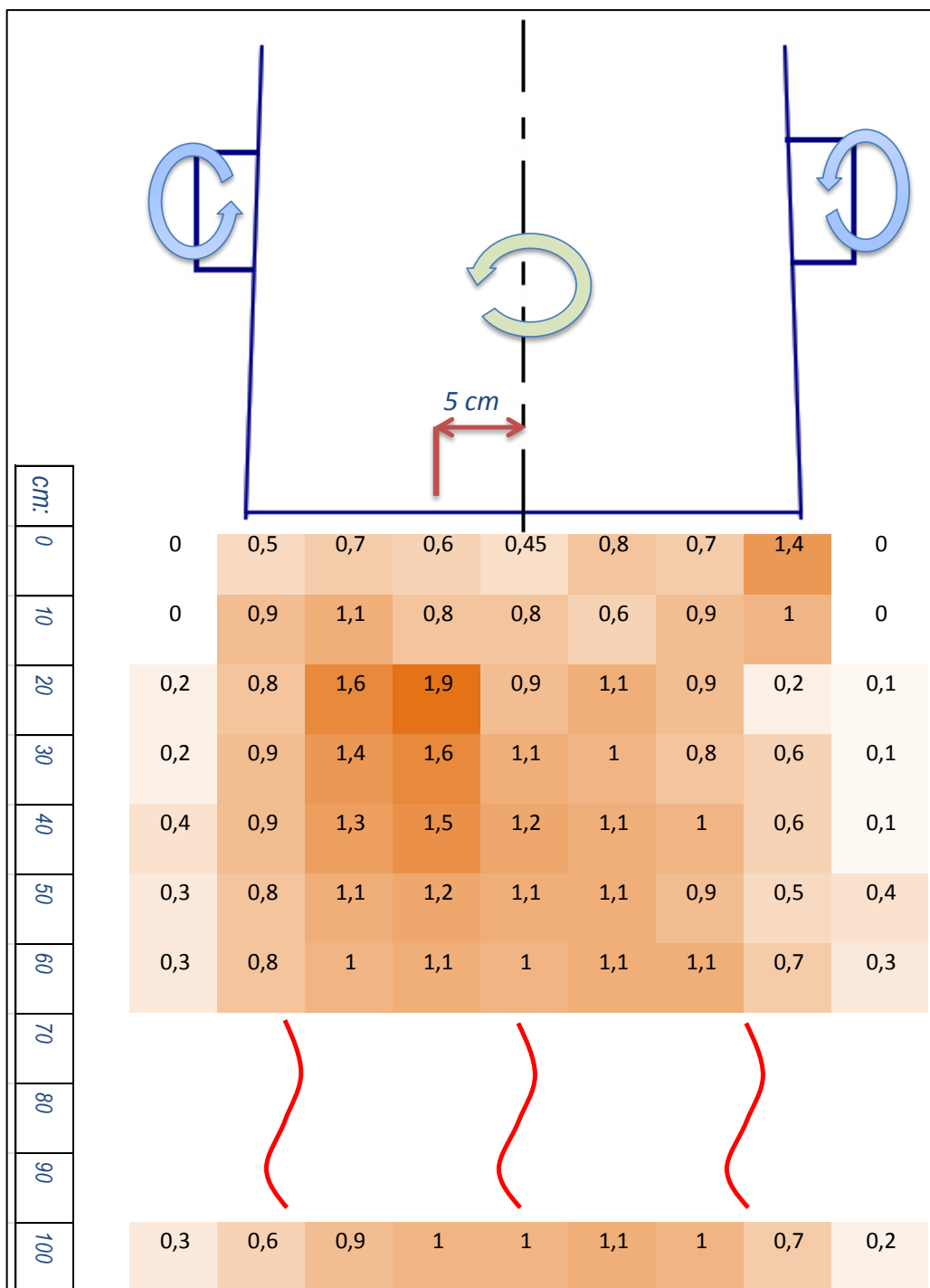
Nejprve byly měřeny rychlosti postupně ve vzdálenosti po 10 cm od vyústění krytu odstředivky, a po 5 cm ve výškách od osy rotujícího kalíšku. Rozepsáním naměřených hodnot bylo získáno jakési mapy, ve které bílá barva signalizuje oblast s nulovou rychlostí, a s rostoucí rychlostí je oblast tmavší, viz obr. 40:



obr. 40: Výsledky z měření rychlosti vzduchu před odstředivkou (pohled ze strany)

Z mapy rychlostí lze vyčíst, že nejvyšší rychlost vzduchu je u horního a spodního okraje krytu odstředivky hned za jeho vyústěním. Po asi 40 cm vzdálenosti se rychlost celkově znatelně snižuje. Více se však snižuje v ose horního okraje, méně v ose u dolního okraje, nejméně v ose rotujícího kalíšku. Lze také vyčíst, že ve vzdálenosti 30 cm a více je proudící vzduch naměřen i pod osou dolního okraje krytu. To znamená, že proud vzduchu si s rostoucí vzdáleností jaksí „sedá“ k zemi. Od vzdálenosti 60 cm až do vzdálenosti 100 cm už byly naměřené hodnoty prakticky neměnné. Z toho lze vyvodit, že ve větší vzdálenosti je proud vzduchu již ustálenější, rovnoměrnější a nedochází k velkému víření – proudění již není tolik nestacionární.

Druhé měření probíhalo opět ve střední ose odstředivky, tentokrát v horizontálním směru resp. posuvu. Výsledná pomyslná mapa lze vidět na obr. 41:



obr. 41: Výsledky z měření rychlosti vzduchu před odstředivkou (pohled shora)

Z této mapy rychlostí lze vyčíst, že nejvyšších rychlostí bylo naměřeno nikoliv hned za okrajem krytu odstředivky, jako v případě přechozího měření ve vertikální rovině, ale až ve vzdálenosti cca 30 cm. Pouze přímo u pravého okraje krytu hned u jeho vyústění byla naměřena relativně vyšší rychlost (1,4 m/s). Stejně jako v předchozím měření, i tady naměřené rychlosti od vzdálenosti asi 50 cm již téměř neměnilly.

Závěr po analýze anemometrem:

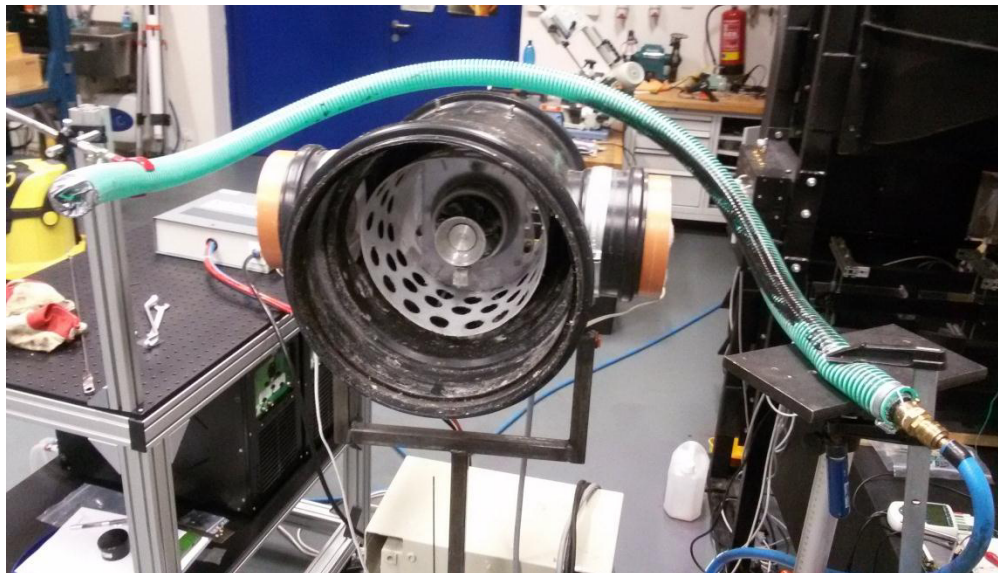
Těmito měřeními bylo zjištěno, jakých rychlostí proudění vzduchu je dosahováno v blízké vzdálenosti před odstředivkou. Ukázalo se také, že rychlosti nejsou ve všech polohách resp. pozicích stejné. Potvrdil se tím předpoklad, že díky dvěma bočním ventilátorům, které se vůči sobě otáčejí a vhánějí vzduch k odstředivce opačnými směry otáčení (naznačeno modrými šipkami), není z odstředivky po celé rovině výstupu směřován a unášen rovnoměrný, rychlostně homogenní proud vzduchu. Tuto nestacionaritu proudění ještě podporuje otáčení rotujícího kalíšku (naznačeno zelenou šipkou v obr. 40), který také vytváří jisté víření vzduchu uvnitř krytu odstředivky. Při modifikaci odstředivky či tvorbě konstrukce transportního systému bude tedy potřeba ovlivnit proud vzduchu v prvních několika desítkách centimetrů před odstředivkou. Ve větší vzdálenosti již by to nemělo takový smysl.

2.2.3 Použití laboratoře na CxI – PIV analýza

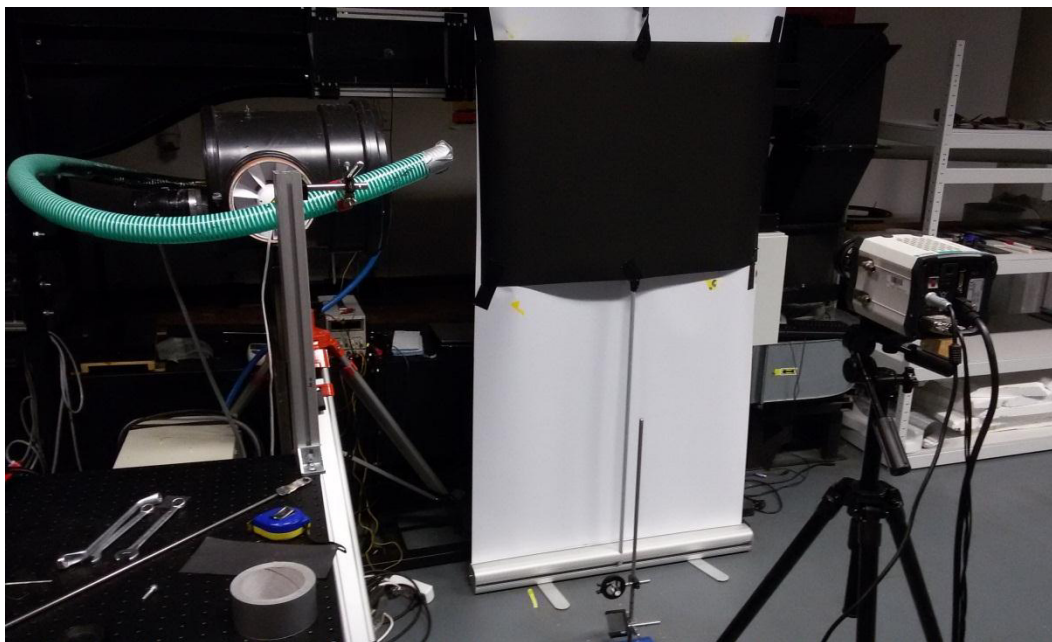
V plánu nakonec bylo také použít k tomu jednu z laboratoří Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace (CxI), spadající pod Technickou univerzitu Liberec. Konkrétně se mělo jednat o Laboratoř mechaniky tekutin, a byla plánována spolupráce s Ing. Darinou Jašíkovou, Ph.D.. Tato laboratoř disponuje technikou pro experimentální sledování mechaniky tekutin s důrazem na nestacionární i vícefázové proudění. Pro náš konkrétní případ bylo vybráno zanalyzování proudu vzduchu pomocí metody PIV (particle image velocimetry), viz kapitola 1.8.2 .

Náš přístroj byl tedy přemístěn do příslušné laboratoře k provedení pokusů. Bylo třeba upravit podmínky a sestavení pro optimální získání výsledků. Okolo ventilátorů odstředivky byla umístěna perforovaná trubice, do které byly vháněny částičky horkého olivového oleje. Tyto částičky byly přes ventilátory nasávány do celkového proudění uvnitř odstředivky, a tím tak tvořily pozorovanou heterogenní složku námi zkoumaného proudění. V prostoru před odstředivkou byl umístěn zdroj laserového záření a zrcátko s válcovou čočkou. Ty zajišťovala usměrnění a následně rozptýlení laserového paprsku do osvětlující roviny. Osvětlující rovina byla snímána speciální, na stojanu umístěnou kamerou, která pořizovala snímky proudícího vzduchu a částic v něm. Kamera byla vzdálena 100 cm od střední osy odstředivky. Naproti kameře

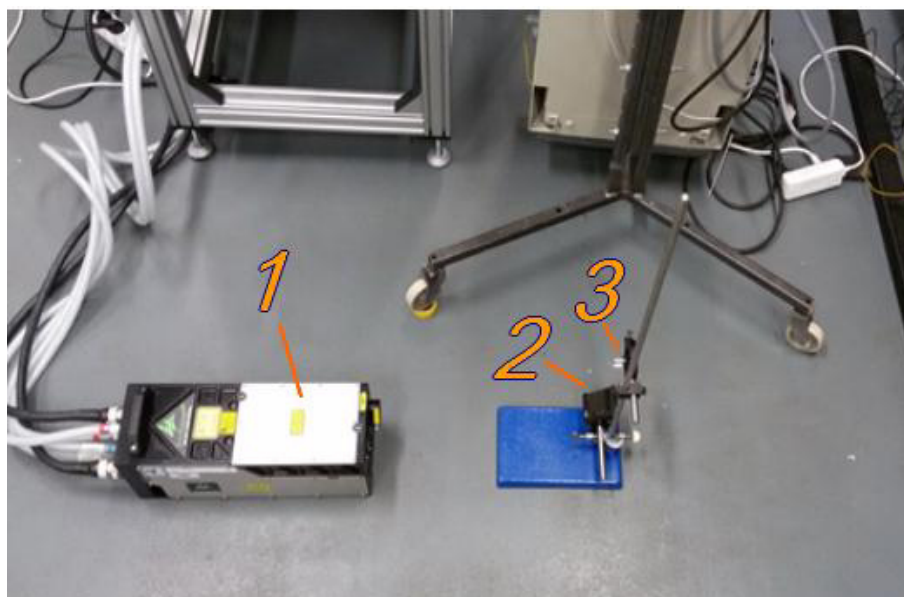
byla postavena černá plachta, která poskytovala vhodné kontrastní prostředí pro získávání snímků. Snímky byly ukládány z kamery do disku počítače. Fota z experimentu a jeho přípravy lze vidět na následujících obrázcích č. 42 - 45:



