



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ

HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW LABORATORY

VYTVÁŘENÍ KAPALINOVÉ CLONY PRO ABSORPCI PLYNNÝCH EXHALACÍ

DEVELOPMENT OF A FLUID CURTAIN FOR GASEOUS EXHALATIONS
ABSORPTION

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ondřej Křištof

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Tomáš Svěrák, CSc.

BRNO 2019

ABSTRAKT

Disertační práce se zabývá aplikací absorpčních metod pro separaci plynných polutantů ze znečištěných plynných směsí s využitím poloprovozního skrápěcího zařízení scrubber. Míra efektivnosti odstranění plynných polutantů byla stanovena na základě hydrodynamické distribuce tekutin ve vnitřním prostoru skrápěcí komory. Byly vykonány experimentální práce vedoucí k charakterizaci spirálové trysky TF-28 150, která byla použita k distribuci absorpční kapaliny. Konkrétně byl vyšetřen dopadový vzor kapalinové clony produkovaný tryskou pomocí intruzivních metod, byly stanoveny efektivní úhly rozstříku kapalinových clon, rozpadové režimy primární a sekundární atomizace a byla stanovena velikost kapek a rychlost kapaliny pomocí neintruzivních optických metod. Taktéž byly realizovány numerické simulace proudění modelové plynné fáze vnitřním prostorem skrápěcí hlavy a rozstřík kapaliny přes spirálovou trysku. Soubor získaných poznatků lze uplatnit při definování styčné mezifázové plochy a společně určení koeficientu celkového prostupu hmoty tak definovat celkovou kinetiku chemisorpce pro danou kombinaci absorbent-absorbát.

KLÍČOVÁ SLOVA

sprchový scrubber, absorpce, spirálová tryska, atomizace kapalin, intruzivní a neintruzivní optické metody, velikost kapek

ABSTRACT

The dissertation thesis deals with the application of absorption methods for the separation of gaseous pollutants from polluted gaseous mixtures using a pilot plant scrubber. The efficiency of the gaseous pollutant removal was determined based on the hydrodynamic distribution of fluids inside the spray chamber. A TF-28 150 spiral nozzle, which was used to spray the absorption liquid, was experimentally characterized. Specifically, the pressure impact pattern of the liquid produced by the nozzle was investigated using intrusive methods and the effective spray angles, the modes of primary and secondary atomization, the droplet size and liquid velocity distributions were determined using non-intrusive optical methods. Numerical simulations of flow of model gas phase inside the sprinkler head and spraying of the liquid through the spiral nozzle were also carried out. The obtained data can be applied to estimate the interface area and together with the determination of the coefficient of total mass transfer thus define the kinetics of chemisorption for a given absorbent/absorbate combination.

KEYWORDS

wet shower scrubber, absorption, spiral nozzle, liquid atomization, intrusive and non-intrusive optical methods, droplet size

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRIŠTOF, Ondřej. Vytváření kapalinové clony pro absorpci plyných exhalací [online]. Brno, 2020 [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/122499>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění. Vedoucí práce Tomáš Svěrák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou doktorskou práci na téma „Vytváření kapalinové clony pro absorpci plyných exhalací“ jsem vypracoval samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Tomáše Svěráka, CSc. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....
Ing. Ondřej Křištof

PODĚKOVÁNÍ

Velmi rád bych poděkoval svému školiteli, panu prof. Ing. Tomáši Svěrákovi, CSc. za obdivuhodnou trpělivost, množství cenných rad, odbornou a psychickou podporu, přátelský přístup a čas věnovaný mé práci i mé osobě.

Také bych chtěl poděkovat prof. Ing. Miroslavu Raudenskému, CSc. a prof. Ing. Jaroslavu Horskému, CSc. (in memoriam) za jejich podporu, nesmírnou trpělivost a možnost absolvovat doktorské studium u nich na ústavu. Děkuji také členům kolektivu sdruženého v Laboratoři přenosu tepla a proudění za jejich cenné rady, ochotu a pomoc s teoretickými i praktickými problémy, kterých se během realizace dizertační práce objevilo mnoho.

Velké díky také patří nejbližším kolegům Ing. et Ing. Pavlu Bulejkovi, Ph.D. a Ing. et Bc. Pavlu Kejíkovi, Ph.D. a Ing. Josefu Kalivodovi, Ph.D. za společně strávené chvíle v laboratoři, spousty legrace a samozřejmě i pomoc po odborné stránce, a sice formou vzájemných dialogů týkajících se této dizertační práce i spolupráce v ostatních pracovních činnostech.

Tímto bych také rád poděkoval Ing. Kateřině Mayerové (i celé její rodině) jak za téměř rodinné zázemí zde v Brně, tak za pomoc při řešení dílčích peripetií v oblasti akademické i v osobním životě.

Velmi děkuji všem pracovníkům firmy MVB Opava CZ, s.r.o. za spolupráci a obětavost při sestavování experimentálního zařízení i za celkovou podporu v uplynulých letech, především pak spolumajiteli Martinu Žůrkovi.

Mé díky patří také Bc. Lukáši Brázdovi za sáhodlouhé debaty nad rozličnými tématy v oblastech odborných, filozofických i v tématech všedního dne a za jeho entuziasmus, který dokáže šířit kolem sebe a tak inspirovat ostatní. Ing. Jakubu Kůdelovi, Ph.D. a Ing. Janu Komínkovi, Ph.D. děkuji za pomoc v oblastech matematiky a v programu Matlab. Ing. Miloslavu Dohnalovi a Ing. Tomáši Juřenovi, Ph.D. mnohokrát děkuji za vstřícný přístup a odbornou pomoc při řešení problému s realizací numerických simulací.

Dále pak děkuji mému ošetřujícímu lékaři, MUDr. Vlastimilu Ráčkovi za jeho vstřícnost a ochotu mi pomoci kdykoli to můj zdravotní stav vyžadoval, stejně tak rehabilitačnímu personálu v rehabilitačních centrech Rubín, Dobrovského, SurGal Clinic a v lázních Aurora v Třeboni, dále pak personálu plaveckých bazénů na Kraví hoře, v Kohoutovicích i v Lužánkách a všem lektorkám pilates ve FitStudios Jana.

Rád bych také poděkoval celé své nejbližší rodině, všem svým přátelům z okolí Dačic a rodině Janíků, kteří mě při realizaci a sepisování této práce podporovali, a bez jejichž pomoci by nebylo možné práci zdárně dokončit.

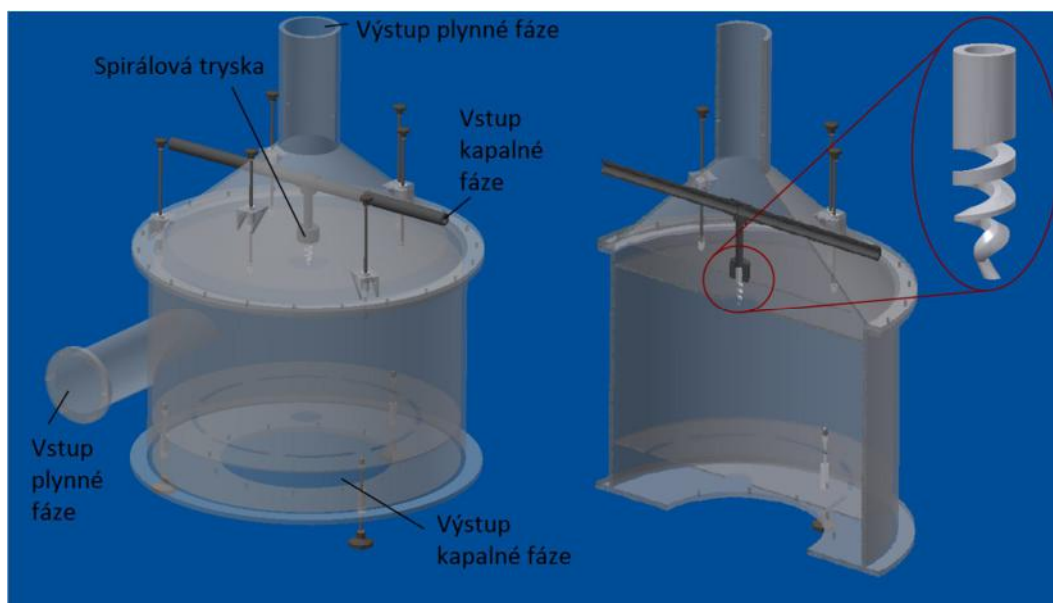
OBSAH

1	Cíle práce	9
2	Úvod.....	10
3	Teoretická část.....	11
3.1	Separační procesy pro plynné exhalace.....	11
3.2	Absorpce.....	12
3.3	Rychlost absorpce	13
3.3.1	Kriteriální rovnice.....	15
3.4	Absorpce s chemickou reakcí	17
3.5	Absorpční zařízení	18
3.5.1	Absorbéry se souvislým kontaktem fází.....	18
3.5.1.1	Náplňové kolony	18
3.5.1.2	Sprchový Scrubber.....	19
3.5.2	Absorbéry se stupňovitým kontaktem fází	21
3.6	Atomizace kapaliny.....	21
3.6.1	Rozpad kapalinové clony	24
3.6.2	Dynamické zóny a úhel rozstříku kapalinové clony.....	29
3.7	Základní typy trysek.....	31
3.7.1	Trysky s rozstříkem dutého kuželu	31
3.7.2	Trysky s rozstříkem plného kuželu	31
3.7.3	Trysky s plochým rozstříkem	32
3.7.4	Trysky s plným paprskem	32
3.7.5	Pneumatické rozprašovací trysky	33
3.8	Techniky měření kapalných sprejů	33
3.8.1	PIV (Particle Image Velocimetry)	35
3.8.2	LDA (Lasser Doppler Anemometry)	36
3.9	Dopadový tlak	37
3.10	Vyjadřování velikosti kapek.....	38
3.10.1	Střední velikosti kapek	38
3.10.2	Reprezentativní velikosti kapek	39
3.10.3	Matematické distribuční funkce.....	40
3.11	Numerické modely	41
3.11.1	Přímá numerická simulace (DNS).....	43
3.11.2	Metody modelování Reynoldsových rovnic (RANS).....	45
3.11.3	Simulace velkých vírů (LES).....	46
4	Praktická část	49
4.1	Sprchový scrubber	49
4.2	Spirálová tryška	51
4.2.1	Současný stav poznání v oblasti spirálové trysky	53
4.2.2	Intruzivní měření kapalinové clony	53

4.2.2.1	První sada měření	54
4.2.2.2	Druhá sada měření	61
4.2.2.3	Vyhodnocení intruzivního měření	64
4.2.3	Vizualizace kapalinové clony	67
4.2.4	Neintruzivní měření kapalinové clony	71
4.2.4.1	Velikost kapek	73
4.2.4.2	Rychlost kapaliny	83
4.3	Numerické simulace	91
4.3.1	Simulace proudění plynné fáze	91
4.3.1.1	Geometrie skrápěcí hlavy	91
4.3.1.2	Generace výpočetní sítě	93
4.3.1.3	Nastavení simulací	93
4.3.1.4	Vyhodnocení simulací	95
4.3.1.5	Srovnání numerických simulací s experimentálními daty	110
4.3.2	Simulace proudění kapalné fáze	112
4.3.2.1	Geometrie a generace výpočetní sítě	113
4.3.2.2	Nastavení simulace	114
4.3.2.3	Vyhodnocení simulace a srovnání s experimentálními daty	115
5	Výsledky a diskuze	122
6	Závěr	127
7	Seznam použitých zdrojů	129
8	Seznam použitých zkratk a symbolů	138
9	Seznam obrázků	142
10	Seznam tabulek	147
11	Přílohy	148
12	Výzkumná činnost autora	171
12.1	Publikace vztahující se k dizertační práci	171
12.2	Ostatní publikace	172
12.3	Produkty a patenty	175
12.4	Projekty	175
12.5	Oponované vysokoškolské práce	176

1 CÍLE PRÁCE

Na Obr. 1 se nachází model skrápěcí komory scrubberu společně s modelem spirálovité trysky (od firmy BETE, označení TF28-150), která byla vybrána, dle předešlých zkušeností, jako nejvhodnější kandidát pro tvorbu kapalinové clony při absorpčních procesech. Numerickými simulacemi a praktickými měřeními bude vyšetřeno proudění tekutin, na jejichž základě se eventuálně současná geometrie pozmění, pro maximalizaci účinnosti absorpčního procesu.



Obr. 1 Model skrápěcí komory navrhovaného absorpčního scrubberu a spirálové trysky

Cílem této práce je pomocí numerické simulace popsat vývoj kapalinové clony za různých hydrodynamických podmínek v nově navrhovaném sprchovém scrubberu:

- V první fázi bude simulována atomizace kapalinové clony, vyvíjené do prostředí skrápěcí komory, s cílem definovat velikost a kinetiku vznikajících struktur a plochy specifického mezifázového styčného povrchu.
- V druhé fázi bude simulováno ovlivnění vývoje kapalinové clony při tangenciálním přivedení plynu do vnitřního prostoru skrápěcí komory v protiproudém uspořádání.
- V poslední fázi bude následovat simulace účinnosti absorpce plynných polutantů (především anorganické plyny jako NO_x , SO_2 , CO , CO_2 , NH_3) do příslušných kapalných absorbentů a jejich srovnání s praktickými experimenty.
- Všechny fáze budou řešeny numerickou metodou konečných objemů. Vyšetřovaný model by měl skutečnost reprezentovat v odpovídající míře, což bude ověřováno po stránce optimalizace výpočetní sítě i přístupem k řešení turbulentního modelu.
- Výsledky simulací budou také ověřovány praktickým měřením kapalinové clony na modelu skrápěcí komory pomocí neintruzivních optických metod PIV a LDA.

2 ÚVOD

Během provozu průmyslových zařízení vzniká celá řada organických i anorganických plynných polutantů, jejichž emise způsobují znečištění atmosféry a globální změny klimatu. Při revitalizaci životního prostředí je proto snahou aplikace chemicko-inženýrských regeneračních systémů založených na různých fyzikálně-chemických procesech a biologických postupech. Vzhledem k zpřísnující se legislativě Evropské unie vede nutnost kontroly objemu a respektování maximálních emisních limitů plynných polutantů k vynaložení velkých finančních částek na pořízení, provoz a údržbu technologických systémů, zajišťujících analýzu a minimalizaci množství kontaminantů obsažených ve vypouštěných odpadních plynech do ovzduší. Z těchto důvodů se do popředí zájmu dostávají absorpční procesy, jelikož se jedná o konstrukčně jednoduchou a relativně investičně i provozně nenáročnou technologii s vysokým potenciálem v dosahovaných výsledcích separace.

Účinnost absorpčního procesu, tedy míra odstranění plynných polutantů ze znečištěných plynných směsí, je závislá na řadě faktorů, z nichž charakter a intenzita kontaktu kapalného absorbentu s plynným polutantem, uvnitř absorpčních zařízení během separace, hrají důležitou roli pro maximalizaci mezifázového styčného povrchu a přestupu hmoty mezi fázemi. Důležitým faktorem je tak studium hydrodynamických charakteristik tekutin uvnitř skrápěcích prostor absorpčních zařízení a procesů atomizace kapalných clon, produkovaných různými typy trysek, které může probíhat dvojím způsobem. První přístup zkoumá vyvíjené kapalinové clony praktickými experimenty, při použití dnes nejrozšířenějších neintruzivních optických metod jako LDV, PDA, PIV, Fraunhoferova difrakce a QLS. Druhý přístup řeší uvažovanou soustavu tekutin pomocí metod numerické simulace, která vzhledem k náročnosti na poli výpočetní techniky zahrnuje do matematických modelů soustavu zjednodušení. Získané výsledky jsou však schopné popsat celkem věrohodně rysy proudění i látkovou výměnu mezi fázemi s odpovídající přesností skutečnosti, dle použitých druhů modelů. V technické praxi je standardem oba přístupy kombinovat a porovnávat mezi sebou, pro co nejpreciznější popsání daných veličin.

V prvních kapitolách teoretické části se autor věnuje separačním procesům v technické praxi, se zaměřením na proces absorpce. Je zde uveden matematický aparát popisující rychlost fyzikální absorpce na základě filmové teorie difúze a využitím kritériálních rovnic, dále doplněnou o absorpci s chemickou reakcí. Zmíněny jsou také hlavní a nejpoužívanější typy absorpčních zařízení v technické praxi. Následuje kapitola o atomizaci kapalinových clon s výčtem faktorů a mechanismů ovlivňující rozpad souvislých clon na jednotlivé struktury, způsoby vyjadřování velikosti vznikajících kapek a popsání základních vzorů kapalinových clon produkovaných různými typy trysek. Obsaženy jsou také kapitoly zaměřující se na intruzivní a neintruzivní techniky měření kapalných sprejů, kdy jsou detailněji popsány techniky měření impaktního tlaku kapaliny a optické metody PIV a LDA.

V experimentální části je popsáno pilotní sprchové absorpční zařízení, na jehož vývoji se autor podílel a jednotlivé etapy experimentálního vyšetřování základních charakteristik spirálové trysky od firmy BETE s označením TF-28 150, která byla uplatněna při produkci kapalinové clony ve skrápěcí komoře scrubberu. V návaznosti jsou uvedeny postupy realizace numerických simulací proudění modelové plynné fáze vnitřním prostorem skrápěcí hlavy a rozstřík modelové kapaliny přes spirálovou trysku.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 SEPARAČNÍ PROCESY PRO PLYNNÉ EXHALACE

Plynné exhalace, obsahující různorodou škálu plynných polutantů, se před opuštěním středisek průmyslových a agrárních producentů zachytávají buďto jednostupňovými procesy, nebo v případě zvýšených nároků na kvalitu ovzduší vícekrokovými regeneračními systémy. Lze rozlišit šest základních technologií uplatňujících se při čištění plynů[1–5]:

- **Adsorpce** je proces, během kterého se na mikroporézní povrch pevného sorbentu váže jedna nebo více plynných složek. Hlavními kritérii pro výběr sorbentu jsou jeho velký specifický mezifázový povrch, vysoká selektivita a vysoká regenerační schopnost. Jako adsorbenty se využívají aktivní uhlí, oxid hlinitý, kovové oxidy, zeolity, fosfáty, organokovové skelety, mikroporézní uhlík, polymery a další. Sorpce příslušného polutantu a následná regenerace adsorbentu může být realizována kolísáním tlaku či teploty (PSA a TSA) nebo vytvořením vakua (VSA).
- **Absorpce** je proces, při kterém přechází jedna či více složek z plynné fáze do fáze kapalné. Proces absorpce je detailněji popsán v následujících kapitolách.
- **Membránová separace** využívá selektivních polymerních i anorganických (uhlíkové, zeolity, keramické či kovové) membrán k odstranění složek ze směsi plynů. Vytváří semipermeabilní bariéru, která je propustná pro jednu či více složek. Difúze je řízena na základě koncentračního gradientu. Mezi jejich výhody patří např. vysoká hodnota mezifázového povrchu, nezahlcují se při vysokých průtocích médií, netrpí markantním snížením účinnosti při nízkých průtocích médií, možná je i nezávislá regulace rychlosti proudící kapalné a plynné fáze. Nevýhodou je však usazování nečistot na povrchu membrány.
- **Kondenzace** je proces využívající se především k čištění plynných směsí (např. spalin) od těkavých organických látek. Proud se ochladí na teplotu, kdy jednotlivé organické sloučeniny zkondenzují a tím jsou z plynné směsi odstraněny.
- **Chemická konverze** se uplatňuje v široké řadě procesů, zahrnující např. katalytické i nekatalytické reakce v plynné fázi, oxidační i redukční reakce v plynné fázi a reakce složek plynné fáze s pevnými složkami suspendovanými v kapalinách.
- **Kryogenní separace** plynů, nazývaná též kryogenní destilace, využívá k oddělení komponent z plynných směsí destilaci při velmi nízké teplotě a vysokém tlaku. Např. pro separaci CO₂ ze spalin je plyn ochlazen na teplotu desublimace (–100 až –135 °C), ztuhlý CO₂ je oddělen od jiných lehčích plynů a stlačen na hodnotu přesahující 100 až 200krát atmosférický tlak. Proces je velmi účinný (90–95 %), nicméně pro své extrémní podmínky také velmi drahý, proto se nejedná o rozšířenou technologii. V současné době se výzkum soustřeďuje hlavně na optimalizaci investičních a provozních nákladů.

3.2 ABSORPCE

Jelikož je výzkum vzniku kapalinové clony spojen se separačním procesem absorpce, značná část teoretické části disertační práce je věnována této chemicko-inženýrské technologii.

Absorpce patří mezi difúzní děje, pro které je charakteristický kontakt plynné a kapalné fáze. Během absorpce dochází k jednosměrnému sdruženému přestupu složek plynné fáze (absorbát) přes mezifázové rozhraní do fáze kapalné, zvané absorbent [6, 7].

Intenzita absorpce tedy závisí na součiniteli přestupu hmoty mezi fázemi, na velikosti plochy mezifázového rozhraní, teplotě a tlaku v systému a koncentračním gradientu dané složky, tedy míry rozpustnosti látky v absorbentu. Hnací silou difúze je vždy rozdíl mezi aktuálním stavem a stavem rovnovážným. Čím blíže k rovnováze, tím je rychlost procesu pomalejší. Plochu mezifázového rozhraní lze zvětšit atomizací kapek absorpčních clon na co nejmenší rozměry. Přechod laminárního charakteru toku do turbulentního (na základě Reynoldsova kritéria) zapříčiní konvektivní příspěvek promísení médií, který má pozitivní efekt na rychlost přestupu látky.

Vlastnosti absorbentu se na procesu absorpce podílejí také. Upřednostňují se absorbenty s vysokou rozpustností absorbované složky, dostatečně selektivní, stálé, málo prchavé, nízkou viskózní, nekorozivní, netoxické, nehořlavé, nepěnlivé, cenově přijatelné a regenerovatelné. Všechny jmenované položky samozřejmě v technické praxi splnit nejde, proto vybraný absorbent je vždy výsledkem kompromisů.

Pro technologie využívající absorpční systémy je důležitá znalost rovnovážných soustav zúčastněných médií, jelikož během přestupu látky z plynné fáze do fáze kapalné může vznikat nasycený roztok při daných provozních podmínkách, který již další rozpouštění látky nedovoluje.

Surový plyn určený k absorpčnímu zpracování, bývá v praxi vícesložková směs. Pro zjednodušení se při základních výpočtech uvažuje pouze dvousložková směs, tj. směs složená ze složky absorbované a ze složky inertní.

Může také probíhat opačný pochod, kdy z kapalné fáze se uvolňuje rozpuštěná látka do proudu plynu, tento opačný proces se nazývá desorpce či stripování. Příkladem může být desorpce amoniaku z vodného roztoku během jeho probublávání čistým vzduchem.

Pro popis absorpčního procesu, tedy konkrétně přestupu hmoty mezi plynnou a kapalnou fází, bylo publikováno několik teorií, z nichž nejvíce uznávanými jsou filmová teorie difúze, penetrační teorie a jejich kombinace, tj. filmově-penetrační teorie. Pro svůj ucelený pohled na difúzní procesy, dobrý soulad s naměřenými experimentálními daty a, ve srovnání s ostatními přístupy, snadnější srozumitelnost, je stále všeobecně přijímanou hypotézou filmová teorie difúze [1, 6–9].

Absorpci lze z fyzikálně-chemické stránky rozdělit do následujících hlavních skupin, na základě podstaty interakce mezi absorbentem a absorbovanou látkou [1]:

- **Prostý fyzikální pochod** – dochází k absorbování nejvýše rozpustné plynné složky v kapalnou fázi, neuplatňuje se chemická reakce. Rovnovážná koncentrace absorbované složky je přímo úměrná parciálnímu tlaku dané složky v plynné fázi.
- **Reverzibilní proces** – dochází k vratné chemické reakci mezi sorbovanou složkou a absorbentem. Tlak sytých par absorbované složky je snižován vznikající sloučeninou, s rostoucí teplotou opět vzroste.
- **Ireverzibilní proces** – dochází k nevratné chemické reakci (chemisorpci) mezi sorbovanou složkou a absorbentem, vznikají nové sloučeniny znemožňující zpětné uvolnění.

3.3 RYCHLOST ABSORPCE

Pro vysvětlení rychlosti absorpce, s využitím filmové teorie difúze, je zvažována jednoduchá soustava se souvislým kontaktem fází, kde se absorbuje složka A, která se nachází v plynné směsi s inertní složkou I. Dále se předpokládá, že jde o nepřetržitý ustálený jednosměrný transport složky A z jádra proudící plynné fáze směrem k mezifázovému rozhraní, její přestup přes mezifázové rozhraní a následný transport do jádra kapalné fáze, absorbentu L. V technické praxi se využívají při popisu integrálních rychlostních rovnic především souhrnné koeficienty přestupu látky ve fázi. Vyjádříme-li hnací sílu difúze v kapalné fázi pomocí rozdílu molárních zlomků složky A na mezifázovém rozhraní a v jádru kapalné fáze a aplikujeme-li Henryho zákon, můžeme integrální rovnici napsat ve tvaru [6, 10]:

$$\frac{\dot{n}_A}{S} = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_{gP}} + \frac{H_A}{k_{lc}}\right)} (P_{Ag} - P_{Al}) \quad (3.1)$$

kde:	$\dot{n}_A$	je tok látkového množství látky A
	S	je difúzní plocha
	k_{gP}	je koeficient přestupu látky A v plynné fázi
	k_{lc}	je koeficient přestupu látky A v kapalné fázi
	P_{Ag}	je parciální tlak transportované složky A v jádru plynné fáze
	P_{Al}	je parciální tlak transportované složky A v plynné fázi, kterému v kapalné fázi odpovídá koncentrace složky C_{Al}
	H_A	je Henryho konstanta

Po zavedení souhrnného koeficientu prostupu látky mezi fázemi získáme integrální rovnici ve tvaru:

$$\frac{\dot{n}_A}{S} = K_P (P_{Ag} - P_{Al}) \quad (3.2)$$

kde:	K_P	je souhrnný koeficient prostupu látky A mezi fázemi, který náleží integrální rychlostní rovnici ustáleného přechodu látky, se souhrnnou hnací silou vyjádřenou rozdílem parciálních tlaků difundující složky
------	-------	--

Ze spojení rovnic (3.1) a (3.2) vyplývá hodnota souhrnného koeficientu prostupu látky A (na základě hnací síly v plynné fázi) takto:

$$K_P = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_{gP}} + \frac{H_A}{k_{lc}}\right)} \quad (3.3)$$

Integrální rychlostní rovnici (3.1) lze po vyjádření formou molárních koncentrací složky A ve formě:

$$\frac{\dot{n}_A}{S} = \frac{1}{\left(\frac{H_A}{k_{gP}} + \frac{1}{k_{lc}}\right)} (C_{Ag} - C_{Al}) \quad (3.4)$$

kde: C_{Ag} je molární koncentrace transportované složky A v jádru plynné fáze
 C_{Al} je molární koncentrace transportované složky A v kapalné fázi

Pro souhrnný koeficient prostupu látky vyjádřeného pomocí molárních koncentrací složky A získáme rovnici ve tvaru:

$$\frac{\dot{n}_A}{S} = K_C (C_{Ag} - C_{Al}) \quad (3.5)$$

kde: K_C je souhrnný koeficient prostupu látky A mezi fázemi, náležející integrální rychlostní rovnici ustáleného přechodu látky, se souhrnnou hnací silou vyjádřenou rozdílem molárních koncentrací difundující složky

A opět ze spojení rovnic (3.4) a (3.5) lze vyjádřit hodnotu souhrnného koeficientu prostupu látky A (na základě hnací síly v kapalné fázi) takto:

$$K_C = \frac{1}{\left(\frac{H_A}{k_{gP}} + \frac{1}{k_{lc}}\right)} \quad (3.6)$$

Rovnice (3.2) a (3.5) lze rozšířit o tzv. specifický mezifázový povrch, který je definován jako podíl plochy mezifázového rozhraní a účinného objemu výrobního zařízení:

$$\frac{\dot{n}_A}{V} = (K_P a_{sp})(P_{Ag} - P_{Al}) = \left(\frac{K_P S}{V}\right)(P_{Ag} - P_{Al}) \quad (3.7)$$

$$\frac{\dot{n}_A}{V} = (K_C a_{sp})(C_{Ag} - C_{Al}) = \left(\frac{K_C S}{V}\right)(C_{Ag} - C_{Al}) \quad (3.8)$$

Jelikož se plocha mezifázového rozhraní může měnit v závislosti na pracovních podmínkách, koeficienty prostupu hmoty se udávají přímo číselně nebo jako rovnice pro výpočet objemových souhrnných koeficientů prostupu látky mezi fázemi ($K_P a_{sp}$; $K_C a_{sp}$) [6].

Všeobecně se dá říci, že transfer látky mezi plynnou a kapalnou fází bude tím rychlejší, čím bude soustava vzdálenější od rovnovážného stavu. Rychlost absorpce látky z plynné do kapalné fáze bude při rostoucí teplotě klesat, jelikož malé zvýšení hodnot koeficientů přestupu látky v soustavě nikdy nevyváží současný pokles hnacích sil absorpce. Naopak zvýšení tlaku má na rychlost absorpce látky mezi fázemi příznivý vliv, neboť malé snížení hodnoty parciálního koeficientu přestupu látky v plynné fázi bude prakticky vždy převýšeno současným vzrůstem hnacích sil absorpce [6, 10].

3.3.1 Kriteriaální rovnice

Určování hodnot koeficientů přestupu látky ve fázích z rychlostních rovnic je problematické a s obtížemi realizovatelné z důvodu stanovení veličin na mezifázovém rozhraní. Tuto překážku lze v praktických situacích obejít experimentálním určením ustálené rychlosti přestupu látky ve fázích přímo v provozním zařízení za daných podmínek, kdy se plocha mezifázového povrchu mění se změnou pracovních podmínek. Pro výpočet koeficientů přestupu látky v jednotlivých fázích lze využít až čtyři postupy, kdy jedním z nich je rozměrová analýza ve spojení s teorií podobnosti, která vyústí k sestavení příslušných kriteriaálních rovnic [6, 11].

Difúzní koeficient, který vystupuje v rychlostních rovnicích v plynné a kapalně fázi, závisí od vlastností jednotlivých složek tvořících fáze a od podmínek, při kterých difúze probíhá. Výpočet pro plynnou směs může mít následující podobu [6, 11, 12]:

$$D_{Ag} = \frac{80,260 \cdot 10^{-4} T^{1,78} (1 + \sqrt{M_A + M_B})}{P \cdot (v_A^{1/3} + v_B^{1/3})^2 \sqrt{M_A + M_B}} \quad (3.9)$$

kde: D_{Ag} je difúzní koeficient složky A v plynné fázi
 T je teplota v K
 M_A, M_B jsou molární hmotnosti složek ve fázi
 v_A, v_B jsou molární objemy

Difúzní koeficient v kapalně fázi dosahuje menších hodnot nežli v plynech, což vyplývá ze skutečnosti větší koncentrace molekul v kapalinách oproti plynům a tedy i vyššímu molovému objemu difundující složky. Ve zředěných kapalných roztocích lze difúzní koeficient určit dle následujícího vztahu [6, 12]:

$$D_{Al} = \frac{7,4 \cdot 10^{-15} (2,6 M_B)^{0,5} T}{v_A^{0,6} \mu_{DVI}} \quad (3.10)$$

kde: D_{Al} je difúzní koeficient složky A v kapalně fázi
 T je teplota v K
 M_B je molární hmotnost vody
 v_A je molární objem složky A

Koeficienty přestupu látky ve fázích (k_{gp} a k_{lc} , souhrně k_c) lze považovat za funkci níže uvedených veličin, [13]:

$$k_c = f(w, D, \rho, \mu_{DV}, D_A) \quad (3.11)$$

kde: w je rychlost kapky ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 D je průměr kapky (m)
 ρ je hustota kapaliny ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 μ_{DV} je dynamická viskozita ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
 D_A je difúzní koeficient ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

čož predstavuje soubor pěti nezávislých a jedné závislé proměnné společně se třemi primárními rozměrovými jednotkami (hmotnost – kg, délka – m, čas – s). Podle Buckinghamovi rozměrové analýzy založené na funkci bezrozměrných π argumentů, lze odvodit následující vztah obsahující tři bezrozměrné π skupiny [13]:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3) \Rightarrow \frac{k_c D}{D_A} = f\left(\frac{Dw\rho}{\mu_{DV}}, \frac{\mu_{DV}}{\rho_L D_A}\right) \quad (3.12)$$

kde:

$$\frac{k_c D}{D_A} = Sh \quad \text{je Sherwoodovo kritérium}$$

$$\frac{Dw\rho_L}{\mu_{DV}} = Re \quad \text{je Reynoldsovo kritérium}$$

$$\frac{\mu_{DV}}{\rho D_A} = Sc \quad \text{je Schmidtovo kritérium}$$

Reynoldsovo kritérium vyjadřuje poměr setrvačných a viskózních sil a je tedy vyjádřením míry intenzity turbulence v proudící tekutině. Schmidtovo kritérium vyjadřuje vztah mezi kinematickou viskozitou proudící tekutiny a difúzním koeficientem pasivní složky v ní obsažené. Sherwoodovo kritérium vyjadřuje poměr celkového množství transportované složky (konvekcí i difúzí) v proudící tekutině k množství transportované složky pouze prostou difúzí.

Výsledná obecná kritériální rovnice, která na základě experimentálně ověřené hodnoty Sherwoodova kritéria umožňuje určit hodnotu koeficientů přestupu látky ve fázích, má tvar [13]:

$$Sh = f(Re, Sc) \quad (3.13)$$

V odborné literatuře je navrženo několik způsobů výpočtů pro konkrétní případy. Pro případy plně vyvinutého turbulentního proudění uvnitř potrubí s hladkým povrchem vnitřní stěny má Sherwoodovo kritérium následující tvar [13]:

$$Sh = 0,023Re^{0,8}Sc^{0,4}; Sc > 0,5 \quad (3.14)$$

V situacích, kdy kapalina stéká uvnitř svislého potrubí či mezi rovnoběžnými deskami v přítomnosti protiproudu plynné fáze, se doporučuje korelace experimentálních údajů pro Sherwoodovo kritérium na straně plynné fáze v podobě [13]:

$$Sh = 0,00814Re^{0,83}Sc^{0,44}\left(\frac{4\Gamma}{\mu_{DVI}}\right)^{0,15}; 2000 < Re < 20000, \left(\frac{4\Gamma}{\mu_{DVI}}\right) < 1200 \quad (3.15)$$

kde:

$$\Gamma \quad \text{je průtok kapaliny na jednotku šířky}$$

$$\mu_{DVI} \quad \text{je dynamická viskozita kapaliny}$$

Pro absorpci v náplňové koloně lze koeficient přestupu látky v plynné fázi odvodit z následující podoby Sherwoodova kritéria [12]:

$$Sh = 0,11Re^{0,8}Sc^{1/3} \quad (3.16)$$

V tomtož systému má kritériální rovnice pro výpočet koeficientu přestupu látky v kapalně fázi tvar [12]:

$$Sh = 0,015Re^{0,66}Sc^{1/3} \quad (3.17)$$

Pro případ letící kapky v proudící plynné fázi byl navržen následující způsob výpočtu koeficientu přestupu látky na straně plynné fáze ve formě [14]:

$$\frac{k_{gP}M_gDP}{D_{Ag}\rho_g} = 2 + 0,552Re^{0,5}Sc^{1/3} \quad (3.18)$$

kde: M_g je střední molární hmotnost plynné směsi
 P je celkový tlak plynné směsi
 D_{Ag} je difúzní koeficient absorbované složky v plynné fázi
 ρ_g je hustota plynné fáze

Pro výpočet koeficientu přestupu látky v kapalně fázi s krátkou dobou kontaktu v proudě plynné fáze lze aplikovat vztah [14]:

$$k_{lc} = 2 \left(\frac{D_{Al}}{\pi t_k} \right)^{0,5} \quad (3.19)$$

kde: t_k je kontaktní doba kapalně a plynné fáze

3.4 ABSORPCE S CHEMICKOU REAKCÍ

V soustavě, ve které absorbovaná složka vstupuje do chemické reakce s jednou či více složkami kapalného absorbentu, lze pozorovat nejvyšší možnou hnací sílu difúzního procesu. Absorbovaná složka mění v absorbentu svoji chemickou podstatu, a tím se z roztoku odstraňuje. Všeobecně má doprovodná chemická reakce příznivý vliv na rychlost reakce. Většinou se volí typ absorpčního roztoku, který lze lehce regenerovat, jestliže není účelem absorpce vytvořit výsledný produkt [6].

Na rychlosti absorpce s chemickou reakcí se současně podílí rychlost fyzikální difúze a rychlost chemické reakce. Urychlení absorpce vlivem chemické reakce se charakterizuje reakčním faktorem. Ten vyjadřuje, kolikrát se hodnota koeficientu přestupu hmoty zvýší v důsledku doprovodné chemické reakce vůči jeho hodnotě bez chemické reakce. Reakční faktor může být definován pomocí Hattova kritéria [15]:

$$Ha = \frac{\sqrt{\left(r \frac{D_{Al}}{C_{Ag}}\right)}}{K_C} \quad (3.20)$$

kde:	Ha	je Hattovo kritérium
	r	je rychlost reakce vztažená k jednotkovému objemu reakční směsi
	D_{Al}	je difúzní koeficient složky A v kapalně fázi

Při nízkých hodnotách Hattova kritéria (řádově $\leq 10^{-2}$) je rychlost chemické reakce značně menší než rychlost fyzikální difúze. Doba prodlení absorbované složky v absorpčním roztoku není dostatečná, aby její významný podíl zreagoval.

Při středně velké rychlosti chemické reakce a dostatečné rychlosti fyzikální difúze (hodnoty Hattova kritéria řádu 10^{-1} až 10^0) opět složka pronikne do celého objemu kapaliny a přitom z převážné části zreaguje. Rychlost absorpce je pak úměrná době, po kterou se kapalina v prostoru absorpčního zařízení zdrží.

Při hodnotách Hattova kritéria řádově větší jak 10^0 je rychlost chemické reakce tak vysoká, že se veškerá absorbovaná složka přemění na produkt chemické reakce již v blízkosti fázového rozhraní. Absorpční rychlost je pak úměrná velikosti plochy fázového rozhraní [15].

3.5 ABSORPČNÍ ZAŘÍZENÍ

Průmyslová zařízení, která využívají absorpční pochody k odstranění kontaminantů z plynných směsí, se nazývají pračky plynů, absorbéry, absorpční kolony či scrubbery. Absorbéry se navrhují s cílem o dosažení maximální plochy mezifázového rozhraní mezi plynnou a kapalnou fází, minimálních tlakových ztrát v kapalném i plynném cirkulačním okruhu, restrikce možného zahlcení vnitřního prostoru absorpční komory kapalným absorbentem a ucpání pevnými nečistotami.

Z hlediska styku kapalně a plynné fáze lze industriální absorpční zařízení rozlišit do dvou základních kategorií [1, 10]:

- **Absorbéry se souvislým (nepřerušovaným) kontaktem fází**
- **Absorbéry se stupňovitým (přerušovaným) kontaktem fází**

3.5.1 Absorbéry se souvislým kontaktem fází

Absorbéry se souvislým kontaktem fází tvoří značné množství konstrukčně pestrých separačních zařízení. Příkladem mohou být kolony se skrápěnou hlavou, stripovací kolony, kolony s fluidní vrstvou, povrchové absorbéry a absorbéry s mícháním.

V následujících podkapitolách jsou popsány náplňové kolony, z důvodu jejich nejmarkantnějšího rozšíření v průmyslu a sprchové absorbéry, které jsou předmětem našeho zájmu.

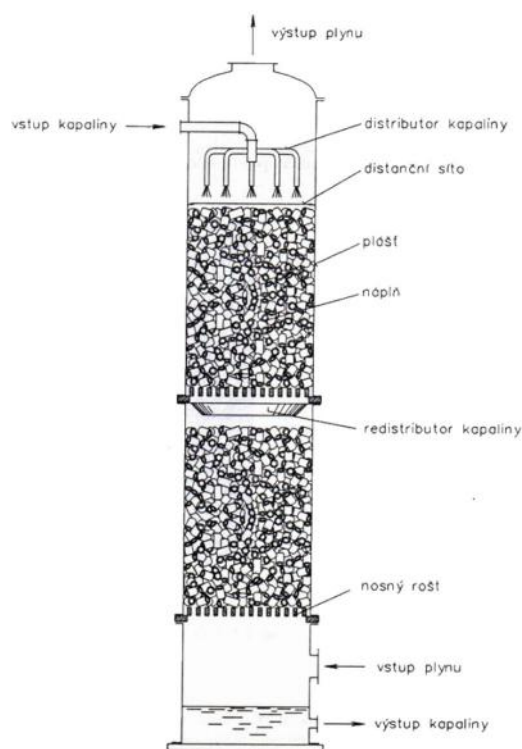
3.5.1.1 Náplňové kolony

Náplňové absorbéry jsou konstruovány v podobě vertikálních válců, v nichž jsou uloženy na roštových nosnících náplně, které zajišťují maximální kontaktní plochu mezi kapalnou a plynnou fází. Tok kapalně a plynné fáze je pro vyšší účinnost, ve většině případů, v protiproudém uspořádání, kdy kapalná fáze z horní části kolony stéká v podobě tenkého filmu po povrchu výplní

a následně odtéká ve spodní části. Současně vstupuje u dna kolony plynná fáze, prostupuje vnitřním prostorem a ústí v horní části.

Absorpční náplň může být uniformní po celé délce kolony nebo může být složena z více typů. Důležité je, aby náplně zabezpečovaly co největší plochu mezifázového styčného povrchu, velký účinný průřez, nízkou mezerovitost, chemickou odolnost, cenovou přijatelnost a malou objemovou váhu pro nízký tlak na nosnou konstrukci stěny. Podle profilu uložené náplně se náplňové kolony rozlišují na kolony s pravidelně uspořádanou (strukturovanou) náplní a s volně sypanou náplní. Náplně jsou vyráběny z plastu, kovu a keramiky, kdy každý materiál se vykazuje pozitivními i negativními vlastnostmi a je vhodný pro rozdílné aplikace. Kovové náplně jsou nejpoužívanější, umožňují širší rozsahy toků fází, mají menší mezerovitost, jsou nerozbitné a levnější, avšak podléhají korozi. Náplně z plastového materiálu se vyznačují chemickou i korozivní odolností, nižší hmotností, bohužel jsou méně smáčivé pro vodné roztoky. Keramické náplně jsou korozivzdorné, dobře smáčivé a relativně levné, na druhou stranu jsou křehké, citlivé na prudké změny teplot a mají nejmenší mezerovitost.

Náplňové absorbéry jsou v chemickém průmyslu nejrozšířenějším typem absorpčního zařízení. Jejich relativně jednoduchá a levná konstrukce, univerzálnost, nízké tlakové ztráty a materiálová odolnost je předurčuje k uplatnění v aplikacích, kde dochází k odporu proti přestupu látky mezi fázemi, kde jsou kladeny vyšší nároky na rozměr absorpčních kolon a tlakové poměry toků obou médií [7, 14, 16].



Obr. 2 Schéma náplňového absorbérů [17]

3.5.1.2 Sprchový Scrubber

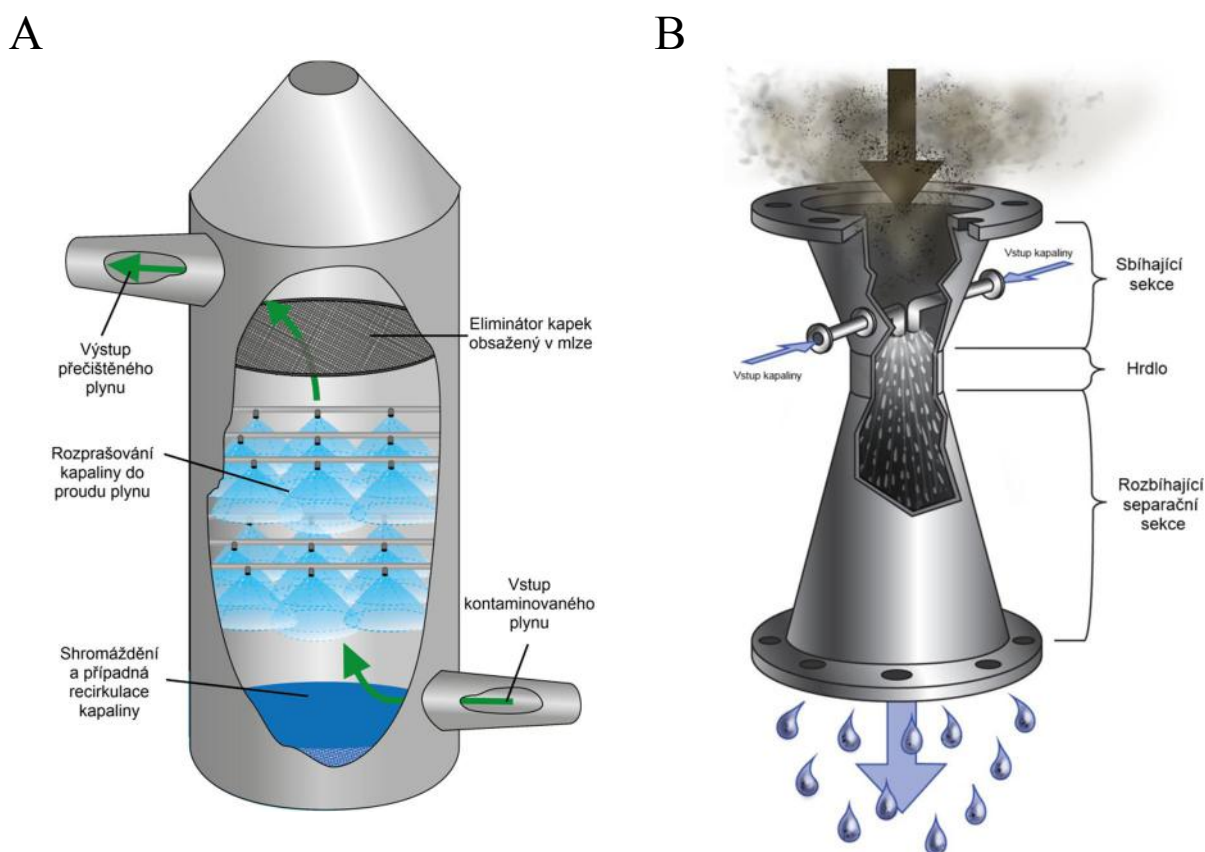
Sprchové absorbéry slouží k odstranění plynných polutantů i pevných částic z plynných směsí prostřednictvím kontaktu s rozstříkovaným kapalným absorbentem. Konstrukčně se jedná o horizontálně umístěné cylindrické zařízení, uvnitř kterého dochází k rozprašování kapalného

absorbentu v protisměru do proudu kontaminovaného plynu soustavou sprch či roštů s tryskami. Cílem je dosažení co největší atomizace kapaliny rovnoměrně po celém průřezu kolony, dojde tak k nárůstu celkové plochy mezifázového povrchu pro maximální účinnost absorpce. Hrozí nebezpečí únosu jemných kapiček z absorbéru proudem plynu nebo tvorba aerosolu, čemuž se předchází instalací eliminujících přepážek na výstupu plynné fáze.

Plyn je do scrubberu přiváděn ze spodní části kolony v axiálním nebo tangenciálním směru. V druhém jmenovaném případě bude docházet vlivem odstředivých sil ke kontaktu pevných částic obsažených v plynné fázi se stěnou kolony, čímž ztratí svoji kinetickou energii a následně budou pohlceny kapalnou fází a odváděny pryč z vnitřního prostoru kolony.

Míra účinnosti přestupu látek mezi fázemi je dána také dobou zachytu kapaliny uvnitř kolony, která je v případě sprchových scrubberů poměrně krátká a přímo úměrná rychlosti proudění kapalně fáze. Proto se tento typ zařízení využívá v situacích, kdy dochází k zachytu dobře rozpustné složky do kapalně fáze a kdy plynná fáze obsahuje pevné mechanické nečistoty.

Sprchový absorbér patří mezi konstrukčně nejjednodušší typy, je cenově nejlevnější a používá se tam, kde je potřeba čistit velké objemy plynů. Při provozu dochází k malé tlakové ztrátě, malému hydraulickému odporu a citlivost na znečištění je minimální. Účinnost mimo jiné také závisí na optimálním návrhu hydrauliky kolony [1, 6, 16].



Obr. 3 Sprchový absorbér (A) a Venturiho scrubber (B) [18, 19]

Venturiho scrubber

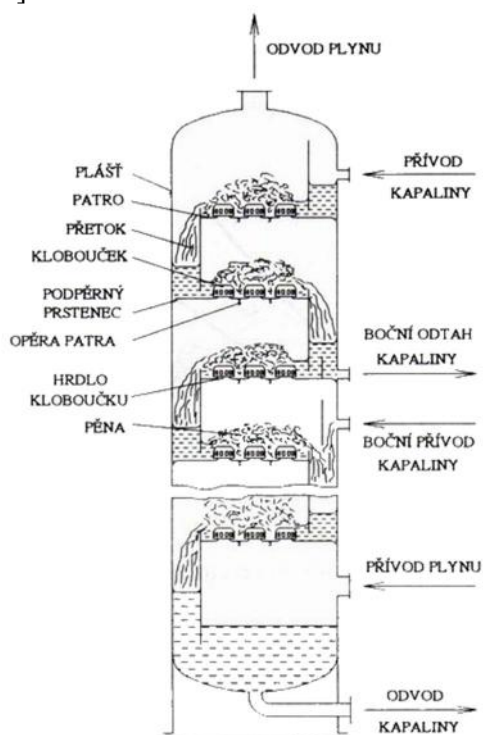
Venturiho scrubber je speciálním typem sprchového absorbéru. V tomto zařízení je rozprašování kapalně fáze pozitivně ovlivněno hybností fáze plynné. Obě fáze spolu procházejí zúženým hrdlem

(tzv. Venturiho trubici), které podpoří turbulenci v systému a tím i rozpad kapalně fáze na menší struktury. K částečné separaci médií dochází již v oblasti difuzoru a posléze v cyklónových odlučovačích či v konstrukčně speciálně navržených technologiích. Vzhledem k uspořádání, pracuje Venturiho scrubber pouze v souproutém uspořádání. Vhodný je zvláště pro separaci mechanických nečistot v emisních plynech [1, 20, 21].

3.5.2 Absorbéry se stupňovitým kontaktem fází

Stupňovitý kontakt kapalně a plynné fáze je, v těchto druzích absorbéru, řešen soustavou patrových kolon umístěných ve vertikálně položeném válci s vestavěnými profily s různou formou úprav. Dle konstrukce pater se rozlišují např. síťová patra s přepadem, kloboučkové patra s přepadem, ventilové patra s přepadem, bezpřepadová patra, patra s více přepady, kaskádová patra a další. Využívání patrových kolon je v současné době méně rozšířené, avšak stále aktuální, vzhledem k jejich relativní konstrukční jednoduchosti a investičním i provozním nákladům.

Z hlediska kontaktu fází se patra kolony rozdělují na patra pracující v protiproudém nebo křížovém režimu (Obr. 4) [7, 14].



Obr. 4 Schéma patrové kolony s přepadem pracující v křížovém režimu [17]

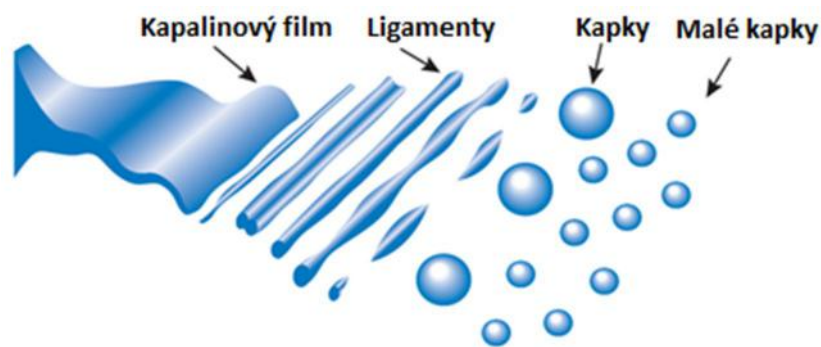
3.6 ATOMIZACE KAPALINY

Proces rozpadu kapalinového filmu na jednotlivé kapky určitých velikostí v závislosti na počáteční tloušťce kapalinového filmu, jeho rychlosti vzhledem k okolnímu médiu a vlastnostech kapaliny (viskozita a povrchové napětí) popsal velmi dobře ve své práci Lefebvre [22]. Fraser a Eisenklam [23] definovali tři režimy rozpadu kapalinové clony. Clark [24] rozšířil Taylorův model pro rozpad kapalinové clony na kapky pro turbulentní tok a navrhnul vliv velikosti kapek, viskozity a povrchového napětí na hodnotu kritického Webrova čísla. Tharakan a kol. [25] odvodili diferenciální rovnice pro nelineární růst vlny v tenkém kapalinovém filmu, vyličili proměnlivost

velikosti a geometrie ligamentů na Weberově čísle a závislost velikosti amplitudy počáteční poruchy na proces rozpadu. Ahmed a kol. [26] experimentálně studovali efekt viskozity a hustoty kapaliny, průměru trysky a rychlosti proudění na rozpad kapalinové clony. Senecal a kol. [27] zjistili, že existují nejméně dva odlišné režimy atomizace kapalného filmu v závislosti na hodnotě Weberova čísla u tlakově-vířivé trysky (pressure-swirl atomizer). El-Sayed [28] studoval vliv Weberova čísla, elektrického pole, poměr hustot kapaliny a plynu na vývoj dvou a tří dimensionální poruchy symetrického a antisymetrického typu. V posledních letech byl výzkum atomizace kapalinových clon soustředěn na vývoj a vylepšení stávajících numerických modelů, které předpovídají distribuci kapek v atomizujících kapalinách. Mitra a Li [29], Kim a kol. [30] a Preusser [31] vytvořili model předpovídající distribuci velikostí a rychlostí kapek ve sprejích. Vyšetřovali efekt distribuce průměru kapek a jejich rychlostí ve spreji v závislosti na podmínkách proudění. Základní experimentální práce v oblasti atomizace kapalin se realizovaly využitím optických metod a vyhodnocovaly se parametry ve vodných roztocích při různých hodnotách vstupních tlaků [32, 33]. Ayres a kol. [34] vyvinuli matematický model k předpovědi společné distribuce velikosti a rychlosti kapek ve spreji. Belhadef a kol. [35] vyvinuli Eulerovský model pro atomizaci kapalinového filmu při vysokých hodnotách Weberova a Reynoldsova čísla pro tlakově-vířivý atomizér. Alekseenko a kol. [36] a Ibrahim a Jog [37] se zabývali modelováním nelineární nestability a rozpadu prstencového kapalného filmu. Wahono a kol. [38] využili vysokorychlostní snímání obrazu ke kvalitativnímu zkoumání struktury spreje. Negeed [39] studoval numericky i experimentálně rozpad kapalinové clony na kapky pro účely sprejového chlazení v tepelných výměnících, využil laserovou optickou metodu PDA. Mezi další studie zaměřující se na základní charakteristiky atomizujících se kapalin, jako je distribuce velikosti kapek, vztahy mezi poměrem vstupního tlaku a průtoku kapaliny a hmotnostním rozložením hustoty kapaliny ve spreji při různých hydrodynamických podmínkách, jmenujme [40–43]. Obecně bylo provedeno mnoho prací zaměřujících se na výzkum trysek produkujících rozstřík plného kuželu v různých oblastech konečné aplikace [44–54].

Atomizace kapaliny, opouštějící ústí trysky, může podle jednotlivých charakterů toků, jejichž tvar se odvíjí od rychlosti toku kapaliny, tlaku kapaliny v rozprašovačích, hustotě kapaliny a geometrii konstrukce vnitřního prostoru rozprašovačů, vznikat několika způsoby.

Rozprašování lze chápat jako defekt ustáleného vlivu povrchového napětí působením vnitřních a vnějších setrvačných sil. Povrchové napětí má, ve snaze minimalizovat povrchovou energii, sklon formovat kapalinu do kulovitěho tvaru. Změně v geometrii vytvořených kapek se snaží čelit, společně s povrchovým napětím, viskozita kapaliny. Aerodynamické síly mohou přispět k rozpadu kapaliny díky svým vnějším deformačním silám působících na její povrch. Pokud jsou síly povrchového napětí kapaliny překonány silami vnějšími, nastane rozpad kapaliny. Primární atomizace kapaliny zaujímá oblast rozpadu počátečního celistvého vodního proudu kapaliny na různě velké kapalinové fragmenty (ligamenty) a velké kapky. Nestabilní produkty vzniklé primární atomizací se dále rozpadají na menší kapky, proces se nazývá sekundární atomizace. Oba procesy jsou závislé na okolních podmínkách (tlak, teplota, rychlost okolního plynného média) a především na fyzikálních vlastnostech kapaliny (viskozita, povrchové napětí, hustota). Primární atomizace závisí také na charakteru toku poskytovaného rozprašovači, sekundární atomizace je naopak velmi citlivá na okolní podmínky [22, 32, 55].



Obr. 5 Průběh rozpadu kapalinové clony během primární a sekundární atomizace [56]

Atomizace kapaliny je tedy silně ovlivněna hustotou kapaliny, viskozitou a povrchovým napětím, kdy účinek hustoty je poněkud nižší, jak ukazují experimentální údaje [22]. Naopak vliv povrchového napětí je zcela zásadní. Při primární atomizaci působí rušivé síly proti silám konsolidačním a tím způsobují oscilaci kapaliny. V momentě, kdy je efekt působících rušivých sil silnější než síly konsolidační (povrchové napětí), objem kapaliny se rozpadne na menší formace (ligamenty a velké kapky). Poté následuje proces sekundární atomizace, kdy se větší kapky či ligamenty v plynném prostředí rozpadají na menší kapky v důsledku větších relativních rychlostí či turbulence [57]. Řídicím parametrem, který definuje poměr rušivých setrvačných sil a regeneračních sil povrchového napětí, je bezrozměrné Weberovo číslo:

$$We = \frac{\rho w^2 d}{\sigma_L} \quad (3.21)$$

kde ρ označuje hustotu tekutiny, w je rychlost tekutiny vyvolávající rozpad, d je charakteristická velikost kapalinové struktury a σ_L je povrchové napětí kapaliny. Specifická hodnota Weberova čísla závisí na druhu setrvačných sil vyvolávajících rozpad kapaliny, obecně čím větší hodnota Weberova čísla, tím pozorujeme vyšší tendence k rozpadu kapaliny [58]. Vysoce rozprašující spreje mají vysokou hodnotu We (≥ 400), zatímco slabě rozprašující spreje mají nízkou hodnotu We (≤ 100) [59].

Viskozita je další velmi významný parametr ovlivňující distribuci velikosti kapek ve spreji, především pak režim proudění kapaliny ve vnitřním prostoru geometrie trysky, čímž následně ovlivňuje morfologii a vzor vyvíjeného kapalinového spreje. Vliv viskozity na tok kapaliny v trysce je poměrně složitá záležitost a závisí na konkrétním typu atomizéru. Zvyšující viskozita kapaliny (platí i pro povrchové napětí) napomáhá soudržnosti kapaliny a brání jejímu rozpadu, jelikož kapalina při toku i atomizaci musí překonávat větší viskózní síly, což má za následek potřebu dodávat vyšší množství energie proudící kapalině na trysku, pro zajištění žádané jemnosti atomizace oproti kapalinám s nižší viskozitou (povrchovým napětím). Obecně se tak distribuce velikostí vznikajících kapek zvyšuje se zvyšující se viskozitou kapaliny a zároveň dochází ke zpoždění celého procesu atomizace kapaliny [22, 60]. Viskozita, stejně jako povrchové napětí, snižuje tendence kapaliny k rozpadu, což je vyjádřeno v bezrozměrném Ohnesorgeho čísle jako poměr viskózních sil a sil povrchového napětí:

$$Oh = \frac{\mu_{DVI}}{\sqrt{\sigma_L \rho_L d}} \quad (3.22)$$

kde μ_{DVI} je dynamická viskozita kapaliny a ρ_L je hustota kapaliny.

Viskozita představuje odpor kapaliny vůči toku z důvodu existence vnitřního tření kapaliny. Zvýšení viskozity způsobuje [32, 61, 62]:

- snížení průtoku kapaliny
- zvýšení minimálního tlaku protékající kapaliny pro udržení adekvátního úhlu rozstříku spreje
- zvýšení proudové kapacity kapaliny
- zvýšení velikosti kapek

Povrchové napětí vytváří tenkou elastickou povrchovou vrstvu kapaliny, která má tendenci smršťovat se na minimální plochu. Zvýšení povrchového napětí způsobuje [32]:

- zvýšení minimálního provozního tlaku trysky
- snížení úhlu rozstříku spreje
- zvýšení velikosti kapek

Faktory, jako rozptyl a vzor oblasti atomizace kapalného filmu, úhel rozstříku, velikost vznikajících kapek a proudová hustota rozložení kapek, mohou být pro různé spreje semi-empiricky korelovány užitím Reynoldsova, Webrova, Ohnesorgeho čísla a poměrem hustot kapalně a plynné fáze [59].

Vliv gravitačních sil na rozpad kapalinových struktur či jednotlivých kapek vyjadřuje bezrozměrné Bondovo číslo [63]:

$$Bo = \frac{\rho_L g d^2}{\sigma_L} \quad (3.23)$$

kde g je gravitační zrychlení. Jedná se o poměr vnějších objemových sil (gravitačního zrychlení) a povrchového napětí kapaliny. Pokud hodnota Bondova čísla překoná určitou hranici, dojde k rozpadu kapalinové struktury na menší části, což je vyvoláno překonáním sil povrchového napětí oscilacemi v objemu kapaliny vlivem sil vnějších.

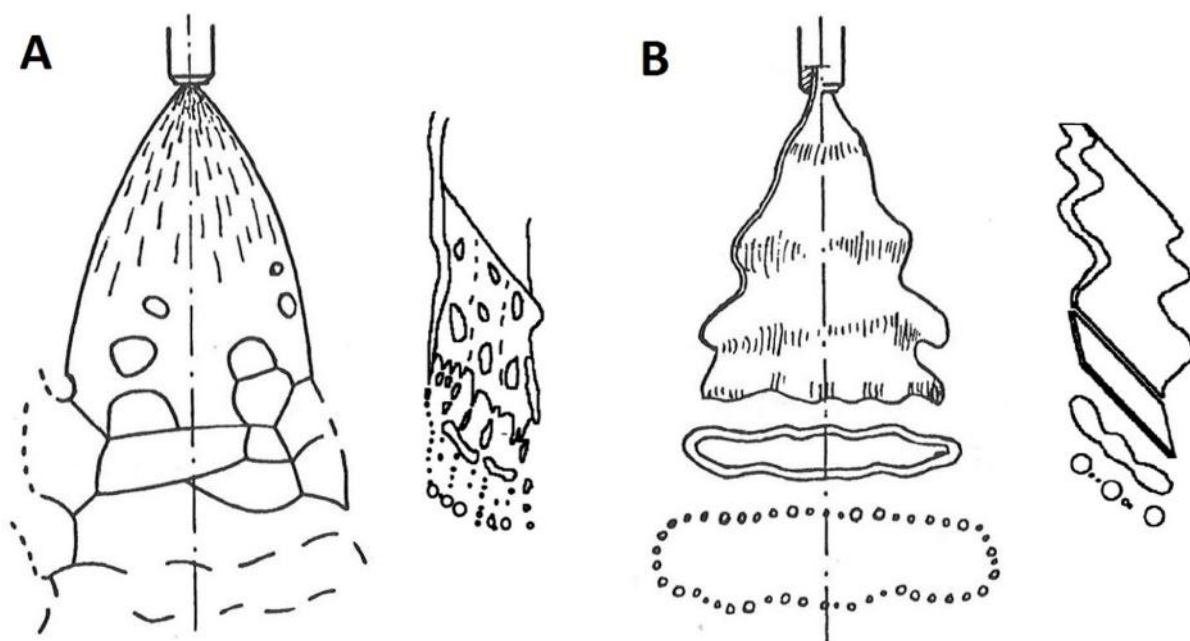
3.6.1 Rozpad kapalinové clony

Rozpad kapalinové clony nastává vlivem působení rušivých vzdušných sil a sil povrchového napětí. Vzdušné síly přispívají k nestabilitě v kapalině. Vyvolávají změnu lokálního atmosférického tlaku, která má tendenci expandovat do míst s nižším atmosférickým tlakem nebo stáčet proud kapaliny. Pokud vzdušné vlivy překonají síly povrchového napětí, které usilují o návrat vyčnívajících nestabilit do původního stavu, deformuje se soudržnost kapalného filmu. Nestabilita na povrchu kapaliny vede k následné primární atomizaci, doprovázenou atomizací sekundární [22].

S rostoucí vzdáleností kapalinové clony od ústí trysky se její tloušťka ztenčuje, což lze považovat za jednu z charakteristik napomáhající k rozpadu, kdy ztenčení kapalinové clony

zároveň ovlivňuje průměr následně vytvořených kapalinových ligamentů a kapek. Tloušťka kapalinové stěny patří tedy mezi řídicí parametr rozpadu kapalinové clony. Mechanismy rozpadu kapalného filmu lze formulovat podle místa nebo tvaru rozpadu na tři základní. Během procesu atomizace nemůžeme přesně definovat hranice jednotlivých režimů rozpadu a v určitých případech mohou přecházet mezi sebou či existovat společně [23, 64, 65]:

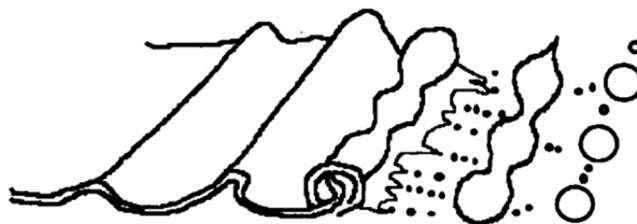
- V perforovaném režimu rozpadu kapalinové clony se v kapalinové stěně objevují díry, jejichž okraje jsou tvořeny kapalinou nacházející se původně ve vnitřním prostoru. Velikost děr se postupně zvětšuje, až do doby, kdy se okraje sousedních děr spojí za současné tvorby vláken a kousků kapalin, které se dále rozpadnou na kapky rozmanitých velikostí. Výsledné velikosti kapek jsou velmi rozličné, jelikož vznikající nestability jsou markantně ovlivňovány vlastnostmi kapaliny i okolního prostředí, nicméně obecně jsou produkovány kapky užší distribuce (v porovnání s vlnovým režimem), jelikož pozice i velikost deformací jsou pravidelnější nežli u vlnového. Obvykle je tento režim charakteristický pro případy, kdy rychlost kapaliny opouštějící ústí trysky je nižší, jelikož síly povrchového napětí převládají nad odporovými silami prostředí a silami viskózními.
- V sinusovém režimu (či vlnovém režimu) dochází k rozpadu kapalného filmu vlivem deformací vznikajících v periodickém vlnovém pohybu, kdy amplitudy vln dosáhnou kritických hodnot v určité vzdálenosti od ústí trysky. Postihnuté oblasti mají tendenci se odtrhávat a prostřednictvím účinku povrchového napětí se rychle smršťují. Vlivem okolního vzduchu nebo turbulence se následně rozpadají na menší kapky. Rozpad vln je v rámci kapalinové clony vysoce heterogenní a proto rozsah velikosti výsledných kapek má značně širokou distribuci. Tento režim se uplatňuje při vyšších rychlostech kapaliny opouštějící ústí trysky.