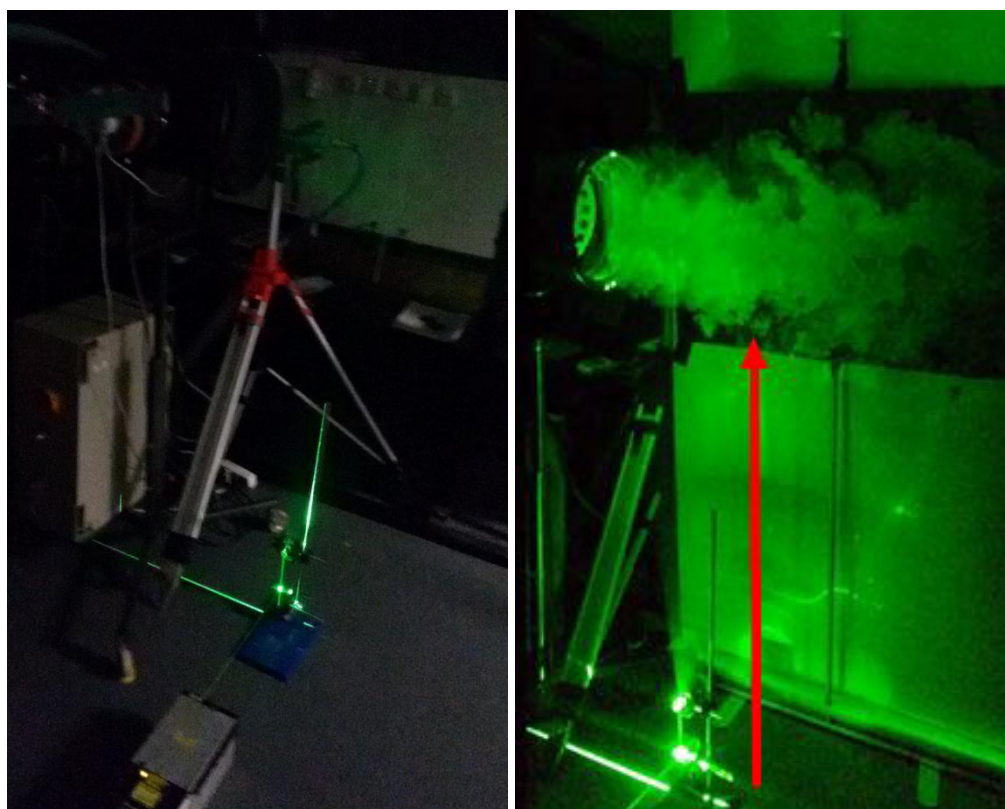
obr. 42: Perforovaná trubice okolo odstředivky, do níž byly vhnány částice doutnajícího olivového oleje



obr. 43: Kamera snímající prostor před odstředivkou. Naproti kameře kontrastní černá plachta



obr. 44: Zdroj laserového záření (1) směřuje na zrcátko (2), odkud je přes válcovou čočku (3) vytvářena osvětlující rovina



obr. 45: *Vlevo*: Usměrněné laserové záření (viz předchozí obrázek);
Vpravo: Pozorované proudění vzduchu a částic olivového oleje v osvětlující rovině

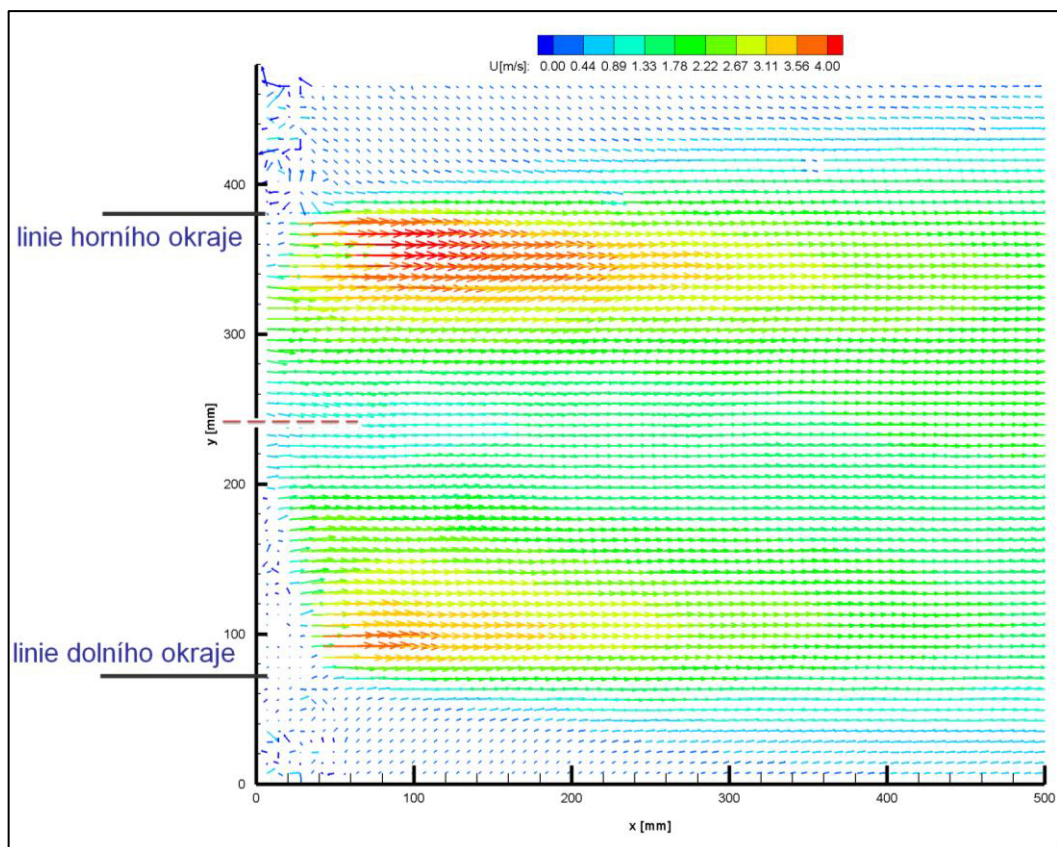
Zkoumány byly postupně 2 oblasti. Nejprve byla v osvětlující rovině pozorována oblast zasahující výstup vzduchu z odstředivky až do vzdálenosti cca 45 – 50 cm. Druhá pozorovaná oblast se pak po posunutí odstředivky nacházela ve vzdálenosti cca 40 – 90 cm před odstředivkou. Obě oblasti na sebe tedy plynule navazovaly. Měření probíhala za podmínek: tlak 971 hPa, teplota vzduchu 24 °C, relativní vlhkost 50%.

Z provedeného měření byly získány série snímků. Snímky se zachycenými pohybujícími se částicemi musely být přes specifický algoritmus postupně graficky upravovány do takové podoby, aby z nich šla jako výstupy získat potřebná data. Pro nás byly výstupem dvě různé charakteristiky:

- absolutní podélné rychlosti proudění vzduchu v oblastech 200 a 700 mm před odstředivkou ve vertikální rovině
- statisticky zpracované vektorové mapy znázorňující proudění vzduchu (ve stejném měřítku).

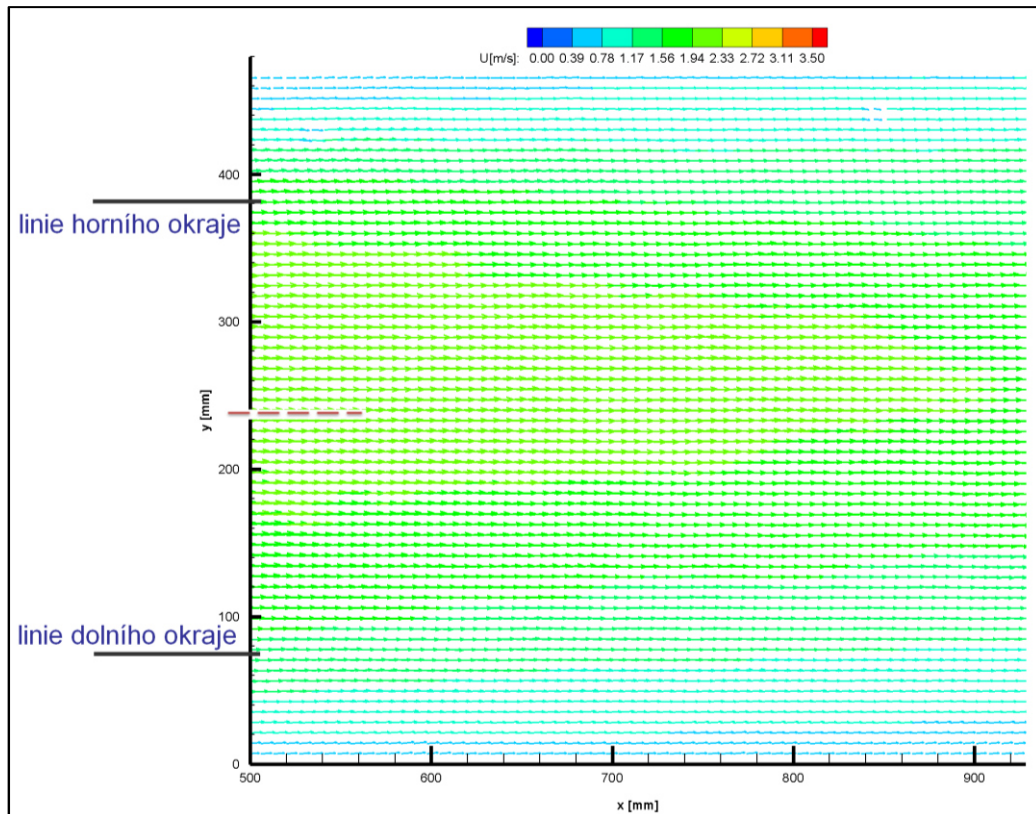
Výstupy ve formě grafických vektorových map lze vidět na obr. 46 a 47. Vodorovná osa znázorňuje vzdálenost od vyústění krytu odstředivky [mm], svislá osa pak výškovou pozici v osvětlující rovině [mm] - přičemž linie dolního a horního okraje odstředivky je ve výšce cca 70 a 380 mm (znázorněno čarami na svislé ose). Pro lepší viditelnost jsou oblasti rozděleny do dvou samostatných obrázků a nejsou spojeny do jednoho.

Grafy popisující absolutní podélné rychlosti ve dvou určených vzdálenostech lze pak vidět na obr. 48 a 49.



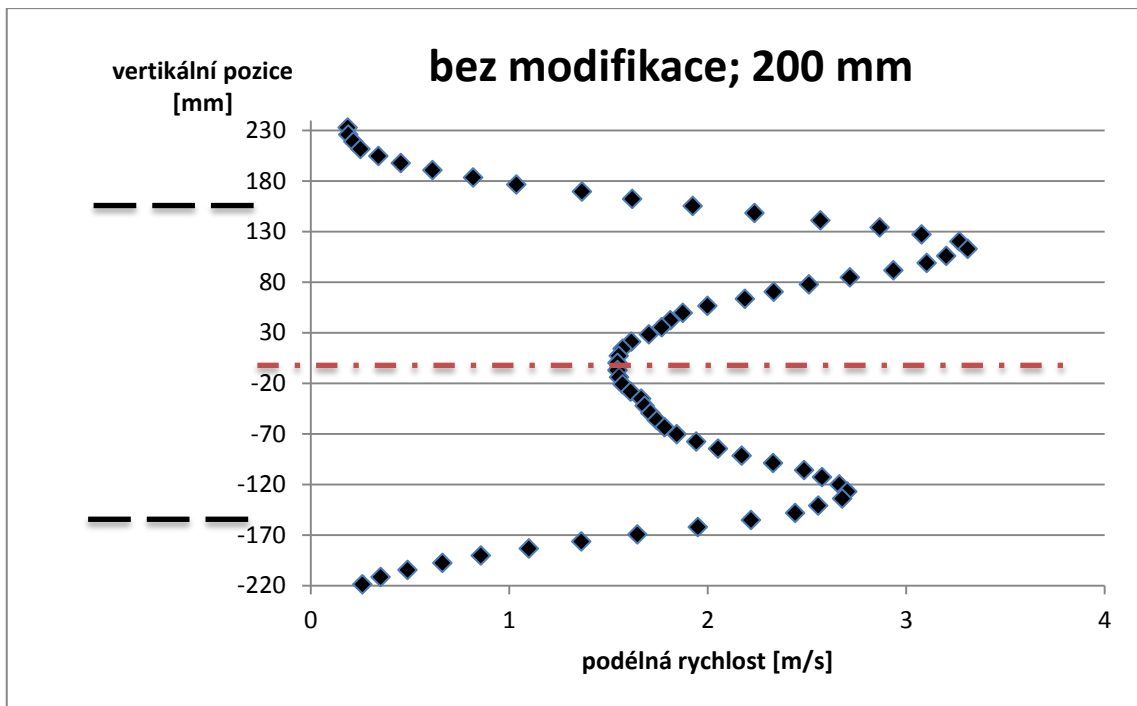
obr. 46: Statisticky zpracovaná vektorová mapa proudění vzduchu v oblasti do 500 mm před odstředivkou

Z vektorové mapy 1. oblasti lze vyčíst, že se tvoří vírové struktury u okraje krytu odstředivky, s nejvyššími rychlostmi proudění odhadem až okolo 4 m/s. Naopak v oblastech okolo středu odstředivky jsou rychlosti značně nižší, odhadem mezi 1 - 2 m/s. Proudění jdoucí z odstředivky tedy vykazuje známky určité nestacionarity. Od vzdálenosti 400 mm od vyústění krytu odstředivky se pak rychlosti po celém obvodu poměrně vyrovnávají a dosahují rychlosti mezi 1,5 - 2 m/s. Proudění se v této vzdálenosti zdá již o něco rovnoměrnější.