Obr. 6 Perforovaný (A) a vlnový (B) režim rozpadu kapalinové clony [64, 65]

- V režimu při okraji lemu se účinkem povrchového napětí volný lem smrští do širší hrany, která se následně rozpadá podobně jako volný proud. Nestability u okraje se rozpadají do

formy kapek napojených na povrch kapalně vrstvy tenkými vlasečnicemi, ze kterých se formují další kapky. Vznikají tak velké kapky obklopené značným počtem malých dceřiných kapiček. Tento režim se uplatňuje při velkém povrchovém napětí a viskozitě kapaliny.



Obr. 7 Režim rozpadu kapalinové clony při okraji lemu [65]

U většiny typů trysek před samotnou atomizací kapaliny dochází k vývoji kapalinové clony z původně celistvého kapalného toku uvnitř těla trysky. Kapalinová clona, vytvářející se za ústím trysky, se vlivem příslušného mechanismu rozpadu dezintegruje na kapalinové ligamenty a dále pak na kapky daných velikostí. Velikost výsledných kapek je úzce spjatá s tloušťkou kapalinové clony [66]. Primární atomizace je silně ovlivněna hodnotou Weberova čísla kapalinového proudu (u ústí trysky):

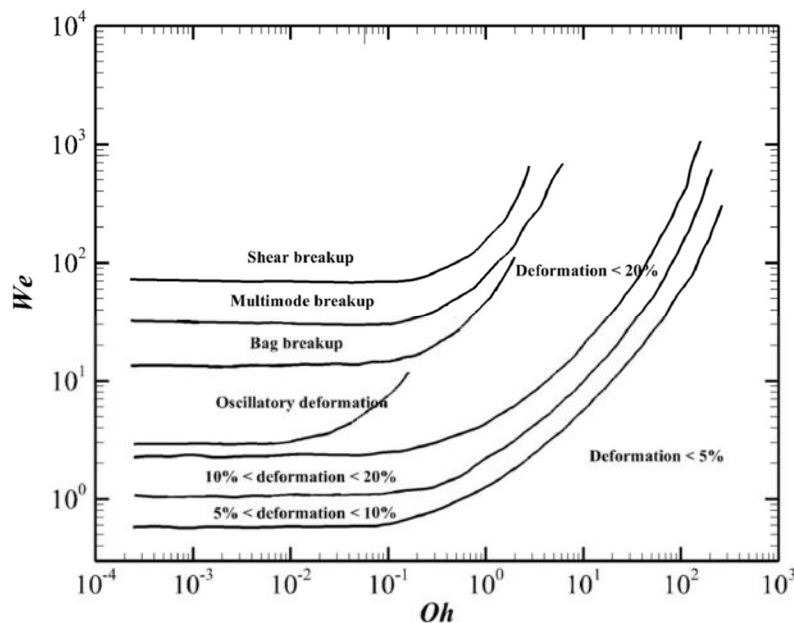
$$We_{jet} = \frac{\rho_L w_o^2 d_o}{\sigma_L} \quad (3.24)$$

kde d_o je průměr ústí trysky a w_o je rychlost proudu kapaliny v ústí trysky. Pokud hodnoty Weberova čísla kapalinového proudu nabývají nižších hodnot, síly povrchového napětí brání vytváření nových kapalinových povrchů, čímž brání rozpadu kapalinové clony. Naopak při vyšších hodnotách We_{jet} dochází vlivem destruktivních setrvačných sil k rozpadu kapalinové clony na ligamenty a kapky. Kritická hodnota proudového Weberova čísla popisuje začátek poklesu radiální vzdálenosti rozpadu od axiální osy trysky, která se v závislosti na typu trysky pohybuje kolem hodnoty 1000 [67].

Po fázi primární atomizace následuje proces sekundární atomizace, která je v literatuře vyjádřena pomocí bezrozměrného Weberova čísla pro plynnou fázi:

$$We_g = \frac{\rho_g w^2 D}{\sigma_L} \quad (3.25)$$

kde ρ_g je hustota okolního plynu a D průměr kapky v daném místě. Viskózní síly kapek jsou významné pro hodnoty $Oh > 0,1$. Pro Oh pod tuto hodnotu bylo pozorováno, že rozpad je nezávislý na Oh . Pro $Oh < 0,1$, byl přechod We pro jednotlivé režimy rozpadu prakticky konstantní [68–70]. Jednotlivé režimy rozpadu jsou rozděleny dle hodnoty We na deformačně-vibrační rozpad kapek pro $0 < We < 11$, kapsový rozpad (bag breakup) pro $11 < We < 35$, multimodální rozpad pro $35 < We < 80$, ztenčení clony (sheet thinning) pro $80 < We < 350$ a katastrofický rozpad pro $We > 350$. Toto však neplatí pro podmínky s vyššími hodnotami Oh . Režimy sekundární atomizace jsou často znázorněny v prostoru $We-Oh$ (Obr. 8) [70, 71].



Obr. 8 Režimy rozpadu v prostoru We - Oh [71]

Pro objektivní posouzení, jaký režim ve skutečnosti nastal v procesu atomizace, bylo pro $Oh \rightarrow 0$ navrženo několik korelací pro kritické Weberovo číslo (We_c). Jedna z takových korelací byla navržena pro $Oh < 4$ Gelfandem takto [72]:

$$We_c = We_{cOh \rightarrow 0}(1 + 1,5Oh^{1,74}) \quad (3.26)$$

kde $We_{cOh \rightarrow 0}$ představuje kritickou hodnotu Weberova čísla pro nízké hodnoty Oh dle jednotlivých režimů uvedených výše.

Proces vzniku kapalinové clony lze v našem případě spirálové trysky (viz kapitola 4.2 Spirálová tryska), kdy je kapalinová clona vytvořena odrazem kapaliny od jednotlivých ploch spirály, považovat za analogický s radiálním rozptylem kapalinového proudu přes horizontální rovinu. Na základě tohoto předpokladu může být spočítána tloušťka kapalinové clony (t_{sh}) na základě konceptu podobnosti mezní vrstvy volného povrchu vyvinutého Watsonem [73] a použitým Renem a kol. [74] a Zhou a Yu [75]. Na základě předpokladu přítomnosti turbulentního toku kapaliny na odrazových plochách šroubovice těla trysky, může být tloušťka clony na okraji spirál spočítána takto:

$$t_{sh} = \frac{d_o^2}{8r_h} + \frac{0,0245d_o^{1/5}r_h^{4/5}}{Re_o^{1/5}} \quad (3.27)$$

kde d_o představuje průměr ústí trysky (11,1 mm), r_h šířku spirály (6,45 mm) a Re_o je hodnota Reynoldsova kritéria v ústí trysky vyjádřena následovně:

$$Re_o = \frac{d_o w_o \rho_L}{\mu_{DVI}} \quad (3.28)$$

Pro odhad rychlosti spreje v dané radiální vzdálenosti (r_r) od axiální osy trysky je nutné zvážit míru vlivu viskózní interakce kapaliny s povrchem spirály. Proto je nedimenzionální tloušťka kapalinové clony definována jako poměr skutečné tloušťky clony (t_{sh}) k tloušťce ideální neviskózní kapalinové clony (t_{sh0}):

$$\delta = \frac{t_{sh}}{t_{sh0}} = 1 + \frac{0,196}{Re_o^{1/5}} \left(\frac{r_r}{d_o} \right)^{9/5} \quad (3.29)$$

Průměrná rychlost kapalinové clony na okraji spirály může být vyjádřena takto [74]:

$$w_{sh} = \frac{K_n \sqrt{\Delta p}}{2\pi r_h t_{sh0} \delta} \quad (3.30)$$

kde K_n je průtokový faktor (viz rovnice (4.1)) a Δp je tlaková ztráta v rámci trysky.

Další rozpad na menší struktury je způsoben lokálními nestabilitami, které vyplývají z růstu amplitud vln přítomných v kapalinové cloně. Vlnová délka při rozpadu kapalinové clony má určující charakter pro velikost vznikajících ligamentů a konečných velikostí kapek. Dombrowski a Johns [76] vyvinuli teorii předpovídající nestabilitu kapalinových clon v nevazkém plynu. Model předpokládá existenci vln na povrchu kapalinové clony, při jejichž posunu platí v rámci kapalinové clony rovnováha sil setrvačných, tlakových a sil povrchového napětí. Po zjednodušení lze rovnováhu sil vyjádřit následovně:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \tau} \right)^2 + \frac{\mu_{DVI} \tilde{\omega}^2}{\rho_L} \left(\frac{\partial f}{\partial \tau} \right) - \frac{2(\rho_g \tilde{\omega} w_{sh}^2 - \sigma \tilde{\omega}^2)}{\rho_L t_{sh}} = 0 \quad (3.31)$$

kde τ je čas, f je parametr rozpadu a $\tilde{\omega}$ je vlnová délka. Parametr rozpadu, který se také nazývá bezrozměrná vlnová amplituda, byl poprvé zkoumán Weberem [77], který jeho velikost stanovil na hodnotu 12. Dále byl zkoumán Dombrowskim a Hooperem [78], kteří stanovili tuto hodnotu jako konstantní, bez ohledu na experimentální podmínky. Nicméně v této práci bylo raději využito následující korelace, která může vyjadřovat funkci geometrie trysky [66]:

$$f = Re^{0,07} We^{0,37} \quad (3.32)$$

kde hodnoty Weberova a Reynoldsova čísla jsou spočítány pro kapalinový paprsek, tedy vlastnosti kapaliny, rychlost proudu kapaliny v ústí trysky a průměr ústí trysky reprezentující charakteristickou délku.

Pro odhad velikosti vznikajících ligamentů a výsledných kapek na základě vlnových nestabilit, které jsou považovány za hlavní příčinu rozpadu kapalinové clony, byl zaveden předpoklad, že při ztenčování kapalinové clony dochází k formování ligamentů cylindrického tvaru. Odhad průměru těchto ligamentů může být vyjádřen následovně [76]:

$$d_L = 2 \left(\frac{4}{3f} \right)^{1/3} \left(\frac{k^2 \sigma_L^2}{\rho_g \rho_L w_{sh}^2} \right)^{1/6} \left(1 + 2,6 \mu_{DVI} \sqrt[3]{\frac{k \rho_g^4 w_{sh}^8}{6 f \rho_L^2 \sigma_L^5}} \right)^{1/5} \quad (3.33)$$

kde k reprezentuje rovnoměrnou rychlost vyvíjející kapalinové clony a může být vyjádřena takto:

$$k = \frac{r_r t_{sh}}{w_{sh}} \quad (3.34)$$

V dané souvislosti lze tak odhadnout dobu rozpadu ligamentů $\tau_{L,bu}$ na základě vztahu [55, 74, 77]:

$$\tau_{L,bu} = 24 \sqrt{\frac{2\rho_L}{\sigma_L}} \left(\frac{d_L}{2} \right)^{3/2} \quad (3.35)$$

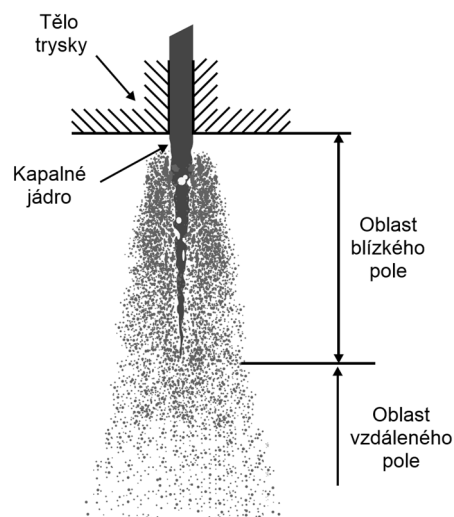
Z průměru vytvořených ligamentů d_L lze spočítat průměr kapek D [76, 77]:

$$D = 1,882 d_L (1 + 30 h_{sh})^{1/6} \quad (3.36)$$

kde Oh_{sh} je Ohnesorgovo číslo vypočítané na základě tloušťky kapalinové clony.

3.6.2 Dynamické zóny a úhel rozstříku kapalinové clony

V kapalinové cloně můžeme identifikovat dvě základní dynamické zóny (Obr. 9). Po opuštění ústí trysky se v neporušené kapalinové cloně objevuje vířivé kapalně jádro (pro turbulentní rozprašovač tvořící rozstřík plného kuželu, viz kapitola 3.7 Základní typy trysek), které podléhá primární atomizaci. Tato zóna se označuje jako oblast hustého spreje (dense spray), oblast blízkého pole (near field) nebo oblast formování spreje (spray-formation region). Následuje oblast zahrnující sekundární atomizaci, která se nazývá oblast vzdáleného pole (far field), oblast zředěného spreje (diluted spray) nebo oblast vyvinutého spreje (developed spray). Bohužel v literatuře není terminologie popisující jednotlivé oblasti zcela konzistentní. Za další zónu (terciální atomizace) může být považována interakce kapaliny s povrchem vnitřní stěny skrápěcí komory, kde dochází ke vzniku kapalného filmu či zpětné koalescenci kapek z původně atomizované kapalinové clony [79].

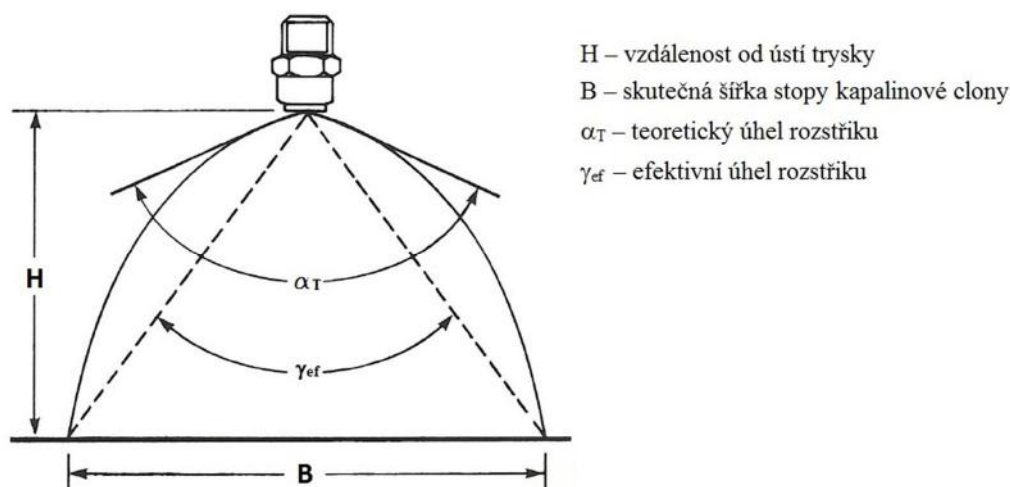


Obr. 9 Schéma oblastí v rozprašované vodní cloně [59]

Úhel rozstříku kapalinové clony je jednou ze základních charakteristik každé trysky, který se typicky měří blízko ústí trysky s tolerancí až $\pm 5^\circ$. Při opouštění kapaliny ústí trysky a zvětšování její vzdálenosti od ústí dochází vlivem externích sil, jako jsou gravitace a odpor vzduchu, k redukci úhlu rozstříku, kdy se kapalinový paprsek formuje do tvaru s parabolickým charakterem. Teoretický a efektivní úhel rozstříku jsou ve většině případů shodné do vzdálenosti zhruba 300 mm od ústí trysky, poté se na základě výše popsaného diferencují, k čemuž je nutné přihlédnout při výpočtu skutečné šířky stopy kapalinového paprsku v dané vzdálenosti od ústí trysky. V našem případě se pro spirálovou trysku parabolický efekt projevuje velmi mírně a zároveň s přihlédnutím na velikost vnitřního prostoru skrápěcí hlavy (průměr 75,5 cm), dovoluje považovat teoretický a efektivní úhel za sobě rovné a tím i skutečnou šířku stopy produkované kapalinové clony v jednotlivých hladinách od trysky [60, 80].

Pro zjednodušený výpočet skutečné šířky dopadové stopy (B) kapalinové clony v příslušné vzdálenosti od ústí trysky (H) pro úhel rozstříku (γ_{ef}) lze použít vzorec [80]:

$$B = 2H \tan\left(\frac{\gamma_{ef}}{2}\right) \quad (3.37)$$



Obr. 10 Schéma úhlu rozstříku a šířky kapalinové clony [80]

3.7 ZÁKLADNÍ TYPY TRYSEK

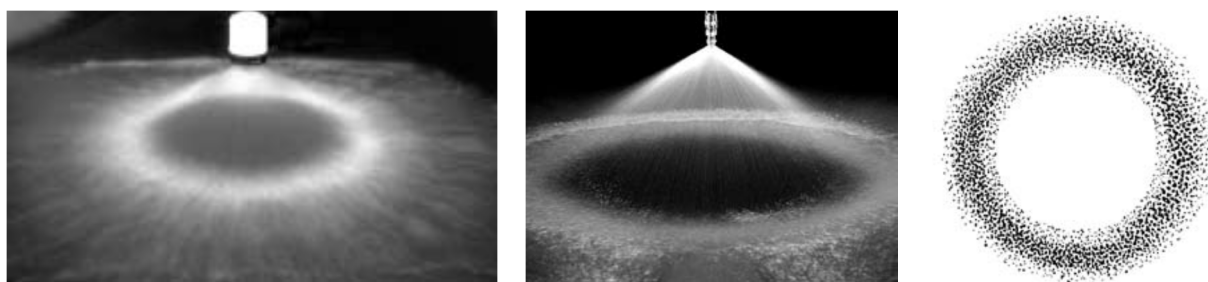
Na trhu se nachází mnoho společností, které se zabývají navrhováním, výrobou a testováním trysek pro nejrůznější aplikace v průmyslu, zemědělství i farmacii. Mezi hlavními producenty jmenujme např. Delavan (Velká Británie), Bete a Monarch (USA), Lechler (Německo), Lumina a Kasen nozzle (Japonsko).

Typy atomizérů mohou být klasifikovány podle morfologie rozprašované kapalinové clony, velikosti a rovnoměrnosti vznikajících kapek. Atomizéry lze klasifikovat na základě principu tvorby kapalinových clon na tlakové, turbulentní, impaktní rozprašovače a rozprašovače dopované vzduchem či rozprašovače s vychýlením paprsku. Jejich úkolem je vyvinout takové podmínky, aby se kapalina rozptýlila do co největšího množství velikostně požadovaných kapek či do požadovaného vzoru vodního paprsku s žádanou intenzitou impaktního tlaku na daný povrch. Proces rozprašování je, mimo jiné, závislý i na geometrii rozprašovače. Obecně největší velikosti kapek produkují hydraulické trysky s rozstříkem plného kuželu (full cone), následované plochými tryskami (flat spray) a dutými kuželovými (hollow cone) tryskami. Totéž platí i u trysek kombinovaných se vzduchem, které poskytují velmi jemné kapky menších velikostí než tradiční hydraulické trysky [56, 80].

Základní rozdělení typů trysek dle morfologie vyvíjené kapalinové clony [56, 81–83]:

3.7.1 Trysky s rozstříkem dutého kuželu

Tento typ trysek produkuje tenkostěnnou vodní clonu kuželovitého tvaru nacházející se pouze po obvodu. Trysky poskytují velikostně širokou škálu jemných kapek, velký mezifázový povrch a tím zajišťují příznivé podmínky pro vysokou účinnost při procesech látkových výměn. Příklady využití jsou absorpční procesy, chlazení a čištění plynů, zvlhčování vzduchu, odstranění prachu, rozprašování oleje atd.

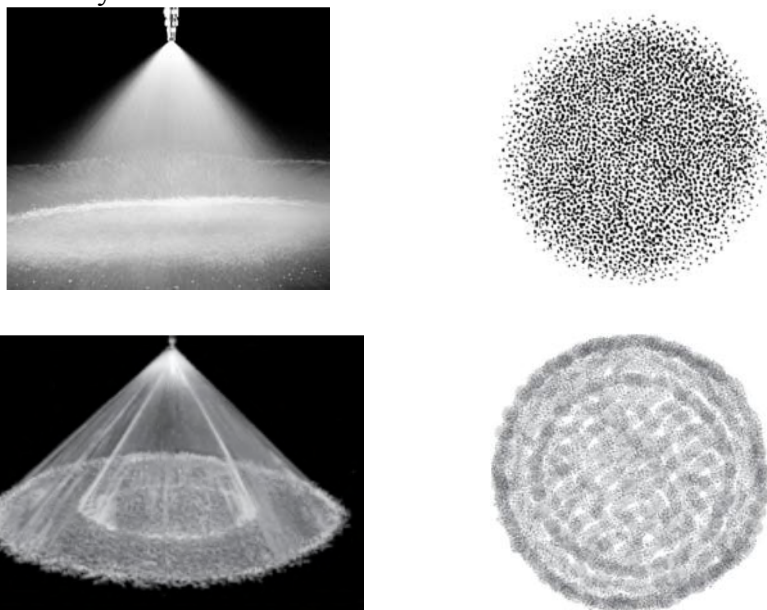


Obr. 11 Tryska s rozstříkem malého (vlevo) a velkého (uprostřed) dutého vodního kuželu, vzor kapalinové clony na ostříkované ploše (vpravo) [56, 81]

3.7.2 Trysky s rozstříkem plného kuželu

Trysky s rozstříkem plného kuželu se vyznačují rovnoměrným rozptýlením kapaliny po celé ploše kruhu, čehož je docíleno rotací kapaliny ve středu proudu přítomností drážek či lopatek ve vnitřním prostoru komory trysky nebo speciální geometrií těla trysky. V průmyslu se jedná o nejčastěji využívané atomizéry vytvářející střední až hrubé velikosti kapek. Speciálním případem jsou spirálovité trysky, u nichž je vnitřní prostor kapalinové clony tvořen soustavou několika

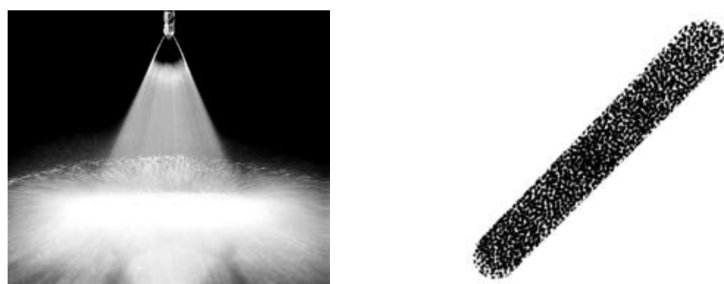
soustředných dutých kuželů, které kombinují efekt plného kuželu s menší velikostí kapek. Jsou vhodné na např. čisticí a prací procesy, chemické procesy, skrápění výplní, chlazení plyných a pevných látek, úpravu vody atd.



Obr. 12 Tvar kapalinové clony axiální (nahore) a spirálové (dole) trysky s plným kuželem a vzory produkované kapalinové clony na ostříkované ploše [56, 81]

3.7.3 Trysky s plochým rozstříkem

Trysky s plochým rozstříkem se vyznačují rovnoměrným rozložením kapaliny a tlaku do poměrně malé oblasti. Úpravou geometrie ústí trysky vzniká kontrolovatelný, kompaktní a intenzivní paprsek s rozložením kapaliny v paprsku ve tvaru paraboly, lichoběžníku či obdelníku. Při využití např. v čisticích procesech v ocelářském průmyslu, oblastech úpravy povrchů, chladících procesech atd., dosahují trysky s plochým intenzivním rozstříkem kapaliny výborných výsledků. Speciálním druhem jsou atomizéry jazýčkové, kde je ostře ohraničený plochý paprsek vyvíjen odrazem na šikmé ploše za výstupním otvorem trysky.



Obr. 13 Tvar kapalinové clony s plochým rozstříkem s příkladem vzoru na ostříkované ploše [56]

3.7.4 Trysky s plným paprskem

Trysky s produkcí plného paprsku vytvářejí pevný, ohraničený, tenký paprsek, který nepodléhá atomizaci do kapek ani na velké vzdálenosti díky své optimální geometrii proudění. Využit ho lze např. při čisticích procesech, řezání materiálů a cíleném bodovém ostříku, cirkulaci

a promíchávání atd., tedy v procesech, kde se požaduje maximální proudová síla paprsku soustředěná do co nejmenšího prostoru.



Obr. 14 Tvar kapalinové clony a její vzor na ostříkovaném povrchu [56]

3.7.5 Pneumatické rozprašovací trysky

U pneumatických rozprašovacích trysek zvyšuje účast přiváděného stlačeného plynu (nejčastěji vzduchu) účinnost atomizace kapaliny na jemnější kapky. Proces směšování plynu s kapalinou může probíhat uvnitř nebo mimo tělo atomizérů. Trysky s vnitřním směšováním se upřednostňují v aplikacích pracujících s médii o nižší viskozitě a bez mechanických nečistot. Oproti tomu princip vnějšího směšování je vhodný pro rozprašování viskózních kapalin a médií, jelikož nehrozí ucpání vnitřního prostoru trysek. Na základě tvaru ústí trysky jsou produkovány dvě geometrické formy paprsku. Rozprašování s plochým paprskem se používá např. pro zvlhčování a chlazení potravin, zvlhčování dopravníků, úpravy před lakováním, procesy odkujení povrchů atd., tedy v odvětvích vyžadujících široký přímý ostřík. Rozprašování s rozstříkem plného kuželu je přednostně užíváno v oblastech s požadavkem na cílený, kruhový ostřík nebo větší dosah, např. při přímém zvlhčování vzduchu, chlazení plynu, v chemických technologiích atd.



Obr. 15 Pneumatická rozprašovací tryska (vlevo) a různé vzory kapalinových clon na ostříkovaném povrchu [56]

3.8 TECHNIKY MĚŘENÍ KAPALNÝCH SPREJŮ

Technický rozvoj v oblasti plynových laserů, digitálních fotoaparátů, elektroniky a počítačů společně s trendy vedoucími k prozkoumání fyzikálních dějů atomizace, hydrodynamických charakteristik jednofázových i dvoufázových systémů, hustoty proudových polí, velikostí a rychlostí částic v kapalinových clonách atd., umožnil vedoucí postavení optických neintruzivních metod při studiu sprejů ve vědeckých a průmyslových aplikacích. Nejrozšířenějšími jsou klasické

techniky jako LDV (Laser Doppler Velocimetry), LDA (Laser Doppler anemometry), PDA (Phase Doppler anemometry), PIV (Particle Image Velocimetry), Fraunhoferova difrakce a QLS (Quantitative Laser Sheet Visualisation) [84].

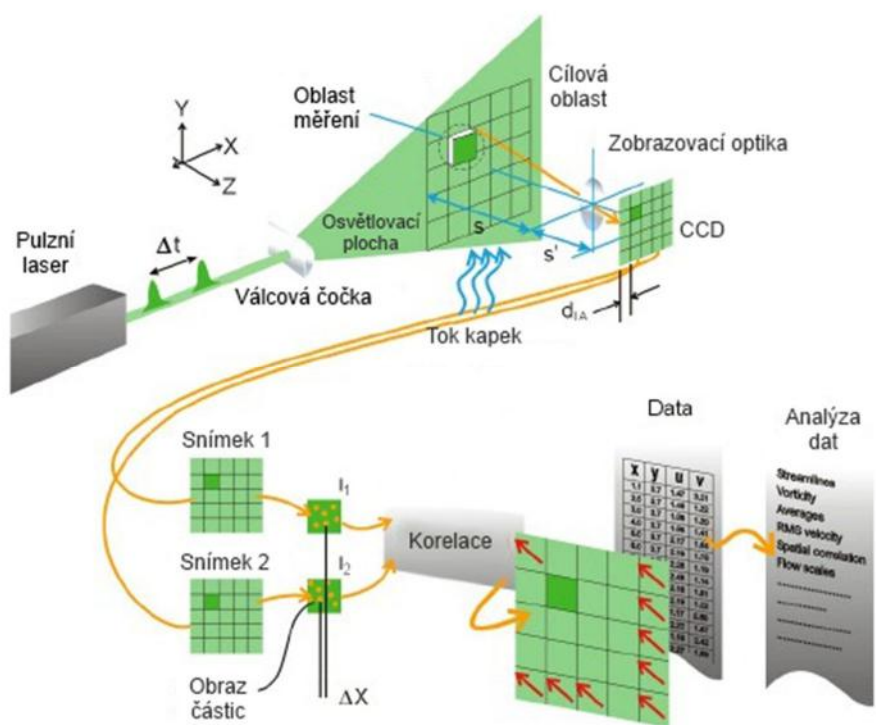
Současné tendence optických pozorovacích a měřících technik se zaměřují na:

- Přejít od kvalitativního ke kvantitativnímu měření charakteristiky sprejů. Významného pokroku bylo dosaženo vyvinutím PDA metody, tedy rozšířením LDA (popsané v kapitole 3.8.2) o dva další detektory umístěné v pečlivě vybraných místech umožňující generovat Dopplerovi zákony. Touto technikou lze realizovat měření velikosti a rychlosti sférických kapek zároveň [85, 86].
- Přejít od makroskopického k mikroskopickému pozorování sprejů. Tradiční sprejové techniky byly převážně zaměřeny na makroskopické charakteristiky, jako vizualizace sprejů, penetrace, sledování úhlu rozstříku, hmotnostní průtok, hmotnostní distribuci přes rovinu proudu a tok hybnosti. Optické metody, využívající objemové iluminace, zpětné iluminace, rentgenových snímků a šířové optické techniky, se soustřeďují na mikroskopické charakteristiky, jako např. velikost a rychlost kapek, hustotu počtu částic, objemový tok, teplotu atd. [85].
- Přejít od jednobodových k rovinným a objemovým pozorováním, jelikož bodové mapování je časově náročné a neposkytuje okamžitou 2D či 3D odezvu vyšetřovaných parametrů spreje. Jednotlivé měřící metody mohou být rozděleny dle principu sledování kapalinových clon do několika sekcí. Měření zorného paprsku se zpětnou iluminací (line-of-sight measurement), založeného na vychýlení světelného paprsku v důsledku pružného rozptylu a absorpčních schopnostech zkoumaných částic, se uplatňuje v technice LAS (Laser Absorption and Scattering) [87], rentgenové absorpční tomografii a laserové difrakci [79]; Planární měření rychlosti je možné metodou PIV (popsaná v kapitole 3.8.1) a její obdobou PTV (Particle tracking velocimetry), vhodných pro pořizování snímků a video záznamu proudění [88]; DGV (Doppler Global Velocimetry), jenž je variantou LDV a využívá se pro zjištění průměrných rychlostních toků sprejů [89]; GIV (Gaseous Image Velocimetry) zabývající se studiem plynné fáze ve sprejích, kombinuje LIF a PIV; LFT (Laser Flow Tagging) vyšetřováním kapek hustých sprejů a rychlostních polí v plynné fázi [90]; Laserem indukovaná planární fluorescence (PLIF či LIF), založená na absorpci a sekundární emisi fluorescenčního záření trasovací částicí, podává oddělenou informaci o teplotě kapalně i plynné fáze, kvantitativním měření objemu kapaliny nebo hmotnostní distribuce. Měření teploty obou fází lze uskutečnit také pomocí Rayleighova pružného a Ramanova nepružného rozptylu světla; PDS (Planar Drop Sizing) využívá poměru obrazů získaných metodou LIF a Mieho rozptylu [85].
- Přejít k vysokorychlostnímu zobrazování, s čímž souvisí snaha studovat charakteristické vlastnosti blízkého pole ve vznikajících sprejových clonách. Optické snímání sprejů vysokorychlostními kamerami s vysokým rozlišením umožňuje popsat souvislé vodní clony opouštějící ústí trysky, jejichž nestabilita vede později k primární atomizaci. Metody PDI (Phase Doppler Interferometry) a LDV se osvědčily pro nízkotlaké spreje, při větších tlacích je třeba použít rentgenových, LFT, SLIPI (Structured Laser Illumination Planar Imaging) a BI (Ballistic Imaging) technik [33, 85].

V následujících podkapitolách jsou detailněji popsány neintruzivní optické metody PIV a LDA, které se plánovaly využít při praktických experimentech vedoucích k charakterizaci vyvíjené kapalinové clony.

3.8.1 PIV (Particle Image Velocimetry)

Standartní neintruzivní optická metoda spadající pod techniky rovinné laserové anemometrie, která je určena pro měření a diagnostiku dynamiky proudění a turbulence u kapalných sprejů. Princip měření rychlostního pole vyšetřovaných trasovaných částic spočívá v osvětlení příslušné roviny v toku pomocí laserového pulsu a pořízení dvou snímků sledovaných struktur krátce po sobě. Na základě těchto obrazových párů jsou speciálními algoritmy vyhodnoceny posuny příslušných částic. Rychlostní pole je poté spočítáno ze známého časového rozdílu mezi snímky a měřeného posunu. Výsledkem je tedy planární obraz vektorů, jejichž směr udává i směr proudění částic a velikost reprezentuje rychlost částic. Nejkratšího intervalu mezi expozicemi obou snímků (maximálně 100 ns) je dosaženo použitím vysokorychlostních CCD a CMOS kamer. Rozlišujeme standartní a stereo PIV měření, v prvním případě lze získat dva vektory rychlosti kapaliny v rovině s využitím jedné kamery, ve druhém případě lze obdržet tři vektory rychlosti kapaliny v rovině s využitím dvou kamer [86, 91].

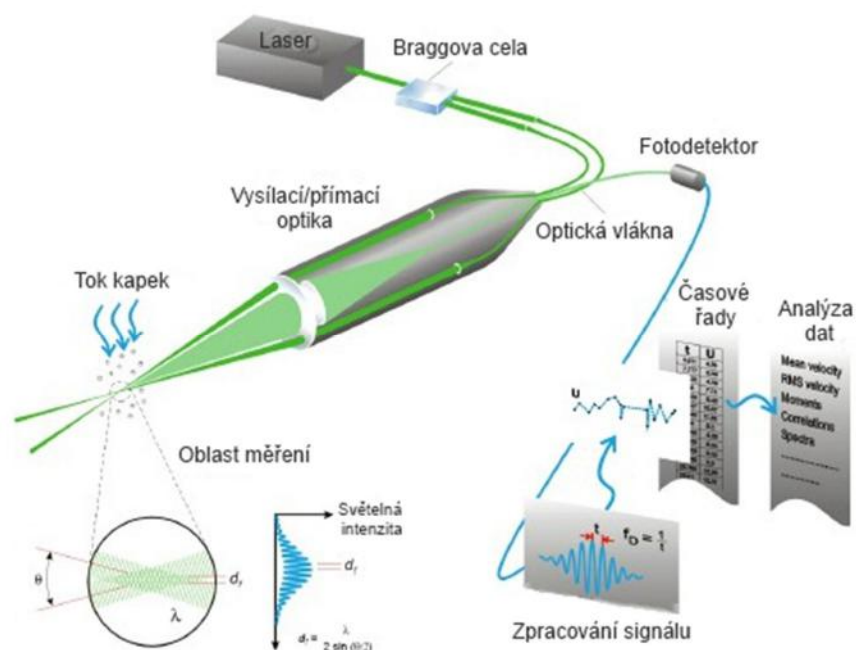


Obr. 16 Schéma přístrojového uspořádání a postup měření PIV [92]

3.8.2 LDA (Lasser Doppler Anemometry)

Absolutní neintruzivní optická metoda založena na Dopplerově principu, podle kterého elektromagnetické záření rozptýlené nebo odražené trasovanou částicí změní svojí frekvenci, jejímž porovnáním se známou frekvencí vysílaného signálu lze spočítat rychlost částice. Metoda umožňuje měřit velké rozpětí rychlostí, od téměř nulových hodnot až do $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Využívá se především při studiu proudových polí při dvoufázovém proudění kapalina-plyn, dynamiky proudění tekutin, v aerodynamických a hydrodynamických studiích a kalibracích průtokoměrů a anemometrů [86, 93].

Samotné měření se, v nejčastěji používaném diferenciálním uspořádání, realizuje detekcí frekvenčního posunutí záření, vznikajícího při průchodu částice, v místě optické sondy. Jedná se o prostor vytvořený protínajícími se laserovými paprsky, které vznikly rozdělením původního paprsku na polopropustném zrcadle či planární desce. Velikost optické sondy by měla být co nejmenší, čehož se dosáhne maximalizací úhlu mezi paprsky, neboť její rozměry jsou definovány úhlem mezi paprsky a jejich průměry. Jako zdroje záření se využívají monochromatické, lineárně polarizované, koherentní plynové lasery s minimální divergencí paprsků (např. He-Ne, Ar). Vysokofrekvenční fotonásobič, jehož výhodou je rychlá odezva a nízký vlastní šum, přemění vstupní reflektované záření na elektrický signál (Dopplerův zákmit), z něhož se metodou Fourierovy transformace zjistí Dopplerova frekvence, která je úměrná rychlosti unášené částice. Jednou dvojicí paprsků lze měřit pouze jednu složku rychlosti. Pro měření více složek rychlosti najednou se využívá dvou či tří párů paprsků, jednotlivé interferenční protějšky se rozpoznávají pomocí barevné, polarizační nebo frekvenční separace [85, 88, 93].



Obr. 17 Schéma přístrojového uspořádání a postup měření LDA [94]

3.9 DOPADOVÝ TLAK

Aplikování numerických modelů je často využíváno k předpovídání chování kapaliny při dopadu na pevnou podložku a následnému vzniku vodního filmu. K nejuznávanějším modelům se řadí O'Rourke and Amsden model [95], Bai and Gosman model (BG) [96], and Han, Xu, Trigui model (HXT) [97], Stanton a Rutland (SR) [98] a Lee a kol. [99]. V těchto modelech je interakce kapalného spreje s pevnou stěnou rozdělena do čtyř reprezentativních režimů (stick = ulpění, rebound = odraz, spread = rozprostření, splash = rozstřík) v závislosti na nárazové energii dopadajících kapek. Parametry okolního prostředí, jako teplota, tlak, rychlost a směr plynné fáze, drsnost dopadové stěny atd., ovlivňují charakter a míru nárazových tlaků u dopadající kapaliny.

Model Stanton a Rutlanda (SR) [98] řeší rovnici kontinuity a rovnice hybnosti pro dvourozměrný filmový tok přes libovolný pevný povrch prostřednictvím Eulerových rovnic. Tento model zvažuje mnoho fyzikálních efektů, jako např. smykové síly a dynamický tlak dopadajících kapek, nicméně zanedbává Laplaceův (kapilární) tlak vznikající zakřivením na rozhraní plyn-kapalina. V tomto modelu se dynamický impaktní tlak kapek (P_{im}) vyjadřuje ve formě:

$$P_{im} = \rho_L \sum_{i=1}^N \left[u^2 \left(\frac{A_d}{A_{wall}} \right) \right]_i \quad (3.38)$$

kde u je normálová složka rychlosti dopadajících kapek, ρ_L hustota kapaliny, u normálová rychlost ke stěně, A_d je plocha dopadající kapky, A_{wall} je plocha dopadové oblasti.

Model Lee a kol. [99] využívá pro popis dynamického impaktního tlaku dopadajících kapek výraz ve formě:

$$P_{im} = [(1 - \chi)\rho_L u^2]\xi \quad (3.39)$$

kde χ je mezerovitost (zlomek prázdného objemu) a ξ je náhodné číslo nabývající hodnot od nuly do jedné.

Dle [100] lze vyjádřit průměrný dopadový tlak na ploše stopy vodního paprsku vyjádřit vztahem:

$$P_{im} = \frac{uV_n}{A_0} = \frac{K^n}{4} \frac{V_n \sqrt{p} \cos^2(\omega)}{y^2 \tan\left(\frac{\gamma_{ef}}{2}\right) \tan\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (3.40)$$

kde konstanta K^n zahrnuje další konstanty týkající se hustoty kapaliny a zohledňuje odpor prostředí; u je rychlost kapaliny; V_n objemový průtok kapaliny; y je výška trysky nad ostříkovaným povrchem; A_0 plocha stopy trysky; γ_{ef} , ω , ϕ jsou úhly rozstříku, náklonu, hloubky paprsku trysky.

3.10 VYJADŘOVÁNÍ VELIKOSTI KAPEK

Během atomizace může vznikat široké spektrum velikostí kapek. Při analýze procesů spojených s rozprašovacími aplikacemi (např. výpočty přenosu tepla a hmoty) a z důvodu porovnání míry atomizace mezi rozdílnými tryskami se nejčastěji využívá středních či reprezentativních průměrů velikostí kapek [101].

3.10.1 Střední velikosti kapek

Nejběžnější hodnoty středních průměrů velikostí kapek jsou uvedeny v Tab. 1, obecně je lze popsat rovnici:

$$D_{cb} = \left[\frac{\sum N_i D_i^c}{\sum N_i D_i^b} \right]^{\frac{1}{c-b}} \quad (3.41)$$

kde i značí rozsah průměrů, N_i je počet kapek rozsahu průměrů i a D_i je průměr rozsahu průměrů i . Proměnné c i b mohou nabývat hodnot korelujících s jednotlivými aplikacemi v průmyslu a rozdíl $c-b$ se označuje jako pořadí středních průměrů [22].

Tab. 1 Nejběžnější smluvní průměry velikostí kapek pro popis v technické praxi [22]

c	b	$c-b$	Symbol	Výraz
1	0	1	D_{10}	$\frac{\sum N_i D_i}{\sum N_i}$
2	0	2	D_{20}	$\left[\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i} \right]^{\frac{1}{2}}$
3	0	3	D_{30}	$\left[\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i} \right]^{\frac{1}{3}}$
2	1	3	D_{21}	$\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i D_i}$
3	1	4	D_{31}	$\left[\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i} \right]^{\frac{1}{2}}$
3	2	5	D_{32}	$\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2}$
4	3	7	D_{43}	$\frac{\sum N_i D_i^4}{\sum N_i D_i^3}$

Kdy střední průměry vhodné k popisu rozložení velikosti kapek generovaných sprejů pro oblast absorpčních pochodů jsou:

- **D₂₀, D₂₁** – tzv. povrchové střední průměry, vhodné pro studie zabývající se absorpčními procesy z hlediska plochy styčného povrchu mezi fázemi

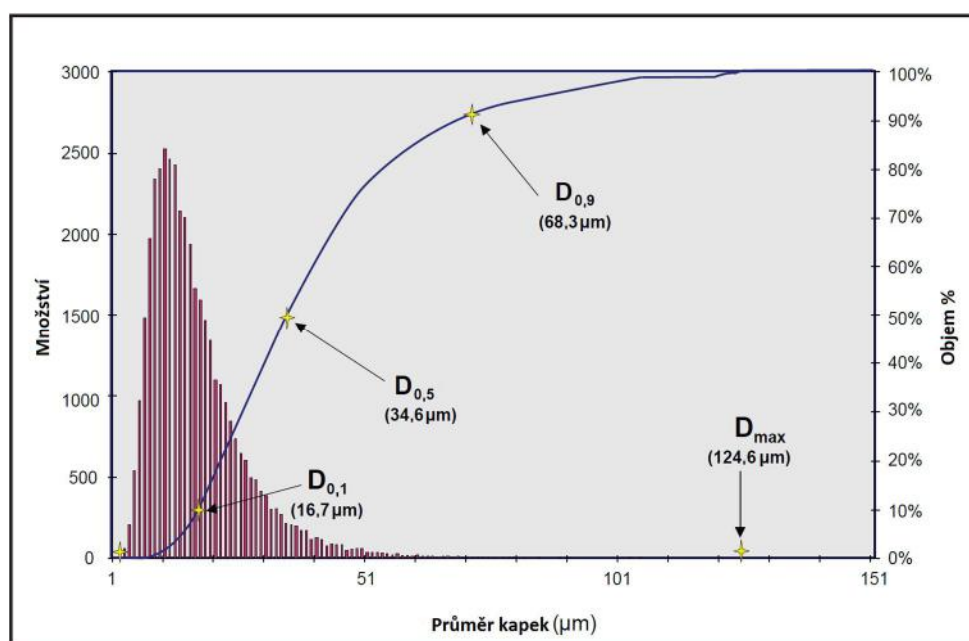
- **D_{32}** – Sauterův střední průměr (SDM), který vyjadřuje jemnost spreje na základě povrchové plochy kapek. Tento průměr je velmi často používán při výpočtu účinnosti a rychlosti přenosu hmoty v chemických reakcích. Jedná se o průměr kulové plochy, který je vypočítán z podílu sumací objemů a ploch všech kapek v systému.

3.10.2 Reprezentativní velikosti kapek

Ve většině inženýrských aplikací se distribuce velikosti kapek ve spreji vyjadřuje pomocí diferenciálních či kumulativních distribučních křivek a to ve formě diskrétních (histogram) či kontinuálních frekvenčních distribucí. Diferenciální distribuční křivka charakterizuje rozdělení velikostí částic vztaženou na určitou velikostní třídu či objem částic a kumulativní distribuční křivka udává procentuální zastoupení částic ve vzorku o velikosti menší než je velikost zvolená (Obr. 18).

Následující souhrn obsahuje některé z nejčastěji používaných reprezentativních průměrů a průměry vhodné pro odvětví zabývající se přestupem hmoty [22, 56, 102]:

- **$D_{0,1}$** – průměr kapky, kdy 10 % celkového kapalného objemu je v kapkách menšího průměru. Hodí se k popisu unášivého potenciálu jednotlivých kapek.
- **$D_{0,5}$** – průměr kapky, kdy 50 % celkového kapalného objemu je v kapkách menšího a dalších 50 % většího průměru. Tento průměr se označuje jako hromadný středový průměr (MMD) a je nejvhodnější pro srovnání průměrné velikosti kapek zaznamenané z různých analyzátorů.
- **$D_{0,9}$** – průměr kapky, kdy 90 % celkového kapalného objemu je v kapkách menšího průměru. Je vhodné využít tento typ průměru při pochodech vedoucích ke kompletnímu vypaření kapaliny ze spreje.
- **$D_{\min}/D_{\max}$** – Minimální/maximální velikost kapek zastoupených ve spreji



Obr. 18 Diferenciální a kumulativní distribuční křivka velikosti kapek [56]

3.10.3 Matematické distribuční funkce

Bylo navrženo několik statistických matematických distribučních funkcí, založených na pravděpodobnostních či čistě empirických úvahách, které na základě adekvátní korelace na naměřeném souboru velikostí vznikajících kapek ve spreji matematicky popisují trend vývoje rozložení velikosti kapek ve spreji. Tím umožňují vzájemné srovnávání sprejů produkovaných různými typy trysek, konsolidaci většího počtu dat v naměřeném souboru velikostí kapek, extrapolaci mimo rozsah naměřených dat, výpočet reprezentativních průměrů kapek atd. Obvykle je nutné soubor experimentálních dat velikostí kapek otestovat na proložení vícero distribučních funkcí a určit tu, která nejvhodněji charakterizuje daný soubor velikostního rozložení. Mezi běžné a často využívané matematické distribuční funkce v oblasti sprejů patří [22, 63, 103]:

- **Normální distribuce**

Nazýváno též Gaussovo rozdělení, které popisuje rozložení pravděpodobnosti výskytu náhodné veličiny v přírodních dějích. Jedná se o symetrické rozložení a nelze ho využít pro soubor dat tvořících bimodální rozdělení.

Číselné rozdělení četností neboli též tzv. funkce hustoty pravděpodobnosti (probability density function) je dána vztahem:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.42)$$

A kumulativní distribuční funkce je pak dána vztahem:

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (3.43)$$

kde σ je směrodatná odchylka, μ je střední hodnota velikosti kapek v souboru x normální distribuce a Φ je Laplaceův integrál.

- **Log-normální distribuce**

Je distribuce vycházející z normálního rozdělení výměnou nezávislé proměnné za logaritmus průměru kapky.

Číselné rozdělení četností je dáno vztahem:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_l\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_l}{\sigma_l}\right)^2} \quad (3.44)$$

A kumulativní distribuční funkce je dána vztahem:

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu_l}{\sigma_l}\right) \quad (3.45)$$

kde σ_l je směrodatná odchylka, μ_l je střední hodnota velikosti kapek v souboru x log-normální distribuce a Φ je Laplaceův integrál.

- **Rosin–Rammler distribuce**

Známé také jako Weibullovo rozdělení. Jedná se o široce používané rozdělení pro reprezentaci rozložení kapek ve sprejích. Empirická konstanta α určuje míru poklesu velikosti kapek, čili čím větší hodnoty nabývá, tím uniformnější kapky se ve spreji nacházejí. Pro většinu produkovaných sprejů se jeho hodnota nachází v rozmezí mezi čísly 1,5 až 4.

Číselné rozdělení četností je dáno vztahem:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (3.46)$$

A kumulativní distribuční funkce je dána vztahem:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (3.47)$$

kde symboly α a β představují empirické konstanty Rosin–Rammler distribuce.

3.11 NUMERICKÉ MODELÝ

Vývoj v oblasti matematiky a na poli informačních technologií umožnil, mimo jiné, simulovat hydrodynamiku kapalinové clony, která se pro spirálovou trysku předpokládá turbulentního charakteru. Podstata turbulence není v současné době plně vyřešeným problémem, a proto je nutné vzhledem k míře složitosti vyšetřovaných úloh používat zjednodušené modely turbulence, založené na empirických poznatcích z oblasti proudění tekutin. Neexistuje tedy univerzálně platný model ani definice, které by byli schopny vyšetřit turbulenci v plném rozsahu. Nicméně turbulenci lze chápat jako vlastnost proudění vazké tekutiny, která má čtyři základní atributy: nedeterministické změny proudění v čase a prostoru; turbulentní přenos hmotnosti, hybnosti a tepla; vířivost a prostorovost turbulentního pohybu a disipaci turbulentní kinetické energie [104].

Základem numerického řešení turbulentního proudění je matematický a fyzikální model. Matematický model zahrnuje numerickou metodu řešení parciálních diferenciálních rovnic převedením na algebraický tvar (nejčastěji metodou konečných objemů či metodou konečných prvků), volbu numerického schématu pro aproximaci jednotlivých výrazů v rovnicích, volbu výpočetní sítě a zadání počátečních či okrajových podmínek. Fyzikální model představuje model tekutiny, pro který je numerické řešení prováděno. Pohybové rovnice společně se souborem přidavných rovnic a empirických vztahů tvoří řešitelný systém rovnic, který je při numerické simulaci turbulentního proudění nazýván modelem turbulence. Pro případ nejčastěji využívaných středovaných Navier-Stokesových rovnic je třeba do fyzikálního modelu zahrnout i model turbulence, který uzavírá soustavu pohybových rovnic [104].

Proudění vazké stlačitelné tekutiny v dynamických systémech je obecně popsáno základními hydrodynamickými zákony zachování, které jsou doplněny dalšími konstitučními vztahy (např. měrnou tepelnou kapacitou tekutiny, součinitelem tepelné vodivosti, součinitelem stlačitelnosti atd.), jež definují termodynamické vlastnosti proudící tekutiny [104, 105]:

- **Zákon zachování hmotnosti** – vyjádřen rovnicí kontinuity (rovnice (3.48))
- **Zákon zachování hybnosti** – vyjádřen Navier-Stokesovou rovnicí (rovnice (3.49))
- **Zákon zachování energie** – vyjádřen Bernoulliho rovnicí, celkovou vnitřní energií či celkovou entalpií (rovnice (3.50))

Turbulentní proudění vazké newtonské stlačitelné tekutiny je především popsáno soustavou pohybových Navier-Stokesových rovnic spolu s rovnicí kontinuity. Tvoří tak soustavu čtyř nelineárních diferenciálních rovnic pro pět neznámých, statický tlak p , hustota ρ a tři složky rychlosti (u_i, u_j, u_k). Pro řešení konkrétní úlohy musí být zadány okrajové a při nestacionárním proudění i počáteční podmínky. Doposud experimentálně ověřené případy nasvědčují o validnosti použití Navier-Stokesových rovnic pro popis chování tekutin, avšak je třeba mít stále na paměti, že se jedná pouze o matematický model a že je zde nutnost konfrontovat Navier-Stokesovy rovnice s experimentálními daty [106, 107].

Rovnice kontinuity má následující tvar [104, 107]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.48)$$

Navier-Stokesovy rovnice ve složkovém tvaru [104, 106, 107]:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}}_{(I)} + \underbrace{\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}}_{(II)} = - \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_i}}_{(III)} + \underbrace{\mu_{DV} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}}_{(IV)} + \underbrace{f_i}_{(V)} \quad (3.49)$$

Fyzikální význam jednotlivých členů Navier-Stokesovy rovnice je následující:

- **(I)** – reprezentuje proudové pole v čase, tedy zrychlení tekutiny
- **(II)** – představuje nelineární (konvektivní) zrychlení u vyšších Reynoldsových čísel způsobujících nestabilitu rovnice a tedy náhodnost
- **(III)** – reprezentuje tlakový gradient
- **(IV)** – vyjadřuje smyková napětí tekutiny způsobená její viskozitou, čili vazkost
- **(V)** – představují objemové síly, např. tíhová síla či tepelný vztlak

Zákon zachování energie vyjádřený pomocí entalpie h má následující tvar [104]:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho h u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3.50)$$

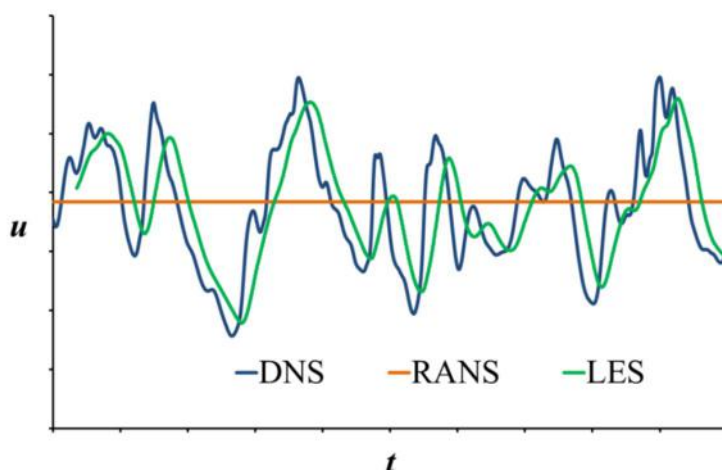
kde veličina τ_{ij} představuje tenzor vazkých napětí a q_j představuje tok tepla

Hydrodynamiku tekutiny lze studovat z hlediska postupu jejího vyšetřování dvojím způsobem. Prvním, nazývaným Lagrangeova metoda, se zvolí z objemu tekutiny libovolná elementární částice a sleduje se její pohyb v kontinuu, tedy vyšetřujeme pohyb tekutiny z hlediska individuálních částic. Druhým, nazývaným Eulerova metoda, se sledují změny kinematických veličin v určitých bodech v oblasti proudění, tedy zkoumáme přímo pole kinematických veličin. Při vyšetřování kapalně fáze proudění se uplatňuje především Lagrangeova metoda, zatímco při vyšetřování plynné fáze se používá hybridní Eulerova-Lagrangeova metoda. Pro blízké okolí ústí trysky, kde se objevuje primární atomizace a tedy i sprej o velké hustotě, je vhodné použít Euler-Eulerův výpočetní model [106, 108].

Při modelování náhodného nestacionárního trojrozměrného turbulentního proudění existují v zásadě tři základní přístupy:

- **DNS** (Direct Numeric Simulation) neboli přímá numerická simulace
- **RANS** (Reynolds Average Navier-Stokes) neboli metody řešení středovaných Navier-Stokesových rovnic
- **LES** (Large Eddy Simulation) neboli metoda simulace pohybu velkých vírů

Metoda DNS poskytne přesný časový průběh sledované veličiny, metoda RANS pouze střední hodnotu v čase a výsledkem metody LES je vyhlazený signál (Obr. 19). V praxi není hranice mezi výše uvedenými metodami ostrá, existují různé kombinace a varianty přechodů [106].



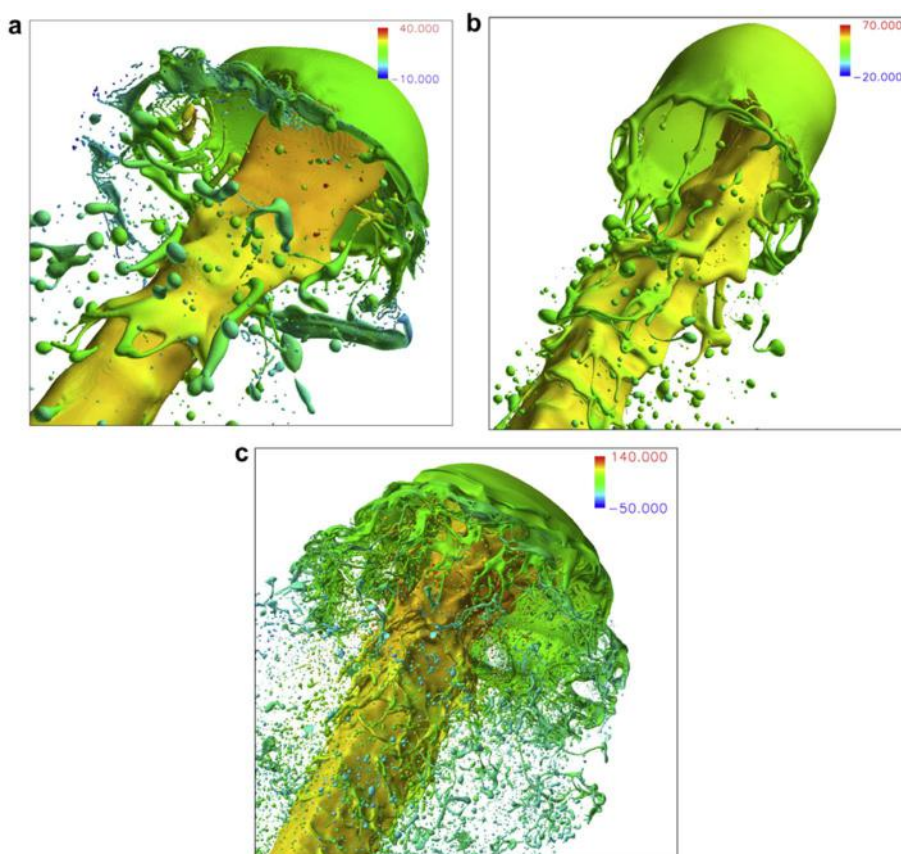
Obr. 19 Výsledky řešení sledované veličiny Navier-Stokesových rovnic pro jednotlivé metody numerické simulace [106]

3.11.1 Přímá numerická simulace (DNS)

Přímá numerická simulace představuje řešení Navier-Stokesových rovnic pomocí postupů numerické matematiky přímým přístupem bez jakéhokoli zjednodušení. Jinými slovy spočívá v řešení pohybových rovnic pro daný soubor okrajových a počátečních podmínek a určení středních hodnot pro celý soubor řešení za určitý časový úsek (dochází ke středování řešení). Řešení velikosti výpočetního elementu musí být řádově stejná jako minimální velikost vírů před jejich disipací na teplo, tudíž DNS vyžaduje velmi hustou výpočetní síť, zejména při obtékání stěn. Proto vzrůstá nárok na výkon výpočetní techniky s rostoucím Reynoldsovým číslem a navíc klesá

potřebný časový krok. Metody DNS jsou tak i časově velmi náročné. Využívají se tedy spíše k řešení fundamentálních úloh z oblasti teorie turbulence, s omezením na geometricky jednoduché oblasti s nízkým Reynoldsovým číslem, kdy počet potřebných uzlů výpočetní sítě je úměrný $Re^{9/4}$ a proto se v současné době přímá numerická simulace využívá pro hodnoty Reynoldsova čísla do 10^4 až 10^5 . Odměnou je však dokonalý obraz fyziky proudění, tedy i možnost získání libovolné veličiny v libovolném místě i čase. Výsledky simulací jsou srovnatelné s výsledky reálných experimentů, avšak co se týče věrohodnosti a komplexnosti získaných informací experimenty dokonce daleko předčí [104, 106, 107].

Příklad vysoké náročnosti této metody může být práce Shinjo a Umemura [109]. Autoři zde provedli přímou numerickou simulaci primární atomizace kapalného paprsku, vstřikovaného do oblasti statického vzduchu. Byly uskutečněny tři simulace s rozdílným nastavením hustoty prvků ve výpočtové oblasti a s jistými variacemi rychlosti vstřikované kapaliny, Reynoldsova a Weberova čísla. K numerickým výpočtům byl využit superpočítač s označením JAXA, přičemž pro nejnáročnější třetí případ simulace, skládající se z 6 miliard výpočtových mřížkových uzlů s rozlišením $0,35 \mu\text{m}$, se doba výpočtu pohybovala v délce 410 hodin, při využití 5760 jader. Výsledky simulací, tj. oblasti poblíž hrotu kapalinového paprsku ve tvaru kloboučku houby, jsou prezentovány na Obr. 20. Autoři se zabývají studiem vývoje ligamentů a následných kapiček, pramenících z povrchových nestabilit na povrchu kapalného jádra a v oblasti hrotu paprsku.



Obr. 20 Celková struktura toku kapalného paprsku pro všechny vyšetřované případy, kdy barevná škála legendy indikuje axiální rychlost tekutiny v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; a) první případ simulace: vstřikovací rychlost = 30 m/s, $Re = 440$, $We = 1270$; b) druhý případ simulace: vstřikovací rychlost = 50 m/s, $Re = 740$, $We = 3530$; c) třetí případ simulace: vstřikovací rychlost = 100 m/s, $Re = 1470$, $We = 14100$ [109]

3.11.2 Metody modelování Reynoldsových rovnic (RANS)

Využívá tzv. statistický přístup, který spočívá v rozdělení okamžitých hodnot nestacionárních veličin na střední a flukтуаční část a v řešení pohybových rovnic pro střední hodnoty závisle proměnných (dochází ke středování rovnic). Tato metody vycházejí standardně ze tří Reynoldsových časově středovaných Navier-Stokesových rovnic a rovnice kontinuity. K dispozici je systém obsahující menší počet rovnic (celkem 4) než je počet neznámých (4 základní, tedy složky středního vektoru rychlosti a střední tlak, a další 6 neznámých z tenzoru Reynoldsova napětí), který je tak nedostatečně určený, tzv. neuzavřený. Proto se metody modelování turbulentního proudění soustřeďují právě na uzavření systému rovnic aplikací statistických metod při řešení a zjednodušování základních rovnic. Ve většině průmyslových odvětví se jedná o nejrozšířenější metodu modelování, schopnou popsat základní rysy turbulentního proudění s rozumnou přesností. Modelování RANS lze rozdělit do dvou podskupin, na metody využívající myšlenky turbulentní vazkosti a metody modelování Reynoldsových napětí. Výpočty lze uplatňovat i na zmenšený počet dimenzí, tedy např. rovinné nebo rotačně-symetrické proudění kapalin [104, 106, 107].

Gao a kol. [110] ve své práci simulovali proces absorpce SO_2 do vápencového kalu s využitím sprchového absorbéru. Simulace byla založena na turbulentním k - ε modelu. Výsledky, které byly porovnány s praktickými experimenty, ukazují přímou závislost absorpce SO_2 se zvyšující se hodnotou pH vápencového kalu.

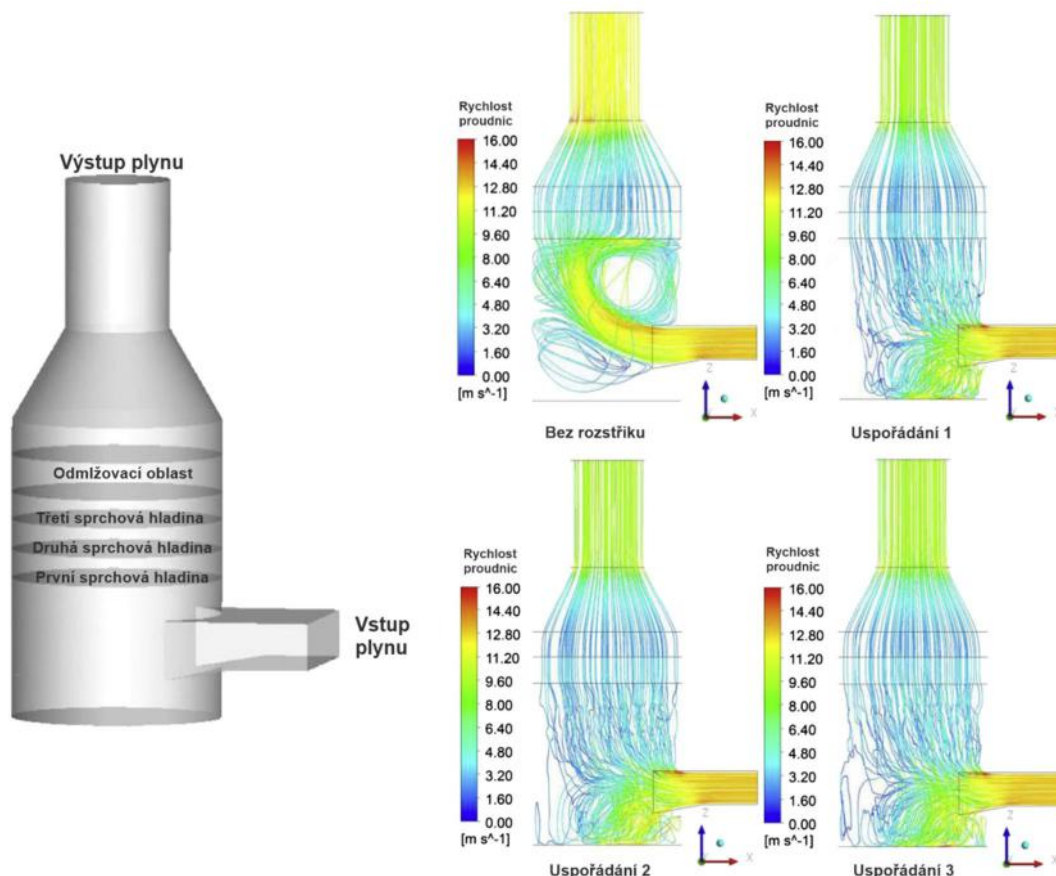
Chen [111] se zabýval simulací přenosu hmoty uvnitř sprchového scrubberu s ohledem na působení odporových sil. Šlo konkrétně o absorpci chlorovodíku do vodní mlhy, produkovaných při velmi nízkých hodnotách počátečního Reynoldsova čísla. K dvoufázové simulaci byl proto využit Eulerův výpočtový model. Míra absorpce do jednotlivých kapiček je, dle výsledků, výrazně ovlivněna odporovými silami, které se s rostoucím Reynoldsovým číslem zvětšují a podporují míru přestupu látky mezi fázemi.

Experimentální práce společně s numerickou simulací souproudeho vysušovacího sprchového absorbéru je popsána v práci Kavoshi a kol. [112]. Vodovzdušná tryska byla využita k rozstříku roztoku hydroxidu sodného, do něhož byl chemisorpcí zachytáván oxid uhličitý z kontaminované plynné fáze. Při numerické simulaci v programu Ansys Fluent byl aplikován Eulerův model pro popis plynné fáze, a pro popis kapalně fáze byl vybrán model dle Lagrangea. Autoři uvádějí dobrou shodu v účinnosti odstranění oxidu uhličitého mezi praktickým experimentem a numerickou simulací.

V práci Ali a kol. [113] byla provedena experimentální i numerická simulace efektivity Venturiho scrubberu pro účinnost odstranění pevných částic (TiO_2) z kontaminované plynné fáze. Eulerův-Lagrangeův výpočtový model společně s turbulentním k - ε modelem byl využit při výpočtech. Autoři ve své práci stanovují distribuci kapalně frakce uvnitř vnitřního prostoru scrubberu během procesu čištění při různých rychlostech kapalně i plynné fáze. Podle výsledků, účinnost odstranění pevných částic se zvyšuje s rostoucím hmotnostním průtokem plynu i rychlostí proudění kapaliny, tedy vzájemných relativních rychlostí zúčastněných fází.

Wang a kol. [114] se zabývali numerickou dvoufázovou simulací odstranění SO_2 z kontaminované plynné fáze do roztoku amoniaku v protiproudém sprchovém scrubberu. Při simulaci byl využit k - ε turbulentní model. Na Obr. 21 vlevo je znázorněna absorpční kolona, která obsahuje soustavy trysek seskupených do tří hladin pro rozstřík kapalněho absorbentu. Autoři

vyšetřovali rychlostní pole plynu uvnitř komory při různém uspořádání rozstříku absorbentu v hladinách. V uspořádání 1 byl sprej produkován první a druhou hladinou, v uspořádání 2 byl produkován druhou a třetí hladinou a v uspořádání 3 byl produkován první a třetí hladinou (Obr. 21 vpravo). Druhé uspořádání má dle autorů nejlepší predikci k účinnosti absorpce, nicméně v dalším kroku připouštějí rozsáhlejší výzkum zahrnující chemické reakce a vyšetření přestupu hmoty v soustavě.

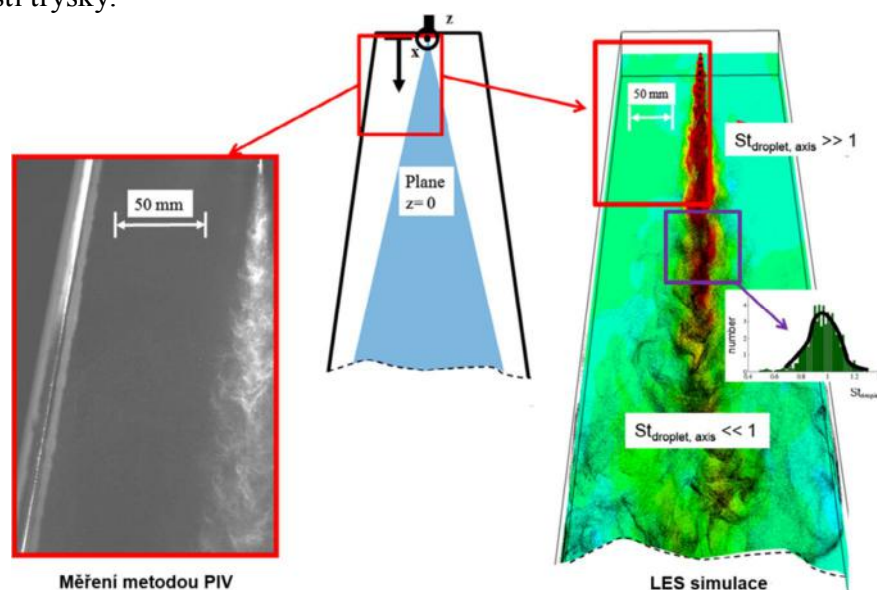


Obr. 21 Model vyšetřované absorpční věže (vpravo) a rychlostní proudnice plynu pro čtyři uspořádání (vlevo) [114]

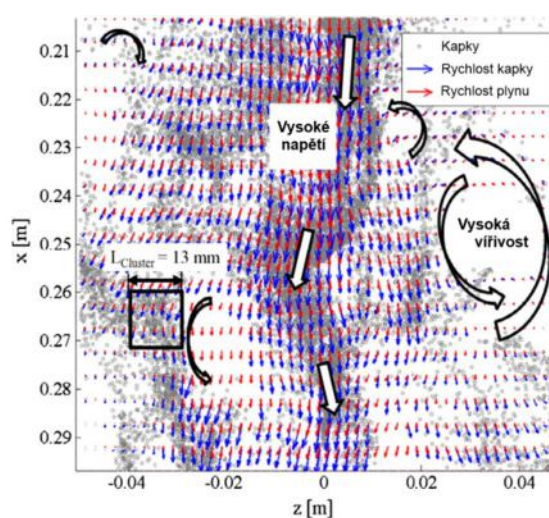
3.11.3 Simulace velkých vírů (LES)

Metoda simulace velkých vírů je založena na myšlence filtrování Navier-Stokesových rovnic, tedy rozdělení výpočtové oblasti na dvě části s rozdílným přístupem simulace, kdy jsou však obě části při řešení úloh stále vzájemně propojeny a nelze je řešit odděleně. LES tvoří přechod mezi metodou DNS a RANS. Systém je rozdělen na oblast velký turbulentních vírů simulovaných DNS metodou, které jsou zachyceny jemněji dělitelnou výpočtovou sítí. Menší turbulentní víry se v praxi na transportních dějích podílejí málo, jejich disipace energie při zániku hraje roli v uvažovaném výpočetním systému, neboť kaskádní přenos energie z větších vírů vyvolal jejich vznik. Z filtrovaného turbulentního pole se odstraní, pomocí tzv. subgridních modelů, turbulentní víry malých velikostí, které se následně modelují metodou RANS. Celý proces tak ve výsledku zaručuje menší náročnost na současnou výpočetní techniku, která je ale pro vyšší Reynoldsova čísla stále vysoká [104, 106].

Lampa a Fritsching [115] navazují na své předchozí experimenty z roku 2011, 2012 [116, 117] a publikaci Heinleina a Fritschinga [118], popisující shlukování kapek uvnitř spreje, produkovaného vodovzdušnou tryskou, v závislosti na tvaru vytvářené kapalinové clony a parametru trysky. V práci [115] potvrzují dobrou shodu získaných veličin mezi numerickou metodou LES a experimentálním měřením pomocí metody PIV (Obr. 22). Rozložení rychlostí plynné a kapalně fáze ve spreji, společně s vyobrazením oblastí podléhajících shlukování kapek, je prezentováno na Obr. 23. Výsledek potvrzuje závěry Eatona a Fesslera [119], tedy že ke shlukování kapek dochází v oblastech vysokých vnitřních napětí a na okraji vírů. Přechodné i periodické strhávání plynu z okolí do vnitřního prostoru vodní clony, způsobené aerodynamickými nestabilitami, podporuje její segmentaci. Zvětšující expanzní úhel rozstříkované konické clony má, dle prezentovaných výsledků, významný efekt na shlukování kapek v oblasti blízkého pole ústí trysky.

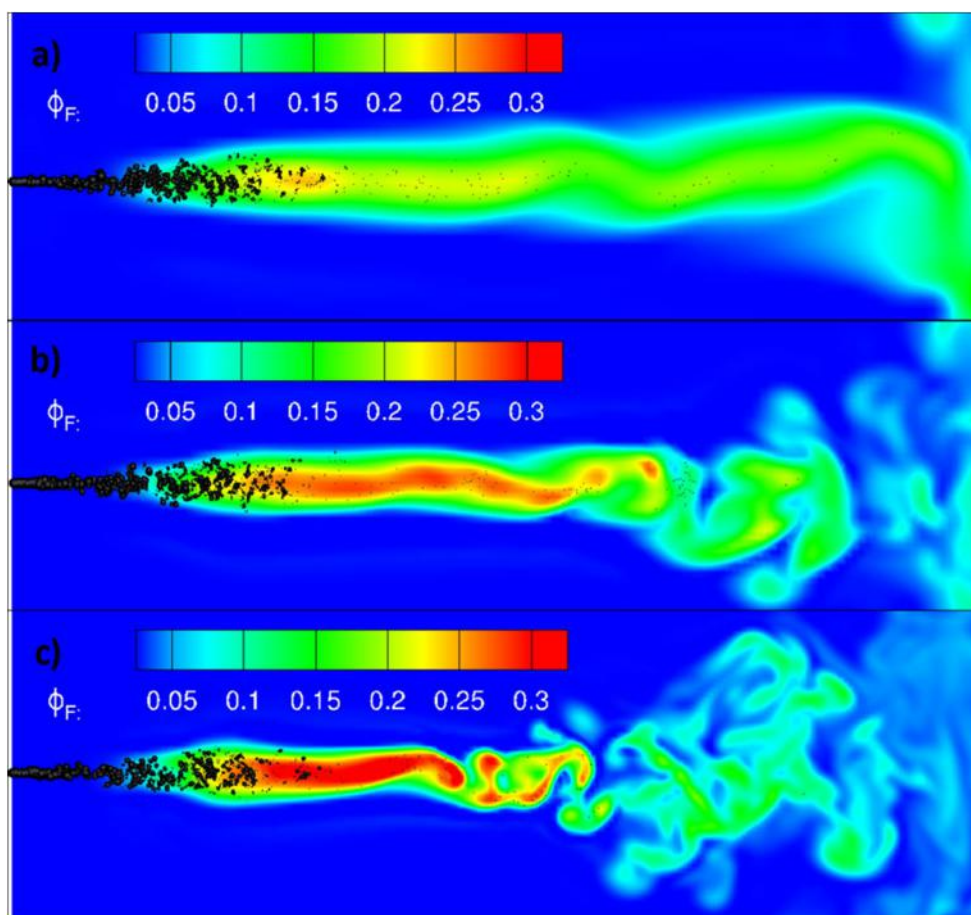


Obr. 22 Vzhled kapalinové clony a oblasti shluku kapek z PIV měření (vlevo) a LES simulace (vpravo) [115]



Obr. 23 Rychlosti plynné a kapalně fáze uvnitř spreje a oblasti shluků kapek části kapalinové clony získané simulací LES [115]

Irannejad a Jaberi [108] se ve své práci zabývají vývojem a testováním LES modelovacích metod pro především vysokorychlostní odpařovací spreje během kontaktu s turbulentním plynem za vysokých teplot i tlaků. Při simulacích využívali hybridní Eulerian-Lagrangianův model, což podpořili rozsáhou studií matematického aparátu v oblasti hydrodynamiky. Získané výsledky metodou LES, pro neodpařující a vypařující se spreje během rozdílných podmínek plynné i kapalně fáze, byly porovnány s dostupnými experimentálními daty. Jeden z výsledků je prezentován na Obr. 24, tedy vliv hustoty výpočetní sítě na výslednou analýzu za stejných podmínek. Je zřejmé, že při využití hustěji koncentrované sítě lze lépe postřehnout a popsat vznikající struktury ve spreji.

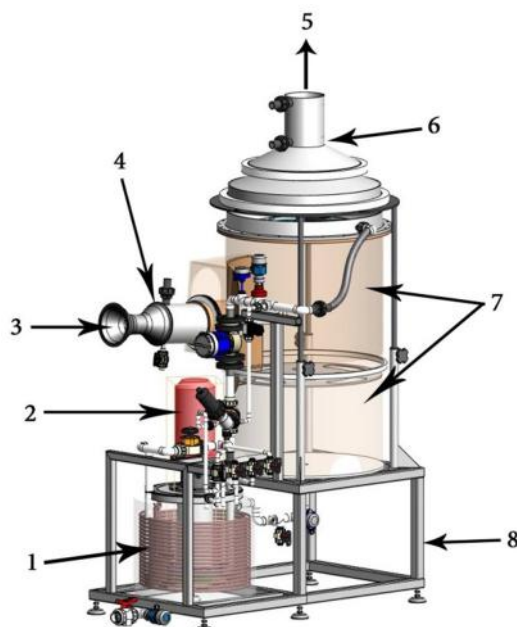


Obr. 24 Efekt výsledků LES simulace v závislosti na velikosti elementů výpočetní sítě při vypařování rozstříkovaného spreje; a) velikost výpočetního elementu 1,00 mm, b) velikost výpočetního elementu 0,75 mm, c) velikost výpočetního elementu 0,50 mm [108]

4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 SPRCHOVÝ SCRUBBER

V rámci projektu EPSILON TH01030820 bylo úkolem navrhnout a otestovat experimentální poloprovozní zařízení, pracující na bázi sprchového kapalného scrubberu pro odstranění anorganických plynných polutantů ze znečištěných plynných směsí, využitelné pro lokální „malé“ producenty emisí. Účelem bylo vyvinout dostatečně efektivní zařízení s vysokou účinností separace s ohledem na nízké hydraulické odpory tekutin, nízkou náchylnost k ucpávání vnitřního prostoru, nízké pořizovací a provozní náklady. Výstupem projektu byl pak návrh kompaktního sprchového scrubberu 2. generace s pojmenováním „Nikol“, který dané požadavky pro vypírku splňoval a byl partnerskou, na projektu spolupracující, firmou MVB Opava zahrnut do portfolia nabídky environmentálních zařízení jako účinná technologie pro absorpci anorganických polutantů z emisních plynů.



Obr. 25 Zjednodušený model sprchového scrubberu; zásobní nádrž kapalného absorbentu s výměníkem tepla (1), cirkulační odstředivé čerpadlo kapalné fáze (2), vstup znečištěné plynné fáze (3), posuvný deflektor (4), výstup přečištěné plynné fáze (5), víko komory s regulační clonou a demistorem (6), skrápěcí komora/hlava (7), nosný rám (8)[120]

Výsledná konstrukce jednostupňového čistícího sprchového scrubberu je řešena tak, že na základový rám jsou podle potřeby ukotveny PP armatury, které spojují jednotlivé dílčí celky zařízení a vytváří tím dva cirkulační okruhy. Jeden okruh slouží k cirkulaci plynné fáze a druhý k cirkulaci absorpční kapaliny. Dílčími celky scrubberu se myslí např. hydrodynamicky optimálně modifikovaná skrápěcí hlava/komora, zásobní nádrž na skrápěcí absorpční kapalinu s výměníkem tepla, cirkulační čerpadlo, ventilátor, měřící MaR prvky (Obr. 25 a Obr. 26). Hlavní funkční část celého scrubberu představuje skrápěcí hlava, ve které dochází ke kontaktu tekutin a tedy i k samotné absorpci plynných polutantů. Do protipohybu tangenciálně distribuovaného znečištěného plynu se přivede speciální spirálovou tryskou absorpční kapalina v ose válcové části. Plyn je odtahován středem válcové části směrem nahoru přes systém přepážek a demistor pro

zachycení jemně rozptýlené zbytkové kapaliny. Kapalina stéká směrem dolů do zásobní nádrže, ze které je cirkulačním čerpadlem opět dopravována na spirálovou trysku. Skrápěcí hlava je vyrobena z materiálu PP natur, který musí vyhovět požadavkům na dlouhodobý kontakt s agresivními médii. Detailnější popis modelu skrápěcí hlavy, různé pohledy na model scrubberu a technologické schéma jsou obsaženy v příloze (Obr. 111 až Obr. 114).



Obr. 26 Poloprovozní sprchový scrubber sestavený v laboratoři (A) s detailem transparentní sprchové komory (B); detail rotačního cirkulačního čerpadla (1), vnitřní prostor zásobní nádrže se spirálovým trubkovým výměníkem tepla (2), deflektor (3), systém uchycení a poloha umístění spirálové trysky (4)

4.2 SPIRÁLOVÁ TRYSKA

K distribuci absorpční kapaliny a produkci optimální kapalinové clony ve vnitřním prostoru skrápěcí hlavy scrubberu byla využita spirálová tryska od firmy BETE s označením TF-28 s úhlem rozstříku vnějšího svrchního kuželu 150° . Tryska se skládá z kompaktního kusu PTFE, její ústí je vyfrézované do tvaru zužující se spirály. Prstence spirály jsou rozděleny na tři sekce, dle úhlu sklonu odrazových ploch vzhledem k axiální ose trysky. Kapalina dopadající na jednotlivé odrazové plochy tvoří celistvý vodní kužel (full cone), který můžeme považovat za kombinaci tří clon ve tvaru dutých soustředných kuželů. Na základě polohy je lze označit za vnější „svrchní“ kužel, vnitřní „velký“ a vnitřní „malý“ kužel (Obr. 27).

Profil asymetrické spirálové trysky je zobrazen na Obr. 28, kdy 3D sken její textury byl pořízen kamerou ATOS Tripple Scan 8 M. Získaná polygonální síť byla metodou reverze převedena na celistvé těleso, kterého bylo využito v návazné simulaci CFD modelu produkce kapalinové clony.

Tryska byla jako vhodný kandidát vybrána z několika důvodů [121]:

- Tryska je vyrobena metodou obrábění z jednoho kusu polytetrafluorethylenu, tudíž se u ní předpokládá resistance vůči zanesení či ucpávání mechanickými nečistotami. Tomuto efektu přispívá absence dalších dílčích vnitřních součástí a nízký koeficient tření použitého plastu. Tryska je odolná vůči korozi, má nízké náklady na výrobu a také vykazuje dostatečnou odolnost vůči teplotám.
- Vykazuje výbornou energetickou účinnost i v náročných podmínkách. Vysoký výtokový součinitel ($\phi C_d = 0,915$) dovoluje pracovat s vyššími průtoky při nízkých tlakových ztrátách.
- Obecně jemná atomizace kapalinové clony při nízkých hodnotách průtoků a/nebo tlaků, která redukuje požadavky na vynaloženou energii a přístrojové i materiálové vybavení celého systému.
- Produkce jemnější mlhy (o 30–50 %) při aplikaci stejného tlaku oproti konvenčním tryškám.
- Snížení ztráty energie v podobě akustického hluku.
- Produkce velmi široké efektivní kapalinové clony, která může nahradit soustavu několika konvenčních trysek.

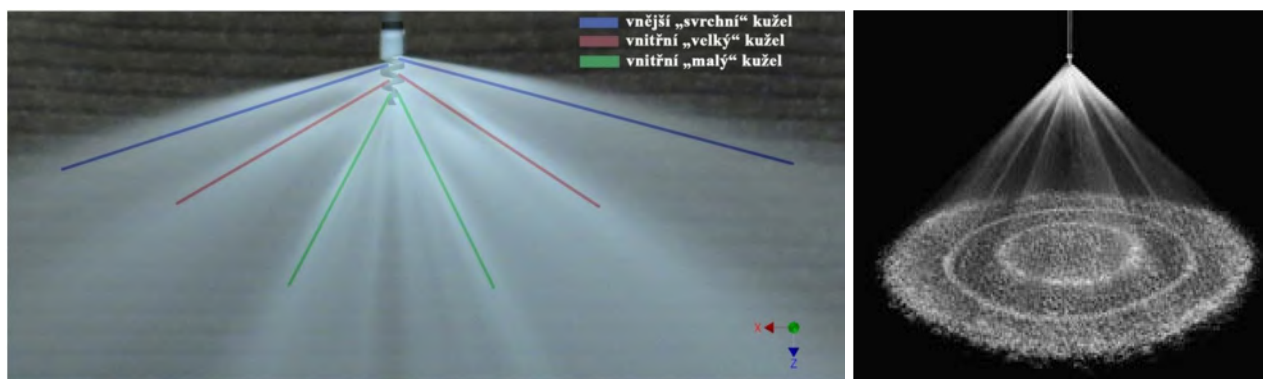
Závislost objemového průtoku kapaliny přes trysku na hodnotě aplikovaného vstupního tlaku jsou dány rovnicí [122]:

$$\dot{V}_n = K_n \sqrt{p_n} \quad (4.1)$$

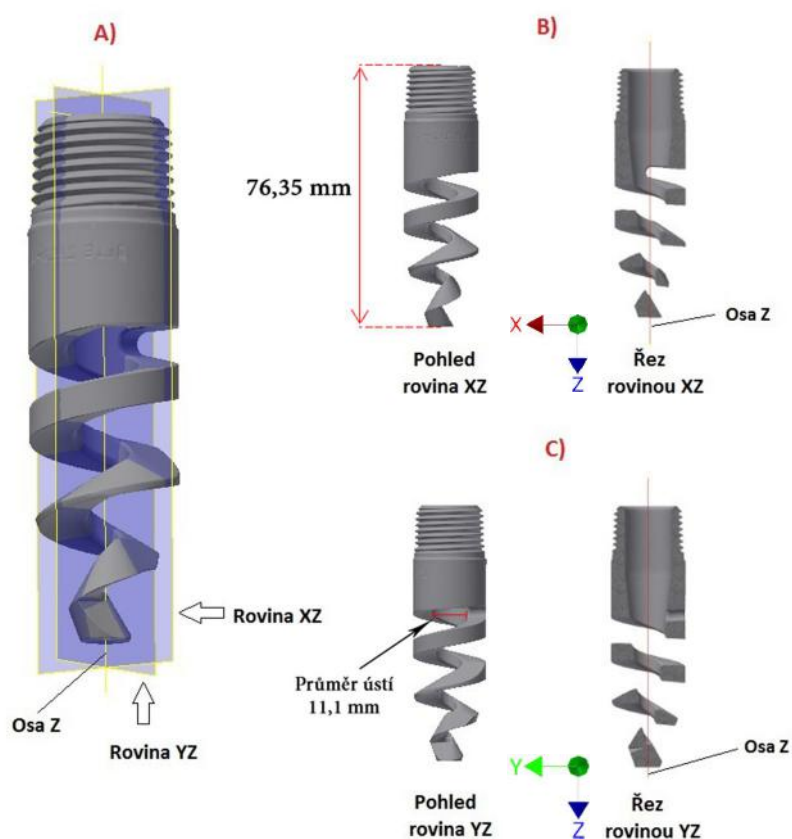
kde $\dot{V}_n$ je objemový průtok kapaliny přes trysku, p_n představuje tlak na vstupu do trysky a K_n je průtokový faktor (koeficient odporu či K-faktor), vyjadřující odpor při průtoku kapaliny vnitřním prostorem trysky a nabývá pro každý typ trysky jiné hodnoty. V případě trysky TF-28 150 jeho hodnota činí $75,2 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{bar}^{-0,5}$. Spirálovou trysku vyrobenou z PTFE lze, dle výrobce, zatížit maximálním vstupním tlakem 3 bar. Příklady hodnot vstupního tlaku a jím odpovídajících hodnot objemových průtoků na základě rovnice (4.1) shrnuje Tab. 2.

Tab. 2 Závislost objemového průtoku kapaliny na vstupním tlaku trysky TF-28 150 [122]

p_n (bar)	V_n (l·s ⁻¹)	C_d (-)
0,5	0,89	0,919
0,7	1,05	0,916
1,0	1,25	0,912
2,0	1,77	0,914
3,0	2,17	0,915



Obr. 27 Znázornění hlavních proudů kapalinové clony (vlevo) a dopadového vzoru (vpravo) spirálové trysky TF-28 150 [122]



Obr. 28 Spirálová tryska TF-28 150; A) Celkový pohled; B) Rovina XZ; C) Rovina YZ

4.2.1 Současný stav poznání v oblasti spirálové trysky

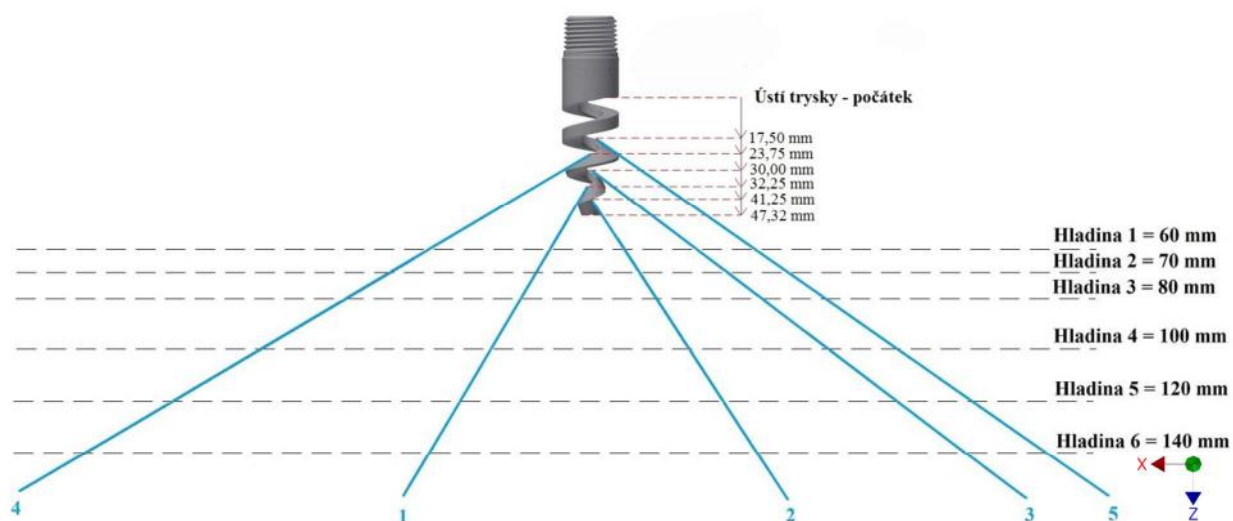
Bylo nalezeno několik prací zabývajících se studiem různých typů spirálových trysek. Většina z nich se zaměřila na charakterizaci spreje produkovaného za různých hydrodynamických podmínek [42, 43, 123–125]. Li a kol. [123] zkoumali charakteristiky sprejů produkovaných spirálovými tryskami používaných při odsiřování spalin. Zjistili, že průtok kapaliny byl lineární s druhou odmocninou tlaku a velikost průměru kapek byla mocninou funkcí tlaku. Změny průměru kapek s tlakem byly podobné u spirálových trysek s různými otvory, zatímco úhel rozstříku se mírně měnil při tlacích vyšších než 40 kPa. Zhang a kol. [124] studovali sprejové charakteristiky spirálových trysek o různých průměrech s využitím metody PIV (Particle image velocimetry) při různých tlacích rozstříku kapaliny. Pozorovali vliv tlaku rozstříkové kapaliny i průměru trysky na úhel rozstříku, průměr výsledných kapek, uniformitu velikosti kapek a průměr velikosti rozprašované oblasti. Při experimentech s pyrolýzou biomasy zjistili, že tryska o průměru 5,6 mm a tlaku kapaliny 2 bar je ideální pro zhášení par vyvíjejících se během pyrolýzy. V další studii, Zhou a kol. [43] provedli experimenty vedoucí k charakterizaci distribuce toku kapaliny u nízkotlaké spirálové trysky s vysokým průtokem za použití systému testování distribuce toku. Analyzovali vliv velikosti trysky na distribuci toku kapaliny změnou několika parametrů jako rozměry samotné trysky (poměr délky trysky k jejímu průměru), radiálního průtoku, polohy postřikovaného povrchu a úhlu postřiku. Výsledky ukazují, že se zvyšujícím se poměrem délky trysky k jejímu průměru se průtok kapaliny snižuje a naopak se zvyšuje úhel rozstříku. Se vzrůstajícím aplikovaným tlakem byly vztahy stejné jako ve výše zmíněných pracích. Dong a kol. [126] porovnávali odsiřovací výkon scrubberů s využitím spirálových a Dynawave trysek. Li a kol. [127] vyvinuli model povrchově sprejové geometrie spirálové trysky s evolventní atomizací. Model dále simulovali pomocí programu Matlab, který ověřil jeho účinnost a poskytl teoretický základ pro návrh a výrobu spirálových trysek. Wasik a kol. [41] studovali vliv typu trysky (včetně spirálové trysky TF6) na hmotnostní hustotu rozstříku. Cong a kol. [128] využili soustavy spirálových trysek k sestavení speciálních přepážek uvnitř destilační kolony pro zvýšení účinnosti přestupu hmoty při separaci cyklohexanu a n-heptanu. Tanner a Knasiak a Jiang a kol. [129, 130] zkoumali využití spirálových trysek v systémech protipožární ochrany. Kalata a kol. [131] studovali charakteristiky spirálové trysky dopované vzduchem při návrhu chladících systémů. Další práce na téma spirálových trysek jsou uvedeny v literaturách [62, 132]. Charakter vytváření kapalinové clony spirálovité trysky TF-28 150 je zcela odlišný ve srovnání s tryskami se spirálovým kanálkem [133] nebo spirálovou tryskou z literatury Hun Kim a kol. a Matsuo a kol. [125, 134].

4.2.2 Intruzivní měření kapalinové clony

Měření tlakové dopadové stopy, neboli měření impaktů, bylo realizováno následovně. Během provozu trysky dopadala vyvíjená kapalinová clona na plochu spojenou s elektronickým tenzometrickým tlakovým senzorem. Tato plocha byla spolu se senzorem umístěna na polohovacím systému *X-Y*. Pohyb plochy byl ovládán speciálním programem z prostředí počítače. Při provozu se zaznamenávala skutečná hodnota dopadového tlaku, která se ukládala v závislosti na poloze snímače vzhledem k trysce.

Intruzivní měření kapalinové clony probíhalo ve dvou etapách za využití rozdílné konstrukce dopadové plochy spojené s tenzometrickým tlakovým senzorem. V jednotlivých experimentech byly též aplikovány různá nastavení hydrodynamických podmínek proudící kapaliny skrz trysku i rozdílné vzdálenosti dopadové plochy od ústí spirálové trysky (Obr. 29).

Prezentované grafy v obou případech znázorňují tlakovou dopadovou stopu blízkého pole vytvářené kapalinové clony pro dva vnitřní kužely. Vnější kužel s markantním úhlem rozstříku 150° se nacházel mimo vymezenou skenovací oblast. Vývoj kapalinové clony do volného prostoru byl testován při podmínkách bez protiproudu plynné fáze.



Obr. 29 Znázornění spirálové trysky TF-28 150; znázornění vzdálenosti jednotlivých dopadových ploch (hladin), vodních paprsků (tyrkysová barva) a vzdáleností zdrojů paprsků od počátku ústí trysky při měření impaktů

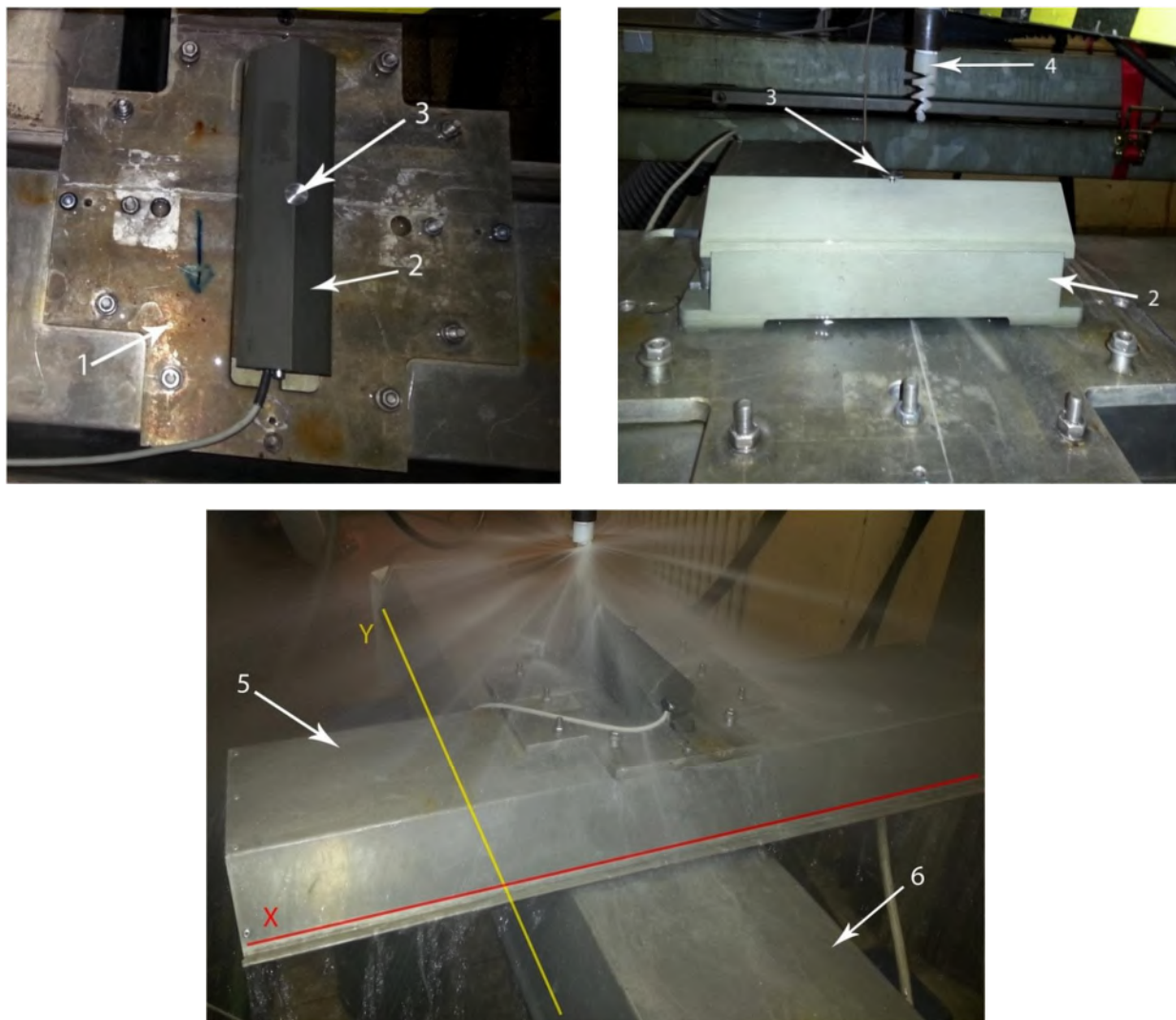
4.2.2.1 První sada měření

V první etapě byla měřena tlaková dopadová stopa blízkého pole kapalinové clony v pěti hladinách, konkrétně ve vzdálenostech 60, 80, 100, 120 a 140 mm od počátku ústí spirálové trysky. Při každém měření v jednotlivých hladinách byly nastaveny hydrodynamické podmínky proudící kapaliny na vstupní tlak 2 bar a průtok $1,76 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, což odpovídá optimálním provozním parametrům dané trysky. Teplota okolí byla 20°C a atmosférický okolní tlak 1022 hPa.

Měření tlakové dopadové stopy rozpadající se kapalinové clony bylo realizováno pomocí tenzometrického tlakového senzoru snímajícího tlak z dopadové kruhové plochy (Obr. 30). Konstrukčně se jednalo o desku upevněnou na pohyblivém se rameni, v jejímž středu se nacházelo rozebíratelné kovové pouzdro se zkosenými stěnami, které ve svém nitru ukrývalo a chránilo instalovaný tenzometrický senzor. Dopadová plocha se nacházela na svrchní hraně kovového pouzdra a při dopadu kapaliny na její povrch byly přenášeny informace o velikosti nárazového tlaku do senzoru. Dopadová plocha byla kruhového tvaru o průměru 12 mm.

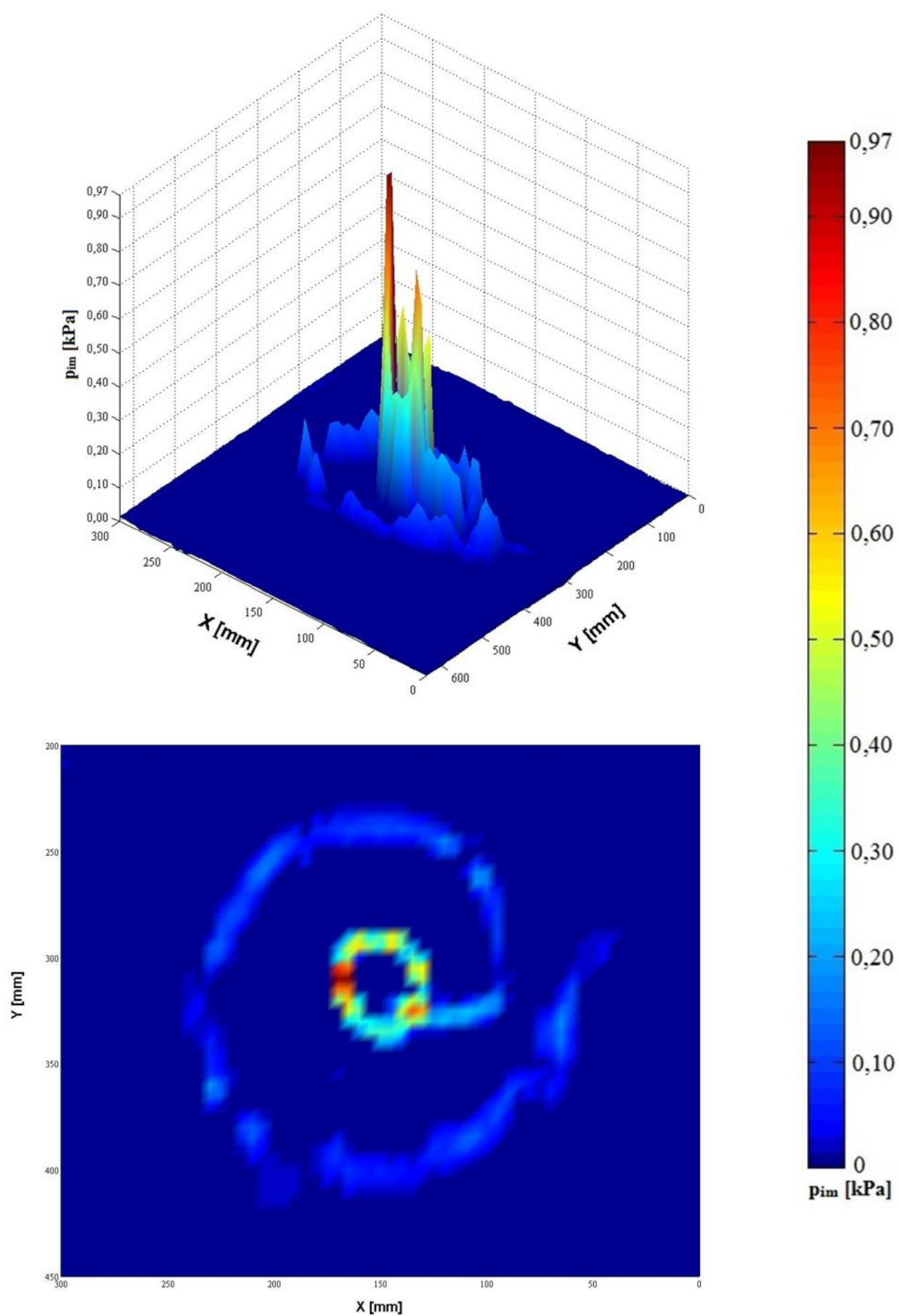
Během experimentu byla deska se senzorem umístěna ve středu svrchního ramene, které se činností krokového motoru pohybovalo v ose X . Svrchní rameno bylo umístěno na spodním rameni, zajišťující pohyb sondy v ose Y (Obr. 30). Při měření v jednotlivých hladinách byla naskenována plocha 300 mm v ose X a 600 mm v ose Y , což odpovídalo maximálnímu možnému

záběru nainstalovaného zařízení. Posun obou ramen byl v každém měření nastaven s krokem 5 mm v obou směrech.

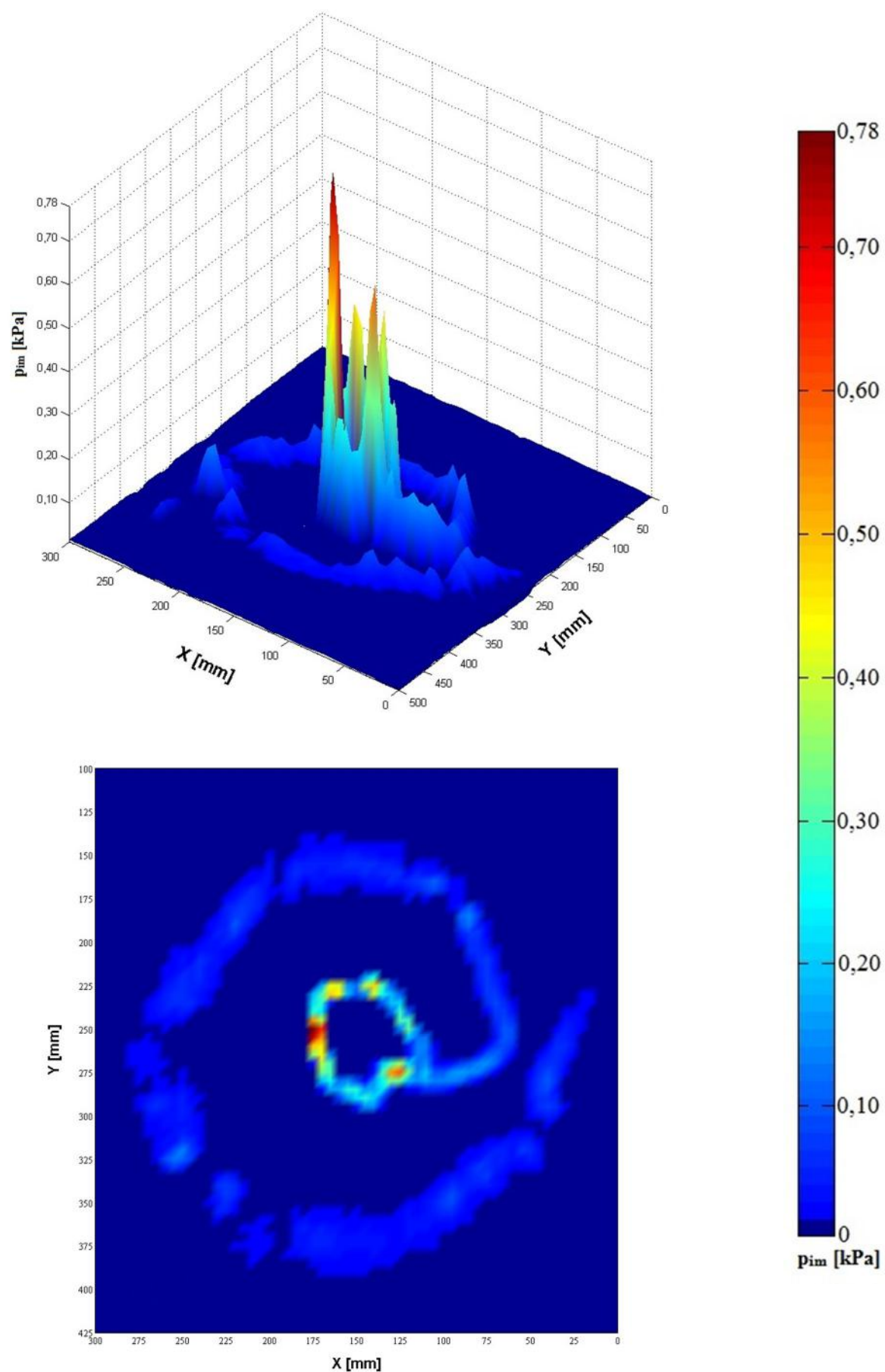


Obr. 30 Přístrojové uspořádání při měření impaktů v první sadě; upevňující deska (1), kovové pouzdro (2), dopadová plocha (3), spirálová tryska TF-28 150 (4), svrchní pohyblivé rameno (5), spodní pohyblivé rameno (6)

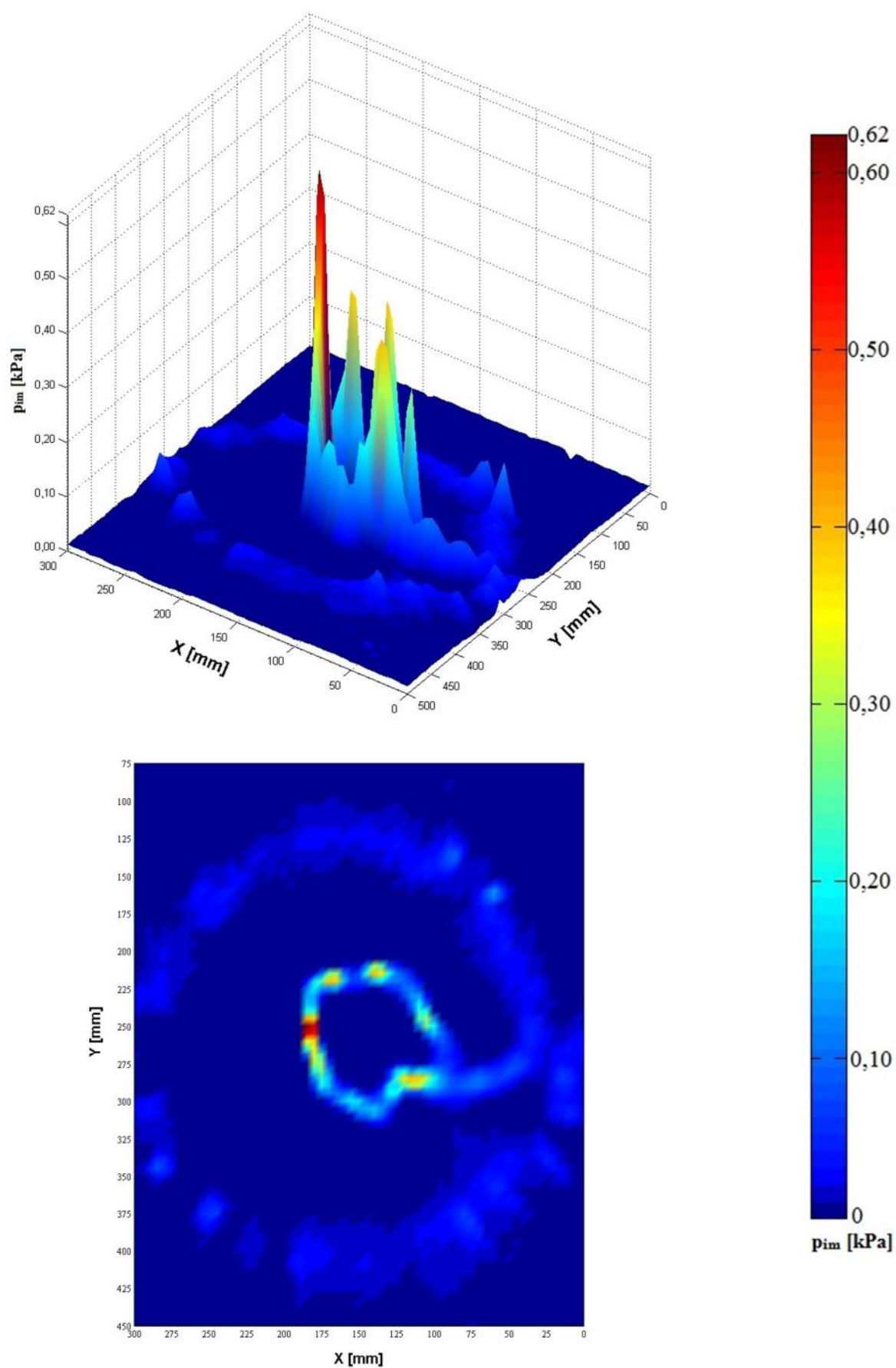
Zpracovaná data z měření v jednotlivých hladinách jsou zobrazena na Obr. 31 – Obr. 35, kdy v případě 3D grafů není zachován ekvidistantní poměr jednotlivých os. Kartézská soustava souřadnic je natočena tak, aby odpovídala záznamu impaktové stopy kapalinové clony z nadhledu, dle umístění trysky při experimentech. Hodnoty nárazových tlaků, které byly při tomto experimentu naměřeny, je třeba brát s rezervou a prezentované grafy slouží spíše jako vizualizace dopadové stopy blízkého pole vytvářené kapalinové clony pro dva vnitřní kužely. Hodnoty nárazových tlaků totiž dosahují velmi malých hodnot (v maximálním případě 0,97 kPa). Důvodem je velikost dopadové plochy, která je dost značná pro měření takto jemného spreje. Dalším a hlavním aspektem je tvar kovového pouzdra. Během provozu v určitých situacích docházelo k odrazu vodního paprsku od zkosené stěny pouzdra směrem pod dopadovou plochu. Tím docházelo k jejímu nadzvedávání a zkreslení přenášené informace o dopadovém tlaku na tenzometrický snímač.



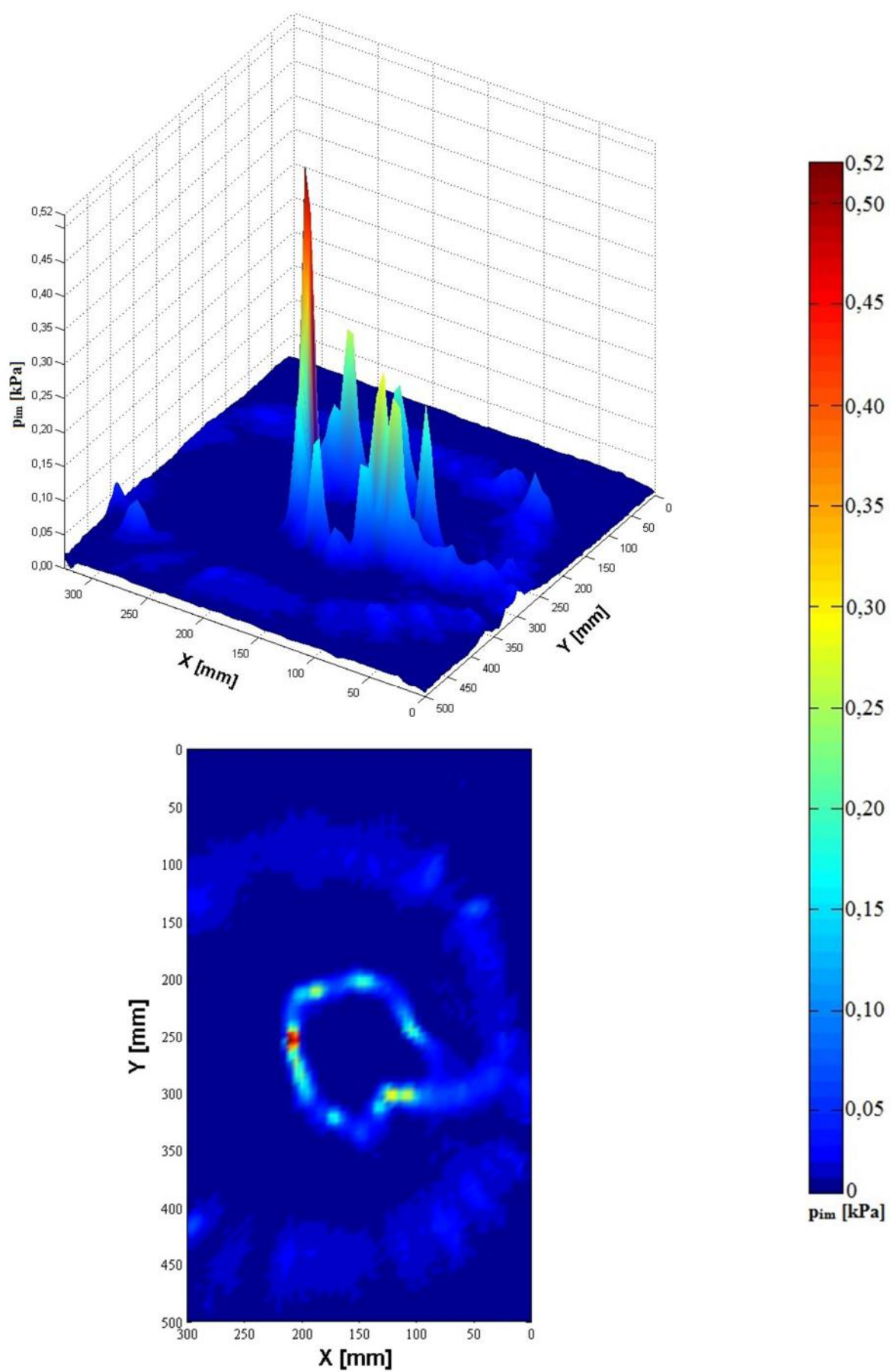
Obr. 31 Rozložení tlaku dopadající kapalinové clony v hladině I (60 mm od ústí trysky)



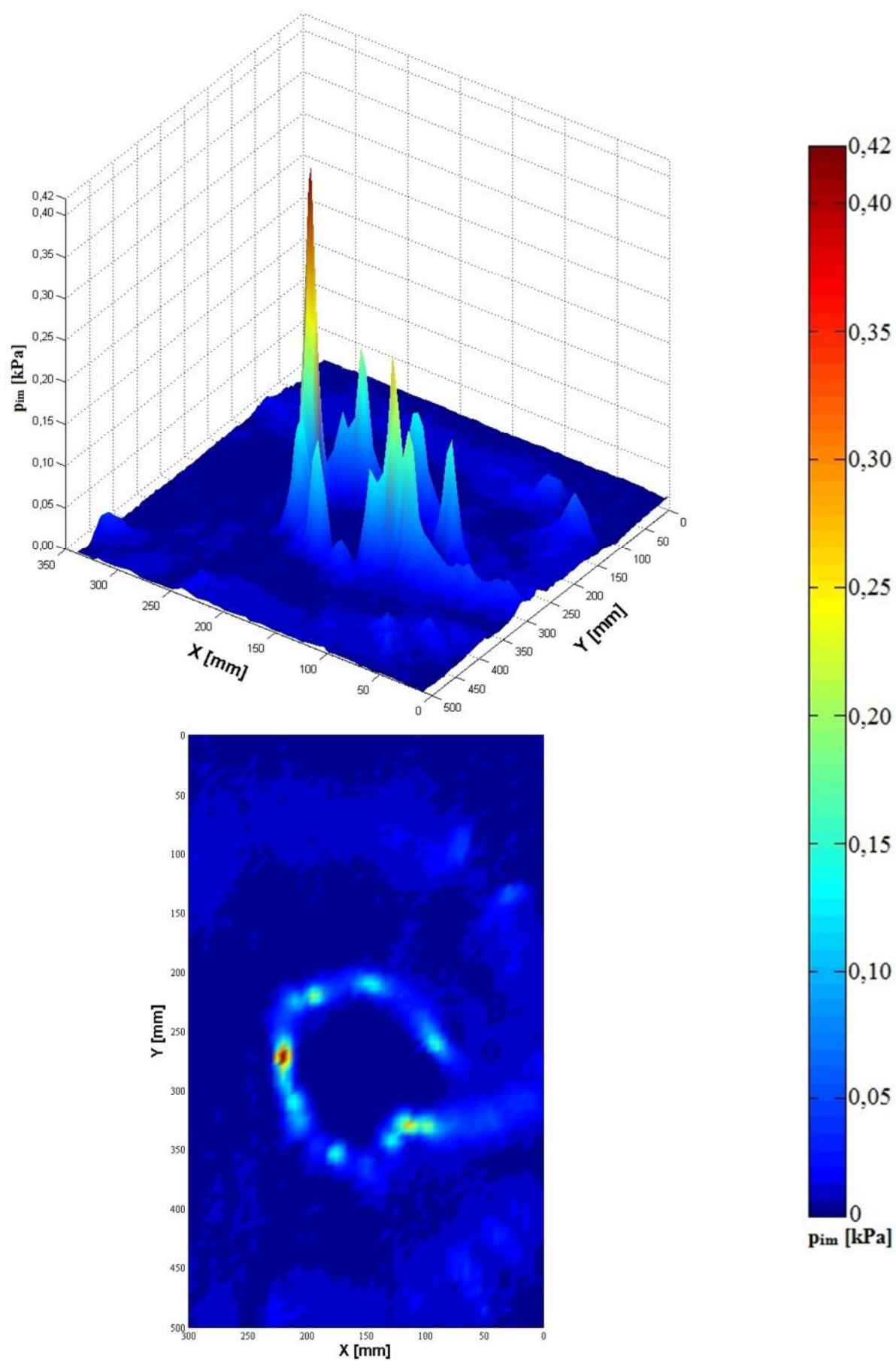
Obr. 32 Rozložení tlaku dopadající kapalinové clony v hladině 3 (80 mm od ústí trysky)



Obr. 33 Rozložení tlaku dopadající kapalinové clony v hladině 4 (100 mm od ústí trysky)



Obr. 34 Rozložení tlaku dopadající kapalinové clony v hladině 5 (120 mm od ústí trysky)



Obr. 35 Rozložení tlaku dopadající kapalinové clony v hladině 6 (140 mm od ústí trysky)

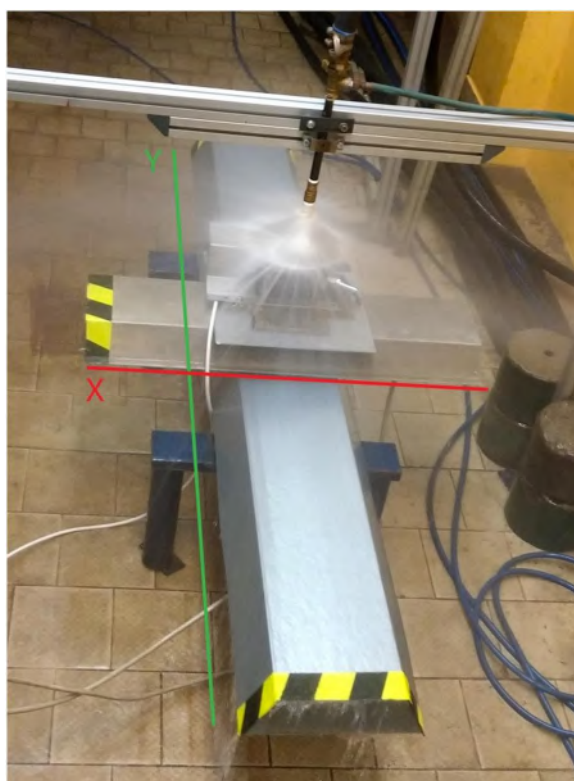
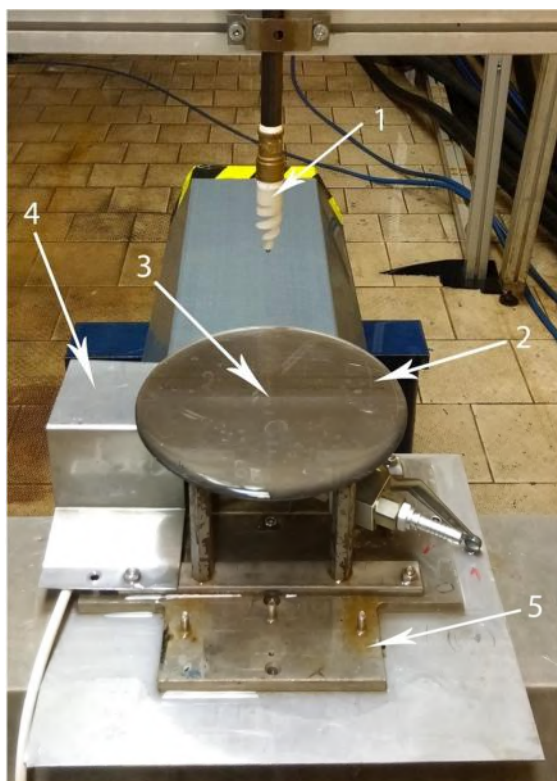
4.2.2.2 Druhá sada měření

Ve druhé etapě byla dopadová plocha nahrazena sestavou, která eliminovala negativní vliv konstrukce dopadové plochy z první etapy. Dopadová plocha byla řešena rovinnou deskou o průměru 200 mm s vyvrtaným otvorem o průměru 1 mm v jejím středu. Tento otvor by na spodní straně spojen s tenzometrickým tlakovým senzorem a před samotným měřením byl zcela zalit vodou. Při provozu trysky byl poté nárazový tlak fluktuací kapaliny přenášén na senzor (Obr. 36).

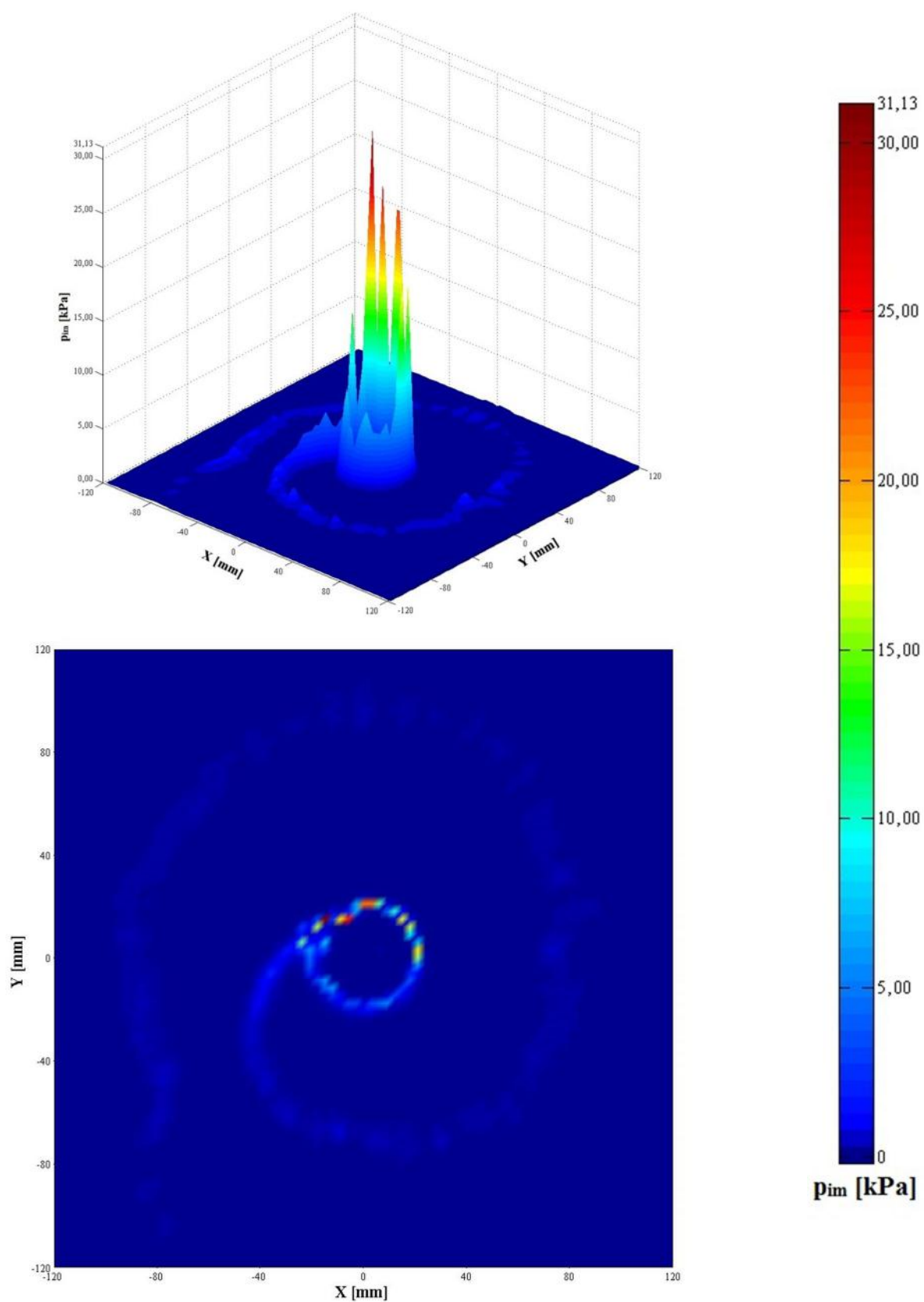
Další přístrojové uspořádání i pohyb ramen v osách X - Y byl shodný s předešlou sadou měření. Pouze rozsah naskenované oblasti činil 240 mm v obou směrech a posun ramen v každém kroku byl nastaven na hodnotu 3 mm. Všechna měření probíhala v hladině 2, tedy ve vzdálenosti 70 mm od počátku ústí trysky (Obr. 29). Experimenty probíhaly při různých hodnotách vstupních tlaků kapaliny na trysce a jím odpovídajících průtocích, které shrnuje Tab. 3. Teplota okolí byla 23 °C a hodnota atmosférického tlaku 1026 hPa.

Tab. 3 Vstupní tlaky (p_n) a průtoky kapaliny (V_n) při měření impaktů v druhé sadě měření

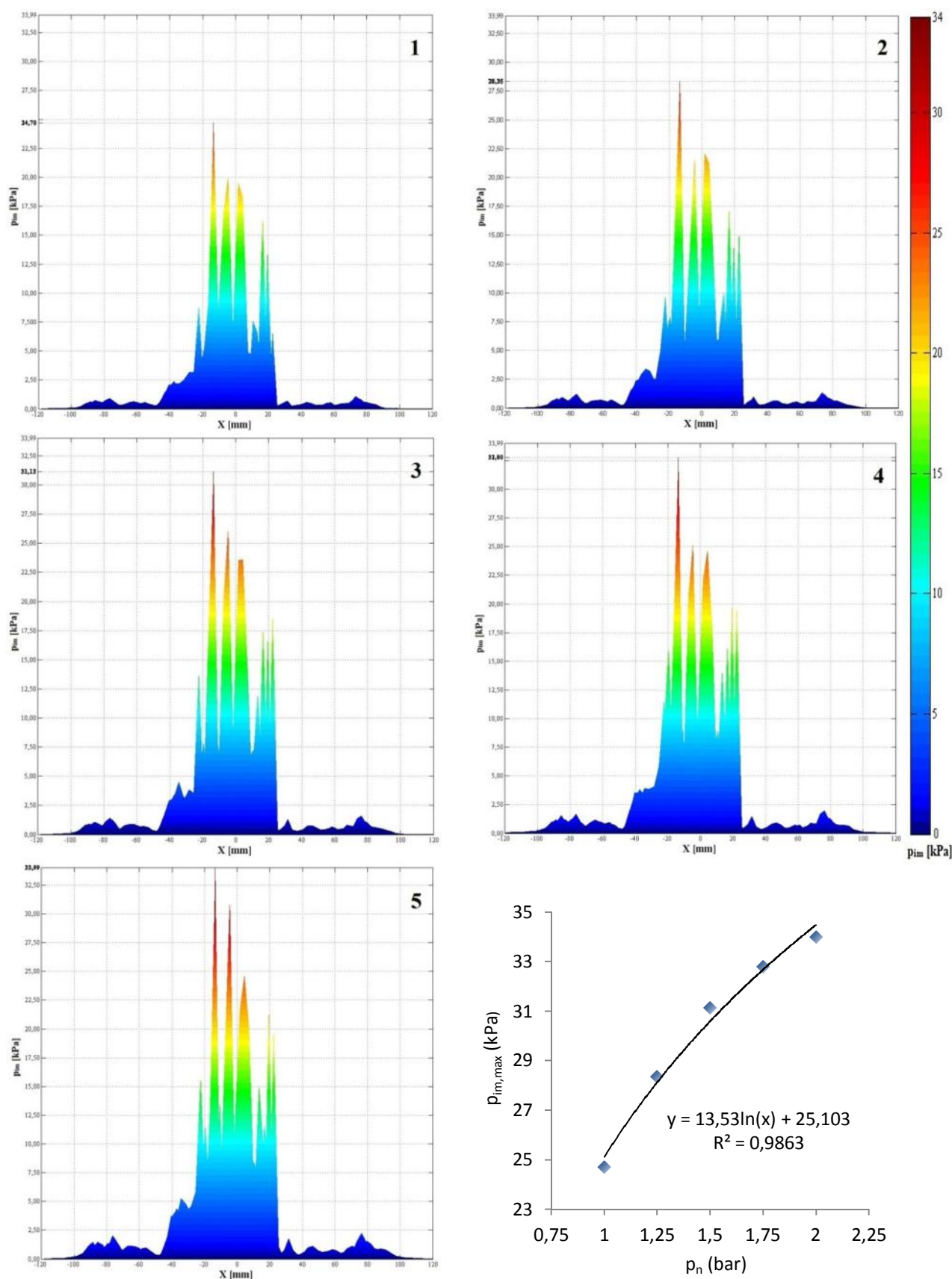
Měření	p_n (bar)	V_n (l·s ⁻¹)
1	1,00	1,25
2	1,25	1,41
3	1,50	1,54
4	1,75	1,65
5	2,00	1,76



Obr. 36 Přístrojové uspořádání při měření impaktů ve druhé sadě; poloha a natočení spirálové trysky TF-28 150 (1), dopadová deska (2), vyvrtaný otvor (3), kryt tenzometrického snímače (4), upevňující deska dopadové plochy (5)



Obr. 37 Příklad rozložení tlaku dopadající kapalinové clony v hladině 2 pro vstupní tlak kapaliny 1,50 bar



Obr. 38 Záznam impaktových tlaků u jednotlivých měření v hladině 2; pohled zepředu dle umístění trysky při měřeních

Na Obr. 37 se nachází příklad záznamu dopadové stopy v hladině 2 pro měření 3, tedy při vstupním tlaku kapaliny 1,5 bar na trysku. Další záznamy měření prezentované nejsou, jelikož dopadová stopa je tvarově velmi podobná, mění se jen její intenzita. Tuto intenzitu lze pozorovat na Obr. 38, kdy pohled v rovině XZ odpovídá poloze a natočení trysky při experimentech (Obr. 36 vlevo). Záznamy nárazových tlaků s upravenou dopadovou plochou během druhé etapy vykazovaly o dva řády vyšší hodnoty, jejich maxima v průměru dosahovala 19,98% tlaku kapaliny aplikované na trysku (Tab. 4). Úpravu konstrukce dopadové plochy lze proto považovat za úspěšnou a záznamy nárazových tlaků za odpovídající skutečnosti. Na druhou stranu je třeba poznamenat, že úhel rozstříku vnitřního „velkého“ kuželu byl už vcelku markantní pro měření impaktů, proto je zaznamenaná intenzita nárazových tlaků poměrně nízká.