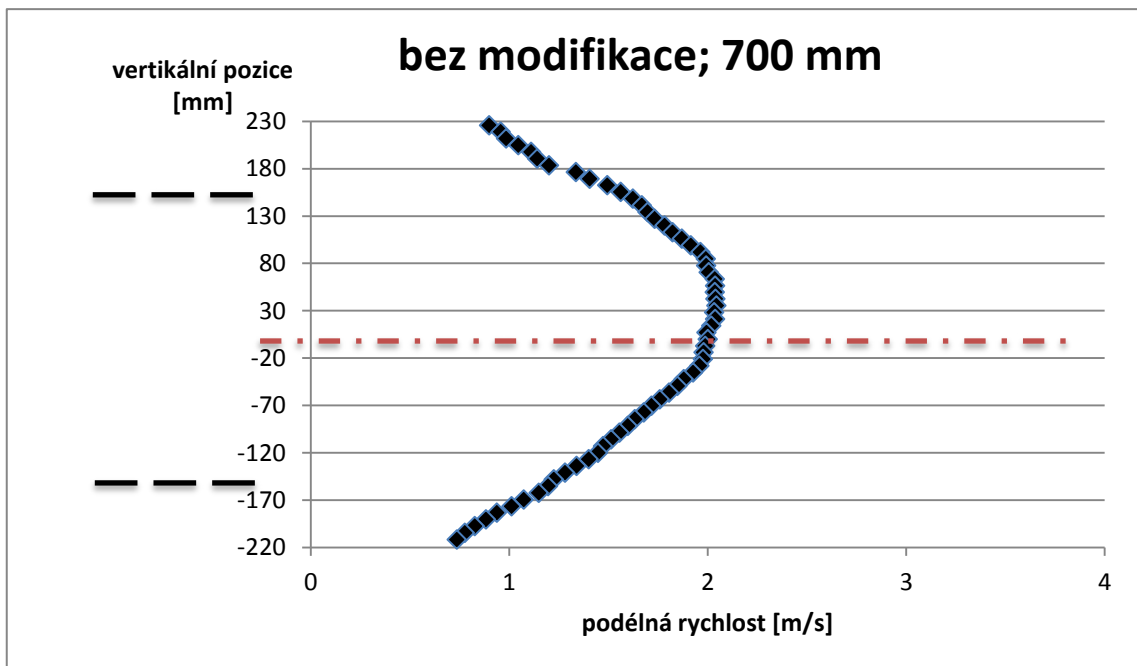


obr. 47: Zobrazení vektorových statistik proudnic v oblasti od 400 do 900 mm před odstředivkou

Z vektorové mapy 2. pozorované oblasti (obr. 47) lze znovu vyčíst to, že od vzdálenosti 40 cm od vyústění krytu odstředivky je proudění vzduchu rovnoměrnější, s rychlostmi odhadem 1 až 2 m/s. Vyšší lze najít uprostřed okolo osy, okolo linií okrajů jsou pak nižší. Tato tendence se nemění do vzdálenosti minimálně 900 mm. V této oblasti je tedy již proudění více stacionární.



obr. 48: Podélné rychlosti proudu vzduchu 200 mm před odstředivkou



obr. 49: Podélné rychlosti proudu vzduchu 700 mm před odstředivkou

Průřez rychlostí ve vzdálenosti 200 mm od vyústění okraje odstředivky vykazuje již výše zmíněnou určitou nestacionaritu proudění. Rychlost vzduchu pod linií horního okraje dosahuje hodnot okolo 3,5 m/s, u spodního okraje pak necelé 3 m/s. Podél osy jsou pak rychlosti nižší, v hodnotách 1,5 – 2 m/s.

Rychlostní profil se ve vzdálenosti 700 mm od vyústění odstředivky změnil (obr. 49). Nejvyšších rychlostí bylo naměřeno okolo osy odstředivky – okolo 2 m/s, směrem k linii horního i spodního okraje se postupně plynule snižují až k 1 m/s. Nestacionarita je již o něco nižší oproti vzdálenosti 200 mm.

Výsledky z PIV analýzy tedy poměrně potvrzují a dokládají poznatky získané z měření anemometrem a pokusů se zdrojem kouře, tedy že v odstředivce je vytvářena poměrně nestacionární proudění s vířivými strukturami. Všechny tyto získané poznatky budou dále sloužit při pokusu o návrh nástavce či modifikace odstředivky pro odvod vznikajících vláken. V potaz musí brán ten fakt, že PIV analýzou měřena byla pouze rovina kopírující vertikální osu odstředivky, což může mít za následek jisté zkreslení výsledků a zároveň jejich ne zcela objektivitu.

2.3 Návrh modifikace

Výsledným cílem této diplomové práce je pokusit se vytvořit nějaký nástavec, konstrukci, nebo modifikaci pro odvod unášených vláken vzniklých v odstředivce. Tento nástavec má za úkol zefektivnit účinek proudu vzduchu, který unáší vlákna, tak, aby bylo možné je směřovat na nějaký zachytávací kolektor ve vhodnější vlákně formě, než doposud. Navrhované řešení v podobě nástavce či modifikace má zároveň být rychle smontovatelné a demontovatelné kvůli nutnosti odstředivku často čistit od nevlákněného polymerního roztoku a ulpěných vláken. Důležitou podmínkou je také to, aby řešení bylo levné.

V případě, že se vhodné řešení nenajde, mají být dány podněty a návrhy k tomu, co by se případně mělo změnit při sestavování novější verze odstředivky.

Vzhledem k výsledkům předchozích měření, a vzhledem k přibývajícimu zachytávání vznikajících vláken k okolním krytům odstředivky, byla snaha proud vzduchu:

- a) usměrnit a zrychlit ho průchodem užším potrubím dle principu Bernoulliho rovnice (viz kapitola Proudění tekutin), aby rychlejší proud vzduchu efektivněji strhával vlákna směrem dopředu ven z odstředivky,
- b) nebo v něm již v okolí spinnerety způsobit víření, které by vzniklá vlákna zakrucovalo do užšího útvaru – jakési vlečky vzdáleně připomínající přízi, a které by rovněž omezilo přichytávání vláken ke krytu a zlepšilo odvod vlákenné vlečky.

Nebyla, bohužel, k nalezení nějaká inspirace, podle které by se dalo řídit a vymýšlet vhodné řešení. Žádné aerodynamické systémy totiž neberou v potaz rovněž odvod vláken v proudícím vzduchu, což tedy konstrukci značně ztěžují. Navíc tyto systémy – např. difuzory, větrací systémy, apod., koneckonců i technologie meltblown či spunbond, pracují s rychlostmi vzduchu řádově vyššími, než se vyskytují ve zkoumané odstředivce. Chování vláken v proudu vzduchu je navíc velmi složitý a těžko popsitelný aerodynamický proces, o kterém je provedeno velmi málo výzkumů a vědeckých zpráv.

2.3.1 Nástavec z části barelu

Jedním z nápadů bylo vytvořit jakýsi kuželovitý nástavec. Ten byl vytvořen z konstrukce dvacetilitrového, potravinářského barelu z vysokopevnostního polyethylenu, jehož podstava a válcová část měla průměr 300 mm, průměr hrdla byl 150 mm a výška činila 440 mm. Barelu byla odříznuta dolní podstava a madla. Takto vytvořený kuželovitý nástavec svými rozměry velmi dobře pasoval do krytu odstředivky. Nástavec byl ještě měkkým drátem zachycen k odstředivce za zbylá ucha po odebraných madlech. Viz obr. 50 - 52.



obr. 50 a 51: Vlevo: Původní barel před úpravou; vpravo: Odřezání podstavy barelu



obr. 52: Barel bez podstavy nasunutý do krytu odstředivky

Bohužel, ukázalo se, že takto vytvořený nástavec má až příliš strmý přechod a příliš malý koncový průměr, jelikož se nedařilo příliš dobře zvlákňovat a odvádět vlákna směrem ven. Tok vzduchu uvnitř barelu tedy nebyl ideální – pravděpodobně byla část proudu vzduchu kvůli strmému přechodu koncové části vracena zpět a tvořila se jakási smyčka.

V důsledku tohoto zjištění byl nástavec z barelu znovu upraven. Proběhlo odřezání asi 15 cm dolní válcové části barelu, a odříznutí hrdlové části, čímž se zvýšil koncový průměr výstupní části na 190 mm. Viz obr. 53:



obr. 53: Úprava barelu s výstupním otvorem o průměru 190 mm

Po této úpravě bylo vidět mírné zlepšení procesu zvlákňování, nicméně oproti zvlákňování bez barelu bylo subjektivně vidět stále spíše zhoršení procesu.

Následovalo tedy ještě další odříznutí a zvětšení koncového průměru, nyní na 228 mm. Oproti vstupnímu průměru 300 mm to tedy bylo tak výrazné zúžení.

Tato úprava vedla k tomu, že vlákna střídavě krátce vylétávala jako příze, krátce zas nevlétávala vůbec.

2.3.2 Použití kartonových lopatek

Dalším nápadem bylo použít nějaké lopatky, které by proud vzduchu uvnitř odstředivky roztočily, a vláknům tím udělovaly zákrut a zároveň omezily přichytávání na okolní kryt. Jako vhodný materiál byl tedy zvolen tenký, pevný karton, z něhož byly vystříženy 4 destičky o rozměru asi 30 x 45 mm. Ty byly rovnoměrně rozmístěny ve vnitřním mezikruží krytu odstředivky.

Při pokusu byly lopatky pootočený vůči ose odstředivky o úhel 15 - 20°, ve směru otáčení rotující příruby. Viz obr. 54:



obr. 54: 4 kartonové lopatky uvnitř krytu odstředivky

Při této modifikaci se tvořila poměrně souvislá vlákenná vlečka, a bylo poznat její roztočení a tím i zakrucování. Nicméně vlákenná vlečka se tvořila jen z části polymerního roztoku, a odlétávala jen k jedné straně (vlevo ve směru proudění), nikoliv rovně dopředu, což není žádoucí jev.

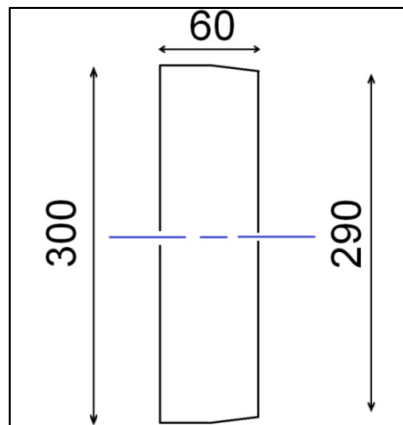
Tento jev byl však zřejmě způsoben tím, že při tomto pokusu byl použit polymerní roztok, jenž v laboratoři ležel už dlouhou dobu. Pokus byl tedy opakován s nově připraveným roztokem.

Při dalším pokusu s čerstvým polymerním roztokem již nastala větší efektivita zvlákňování, a odlétávání vlákenné vlečky k jedné straně bylo znatelně menší. Roztočení proudu vzduchu by tedy mohla být cesta, kudy směřovat vývoj nástavce či modifikace.

2.3.3 Límecový nástavec

Jako další varianta modifikace bylo použití tvrdého papíru, ze kterého se udělal jakýsi límec. Ten měl za úkol mírně zužovat výstupní průměr krytu odstředivky a tím částečně usměrňovat a zrychlovat proudění. Šířka límce činila 60 mm. Průměr na jedné straně odpovídal průměr v krytu odstředivky, měl tedy 300 mm. Průměr na straně, která vystupovala z odstředivky, činil 290 mm. Po obvodu límce byly ještě rovnoměrně

provedeny stříhy, aby se mohl lépe tvarovat a držet požadovaný tvar. Límec a jeho schéma lze vidět na obr. 55 a 56:



obr. 55: Rozměry límce.



obr. 56: Límec v krytu odstředivky

Použití tohoto límce mělo za následek tvorbu subjektivně o něco kompaktnější vlákné vlečky, než bez jeho použití. Tato modifikace lze tedy teoreticky hodnotit také jako možný směr, kterým by se mohly vést další kroky.

2.3.4 Použití barelu a límce najednou

Vyzkoušeno bylo také použití barelu před jeho ořezáním, tedy jen s oddělanou podstavou, a současným nasazením kartonového límce na kryt odstředivky.

Při této modifikaci se sice dařilo dobře zvlákňovat z polymerního roztoku, nicméně vlákna se formovala do provazců či pavučiny, která se neodtrhávala z okolí rotující příruby. Při nastavení nižších otáček otáčení příruby zlepšení nenastalo. Tudíž tato modifikace se jako vhodná nejeví.

2.3.5 Použití límce a lopatek najednou

Vyzkoušeno bylo také současné použití límcového nástavce a kartonových lopatek.

Při této kombinaci se dařilo chvílemi zvlákňovat dobře a vznikala subjektivně kompaktnější vlákenná příze, než bez použití této modifikace., chvílemi však se vlákenná vlečka zachytávala o okolní bílý kryt a neodlétávala dopředu. Zachycená pavučina se zachytávala na jiných místech, než u jiných modifikací.

Všechny tyto pokusy a jejich vlivy byly hodnoceny subjektivně. Pro objektivní posouzení vlivu modifikací či nástavce na proud vzduchu byly tyto pokusy podrobeny znovu PIV analýze. Její výsledky budou popsány v další kapitole.