Tab. 4 Poměr maximálního nárazového tlaku ke vstupnímu tlaku kapaliny na trysku

Měření	$\frac{p_{im,max}}{p_n}$
	(%)
1	20,7
2	22,7
3	20,8
4	18,7
5	17,0

4.2.2.3 Vyhodnocení intruzivního měření

Ačkoli nebyla konstrukce dopadové plochy z první etapy ideální, záznam vývoje vnitřních kuželů kapalinové clony byl pořízen. Společně se záznamem dopadové plochy z druhé etapy měření byl vyhodnocen efektivní úhel rozstříku obou vnitřních kuželů pro vstupní tlak kapaliny na trysku 2 bar. Je třeba zmínit, že na základě měření z druhé etapy pro různá nastavení vstupních tlaků, se se zvyšujícím vstupním tlakem efektivní úhel rozstříkané kapaliny měnil pouze nepatrně.

Podstava vnitřních kuželů, formující se v jednotlivých hladinách od ústí trysky, může být vyjádřena parametrickou rovnicí Archimédovi spirály, jejíž zápis v obecném tvaru je následující:

$$x = a\theta\cos\theta + S_x \quad (4.2)$$

$$y = a\theta\sin\theta + S_y \quad (4.3)$$

kde x a y jsou body křivky v souřadnicových osách, a je hledaný parametr, S_x a S_y jsou posunuté středy spirál a θ je úhel mezi polopřímku (popisující trajektorii pohybu vykreslení spirály) a polární osou soustavy.

Hodnoty parametrů a vnitřních kuželů v jednotlivých hladinách shrnuje Tab. 5. Příklad parametrického vyjádření spirály v hladině 3 (Obr. 39) je pro „malý“ kužel:

$$x = 2,6\theta\cos\theta + 145 \quad (4.4)$$

$$y = 2,6\theta\sin\theta + 250 \quad (4.5)$$

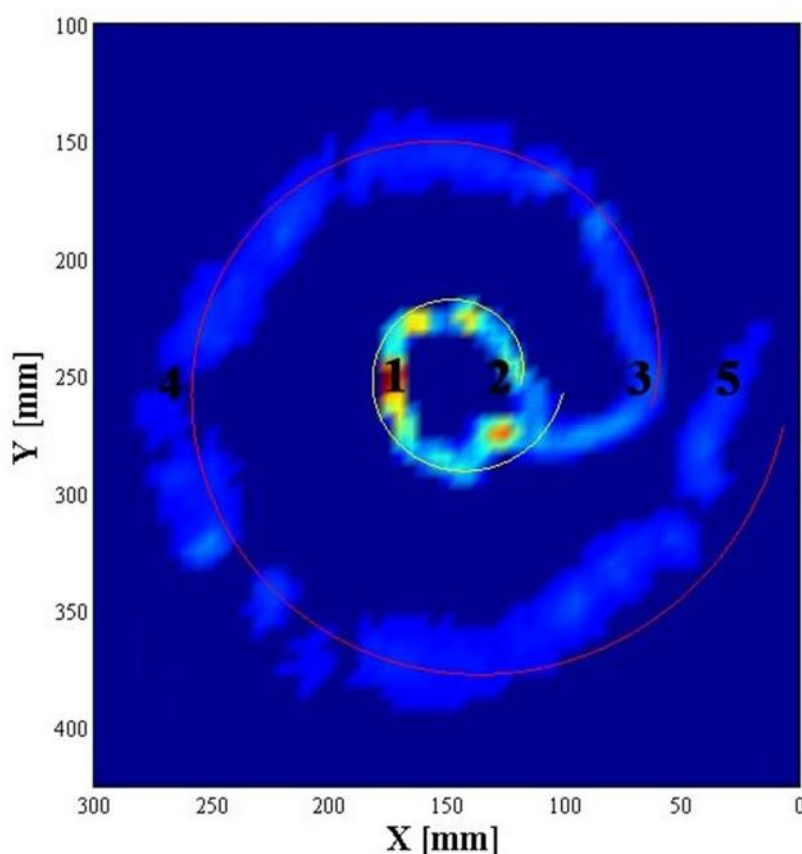
a pro „velký“ kužel:

$$x = 9\theta\cos\theta + 145 \quad (4.6)$$

$$y = 9\theta\sin\theta + 250 \quad (4.7)$$

kdy pro všechny hladiny platí $\theta \in (2,95\pi; 4,95\pi)$.

Spirálovité křivky kopírují tvar dopadové stopy vnitřních kuželů, tedy jsou v souladu s naměřenými daty. Výjimku nacházíme ve čtvrtém kvadrantu, neboť geometrie trysky a přechod mezi jednotlivými kužely (spirály o různých parametrech) má za následek lokální změnu toku vodního proudu.



Obr. 39 Označení vodních paprsků a grafické znázornění spirál představujících základny vnitřních kuželů pro hladinu 3

Tab. 5 Hodnoty parametrů „a“ spirálovitých podstav vnitřních kuželů

Hladina	Střed spirály		Parametr a	
	S_x	S_y	"malý" kužel	"velký" kužel
1	150	310,0	1,8	6,8
2	0	1,5	1,9	6,7
3	145	250,0	2,6	9,0
4	140	255,0	3,7	11,4
5	150	255,0	5,1	15,5
6	145	280,0	6,2	–

V grafech na Obr. 31 – Obr. 35 a Obr. 37 lze pozorovat tvar vnitřních kuželů a jejich vzájemný přechod, který vychází z geometrie spirálové konstrukce měřené trysky. Rozsah „malého“ kuželu byl spočítán součtem vnitřních úhlů 1. a 2. vodního paprsku, rozsah „velkého“ kuželu součtem vnitřních úhlů 4. a aritmetickým průměrem 3. a 5. vodního paprsku (Obr. 39). Při výpočtu vnitřních úhlů jednotlivých paprsků vůči axiální ose trysky byla pozice reprezentující zahájení produkce paprsků od odrazových ploch aproximována dle natočení trysky při experimentech. Průměrné vzdálenosti počátků paprsků od počátku ústí spirálové trysky jsou zobrazeny na Obr. 29. Na základě rozsahu vodního paprsku obou vnitřních kuželů v daných hladinách byl vypočítán jejich efektivní úhel rozstříku γ_{ef} (Tab. 6). Průměrné hodnoty efektivního úhlu rozstříku pro „malý“ a „velký“ vodní kužel činí 61,7° a 115,5°.

Tab. 6 Efektivní úhly rozstříku γ_{ef} „malého“ a „velkého“ vodního kuželu

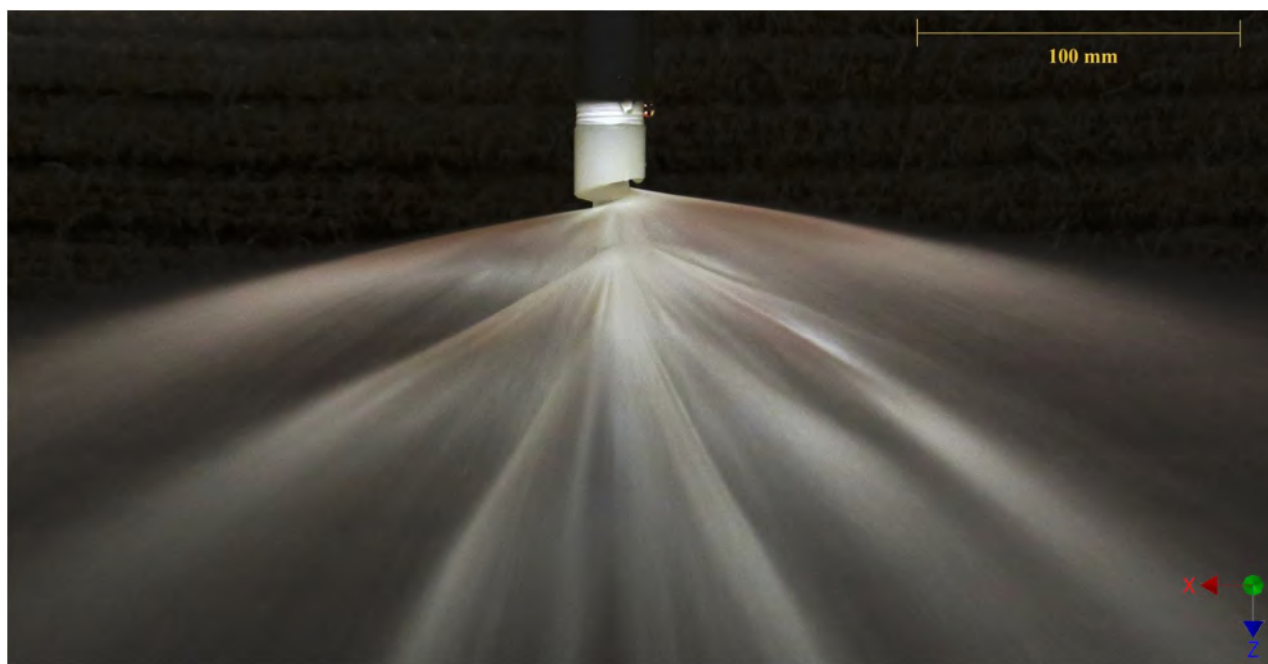
Hladina	Paprsek	Vnitřní úhly (°)	γ_{ef} (°)	
			"malý" kužel	"velký" kužel
1	1	29,10	62,50	119,59
	2	33,40		
	3	55,78		
	4	61,78		
	5	59,83		
2	1	31,15	63,14	104,62
	2	31,99		
	3	44,64		
	4	60,63		
	5	59,32		
3	1	27,20	60,03	119,56
	2	32,83		
	3	54,46		
	4	61,59		
	5	61,48		
4	1	27,01	61,25	118,88
	2	34,25		
	3	56,31		
	4	60,54		
	5	60,36		
5	1	29,53	60,36	114,73
	2	30,83		
	3	54,25		
	4	60,48		
	5	–		
6	1	29,80	63,16	–
	2	33,35		
	3	–		
	4	–		
	5	–		
$\emptyset$			61,74	115,47

4.2.3 Vizualizace kapalinové clony

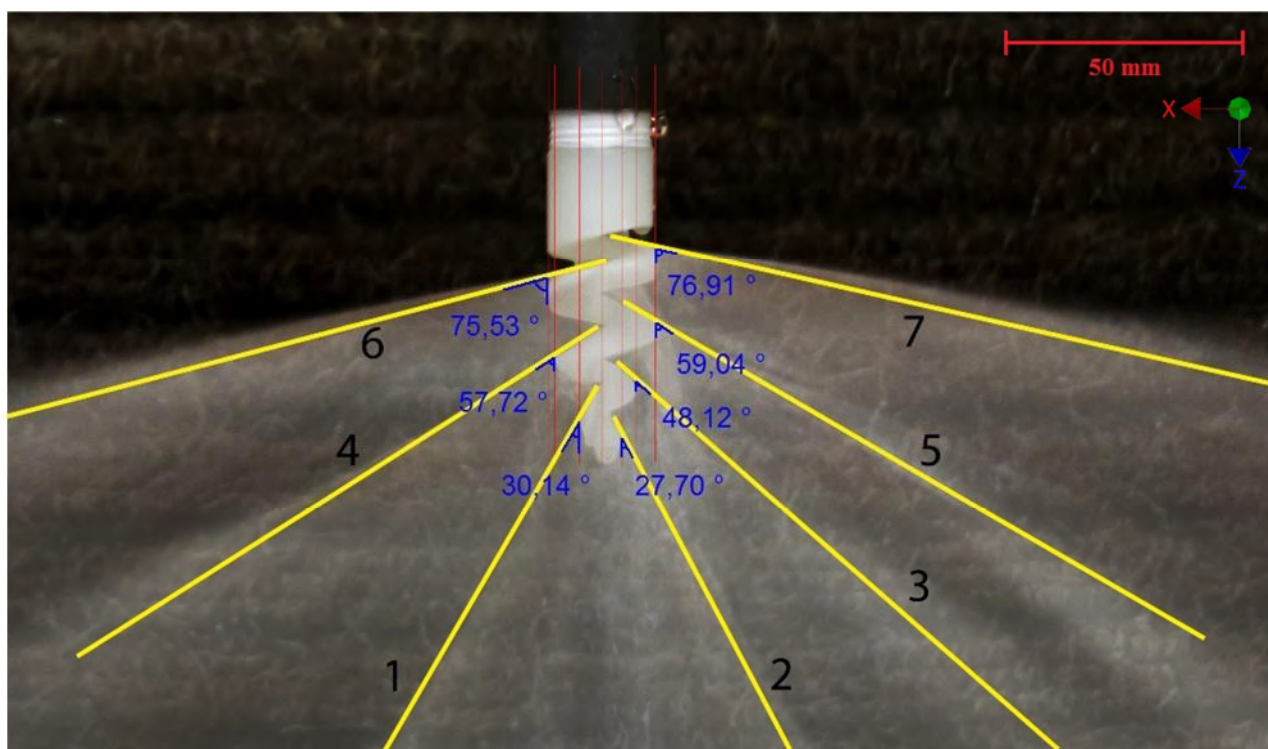
Z vhodně pořízených fotografií rozstřikující kapaliny je možné odečíst hodnotu odklonu úhlu od svislé osy trysky. Osa objektivu fotoaparátu, umístěného na stativu, byla kolmá na vertikální rovinu trysky a střed fotografie se nacházel v průsečíku ústí trysky a její svislé osy. Toto umístění společně se známými skutečnými rozměry snímané oblasti (v podélném i příčném směru) zajistilo minimální zkreslení stanovovaných úhlů pro jednotlivé paprsky formující kužely kapalinové clony.

Porovnáním sady pořízených fotografií během provozu trysky (Obr. 40) a snímků bez rozstřiku kapaliny, byly vyčleněny hlavní vodní paprsky produkující kužely kapalinové clony při dané konfiguraci zkoumané trysky (Obr. 41), konkrétně při hodnotě vstupního tlaku 2 bar a průtoku kapaliny $1,77 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Natočení trysky při experimentech odpovídalo případu B na Obr. 28, tedy čelnímu pohledu v rovině XZ . Vyhodnocení odklonu úhlů jednotlivých paprsků od svislé osy trysky bylo realizováno v programu Stream Motion, jejich průměrné hodnoty uvádí Tab. 7. Z hodnot úhlů jednotlivých paprsků byl poté spočítán efektivní úhel rozstřiku vnějšího i vnitřních kuželů kapalinové clony (Tab. 8). Průměrná hodnota efektivního úhlu rozstřiku vnějšího „svrchního“ kuželu byla odečtena na $152,25^\circ$, hodnota vnitřního „malého“ kuželu činila $58,01^\circ$ a vnitřního „velkého“ kuželu $111,12^\circ$. Srovnáme-li hodnoty obdržených efektivních úhlů rozstřiku pro oba vnitřní kužely s metodou uváděnou v kapitole 4.2.2.3 (Vyhodnocení intruzivního měření), obdržíme hodnoty menší o 6 % pro „malý“ a o 3,5 % pro „velký“ kužel.

Vzhledem k povaze měření, kdy zachycení trojrozměrně vyvíjené kapalinové clony na dvourozměrnou fotografii s sebou nese jisté zkreslení vždy a zároveň neostrá hranice i subjektivní přístup pro vytyčení počátků proudů paprsků kapalinových kuželů, který i při velmi malých polohových změnách značně mění hodnoty jejich vnitřních úhlů, lze odchylky efektivních úhlů rozstřiku dle jednotlivých metod měření a vyhodnocení v rámci jednotek procent tolerovat.



Obr. 40 Fotografie vyvíjené kapalinové clony s aplikovaným filtrem



Obr. 41 Porovnání obdrženích fotografií s vyznačením hlavních paprsků (1 až 6) a úhlů (pro 2. měření), které svírají se svislou osou trysky

Tab. 7 Úhly rozstříku jednotlivých paprsků

Paprsek	Vnitřní úhel (°)			$\varnothing$
	1. měření	2. měření	3. měření	
1	30,25	30,14	30,31	30,23
2	27,85	27,70	27,79	27,78
3	48,15	48,12	48,29	48,19
4	57,84	57,72	57,79	57,78
5	59,03	59,04	59,18	59,08
6	75,42	75,53	75,35	75,43
7	76,75	76,91	76,80	76,82

Tab. 8 Efektivní úhly rozstříku γ_{ef} vnějšího („svrchního“) kuželu a vnitřních („malého“ i „velkého“) kuželů

Kužel	γ_{ef} (°)
„malý“	58,01
„velký“	111,42
„svrchní“	152,25

Při vizualizaci kapaliny bylo též snahou proniknout přes vnější povrch vytvářené kapalinové clony blíže ke stěnám jednotlivých spirál trysky a získat tak podrobnější představu o tvaru a vývoji jednotlivých kapalinových kuželů, především ve spodních částech ústí trysky. Byla zvolena metoda, kdy na stěnu trysky v její axiální ose byla upevněna přepážka a tím bylo dosaženo otevření jednotlivých paprsků. K zajištění minimálního ovlivnění distribuce kapalinových kuželů, kapalinou odraženou od povrchu přepážky, byla její šířka pouhých 5 mm a v podélném směru byla ohnuta do tvaru písmene „U“ po proudu kapaliny šířící se od odrazových ploch trysky do okolního prostředí. Na Obr. 42 lze pozorovat výsledný záznam vývoje kapalinové clony při provozním tlaku 2 bar.

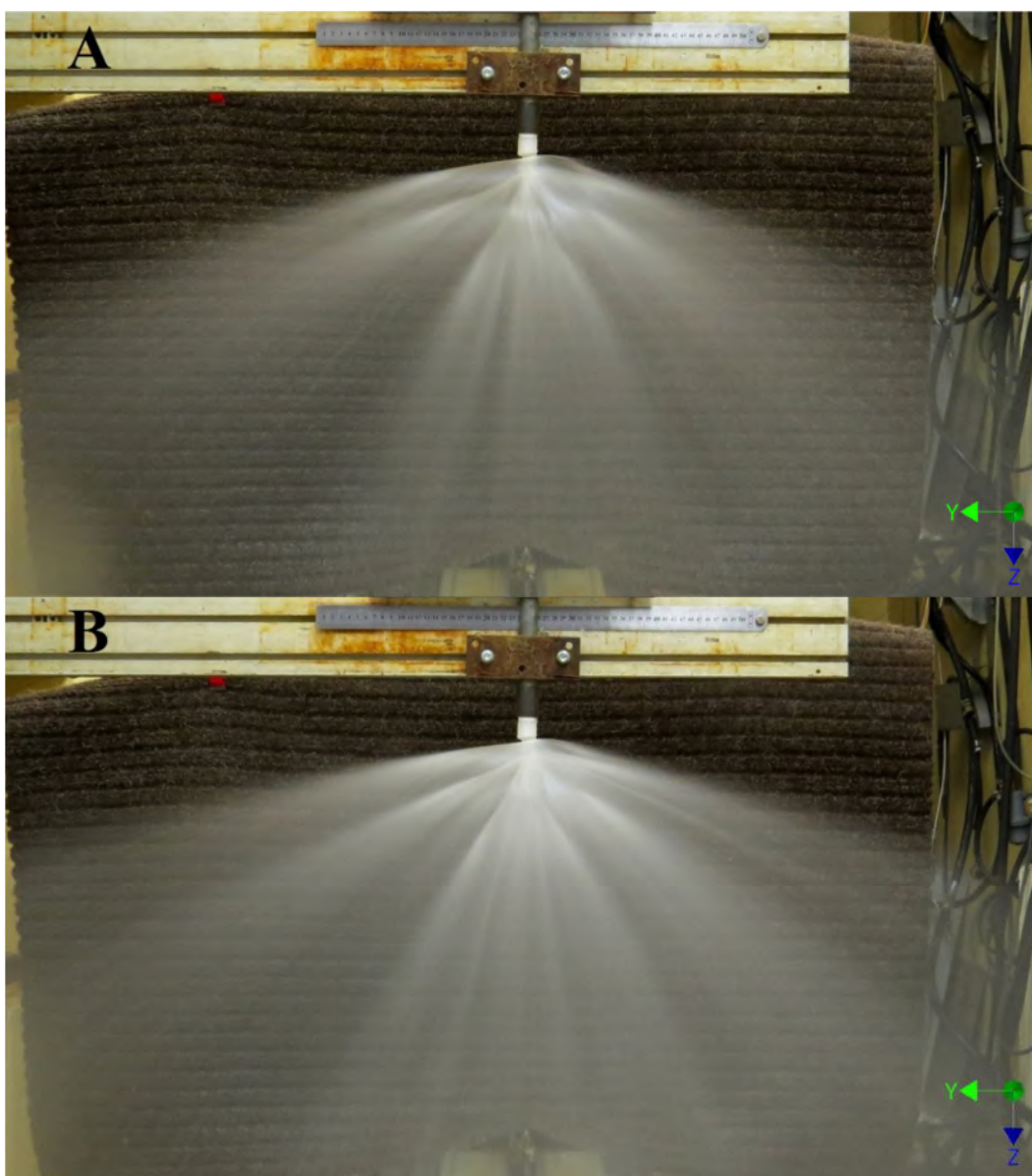
Instalovaná přepážka sice nedovolovala odečíst přesné úhly vnějšího „svrchního“ a vnitřního „velkého“ kapalinového kuželu, jelikož šířka přerušených clon nepřesahovala přes celou rovinu XZ . Nicméně se naskytla možnost pozorovat naprosto neovlivněný vnitřní „malý“ kapalinový kužel. V detailnějším zobrazení v levém horním rohu na Obr. 42 bylo možné, po aplikaci filtru eliminujícího jemnější okolní koncentraci kapalinové mlhy, rozeznat snadněji okraje proudů vnitřního „malého“ kapalinového kuželu a vyhodnotit jejich vnitřní úhly. Efektivní úhel rozstříku byl změřen na $53,8^\circ$ ($28,6^\circ + 25,2^\circ$), což činí hodnotu menší o 12,9 % oproti měření v kapitole 4.2.2.3 (Vyhodnocení intruzivního měření) a hodnotu menší o 7,3 % oproti měření z úvodu této kapitoly. Jemnější mlha nacházející se mezi 2 a 3 vodním paprskem (Obr. 29) je způsobena přechodem mezi vnitřními („malý“ a „velký“) kapalinovými kužely. Jinými slovy, konstrukce sklonu vysoustružených odrazových ploch v přechodové oblasti mezi geometriemi jednotlivých spirál prochází skokovou změnou, což má za následek lokální posun paprsku a menší koncentraci kapalinového spreje v daném místě.



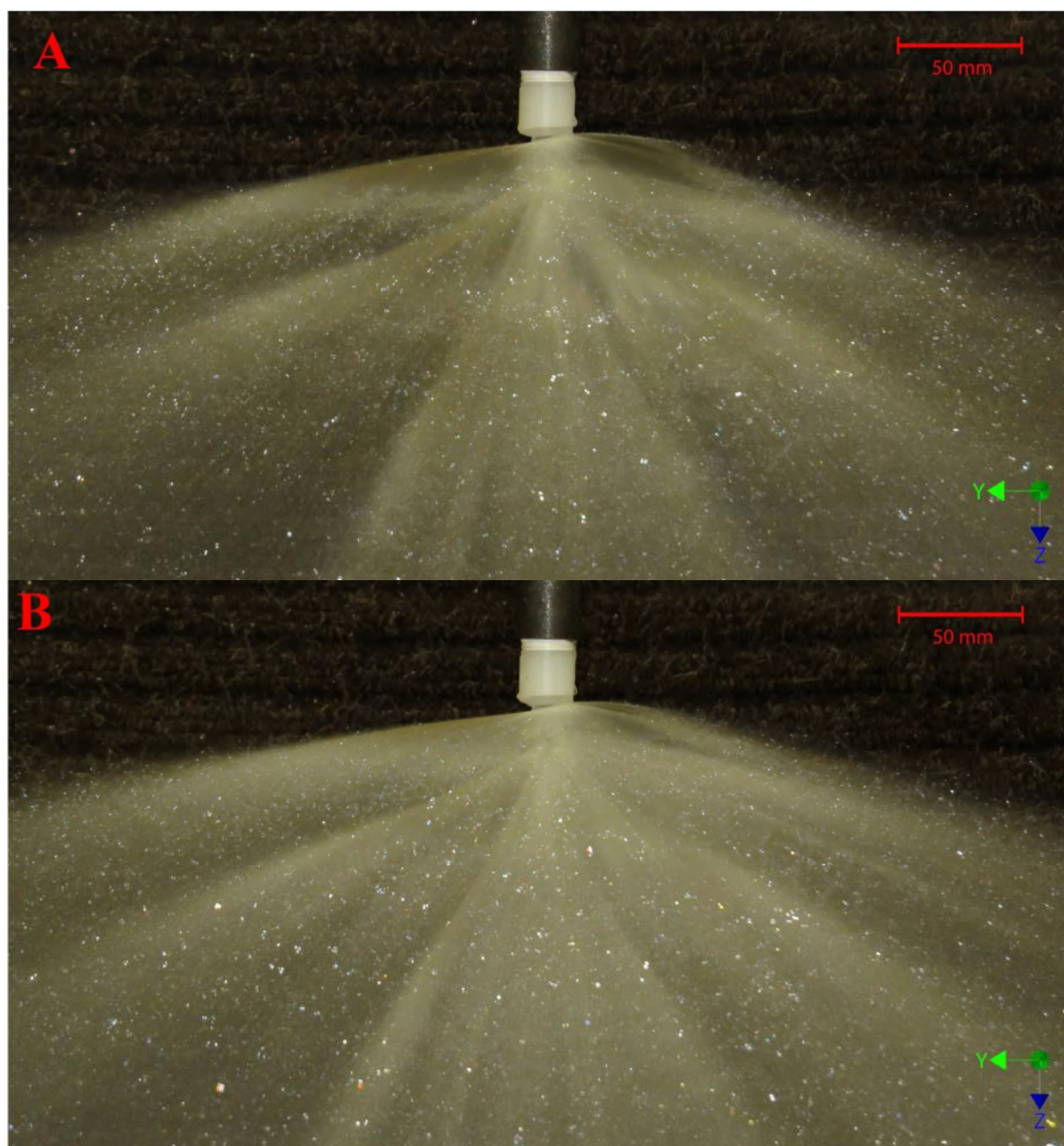
Obr. 42 Vývoj kapalinové clony s instalovanou přepážkou pro otevření kapalinové clony; v levém horním rohu detailnější pohled na trysku s aplikovaným filtrem pro snadnější rozeznání okrajů paprsků

V dalším kroku vyšetřování základních charakteristik trysky byly pořízeny fotografie vyvíjené kapalinové clony při provozních tlacích s odpovídajícími průtoky kapaliny na trysce (Obr. 43 a Obr. 44). Konkrétně se jednalo o provozní tlak 1 bar ($V_n = 1,25 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$) pro případ A a 2 bar ($V_n = 1,77 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$) pro případ B. Z názorných důvodů bylo natočení trysky zvoleno pro změnu z čelního pohledu v rovině YZ (případ C na Obr. 28), jelikož spirálová tryska, z podstaty své konstrukce, neobsahuje žádnou rovinu symetrie.

Z fotografií na Obr. 43 a Obr. 44 lze pozorovat, že při zvýšení vstupního tlaku na trysku dochází k intenzivnějšímu rozstříku kapaliny do okolí, avšak jen s velmi malou změnou efektivního úhlu rozstříku kapalinové clony. Hustota spreje je výraznější, neboť vyšší hodnoty tlakové i kinetické energie kapaliny na výstupu se transformují, při opuštění vnitřního prostoru trysky a následném odrazu od stěn spirálovitých prstenců, na produkci jemnější kapalinové mlhy s většími rychlostmi proudících kapek v prostoru. Spirálová tryska, na rozdíl od tradičních trysek, podléhá menšímu ovlivnění výtokového úhlu s měnícím se tlakem rozstřikující kapaliny.



Obr. 43 Vývoj kapalinové clony při A) provozním tlaku 1 bar na spirálové trysce a B) provozním tlaku 2 bar na spirálové trysce



Obr. 44 Detailnější fotografie vyvíjené kapalinové clony s využitím blesku při A) provozním tlaku 1 bar na spirálové trysce a B) provozním tlaku 2 bar na spirálovité trysce

4.2.4 Neintruzivní měření kapalinové clony

Měření charakteristik generovaného spreje spirálovou tryskou bylo realizováno také ve vnitřním prostoru zmenšeného modelu skrápěcí hlavy absorpčního scrubberu vyrobeného z PVC-glas. Transparentní model skrápěcí hlavy byl společně se zásobní nádrží osazen na základovém rámu a instalované odstředivé čerpadlo zajišťovalo cirkulaci kapaliny přes spirálovou trysku. Testy byly provedeny za pokojové teploty (20 °C), cirkulující kapalinou byla kohoutková voda se vstupním tlakem na trysce 1 bar ($V_n = 1,25 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$). Bohužel vyššího vstupního tlaku nebylo možné dosáhnout, jelikož výkon čerpadla byl poddimenzován. Zmenšený model testovacího zařízení byl dodán jako celek od partnerské firmy MVB Opava a vzhledem k návaznosti jednotlivých úkonů a zamluvenému datu v laboratoři nebylo možné zařízení osadit závčasou výkonnějším čerpadlem.

Pro detailnější posouzení morfologie generovaného spreje byla využita modifikovaná verze klasické fotografie, kde modifikace spočívala v typu použitého osvětlení, které se ve velké míře podílí na kvalitě výstupů. Původně zamýšlená PIV metoda se nakonec z důvodu velké náročnosti nastavení a omezeného optického přístupu k jednotlivým kapalinovým clonám (kuželům) nevyužila. Druhou neintruzivní metodou v rámci měření uvnitř zmenšeného modelu byla metoda Laser Doppler Anemometry, která v našem případě přinesla informaci o radiální a tangenciální rychlosti kapaliny v daném prostoru.

Obě sady měření byly provedeny pomocí osvětlení s pulzním laserem Nd:YAG s délkou pulzu 5 ns. Obraz byl zachycen fotoaparátem Canon D70 s objektivem Canon EF 100 mm f/2.8 USM Macro. Optické přístroje byly umístěny ve vzájemně kolmých rovinách, přičemž pulzní laser osvětloval vyvíjející kapalinu z boční strany.



Obr. 45 Model skrápěcí hlavy pro testování kapalinové clony; Canon D70 s objektivem Canon EF (1), pulzní laser Nd:YAG (2), umístění spirálové trysky (3), odstředivé čerpadlo (4)

4.2.4.1 Velikost kapek

Během neintruzivního experimentálního zkoumání kapalinového spreje byly metodou modifikované verze klasické fotografie pořízeny série snímků vnější „svrchní“ kapalinové clony. Snímky byly zachyceny v různých vzdálenostech ve směru kolmém na vnější kapalinovou clonu. Z fotografického záznamu se stanovila morfologie vnějšího „svrchního“ spreje a rozměrovou analýzou se vyhodnotily velikosti jednotlivých kapek. Vyhodnocení se realizovalo v programu Stream Motion.

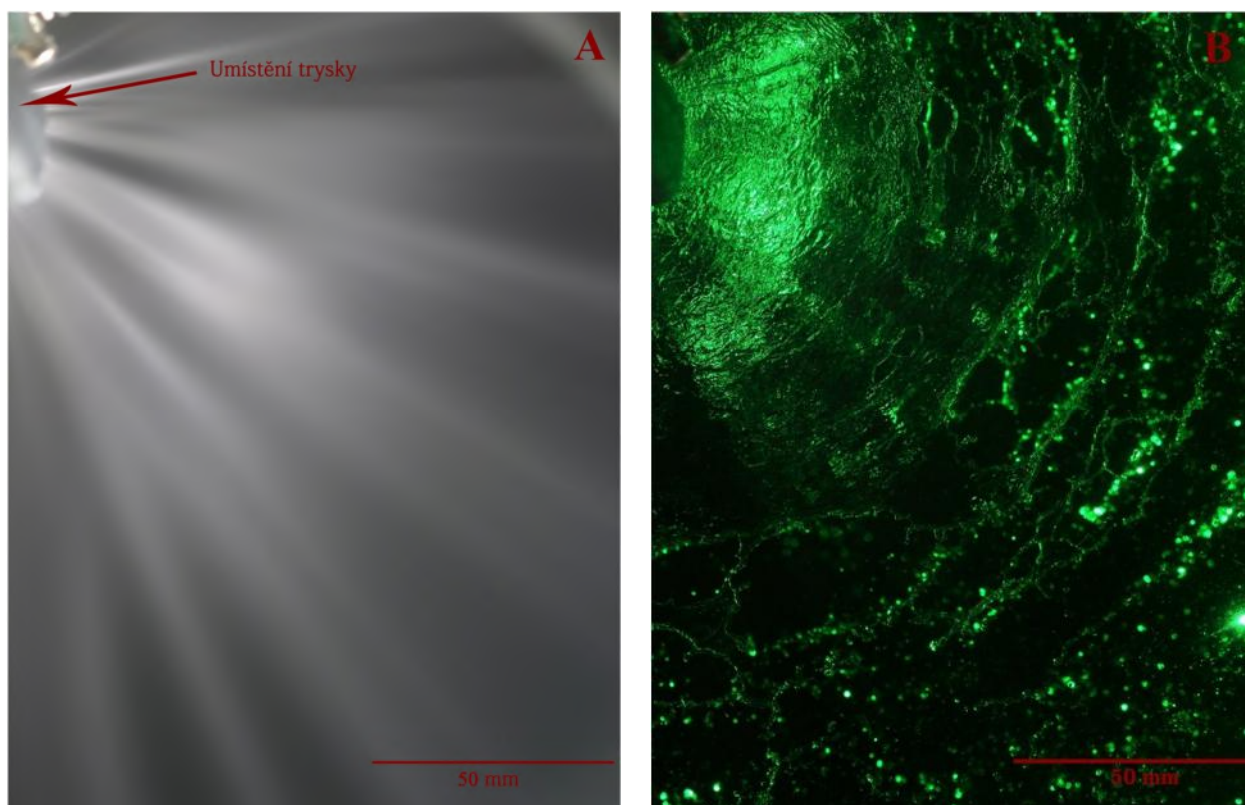
Snímky pořízené z nadhledu na vnější „svrchní“ kapalinovou clonu jsou zobrazeny na Obr. 46 až Obr. 48. Morfologie generovaného spreje v klasickém režimu záznamu se jeví, stejně jako při pozorování prostým okem, ve formě paprskovité vodní clony s měnící se hustotou kapalně fáze generované po obvodu odrazových ploch spirály (Obr. 46 případ A). V prosvětlené modifikované verzi klasické fotografie s možností rychlé frekvence snímání lze již rozlišit vodní stěnu šířící se periodicky do prostoru (Obr. 46 případ B).

Vodní stěna zůstává celistvá do vzdálenosti zhruba 80 mm od axiálního středu trysky (Obr. 47, případ A), i když zcela kontinuální je pouze v nejbližším okolí těla trysky a ve vzdálenějších oblastech této fáze distribuce lze pozorovat vývoj lokálních poruch v podobě perforací o různých velikostech (např. Obr. 47 případ A, Obr. 48 případ A). Mohou též vznikat poruchy, které se šíří v rámci celého objemu kapalinového filmu (Obr. 47 případ B). Hodnota Weberova čísla kapalinového proudu dosahuje v tomto případě velikosti více jak 22000, což je mnohem více než kritická hodnota 1000 navrhovaná jinými studiemi [67, 135]. V tomto režimu se dá očekávat velmi krátká radiální rozpadová vzdálenost a rapidně se ztenčující tloušťka kapalinové clony. Tloušťka kapalinové clony byla na základě vztahu (3.27) stanovena na 2,47 mm na okraji odrazové plochy spirály, která se s narůstající radiální vzdáleností postupně stále snižuje. Ve vzdálenosti 78 mm od axiální osy trysky, kdy pozorujeme přechod z kompaktní kapalinové clony na první ligamenty, byla tloušťka kapalinové clony stanovena na 330 μm . Z detailnějších snímků okraje kapalinové clony byla také stanovena šířka vyvíjené kapalinové clony. Měření probíhala na jejím okraji, před samotným rozpadem kapaliny na fragmenty, i v rámci vnitřního objemu na okraji děr. Průměrná hodnota šířky vnějšího „svrchního“ spreje byla stanovena na hodnotu 622 μm . Stanovená tloušťka kapalinové clony také klesá se zvyšujícím se průtokem kapaliny. Následuje fáze rozstříku do vzdálenosti zhruba 125 mm (Obr. 47, případ A), kdy se integrita vodní clony postupně narušuje markantněji, ať už vlivem vznikajících nových děr či rozšiřováním i spojováním děr dřívějších, za vzniku podlouhlých ligamentových útvarů (Obr. 47, případ B). První naměřené ligamenty (ve vzdálenosti 78 mm) měly velikost $1,86 \pm 0,57$ mm s vypočítaným časem rozpadu 10,9 ms (dle rovnice (3.35)), která se postupně snižovala na hodnotu $0,75 \pm 0,19$ mm s časem rozpadu 2,8 ms (ve vzdálenosti přibližně 120 mm). Stanovený průměr ligamentů byl spočítán na hodnotu 0,70 mm (z rovnice (3.33) s využitím korelace dle vztahu (3.32) pro bezrozměrnou vlnovou amplitudu v radiální vzdálenosti 120 mm).

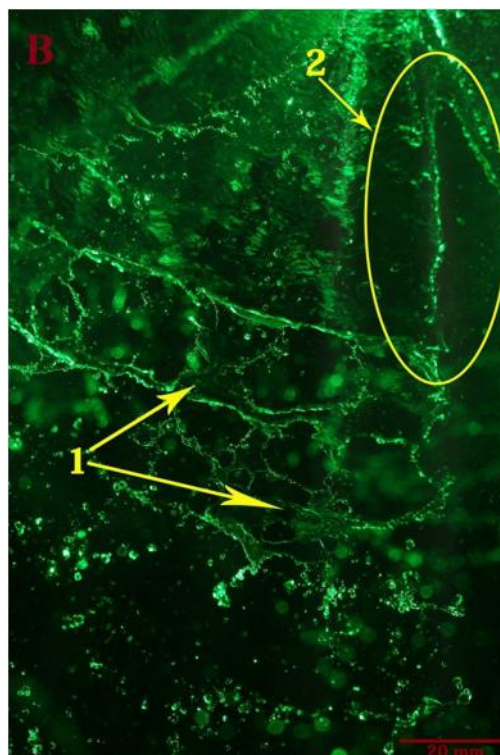
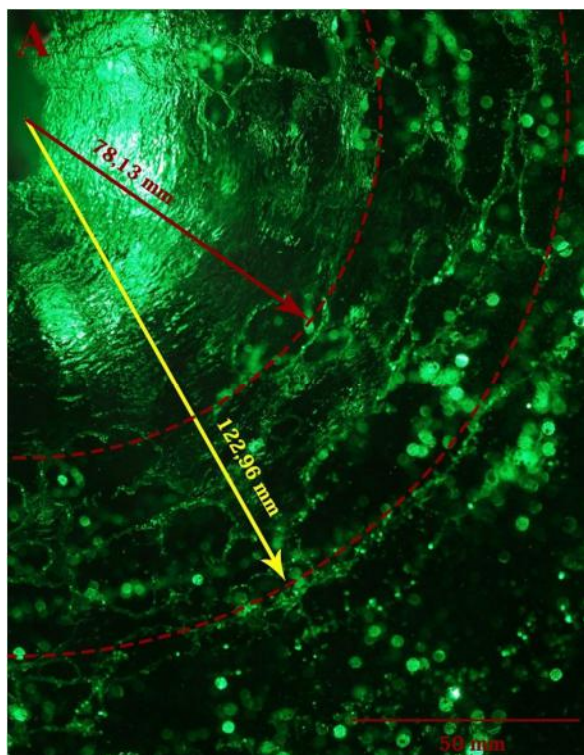
Z těchto ligamentů dále v rámci úzké oblasti vznikají jednotlivé kapky, jejichž velikost a struktura se s narůstající vzdáleností od trysky mění pouze minimálně (Obr. 48, případ C). Proces rozpadu ligamentů na jednotlivé kapky lze považovat za hranici, kdy rozlišujeme přechod z režimu primárního rozpadu kapalinové clony na režim sekundárního rozpadu tvořící výsledné kapky, ikdyž v tomto případě by se dalo hovořit spíše o kvazi-sekundárním rozpadu kapaliny. Vytvářené kapalinové clony kvalitativně podobných charakteristik byly v odborné literatuře

nalezeny pouze málo, přičemž nejvíce podobné spreje produkují podle literatury atomizéry protipožární ochrany (viz např. [74, 75, 136–138]). Tyto atomizéry se sestávají z konvergentní trysky s kužel-diskovým deflektorem umístěným v definované vzdálenosti pod tělem trysky a produkující kruhovou kapalinovou clonu. Proces vzniku kapalinové clony u obou typů trysek (spirálové a protipožární) je prakticky stejný.

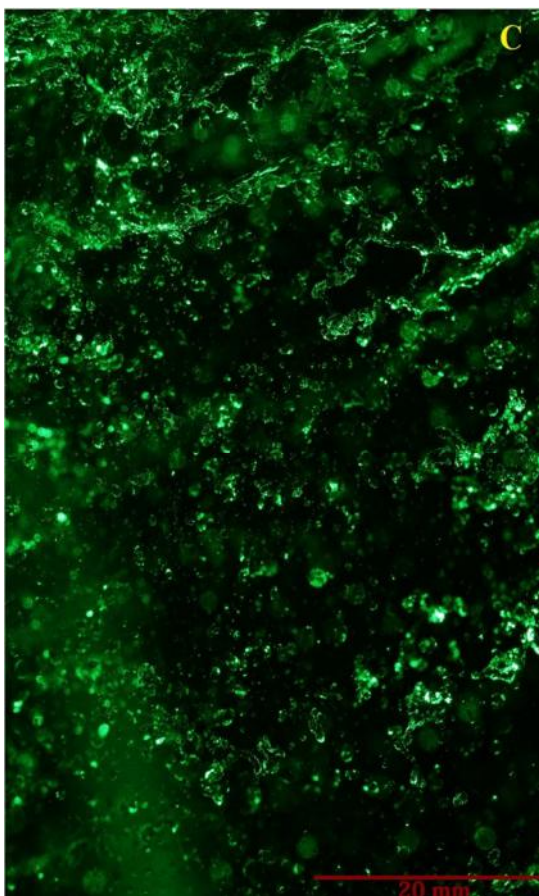
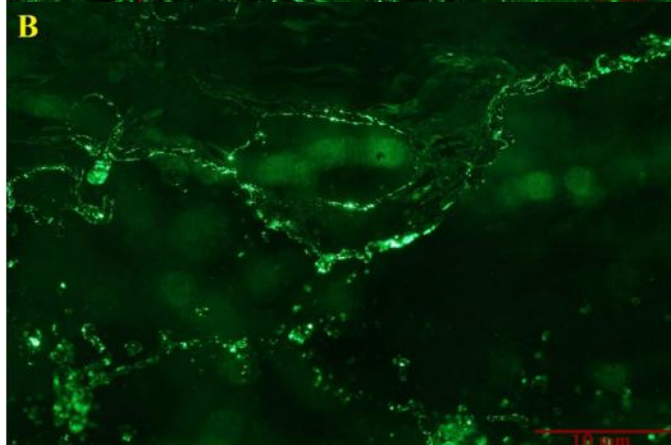
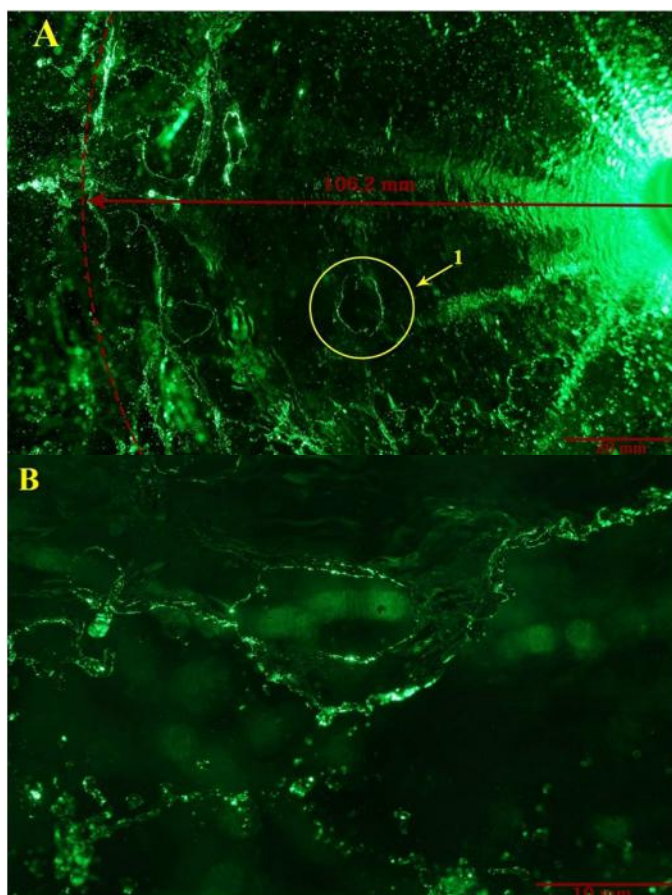
Bezrozměrné Weberovo číslo pro plynou fázi, vypočítané pro dané velikosti výsledných kapek (viz níže) a radiální rychlosti kapaliny (kapitola 4.2.4.2 Rychlost kapaliny), bylo nižší než hodnota 11. Podle některých studií tato hodnota značí buď absenci sekundárního rozpadu [139–141] či přítomnost deformačního režimu rozpadu kapek [69] nebo vibračního režimu rozpadu [68]. Na základě vizuálního pozorování pořízených fotografií vyvíjené kapalinové clony lze usuzovat na poslední dva jmenované rozpadové režimy. Je však nutné si uvědomit, že rozsahy Weberova čísla, definující jednotlivé režimy sekundárního rozpadu, byly původně odvozeny a definovány pro kapalinové proudy. V kapalinových kónických clonách může být situace odlišná.



Obr. 46 Fotografie vnější „svrchní“ kapalinové clony klasické (A) a modifikované prosvětlené (B) verze

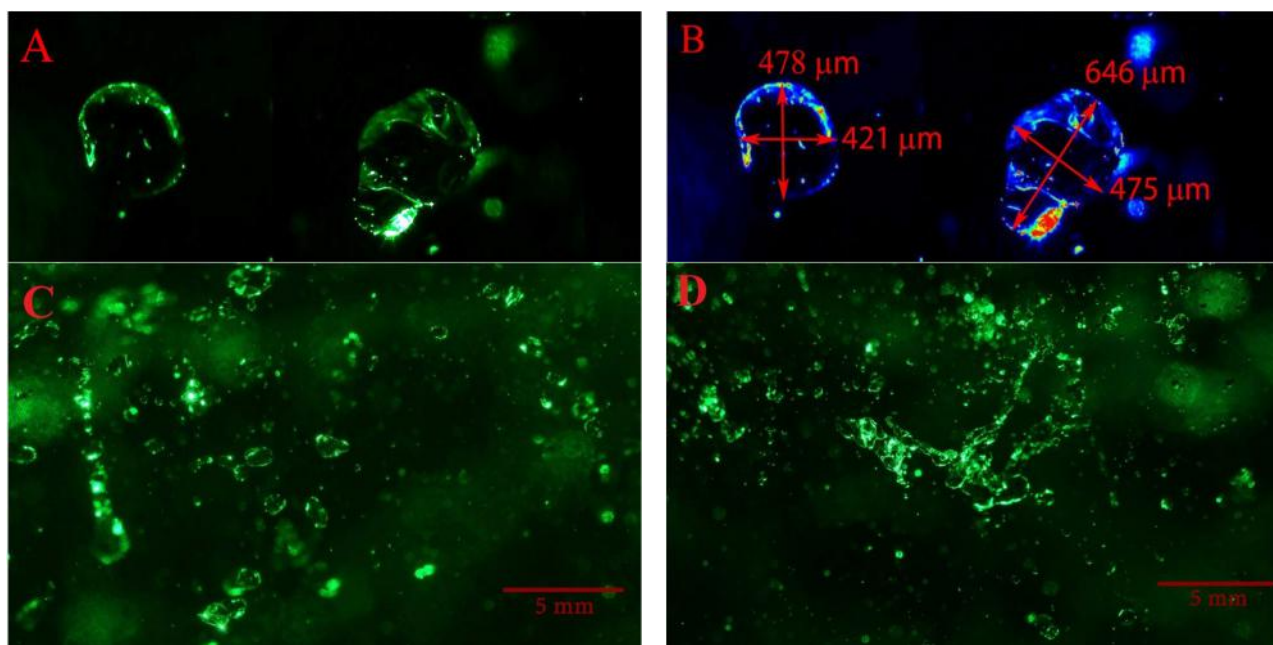


Obr. 47 A) Jednotlivé fáze distribuce kapalinné clony; B) Kapalinná clona, ligamenty (1) a protržení kapalinné clony v celém objemu (2)



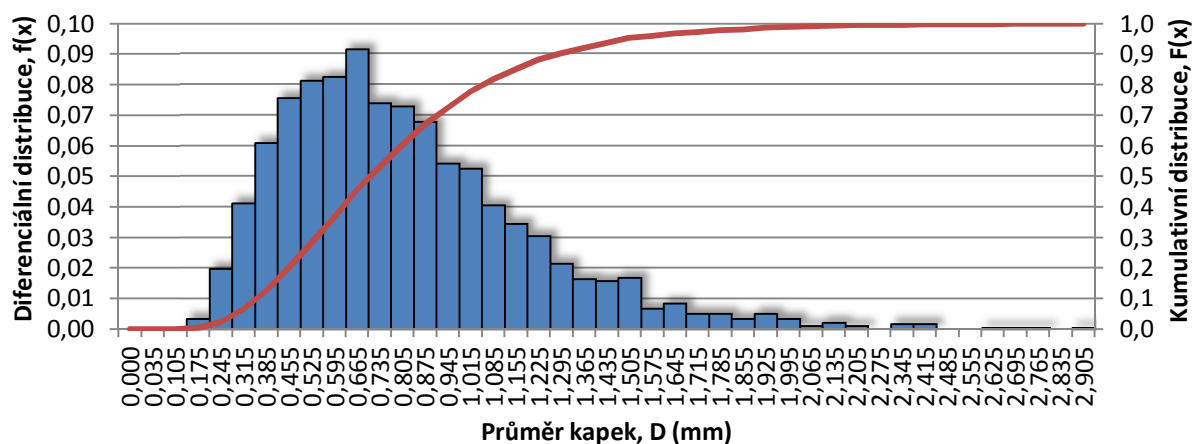
Obr. 48 A) Kapalinná clona, porucha - díra (1); Detail okraje kapalinné stěny (B); Rozpad na jednotlivé kapky - sekundární atomizace (C)

Z detailnějších snímků oblastí sekundární atomizace kapalinové clony, kdy docházelo k rozpadu ligamentů na výsledné kapky různých rozměrů (navíc obklopených satelitními či tzv. dceřinými kapkami), byly v programu Stream Motion vyhodnoceny průměry vybraných kapek. Za průkaznou kapku byl brán zřetelně definovaný objekt s ostrými okraji. Před samotným ručním měřením vzdáleností byl na obrazový záznam aplikovaný filtr, s jehož pomocí bylo možné lépe rozeznat obrys zaznamenané skutečné kapky od šmouhy či světelného záblesku na pozadí (Obr. 49). U kapek sférického tvaru byl měřený pouze jeden průměr, zatímco v nesymetrických případech byly měřeny dva průměry (Feretovi průměry) na sebe kolmé a z nich byl spočítán aritmetický průměr, který reprezentoval velikost dané kapky (Obr. 49, případ B). Konečný soubor, který byl tímto způsobem vyhodnocen, čítá 1773 průměrů kapek (součástí přílohy). Oproti běžně využívaným automatickým obrazovým algoritmům pro vyhodnocování průměrů a velikostí kapek, které mohou obsahovat desítky tisíc reprezentujících kapek, se jedná o malé číslo, nicméně i tak se stále jedná o široký soubor dat dávající statisticky základní přehled o velikosti vznikajících kapek v rámci vnější „svrchní“ kapalinové clony.

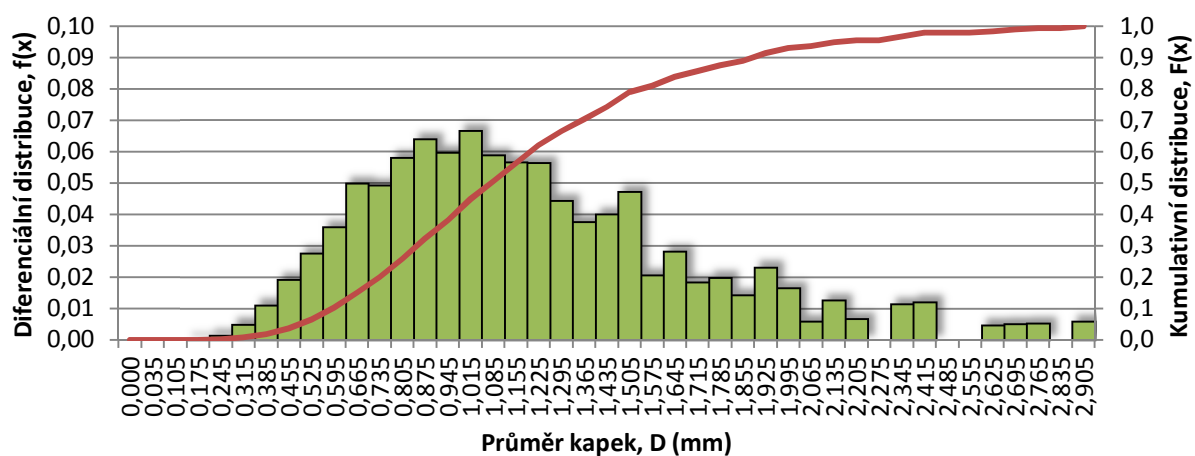


Obr. 49 Detailní fotografie sekundární rozpadové zóny (C, D) a příklad vyhodnocovaných kapek (A, B) z této oblasti

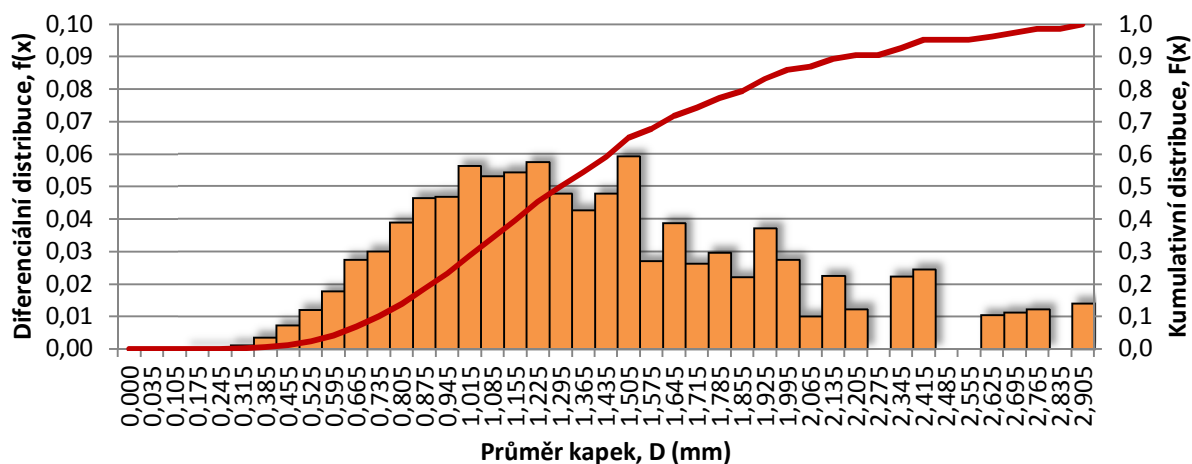
Z naměřených průměrů kapek byly sestaveny diferenciální diskrétní a kumulativní spojité distribuce v závislosti na počtu, celkovém povrchu a celkovém objemu/hmotnosti všech kapek v jednotlivých velikostních třídách. Optimální šířka velikostní třídy byla zvolena vydělením celkové šířky rozdělení odmocninou z počtu naměřených kapek, což v tomto případě stanovuje šířku každé třídy o velikosti 0,07 mm. Na osách X , reprezentující ekvivalentní průměry kapek, jsou vyznačeny odpovídající průměry rozsahů jednotlivých velikostních tříd (Obr. 50) [142].



■ Diferenciální distribuce — Kumulativní distribuce



■ Diferenciální distribuce — Kumulativní distribuce



■ Diferenciální distribuce — Kumulativní distribuce

Obr. 50 Početní (modrá barva), povrchová (zelená barva) a objemová/hmotnostní (oranžová barva) vážená distribuce kapek v jednotlivých velikostních třídách

Sestavené početně, povrchově i objemově/hmotnostně vážené histogramy rozložení kapek ve vnější „svrchní“ kapalinové cloně byly postupně otestovány proložením normální, log-normální a Rosin-Rammler distribučními funkcemi, přičemž byla pozorována jejich optimální korelace s naměřenými daty po stránce grafické i testováním metodami matematické statistiky.

Z prostého srovnání tvaru histogramu a proložených funkcí (Obr. 51, Obr. 53, Obr. 55) ve všech případech rozložení průměru kapek nejlépe charakterizuje log-normální distribuční funkce a naopak normální distribuční funkce tvar histogramu nekopíruje téměř vůbec. V případě početně váženého rozložení kapek by ještě jistým způsobem mohla tvar histogramu kopírovat Rosin-Rammler distribuce.

Shoda mezi experimentálně získanými daty a daty z proložených distribučních funkcí byla testována také pomocí grafického testu normality. V tomto testu se do tzv. P-P pravděpodobnostních grafů vynášejí vůči sobě kumulativní rozdělení naměřených a teoretických velikostí kapek, jinými slovy se vezmou hodnoty velikostí kapek a stanoví se, kterým těmto bodů přísluší teoretický a pozorovaný kvantil a ty se poté vykreslí. Z grafického testu vyplývá skutečnost, že opravdu jedině log-normálové rozdělení nám reprezentuje početně, povrchově i objemově vážené rozložení kapek. Hodnoty teoretických i experimentálních kvantilů jsou si v tomto případě blízké a úzce kopírují modrou čerchovanou diagonálu ve všech třech případech (Obr. 52, Obr. 54, Obr. 56). Rosin-Rammler distribuci lze uvažovat v případě početní vážené distribuce za blízké shodě s diagonálou a tedy adekvátně popisující dané rozložení (pouze z grafické reprodukce).

Výše popsaná vizuální technika nastiňuje předpoklad, zda danou matematickou distribuci proložení zahrnout či nikoli, nicméně v neprůkazných případech jako je tomu u početně váženého rozložení Rosin-Rammler distribuce, je lepší se spolehnout na metody matematické statistiky. Ty nám umožňují otestovat a jednoduše odhalit zda dvě náhodné proměnné pocházejí ze stejného rozdělení pravděpodobnosti, tedy shodu mezi experimentální a aplikovanou teoretickou distribucí. Jako statistická metoda byl vybrán Kolmogorov-Smirnovův test, který srovnává vypočítané P-hodnoty s kritickou hodnotou pro danou hladinu významnosti. Kritická hodnota (p_k) se pro soubor 1773 hodnot kapek (N) pro hladinu významnosti 0,05 vypočítá ze vztahu [143]:

$$p_k = \frac{1,35810}{\sqrt{N}} \quad (4.8)$$

a pro tento případ má hodnotu 0,03225. V Tab. 9 je pro aplikované distribuční funkce jednotlivých typů rozložení zaznamenána P-hodnota. Ze statistického porovnání P-hodnoty a kritické hodnoty tedy plyne, že jedinou hypotézou charakterizující adekvátně proložení naměřených velikostí kapek ve všech typech rozložení je log-normální distribuční funkce.

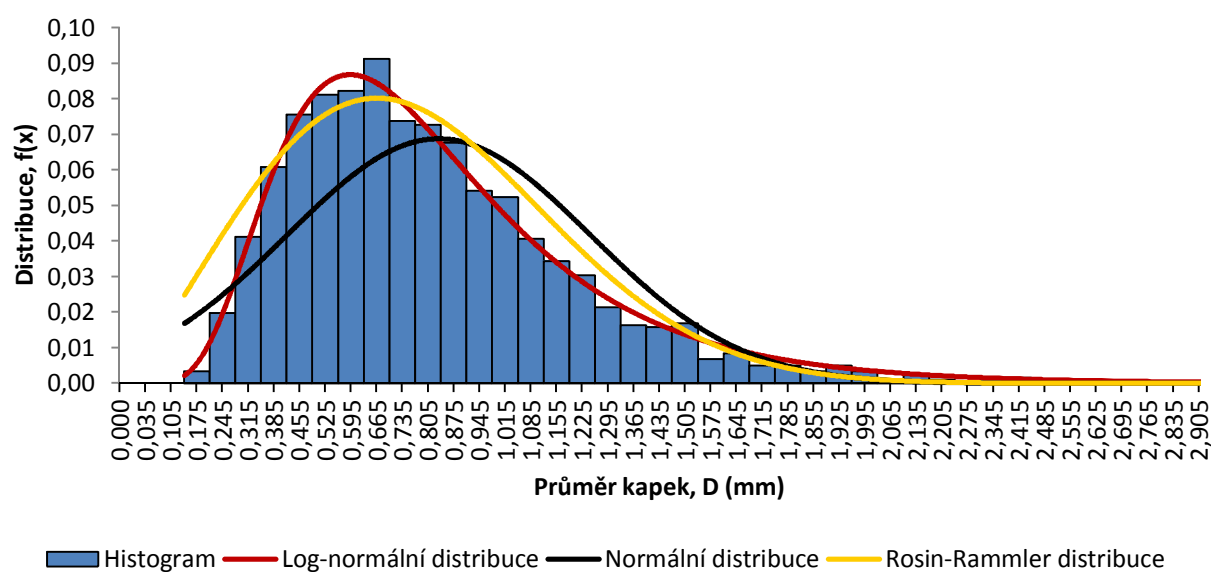
Distribuci kapek ve spreji lze definovat jako monodisperzní pokud [24]:

$$\frac{\sigma}{\mu} < 0,1 \quad (4.9)$$

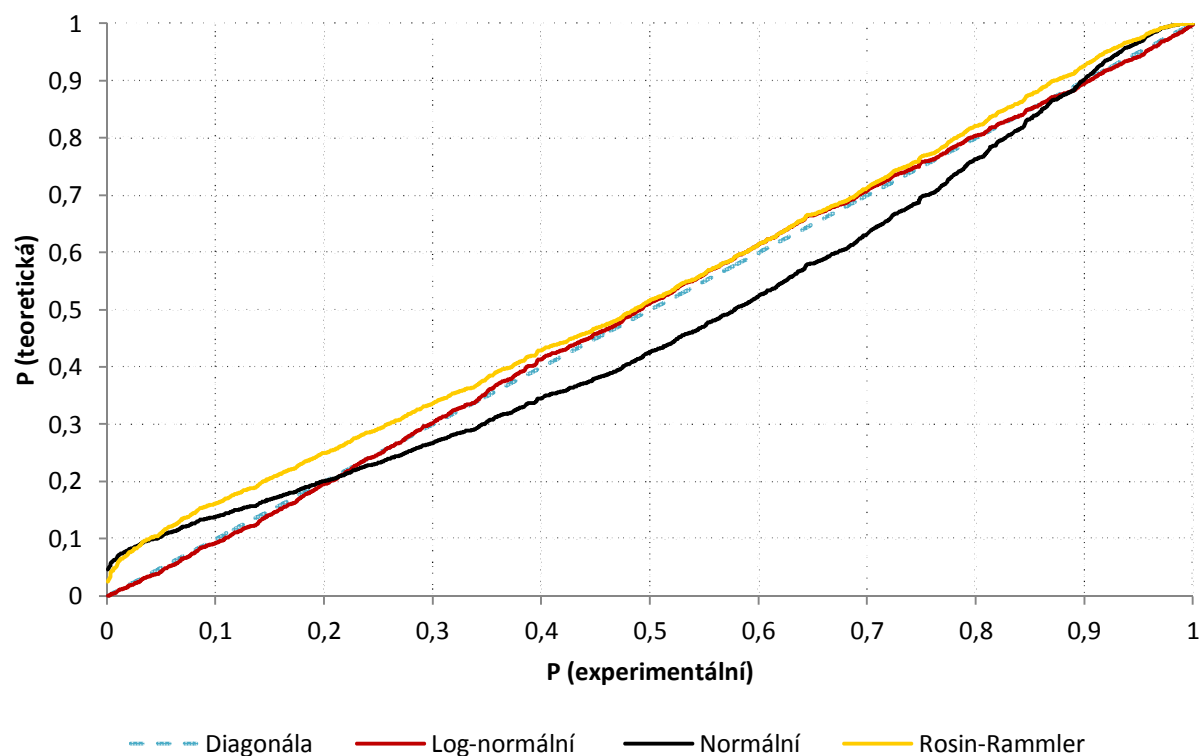
kde σ je směrodatná odchylka a μ je průměrná hodnota velikosti kapek. V našem případě, dle početního rozložení kapek ve spreji, nabývá jejich poměr hodnoty 0,475 a jedná se tedy o polydisperzní rozdělení výsledných kapek.

Tab. 9 Vyhodnocení statistického Kolmogorov–Smirnovova testu

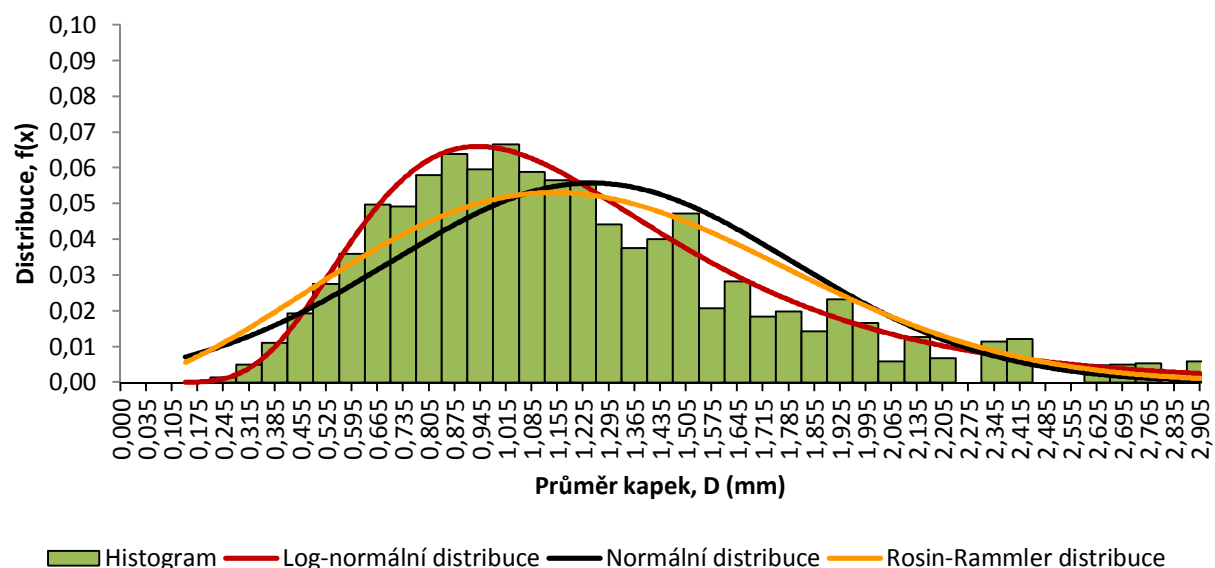
Typ rozložení	Distribuční funkce	P-hodnota	Hypotéza
Početní	Normální	$4,2193 \cdot 10^{-10}$	ZAMÍTNUTO
	Log-normální	$4,5561 \cdot 10^{-1}$	NEZAMÍTNUTO
	Roslin–Rammler	$8,0953 \cdot 10^{-8}$	ZAMÍTNUTO
Povrchové	Normální	$5,0620 \cdot 10^{-10}$	ZAMÍTNUTO
	Log-normální	$5,8638 \cdot 10^{-1}$	NEZAMÍTNUTO
	Roslin–Rammler	$3,8914 \cdot 10^{-6}$	ZAMÍTNUTO
Objemové/hmotnostní	Normální	$1,2988 \cdot 10^{-8}$	ZAMÍTNUTO
	Log-normální	$1,0722 \cdot 10^{-1}$	NEZAMÍTNUTO
	Roslin–Rammler	$1,9542 \cdot 10^{-5}$	ZAMÍTNUTO



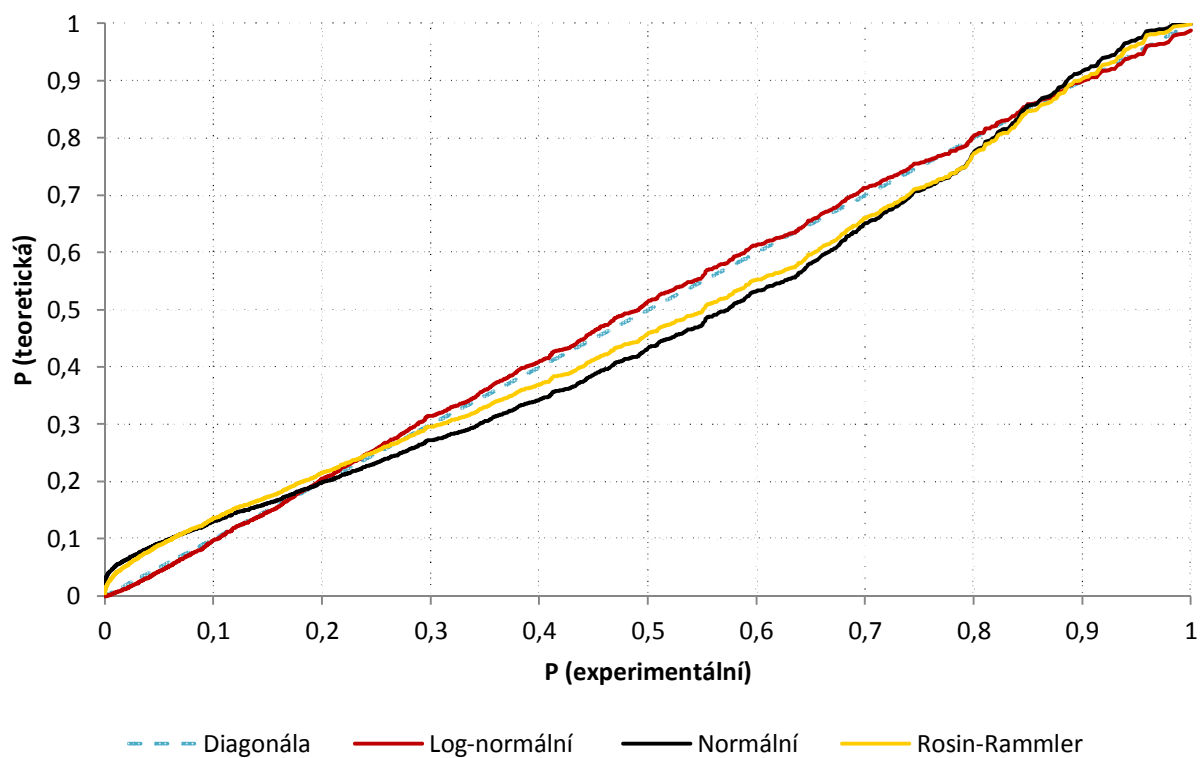
Obr. 51 Početní histogram s proloženými teoretickými distribučními funkcemi



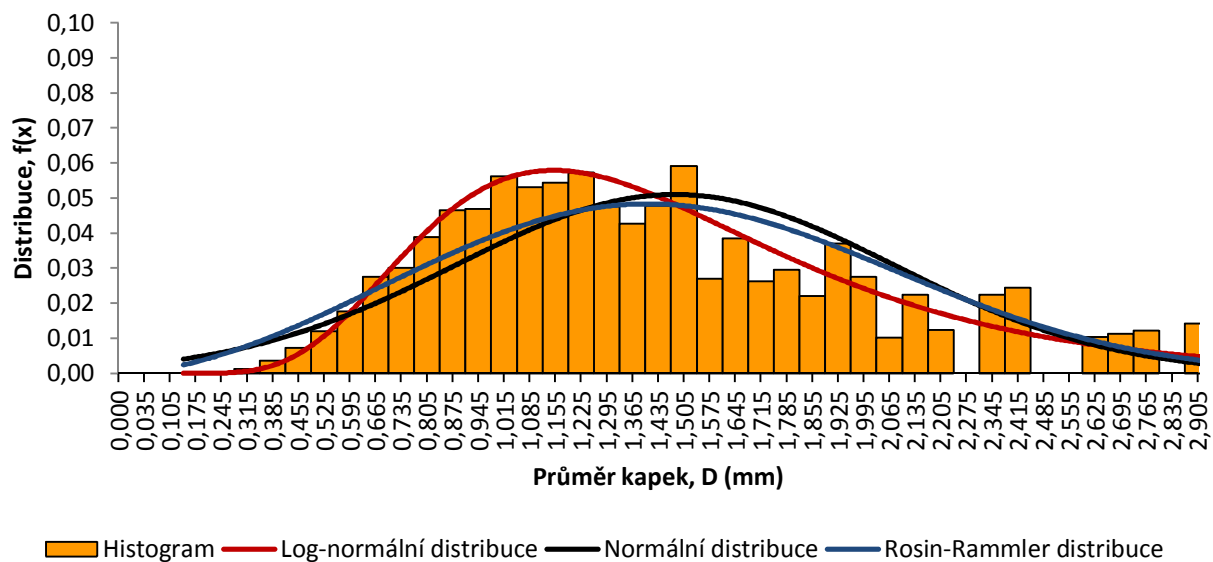
Obr. 52 *P-P pravděpodobnostní graf kumulativního rozdělení teoretických distribučních funkcí pro početní rozložení velikosti kapek*



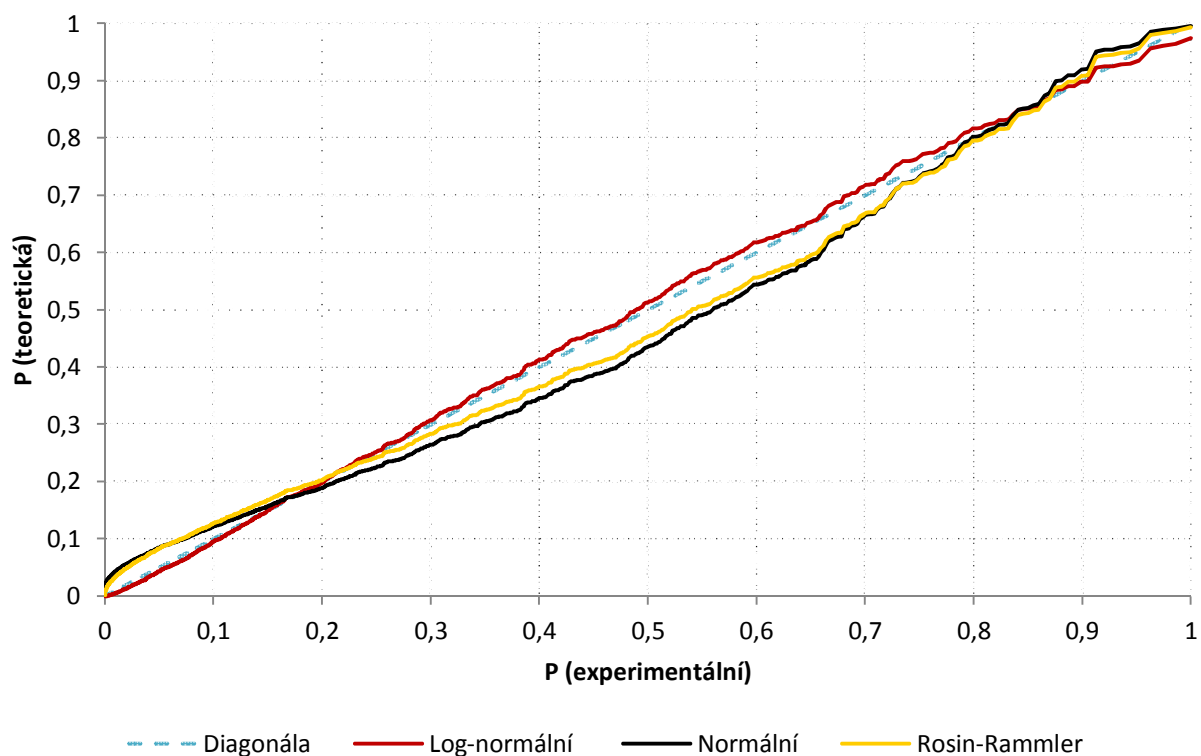
Obr. 53 *Histogram zastoupení povrchu s proloženými teoretickými distribučními funkcemi*



Obr. 54 *P-P pravděpodobnostní graf kumulativního rozdělení teoretických distribučních funkcí pro povrchové rozložení velikosti kapek*



Obr. 55 *Histogram zastoupení objemu/hmotnosti s proloženými teoretickými distribučními funkcemi*



Obr. 56 P-P pravděpodobnostní graf kumulativního rozdělení teoretických distribučních funkcí pro objemové/hmotnostní rozložení velikosti

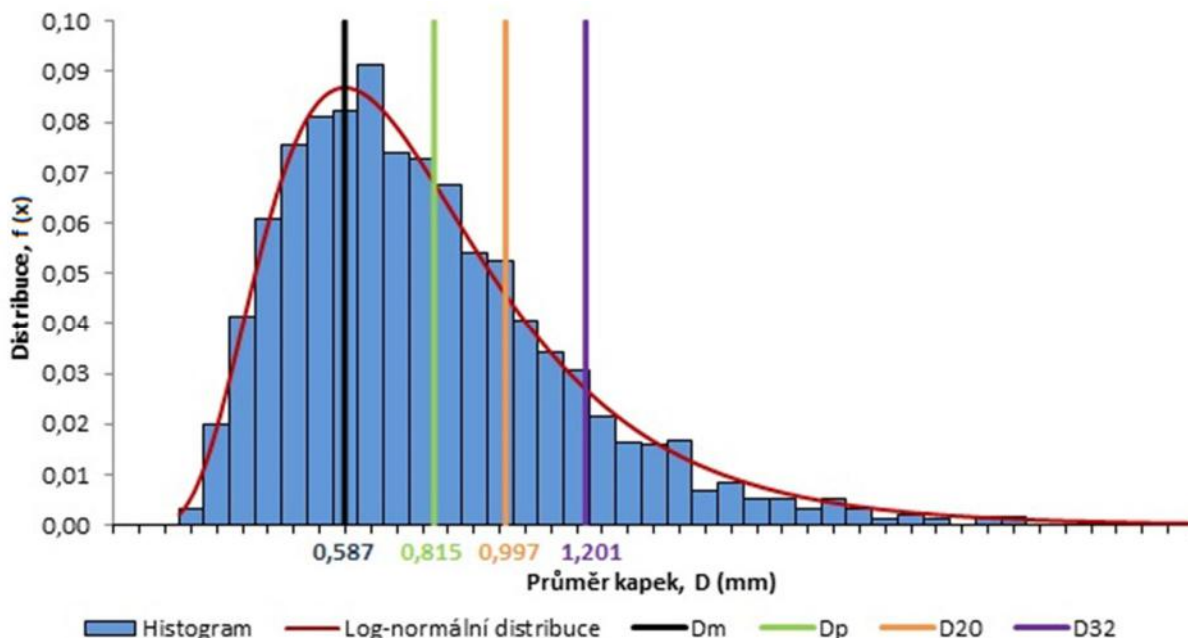
Na Obr. 57 jsou znázorněny výsledné vybrané střední průměry kapek z experimentálního neintruzivního měření na vnější „svrchní“ kapalinové cloně. Jelikož použitou neintruzivní metodou nebylo z principiálního hlediska možné zkoumat vývoj velikostí výsledných kapek i v oblastech ostatních kapalinových clon, jsou tyto zjištěné velikosti kapek předpokládány v rámci celého spreje. Průměrná velikost kapek (D_p) je 0,815 mm, přičemž největší počet průměrů kapek se procentuálně (8,7 %) nachází kolem velikosti 0,587 mm (modus, D_m). Povrchově střední průměr (D_{20}) má hodnotu 0,997 mm a Sauterův střední průměr (D_{32}) má dle rovnice (3.41) hodnotu 1,201 mm. Další interpretaci a možné ověření hodnoty vypočítaného Sauterova průměru je z průměrné hodnoty velikosti kapek v rámci povrchově váženého rozložení kapek, které má hodnotu 1,205 mm (Obr. 53) [22]. Další možností výpočtu Sauterova středního průměru je z rovnice [144]:

$$D_{32} = D_{me} e^{\left(\frac{5}{2} \ln^2 \sigma_g\right)} \quad (4.10)$$

z níž vyplývá D_{32} roven hodnotě 1,281 mm. Všechny tři metody poskytují velmi podobné výsledky Sauterova středního průměru.

Nejčtenější procentuální zastoupení povrchu kapaliny ve výsledném spreji (6,6 %) je ve velikostech průměru kapek kolem 0,911 mm (Obr. 53). Charakter vlivu větších kapek je patrný i na histogramu zastoupení objemu v kapalinovém spreji (Obr. 55), kdy se střední hodnota průměru kapek posouvá směrem doprava po ose X k velikosti 1,423 mm. Objem kapaliny je nejčteněji zastoupen (5,8 %) v průměru kapek o velikosti 1,108 mm.

Teoretická předpověď velikosti kapek při rozpadu kapalinové clony byla založená na analogii podobnosti pro odraz kapalinového proudu od horizontálně umístěné plochy. Průměr kapek byl na základě rovnice (3.36) spočítán na hodnotu 1,413 mm, což představuje hodnotu poměrně odlišnou od průměrné hodnoty získané experimentálně (0,815 mm), navzdory očekávané analogii s teorií přijatou pro odhad velikosti průměru.



Obr. 57 Početní histogram se zvýrazněnými hodnotami vybraných středních průměrů

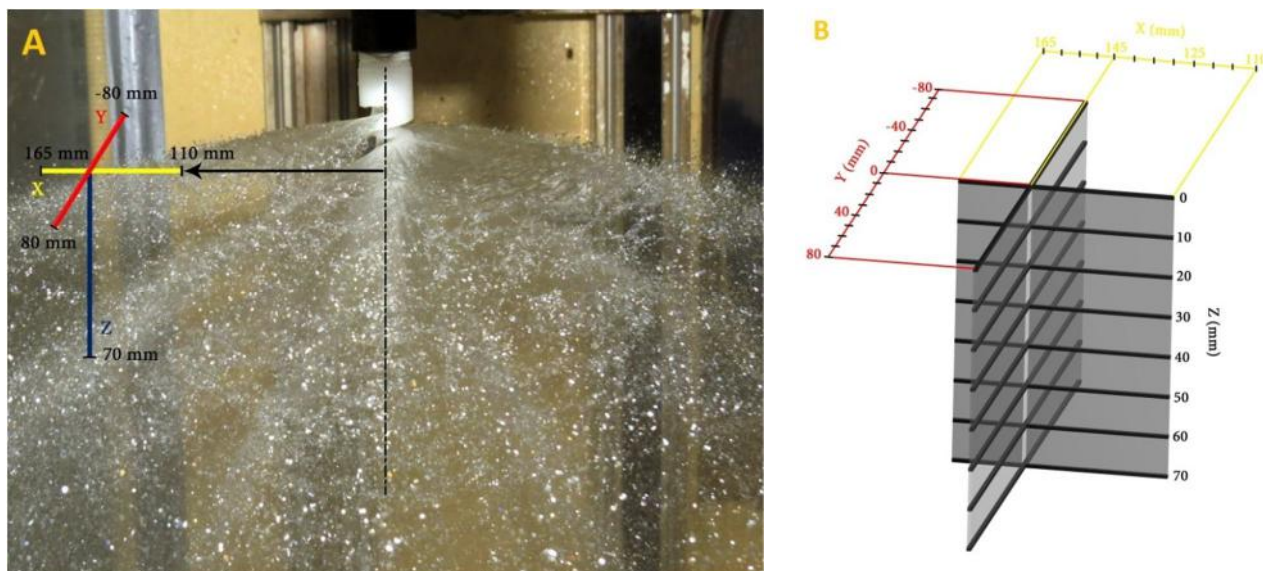
4.2.4.2 Rychlost kapaliny

Metodou laserové Dopplerovské anemometrie (Laser Doppler Anemometry, LDA) bylo uskutečněno neintruzivní měření radiálních a tangenciálních rychlostí kapaliny ve vnější „svrchní“ kapalinové cloně produkované spirálovou tryskou.

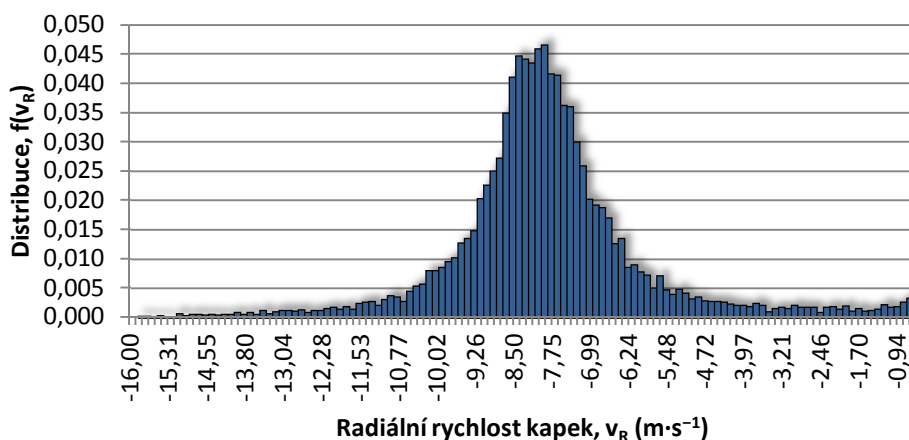
Měření pozice LDA metodou jsou znázorněny na Obr. 58. Měření proběhlo v 8 horizontálních řezech (osa Z), v každé horizontální rovině byly měřeny dvě na sebe kolmé osy (osa X ve směru proudu, osa Y kolmá na proud). Počátek měření na ose X byl 110 mm od axiální osy trysky, s krokem 5 mm bylo měřeno 12 pozic do vzdálenosti 165 mm od středu trysky. Na ose Y byla uskutečněna měření ve vzdálenosti 145 mm od axiální osy trysky v rozsahu od -80 mm do +80 mm (tzn. celkově 33 pozic). V každé pozici bylo měřeno 30 000 vzorků nebo po dobu 30 s. V ose Z odpovídal bod 0 mm pozici nad sprejem a po kroku 10 mm bylo provedeno měření do vzdálenosti 70 mm od tohoto bodu. Hraniční body byly voleny tak, aby vnější „svrchní“ kapalinová clona byla zhruba uprostřed mezi těmito body.

Zpracování obdržení dat spočívalo v sestavení histogramů distribuce rychlostí pro radiální a tangenciální složku rychlosti v pozorovaných bodech a z průměrných hodnot jednotlivých rychlostí vektorovým součtem byla zjištěna reprezentativní absolutní radiální rychlost (v_{AR}) kapaliny v daném bodě (příspěvek tangenciální rychlosti byl velmi malý). Příklad zpracování se nachází na Obr. 59 a Obr. 60, kdy záporné znaménko u rychlostí v tomto případě ukazuje směr rychlosti, jelikož přístrojové uspořádání LDA měření bylo nastaveno tak, že radiální rychlosti byly

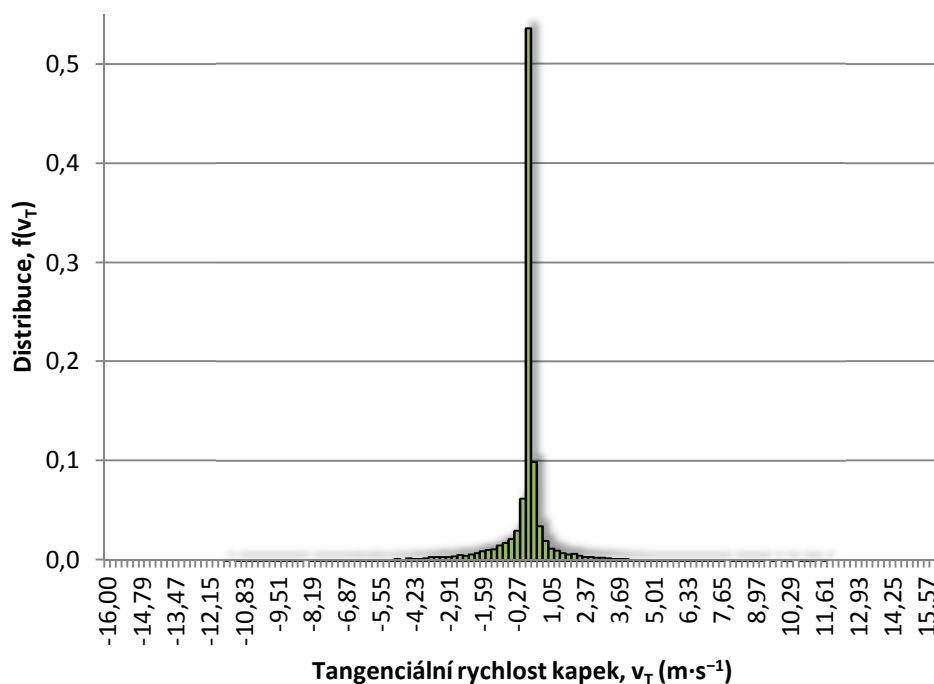
měřeny jako záporné. Průměrná radiální rychlost v bodě [140,0,40] mm je $7,782 \pm 2,029 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, průměrná tangenciální rychlost $0,173 \pm 1,280 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vektorový součet pro daný příklad a tedy reprezentativní absolutní radiální rychlost kapaliny v bodě [140,0,40] mm je $7,779 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Průměrné hodnoty radiálních a tangenciálních rychlostí spolu se směrodatnými odchylkami a hodnotou vektorového součtu pro všechny body jsou obsaženy v příloze (Tab. 13). Z měření vyplývá, že příspěvek tangenciálních rychlostí v kapalinové cloně byl velmi malý s velmi úzkou distribucí. Ve srovnání se spirálovou průtokovou tryskou s prstencovou štěrbinou [134], ve které byla pozorována tangenciální rychlost až $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při pohledu na studovanou spirálovou trysku by se očekával výraznější přínos tangenciální složky rychlosti. Výsledný točivý efekt kapalinové clony je zapříčiněn dostředivě orientovanými dopadovými plochami spirál, avšak pouze při nižších rychlostech proudící kapaliny. Při vysokých rychlostech kapaliny (což je dle měření již při aplikovaném tlaku 1 bar) je tento účinek omezený v důsledku vysoké impaktní síly kapaliny, která způsobuje markantní odraz kapaliny do prostoru z povrchu spirál v radiálním směru, čímž se eliminuje točivý moment toku kapaliny.



Obr. 58 Vizualizace měřených pozic při měření rychlosti kapaliny metodou LDA (A); detailnější popis měřených pozic pro lepší představu (B)



Obr. 59 Histogram distribuce radiálních rychlostí v bodě [140,0,40] mm (x,y,z)



Obr. 60 Histogram distribuce tangenciálních rychlostí v bodě $[140,0,40]$ mm (x,y,z)

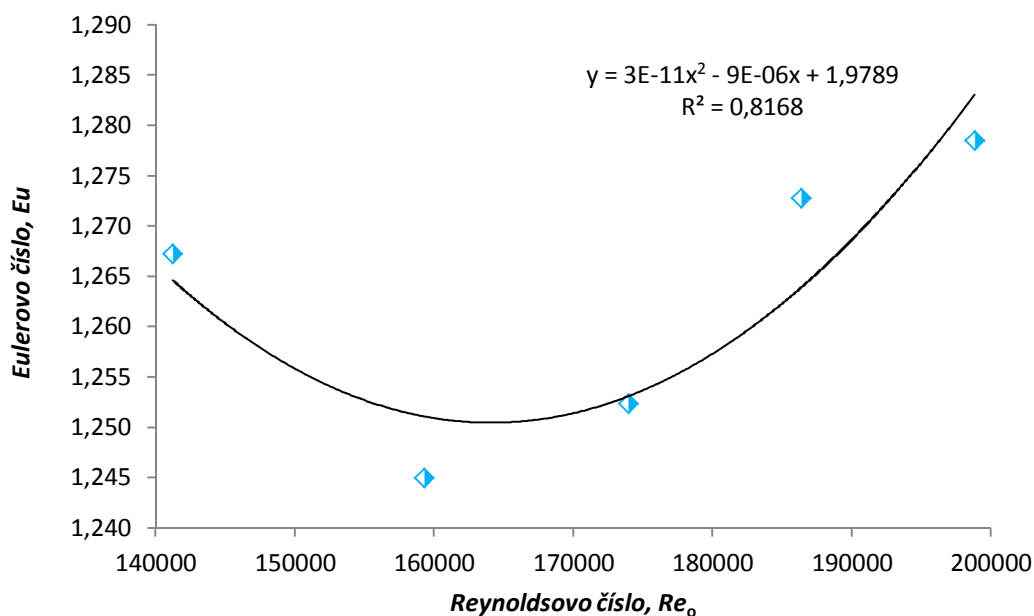
Z dat upravených výše popsaným postupem byly sestaveny závislosti radiální rychlosti na poloze v rámci os X a Y v jednotlivých hladinách Z (Obr. 62 až Obr. 67). 2D grafy dat v závislosti na poloze v ose X a axiální vzdálenosti Z jsou zobrazeny na Obr. 62 a Obr. 63 a v závislosti na poloze v ose Y a axiální vzdálenosti Z na Obr. 65 a Obr. 66. Pro lepší orientaci a prezentaci jsou zobrazeny také v 3D grafu pro osu X na Obr. 64 a pro osu Y na Obr. 67, v nichž byly experimentálně získané hodnoty dat vyhlazeny aproximací plochy pomocí metody nejmenších čtverců s váženou vzdáleností.

Z Obr. 62 je patrný pokles rychlostí s rostoucí vzdáleností od trysky. V bodech 0 a 10 mm (Z) bylo měřeno těsně nad kapalinovou stěnou, která má střed mezi pozicemi 40 a 50 mm. Zde tyto profily vykazují nejvyšší rychlosti, které s rostoucí axiální (Z) vzdáleností drobně klesají, což je patrné na Obr. 63, ve kterém byla naměřená data seřazena tak, aby vynikl vliv axiální vzdálenosti na rychlosti pro každý radiální řez. Z naměřených hodnot radiálních rychlostí v ose X vyplývá nejvyšší radiální rychlost kapaliny ($8,264 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ve vzdálenosti 110 mm od axiální osy trysky v hladině Z rovnající se 40 mm. V této samé hladině Z naopak nejnižší rychlost vykazuje kapalina v oblasti 165 mm (nejvzdálenější v rámci měření) od axiálního středu trysky a to $7,221 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což odpovídá ztrátě kinetické energie kapaliny šířící se v prostoru. V hladině Z rovnající se 0 a 10 mm s rostoucí vzdáleností od trysky je patrný propad rychlostního profilu, který je větší, než by se dal očekávat v rámci ztráty kinetické energie a souvisí s klesáním kapalinové stěny, která vytéká pod úhlem zhruba 150° . Ve vzdálenosti mezi 110 a 165 mm od trysky lze očekávat její propad zhruba o 15 mm. Další ztráta kinetické energie (ve smyslu zpomalení toku) je také způsobena vysokým třením v důsledku komplikované konstrukce geometrie trysky. To může být vyjádřeno

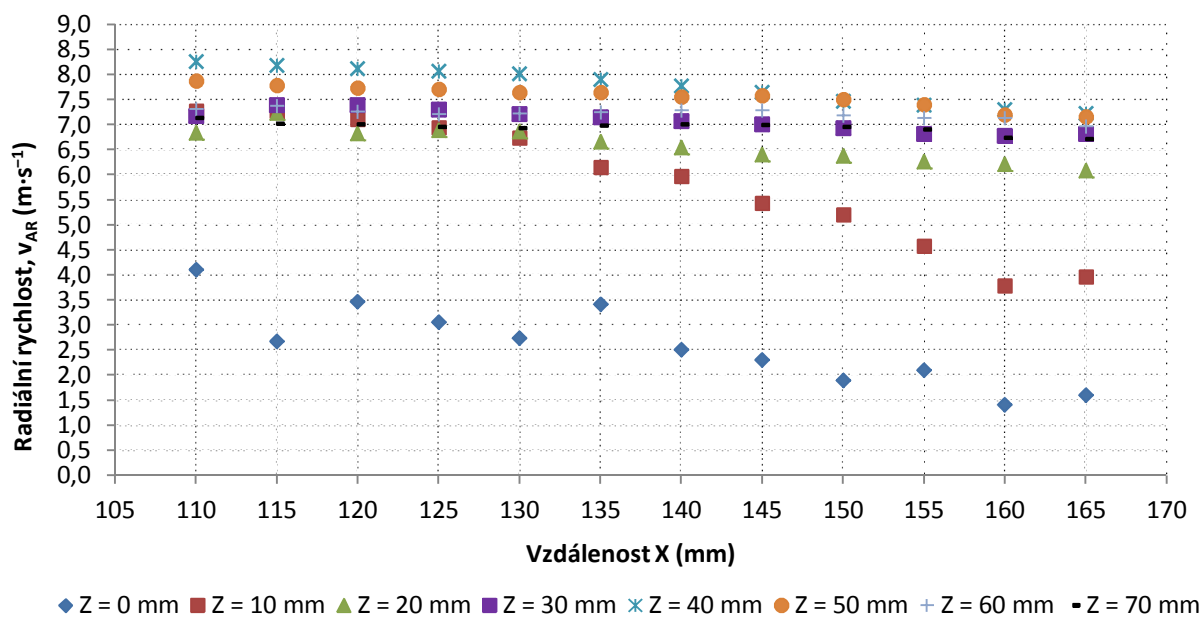
prostřednictvím Eulerova bezrozměrného kritéria, které vyjadřuje poměr tlakové ztráty v důsledku omezení toku a kinetické energie kapaliny na objemovou jednotku toku:

$$Eu = \frac{2\Delta p}{\rho_L w^2} \quad (4.11)$$

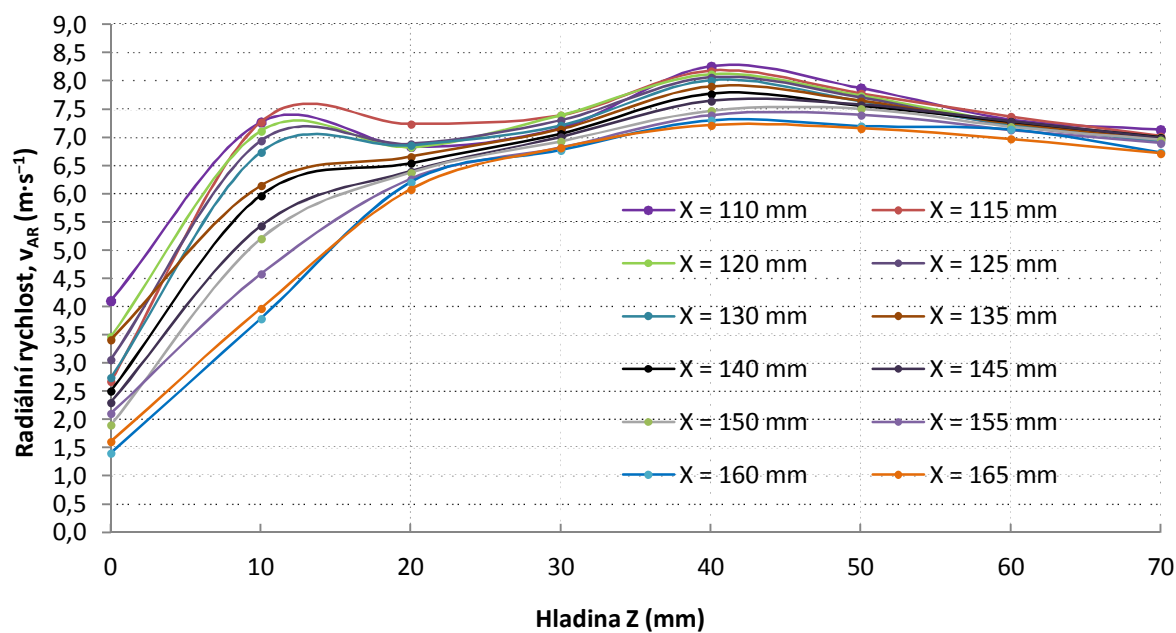
kde Δp je pokles tlaku v rámci vnitřní geometrie trysky (tedy tlakový rozdíl mezi tlakem uvnitř trysky a okolním tlakem, kam je kapalina rozprašována) a w je rychlost tekoucí kapaliny uvnitř trysky. Na Obr. 61 je vyjádřena závislost Eulerova čísla na hodnotě Reynoldsova čísla toku kapaliny v ústí spirálové trysky (Re_o), spočítaného dle rovnice (3.28). Ztráty způsobené vnitřním třením jsou poměrně nízké, jelikož hodnota $Eu = 1$ odpovídá situaci ideálního toku bez tření. Spirálová tryska vykazuje atypické chování, kdy ztráty vyvolané vnitřním třením s rostoucím Re (cca $1,4 \cdot 10^5$ až $1,6 \cdot 10^5$) nejprve mírně klesají a poté se zvyšujícím Re hodnota Eu roste až na hodnotu 1,28, což odpovídá vstupnímu tlaku kapaliny 2 bar na trysce. Ve všech případech hodnota Re vypovídá o plně vyvinutém turbulentním proudění a tedy závislost Eu na Re nastiňuje ideální provozní podmínky pro tento typ trysky, neboť z pohledu absorpčních procesů je, pro odstranění plynných polutantů ze znečištěných plynných směsí, příznivé pracovat v režimech co možná nejvyšší turbulence, avšak za provozně ekonomicky přijatelných podmínek.



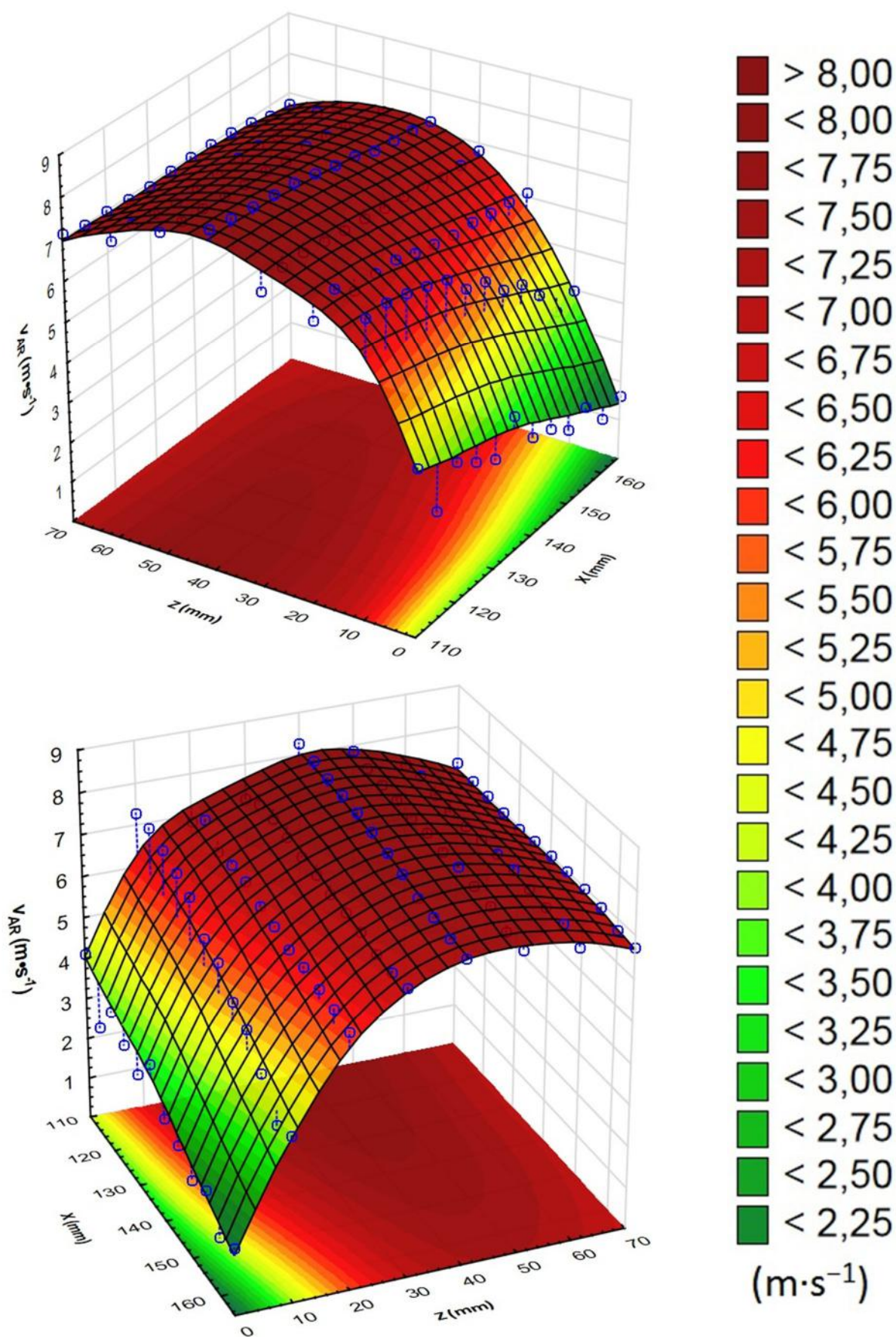
Obr. 61 Eulerovo číslo v závislosti na Reynoldsově čísle ve spirálové trysce



Obr. 62 Rychlostní profil kapalinové stěny v závislosti na radiální vzdálenosti X

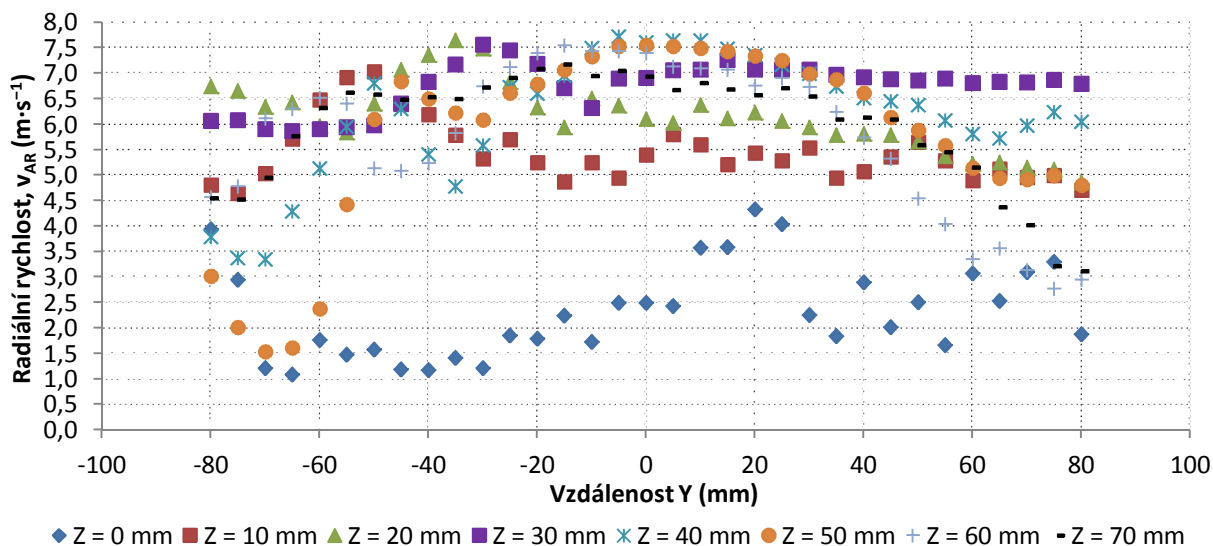


Obr. 63 Rychlostní profil kapalinové stěny v ose X v závislosti na axiální vzdálenosti Z

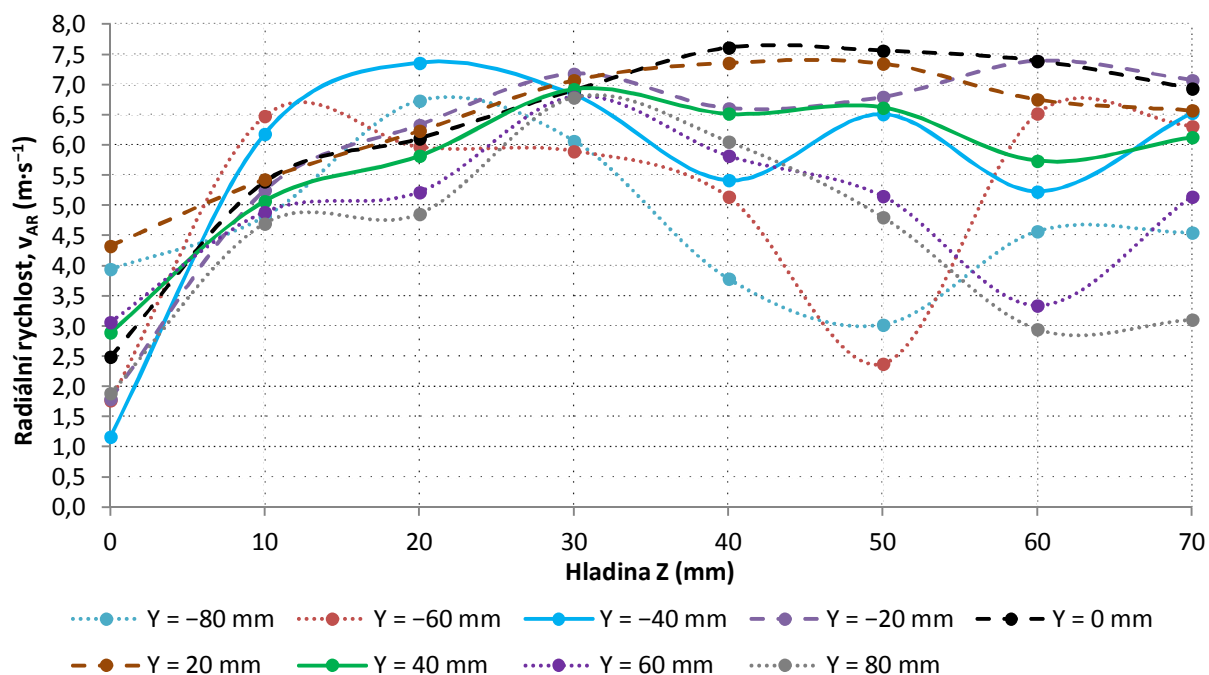


Obr. 64 3D graf vyhlazených dat pro radiální vzdálenost X

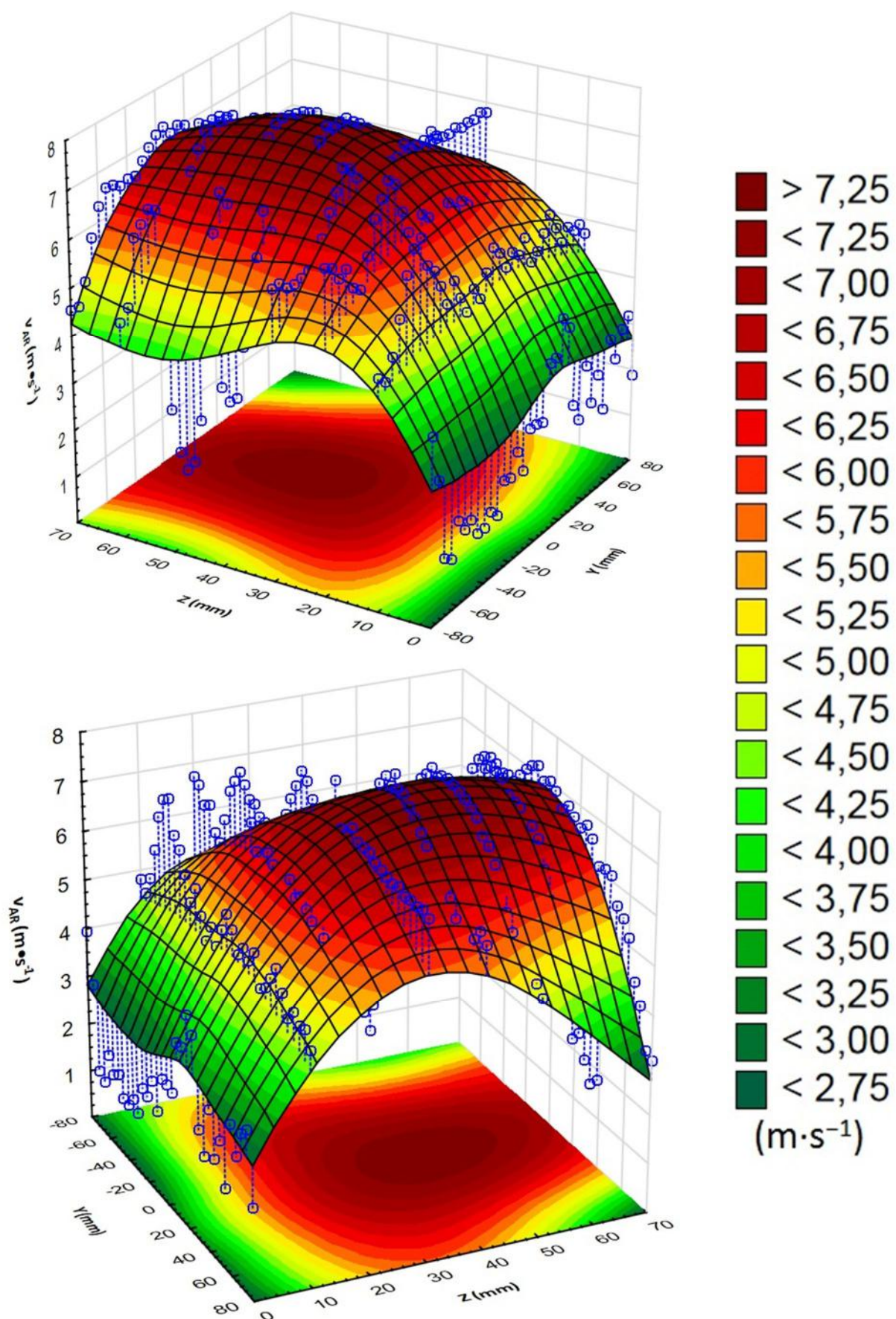
Měření hodnot radiálních rychlostí v ose Y byly uskutečněny ve vzdálenosti 145 mm od axiální osy trysky, maximální změřená radiální rychlost byla $7,615 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ opět v hladině 40 mm (Z) uprostřed měřené oblasti ($Y = 0 \text{ mm}$), což je možné vidět na obrázcích níže. Pro srovnání, hodnota radiální rychlosti pro $X = 145 \text{ mm}$ a $Z = 0 \text{ mm}$, která odpovídala stejnému měřenému bodu, byla $7,652 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro hladinu $Z = 0 \text{ mm}$ zasahovala měření v ose Y opět pouze na okraj šířící se kapalinové clony, proto jsou hodnoty radiálních rychlostí nižší v porovnání s velikostmi v ostatních hladinách, kde ovšem taktéž dochází k záznamu nižších rychlostí na obou koncích osy Y ze stejného důvodu.



Obr. 65 Rychlostní profil kapalinové stěny v závislosti na poloze Y



Obr. 66 Rychlostní profil kapalinové stěny v ose Y v závislosti na axiální vzdálenosti Z



Obr. 67 3D graf vyhlazených dat pro vzdálenost Y

4.3 NUMERICKÉ SIMULACE

V rámci práce byly také zahrnuty numerické simulace proudění modelové vzdušiny vnitřním prostorem skrápěcí hlavy a rozstřík modelové kapaliny přes spirálovou trysku.

Konstrukce zjednodušené CAD geometrie skrápěcí hlavy byla zhotovena v programu Autodesk Inventor Professional a následné simulace realizované v programu Ansys 18.1. Podobně tomu bylo v případě asymetrické spirálové trysky, kdy byl 3D sken její textury pořízen kamerou ATOS Tripple Scan 8 M a získaná polygonální síť metodou reverze převedena na celistvé těleso také v programu Autodesk Inventor Professional. Při přesunu CAD geometrií v rámci těchto programů dochází často k různě závažným poruchám virtuálních modelů. Tyto poruchy v celistvosti geometrie, které mají negativní vliv na vytvoření výpočetní sítě a následně také na průběh výpočetních operací, byly odstraněny v přidružených modulech programu Ansys, konkrétně se jednalo o Design Modeler Geometry a ICEM CFD.

Pro vytvoření výpočetní sítě byl v obou případech simulací využit modul Mesh a následné výpočetní operace byly realizovány v řešiči Fluent. Vyhodnocení proběhlých CFD simulací bylo uskutečněno prostřednictvím modulu CFD-Post.

Důležité je také podotknout, že oproti experimentální části došlo ke konverzi os v kartézské soustavě souřadnic, které si autor povšiml až při zpracovávání a vzájemném porovnávání a již nebylo možné souřadný systém sjednotit. V simulacích představuje osa X osu Y v experimentální části, respektive osa Y osu Z a osa Z osu X .

4.3.1 Simulace proudění plynné fáze

Numerické simulace proudění plynné fáze ve vnitřním prostoru skrápěcí hlavy byly realizované pro modelovou tekutinu (vybranou z materiálové databáze Fluentu) odpovídající vzduchu při tlaku 100700 Pa a teplotě 299,75 K. Důležité fyzikální vlastnosti vzduchu byly v rámci simulace nastaveny na počáteční hodnoty, které korespondovaly s okolními podmínkami. Jednalo se především o hustotu ($\rho_g = 1,169 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$) a dynamickou viskozitu ($\mu_{\text{DVg}} = 1,9188\cdot 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$).

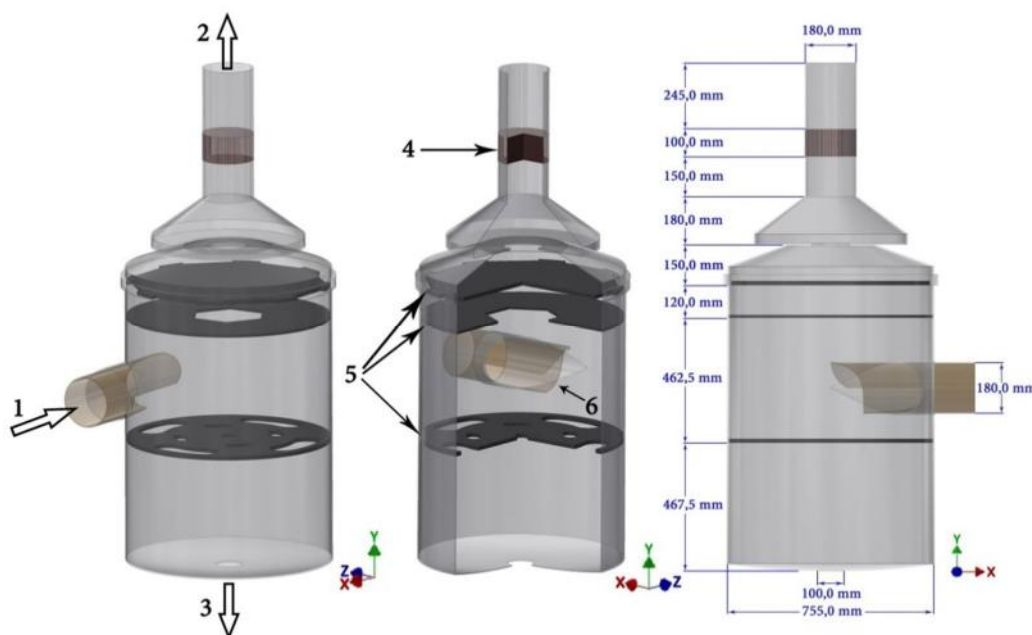
Uskutečněné a následně optimalizované numerické simulace byly nastaveny pro tři různé hydrodynamické podmínky plynné fáze v místě tangenciálního vstupu vzdušiny do pracovní komory. Hodnoty hmotnostního průtoku plynu ($\dot{V}_p$) byly nastaveny pro případ A na $0,054 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, pro případ B na $0,099 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ a pro případ C na $0,129 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Hmotnostní průtoky (případ A a případ C) odpovídaly pracovnímu rozsahu instalovaného ventilátoru v plynném cirkulačním okruhu, kdy proudění plynné fáze do vnitřního prostoru bylo zajištěno jeho umístěním na potrubní trase na výstupu ze skrápěcí hlavy až za demistorem. Celý vnitřní prostor skrápěcí hlavy se vyskytuje při provozu v mírném podtlaku oproti tlaku atmosférickému, jelikož je umístěn na sací straně ventilátoru.

4.3.1.1 Geometrie skrápěcí hlavy

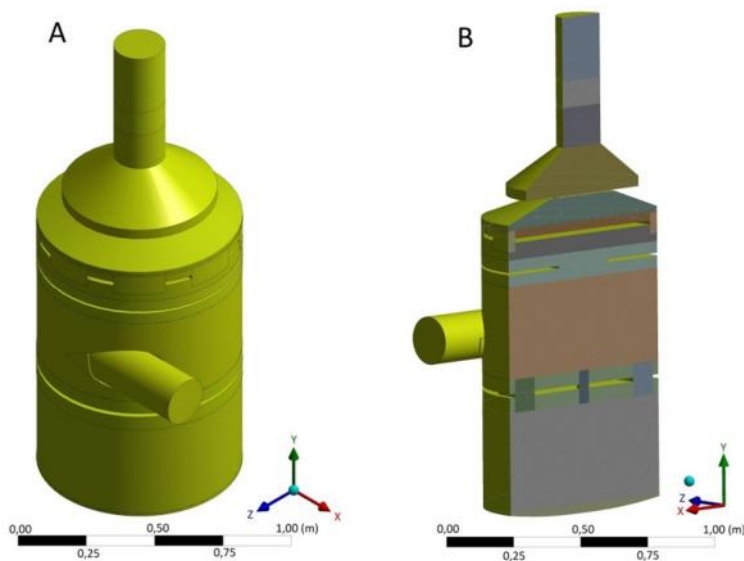
V numerické simulaci distribuce vzdušiny ve vnitřním prostoru modelu skrápěcí hlavy, která proporčně i tvarově odpovídá finální podobě instalované pracovní komory kompaktního sprchového scrubberu 2. generace. V modelu jsou zahrnuta jistá zjednodušení pro urychlení doby numerických výpočtů, avšak stále obsahuje všechny hlavní konstrukční prvky ovlivňující charakter proudění. Na Obr. 68 lze pozorovat vytvořený zjednodušený model skrápěcí hlavy

z různých pohledů, společně s označenými hlavními prvky zařízení a rozměry mezi jednotlivými komponentami pracovní komory.

Pro simulaci proudění je třeba zjednodušený model geometrie skrápěcí hlavy převést na inverzní objem, ve kterém se realizují budoucí výpočetní operace. Výsledný inverzní objem skrápěcí hlavy byl sestaven v programu Design Modeler Geometry a byl rozdělen do celkového počtu 34 na sebe navazujících těles, která tak vytváří celistvý výpočetní prostor pro simulaci proudící plynné fáze (Obr. 69). Inverzní objem byl rozdělen na větší počet objemových těles z důvodu realizace adekvátní částečně strukturované výpočetní sítě (tzv. mesh) v následujícím kroku.



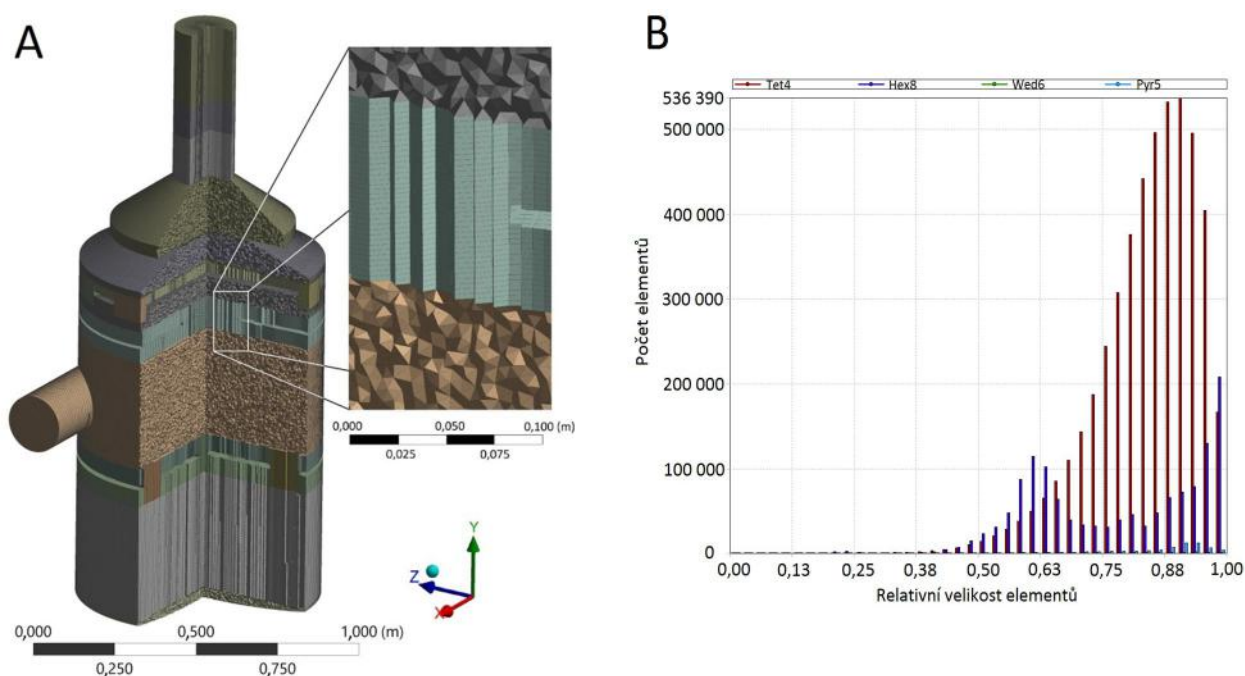
Obr. 68 Zjednodušený model geometrie skrápěcí hlavy pro CFD simulaci vzdušiny; vstup plynné fáze/inlet (1), výstup plynné fáze/outlet (2), výstup kapalné fáze (3), demistor/separátor kapek (4), soustava přepážek (5), deflektor (6)



Obr. 69 Inverzní objem modelu geometrie skrápěcí hlavy; axonometrický pohled na reliéf (A), pohled v řezu roviny XY (B)

4.3.1.2 Generace výpočetní sítě

Rozčlenění vnitřního prostoru na větší počet dílčích celků při vytváření inverzního objemu dovovalo připravit komplexní výpočetní síť s velikostně i poměrově vhodně na sebe navazujícími elementy, které byly složeny celkově ze čtyř geometrických útvarů (Obr. 70, případ B). V modulu Mesh tak byla vygenerovaná částečně strukturovaná výpočetní síť, která obsahuje 6160549 geometrických elementů složených převážně z prostorových hexaedrů a tetraedrů (Obr. 70, případ A). Jednotlivé části výpočetní sítě byly vygenerovány prostřednictvím metod MultiZone, Face Sizing, Patch Conforming Method, Body Sizing a Sweep Method. Charakteristická délka velikosti elementů výpočetní sítě se pohybovala v rozmezí $2,13 \cdot 10^{-4}$ m až $8,88 \cdot 10^{-3}$ m, průměr se pohyboval kolem hodnoty $4,26 \cdot 10^{-3}$ m. Limitní hodnoty nejdůležitějších parametrů elementů výpočetní sítě, tedy minimální ortogonální kvality a maximální šikmosti (skewness) se pohybují v relativních hodnotách 0,207 a 0,923, což odpovídá akceptovatelným parametrům pro numerickou simulaci [145].



Obr. 70 Vygenerovaná výpočetní síť pro numerickou analýzu vzdušiny v modelu skrápěcí hlavy (A); graf kvality a počtu elementů v závislosti na relativních velikostech elementů výpočetní sítě (B)

4.3.1.3 Nastavení simulací

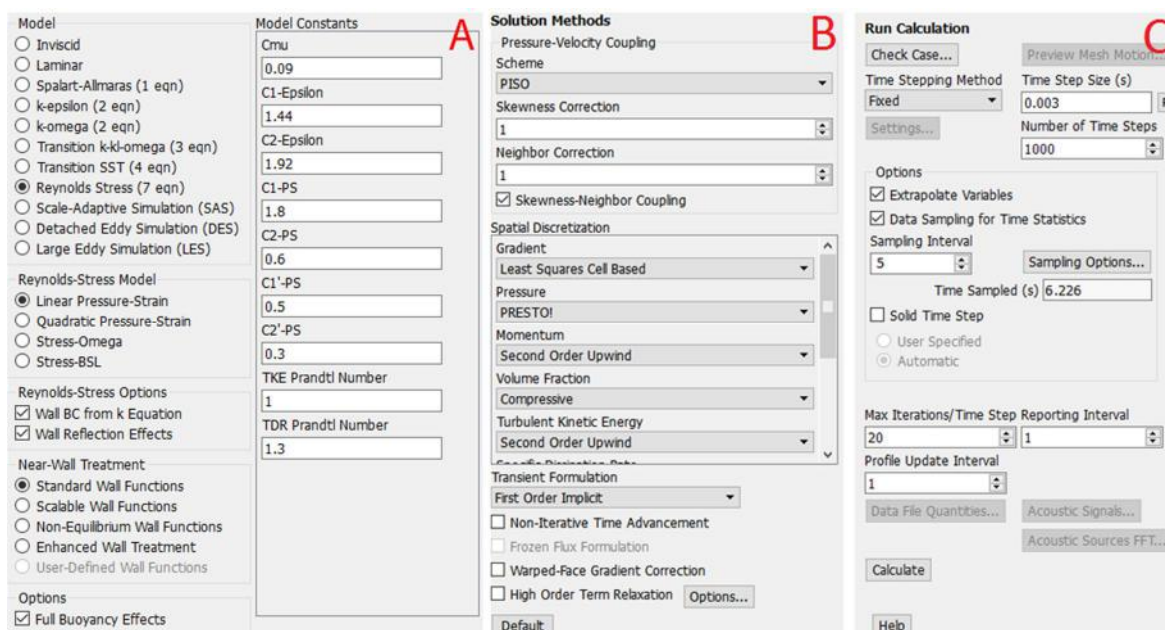
Všechny simulace byly nastaveny za provozních podmínek odpovídajících ověřovacím praktickým experimentům (100700 Pa; 299,75 K) se zahrnutím gravitačního zrychlení v záporném směru osy Y.

Pro výpočet byl použit nejkomplicovanější typ turbulentního RANS modelu, konkrétně Reynolds stress model (RSM), který na rozdíl od jednodušších dvourovnicových modelů, opouští hypotézu izotropní vířivé viskozity a uzavírá zprůměrované Reynoldsovy Navier-Stokesovy rovnice vyřešením šesti transportních rovnic pro Reynoldsova napětí spolu s rovnicí pro rychlost disipace. Při řešení ve 3D prostoru tak dochází k zahrnutí výpočtu dalších sedmi transportních

rovníc. Pokud by byla uvažována i energie, musel by tento model vyřešit dvanáct diferenciálních rovnic. Tento model je schopný věrohodněji popsat systémy komplexních toků obsahujících rotační víření, což je náš případ. Za submodel Reynoldsových napětí byl vybrán Linear pressure-strain model a v blízkosti stěn byla nastavena standartní vlnová funkce (Standar wall function) pro popis mezní vrstvy (Obr. 71 A).

Okrajové podmínky byly pro každý případ simulace nastaveny pomocí hmotnostního průtoku plynné fáze na vstupu (inlet) a tlaku na výstupu (outlet) ze skrápěcí hlavy za umístěným demistorem (Obr. 68). Takto využitá kombinace okrajových podmínek zajišťuje validní nastavení pro numerické výpočty s reprodukovatelnými výsledky. Pokud by se na vstupu i na výstupu zvolily okrajové podmínky pouze v hodnotách relativních tlaků, vedlo by to při opakovaném výpočtu stejných nastavení k různým konečným výsledkům [145]. Konkrétní hodnoty okrajových podmínek shrnuje Tab. 10. Ulpívání tekutiny na vnitřní stěně pracovní komory ani její povrchová drsnost nebyly uvažovány.

CFD výpočet byl řešen jako transientní typ úlohy s tlakově spojitým algoritmem, který v rámci výpočtů jednotlivých iterací propočítává systém rovnic hybnosti a rovnici kontinuity, z nichž odvozuje rovnice pro tlak. Pro metodu řešení (pressure-velocity coupling) bylo vybráno PISO schéma. Interpoláční schémata druhého řádu pro většinu veličin a PRESTO! pro tlak byla využita pro přepočet konvekčních podmínek mezi centry a stěnami výpočtových buněk sítě, jelikož poskytují nejlepší výsledky pro komplexní toky zahrnující víření (Obr. 71 B). Inicializace úlohy byla nastavena standartním formátem se započítáním výpočtu normálově ve směru plochy (inlet) vstupující plynné fáze. Pro konkrétní případy byly nastaveny příslušné počáteční hodnoty hmotnostních průtoků. Zpočátku byla simulace nastavena v ustáleném stavu (steady-state). Následně po 150 výpočtových iteracích došlo k přenastavení úlohy na transientní způsob výpočtu s velikostí časového kroku 0,003 s (Obr. 71 C). Konečný fyzický čas výpočtu byl ve všech případech 20 s a výsledné hodnoty konvergence sledovaných veličin se pohybovaly pod hodnotou reziduálu $1 \cdot 10^{-5}$, což odpovídá obecně platným standardům v CFD pro řešič Fluent [145].