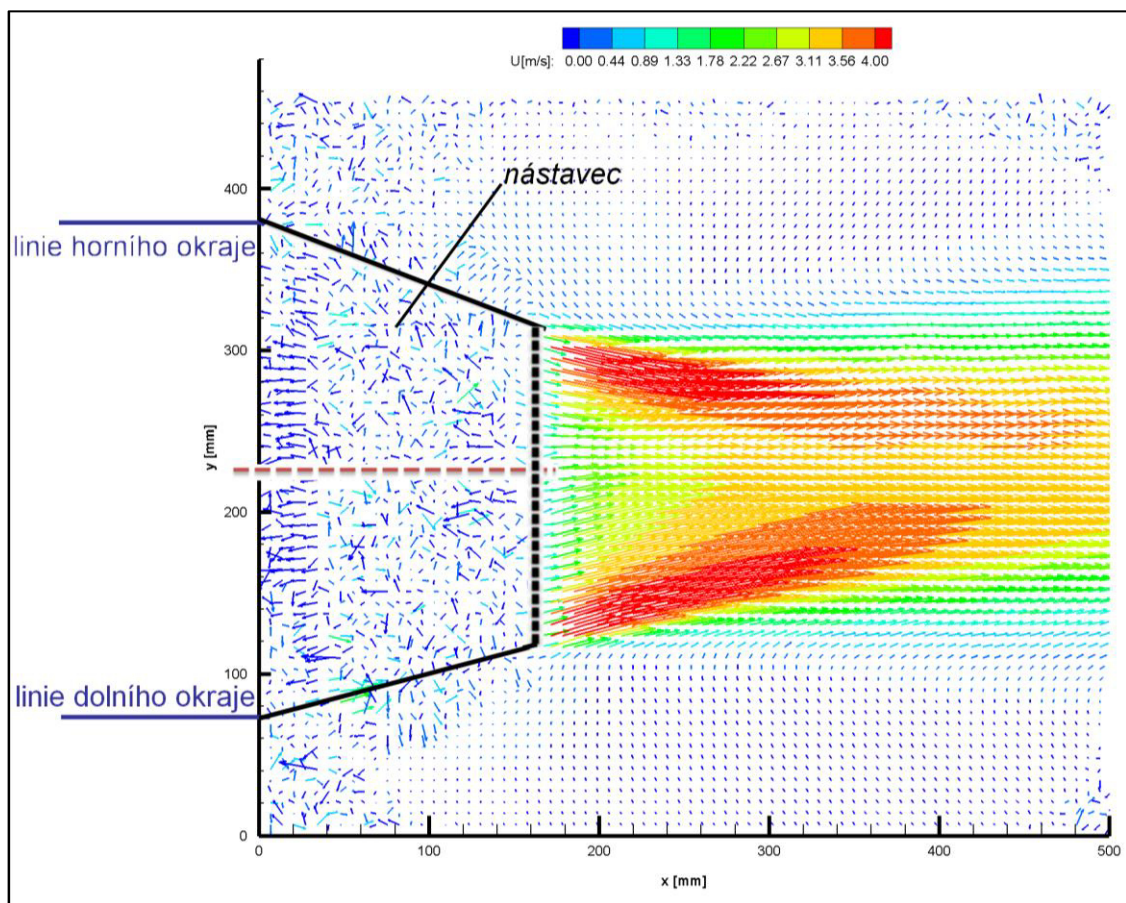
2.4 PIV analýza zkoušených modifikací

Zkoušené modifikace na odstředivce byly tedy stejně jako samotná odstředivka podrobeny PIV analýze. Měření a získávání výstupů probíhalo velmi obdobně, jejich postup lze najít již v kap. 2.2.3. Získány byly opět dvě charakteristiky, tedy:

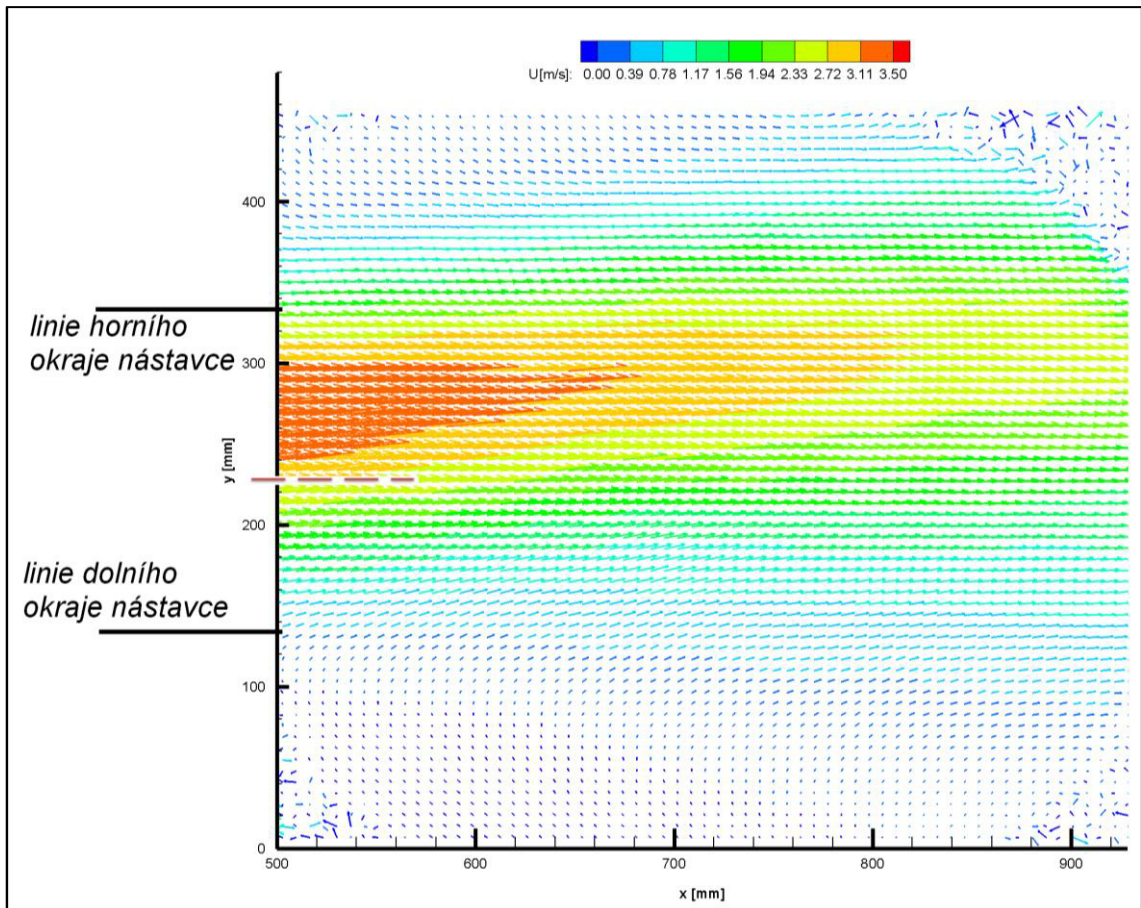
- absolutní podélné rychlosti proudění vzduchu v oblastech 200 a 700 mm před odstředivkou ve vertikální rovině
- statisticky zpracované vektorové mapy znázorňující proudění vzduchu (ve stejném měřítku, s různě širokými barevnými škálami).

2.4.1 Nástavec z části barelu

Vektorové mapy lze vidět na obr. 57 a 58, rychlosti vzduchu pak na obr. 59 a 60:

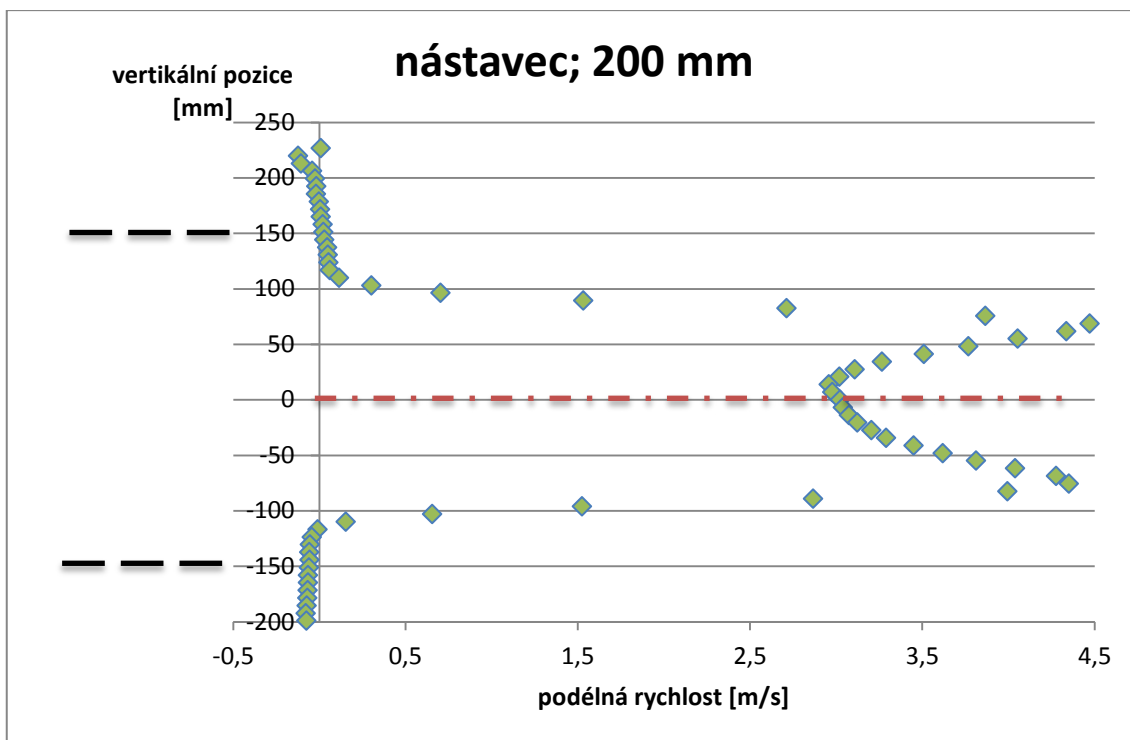


obr. 57: Statisticky zpracovaná vektorová mapa proudění vzduchu v oblasti do 500 mm před odstředivkou s nástavcem

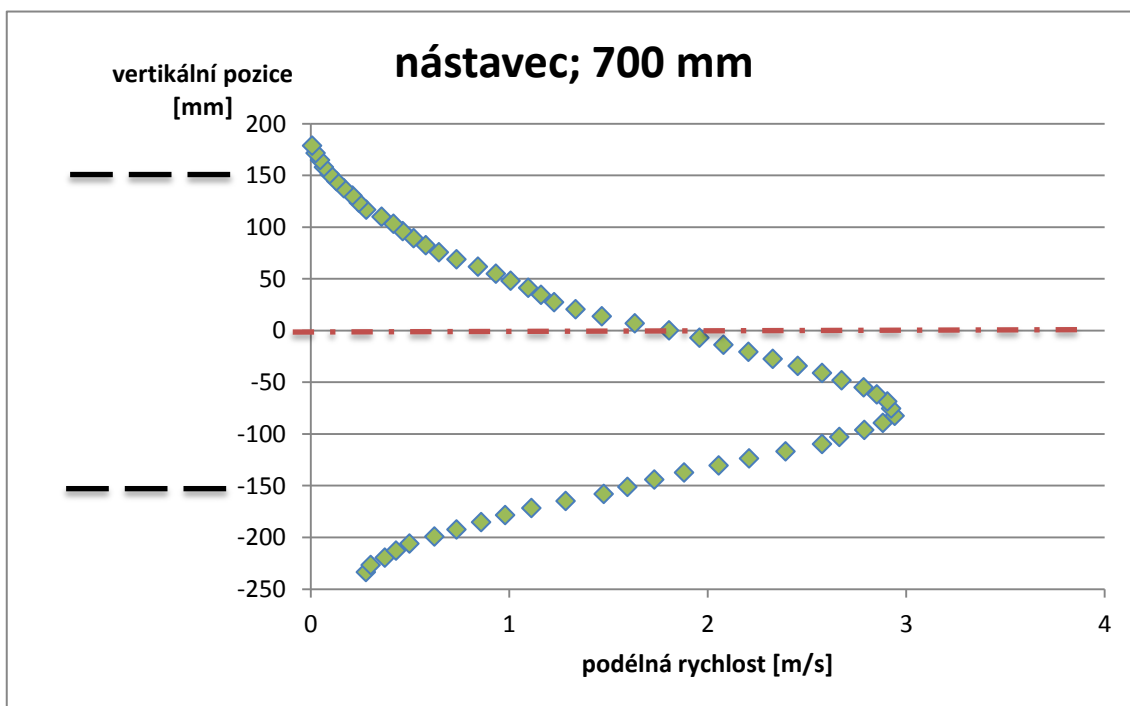


obr. 58: Statisticky zpracovaná vektorová mapa proudění vzduchu v oblasti 500 - 900 mm před odstředivkou s nástavcem

Z těchto vektorových map lze vyčíst, že zešíkmení nástavce a zúžení výstupu způsobilo dle znění Bernoulliho rovnice zvýšení rychlostí vzduchu proudícího po stěnách nástavce, a to na hodnoty přes 4 m/s. Okolo osy odstředivky/nástavce jsou hodnoty rychlostí zprvu nižší, do 2 m/s. Ve vzdálenosti okolo 250 mm však dojde k rozvíření rychlejšími proudy vycházejících z okrajů nástavce, a rychlosti okolo osy pak dosahují 3 – 3,5 m/s. Ve vzdálenosti od 500 mm dále jde vyzorovat, že v horní části nad osou odstředivky je proud vzduchu značně vyšší (až 3,5 m/s), než je tomu v dolní polovině, kde dosahuje rychlostí do 1,5 m/s. Tato nesouměrnost a vychýlení od osy však může být způsobena nestacionaritou proudění, a také nedokonalostí vytvářeného proudění.