Obr. 71 Nastavení záložek v programu Ansys; záložka turbulentního modelu (A), záložka matematického způsobu řešení CFD simulací (B), záložka spuštění výpočtu CFD (C)

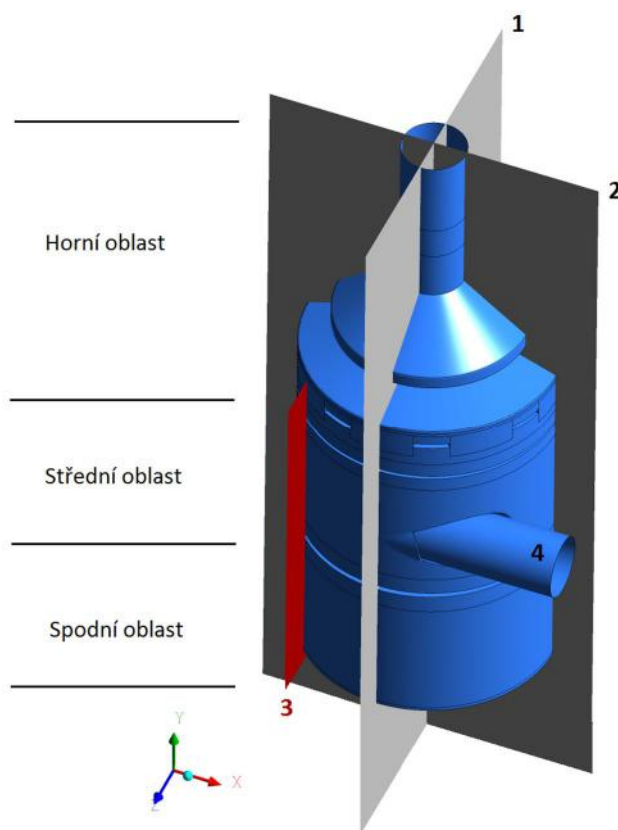
Tab. 10 Okrajové podmínky pro tři případy numerických výpočtů; kde V_p je hmotnostní průtok plynné fáze na vstupu a P_{ro} relativní tlak plynné fáze na výstupu do/ze skrápěcí hlavy

Případ	Inlet V_p ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	Outlet P_{ro} (Pa)
A	0,054	-40
B	0,099	-117
C	0,129	-189

4.3.1.4 Vyhodnocení simulací

Systém přepážek rozděluje vnitřní prostor skrápěcí komory na tři rozdílné zóny. Pozice horní, střední a spodní oblasti, na které je v následujícím textu odkazováno, jsou označeny na Obr. 72.

Numerické simulace distribuce plynné fáze byly uskutečněny pro tři různé hmotnostní průtoky. Výsledky numerických simulací jsou prezentovány pro případ A na Obr. 73 až Obr. 78, pro případ B na Obr. 79 až Obr. 84 a pro případ C na Obr. 85 až Obr. 90. U každého obrázku je znázorněna kartézská osa souřadnic, která napomáhá s orientací poloh natočení skrápěcí komory. Kladný směr v ose Y reprezentuje axiální směr proudění, osy X a Z pak představují radiální složky pohybu plynné fáze. Vertikální roviny protínají skrápěcí komoru (vyjma případu znázornění proudnic na protilehlé stěně od umístění deflektoru Obr. 73, Obr. 79 a Obr. 85) ve středu skrápěcí komory (Obr. 72).



Obr. 72 Pozice oblastí ve skrápěcí komoře a orientace jednotlivých rovin; rovina YZ (1), rovina YX (2), protilehlá rovina (3) deflektoru (4)

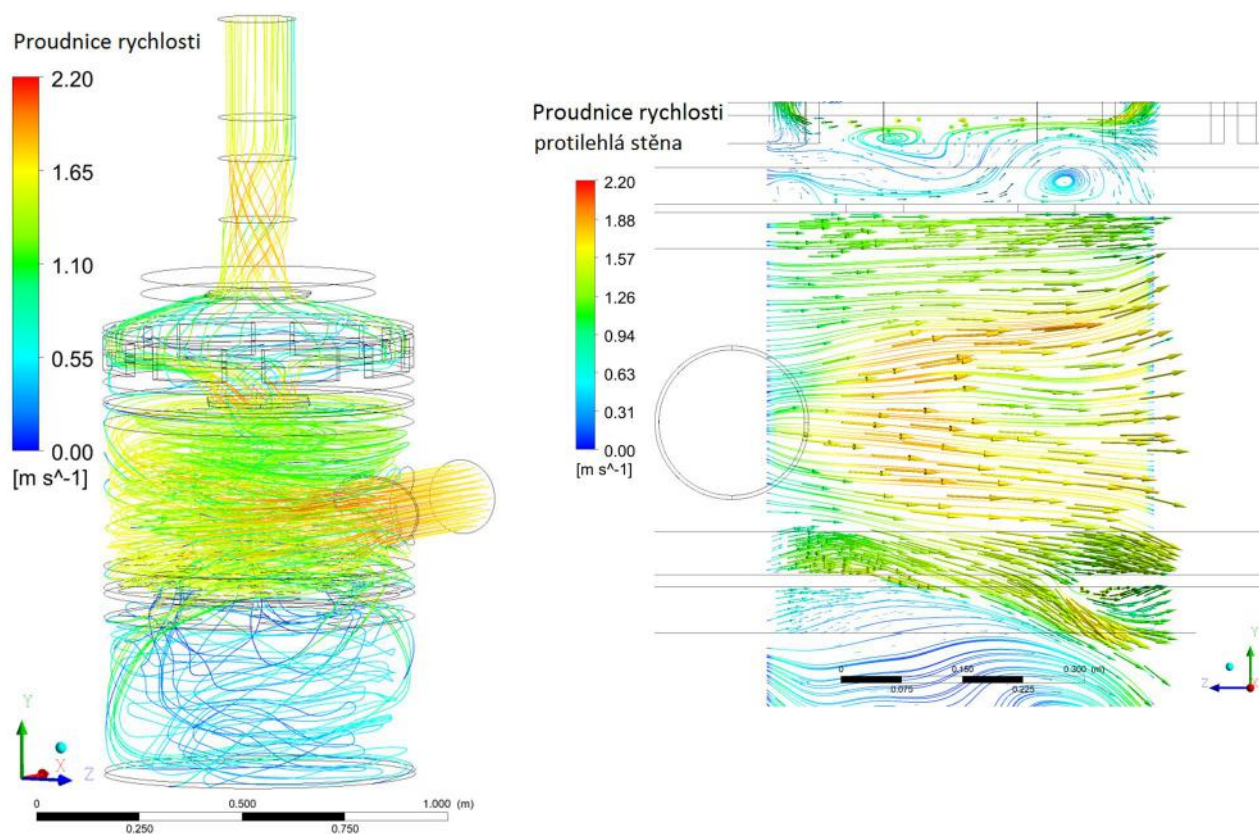
Ve všech případech po vstupu plynu přes tangenciálně umístěný deflektor dochází na protilehlé kónické stěně k rozdělení proudu do dvou směrů (Obr. 73, Obr. 79 a Obr. 85). Část proudu pokračuje v převážně tangenciálním pohybu po stěně a jejím blízkém okolí směrem vzhůru, kde buď cirkuluje nadále ve střední části či v oblasti po jedné až jedné a čtvrt otáče (od tangenciálního vstupu do vnitřního prostoru) přechází do horní části pracovní komory. Odkud je přes soustavu přepážek odváděn pryč z pracovní komory. Z Obr. 74, Obr. 80, Obr. 86 je patrné, že ve všech případech při přechodu plynu do horní části ve zúženém místě přepážky, plyn mění lokálně rychlost i směr proudění a jeho přechod je asymetrický s vyoseným středem. V místě nejmarkantnějšího přechodu navíc vzniká za obtékanou hranou otvoru přepážky oblast nízkého tlaku. Proud se také částečně odráží od stěny další výše umístěné přepážky. Oba tyto efekty vavolají vznik lokálního zpětného proudění v rámci oblasti nižšího tlaku ve střední části pracovní komory. Plyn v horní části komory proudí přes systém přepážek, které opět mění lokálně rychlost a způsobují vývoj turbulentní kinetické energie.

Druhá část proudu směřuje přes otvory perforované přepážky do dolní části pracovní komory. V případě A, tedy nejmenšího hmotnostního průtoku, se proud opět rozdělí na dvě části. Část je vedena podél povrchu stěny horizontální přepážky k centrálnímu otvoru. Následně je nasávána v oblasti axiálního středu zpět do středové části vlivem tlakové níže uprostřed komory. Zbylá část krouží převážně kolem vnitřní stěny pracovní komory a po čase, když ztratí kinetickou energii, je nasávána do střední části zařízení také. V případech B a C vzniká ve spodní části vír, který má ve svém jádru minimální rychlost proudění. Naopak v jeho nejbližším okolí je přítomné vířivé proudění, které je zdrojem vzniku lokální turbulentní kinetické energie.

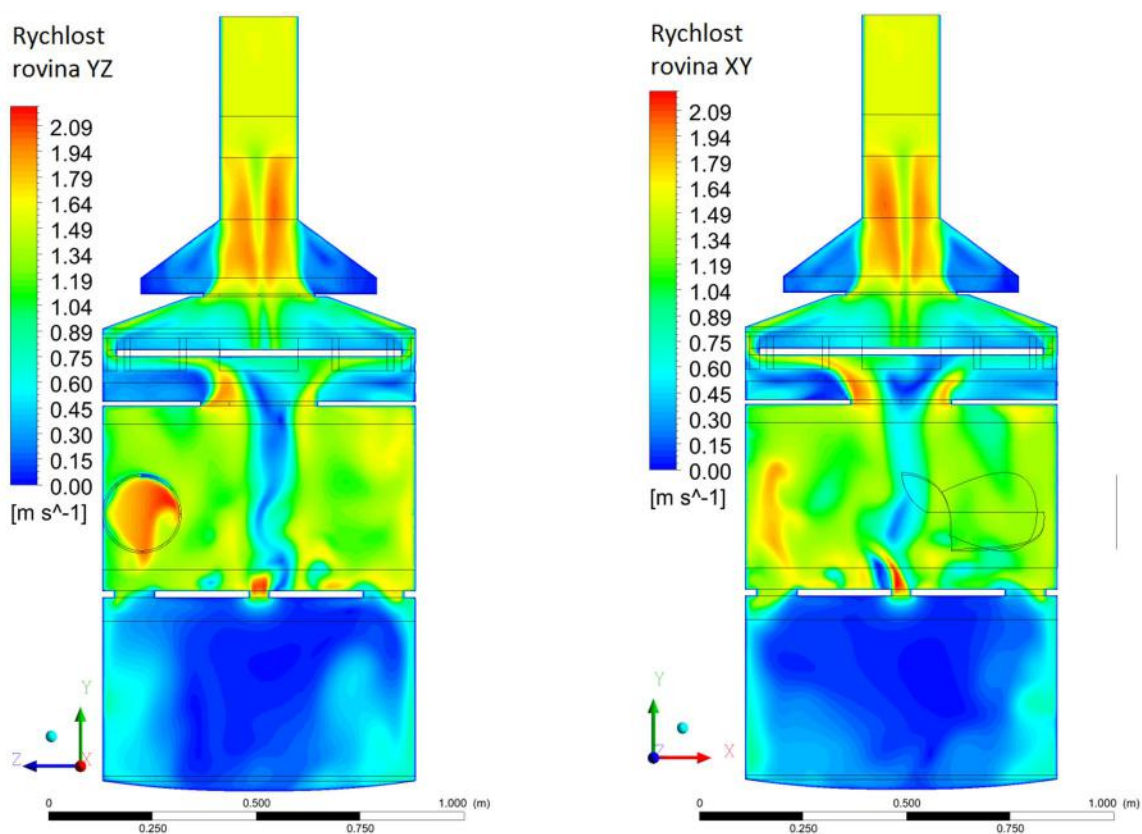
Vířivé proudění je přítomné také ve střední části pracovní komory. Hlavní složku rychlosti vířivého proudění představuje tangenciální rychlost, avšak se zvyšujícím se průtokem plynné fáze dochází ke zvyšování hodnoty a vlivu axiální složky. Uplatňuje se kaskádový přenos energie, který v konečném důsledku vede ke zmenšování velikosti příčného rozměru víru (porovnání pro jednotlivé případy na Obr. 78, Obr. 84 a Obr. 90) a současně ke zvyšování hodnot gradientů tangenciální rychlosti (porovnání pro jednotlivé případy na Obr. 77, Obr. 83 a Obr. 89). Vířivost lze tedy definovat poměrem axiální a tangenciální rychlosti.

S roustoucím hmotnostním průtokem plynné fáze roste také velikost všech složek rychlosti. Režim proudění pro případ A je rozdílný od případu B a C. Lze si to vysvětlit provozem na hranici minimálního pracovního rozsahu instalovaného ventilátoru, kdy nedošlo zcela k náběhu soustavy do optimálního pracovního režimu. Případ B a C vykazují stejný charakter proudění, pouze s rozdílnými hodnotami velikosti veličin.

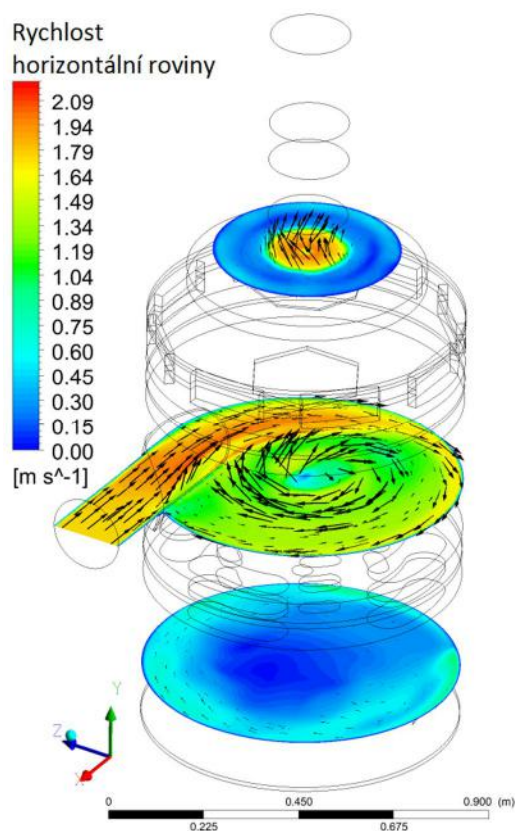
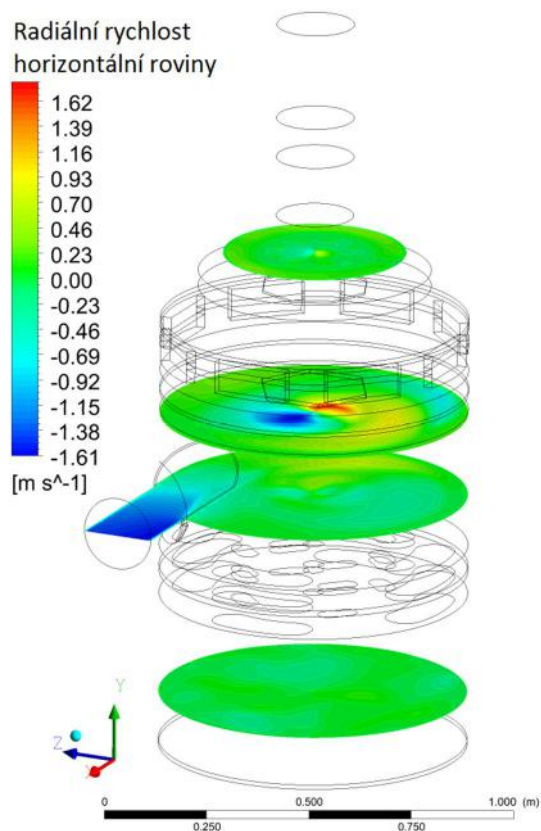
Instalovaná perforovaná přepážka, rozdělující vnitřní prostor skrápěcí komory na střední a spodní oblat, mění lokálně velikost rychlosti a režim proudění plynné fáze. Vzniká tak předpoklad pro účinnější absorpci při současném protiproudu kapalně fáze během provozu scrubberu. Vyšší relativní rychlost mezi plynnou a kapalnou fází povede ke zvýšení turbulence a přenosu kinetické energie i hmoty. Důležitým parametrem při konstrukci perforovaných přepážek je jejich mezerovitost, čili poměr mezi plochou děr a celkovou plochou přepážky, která se stanovuje pro konkrétní případy experimentálně.



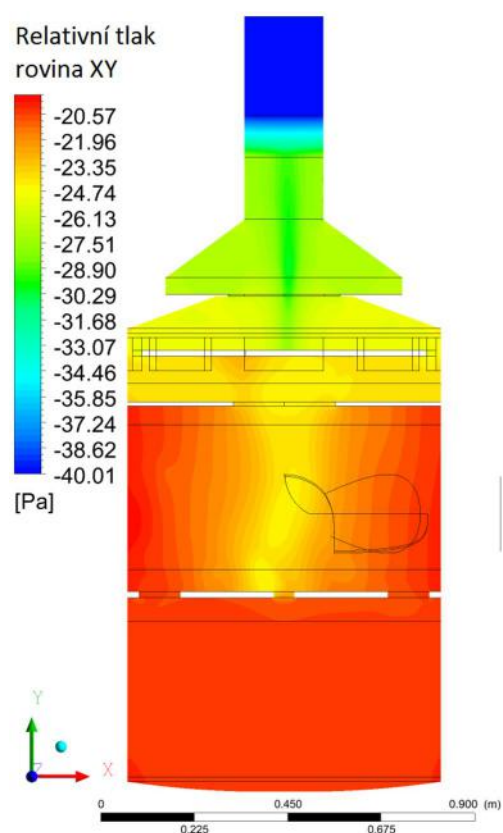
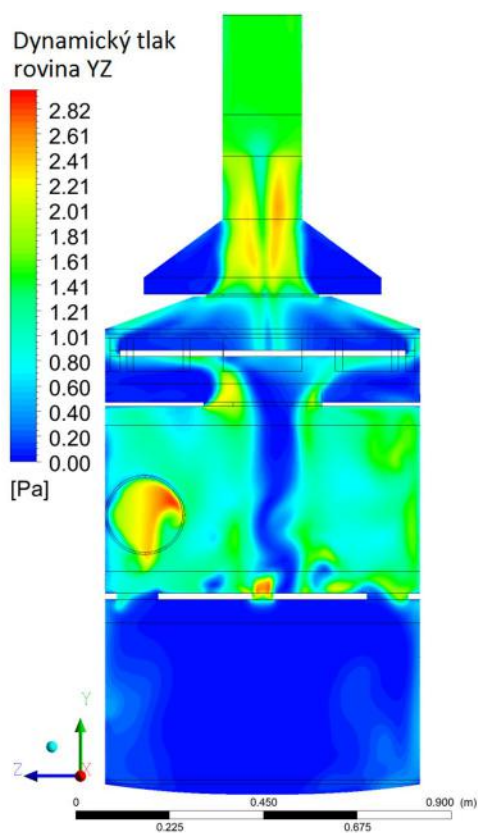
Obr. 73 Velikost rychlosti proudění zobrazena pomocí proudnic; **případ A** ($V_p = 0,054 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



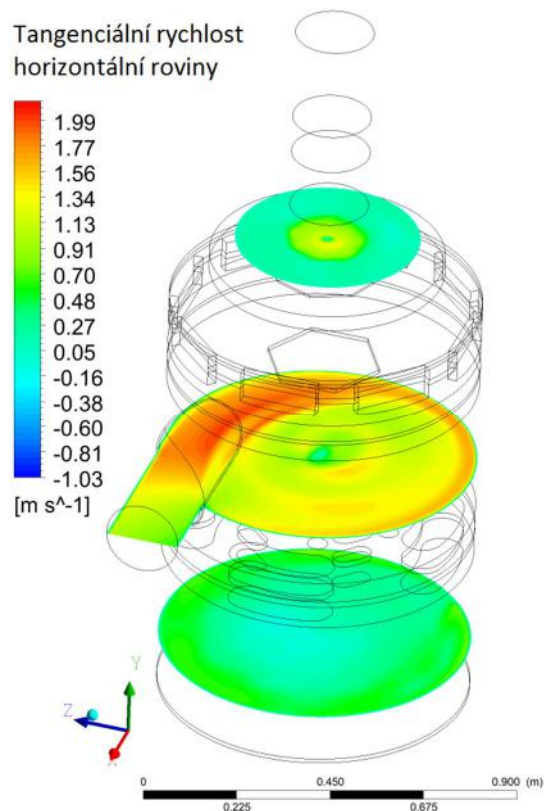
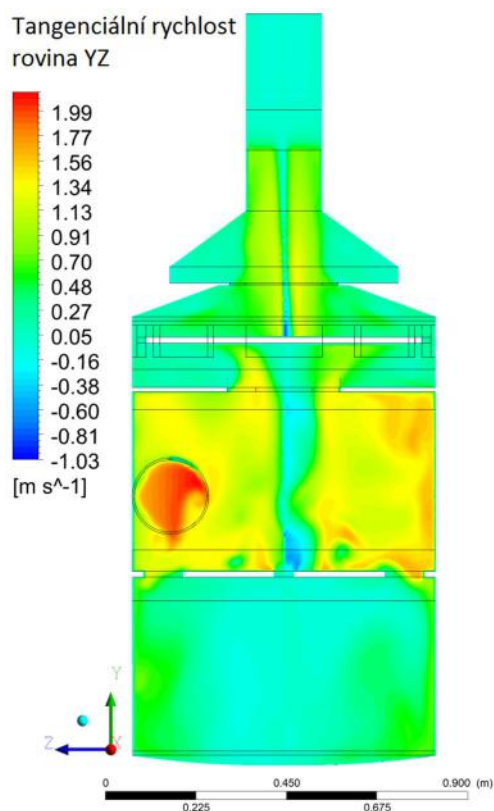
Obr. 74 Kontury velikosti rychlosti v rovinách pro **případ A** ($V_p = 0,054 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



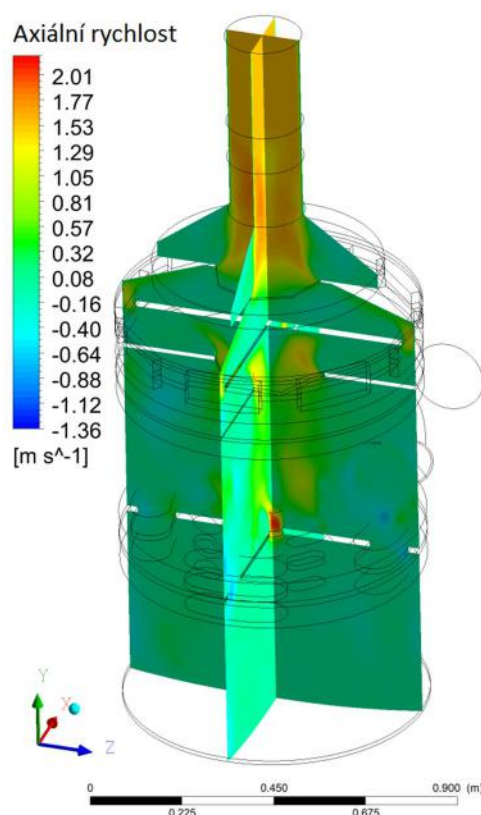
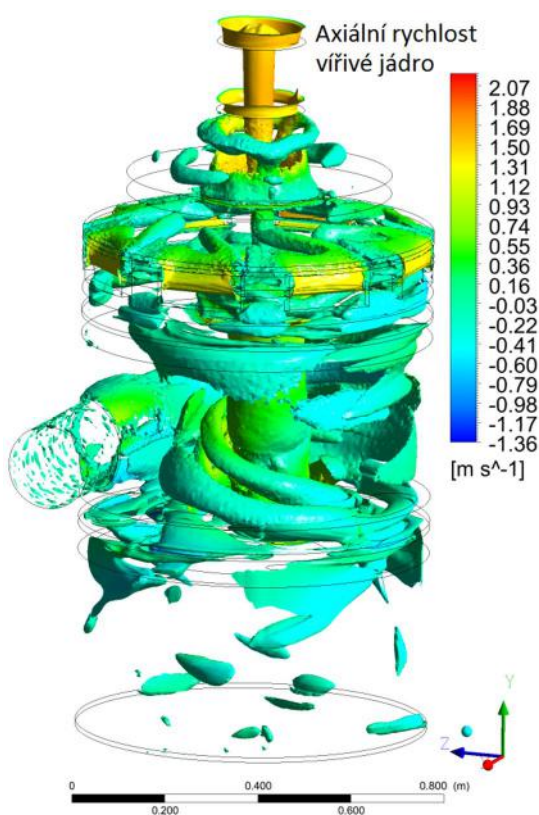
Obr. 75 Kontury radiálních rychlostí a kontury rychlostí s vektory v horizontálních rovinách pro **případ A** ($V_p = 0,054 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



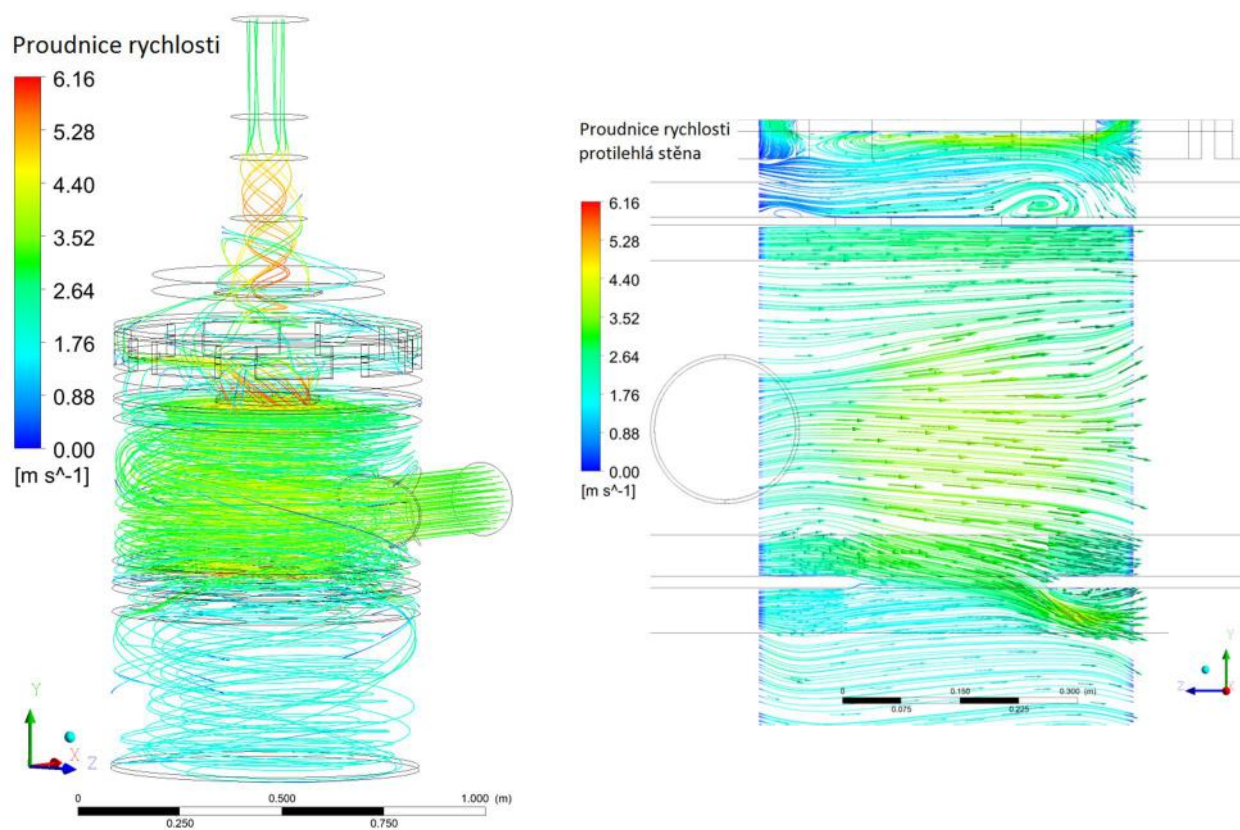
Obr. 76 Kontury dynamického a relativního tlaku pro **případ A** ($V_p = 0,054 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



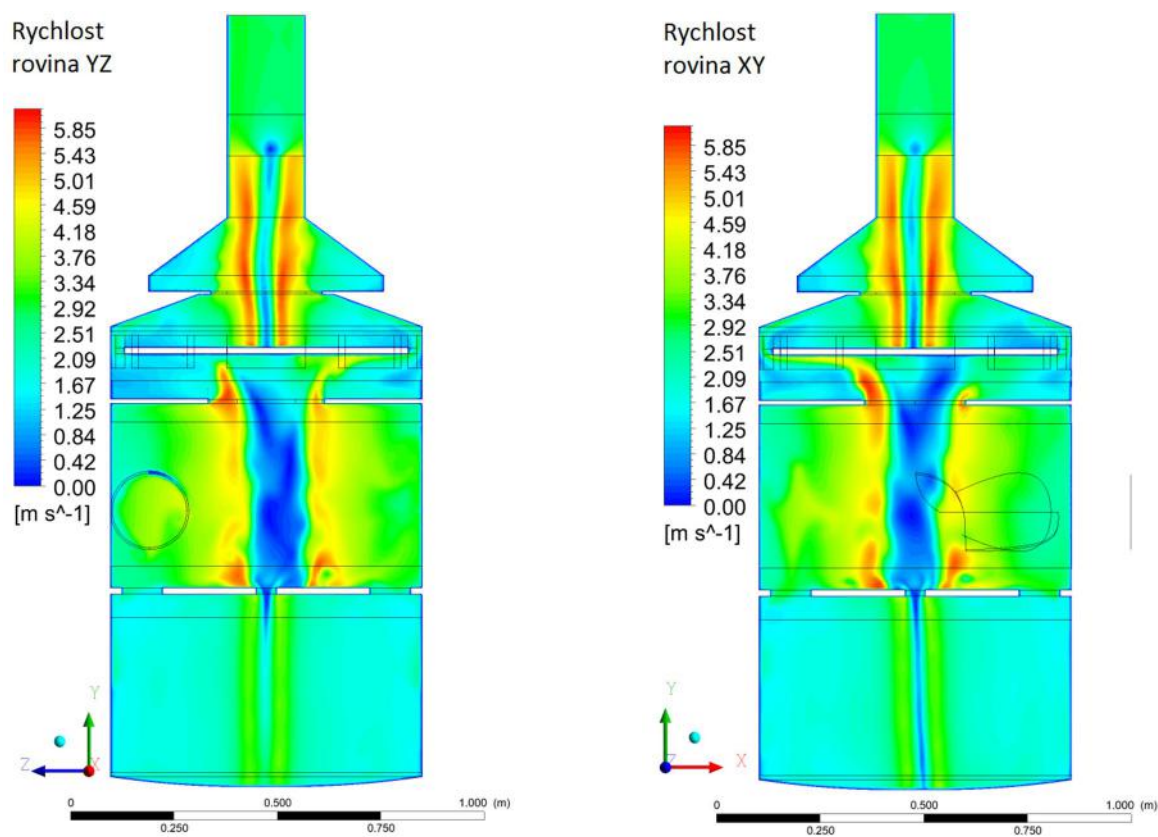
Obr. 77 Kontury tangenciálních rychlostí pro **případ A** ($V_p = 0,054 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



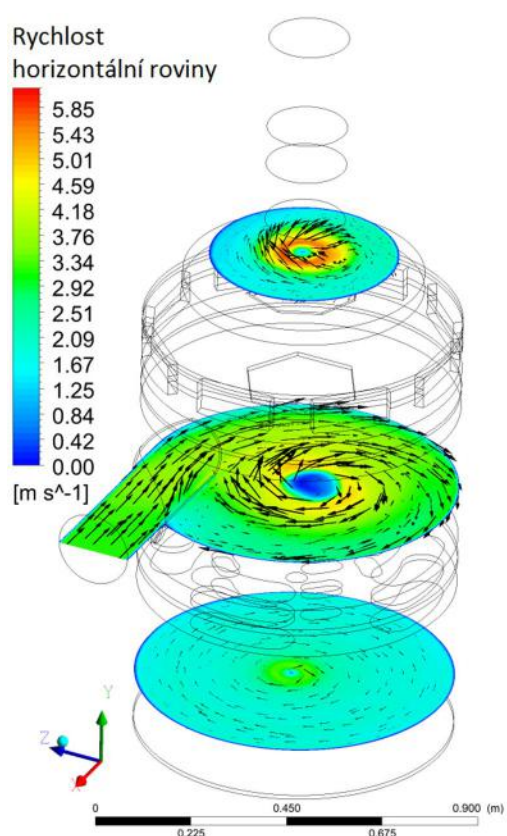
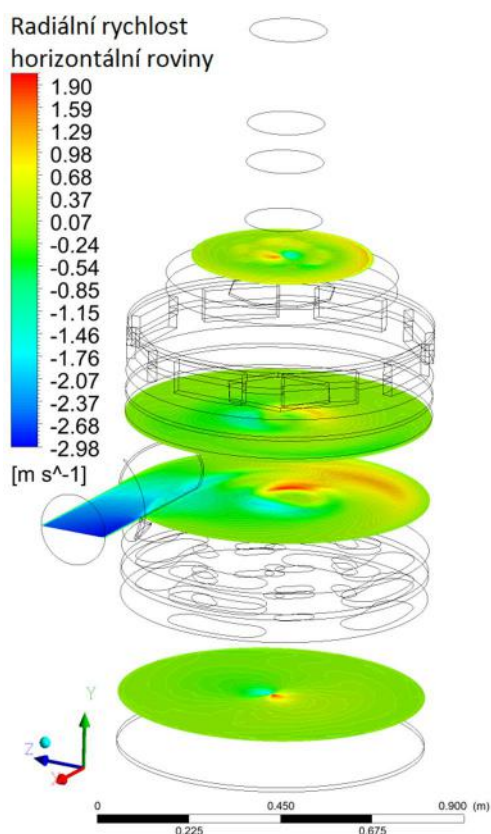
Obr. 78 Vířivé jádro s filtrací síly nastavenou na 0,06 společně s konturací axiální rychlosti a kontury axiálních rychlostí v rovinách XY a YZ pro **případ A** ($V_p = 0,054 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



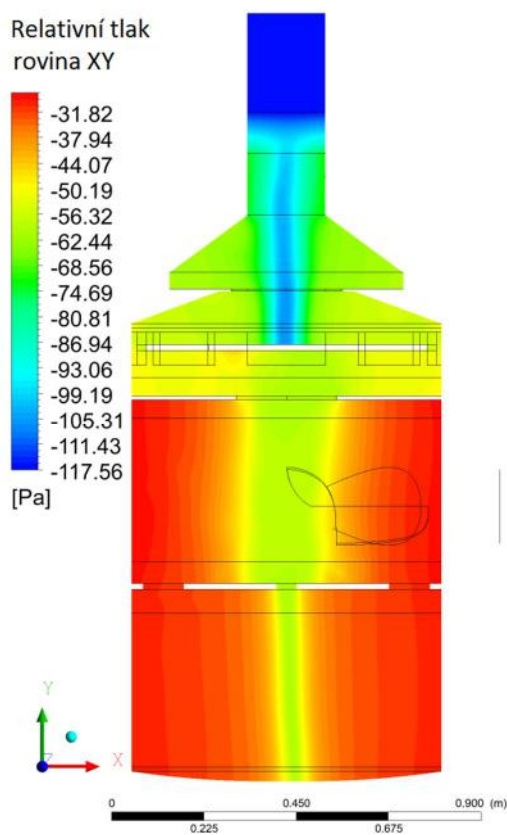
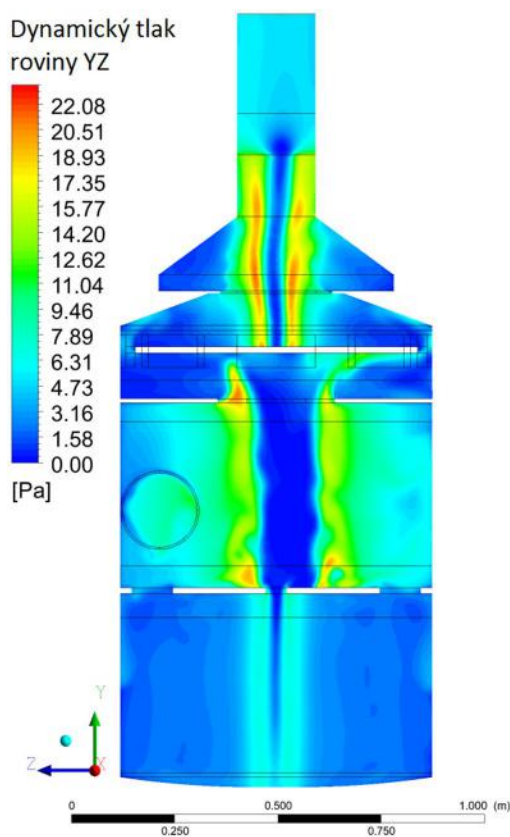
Obr. 79 Velikost rychlosti proudění zobrazena pomocí proudnic; **případ B** ($V_p = 0,099 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



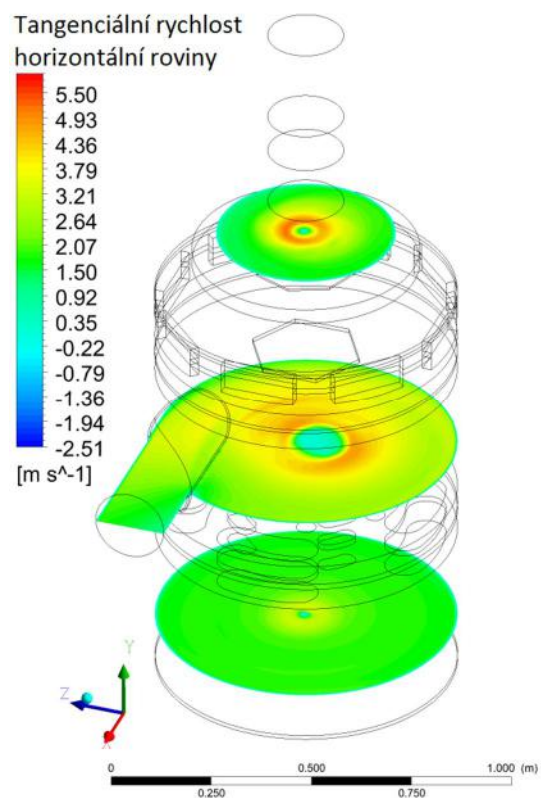
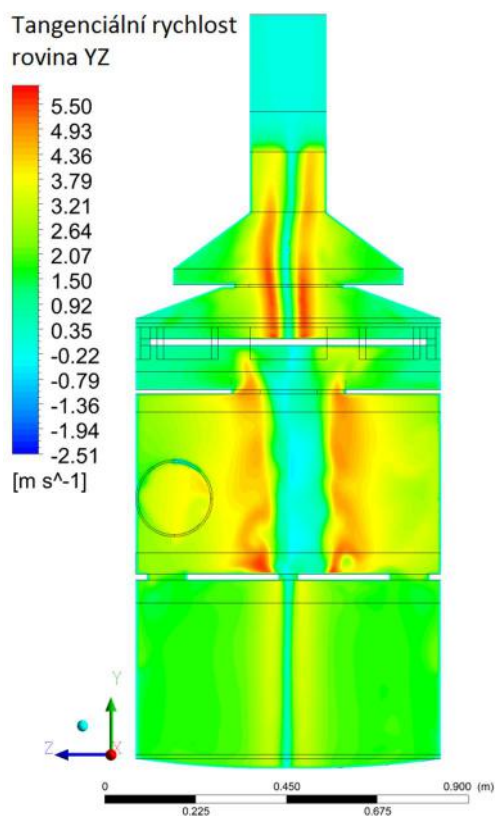
Obr. 80 Kontury velikosti rychlosti v rovinách pro **případ B** ($V_p = 0,099 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



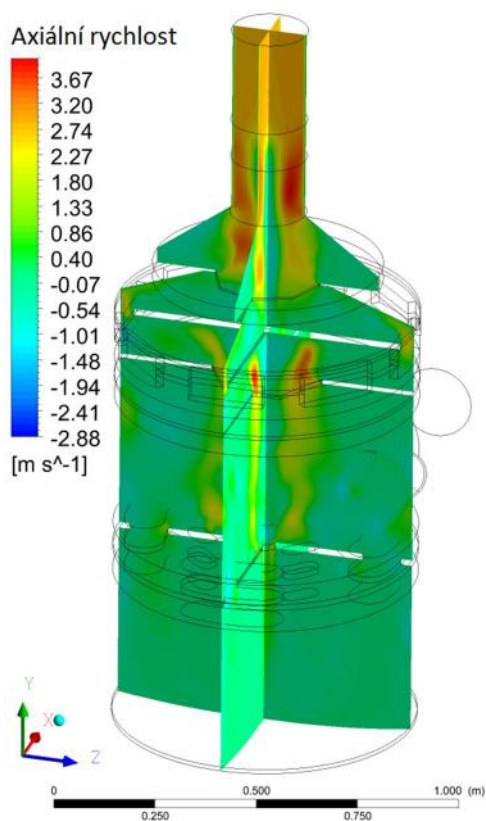
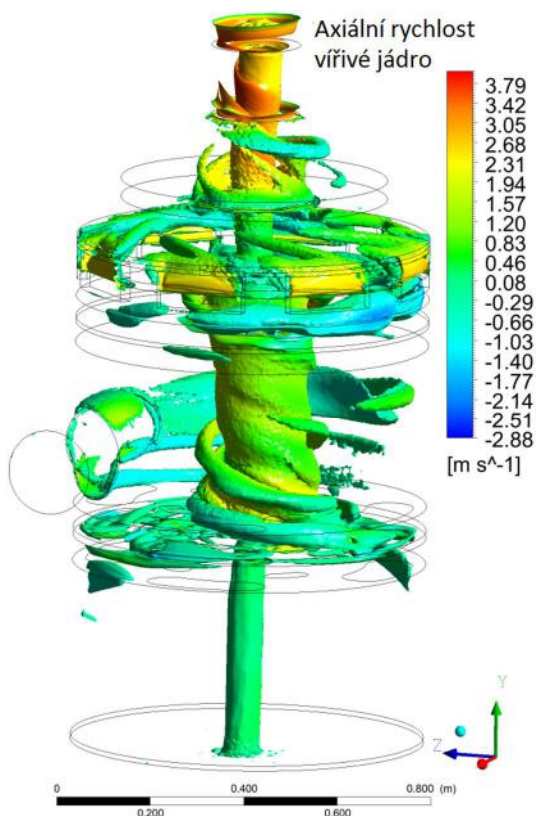
Obr. 81 Kontury radiálních rychlostí a kontury rychlostí s vektory v horizontálních rovinách pro **případ B** ($V_p = 0,099 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



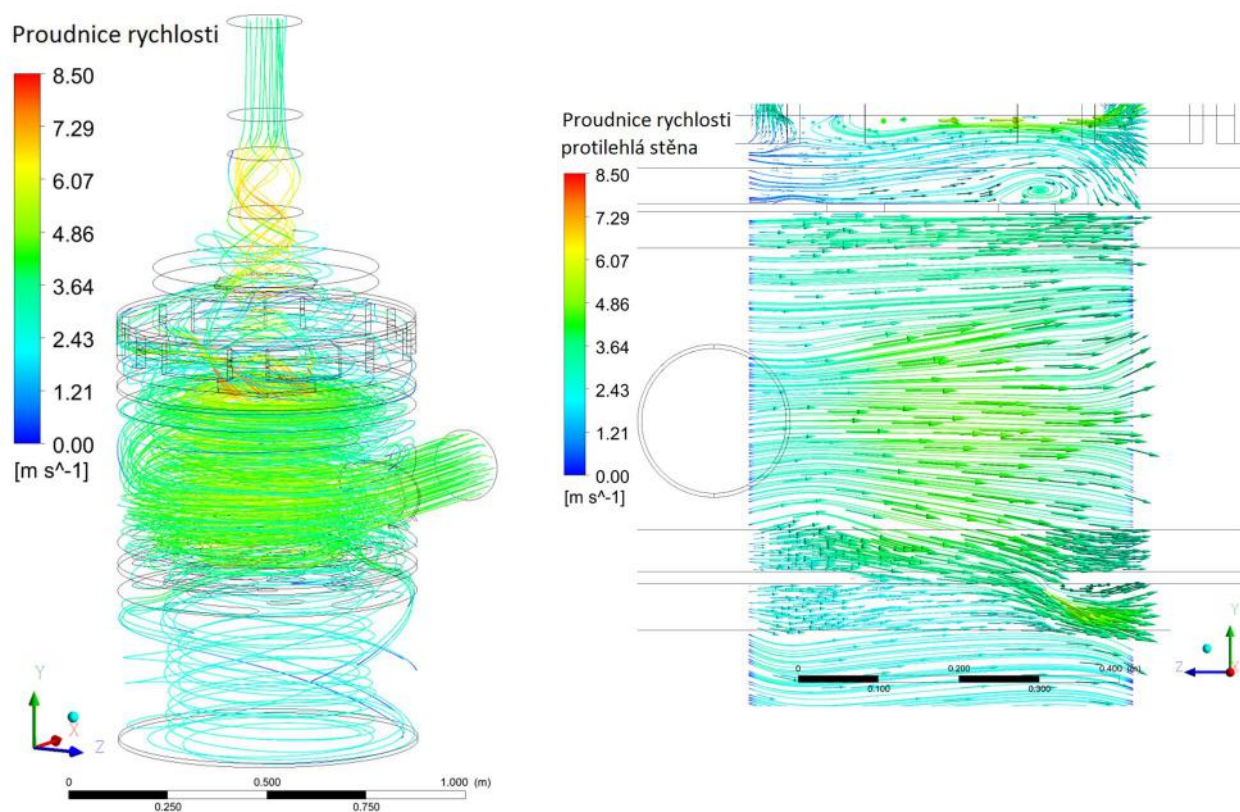
Obr. 82 Kontury dynamického a relativního tlaku pro **případ B** ($V_p = 0,099 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



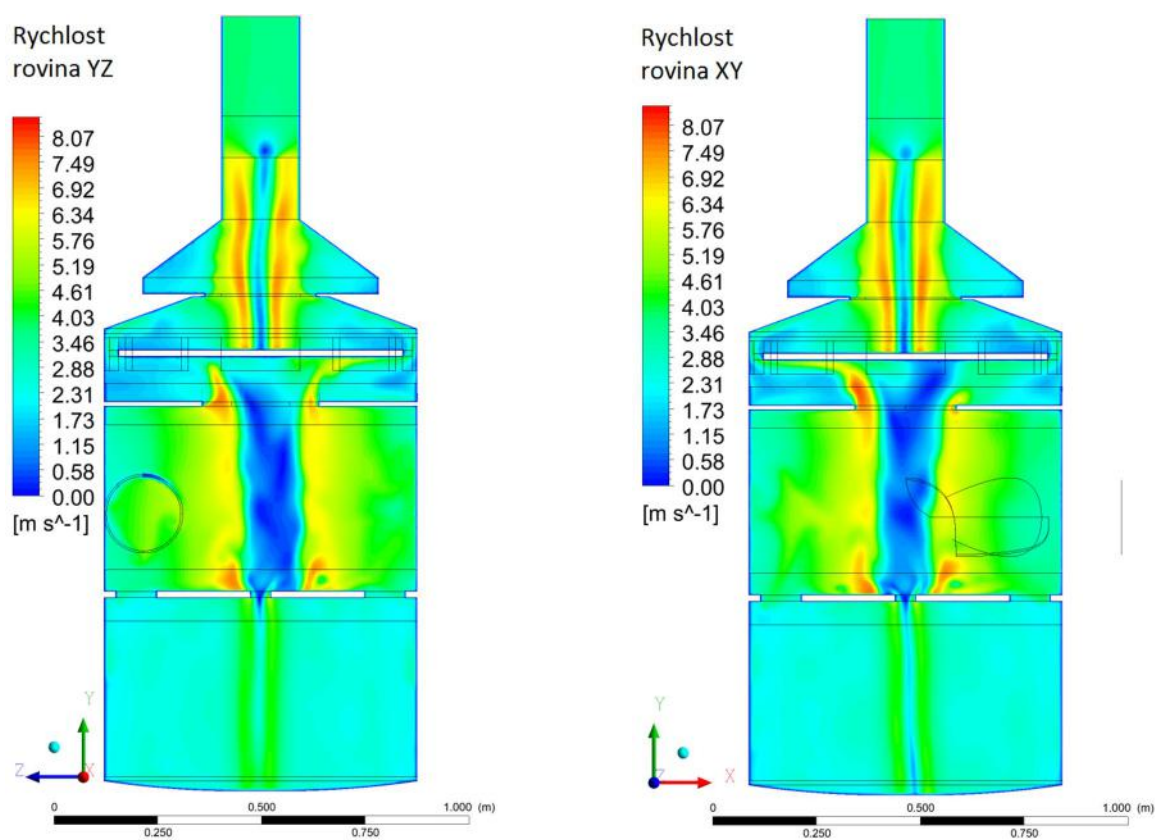
Obr. 83 Kontury tangenciálních rychlostí pro **případ B** ($V_p = 0,099 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



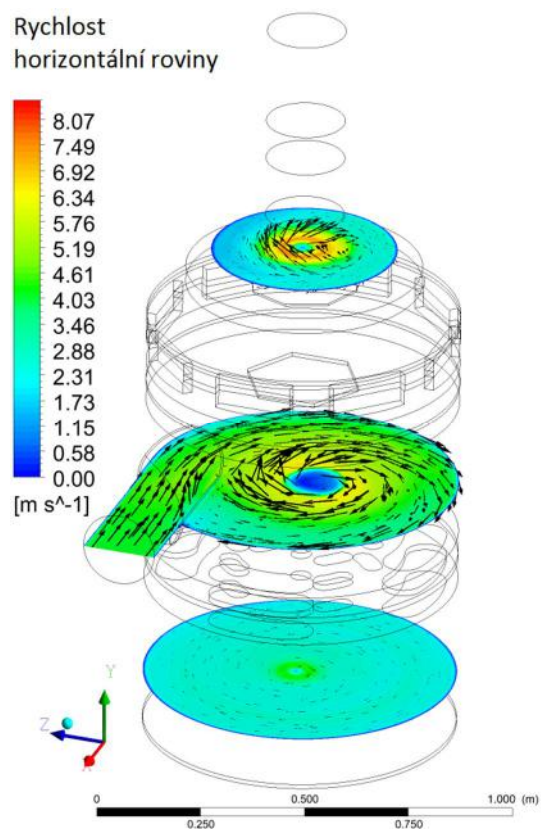
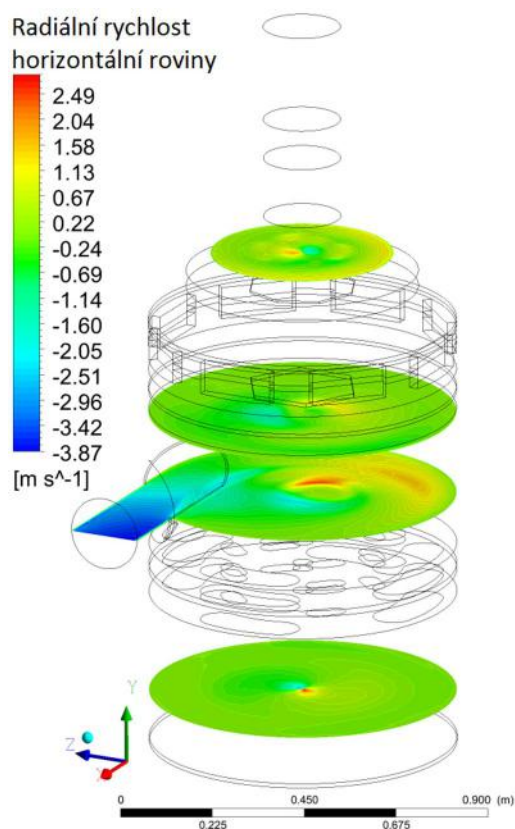
Obr. 84 Vířivé jádro s filtrací síly nastavenou na 0,06 společně s konturací axiální rychlosti a kontury axiálních rychlostí v rovinách XY a YZ pro **případ B** ($V_p = 0,099 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



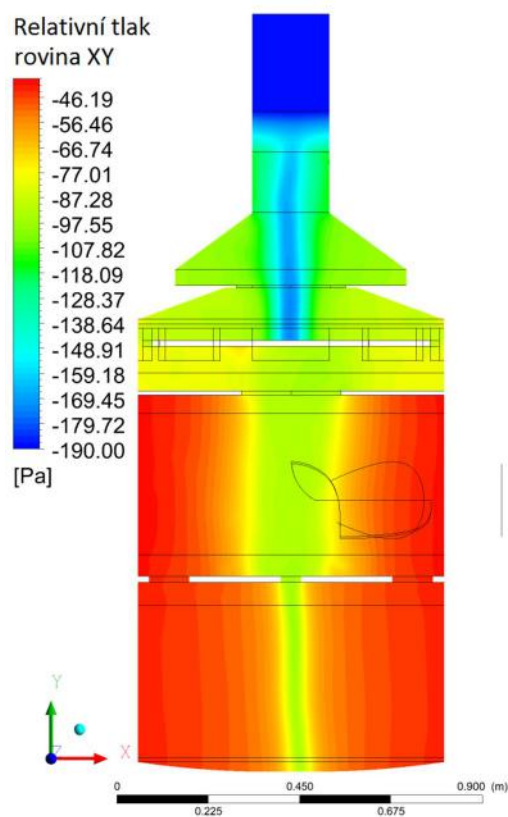
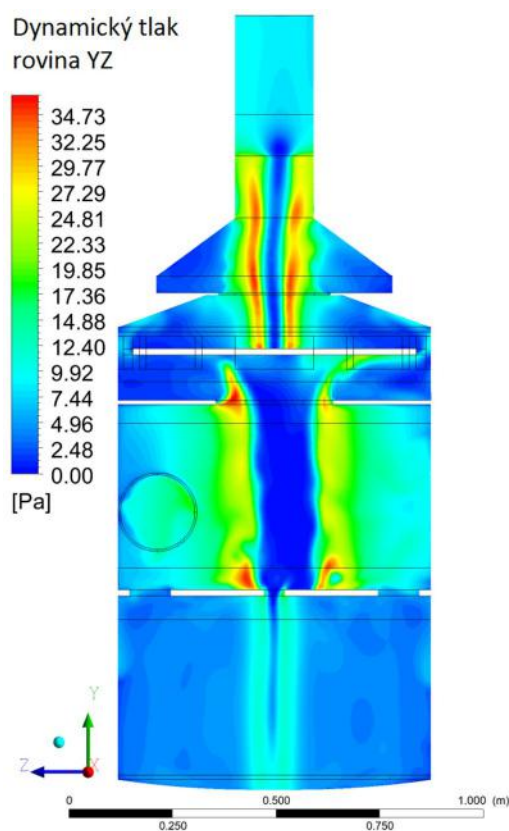
Obr. 85 Velikost rychlosti proudění zobrazena pomocí proudnic; **případ C** ($V_p = 0,129 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



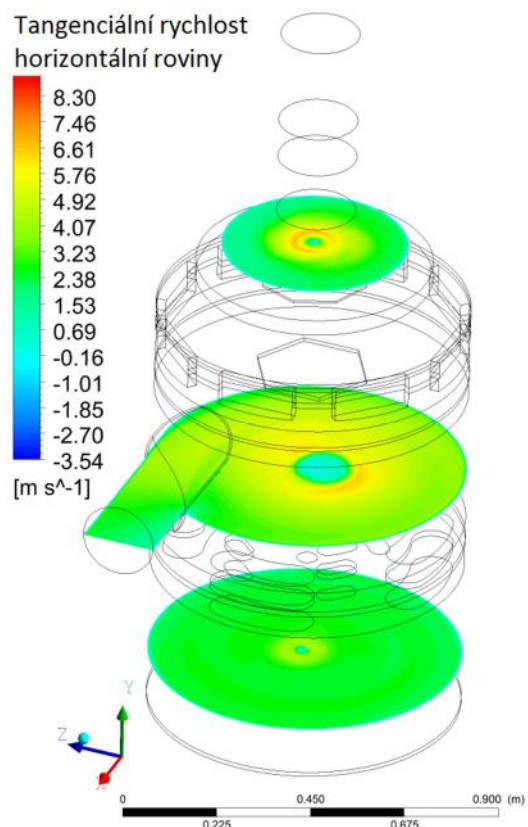
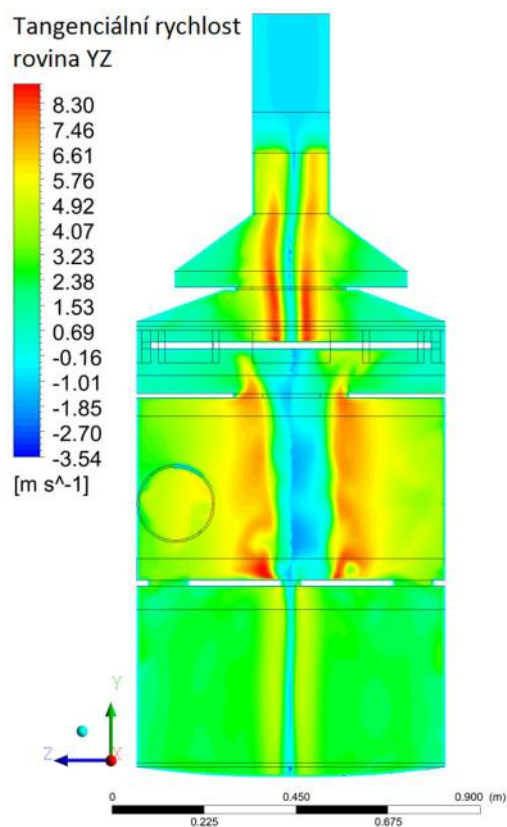
Obr. 86 Kontury velikosti rychlosti v rovinách pro **případ C** ($V_p = 0,129 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



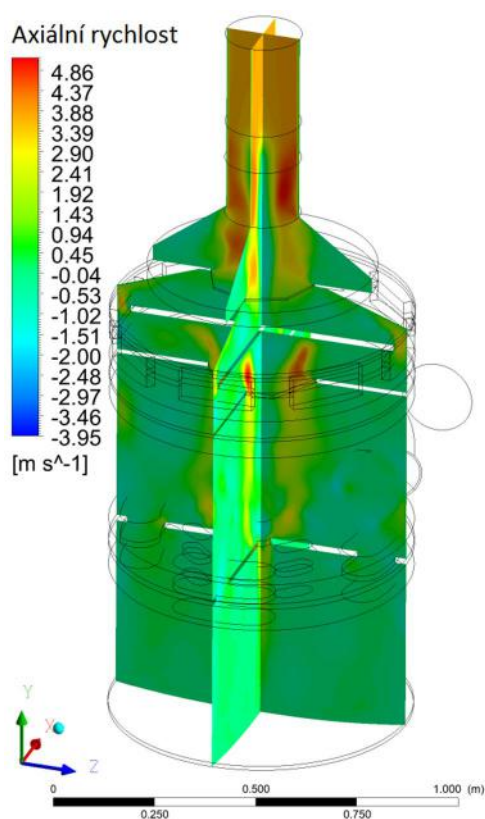
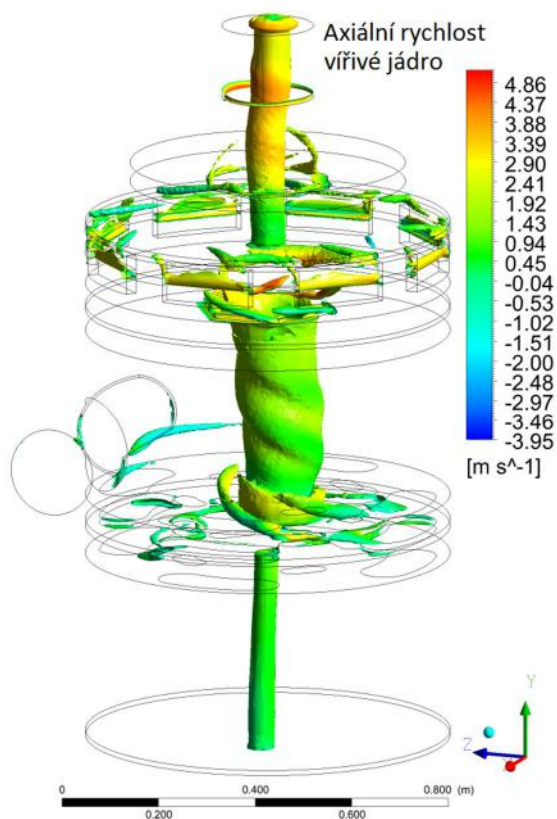
Obr. 87 Kontury radiálních rychlostí a kontury rychlostí s vektory v horizontálních rovinách pro **případ C** ($V_p = 0,129 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



Obr. 88 Kontury dynamického tlaku pro **případ C** ($V_p = 0,129 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



Obr. 89 Kontury tangenciálních rychlostí pro **případ C** ($V_p = 0,129 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)



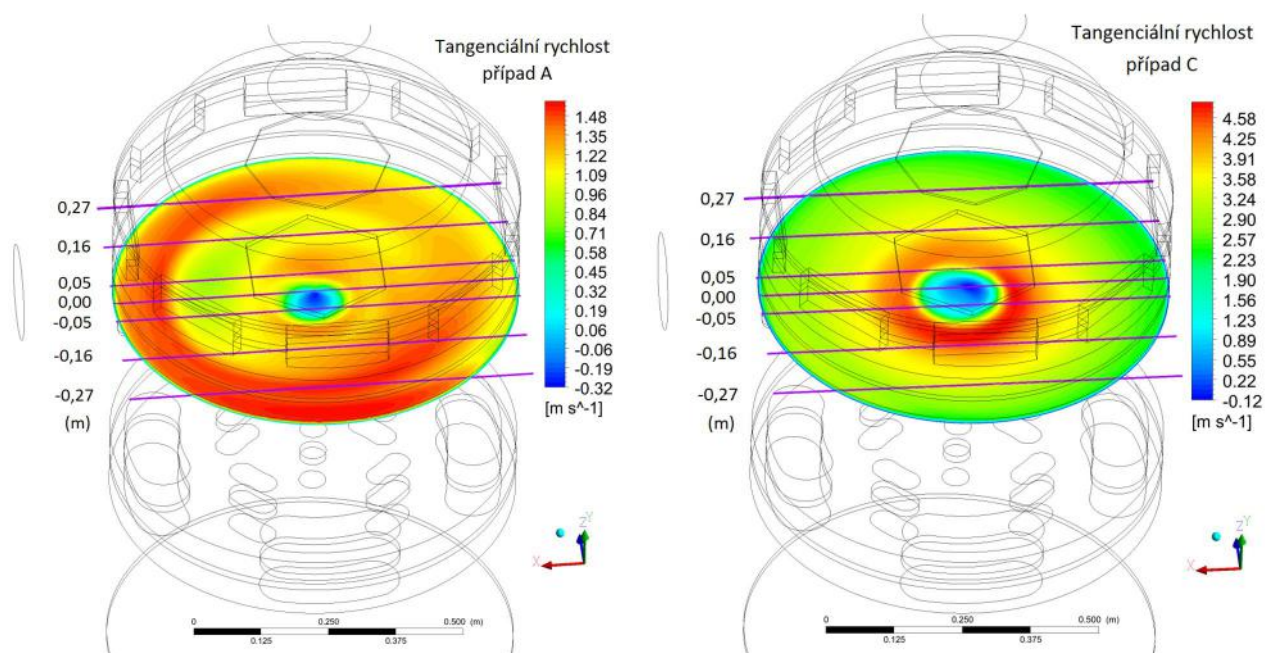
Obr. 90 Vířivé jádro s filtrací síly nastavenou na 0,06 společně s konturací axiální rychlosti a kontury axiálních rychlostí v rovinách XY a YZ pro **případ C** ($V_p = 0,129 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Na Obr. 91, Obr. 93, Obr. 95 jsou vyznačeny kontury jednotlivých složek rychlosti pro případ A a B v ploše (případ C součástí přílohy, Obr. 117), která reprezentuje horizontální rovinu, kde by při chodu sprchové scrubberu byla umístěná spirálová tryska. Pro lepší orientaci je třeba zdůraznit, že počátek kartézské souřadnicové osy je umístěn v geometrickém středu horizontální roviny. Orientace kladného směru osy X směřuje netradičně vlevo a pozice prezentovaných linií jsou označeny dle polohy v ose Z . V rámci každé linie bylo vyneseno 300 bodů hodnot příslušných složek rychlosti do skupinových grafů (Obr. 92, Obr. 94, Obr. 96).

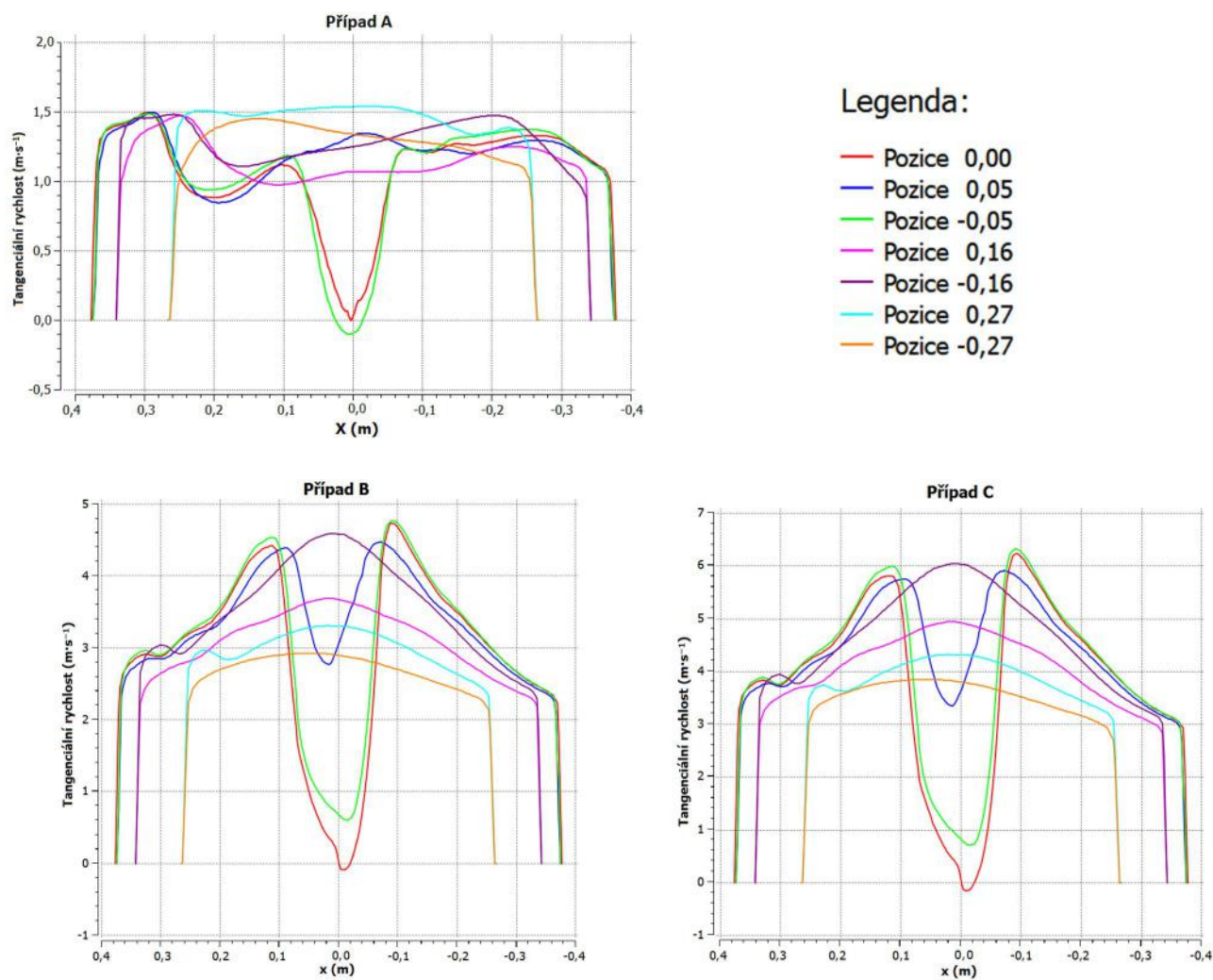
Z porovnání záznamu hodnot jasně vyplývá, že distribuce plynné fáze je pro případ A odlišná oproti případům B i C. Vývoj některých křivek je sice podobný, ale některé se naopak značně liší. Například dosti odlišný vývoj je možné pozorovat pro tangenciální rychlosti oproti ostatním dvěma případům. Souhlasný zůstává pouze posunutý střed víru, který ve svém centru v této hladině vykazuje záporný směr rotace. V případě B a C pak přechází rovnou k silně vířivému prstenci s následnou klesající tendencí směrem ke stěnám pracovní komory. Oba případy se liší pouze intenzitou (ostatně jako i v ostatních složkách rychlosti). Naopak v případě A vykazuje tangenciální složka rychlosti nejvyšší hodnoty u stěn komory, soustředěné převážně v kladných hodnotách osy X dle Obr. 91.