obr. 59: Podélné rychlosti proudu vzduchu 200 mm před odstředivkou s nástavcem



obr. 60: Podélné rychlosti proudu vzduchu 700 mm před odstředivkou s nástavcem

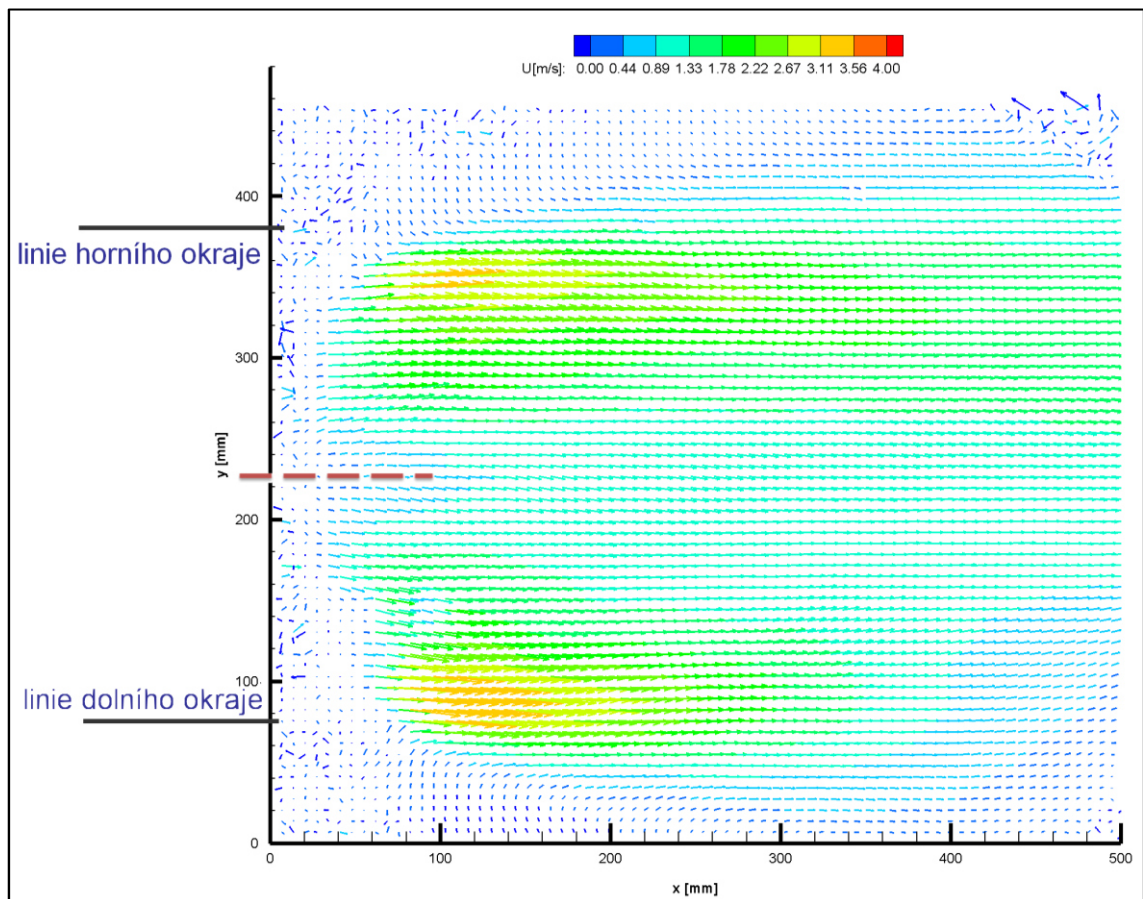
Ve vzdálenosti 200 mm před odstředivkou s nasazeným nástavcem jsou hodnoty rychlostí vzduchu nejvyšší okolo osy odstředivky, dosahují až 3 m/s. Záporné hodnoty

jsou způsobeny nedostatkem světla na hranici s nástavcem, nebo špatně nastaveným laserem – dají se brát za irelevantní.

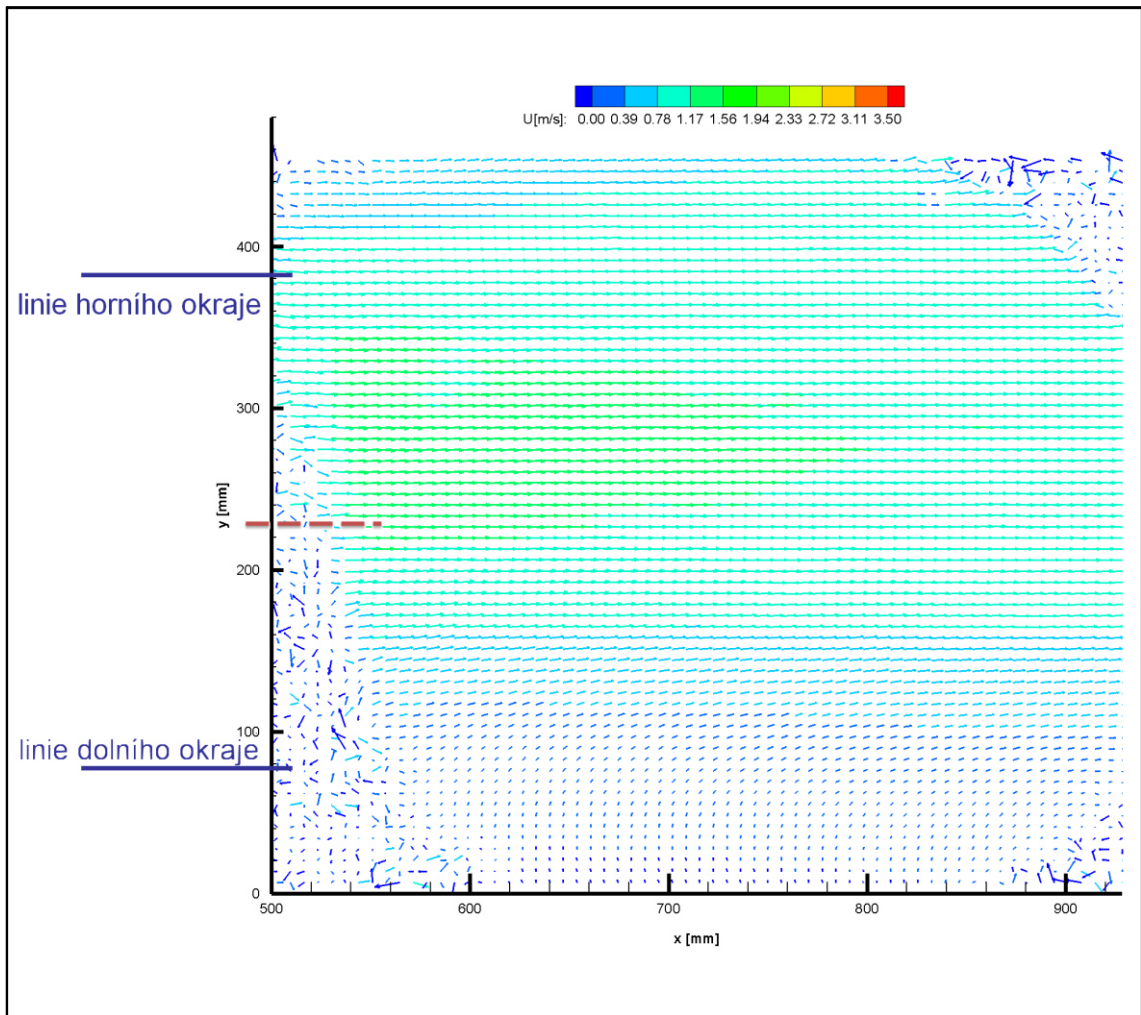
Ve vzdálenosti 700 mm však je oproti vektorové mapě vidět opačný trend pro horní a spodní polovinu vůči ose odstředivky. Ve spodní polovině byly zjištěny rychlosti vzduchu okolo 3 m/s, v horní polovině pak do 1 m/s. Tato nesrovnalost byla zřejmě způsobena nedokonalostí vytvářeného proudění a jeho nestacionární charakteristikou.

2.4.2 Použití kartonových lopatek

Výstupy měření lze vidět na obr. 61 – 64:

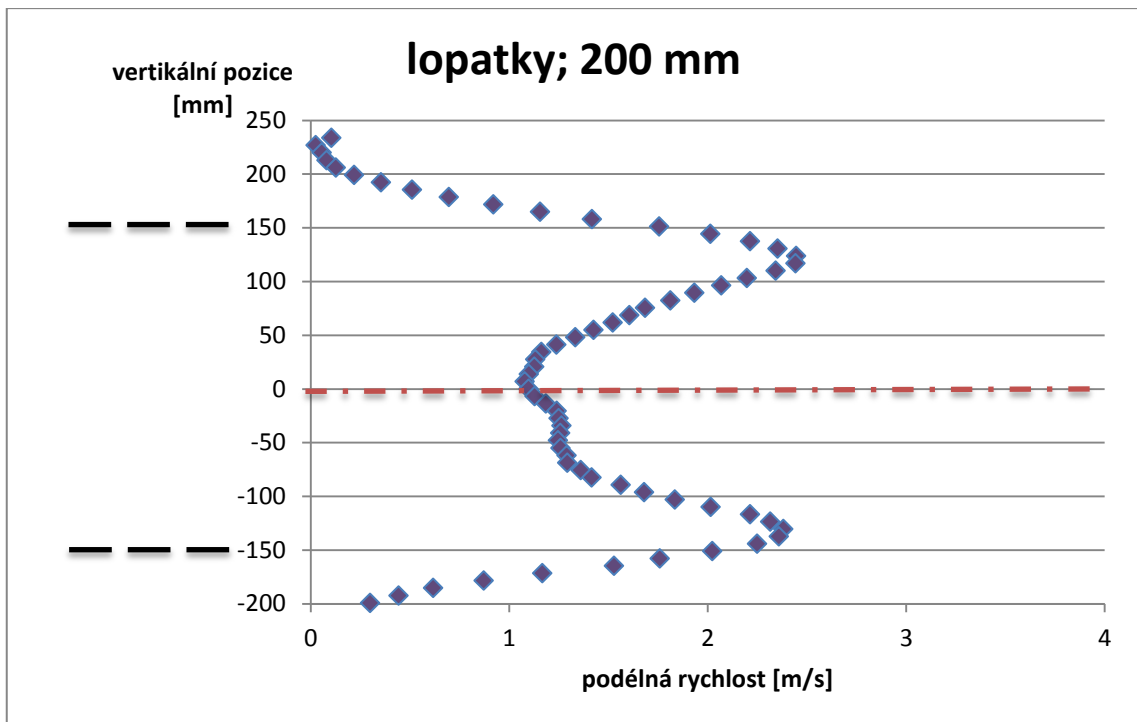


obr. 61: Statisticky zpracovaná vektorová mapa proudění vzduchu v oblasti do 500 mm před odstředivkou s lopatkami

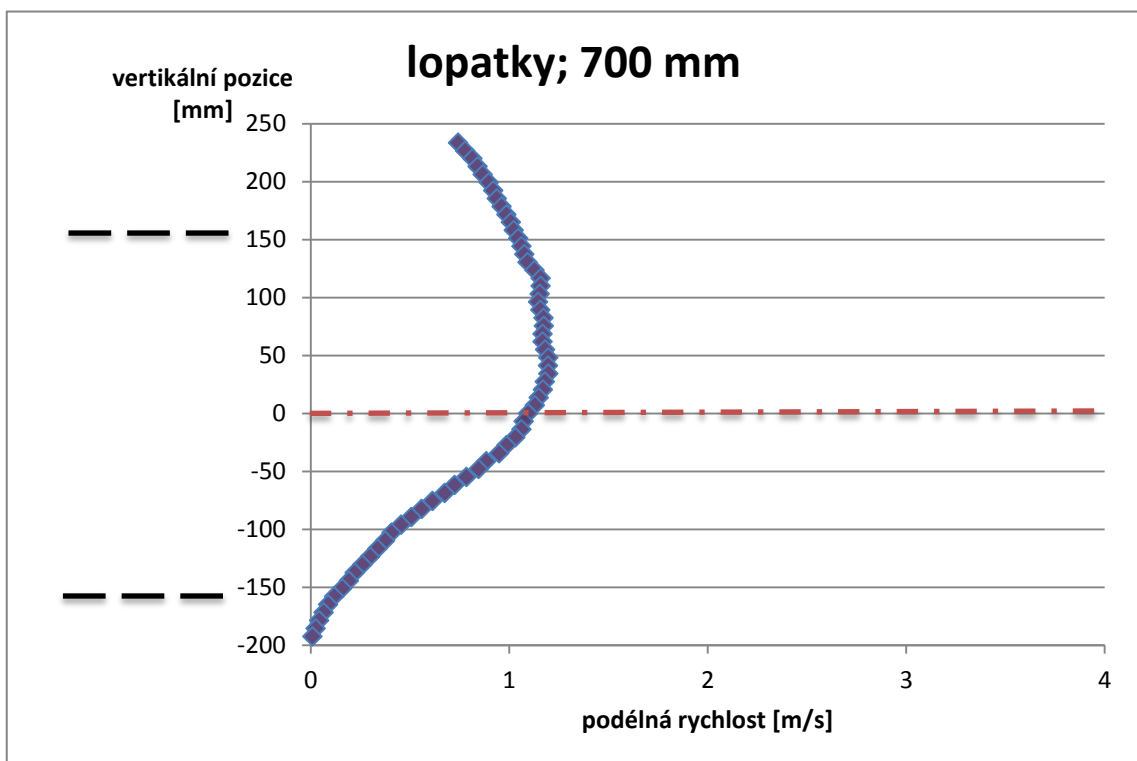


obr. 62: Statisticky zpracovaná vektorová mapa proudění vzduchu v oblasti 500 - 900 mm před odstředivkou s lopatkami