Pro složku radiálních rychlostí lze nicméně u všech případů sledovat podobný trend rozložení, samozřejmě s rozdílnými hodnotami velikostí. Maximální kladné hodnoty radiálních rychlostí (červená oblast na Obr. 93) v případě A dosahují k linii $-0,05$. V případě B i C dosahují zhruba do poloviny mezi liniemi $-0,05$ a $-0,16$. Oblast maximálně záporných hodnot radiálních rychlostí (tmavě modrá barva) zaujímá pro případ A větší plochu než pro zbylé případy. Plocha dosahuje hranice počátku souřadnicové osy.

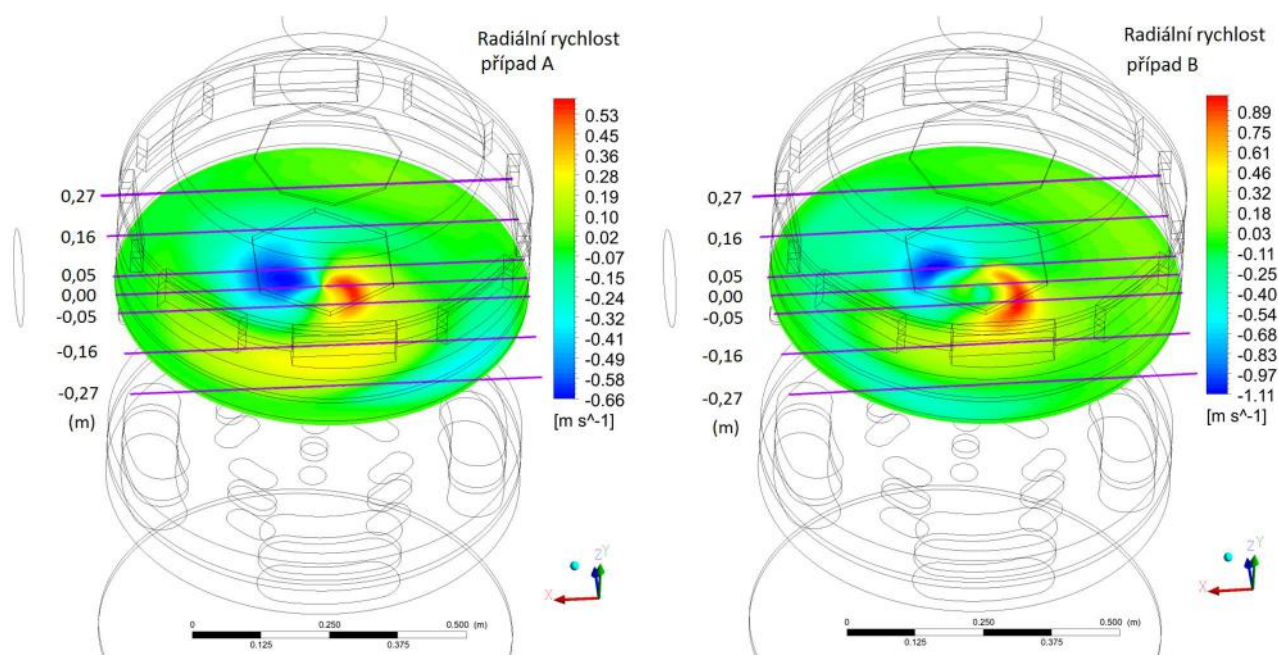
V porovnání axiálních rychlostí se případ A opět od ostatních liší. V případě A registrujeme zápornou axiální rychlost ve středu mírně vybočeného víru. Okolo se nachází oblast maximální kladné axiální rychlosti (červená barva) s nejvyššími hodnotami ležícími pod linií $0,00$ a v záporných hodnotách osy X . Od obvodu víru se pak nadále směrem k vnitřní stěně komory axiální rychlost postupně snižuje. Oblast minimální axiální rychlosti je na Obr. 95 pro případ A znázorněna tmavě modrou barvou. V případě B a C je maximální axiální rychlost soustředěna okolo středu posunutého víru. Zobrazuje tak oblast, kde plynná fáze v převážné části opouští střední část skrápěcí komory.



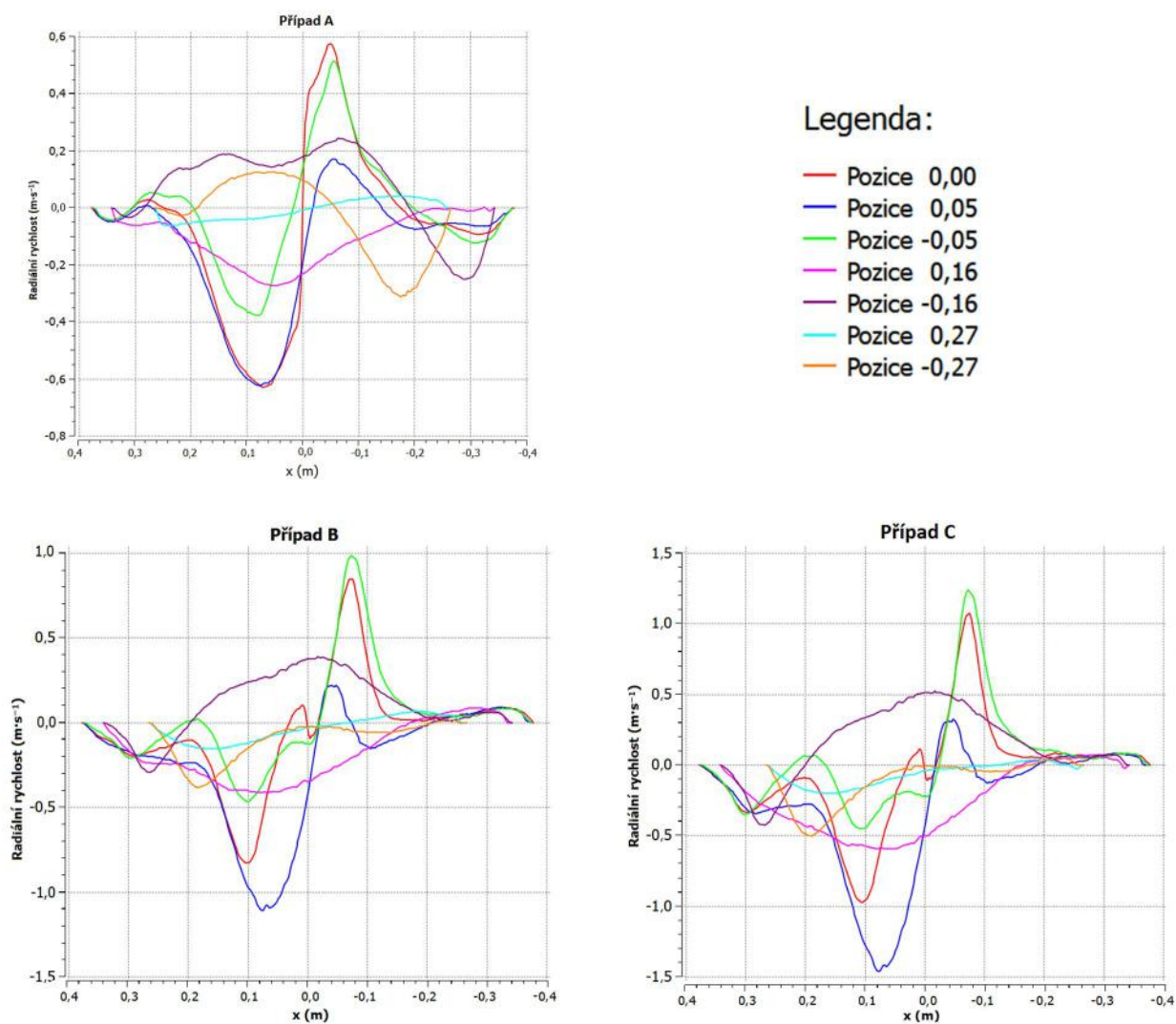
Obr. 91 Kontury **tangenciálních** rychlostí v ploše trysky pro případ A a B; pozice dat v grafech



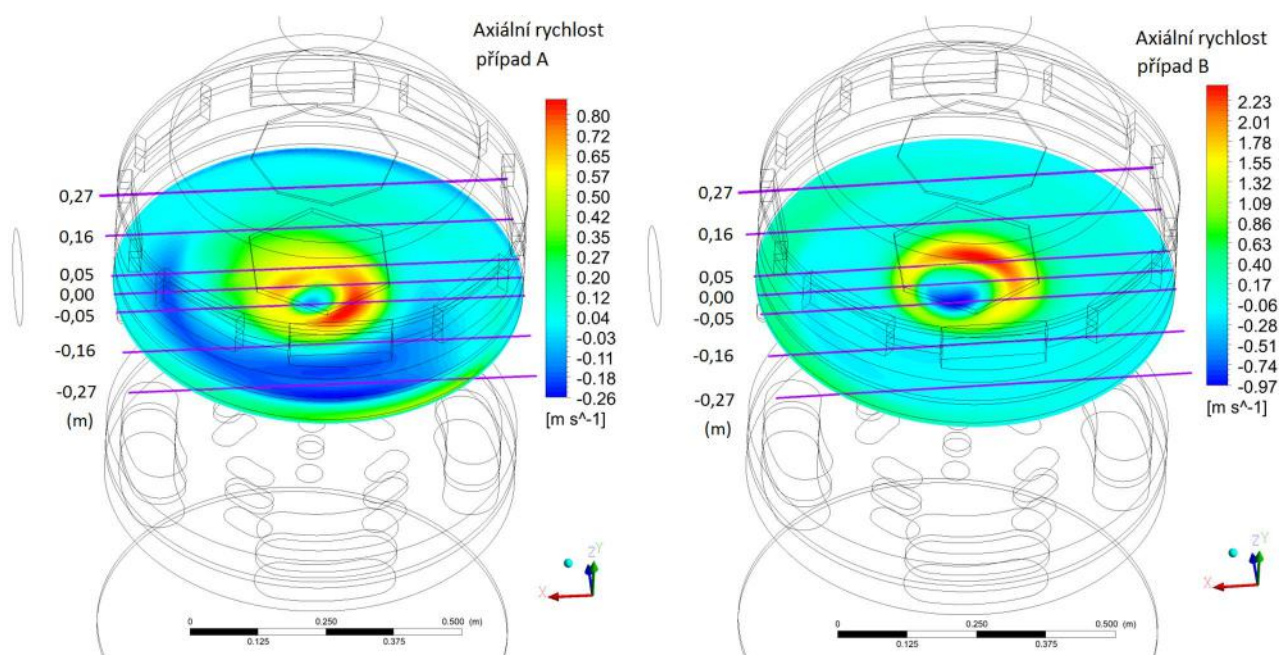
Obr. 92 Grafy vývoje tangenciálních rychlostí v ploše trysky pro různé pozice



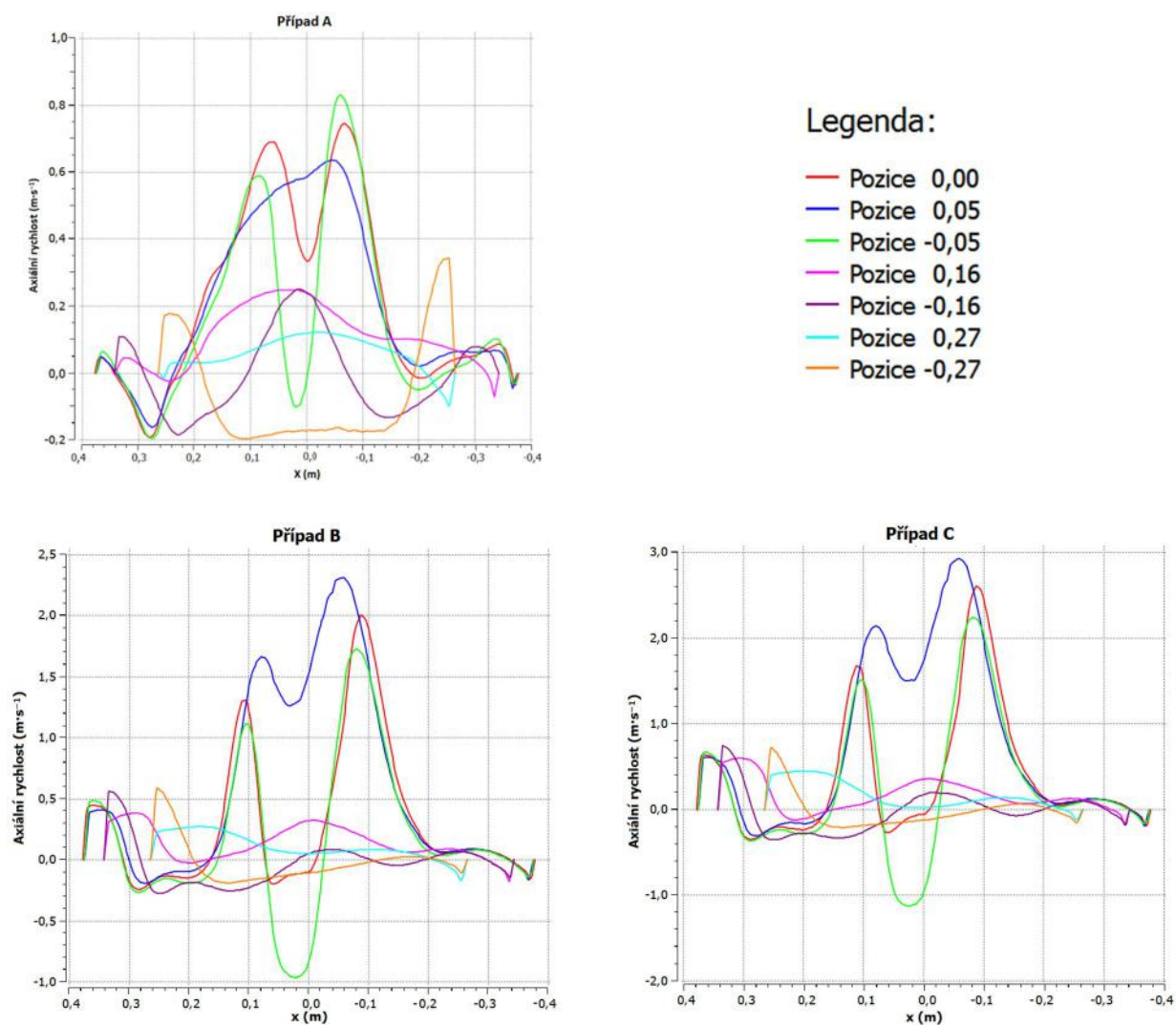
Obr. 93 Kontury **radiálních** rychlostí v ploše trysky pro případ A a B; pozice dat v grafech



Obr. 94 Grafy vývoje **radiálních** rychlostí v ploše trysky pro různé pozice



Obr. 95 Kontury *axiálních* rychlostí v ploše trysky pro případ A a B; pozice dat v grafech



Obr. 96 Grafy vývoje *axiálních* rychlostí v ploše trysky pro různé pozice

4.3.1.5 Srovnání numerických simulací s experimentálními daty

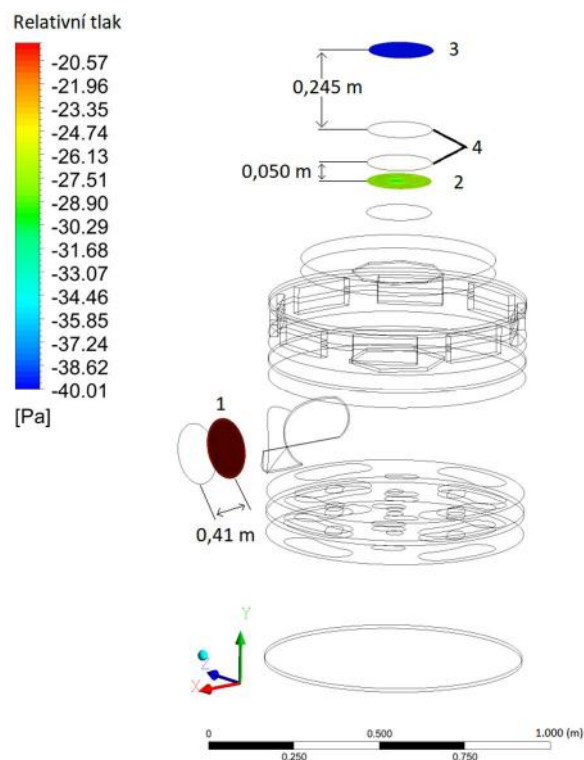
Výsledky simulačních výpočtů bylo potřeba konfrontovat s ověřenými daty získanými z experimentálního pozorování distribuce relativních tlaků ve vnitřním prostoru skrápěcí hlavy, a sice během provozu plynného cirkulačního okruhu poloprovozního scrubberu. Při experimentálních pracích nebyl kapalný cirkulační okruh zapnut, jelikož i simulace byly realizovány pouze pro popis charakteru distribuce samotné plynné fáze. Podmínky okolí odpovídaly nastavení provozních podmínek pro numerické simulace. Z experimentálních prací byly také použity hodnoty hmotnostních průtoků a hodnoty relativních tlaků v jednotlivých případech pro definování okrajových podmínek simulací na vstupu a výstupu do skrápěcí hlavy.

Pro ověření správnosti simulací byl vybrán, jako srovnávací veličina, relativní tlak v příslušných místech skrápěcí hlavy. Jedna tlaková sonda byla umístěna v deflektoru na vstupu plynu do skrápěcí hlavy, kterou se také regulovaly otáčky ventilátoru a tím hmotnostní průtok plynu v jednotlivých případech. Další tlaková sonda byla umístěna na výstupu ze skrápěcí hlavy před demistorem a poslední srovnávací sonda za demistorem na výstupu do potrubní trasy centrálního odvětrávání (Obr. 97).

Hodnoty hmotnostních průtoků plynné fáze pro případ A, B i C zjištěné experimentálně a jím odpovídající hodnoty relativních tlaků z praktických měření a výsledků simulací jsou uvedeny v Tab. 11. V rámci simulací distribuce plynné fáze ve vnitřním prostoru skrápěcí hlavy byl dopočítán relativní tlak na vstupu do pracovní komory a v oblasti před odlučovačem kapek. Relativní tlak na výstupu byl nastaven jako okrajová podmínka. Srovnání tlakových veličin vypočítaných numerickou simulací s experimentálními daty je zobrazeno na Obr. 98.

Simulací obdržený výsledný relativní tlak před odlučovačem kapek vykazuje minimální odchylky oproti experimentálně zjištěným relativním tlakům. Konkrétně o 1,0 % pro případ A, o 2,3 % pro případ B a o 2,7 % pro případ C. K dobré shodě přispělo umístění kontrolního tlakového bodu poblíž výstupu (outlet) výpočtové oblasti, která byla definována pevnou tlakovou okrajovou podmínkou. Odlučovač kapek/demistor, nacházející se těsně za kontrolním bodem na výstupu ze skrápěcí komory, nebyl v geometrii modelu pro svou složitost zahrnut (systém vertikálně uložených a navzájem dle axiální osy pootočených roštů). Bylo proto nutné ho ve Fluentu definovat přiřazením virtuální porézní zóny v předem připravené oblasti modelu. Na základě minimální tlakové difference obdržených dat mezi simulacemi a experimenty, lze považovat nastavení charakteristik porozity a koeficientů odporu demistorové zóny za optimální.

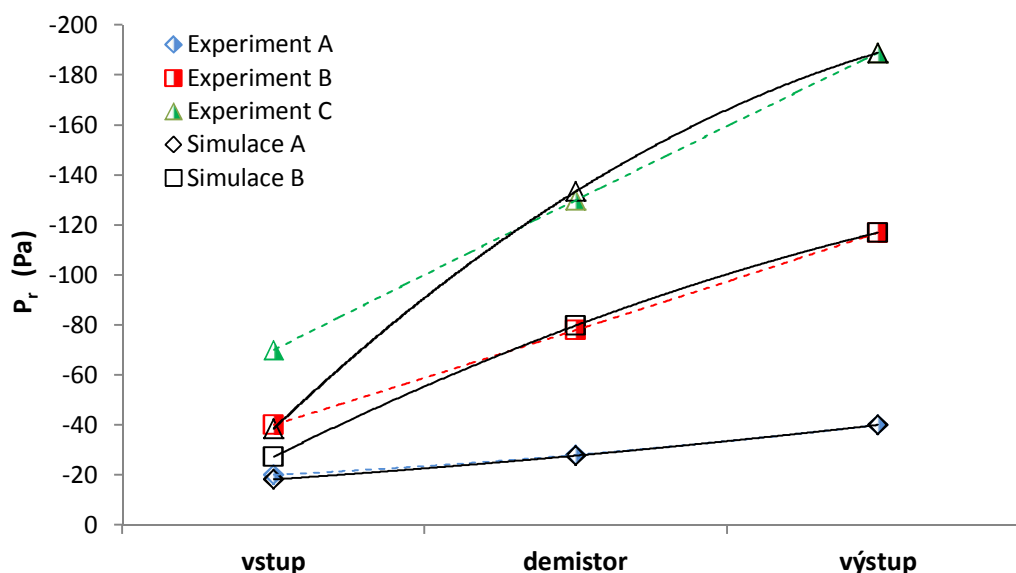
Hodnoty relativního tlaku na vstupu do pracovní komory, získané ze simulací, byly ve všech případech nižší oproti experimentálně zjištěnému. Pro případ A o 9,1 %, pro případ B o 31,9 % a pro případ C o 45,0 %. Tento jev lze vysvětlit implementací zjednodušení pro snížení náročnosti numerických výpočtů, jako jsou např. izotermické podmínky, standartní vlnová funkce mezní vrstvy a využití RANS rovnic pro výpočet pohybových rovnic a skutečnost, že relativní tlak na vstupu je zpětně dopočítáván z okrajové podmínky na výstupu. K odchylce také přispívá citlivost tlakových sond a mechanismus přepočtu regulující otáčky ventilátoru během praktických experimentů. Je třeba si také uvědomit, že rozdíly jsou v řádu desítek pascalů. Jedná se tedy o velmi malé hodnoty, a proto takto nastavené numerické výpočty byly akceptovány. Na Obr. 99 jsou uvedeny hodnoty koeficientů detereminace, které vykazují shodu mezi experimentálně a numericky získanými daty, i když závislost byla sestavena pouze ze tří hodnot, více kontrolních bodů relativního tlaku nebylo k dispozici.



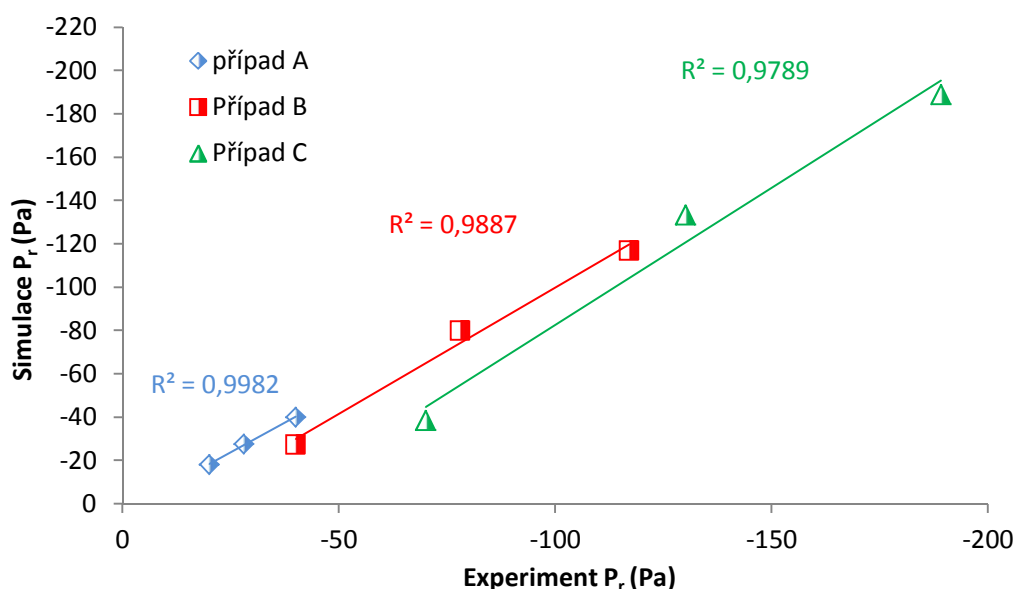
Obr. 97 Umístění tlakových sond při experimentech a porovnání jejich hodnot pro případ A ($V_p = 0,054 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$); tlaková sonda na vstupu (1), tlaková sonda před demistorem (2), tlaková sonda na výstupu (3), plochy ohraničující délku demistoru (4)

Tab. 11 Hodnoty relativních tlaků ve skrápěcí hlavě pro různé průtoky/případy z praktických experimentů a simulací; kde V_p je hmotnostní průtok plynné fáze na vstupu, $P_{ri}/P_{rd}/P_{ro}$ relativní tlak plynné fáze na vstupu/před demistorem/na výstupu

		V_p ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	P_{ri} (Pa)	P_{rd} (Pa)	P_{ro} (Pa)
Experiment	A	0,054	-20,00	-28,00	-40,00
	B	0,099	-40,00	-78,00	-117,00
	C	0,129	-70,00	-130,00	-189,00
Simulace	A	0,054	-18,18	-27,72	-40,00
	B	0,099	-27,23	-79,82	-117,00
	C	0,129	-38,49	-133,51	-189,00



Obr. 98 Porovnání hodnot relativních tlaků ve skrápěcí hlavě z praktických experimentů a simulací pro různé průtoky/případy



Obr. 99 Hodnoty koeficientů determinace mezi experimentem a simulacemi pro různé průtoky/případy

4.3.2 Simulace proudění kapalně fáze

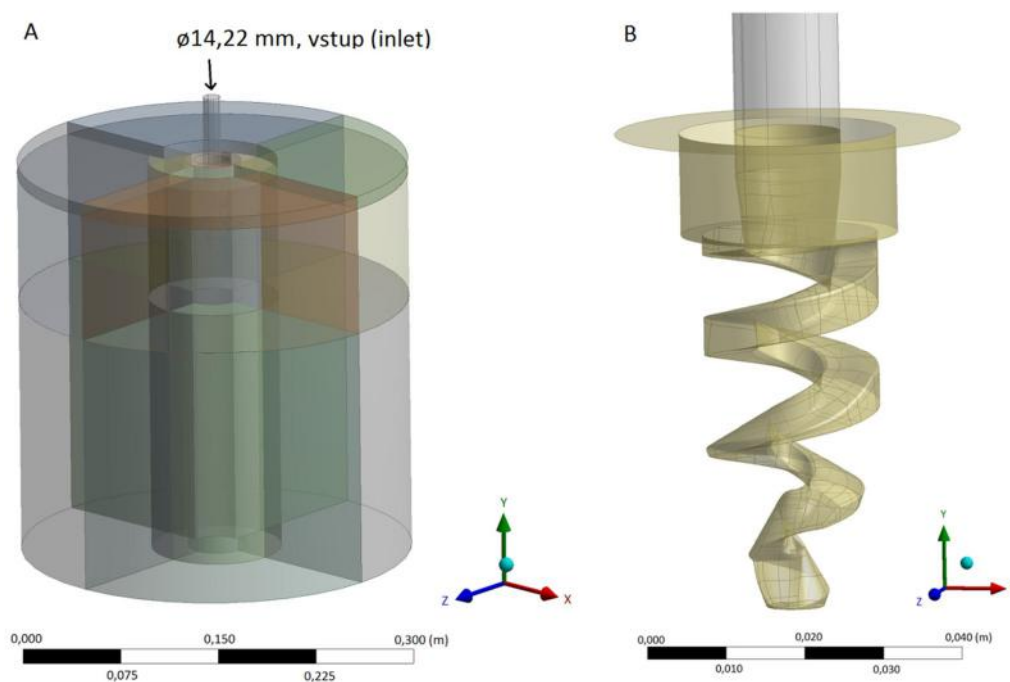
Vícefázová numerická simulace vývoje kapalinové clony podél spirálovitého těla trysky byla realizovaná do volného prostoru bez protiproudu plynné fáze. Jejím smyslem bylo nalézt vhodné nastavení parametrů, které popisující věrohodně rozstřík kapalně fáze přes spirálovou trysku.

Pro potřeby numerické simulace bylo potřeba definovat vlastnosti pracovních tekutin. Okolní podmínky (plynná fáze) simulace byly nastaveny na tlak 101325 Pa, teplotu 298,15 K, hustotu okolního statického vzduchu na hodnotu $1,1845 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (ρ_g) a na hodnotu dynamické viskozity

$1,91 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (μ_{DVg}). Fyzikální vlastnosti kapalně fáze (vody) byly v rámci simulace nastaveny tak, aby korespondovaly s okolními podmínkami plynné fáze. Tedy na hodnotu hustoty $997,04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (ρ_L) a hodnotu dynamické viskozity $8,91 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (μ_{DVI}). Hodnota vstupního hmotnostního průtoku kapalně fáze pro numerickou simulaci byla nastavena na $1,759 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (V_n), což odpovídá pracovnímu tlaku 2 bar na vstupu do trysky.

4.3.2.1 Geometrie a generace výpočetní sítě

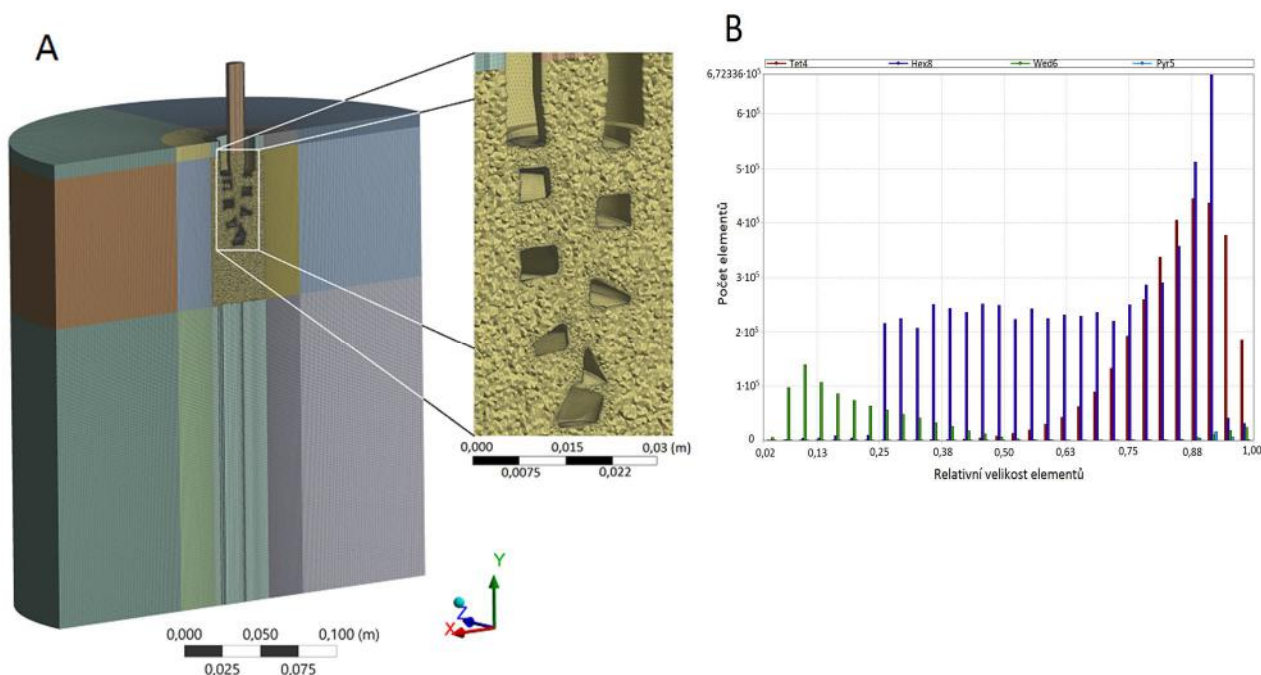
Pro potřeby numerické simulace bylo nutné vymodelovat virtuální geometrii tvarově i proporčně co nejbližší odpovídající reálné geometrii spirálové trysky. Profil výsledné vodní clony je za daných hydrodynamických podmínek, mimo jiné, výsledkem režimu proudění tekutiny vnitřním prostorem trysky a jejím následným odrazem od ploch jednotlivých spirál. Přítomnost zužujících spirálových struktur trysky, které navíc mají různě nakloněné odrazové plochy, komplikovaly reprodukci CAD modelu. Proto byl povrch trysky naskenován a do virtuálního modelu převeden. Tato metoda zajišťovala minimální odchylku (cca 1 mm) oproti skutečným rozměrům, nicméně byla spojena s jedním negativním faktem. Takto připravený model trysky obsahoval 374 ohraňovaných a na sebe nesourodě navazujících ploch (Obr. 100 B), které komplikovaly následnou generaci výpočetní sítě. Výpočetní prostor kolem trysky byl cylindrického tvaru o průměru a výšce 30 cm a byl rozdělen na 28 oblastí, opět z důvodu realizace adekvátní částečně strukturované sítě (Obr. 100 A).



Obr. 100 Reverzní geometrie výpočetního prostoru rozděleného na 28 oblastí/těles (A); spirálová tryska složená ze 374 ploch (B)

Rozčlenění vnitřního prostoru na větší počet oblastí dovoľovalo vygenerovat optimální částečně strukturovanou výpočetní síť. Většina výpočetního objemu byla složena z prostorových hexaedrů. Jejich velikost se postupně, od konce výpočetního prostoru směrem ke středu, snižovala (bias faktor 1,4). Metody Sweep, Edge Sizing, Body Sizing byly aplikovány pro získání elementů

požadované kvality. V prostoru kolem trysky byla metodou Patch Conforming Method vygenerována nestrukturovaná výpočetní síť, neboť velký počet různorodých ploch eliminoval veškeré pokusy o sestrojení geometricky pravidelnějších elementů (Obr. 101 B). Limitní hodnoty minimální ortogonální kvality a maximální šikmosti se rovnaly relativním hodnotám 0,135 a 0,899. Hodnota minimální ortogonální kvality reprezentuje hraniční hodnotu mezi akceptovatelnou a špatně sestrojenou sítí, nicméně kvůli výše popsaným důvodům nebylo možné zvýšit její kvalitu při současném zachování daného celkového počtu elementů výpočetní sítě s postupným rozvojem velikosti směrem k hraničním konce výpočetní oblasti. Konečná síť obsahovala 9841428 geometrických elementů. Průměrná charakteristická délka velikosti elementů výpočetní sítě měla hodnotu $3,03 \cdot 10^{-4}$ m.



Obr. 101 Vygenerovaná výpočetní síť pro rozstřík kapaliny přes spirálovou trysku (A); graf kvality a počtu elementů v závislosti na relativních velikostech elementů výpočetní sítě (B)

4.3.2.2 Nastavení simulace

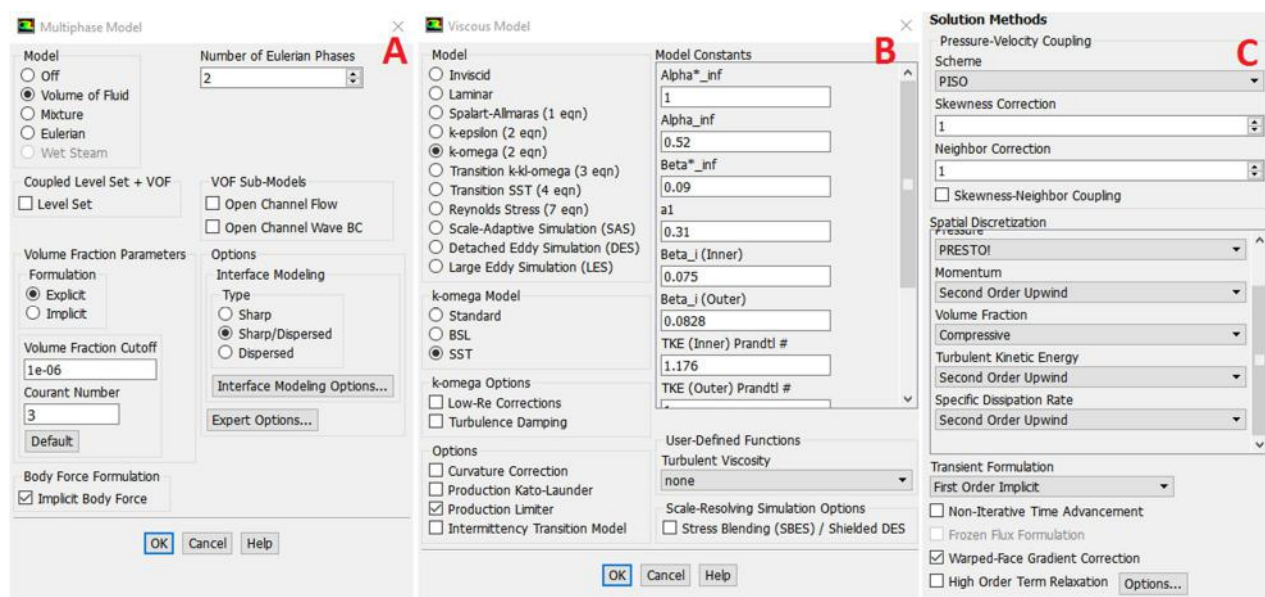
Pro dvoufázovou simulaci rozstříku kapaliny podél spirálovitého těla trysky posloužil hybridní Euler-Eulerův výpočetní model. Konkrétně byl aplikovaný VOF (Volume of Fluid) dvoufázový model, který se s úspěchem využívá při modelování dvou či více nemísitelných tekutin s jasně definovaným rozhraním. Výpočetní proces probíhá vyřešením jedné sady rovnic hybnosti a sledováním objemového podílu každé z tekutin v doméně. Typické aplikace zahrnují predikci vývoje a atomizace kapalných paprsků, což zahrnuje studovaný případ spirálové trysky. V modelu byla plynná fáze nastavena jako primární, kapalná fáze reprezentovala sekundární fázi. Součinitel povrchového napětí mezi fázemi byl nastaven na hodnotu $0,07275 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ (γ_{st}). Pro parametr objemového podílu bylo použito explicitní schéma, které lépe modeluje fázové rozhraní přechodu. Hodnota Courantova čísla byla nastavena na hodnotu 3 (Obr. 102, A).

SST k- ω (Shear-Stress transport) dvourovnicevý viskózní model byl použitý pro popis turbulence, jelikož kombinuje výhody standartního modelu k- ϵ a k- ω . Tento model tedy efektivně popisuje proudění v blízkosti stěn i ve volném prostoru a je proto spolehlivou volbou pro spirálovou trysku, kde vývoj kapalinové clony probíhá odrazem od ploch spirál (Obr. 102, B).

Vstupní okrajová podmínka (inlet) byla lokalizována před vstupem do trysky s ustalovací délkou rovné desetinásobku vstupního průměru trysky (Obr. 101, A). Na vstupu byl definován 100% objemový zlomek kapalné fáze a nastavena hodnotnota hmotnostního průtoku kapalné fáze. Na okrajích výpočetního prostoru byla definována výstupní podmínka typu pressure outlet, která umožňovala volné opuštění tekutin z výpočetní oblasti.

Simulační výpočet byl nastaven jako transientní typ úlohy s tlakově spojitým algoritmem. Metodou řešení pro tlakově-rychlostní propojení bylo nastaveno PISO schéma společně s interpolačními schématy druhého řádu pro většinu veličin a PRESTO! pro tlak (Obr. 102, C).

Inicializace úlohy byla nastavena standartním formátem se započítáním výpočtu normálově ve směru plochy (inlet) vstupující kapalné fáze. Zpočátku byla simulace nastavena v ustáleném stavu a po 200 výpočtových iterací přenastavena na transientní způsob se zachováním Courantova čísla na hodnotě 3. Časový krok výpočtu tak činil $2,49 \cdot 10^{-6}$ s. Výsledné hodnoty konvergence sledovaných veličin se pohybovaly pod hodnotou reziduálu $1 \cdot 10^{-5}$.

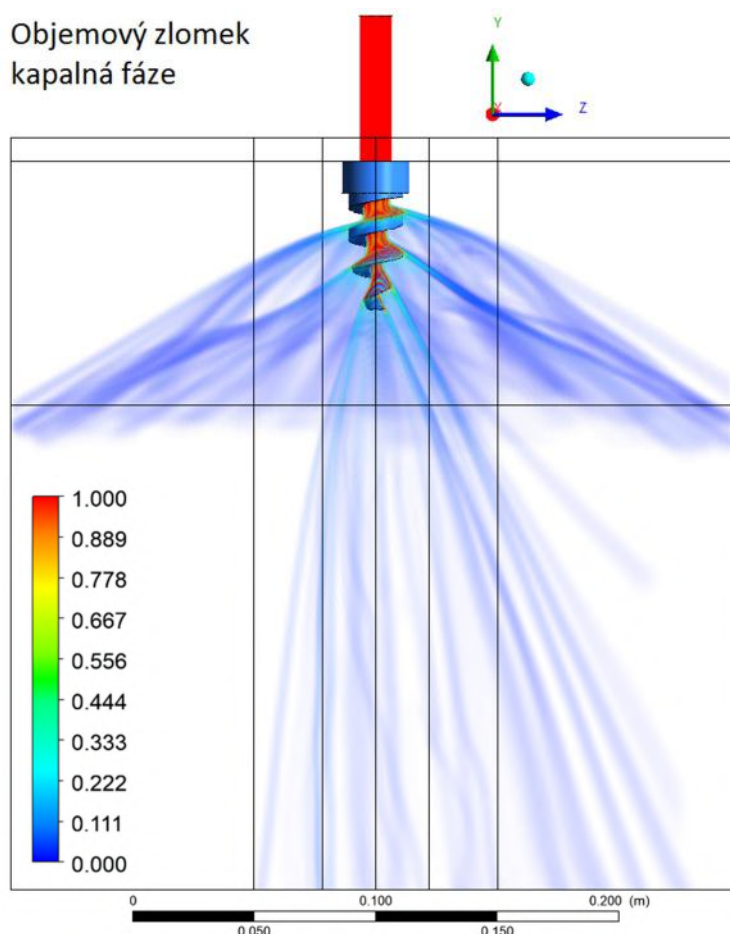


Obr. 102 Nastavení záložek v programu Ansys; záložka vícefázového modelu (A), záložka turbulentního modelu (B), záložka matematického způsobu řešení CFD simulací (C)

4.3.2.3 Vyhodnocení simulace a srovnání s experimentálními daty

Transientní dvoufázová simulace rozstřiku kapaliny byla nejprve provedena pro 2D prostor, aby se našlo a ověřilo korektní nastavení podmínek simulace pro distribuci kapaliny. Po pokusech a následných modifikacích jak výpočetní síť, tak nastavení dvoufázového modelu a modelu turbulence, byly obdrženy konečné hodnoty veličin charakterizující distribuci kapaliny ve 2D prostoru společně s výsledným optimálním výběrem parametrů nastavení. Simulace byla realizovaná v rovině XY.

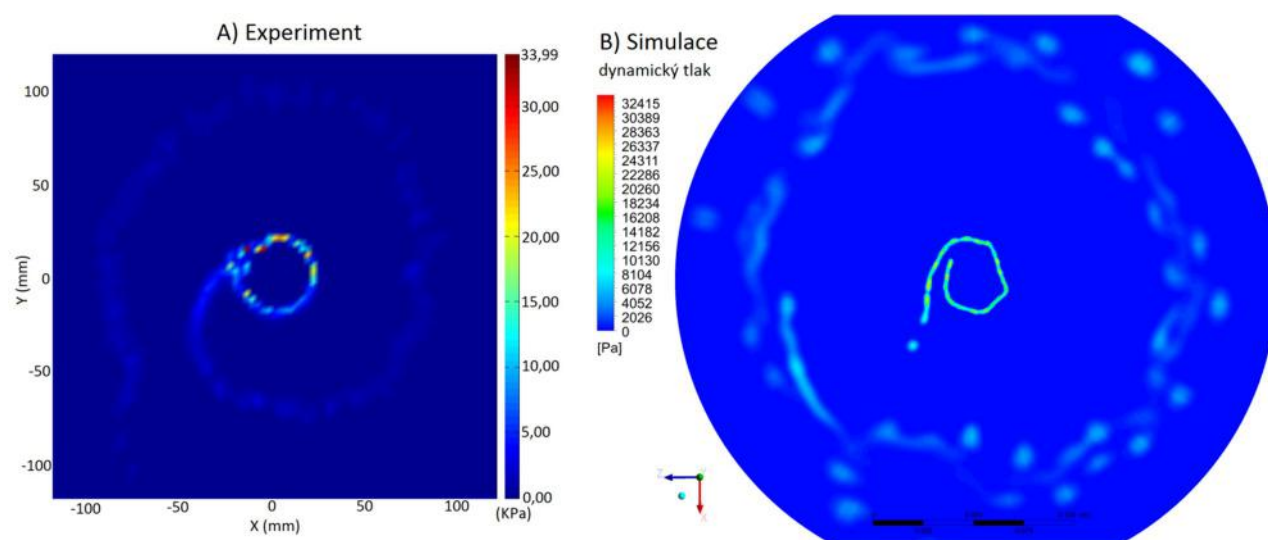
Následně bylo optimalizované nastavení použité pro simulaci rozstříku v kompletním 3D prostoru. Vizualizace konečné podoby paprsku je na Obr. 103. Z obrázku je patrné, že parsek vnějšího „svrchního“ a vnitřního „velkého“ paprsku se stýkají, což neodpovídá zcela skutečnosti. Vysvětlit si to lze omezeným výpočetním prostorem, kdy docházelo ke zpětnému toku tekutin do výpočetní oblasti a ovlivnění charakteru proudění vyvíjených kapalinových kuželů. Vliv na výslednou podobu má jistě i aplikace zjednodušení pro urychlení výpočetního procesu a hruběji definovaná výpočetní síť ve vzdálenějších oblastech od trysky, která se skládá z elementů s postupně rostoucími rozměry směrem k hranici výpočetní oblasti.



Obr. 103 Vzhled produkované kapalinové clony ve výpočetním prostoru reprezentovaný objemovým zlomkem kapalně fáze

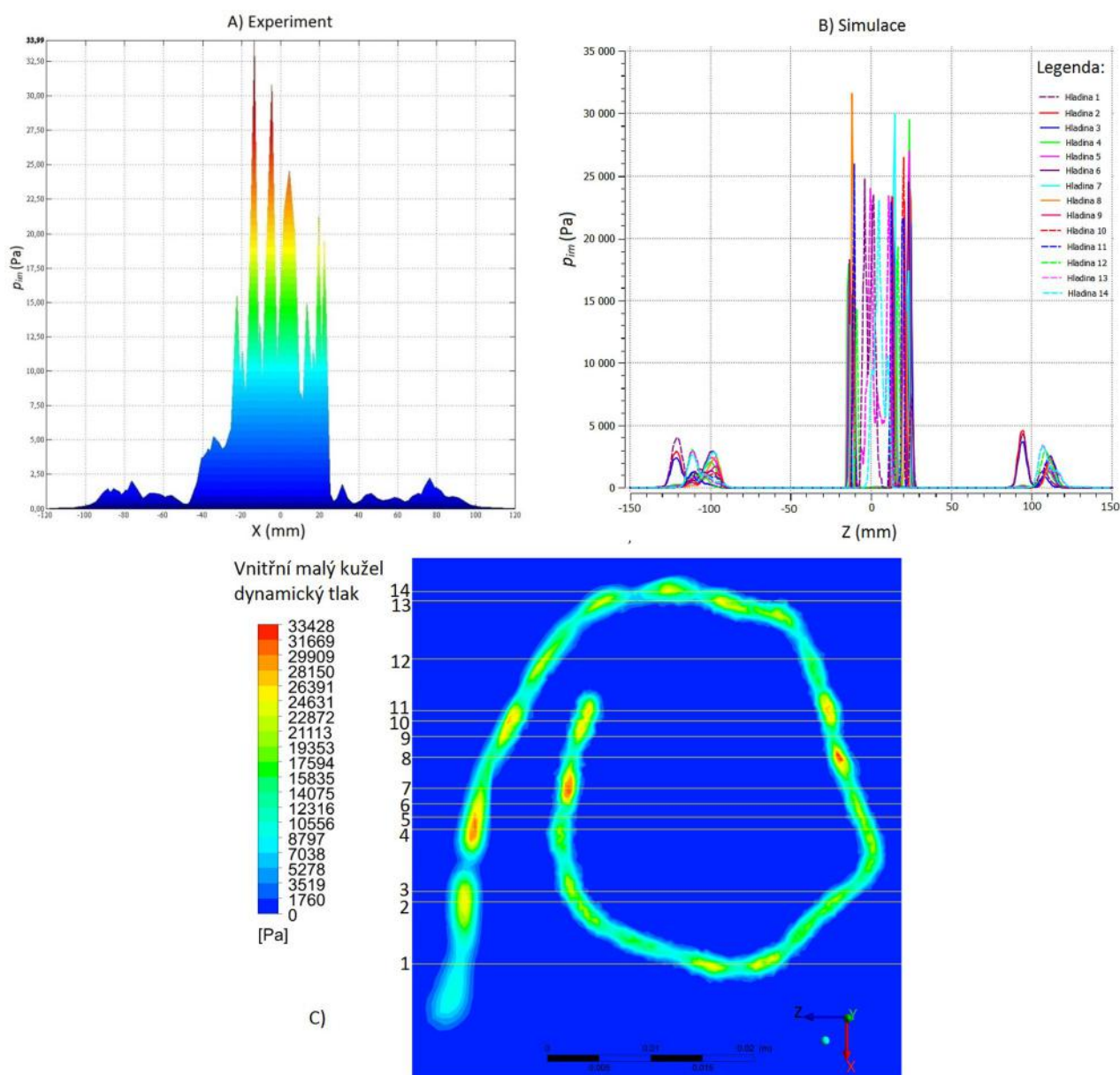
I přes výše popsání snahy o zjednodušení výpočtové úlohy byla časová náročnost výpočtových operací při dodržení požadovaného časového kroku markantní. Časový krok simulace musel být dodržen, aby splňoval už i tak naddimenzované Courantovo číslo s hodnotou 3 (ideální hodnota je 1) a konvergenci proměných v každém časovém kroku. Jen při splnění těchto podmínek bylo možné dosáhnout validních výsledků. Hardwarová náročnost na numerické výpočty tak byla za hranicí dostupného výpočetního výkonu 16 procesorového uzlu clusteru FSI, na kterém byly simulace realizovány. Proto konečný fyzický čas transientní úlohy vývoje kapalinové clony činil pouze 0,12 s. Rozhodnutí o ukončení výpočtu v uvedený fyzický čas simulace vyplynulo z pozorování vývoje maximálního dynamického tlaku na kontrolní hladině umístěné 70 mm od počátku ústí trysky, která se shodovala s hladinou 2 z intruzivního měření impaktu

(kapitola 4.2.2.2 Druhá sada měření). Po ustálení dynamického tlaku na střední hodnotě, kolem které tato veličina fluktovala, byla simulace ukončena a srovnána s experimentálním intruzivním měřením rozstříku kapaliny při 2 bar. Vizuální srovnání rozložení dynamických tlaků dopadových vzorů kapaliny, produkované především vnitřním „malým“ kuželem, je na Obr. 104. Ze srovnání vyplývá velmi podobný trend formování kapaliny v dané hladině mezi experimentem a numerickou simulací. V obou případech kapalinová clona vnitřního „malého“ kuželu vytváří dopadový vzor v podobě Archimédovi spirály. Z výsledků numerické simulace navíc velmi zřetelně. Naznačen je i přechod na dopadový vzor spirálovitého tvaru vnitřního „velkého“ kuželu, který však oproti experimentům již není homogenně rozložen, což vyplývá z tvaru produkované kapalinové clony na Obr. 103. Je třeba znovu upozornit, že orientace os v experimentální části a simulaci je rozdílná, jak je uvedeno v úvodu kapitoly o numerických simulacích.



Obr. 104 Srovnání rozložení dynamických tlaků (impaktů) kapalinové clony v hladině 2 mezi experimentem (A) a simulací (B)

Na Obr. 105 C je přibližná dopadová stopa vnitřního „malého“ kuželu. Z kontur záznamu výpočetních simulací lze lokalizovat místa s nejvyšší hodnotou dynamického dopadového tlaku. Těmito místy byly vedeny linie přes celý výpočetní prostor, které byly následně vyneseny do grafu (Obr. 105 B). Na každé linii bylo zaznamenáno 500 vzorkovacích míst. V grafu jsou vyznačeny průběhy zaznamenaných hodnot dynamického tlaku v závislosti na poloze v ose Z. Velké množství vzorkovacích linií sice komplikuje orientaci mezi jednotlivými křivkami grafu, nicméně záměrem bylo tímto postupem získat graf rozložení maxim, který by se následně dal porovnat s grafem sestaveným ze záznamu experimentálního měření (Obr. 105 A). Osa X z praktického měření a osa Z ze simulací se spolu shodují. Při srovnání dopadových tlaků si můžeme všimnout, že na okrajích os je dopadová síla v rámci simulace vyšší než naměřená, což je způsobeno nejspíše sjednocením vnějšího „svrchního“ a vnitřního „velkého“ paprsku. Rozložení maxim ve střední části, reprezentující vnitřní „malý“ kužel, má podobný trend, který směrem doprava má klesající charakter. Maximální dopadový tlak v případě intruzivního experimentálního měření má hodnotu 33,99 kPa, zatímco maximum dosažené z průměrovaných hodnot simulačního výpočtu dosahuje hodnoty 33,43 kPa. Porovnávané veličiny se liší pouze o 1,65 %. Obě maxima jsou navíc zaznamenaná v oblastech velmi blízkých, v pozicích mezi hodnoty -10 až -15 mm na ose X (Z).



Obr. 105 Dopadový vzor vnitřního „malého“ kuželu (C) a srovnání maximálních získaných impaktních tlaků mezi experimentem (A) a simulací (B)

V kapitole 4.2.3 Vizualizace kapalinové clony byl uskutečněn experiment, při kterém se na vnější stěnu spirál v axiální ose trysky uchytila přepážka ve tvaru písmene U. Během průtoku kapaliny tryskou a vývoji kapalinové clony tak došlo k otevření kapalinových kuželů, což umožňovalo alespoň částečný pohled na tvar okrajů jednotlivých kapalinových kuželů. Především bylo možné pozorovat vzhled vnitřního „malého“ kuželu (Obr. 106). Získaná fotografie mohla být vizuálně porovnána s výsledky simulací, které jsou prezentovány formou kontur příslušných veličin na Obr. 107 až Obr. 110. Například při porovnání experimentálně získané fotografie s konturami objemového zlomku kapalně fáze z výsledků simulací vyplývá, že dochází k velmi podobnému charakteru distribuce kapaliny v prostoru mezi spirálami i v blízkém okolí trysky. Axiální rychlost kapaliny šířící se do okolí (Obr. 108) nabývá pro vnitřní „malý“ kužel největších hodnot, a sice v průměru $15,52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v oblasti opouštějící trysku. Pro ostatní dva kužely nabývá podobných hodnot, v průměru $6,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Radiální rychlost kapaliny (Obr. 109) v bezprostředním

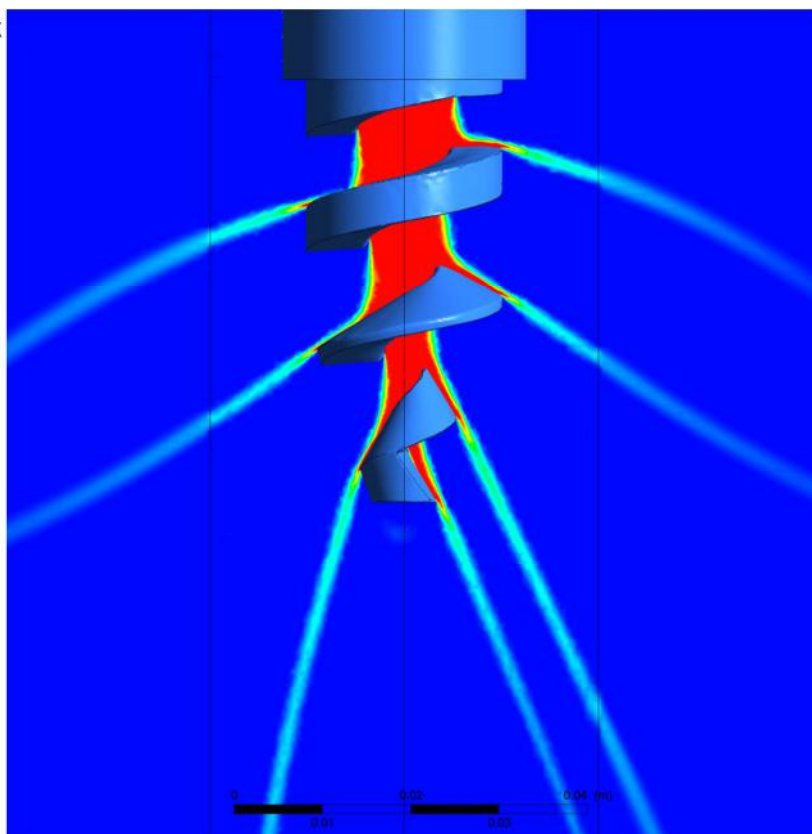
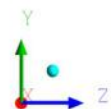
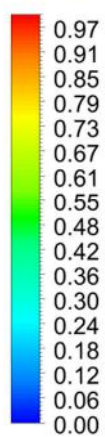
okolí po odrazu od ploch spirál je největší pro vnější „svrchní“ a vnitřní „velký“ kužel s průměrnou hodnotou $13,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro vnitřní „malý“ kužel se radiální rychlost pohybuje v rozmezí $6,63$ až $10,93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Průměrná celková rychlost kapaliny, vyvíjené do prostoru odrazem od ploch spirál, se pohybuje v hodnotě $12,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Obr. 110).

Mezi jednotlivými kužely kapalinové clony vznikají velmi silné víry zpětného proudění plynné fáze, které způsobují fluktuaci a lokální narušení celistvosti šířících se kapalinových proudů. Přítomnost zpětných proudů plynné fáze lokálně také ovlivňuje vývoj turbulentní kinetické viskozity a způsobuje vznik turbulentní kinetické energie na fázovém rozhraní s kapalinou, což v důsledku vede ke zvýšení potenciálu k přestupu hmoty mezi fázemi.



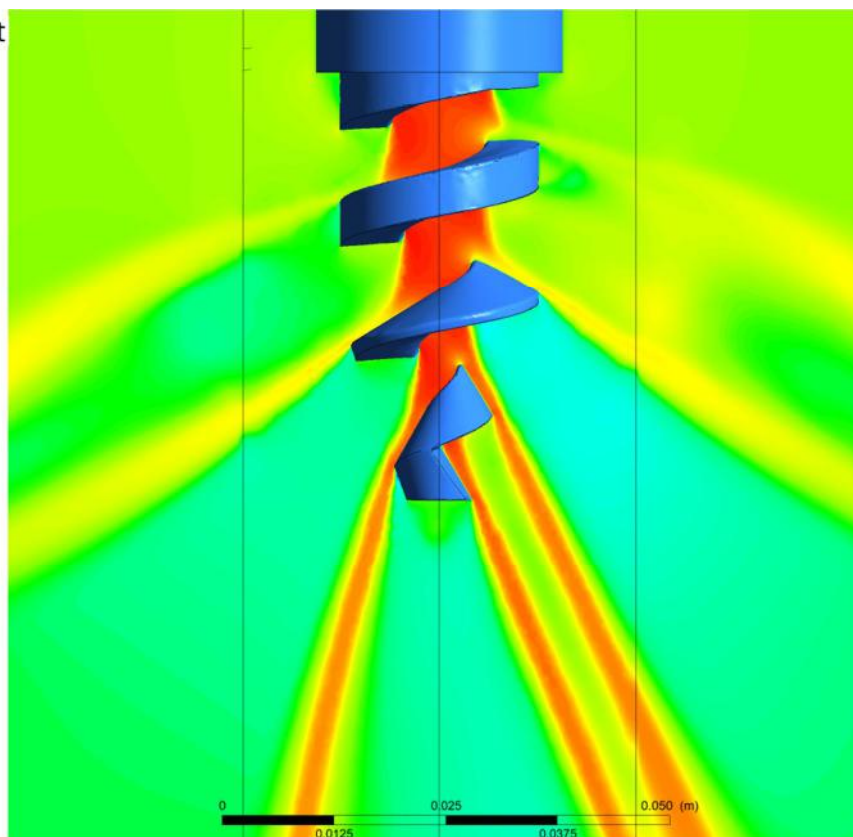
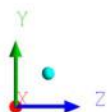
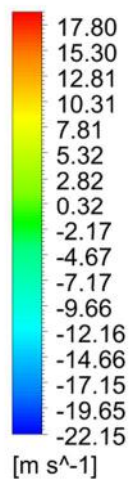
Obr. 106 Fotografie trysky s umístěným jazýčkem a aplikovaným filtrem pro snadnější rozeznání okrajů paprsků

Objemový zlomek
kapalná fáze

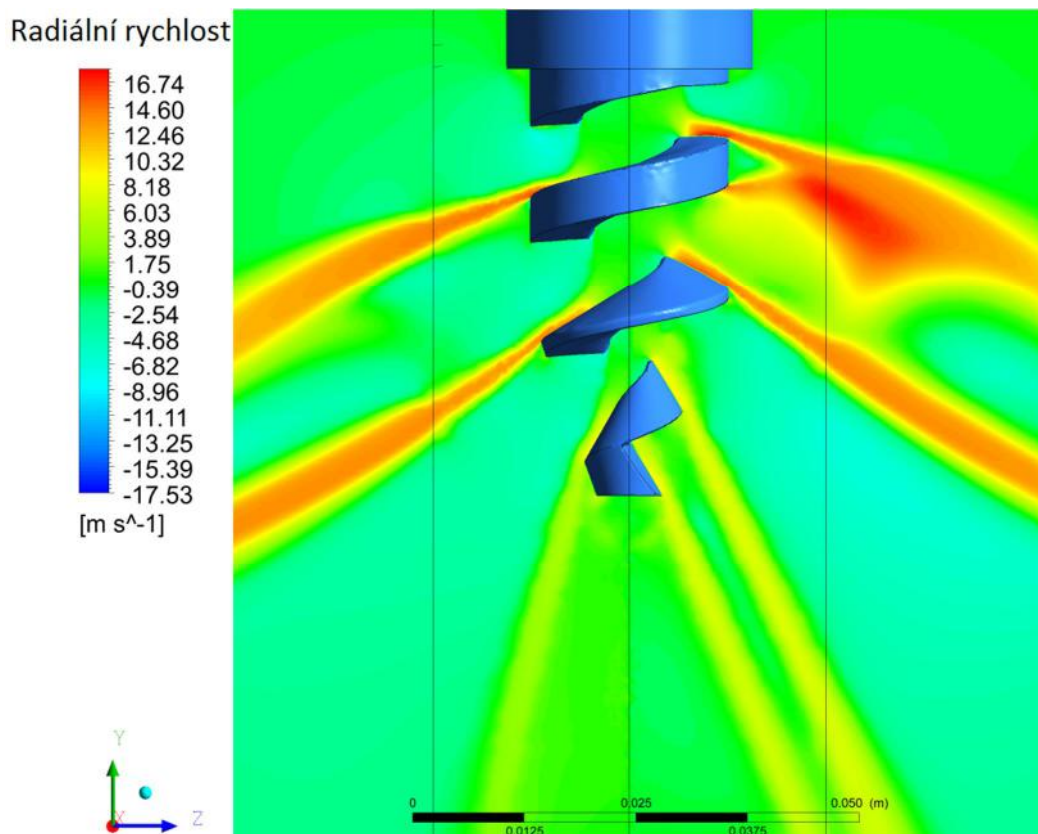


Obr. 107 Kontury objemového zlomku kapalně v blízkém okolí trysky v rovině YZ

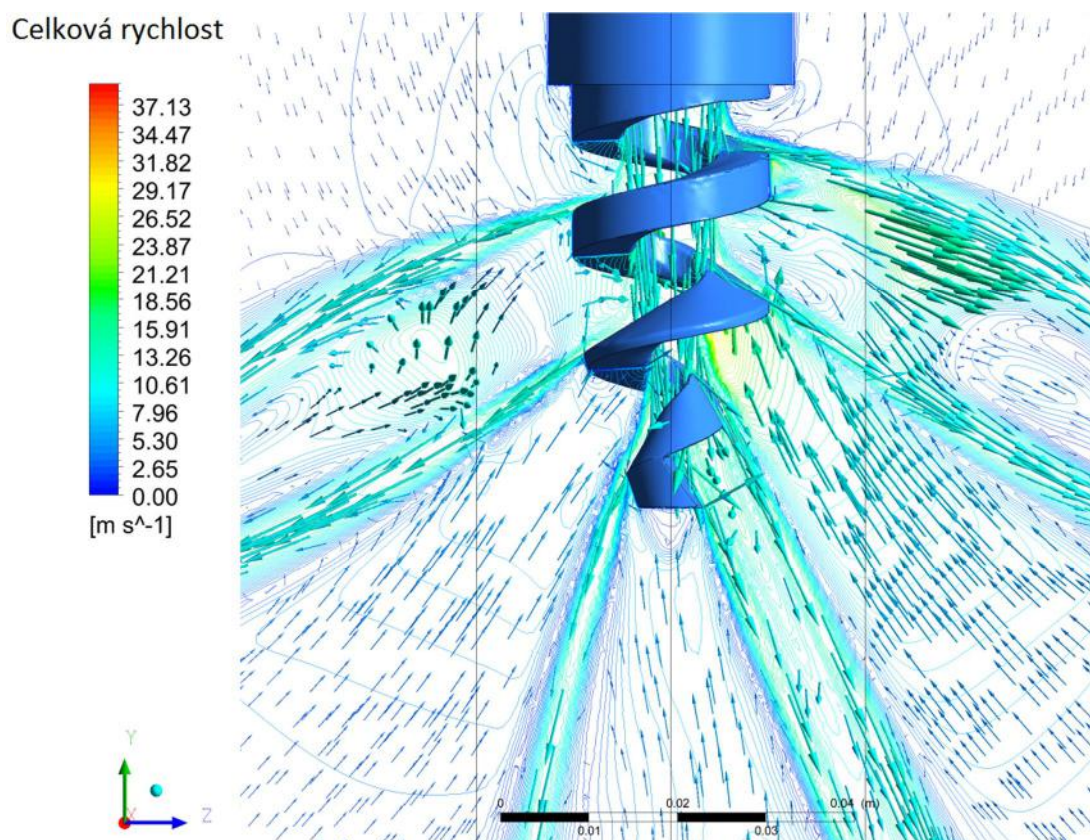
Axiální rychlost



Obr. 108 Kontury axiální rychlosti kapalně i plynné fáze v rovině YZ



Obr. 109 Kontury radiální rychlosti kapalné i plynné fáze v rovině YZ



Obr. 110 Kontury velikosti celkové rychlosti kapalné i plynné fáze v rovině YZ

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

Pro účinnost absorpčního procesu mají vliv v zásadě dva faktory, a sice provozní podmínky, za kterých je vzájemný kontakt obou fází realizován a konstrukce jednotlivých prvků ve vnitřním prostoru skrápěcí hlavy, která má vliv na hydrodynamiku proudění obou fází při daných podmínkách separace. Oba jmenované aspekty mají vliv na průběh účinnosti absorpčního procesu v různé míře.