Oproti mapám při použití samotného nástavce či límce lze vyčíst, že při použití lopatek je proud vzduch celkově zpomalen a nejsou viděny výrazné vířivé struktury a oblasti s vyššími rychlostmi. U linií okrajů jsou rychlosti vyšší, než okolo osy. Po výstupu z odstředivky směřují vektory proudu i pod linii spodního okraje odstředivky, proud vzduchu je tedy zřejmě roztočen, nebo byl prostor špatně osvětlen. V oblasti od 500 mm dále je vzduch pak naopak pozorován nad linií horního okraje, což bylo způsobeno nestacionárním charakterem proudění nebo špatným osvětlením prostoru. V horní polovině nad osou jsou rychlosti o něco vyšší, než v dolní polovině. Rychlosti proudu při této modifikaci jsou celkově nižší a rovnoměrnější.



obr. 63: Podélné rychlosti proudu vzduchu 200 mm před odstředivkou s lopatkami

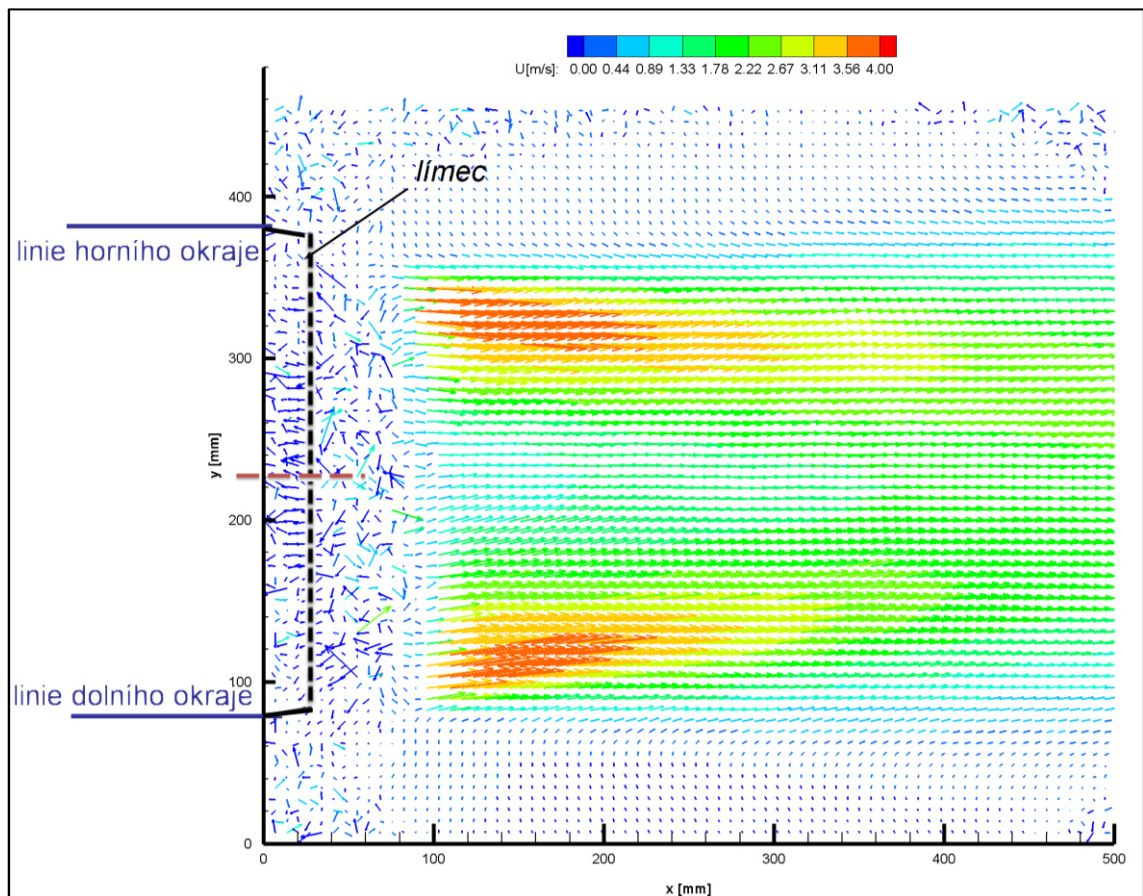


obr. 64: Podélné rychlosti proudu vzduchu 700 mm před odstředivkou s lopatkami

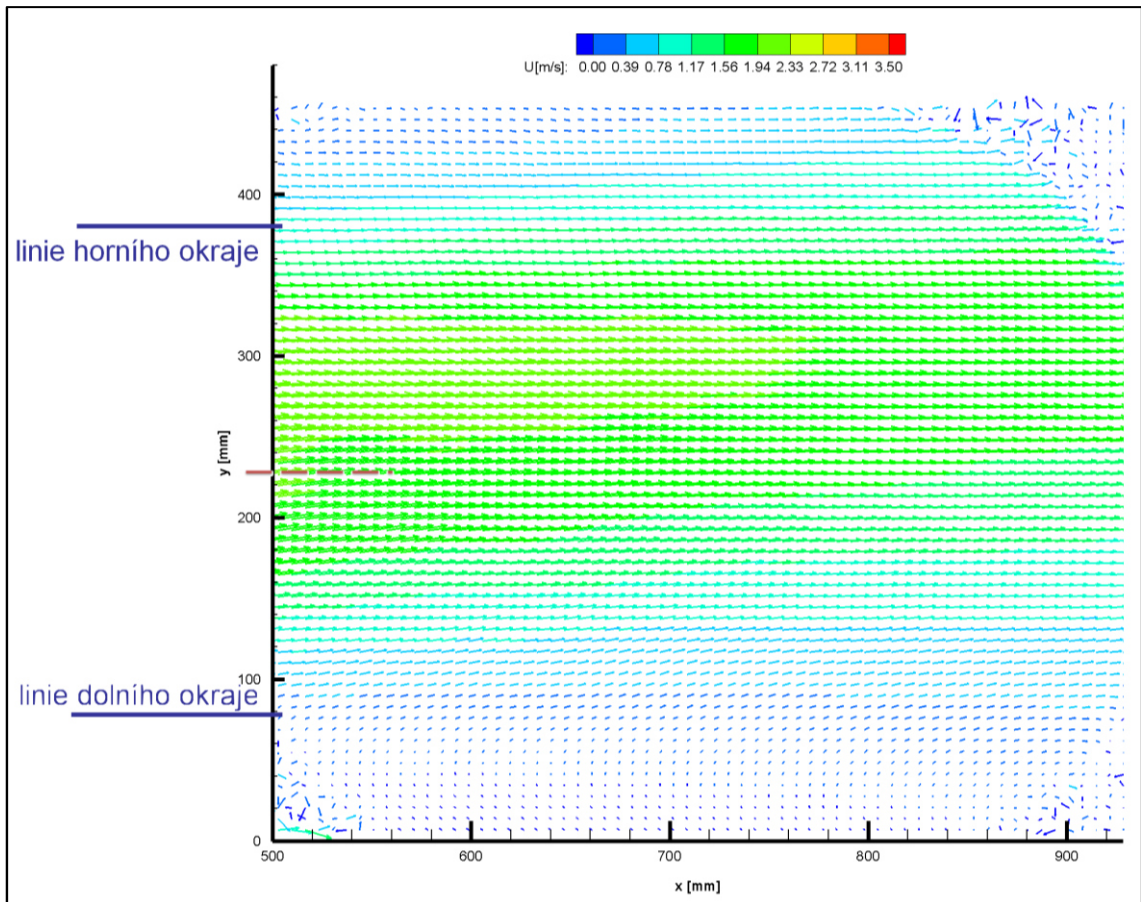
Hodnoty rychlostí vzduchu v obou zkoumaných vzdálenostech mají relativně podobný trend, jako bez použití jakékoliv modifikace. Rychlosti jsou však nižší s menšími rozdíly. Ve vzdálenosti 200 mm od odstředivky jsou v blízkosti linií okrajů rychlosti v hodnotách 2 – 2,5 m/s, okolo osy pak do 1,5 m/s. Ve vzdálenosti 700 mm se pak profil změní a rychlosti jsou vyšší okolo osy – přes 1 m/s, u linií okrajů jsou pak nižší. U horního okraje jsou vyšší, než u dolního. I to může naznačovat roztočení proudu vzduchu. Nelze to tvrdit s jistotou z důvodu absence měření v ose z.

2.4.3 Lícový nástavec

Výstupy měření lze vidět na obr. 65 – 68:

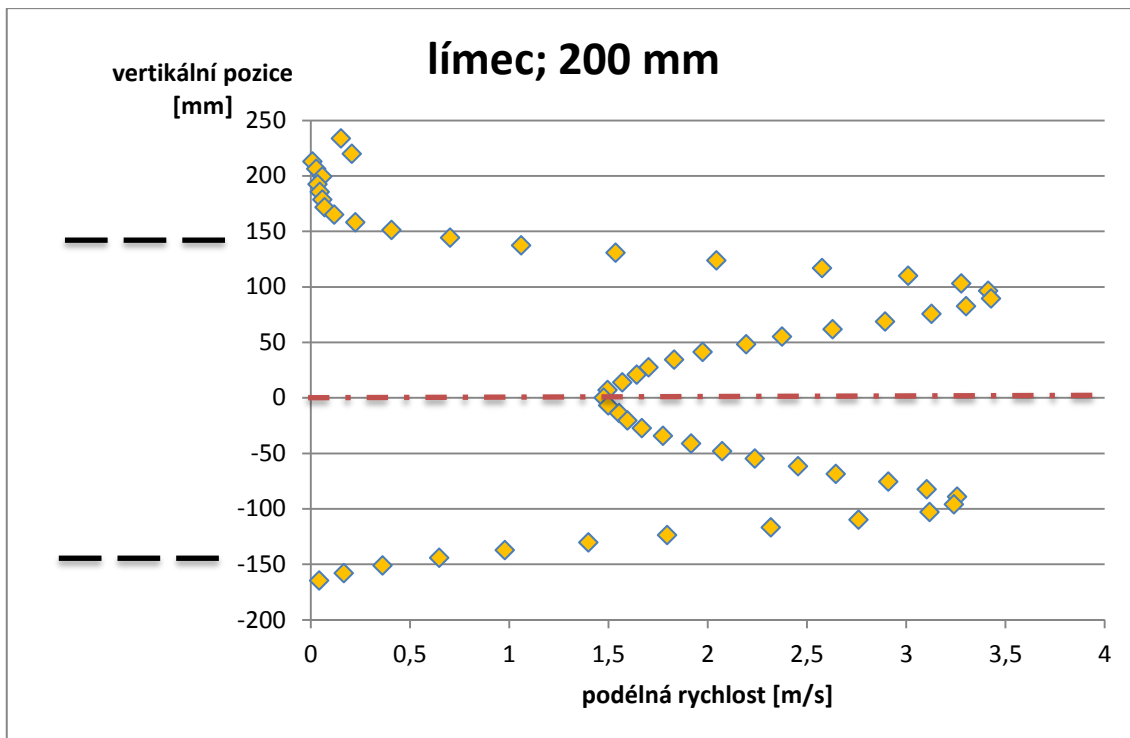


obr. 65: Statisticky zpracovaná vektorová mapa proudění vzduchu do 500 mm před odstředivkou s línemcem

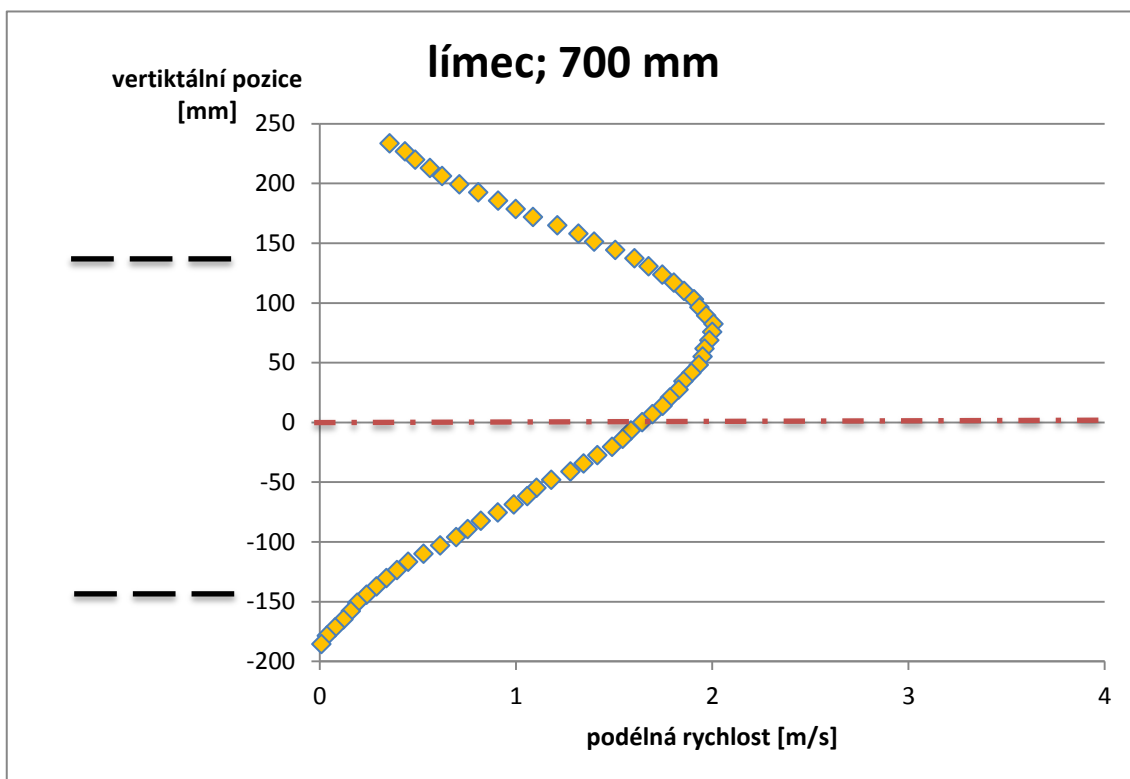


obr. 66: Statisticky zpracovaná vektorová mapa proudění vzduchu
500 - 900 mm před odstředivkou s límcem

Tvar límce udal směr výslednému proudu, kdy jde z mapy odečíst, že mírné zúžení výstupu z odstředivky způsobilo poměrně výraznější oblasti vyšších rychlostí proudu, vystupujících podél obvodu límce – až k 4 m/s. Okolo osy odstředivky jsou pak rychlosti značně nižší, asi 1 - 2 m/s. V oblasti od 400 mm dále jsou pak rozdíly rychlostí nižší, v horní polovině nad osou jsou pak rychlosti o něco vyšší, než v dolní polovině, to může však být způsobeno špatným osvětlením měřeného prostoru.



obr. 67: Podélné rychlosti proudu vzduchu 200 mm před odstředivkou s límečem

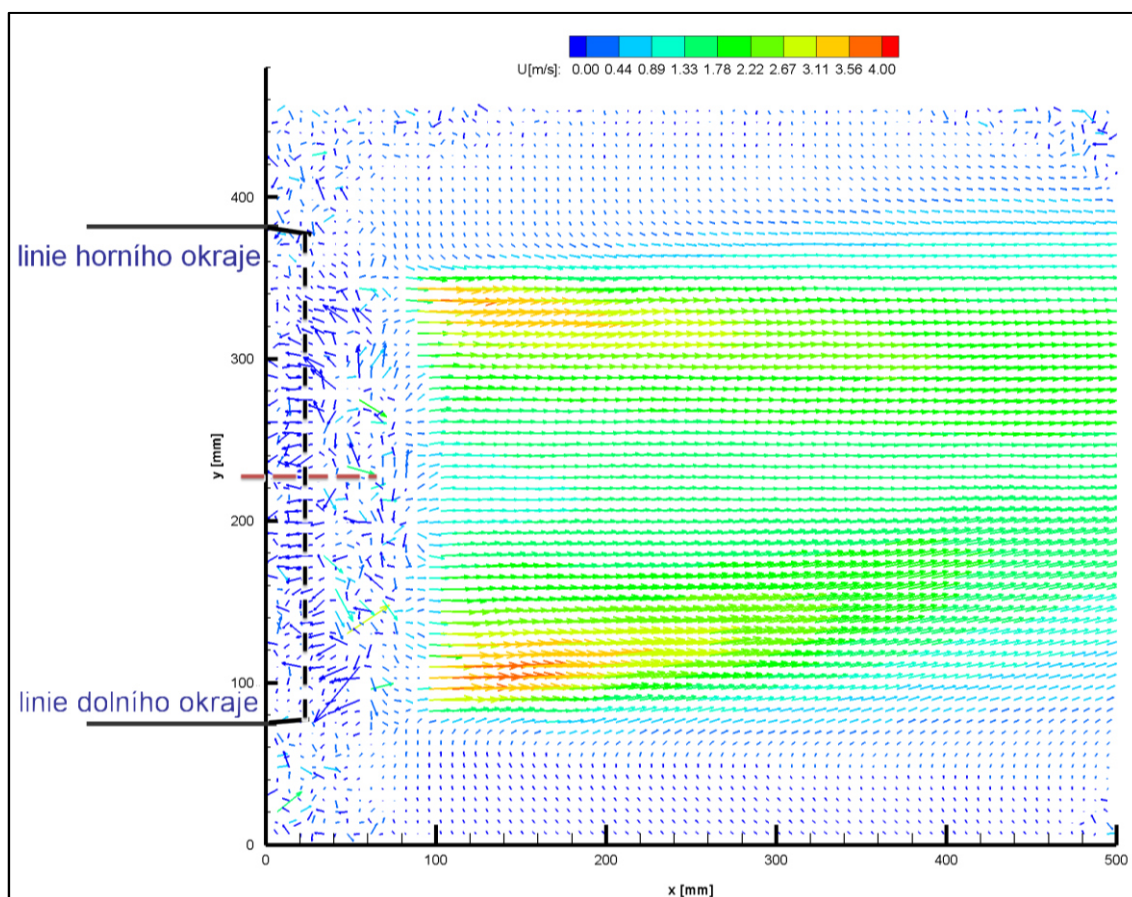


obr. 68: Podélné rychlosti proudu vzduchu 700 mm před odstředivkou s límečem

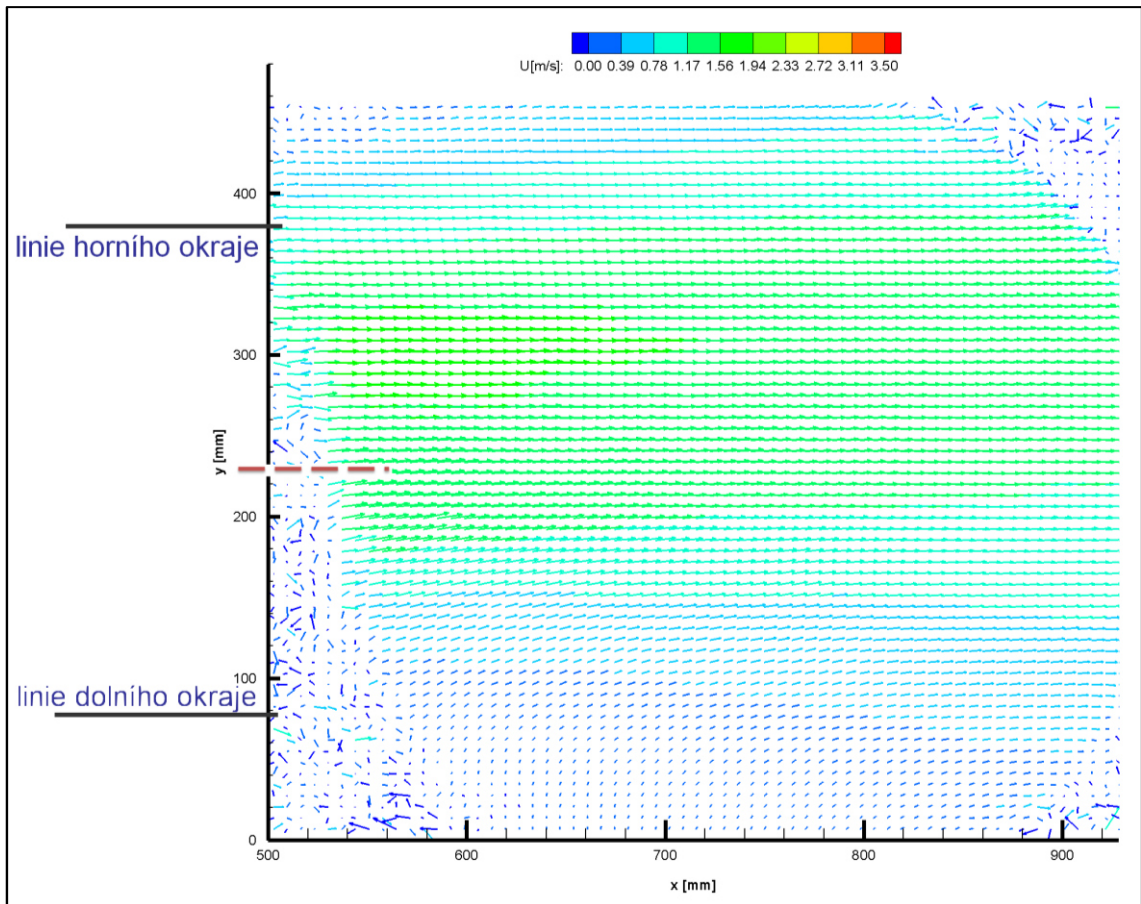
Řez průřezu rychlostí je vcelku podobný tomu bez modifikace, avšak s celkovým zúžením směrem k ose a o něco vyššími rychlostmi. Rychlosti podél linií okraje límce jsou značně vyšší – 3,5 m/s, než rychlost okolo osy – 1,5 - 2 m/s. Ve vzdálenější oblasti pak je vyšší rychlost okolo osy – 2 m/s, než v oblastech dále od osy. V horních oblastech nad osou jsou pak rychlosti vyšší, než ve spodní. To však mohlo být způsobeno nedokonalostí měření.

2.4.4 Použití límce a lopatek najednou

Výstupy měření lze vidět na obr. 69 – 72:

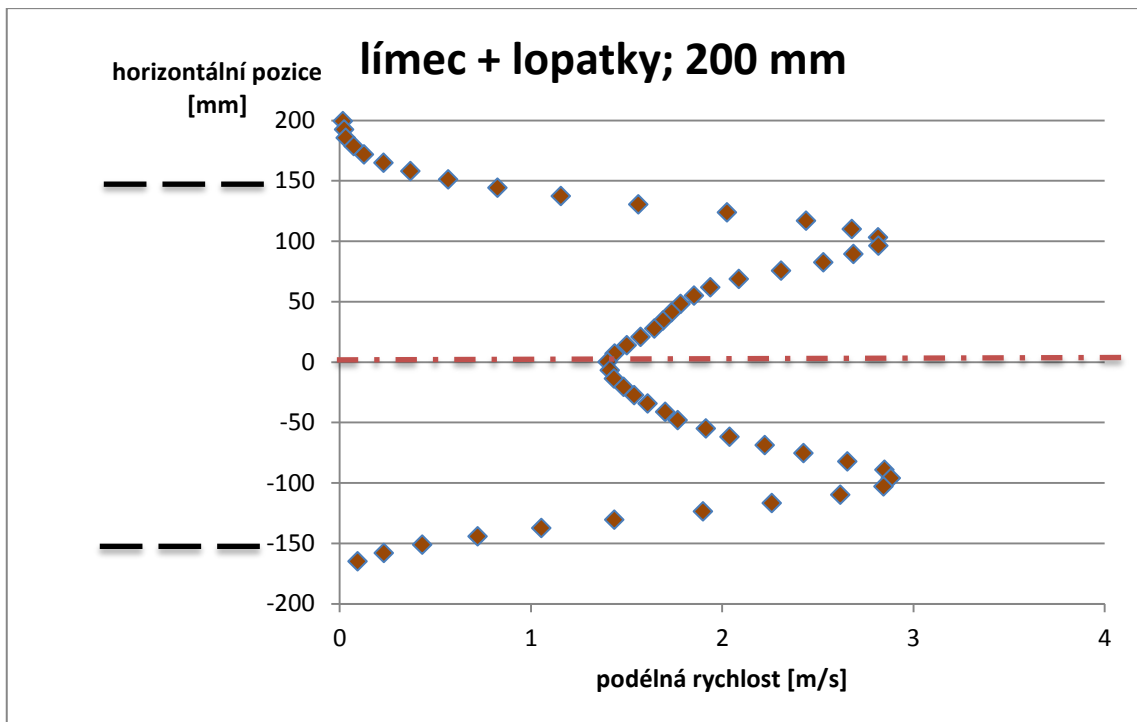


obr. 69: Statisticky zpracovaná vektorová mapa proudění vzduchu v oblasti do 500 mm před odstředivkou s límcem

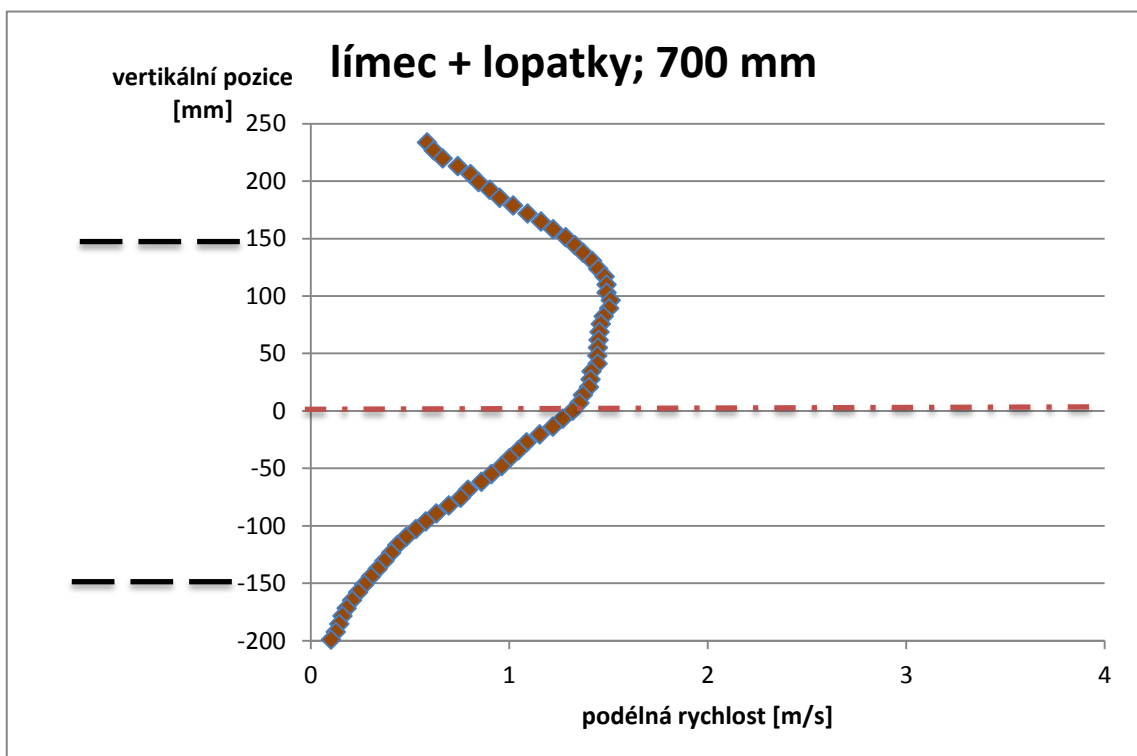


obr. 70: Statisticky zpracovaná vektorová mapa proudění vzduchu v oblasti 500 - 900 mm před odstředivkou s límcem

Do vektorové mapy se promítly oba vlivy – jak lopatek, tak límce. Lopatky celkově zpomalily proud vzduchu a rychlosti jsou tak celkově nižší, než při použití samotného límce. Límeč zase udal směr proudnic s vyššími rychlostmi, které vystupují podél jeho okraje, nicméně oblasti vyšších rychlostí jsou menší. Okolo osy jsou pak rychlosti nízké – do 1,5 m/s. Ve vzdálenější oblasti pak zřejmě kvůli špatnému osvětlení měřeného prostoru jsou rychlosti téměř nulové.



obr. 71: Podélné rychlosti proudu vzduchu 200 mm před odstředivkou s límeč a lopatkami



obr. 72: Podélné rychlosti proudu vzduchu 700 mm před odstředivkou s límeč a lopatkami

Zde se ve vzdálenosti 200 mm ukázalo, že rychlosti jsou podél linií okrajů límeče o něco nižší, než při použití samotného límeče vlivem použití lopatek, okolo osy jsou však

poměrně stejné. Ve vzdálenosti 700 mm jsou pak rychlosti v horní polovině nad osou o něco vyšší, než v dolní polovině, to však bylo nejspíš způsobeno i špatným osvětlením prostoru či špatně nastaveným laserem.

2.5 Vyhodnocení výsledků

Jak ukázaly jednak pokusy se zdroji kouře a suchým ledem, jednak měření rychlosti anemometrem, a jednak také analýza metodou PIV, vzniká již v prostoru okolo zvlákňovací hlavy proudění poměrně nestacionárního charakteru, a to i přesto, že rychlosti proudění jsou jen v řádech několika m/s. Z toho důvodu by bylo vhodnější mít již zdroj proudění nastaven tak, aby vytvářel proudění rovnoměrnější, případně i o vyšších rychlostech. Jednoduché zkoušené modifikace či jejich kombinace neovlivnily proudění vzduchu vznikající v těsné blízkosti zvlákňovací hlavy zásadním rozdílem tak, že by se výrazně změnil charakter proudění uvnitř odstředivky a v oblasti výstupu vláken. To dokazují výsledky PIV analýzy a jejich porovnání před a po aplikaci modifikace/í. Ani po subjektivním zhodnocení po použití modifikací či jejich kombinací při zvlákňování nelze konstatovat, že by jejich použití mělo dostatečně přínosný a zásadní vliv na charakter vznikající vlákenné vlečky. Modifikace v aktuálním rozsahu a stavu tudíž nesplňují požadovaný cíl této DP. Vzhledem k dalším okolnostem, které budou popsány v závěrečné kapitole, však již nedošlo k úsilí tyto modifikace zefektivnit, vymýšlet nové či provádět další zkoumání a měření.

Důvody tohoto resumé budou popsány v závěru této DP, stejně jako doporučení vyplývající z této situace.

3. Závěr

3.1 Diskuze

V této DP byla úspěšně provedena rešerše metod transportu vláknenných útvarů při zvlákňování, a to u technologií spunbond a meltblown. Byly poměrně úspěšně zanalyzovány a popsány podmínky vzniku vláknenné vlečky a toku vzduchu v okolí zvlákňovací hlavy při odstředivém zvlákňování. Ale jak již bylo napsáno v předchozí kapitole, nebylo dosaženo dostatečně zdařilých modifikací pro efektivnější odvod vláknenné vlečky z přístroje na odstředivé zvlákňování. Příčin, proč tomu tak bylo a proč dále nebyly vymyšleny sofistikovanější modifikace, je hned několik:

Vznikající charakter proudění

Již tok vzduchu, který vzniká uvnitř konstrukce odstředivky, není vhodně vytvářen. Dva ventilátory po stranách odstředivky, které se hlavní měrou podílejí na vzniku proudění, se vůči sobě otáčejí na opačné strany. Dále je diskutabilní, zda je vhodně zvolené jejich umístění, resp. směr natočení vůči spinneretu.

Rychlé znečištění

Polymerní roztoky a z nich následně vznikající polymery svojí chemicko-fyzikální povahou způsobují to, že během výrobního procesu poměrně rychle ulpívají na různých stěžejních částech odstředivky (zvlákňovací hlava, vnitřní kryt). Pokud se tyto části urychleně manuálně neočistí, polymerní roztoky / polymery na nich zasychají a s postupem času se na nich tvoří tlustší a objemnější vrstvy. Tyto vrstvy musejí být odstraňovány manuálním čištěním, čím se však zároveň znehodnocuje povrch zmíněných částí.

Ačkoliv byly části odstředivky mezi sériemi pokusů občas očištěny, bylo s přibývajícím počtem pokusů a zároveň po užívání odstředivky jinými uživateli znát, že hladkost a čistota povrchů zvlákňovací hlavy a okolních prvků se čím dál více zhoršuje a čištění

bylo nutné čím dál častěji. Znečištění rychle narůstalo v případech, kdy se nedařilo příliš dobře zvláknovat z polymerního roztoku. Dá se předpokládat, že i přívodní trubička polymerního roztoku ke spinneretě se postupně zanášela. Efektivita zvláknování na odstředivce bez modifikace byla subjektivně porovnatelně postupně horší a horší. Ukázky znečištění lze vidět na obr. 73 a 74:



obr. 73: Ulpělé vrstvy na ploše vnitřního krytu, které jsou již oškrábané z čištění



obr. 74: Zaschlé vrstvy polymerního roztoku na spinneretě a jejím okolí, které je nutno odstraňovat; ne vždy však zcela úspěšně

Nedostatek měření a minimální rozpočet

Základní PIV analýzy provedené pro tuto DP v laboratoři CxI sice poskytly jistý vhled a zpětnou vazbu v podobě získání objektivních dat, nicméně pro realizaci sofistikované modifikace odstředivky by bylo potřeba (nejen) PIV analýz provádět postupně více a ve větším rozsahu (zohlednit také osu z apod.). To však z kapacitních důvodů na CxI a z důvodu vyčerpání jeho členů zakázkami a grantovými projekty nebylo možné.

V teoretickém případě s dostatkem měření by pak pro výrobu sofistikované modifikace bylo třeba investovat určitou finanční částku. V ideálním případě by bylo třeba nechat prototyp či model vyrobit na zakázku. Avšak to se vylučuje s finančními možnostmi této DP.

Malé znalosti dané problematiky

Ačkoli jak navrhovatel odstředivky, tak autor této DP pocházejí z Katedry netkaných textilií a nanovlákných materiálů Fakulty textilní, problematika této DP se textilií týká jen v menší míře. Mnohem větší měrou je zastoupena problematika z oboru strojírenství, zejména mechaniky tekutin a konstrukce strojů. Bylo by tedy vhodnější zapojit více výzkumníků z příslušných oborů, to však není kvůli omezeným možnostem DP možné (souvisí s předchozím důvodem).

Celkově lze tedy konstatovat, že problematika tvorby vlákenné vlečky překračuje rámec textilního oboru a možnosti DP. Podílet se na zkoumaném principu by ideálně měli i odborníci z výše zmíněných oborů.

3.2 Doporučení

Jelikož nejen při zkoumání odstředivky při vypracování této DP bylo odhaleno několik jejích nedostatků, je v plánu vytváření nové verze. Pokud bude nová odstředivka částečně podobná této první, budou moci být použity poznatky z této DP a může se být vyvarováno nedostatkům u této odstředivky.

Vzhledem k objeveným problémům je z pohledu mého, jakožto člověka z textilního oboru, doporučováno, aby pokud možno byly stěžejní části uvnitř odstředivky alespoň trochu polohovatelné a nastavitelné. Převážně se to týká vysouvání spinnerety v podélném směru. To by umožnilo částečnou variabilitu a zřejmě mělo vliv na nižší míru zachytávání vlákenné vlečky o okolní vnitřní kryt v případě, že by zvlákňovací hlava byla vysunuta více dopředu před úroveň krytu. Ještě vhodnější by však bylo celkově změnit vnitřní konstrukci a uspořádání.

Umístění ventilátorů by mělo směřovat ze zadní stěny odstředivky směrem dopředu podél zvlákňovací hlavy, nebo přidat další zdroj proudění vycházející ze zadní strany. Proud vzduchu by celkově měl mít vyšší rychlost, což by jistou měrou zamezovalo zachytávání vlákenné vlečky, protože by byla lépe strhávána směrem ven z odstředivky. Do diskuze by se také nabízelo, zda nezvolit jinou formu zdroje proudění.

Pokud by to bylo možné, vnitřní a vnější kryt odstředivky by měly být vyrobeny z transparentního materiálu, pokud by nástavec či modifikace byly odnímatelné a bylo potřeba PIV analýzou zkoumat charakter vzduchu uvnitř odstředivky. Případně použít materiály s nízkým koeficientem tření, což by mohlo zmírnit míru zachytávání vlákenné vlečky. To však je závislé i na rozpočtu a dalších zkoumáních.

Zdroje literatury

- [1] RUSSELL, S. J, ed. *Handbook of nonwovens*. Cambridge: Woodhead, 2007. ISBN 978-1-85573-603-0.
- [2] BATRA, Subhash a Behnam POURDEYHIMI. *Introduction to nonwovens technology*. Lancaster: DEStech Publications, 2012. ISBN 978-1-60595-037-2.
- [3] Polymer-EXTRUSION based Technologies: Meltblown technology. *National Programme on Technology Enhanced Learning (NPTEL)* [online]. [cit. 2018-01-12]. Dostupné z: <https://nptel.ac.in/courses/116102014/10>
- [4] Nonwovens: Meltblown. *TechnicalTextile.com* [online]. [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: <http://www.technicaltextile.net/>
- [5] MOYO, D., A. PATANAIK a R. D. ANANDJIWALA. *Process control in nonwovens production* [online]. 2013, 288-292 [cit. 2018-01-15]. DOI: 10.1533/9780857095633.3.279. Dostupné z: www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857090270500126
- [6] The meltblown process. *Meltblown made by Innovatec* [online]. [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <https://melt-blown.com/ueber-uns/meltblown/>
- [7] *Shinwa Industrial Co.,: Non-woven fabric manufacturing machine - Spunbond* [online]. [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <http://www.shinwa-cc.co.jp/en/products/spunbond.html>
- [8] SARKAR, Kamal, Carlos GOMEZ, Steve ZAMBRANO, Michael RAMIREZ, Eugenio DE HOYOS, Horacio VASQUEZ a Karen LOZANO. Electrospinning to Forcespinning™. *Materialstoday* [online]. 2010, **13**(11), 12-14 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702110701991>
- [9] ZHIMING, Zhang a Sun JUN. Research on the development of the centrifugal spinning. *MATEC Web of Conferences 95* [online]. School of Electrical & Mechanical Engineering, Wuhan Textile University, 430073 Wuhan City, China, 2017 [cit. 2018-02-05]. DOI: 10.1051/mateconf/2017950 ICMME 2016 7003. Dostupné z: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/09/mateconf_icmme2017_07003.pdf
- [10] LI, Yongqiang, Chao ZOUA, Jianzhong SHAOAB, Xiangwu ZHANGC a Ya'nan LI. Preparation of SiO₂/PS superhydrophobic fibers with bionic controllable micro–nano structure via centrifugal spinning. *The Royal Society of Chemistry* [online]. 2017

[cit. 2018-11-13]. DOI: 10.1039/C6RA25813A. Dostupné z:
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2017/ra/c6ra25813a>

[11] VISHAL, Pande. An Overview of Nanofibers as a Platform for Drug Delivery. *Inventi rapid* [online]. 22/05/2015, 1-6 [cit. 2018-03-13]. ISSN 0976-3791.

Dostupné z:

www.researchgate.net/publication/280727191_An_Overview_of_Nanofibers_as_a_Platform_for_Drug_Delivery

[12] NOROOZI, Sooran, Houshang ALAMDARI, Walter ARNE, Seyed Mohammad TAGHAVI a R. G. LARSON. Regularized string model for nanofibre formation in centrifugal spinning methods. *Cambridge University Press: J. Fluid Mech.* (2017) [online]. 2017, 20/4/2017, (822), 202-234 [cit. 2018-02-14]. DOI: 10.1017/jfm.2017.279. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/317288033_Regularized_string_model_for_nanofibre_formation_in_centrifugal_spinning_methods

[13] Výkresové dokumenty od Ing. Josefa SKŘIVÁNKA, Ph.D, z Katedry textilních a jednoúčelových strojů na FS TUL, který je technickým konstruktérem odstředivky. Doplněno o grafické prvky, případně popisky.

[14] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, 2007 [cit. 2018-03-08]. ISBN 978-80-248-1508-4. Dostupné z:

<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/MT/Mechanika%20tekutin.pdf>

[15] KRÁLOVÁ, Magda. Proudění tekutin. *Techmania Science Center / EDUPORTÁL* [online]. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z:

<https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/tekutiny/proudeni-tekutin>

[16] KŘEN, Jiří a Josef ROSENBERG. *Mechanika kontinua. 2., upr. vyd.* V Plzni: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-908-7.

[17] JANALÍK, Jaroslav a Pavel ŠTÁVA. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2002. ISBN 80-248-0038-1.

[18] PAVELEK, Milan. EXPERIMENTÁLNÍ METODY II 7. Vizualizace proudění a PIV: Výukový materiál. In: *FSI VUT v Brně: Energetický ústav Odbor termomechaniky a techniky prostředí* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z:

<https://docplayer.cz/38670861-Experimentalni-metody-ii-7-vizualizace-proudeni-a-piv.html>

[19] PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E., ŠTĚTINA, J.: *Vizualizační a optické měřicí metody*. Elektronické skriptum [online]. [cit. 2018-04-17] Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/>

[20] KOPECKÝ, Václav. *Laserové anemometrie*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7083-945-7.

[21] *EFluids: A Free One-Stop Resource For Fluid Dynamics and Flow Engineering* [online]. In: 18.10.2014 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: http://www.efluids.com/efluids/gallery/gallery_images/bullet_shadowgraph.jpg

[22] MUELLER, Tiffany. Special optics allow us (and our cameras) to see air flow with the naked eye. In: *DIY Photography* [online]. 24.11.2014 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.diyphotography.net/special-optics-allow-us-cameras-see-air-flow-naked-eye/>

[23] Internetové stránky firmy *Kuraray*, od níž pochází PVB používané v této diplomové práci. [cit. 2018-10-16]. Dostupné z: <https://www.mowital.com/>