Příznivý vliv, z pohledu provozních podmínek, na rychlost absorpce má výběr vhodných partnerů absorbent-absorbát pro nahrazení prosté fyzikální difúze chemisorpcí. Zajištění vhodného pH vypírky, při kterém se reagující složky nacházejí v požadované chemické formě a kdy dochází k jejich zpětné regeneraci. Absorpce polutantů ze znečištěných plynných směsí probíhá lépe při nižších teplotách, za sníženého parciálního tlaku rozpuštěné látky nad absorpční kapalinou. Důležitým parametrem, ovlivňujícím účinnost absorpce, je také doba vzájemného kontaktu obou médií, kterou lze v případě protiproudého uspořádání ovlivnit poměrem hmotnostních toků kapalně a plynné fáze, tzv. kapalino-plynné zatížení L/G (liquid-gas ratio). S rostoucím poměrem dochází k účinnější absorpci. Z ekonomického hlediska je třeba najít vhodný poměr, pro zachování optimálních tlakových ztrát, účinnosti a cenové relace separace. Od určitého bodu se již nevyplatí tento poměr zvyšovat, ale vyjde lépe využít např. trysku s produkcí jemnější kapalinové clony, použít systém skrápění složený z většího množství trysek, které efektivněji vyplní vnitřní prostor skrápěcí hlavy, nebo zvýšit výšku skrápěcí hlavy (a tím opět prodloužit dobu vzájemného kontaktu). Obecně by se dalo shrnout, že vyšší hmotnostní průtok kapalně fáze a nižší průtok plynné fáze má pozitivní efekt pro absorpci plynných polutantů, pro shodné střední průměry vznikajících kapek.

Sprchové scrubbery mohou být rozděleny do dvou základních typů, na základě přítomnosti přepážek ve vnitřním prostoru skrápěcí hlavy. V modifikaci bez přepážek (Open Spray tower) je vnitřní prostor skrápěcí hlavy volně průchodný a bez přítomnosti elementů ovlivňujících charakter proudění kapalně a plynné fáze a tím přispívající ke zvýšení kinetické i turbulentní energie pro zvýšení míry přestupu hmoty. Je tedy nutné použít trysku či skupinu trysek, které efektivně vyplňují vnitřní prostor a atomizují kapalinu do jemných velikostí s co největší styčnou mezifázovou plochou. Tedy čím menší kapalinové struktury a kapky vznikají, tím je absorpční efekt výraznější. V modifikaci sprchového scrubberu s perforovanými přepážkami je absorpční efekt zvyšován růstem vzájemných relativních rychlostí kapalně a plynné fáze v oblasti přepážek. Na přepážkách dochází k distribuci kapaliny do podoby tenkého filmu, který protéká jednotlivými perforacemi až do spodní části skrápěcí hlavy. V protiproudu se pohybuje znečištěná plynná fáze (při protiproudém uspořádání), která v okolí přepážek obtéká kapalnou fází. Část plynné fáze proudí prostorem směrem k hornímu výstupu ze skrápěcí hlavy a část je na základě několika typů mechanismů cirkulována. Vytváření těchto vírových struktur v oblasti přepážky (či mezi přepážkami, pokud jich je ve skrápěcí hlavě implementováno více) má pozitivní efekt pro přenos hmoty oproti konstrukcím bez přepážek.

Z výše uvedených aspektů vyplývá komplexnost absorpčních pochodů a problematika spojená s inženýrsko-chemickými procesy při návrhu a realizaci optimální soustavy pro účinnou separaci plynných polutantů. Vyšetřováním základních charakteristik atomizéru a distribucí kapalně a plynné fáze uvnitř skrápěcí hlavy má esenciální význam pro popis, definování a výběr režimů optimálních pracovních podmínek separace.

V průběhu realizace dizertační práce byla společně s firmou MVB Opava navržena, sestavena a otestována kompaktní poloprovozní jednotka pro absorpci plynných polutantů ze znečištěných plynných směsí. Nově vyvíjené zařízení, pracující na bázi sprchového scrubberu, využívalo k distribuci kapalné fáze spirálovou trysku TF-28 150 od firmy BETE. Použití trysky tohoto typu s markantním úhlem rozstřiku bylo výslovné přání spolupracující firmy. Požadavkem partnerské firmy bylo také studium charakteristik distribuce plynné i kapalné fáze ve vnitřním prostoru skrápěcí hlavy, s ohledem na účinnost absorpčního procesu při vypírce polutantů z modelových znečištěných plynů za různých provozních podmínek.

Ještě před samotnou realizací experimentálních prací a simulačních procesů, byl s firmou MVB Opava konzultován výběr konkrétního typu spirálové trysky pro atomizaci kapaliny ve skrápěcí hlavě daných rozměrů (75,5 cm). Na trhu existuje mnoho typů trysek produkující kompaktní kapalinové clony (full cone) o menších velikostech výsledných kapek, které by zajišťovaly zvýšení mezifázového styčného povrchu. Avšak žádná s takto širokým efektivním úhlem rozstřiku. Většina trysek produkuje maximální efektivní úhly rozstřiku kolem 120° , což se jeví při daném rozměru skrápěcí hlavy jako velmi málo, jelikož by nedocházelo k maximálnímu možnému vyplnění vnitřního prostoru absorpční kapalinou. Zmenšení průměru a současně zvětšení výšky skrápěcí hlavy, které by umožňovalo aplikaci jiných typů trysek, nepřipadalo v úvahu, jelikož si firma přála vyvinout zařízení o nízké světlé výšce, které by mohla instalovat v průmyslových provozech na výšku prostorově omezených. Navíc spirálová tryska je, díky své konstrukci, schopná nahradit soustavu klasických trysek a nedochází u ní k ucpávání vnitřního prostoru mechanickými nečistotami, které se v průmyslových provozech ve znečištěných směsí plynů nacházejí. Absorpční scrubber je pak pro pracovníky v provozu z tohoto pohledu bezúdržbový.

Při provozu produkuje asymetrická spirálová tryska kapalinovou clonu kopírující sestupný tvar prstenců spirál, na jejichž plochách dochází k odrazu původně celistvého kapalného toku uvnitř těla trysky a k šíření dále do prostoru. V blízkém horizontálním okolí od počátku ústí trysky (minimálně do vzdálenosti 140 mm) se vzory vyvíjených kapalinových clon formují do podoby Archimédových spirál, které se s rostoucí vzdáleností od trysky transformují v soustavu tří soustředných kuželů, neboť přechody mezi jednotlivými spirálami se ztratí v šumu malých dceřiných kapek, které vyplňují prostor mezi jednotlivými kapalinovými clonami. Na základě polohy mohou vytvářené kapalinové clony být označeny jako vnější „svrchní“ kužel, vnitřní „velký“ kužel a vnitřní „malý“ kužel.

Dopadové stopy jednotlivých kuželů byly vyšetřeny pomocí intruzivní metody měřící impaktní tlak v daných hladinách od ústí trysky. V první sadě měření dopadového tlaku se měření realizovalo při konstantním průtoku kapaliny přes trysku ($1,76 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ při vstupním tlaku 2 bar) a v různě vzdálených hladinách od počátku ústí trysky (60, 80, 100, 120 a 140 mm). Získané dopadové tlaky, kvůli problematické konstrukci tenzometrického snímače, jsou pouze orientační. Použité však byly dopadové vzory kapaliny v jednotlivých hladinách, a sice pro definici efektivních úhlů rozstřiků obou vnitřních kuželů. Po reprodukci parametrů Archimédových spirál, definujících hranice dopadových vzorů jednotlivých kuželů, byly spočítány efektivní úhly rozstřiku vnitřního „malého“ kuželu a vnitřního „velkého“ kuželu s hodnotami $61,74^\circ$ a $115,47^\circ$. Porovnáme-li spočítané efektivní úhly obou vnitřních kuželů z intruzivního měření impaktů s odečtenými efektivními úhly pomocí vizualizace kapalinové clony (hodnota pro „malý“ kužel se rovnala $58,01^\circ$ a pro „velký“ kužel se rovnala $111,12^\circ$), obdržíme hodnoty s rozdílem 6 % pro

„malý“ a 3,5 % pro „velký“ kužel, což lze vzhledem k povaze měření, tedy odečítání z dvourozměrné fotografie, tolerovat. Navíc se úhel rozstříku kapalinové clony obecně měří s tolerancí $\pm 5^\circ$.

Ve druhé sadě měření intruzivního vyšetření impaktního tlaku byl vylepšen systém snímání dopadových tlaků. Experimenty byly provedeny v konstantní horizontální rovině (70 mm od počátku ústí trysky) a měněn byl průtok kapalně fáze, který odpovídal vstupnímu tlaku na trysce v rozsahu 1 až 2 bar. Záznamy dopadových tlaků z druhé sady měření vykazovaly o dva řády vyšší maximální hodnoty, konkrétně od 24,7 do 33,9 kPa. Dopadové vzory a hodnoty impaktních měření (pro 2 bar) následně byly konfrontovány se získaným impaktním tlakem z numerických simulací rozstříku kapaliny přes spirálovou trysku. Maximální impaktní tlak zaznamenaný z intruzivního experimentálního měření činil 33,99 kPa. Maximální impaktní tlak obdrženy ze simulačního výpočtu rozstříku kapalně fáze měl hodnotu 33,43 kPa. Simulaci vývoje kapalinové clony přes spirálovou trysku tak lze považovat za zdařilou, jelikož zaznamenaná hodnota se liší pouze o 1,65 % oproti hodnotě získané experimentálně. Navíc, pokud srovnáme dopadový vzor obou vnitřních kapalinových clon, získáme velmi podobný trend formování kapaliny v ploše dané hladiny pro experiment i simulaci.

Vývoj kapalinové clony (pro vstupní tlak na trysce 1 bar) byl testován také pomocí neintruzivních optických metod pro vnější „svrchní“ kapalinovou clonu v transparentním modelu skrápěcí komory. Modifikovaná verze klasické fotografie byla využita pro posouzení morfologie generované kapalinové clony a vyhodnocení velikosti vznikajících kapek. Metoda LDA poskytla informace o radiálních a tangenciálních rychlostech kapalinové clony ve vzdálenosti 110 až 165 mm od axiální osy trysky.

Proces vzniku kapalinových clon u spirálové trysky lze považovat za analogický s radiálním rozptylem kapalinového proudu přes horizontální rovinu, na kterém jsou založeny trysky protipožární ochrany. Oblast primární atomizace, kde se kapalina po odrazu od ploch spirál šíří periodicky do prostoru, sahá do vzdálenosti zhruba 80 mm od axiálního středu trysky. V této oblasti Webrovo číslo kapalinového proudu dosahuje hodnoty 22000, což indikuje krátkou radiální rozpadovou vzdálenost s rapidně se ztenčující tloušťkou kapalinové clony, která byla spočítána na 2,47 mm na okraji odrazové plochy spirály a v oblasti přechodu na sekundární typ atomizace (vzdálenost 80 až 125 mm od axiální osy trysky) na hodnotu mezi 330 až 622 μm . V této oblasti vznikaly první ligamenty s velikostí $1,86 \pm 0,57$ mm s časem rozpadu 10,9 ms, která se postupně snižovala na hodnotu $0,75 \pm 0,19$ mm s časem rozpadu 2,8 ms. Čili stanovený průměr vznikajících ligamentů byl spočítán na hodnotu 0,70 mm. Následovala oblast sekundární atomizace, tedy proces dalšího postupného rozpadu ligamentů na kapky. Dle hodnoty bezrozměrného Weberova čísla pro plynnou fázi (hodnota 11) a pro dané velikosti výsledných kapek, lze hovořit spíše o kvazi-sekundárním rozpadu kapaliny či o přítomnosti deformačního či vibračního režimu rozpadu kapek, v rámci vývoje kapalinové clony uvnitř transparentního modelu skrápěcí komory. Soubor čítající 1773 průměrů jednotlivých kapek byl získán ze záznamu snímků oblastí sekundární (kvazi-sekundární) atomizace kapalinové clony. Z průměrů kapek byly vyhodnoceny histogramy početně, povrchově a hmotnostně/objemově vážené distribuce velikostí kapek. Distribuční histogramy byly testovány proložením normální, log-normální a Rosin-Rammler distribučními funkcemi a byla pozorována jejich korelace s naměřenými daty po stránce grafické i testováním metodou matematické statistiky založené na testu dle Kolmogorova-Smirnovova pro hladinu

významnosti 0,05. Log-normální distribuční funkce jako jediná hypotéza charakterizovala adekvátně všechny typy rozložení naměřených velikostí výsledných kapek. Průměrná velikost kapek, zjištěná experimentálně, byla vyhodnocena na hodnotu 0,815 mm. Sauterův střední průměr dle různých interpretací byl spočítán na hodnoty 1,201 mm, 1,205 mm a 1,281 mm.

Jak bylo uvedeno výše, metodou LDA byly zjištěny informace o velikosti tangenciální a radiální rychlosti kapaliny pro vnější „svrchní“ clonu v celkově osmi horizontálních řezech, kdy v každé horizontální rovině byly měřeny dvě na sebe kolmé osy, které byly zvoleny tak, aby zhruba uprostřed mezi hraniční body os se nacházela vnější „svrchní“ kapalinová clona. Bylo zjištěno, že příspěvek tangenciální složky rychlosti proudící kapalinové clony je minimální. Vektorovým součtem tangenciální a radiální složky rychlosti byla vyjádřena reprezentativní absolutní radiální rychlost kapaliny v daných měřených bodech kapalinové clony. Z naměřených hodnot absolutních radiálních rychlostí vyplývá nejvyšší radiální rychlost kapaliny rovna $8,264 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ve vzdálenosti 110 mm od axiální osy trysky v horizontální hladině rovnající se 40 mm. V této samé hladině naopak nejnižší rychlost vykazuje kapalina v oblasti 165 mm (nejvzdálenější v rámci měření) od axiálního středu trysky a to $7,221 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Na základě bezrozměrného Eulerova kritéria byly vyhodnoceny ztráty kinetické energie, přítomnostní vnitřního tření při průtoku kapaliny vnitřním prostorem trysky, a nastíněny optimální provozní podmínky pro tento typ trysky.

Dále byly v rámci práce uskutečněny simulace proudění plynné fáze vnitřním prostorem skrápěcí hlavy a simulace proudění kapaliny přes spirálovou trysku do volného prostoru statického vzduchu. Simulace proudění plynné fáze byly nastaveny pro tři hmotnostní průtoky plynu v tangenciálním vstupu do skrápěcí komory. Byla popsána distribuce proudění a složky rychlosti plynné fáze uvnitř skrápěcí komory pro jednotlivé případy i v horizontální rovině, ve které při chodu scrubberu je umístěná spirálová tryska. Numerická simulace byla srovnána s experimentálními daty na vstupu a výstupu ze skrápěcí komory. Výsledky distribuce proudění plynné fáze jsou pro případ B a C velmi podobné, liší se pouze intenzitou složek rychlostí. Pro případ A sledujeme rozdílné chování v proudění plynu, které souvisí s pracovním provozem na hranici minimálního pracovního rozsahu. Na základě výsledků proudění samotné vzdušiny vnitřním prostorem skrápěcí komory lze předpokládat, že největší potenciál pro přestup hmoty mezi kapalnou a plynnou fází v absorpčním pochodu budou mít případ B a hlavně C. V těchto režimech proudění dochází k lokálnímu zvýšení relativních rychlostí tekutin, především pak v blízkém okolí instalované přepážky v hlavní střední části skrápěcí komory a v okolí axiální osy skrápěcí komory, kde registrujeme vznik turbulentního víru s vysokými hodnotami tangenciální složky rychlosti. Vzniká tak předpoklad ke vzniku lokální turbulentní kinetické energie, která má pozitivní efekt pro účinnost absorpce. Nicméně na druhou stranu v režimech proudění pro případ B a C je celková rychlost kapalné fáze vysoká, což zapříčiní rychlý průchod znečištěné plynné fáze celým vnitřním objemem skrápěcí hlavy a sníží výsledný poměr kapalino-plynného zatížení, které může, z hlediska záporně ovlivněné zádržné doby kontaktu mezi jednotlivými fázemi, mít negativní efekt při konečné míře separace polutantů ze znečištěných plynných směsí. Je tedy určující, zda v daném systému při absorpčním procesu je řídicím mechanismem pomaleji probíhající prostá fyzikální difúze či se uplatňuje proces chemisorpce (různá rychlost v závislosti na hodnotě Hattova kritéria), což lze ovlivnit vhodným výběrem absorpčního roztoku pro separaci žádaného plynného polutantu. Z ověřené simulace proudění kapaliny přes spirálovou trysku byly získány hodnoty jednotlivých složek i celkové úletové rychlosti v okolí odrazových ploch

jednotlivých spirál, a sice při aplikovaném tlaku kapalně fáze na vstupu do trysky 2 bar a tomu odpovídajícímu objemovému průtoku $1,765 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Vzhled vyvíjených kapalinových clon byl v konečném výsledku lehce deformován přítomností zpětného proudění do výpočtové oblasti. V budoucnu by bylo potřeba tuto oblast dále rozšířit a eliminovat zjednodušující parametry nastavení, především turbulentních modelů, což jednoznačně vede k vysokým nárokům na výpočetní techniku. Jen v tomto případě lze pokročilou dvoufázovou LES simulací dosáhnout optimálních výsledků, které by byly schopny během vývoje kapalinové clony rozlišit jednotlivé fáze vývoje, od celistvé kapalinové clony rozpadající se postupně na menší ligamentové struktury až po jednotlivé kapky. Nicméně z vykonaných simulací a experimentálního vyšetření spirálové trysky lze na základě obdržených informací a hodnot sestavit dvoufázovou DPM (Discrete Phase Model) simulaci založenou na hybridní Euler-Lagrange metodě.

6 ZÁVĚR

V dizertační práci je analyzován stav současných znalostí z oblasti chemicko-inženýrských procesů separačních technologií. Především se práce věnuje absorpci plyných polutantů ze znečištěných plyných směsí s využitím poloprovodního skrápěcího zařízení zvaného scrubber a parametrům ovlivňující míru přestupu látek mezi fázemi. V návaznosti na absorpční pochody je řešena problematika dynamiky formování a následného rozpadu kapalinových clon a metody pozorování základních charakteristik atomizérů s využitím intruzivních i neintruzivní optických metod. Součástí teoretické části práce je také základní rozdělení přístupů numerické simulace pro modelování distribuce tekutin.

V experimentální části byly vykonány práce vedoucí k objasnění základních charakteristik spirálové trysky TF-28 150 za různých hydrodynamických podmínek, která se uplatňuje při distribuci absorpční kapaliny ve skrápěcí komoře absorpčního scrubberu. Vystupující proud kapaliny z trysky je teoreticky formován do jediné celistvé kapalinové clony se spirálovou průsečnicí roviny kolmé na osu trysky. Ve skutečnosti se však vystupující proud kapaliny formuje do tří částečně se prolínajících téměř koncentrických kapalinových kuželů. Úhel maximálního rozstříku je ve srovnání s klasickými tryskami markantní a dosahuje hodnoty okolo 150°. Za podmínek vstupního tlaku kapaliny 1 bar na trysce byly vyhodnoceny rozpadové režimy primární a sekundární atomizace s následným vyhodnocením distribuce kapek ve vnější kapalinové cloně. Sauterův průměr pro takto nastavené podmínky dosahoval průměrné hodnoty 1,23 mm. Z neintruzivního optického LDA měření byla zjištěna maximální úletová rychlost v kapalinové cloně v hodnotě 8,264 m·s⁻¹.

V kapitole 3.6 Atomizace kapaliny jsme se zabývali rozpadem proudu kapaliny v závislosti na rozvoji Weberova kritéria, které nám dávalo příležitost stanovit střední velikost kapek kapaliny – a tím také potom i střední velikost vznikající směnné plochy, na které probíhá přestup hmoty při absorpci. Poněvadž však Weberovo kritérium v sobě nese parametr vzájemné rychlosti kapaliny a čištěného plynu, je zřejmé, že tento parametr (jak plyne z námi proměřovaných absolutních rychlostí samostatné kapalně a plyné fáze) může nabývat hodnot superpozice vektorového součtu rychlostí těchto fází. Proto jsme se rozhodli postupovat cestou přímého stanovování rozměrů vznikajících kapek optickou cestou s vyhodnocováním pomocí programu Stream Motion, popsanou v kap. 4.2.4.1. Touto cestou jsme schopni dosazovat přímo směnnou plochu S do rovnic 3.1 až 3.6 a spočítat poté celkový koeficient prostupu hmoty, který můžeme porovnávat s reálnými naměřenými hodnotami absorpce plyných polutantů do příslušných roztoků kapalných absorbantů.

Možnost přímého výpočtu celkového koeficientu prostupu hmoty z parciálních koeficientů přestupu hmoty na straně kapalně a plyné fáze, za použití Sherwoodova a Schmidtova kritéria a příslušných difúzivit (viz rovnice 3.13 a 3.20), je v současném stavu výpočetních možností stanovení lokálních aktuálních a sumárních hodnot Reynoldsova kritéria cesta neschůdná. Reálná současná cesta výpočtu kinetiky procesu chemisorpce v režimech obvykle používané rychlé reakce, je definování směnné plochy reakce pomocí výše uvedeného optického způsobu a doplnění výpočtu pomocí experimentálně stanoveného koeficientu celkového prostupu hmoty, platného pro dané zařízení a danou kombinaci absorbent-absorbát.

Součástí práce byla také numerická simulace proudění plyné fáze uvnitř skrápěcí komory absorpčního scrubberu, bez přítomnosti rozstříkující kapalně fáze. Simulace poskytla informace o

distribuci proudění, intenzitě jednotlivých složek rychlosti a oblastech lokálních vírů a tím identifikovala potenciál pro přestup hmoty mezi fázemi pro různé režimy. Numerická simulace proudění kapaliny přes spirálovou trysku definovala úletové rychlosti kapaliny na odrazových plochách pro případ aplikovaného tlaku kapalně fáze 2 bar na vstupu do trysky.

Soubor získaných empirických i numerických poznatků a výsledků se v budoucnu uplatní při realizaci dvoufázových numerických simulací založených na hybridní Euler-Lagrange metodě.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOHL, Arthur L. a Richard NIELSEN. *Gas purification*. 5th ed. Houston, Tex.: Gulf Pub., c1997. ISBN 0-88415-220-0.
- [2] LEUNG, Dennis Y. C., Giorgio CARAMANNA a M. Mercedes MAROTO-VALER. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **39**, 426–443. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.07.093
- [3] SONG, Chunfeng, Yutaka KITAMURA a Shuhong LI. Energy analysis of the cryogenic CO₂ capture process based on Stirling coolers. *Energy* [online]. 2014, **65**, 580–589. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2013.10.087
- [4] SREENIVASULU, B., D. V. GAYATRI, I. SREEDHAR a K. V. RAGHAVAN. A journey into the process and engineering aspects of carbon capture technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **41**, 1324–1350. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.09.029
- [5] YONG, Z., V. MATA a A. RODRIGUES. Adsorption of carbon dioxide at high temperature—a review. *Separation and Purification Technology* [online]. 2002, **26**(2–3), 195–205. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/S1383-5866(01)00165-4
- [6] DOJČANSKÝ, Ján a Jaroslav LONGAUER. *Chemické inžinierstvo II: difúzne procesy, prestup látky, absorpcia, adsorpcia, destilácia a rektifikácia, extrakcia, úprava vzduchu a chladenie vody, sušenie, kryštalizácia, membránové procesy*. 1. vyd. Bratislava: Malé Centrum, 2000. ISBN 80-967064-8-9.
- [7] RAMM, Vitalij Maksimovič a Adolf BALADA. *Absorpční pochody v chemickém průmyslu*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [8] PEDERSEN, T. Oxygen absorption into moving water and tenside solutions. *Water Research* [online]. 2018, **34**(9), 2569–2581. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1354(99)00417-0
- [9] TOOR, H. L. a J. M. MARCHELLO. Film-penetration model for mass and heat transfer. *AIChE Journal* [online]. 1958, **4**(1), 97–101. ISSN 0001-1541. Dostupné z: doi:10.1002/aic.690040118
- [10] KRIŠTOF, Ondřej. *Použití scrubberů při čištění vzduchu* [online]. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta chemická. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=50611
- [11] KOSSACZKY, Elemir. *Chemické inžinierstvo*. Bratislava: Státní nakladatelství technickej literatúri Paraha, 1983.
- [12] SVĚŘÁK, T. a J. RICHTER. *Chemické inženýrství II*. B.m.: skripta FCH VUT v Brně. v tisku
- [13] MILLS, Anthony F. *Mass Transfer*. 1 edition. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2001. ISBN 978-0-13-032829-8.
- [14] AL, Henry Z. Kister [et. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0-07-154221-0.
- [15] NEUŽIL, Lubomír a Vladimír MÍKA. *Chemické inženýrství I*. Vyd. 2., upr. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1998. ISBN 80-7080-312-6.
- [16] MEYERS, Robert A. *Encyclopedia of physical science and technology*. 3rd ed. San Diego: Academic Press, c2002. ISBN 0-12-227410-5.
- [17] HOFFMAN, Pavel. *Náplňový absorbér: Patrový absorbér* [online]. B.m.: CVUT, 2018. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/pavel.hoffman/PREDMETY/ZSVZ/zsvz.htm>
- [18] BETE. Gas Scrubbing:the spray nozzle people [online]. 2018 [vid. 2018-07-06]. Dostupné z: <http://www.bete.co.uk/spray-nozzle-applications/gas-scrubbing>
- [19] DEVIANTART. *Venturiho scrubber* [online]. 2015 [vid. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://oouah.deviantart.com/art/Venturi-Scrubber-307266786>

- [20] CORBITT, Robert A. *Standard handbook of environmental engineering*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c1999. ISBN 0-07-013160-0.
- [21] GAMISANS, X., M. SARRÀ a F. J. LAFUENTE. The Role of the Liquid Film on the Mass Transfer in Venturi-Based Scrubbers. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2004, **82**(3), 372–380. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1205/026387604322870480
- [22] LEFEBVRE, Arthur H. a Vincent G. MCDONELL. *Atomization and Sprays*. nedatováno. Second edition. ISBN 978-1-4987-3626-8.
- [23] FRASER, R.P. a P. EISENKLAM. Research into the performance of atomizers for liquids. In: *Imp. Coll. Chem. Eng. Soc. J.* 7. 1953, s. 52–68.
- [24] CLARK, Mark M. Drop breakup in a turbulent flow—I. Conceptual and modeling considerations. *Chemical Engineering Science* [online]. 1988, **43**(3), 671–679. ISSN 0009-2509. Dostupné z: doi:10.1016/0009-2509(88)87025-8
- [25] THARAKAN, T. John, K. RAMAMURTHI a M. BALAKRISHNAN. Nonlinear breakup of thin liquid sheets. *Acta Mechanica* [online]. 2002, **156**(1), 29–46. ISSN 1619-6937. Dostupné z: doi:10.1007/BF01188740
- [26] AHMED, M., N. ASHGRIZ a H. N. TRAN. Break-Up Length and Spreading Angle of Liquid Sheets Formed by Splash Plate Nozzles. *Journal of Fluids Engineering* [online]. 2009, **131**(1) [vid. 2019-10-02]. ISSN 0098-2202. Dostupné z: doi:10.1115/1.3026729
- [27] SENECA, P. K, D. P SCHMIDT, I NOUAR, C. J RUTLAND, R. D REITZ a M. L CORRADINI. Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 1999, **25**(6), 1073–1097. ISSN 0301-9322. Dostupné z: doi:10.1016/S0301-9322(99)00057-9
- [28] EL-SAYED, M. F. Three-dimensional electrohydrodynamic temporal instability of a moving dielectric liquid sheet emanated into a gas medium. *The European Physical Journal E* [online]. 2004, **15**(4), 443–455. ISSN 1292-895X. Dostupné z: doi:10.1140/epje/i2004-10076-2
- [29] MITRA, Sushanta K. a Xianguo LI. A PREDICTIVE MODEL FOR DROPLET SIZE DISTRIBUTION IN SPRAYS. *Atomization and Sprays* [online]. 1999, **9**(1), 29–50. ISSN 1044-5110, 1936-2684. Dostupné z: doi:10.1615/AtomizSpr.v9.i1.20
- [30] KIM, Woo Tae, Sushanta K. MITRA, Xianguo LI, L. A. PROCIW a T. C. J. HU. A Predictive Model for the Initial Droplet Size and Velocity Distributions in Sprays and Comparison with Experiments. *Particle & Particle Systems Characterization* [online]. 2003, **20**(2), 135–149. ISSN 1521-4117. Dostupné z: doi:10.1002/ppsc.200390011
- [31] PREUSSER, H. *Drop Size Distribution from the Breakup of Liquid Ligaments*. Canada, 1997. Diplomová práce. Queen's University at Kingston.
- [32] DAVANLOU, Ashkan, Joshua D. LEE, Saptarshi BASU a Ranganathan KUMAR. Effect of viscosity and surface tension on breakup and coalescence of bicomponent sprays. *Chemical Engineering Science* [online]. 2015, **131**, 243–255. ISSN 0009-2509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2015.03.057
- [33] SAHA, Abhishek, Joshua D. LEE, Saptarshi BASU a Ranganathan KUMAR. Breakup and coalescence characteristics of a hollow cone swirling spray. *Physics of Fluids* [online]. 2012, **24**(12), 124103. ISSN 1070-6631. Dostupné z: doi:10.1063/1.4773065
- [34] AYRES, D, M CALDAS, V SEMIÃO a M DA GRAÇA CARVALHO. Prediction of the droplet size and velocity joint distribution for sprays. *Fuel* [online]. 2001, **80**(3), 383–394. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/S0016-2361(00)00094-6
- [35] BELHADEF, A., A. VALLET, M. AMIELH a F. ANSELMET. Pressure-swirl atomization: Modeling and experimental approaches. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2012, **39**, 13–20. ISSN 0301-9322. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.09.009

- [36] ALEKSEENKO, S. V., S. P. AKTERSHEV, A. V. CHERDANTSEV, S. M. KHARLAMOV a D. M. MARKOVICH. Primary instabilities of liquid film flow sheared by turbulent gas stream. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2009, **35**(7), 617–627. ISSN 0301-9322. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.03.003
- [37] IBRAHIM, A. A. a M. A. JOG. Nonlinear instability of an annular liquid sheet exposed to gas flow. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2008, **34**(7), 647–664. ISSN 0301-9322. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.12.003
- [38] WAHONO, Stevano, Damon HONNERY, Julio SORIA a Jamil GHOJEL. High-speed visualisation of primary break-up of an annular liquid sheet. *Experiments in Fluids* [online]. 2008, **44**(3), 451–459. ISSN 1432-1114. Dostupné z: doi:10.1007/s00348-007-0361-8
- [39] NEGEED, R. *Spray Cooling Heat Exchangers*. B.m., 2004. Ph.D. Thesis. Cairo University, Faculty of Engineering, Mechanical Power Engineering.
- [40] LIU, N.-L. a X. ZHANG. Distribution of droplet diameters and the spline of their empirical equation for spiral nozzle. *Shiyan Liuti Lixue – Journal of Experiments in Fluid Mechanics*. 2006, **20**(3), 8–12.
- [41] WĄSIK, Wiktor, Agata WALCZAK a Tomasz WĘSIERSKI. The impact of fog nozzle type on the distribution of mass spray density. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018, **247**, 00058. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201824700058
- [42] LIU, N a X ZHANG. Experimental research on spray and flow rate characteristics of spiral nozzle. 2006, **37**, 79–82.
- [43] ZHOU, H, W GUO, Y ZHU a W MA. Flow Distribution Characteristics of Low-pressure High-flux Spiral Nozzles. *Dongli Gongcheng Xuebao/Journal of Chinese Society of Power Engineering*. 2017, **37**, 577–583.
- [44] JAIN, M., B. JOHN, K.N. IYER a S.V. PRABHU. Characterization of the full cone pressure swirl spray nozzles for the nuclear reactor containment spray system. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2014, **273**, 131–142. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2014.02.025
- [45] ZACARÍAS, A., M. VENEGAS, A. LECUONA, R. VENTAS a I. CARVAJAL. Experimental assessment of vapour adiabatic absorption into solution droplets using a full cone nozzle. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2015, **68**, 228–238. Dostupné z: doi:10.1016/j.expthermflusci.2015.05.001
- [46] VALENCIA-BEJARANO, M. a T.A.G. LANGRISH. Experimental investigation of droplet coalescence in a full-cone spray from a two-fluid nozzle using laser diffraction measurements. *Atomization and Sprays* [online]. 2004, **14**(4), 355–374. Dostupné z: doi:10.1615/AtomizSpr.v14.i4.30
- [47] TSENG, A.A., H. BELLEROVÁ, M. POHANKA a M. RAUDENSKY. Effects of titania nanoparticles on heat transfer performance of spray cooling with full cone nozzle. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2014, **62**(1), 20–27. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.07.023
- [48] SADA, E., K. TAKAHASHI, K. MORIKAWA a S. ITO. Drop size distribution for spray by full cone nozzle. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* [online]. 1978, **56**(4), 455–459. Dostupné z: doi:10.1002/cjce.5450560404
- [49] NAZ, M.Y., S.A. SULAIMAN, B. ARIWAHOEDI a K. ZILATI. Visual characterization of heated water spray jet breakup induced by full cone spray nozzles. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics* [online]. 2015, **56**(2), 211–219. Dostupné z: doi:10.1134/S0021894415020066
- [50] NAZ, M.Y., S.A. SULAIMAN, B. ARIWAHOEDI a K.Z. KU SHAARI. Investigation of vortex clouds and droplet sizes in heated water spray patterns generated by axisymmetric

- full cone nozzles. *The Scientific World Journal* [online]. 2013, **2013**. Dostupné z: doi:10.1155/2013/796081
- [51] KOHNEN, B.T., D. PIELOTH, E. MUSEMIC a P. WALZEL. Characterization of full cone nozzles. *Atomization and Sprays* [online]. 2011, **21**(4), 317–325. Dostupné z: doi:10.1615/AtomizSpr.2011003262
- [52] JIANG, P., Q. WANG, I. SABARIMAN a E. SPECHT. Experimental study on heat transfer of pressurized spray cooling on the heated plate by using 45° full cone nozzles. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2014, **535**, 32–36. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.535.32
- [53] BELLEROVÁ, H., A.A. TSENG, M. POHANKA a M. RAUDENSKY. Heat transfer of spray cooling using alumina/water nanofluids with full cone nozzles. *Heat and Mass Transfer* [online]. 2012, **48**(11), 1971–1983. Dostupné z: doi:10.1007/s00231-012-1037-3
- [54] JAŠÍKOVÁ, Darina, Michal KOTEK, Tadeáš LENC a Václav KOPECKÝ. The study of full cone spray using interferometric particle imaging method. *EPJ Web of Conferences* [online]. 2012, **25**, 01033. ISSN 2100-014X. Dostupné z: doi:10.1051/epjconf/20122501033
- [55] WU, Di, Delphine GUILLEMIN a André W. MARSHALL. A modeling basis for predicting the initial sprinkler spray. *Fire Safety Journal* [online]. 2007, **42**(4), 283–294. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2006.11.007
- [56] SCHICK, Rudolf J. *Spray Technology Reference Guide: Understanding Drop Size* [online]. B.m.: Spraying System CO. 2006. Dostupné z: https://www.spray.com/literature_pdfs/B459C_Understanding_Drop_Size.pdf
- [57] RAHMAN, Mohammad A, Ted HEIDRICK a Brian A FLECK. Correlations between the two-phase gas/liquid spray atomization and the Stokes/aerodynamic Weber numbers. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2009, **147**, 012057. ISSN 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/147/1/012057
- [58] GULDENBECHER, D. R., C. LÓPEZ-RIVERA a P. E. SOJKA. Droplet Deformation and Breakup. In: Nasser ASHGRIZ, ed. *Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications* [online]. Boston, MA: Springer US, 2011 [vid. 2019-05-23], s. 145–156. ISBN 978-1-4419-7264-4. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7264-4_6
- [59] LINNE, Mark A., Megan PACIARONI, Edouard BERROCAL a David SEDÁRSKY. Ballistic imaging of liquid breakup processes in dense sprays. *Proceedings of the Combustion Institute* [online]. 2009, **32**(2), 2147–2161. ISSN 1540-7489. Dostupné z: doi:10.1016/j.proci.2008.07.040
- [60] DELEVAN. *Industrial nozzles and accessories, Specifiers Guide* [online]. B.m.: DELEVAN. 20. březen 2019. Dostupné z: <https://www.spraytechnologies.co.nz/wp-content/uploads/2017/05/Total-Control-Catalogue.compressed.pdf>
- [61] NONNENMACHER, S. a M. PIESCHE. Design of hollow cone pressure swirl nozzles to atomize Newtonian fluids. *Chemical Engineering Science* [online]. 2000, **55**(19), 4339–4348. ISSN 0009-2509. Dostupné z: doi:10.1016/S0009-2509(00)00043-9
- [62] MING CHENG, Xiao, Yuji MATSUMAE, Bunsaku HASHIMOTO, Satoshi KAGE, Kakuji OHSUMI a Kiyoshi HORII. Flow in Spiral Nozzle for Rope-installation in Petrochemical Pipeline Repairs. *Journal of The Japan Petroleum Institute* [online]. 1992, **35**, 382–389. Dostupné z: doi:10.1627/jpi1958.35.382
- [63] ASHGRIZ, Nasser, ed. *Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications*. B.m.: Springer US, 2011. ISBN 978-1-4419-7263-7.
- [64] BAYVEL, L. P a Z ORZECOWSKI. *Liquid atomization*. B.m.: Washington, DC : Taylor & Francis, 1993. ISBN 978-0-203-74878-7.
- [65] LIU, Huimin. *Science and Engineering of Droplets: Fundamentals and Applications*. B.m.: William Andrew, 1999. ISBN 978-0-8155-1894-5.

- [66] ASHGRIZ, N., X. LI a A. SARCHAMI. Instability of Liquid Sheets. In: Nasser ASHGRIZ, ed. *Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications* [online]. Boston, MA: Springer US, 2011 [vid. 2019-05-23], s. 75–95. ISBN 978-1-4419-7264-4. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7264-4_3
- [67] TAYLOR, Geoffrey Ingram. The dynamics of thin sheets of fluid. III. Disintegration of fluid sheets. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* [online]. 1959, **253**(1274), 313–321. Dostupné z: [doi:10.1098/rspa.1959.0196](https://doi.org/10.1098/rspa.1959.0196)
- [68] PILCH, M. a C. A. ERDMAN. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 1987, **13**(6), 741–757. ISSN 0301-9322. Dostupné z: [doi:10.1016/0301-9322\(87\)90063-2](https://doi.org/10.1016/0301-9322(87)90063-2)
- [69] FAETH, G. M, L. -P HSIANG a P. -K WU. Structure and breakup properties of sprays. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 1995, **21**, Annual Reviews in Multiphase Flow 1995, 99–127. ISSN 0301-9322. Dostupné z: [doi:10.1016/0301-9322\(95\)00059-7](https://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00059-7)
- [70] GULDENBECHER, D. R., C. LÓPEZ-RIVERA a P. E. SOJKA. Secondary atomization. *Experiments in Fluids* [online]. 2009, **46**(3), 371. ISSN 1432-1114. Dostupné z: [doi:10.1007/s00348-008-0593-2](https://doi.org/10.1007/s00348-008-0593-2)
- [71] LUO, Kun, Changxiao SHAO, Min CHAI a Jianren FAN. Level set method for atomization and evaporation simulations. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2019, **73**, 65–94. ISSN 0360-1285. Dostupné z: [doi:10.1016/j.pecs.2019.03.001](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.03.001)
- [72] GELFAND, B. E. Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 1996, **22**(3), 201–265. ISSN 0360-1285. Dostupné z: [doi:10.1016/S0360-1285\(96\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(96)00005-6)
- [73] WATSON, E. J. The radial spread of a liquid jet over a horizontal plane. *Journal of Fluid Mechanics* [online]. 1964, **20**(3), 481–499. ISSN 1469-7645, 0022-1120. Dostupné z: [doi:10.1017/S0022112064001367](https://doi.org/10.1017/S0022112064001367)
- [74] REN, N., A. BLUM, Y. ZHENG, C. DO a A. MARSHALL. Quantifying the Initial Spray from Fire Sprinklers. *Fire Safety Science*. 2008, **9**, 503–514.
- [75] ZHOU, Xiangyang a Hong-Zeng YU. Experimental investigation of spray formation as affected by sprinkler geometry. *Fire Safety Journal* [online]. 2011, **46**(3), 140–150. ISSN 0379-7112. Dostupné z: [doi:10.1016/j.firesaf.2011.01.003](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.01.003)
- [76] DOMBROWSKI, N. a W. R. JOHNS. The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets. *Chemical Engineering Science* [online]. 1963, **18**(3), 203–214. ISSN 0009-2509. Dostupné z: [doi:10.1016/0009-2509\(63\)85005-8](https://doi.org/10.1016/0009-2509(63)85005-8)
- [77] WEBER, Constantin. The break-up of liquid jets (Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles). *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik* [online]. 1931, **11**(2), 136–154. ISSN 1521-4001. Dostupné z: [doi:10.1002/zamm.19310110207](https://doi.org/10.1002/zamm.19310110207)
- [78] DOMBROWSKI, N. a P. C. HOOPER. The effect of ambient density on drop formation in sprays. *Chemical Engineering Science* [online]. 1962, **17**(4), 291–305. ISSN 0009-2509. Dostupné z: [doi:10.1016/0009-2509\(62\)85008-8](https://doi.org/10.1016/0009-2509(62)85008-8)
- [79] LINNE, Mark. Imaging in the optically dense regions of a spray: A review of developing techniques. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2013, **39**(5), 403–440. ISSN 0360-1285. Dostupné z: [doi:10.1016/j.pecs.2013.06.001](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.06.001)
- [80] PNR-NOZZLES. *Spray engineering handbook* [online]. [vid. 2019-02-07]. Dostupné z: <http://www.pnr.eu/wp-content/uploads/2017/05/CTG-SH07-EU-ENGINEERING-BOOK.pdf>

- [81] *Nozzle for industry, pollution control and fire protection* [online]. B.m.: Bete Fog Nozzle, Inc. 8. září 2017. Dostupné z: <https://docplayer.net/20922009-Nozzles-for-industry-pollution-control-and-fire-protection.html>
- [82] *Spray Nozzles, Global Product Guide* [online]. B.m.: DELAVAN, Spray Technologies. 9. září 2017. Dostupné z: <https://www.spraytechnologies.co.nz/wp-content/uploads/2017/05/Delavan-Global-Product-Guide.pdf>
- [83] LECHLER. *Spray Character* [online]. 9. září 2017. Dostupné z: <https://www.lechler.com/de-en/technology/basics-nozzle-technology/spray-character/>
- [84] COGHE, A. a G. E. COSSALI. Quantitative optical techniques for dense sprays investigation: A survey. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2012, **50**(1), Advances in Flow Visualization, 46–56. ISSN 0143-8166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2011.07.017
- [85] D FANSLER, Todd a Scott E PARRISH. Spray measurement technology: A review. *Measurement Science and Technology* [online]. 2015, **26**. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/26/1/012002
- [86] LIU, Xiaofei, William DOUB a Changning GUO. Evaluation of droplet velocity and size from nasal spray devices using phase Doppler anemometry (PDA). *International journal of pharmaceutics* [online]. 2010, **388**, 82–7. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpharm.2009.12.041
- [87] MOON, S, W ZHANG, K NISHIDA, Y MATSUMOTO a J GAO. Development and Evaporation of Group-Hole Nozzle Sprays under Various Surrounding and Impinging Conditions of Direct-Injection Diesel Engines. *International Journal of Engine Research* [online]. 2011, **12**(1), 41–57. ISSN 1468-0874. Dostupné z: doi:10.1177/14680874JER565
- [88] MALÍK, Michal a Jiří PRIMAS. *Anemometrické metody*. B.m.: Technická univerzita v Liberci. 2011
- [89] FISCHER, M, Johannes HEINZE, K MATTHIAS a Ingo RÖHLE. Doppler Global Velocimetry in flames using a newly developed, frequency stabilized, tunable, Long pulse, Nd: YAG Laser. In: . 2000.
- [90] DEPPE, J, S WISSEL, Christoph PAULS a G GRÜNEFELD. GASEOUS AND LIQUID PHASE VELOCITY MEASUREMENTS IN DENSE SPRAYS BY MEANS OF LASER FLOW TAGGING. 2006.
- [91] PALERO, Virginia R. a Yuji IKEDA. Droplet-size-classified stereoscopic PIV for spray characterization. *Measurement Science and Technology* [online]. 2002, **13**(7), 1050–1057. ISSN 0957-0233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/13/7/312
- [92] DANTEC DYNAMICS A/S. *Measurement Principles of PIV* [online]. 3. únor 2019. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>
- [93] KOPECKÝ, Václav. *Laserová anemometrie v mechanice tekutin*. B.m.: Tribun EU, 2008. ISBN 978-80-7399-357-3.
- [94] DANTEC DYNAMICS A/S. *Measurement Principles of LDA* [online]. 3. únor 2019. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-lda>
- [95] O'ROURKE, P. J. a A. A. AMSDEN. A Spray/Wall Interaction Submodel for the KIVA-3 Wall Film Model. *SAE Transactions*. 2000, **109**, 281–298. ISSN 0096-736X.
- [96] BAI, Chengxin a A. D. GOSMAN. Development of Methodology for Spray Impingement Simulation. *SAE Transactions*. 1995, **104**, 550–568. ISSN 0096-736X.
- [97] HAN, Z., Z. XU a N. TRIGUI. Spray/wall interaction models for multidimensional engine simulation. *International Journal of Engine Research* [online]. 2000, **1**(1), 127–146. Dostupné z: doi:10.1243/1468087001545308
- [98] STANTON, Donald W. a Christopher J. RUTLAND. Modeling Fuel Film Formation and Wall Interaction in Diesel Engines. In: *International Congress & Exposition* [online]. 1996, s. 960628 [vid. 2019-08-13]. Dostupné z: doi:10.4271/960628

- [99] LEE, Seong Hyuk, Gwon Hyun KO, Hong Sun RYOU a Ki Bae HONG. Development and application of a new spray impingement model considering film formation in a diesel engine. *KSME International Journal* [online]. 2001, **15**(7), 951–961. ISSN 1738-494X. Dostupné z: doi:10.1007/BF03185273
- [100] SILK, N. J. The practical aspects of hydraulic de-scaling. *Steel Times International; Redhill*. 2001, **25**(7), 38-41,44. ISSN 01437798.
- [101] BOVAT, Paul M. *Computational Analysis of Water Atomization in Spray Desuperheaters of Steam Boilers*. Hartford, Connecticut, 2013. Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute.
- [102] TRATNIG, Andreas a Günter BRENN. Drop size spectra in sprays from pressure-swirl atomizers [online]. 2010. ISSN 03019322. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.01.008
- [103] CROWE, Clayton T., John D. SCHWARZKOPF, Martin SOMMERFELD a Yutaka TSUJI. *Multiphase Flows with Droplets and Particles, Second Edition*. B.m.: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4398-4050-4.
- [104] PŘÍHODA, J. a P. LOUDA. *Matematické modelování turbulentního proudění*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03623-5.
- [105] ŠOB, F. *Hydromechanika /*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-3578-0.
- [106] URUBA, V. *Turbulence*. Praha: Česká technika- nakladatelství ČVUT, 2014. Učební texty vysokých škol, 2. přepracované vydání. ISBN 978-80-01-05600-4.
- [107] BLEJCHAR, T. *Turbulence-Modelování proudění - CFX*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-248-2606-6.
- [108] IRANNEJAD, Abolfazl a Farhad JABERI. Large eddy simulation of turbulent spray breakup and evaporation. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2014, **61**, 108–128. ISSN 0301-9322. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.01.004
- [109] SHINJO, J. a A. UMEMURA. Simulation of liquid jet primary breakup: Dynamics of ligament and droplet formation. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2010, **36**(7), 513–532. ISSN 0301-9322. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.03.008
- [110] GAO, Xiang, Wang HUO, Zhong-yang LUO a Ke-fa CEN. CFD simulation with enhancement factor of sulfur dioxide absorption in the spray scrubber. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* [online]. 2008, **9**(11), 1601–1613. ISSN 1862-1775. Dostupné z: doi:10.1631/jzus.A0820507
- [111] CHEN, Wei-Hsin. Air pollutant absorption by single moving droplets with drag force at moderate Reynolds numbers. *Chemical Engineering Science* [online]. 2006, **61**(2), 449–458. ISSN 0009-2509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2005.07.016
- [112] KAVOSHI, Leila, Amir RAHIMI a Mohammad Sadegh HATAMIPOUR. CFD modeling and experimental study of carbon dioxide removal in a lab-scale spray dryer. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2015, **98**, 157–167. ISSN 0263-8762. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2015.04.023
- [113] ALI, Majid, Changqi YAN, Zhongning SUN, Jianjun WANG a Haifeng GU. CFD simulation of dust particle removal efficiency of a venturi scrubber in CFX. In: [online]. 2013. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2012.12.013
- [114] WANG, S. J., P. ZHU, G. ZHANG, Q. ZHANG, Z. Y. WANG a L. ZHAO. Numerical simulation research of flow field in ammonia-based wet flue gas desulfurization tower. *Journal of the Energy Institute* [online]. 2015, **88**(3), 284–291. ISSN 1743-9671. Dostupné z: doi:10.1016/j.joei.2014.09.002
- [115] LAMPA, A. a U. FRITSCHING. Large Eddy Simulation of the spray formation in confinements. *International Journal of Heat and Fluid Flow* [online]. 2013, **43**, 26–34. ISSN ISSN 0142-727X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.04.014

- [116] LAMPA, Aljoscha a Udo FRITSCHING. SPRAY STRUCTURE ANALYSIS IN ATOMIZATION PROCESSES IN ENCLOSURES FOR POWDER PRODUCTION. *Atomization and Sprays* [online]. 2011, **21**(9). ISSN 1044-5110, 1936-2684. Dostupné z: doi:10.1615/AtomizSpr.2012003760
- [117] LAMPA, A. a U. FRITCHING. LES spray process simulation for analysis of droplet clustering in twin-fluid atomization. In: *13th Workshop on Two-Phase Flow Predictions*. 2012.
- [118] HEINLEIN, Jens a Udo FRITSCHING. Droplet clustering in sprays. *Experiments in Fluids* [online]. 2006, **40**(3), 464–472. ISSN 1432-1114. Dostupné z: doi:10.1007/s00348-005-0087-4
- [119] EATON, J. K. a J. R. FESSLER. Preferential concentration of particles by turbulence. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 1994, **20**, 169–209. ISSN 0301-9322. Dostupné z: doi:10.1016/0301-9322(94)90072-8
- [120] KALIVODA, J., K. MAYEROVÁ, O. KRIŠTOF, T. SVĚRÁK a M. ŽŮREK. *Komplexní snížení plynných polutantů „malých“ producentů emisí*. B.m.: VUT, FSI. 2019
- [121] *TF Nozzles* [online]. 2019 [vid. 2019-01-10]. Dostupné z: <https://www.bete.com/products/tf>
- [122] BETE FOG NOZZLE. *BETE_TF_fullcone-metric* [online]. 2019 [vid. 2019-01-19]. Dostupné z: https://www.bete.com/PDFs/BETE_TF_fullcone-metric.pdf
- [123] LI, Z, S WANG a X WANG. Spray characteristics of spiral nozzles used in wet flue gas desulfurization system. *Dongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*. 2008, **38**, 493–495.
- [124] ZHANG, D, Z LI, W YI a F WANG. Test study of spray characteristics of spiral nozzle in the spray tower. *Taiyangneng Xuebao/Acta Energiae Solaris Sinica*. 2013, **34**, 1969–1972.
- [125] HUN KIM, Tae, Shigeru MATSUO, Toshiaki SETOGUCHI a Shen YU. A Study on Flow Characteristics in a Spiral Flow Nozzle. *International Journal of Turbo Jet Engines* [online]. 2006, **23**, 129–136. Dostupné z: doi:10.1515/TJJ.2006.23.2.129
- [126] DONG, H, H MA, D LI a G SUN. Comparative study on scrubbing desulfurization performances of spiral nozzle and Dynawave nozzle. 2006, **36**, 32–35.
- [127] LI, C, S WANG, Z ZHONG, X ZHANG a L KANG. Research on spray surfaces geometry model of spiral nozzles with involute atomization. 2007, **38**, 75-78+106.
- [128] CONG, Haifeng, Xingang LI, Zhijie LI, Hong LI a Xin GAO. Combination of spiral nozzle and column tray leading to a new direction on the distillation equipment innovation. *Separation and Purification Technology* [online]. 2016, **158**, 293–301. ISSN 1383-5866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2015.12.034
- [129] TANNER, G. a K.F. KNASIAK. Spray Characterization of Typical Fire Suppression Nozzles. In: *In Proceedings of the Third International Water Mist Conference*. 2003, s. 1–16.
- [130] JIANG, L., R. WU, H. ZHAO, P. MEI, Q. ZHANG, J. ZHU, J. XIAO a B. LEI. Middle or low water pressure direct spiral double helix converging nozzle structure optimization and flow field analysis. *High Technology letters 21* [online]. 2015, 261–268. Dostupné z: doi:10.3772/j.issn.1006-6748.2015.03.003
- [131] KALATA, W, K J BROWN a R J SCHICK. Air Assisted Atomization in Spiral Type Nozzles. In: *25th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System*. 2013, s. 8.
- [132] REN, Z., Y. HAO a B. WANG. Experimental Analysis on Spiral Pressure Nozzle and Spray Angle Control in the Spray Dryer. In: *2011 International Conference on Internet Computing and Information Services: 2011 International Conference on Internet Computing and Information Services* [online]. 2011, s. 163–165. Dostupné z: doi:10.1109/ICICIS.2011.47

- [133] HAN, H., P. WANG, R. LIU, Y. LI, J. WANG a Y. JIANG. Experimental study on atomization characteristics of two common spiral channel pressure nozzles. *E3S Web Conf.* [online]. 2019. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198101022>
- [134] MATSUO, Shigeru, Tae-Hun KIM, Toshiaki SETOBUCHI, Heuy Dong KIM a Yeon-Won LEE. Effect of nozzle geometry on the flow characteristics of spiral flow generated through an annular slit. *Journal of Thermal Science* [online]. 2007, **16**(2), 149–154. ISSN 1993-033X. Dostupné z: doi:[10.1007/s11630-007-0149-4](https://doi.org/10.1007/s11630-007-0149-4)
- [135] HUANG, J. C. P. The break-up of axisymmetric liquid sheets. *Journal of Fluid Mechanics* [online]. 1970, **43**(2), 305–319. ISSN 1469-7645, 0022-1120. Dostupné z: doi:[10.1017/S0022112070002392](https://doi.org/10.1017/S0022112070002392)
- [136] VEGAD, Chetankumar S., Satyanarayanan R. CHAKRAVARTHY a Amit KUMAR. Dynamics of a radially expanding circular liquid sheet and its atomization characteristics. *Fire Safety Journal* [online]. 2018, **100**, 51–63. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:[10.1016/j.firesaf.2018.07.004](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.07.004)
- [137] JORDAN, Stephen J., Noah L. RYDER, Juraj REPCIK a Andre W. MARSHALL. Spatially-resolved spray measurements and their implications. *Fire Safety Journal* [online]. 2017, **91**, Fire Safety Science: Proceedings of the 12th International Symposium, 723–729. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:[10.1016/j.firesaf.2017.03.007](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.007)
- [138] MYERS, Taylor, Arnaud TROUVÉ a Andre MARSHALL. Predicting sprinkler spray dispersion in FireFOAM. *Fire Safety Journal* [online]. 2018, **100**, 93–102. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:[10.1016/j.firesaf.2018.07.008](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.07.008)
- [139] DAI, Z. a G. M. FAETH. Temporal properties of secondary drop breakup in the multimode breakup regime. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2001, **27**(2), 217–236. ISSN 0301-9322. Dostupné z: doi:[10.1016/S0301-9322\(00\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(00)00015-X)
- [140] KRZECZKOWSKI, Stefan A. Measurement of liquid droplet disintegration mechanisms. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 1980, **6**(3), 227–239. ISSN 0301-9322. Dostupné z: doi:[10.1016/0301-9322\(80\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0301-9322(80)90013-0)
- [141] CAO, Xian-Kui, Zhi-Gang SUN, Wei-Feng LI, Hai-Feng LIU a Zun-Hong YU. A new breakup regime of liquid drops identified in a continuous and uniform air jet flow. *Physics of Fluids* [online]. 2007, **19**(5), 057103. ISSN 1070-6631, 1089-7666. Dostupné z: doi:[10.1063/1.2723154](https://doi.org/10.1063/1.2723154)
- [142] PABST, W. a E. GREGOROVÁ. *Charakterizace částic a částicových soustav*. B.m.: VŠCHT Praha
- [143] PAVLÍK, Jiří. *Aplikovaná statistika*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-569-2.
- [144] ZENDER, Charlie. *Particle Size Distribution: Theory and Application to Aerosols, Clouds, and Soils*. Irvine, 2015. University of California, Department of Earth System Science.
- [145] *ANSYS Help Viewer, version 18.1.0*. B.m.: ANSYS

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	parametr spirály	(–)
A_0	plocha stopy trysky	(mm ²)
a_{sp}	specifický mezifázový povrch	(m ² ·m ⁻³)
B	proměnná v obecné rovnici středních průměrů velikosti kapek	(–)
B	skutečná šířka stopy kapalinové clony	(mm)
BI	Ballistic Imaging	(–)
c	proměnná v obecné rovnici středních průměrů velikosti kapek	(–)
CAD	Computer aided design, počítačem podporované kreslení	(–)
C_{Ag}	molární koncentrace transportované složky A v jádru plynné fáze	(mol·dm ⁻³)
C_{Al}	molární koncentrace transportované složky A v kapalné fázi	(mol·dm ⁻³)
C_d	výtokový součinitel	(–)
CFD	Computational Fluid Dynamics	(–)
D	charakteristická velikost kapalinové struktury	(m)
d_L	průměr kapalinového ligamentu	(m)
d_o	průměr ústí trysky	(m)
D	průměr kapky	(m), (mm)
D_{20}, D_{21}	povrchově střední průměry kapek	(mm)
D_{32}	Sauterův střední průměr kapky	(mm)
D_A	difúzní koeficient	(m ² ·s ⁻¹)
D_{Al}	difúzní koeficient složky A v kapalné fázi	(m ² ·s ⁻¹)
D_{Ag}	difúzní koeficient složky A v plynné fázi	(m ² ·s ⁻¹)
DGV	Doppler Global Velocimetry	(–)
D_i	střední průměr rozsahu	(mm)
D_m	modus velikosti kapek v číselné distribuci	(mm)
D_{me}	medián velikosti kapek v číselné distribuci	(mm)
DNS	přímá numerická simulace	(–)
D_p	průměrná velikost kapek v číselné distribuci	(mm)
DPM	Discrete Phase Model	(–)
Eu	Eulerovo číslo	(–)
$f(x)$	rozdělení četností	(–)
$F(x)$	kumulativní distribuční funkce	(–)
FSI	Fakulta strojního inženýrství	(–)
GIV	Gaseous Image Velocimetry	(–)
H	vzdálenost od ústí trysky	(mm)
h	entalpie	(J·kg ⁻¹)
H_a	Hattovo kritérium	(–)
H_A	Henryho konstanta	(Pa·m ³ ·mol ⁻¹)
K	rovnoměrná rychlost vyvíjející kapalinové clony	(m·s ⁻¹)
K_C	souhrnný koeficient prostupu látky A mezi fázemi	(mol·m ⁻² ·s ⁻¹)
k_c	koeficient přestupu látky ve fázi	(kg·m ⁻² ·s ⁻¹)
k_{gP}	koeficient přestupu látky A v plynné fázi	(mol·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹)

k_{lc}	koeficient přestupu látky A v kapalně fázi	$(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
K_n	průtokový parametr o hodnotě 75,2	$(\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{bar}^{-0,5})$
K^n	konstanta	(–)
K_p	souhrnný koeficient prostupu látky A mezi fázemi	$(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
LAS	Laser Absorption and Scattering	(–)
LDA	Laser Doppler Anemometry	(–)
LDV	Laser Doppler Velocimetry	(–)
LES	Simulace pohybu velkých vírů	(–)
LFT	Laser Flow Tagging	(–)
LIF	Laser Induced Fluorescence	(–)
M_A	molární hmotnost složky A ve fázi	$(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$
M_B	molární hmotnost složky B ve fázi	$(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$
M_g	střední molární hmotnost plynné směsi	$(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$
N_i	počet kapek v daném rozsahu průměrů	(–)
N	celkový počet kapek v souboru měření	(–)
$\dot{n}_A$	tok látkového množství látky A	$(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1})$
Oh	Ohnesorgeho číslo	(–)
Oh_{sh}	Ohnesorgeho číslo definované tloušťkou kapalinové clony	(–)
P	celkový tlak plynné směsi	(Pa)
p	statický tlak	(Pa)
P_{Ag}	parciální tlak transportované složky A v jádru plynné fáze	(Pa)
P_{Al}	parciální tlak transportované složky A v plynné fázi, kterému v kapalně fázi odpovídá koncentrace složky C_{Al}	(Pa)
PDA	Phase Doppler Anemometry	(–)
PDI	Phase Doppler Interferometry	(–)
PDS	Planar Drop Sizing	(–)
p_{im}	nárazový (impaktní) tlak kapaliny	(kPa), (Pa)
$p_{im,max}$	maximální nárazový (impaktní) tlak kapaliny	(kPa)
PISO	Pressure-Implicit with Splitting of Operators	(–)
PIV	Particle Image Velocimetry	(–)
p_k	kritická hodnota	(–)
PLIF	Planar Laser Induced Fluorescence	(–)
p_n	tlak kapaliny na vstupu do trysky	(bar)
P_r	relativní tlak plynné fáze/vzduchu	(Pa)
P_{rd}	relativní tlak plynné fáze/vzduchu před demistorem	(Pa)
PRESTO!	Pressure Staggering Option	(–)
P_{ri}	relativní tlak plynné fáze/vzduchu na vstupu	(Pa)
P_{ro}	relativní tlak plynné fáze/vzduchu na výstupu	(Pa)
PTFE	polytetrafluorethylen	(–)
PTV	Particle Tracking Velocimetry	(–)
PVC-glas	neměkčený polyvinylchlorid	(–)
q_j	tepelný tok	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
QLS	Quantitative Laser Sheet Visualisation	(–)

r	rychlost reakce vztažená k jednotkovému objemu reakční směsi	$(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$
RANS	metody středovaných Navier-Stokesových rovnic	(–)
r_h	šířka spirály	(mm)
r_r	radiální vzdálenost od osy trysky	(mm)
Re	Reynoldsovo kritérium	(–)
Re_o	Reynoldsovo kritérium v ústí trysky	(–)
RSM	Reynolds stress model	(–)
S	difúzní plocha	(m^2)
Sc	Schmidtovo kritérium	(–)
Sh	Sherwoodovo kritérium	(–)
SLIPI	Structured Laser Illumination Planar Imaging	(–)
S_x	posunutý střed spirály v ose X	(–)
S_y	posunutý střed spirály v ose Y	(–)
T	teplota	(K)
t_k	kontaktní doba kapalné a plynné fáze	(s)
t_{sh}	tloušťka kapalinové clony	(mm)
t_{sh0}	tloušťce ideální neviskózní kapalinové clony	(mm)
U	normálová rychlost ke stěně/podložce	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
u_i, u_j, u_k	vektor rychlosti	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
V	difúzní objem	(m^3)
v_A	molární objem složky A ve fázi	$(\text{dm}^3 \cdot \text{kmol})$
v_{AR}	průměrná radiální rychlost kapaliny	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
v_B	molární objem složky B ve fázi	$(\text{dm}^3 \cdot \text{kmol})$
V_n	objemový průtok kapaliny přes trysku	$(\text{l} \cdot \text{min}^{-1}, \text{l} \cdot \text{s}^{-1})$
VOF	Volume of Fluid	(–)
V_p	hmotnostní průtok plynné fáze/vzduchu na vstupu	$(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$
v_R	radiální rychlost kapaliny	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
v_T	tangenciální rychlost kapaliny	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
W	rychlost tekutiny/kapky	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
w_o	rychlost kapaliny u ústí trysky	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
w_{sh}	průměrná rychlost kapalinové clony	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
We	Weberovo číslo	(–)
$We_{coh \rightarrow 0}$	kritické Weberovo číslo pro nízké hodnoty Oh	(–)
We_g	plynné Weberovo číslo	(–)
We_{jet}	Weberovo číslo kapalinového proudu	(–)
x_i, x_j, x_k	kartézské souřadnice	(m)
y	výška trysky nad ostřikovaným povrchem	(mm)
γ_{ef}	efektivní úhel rozstříku	(°)
γ_{st}	součinitel povrchového napětí	$(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
θ	úhel mezi polopřímkou a polární osou soustavy	(rad)
$\emptyset$	průměr	(–)
α	empirická konstanta Rosin_Rammler distribuce	(–)
α_T	teoretický úhel rozstříku	(°)

β	empirická konstanta Rosin_Rammler distribuce	(–)
δ	nedimensionální tloušťka kapalinové clony	(–)
Γ	průtok tekutiny na jednotku šířky	(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
ξ	náhodné číslo	(–)
μ	střední hodnota velikosti kapek	(m)
μ_{DV}	dynamická viskozita	(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
μ_{DVI}	dynamická viskozita kapaliny	(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
μ_{DVg}	Dynamická viskozita plynné fáze	(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
σ	směrodatná odchylka	(m)
σ_L	povrchové napětí kapaliny	(N·m ⁻¹)
σ_g	geometrická směrodatná odchylka	(m)
ρ_g	hustota plynné fáze	(kg·m ⁻³)
ρ_L	hustota kapalné fáze	(kg·m ⁻³)
ρ	hustota	(kg·m ⁻³)
τ_{ij}	tenzor vazkých napětí	(N·m ⁻²)
$\tau_{L,bu}$	doba rozpadu ligamentu	(s)
χ	mezerovitost	(–)
Φ	Laplaceův integrál	
ϕ	úhel hloubky paprsku trysky	(°)
$\tilde{\omega}$	vlnová délka	(m)
ω	úhel náklonu paprsku trysky	(°)

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Model skrápěcí komory navrhovaného absorpčního scrubberu a spirálové trysky	9
Obr. 2	Schéma náplňového absorberu [17]	19
Obr. 3	Sprchový absorbér (A) a Venturiho scrubber (B) [18, 19]	20
Obr. 4	Schéma patrové kolony s přepadem pracující v křížovém režimu [17]	21
Obr. 5	Průběh rozpadu kapalinové clony během primární a sekundární atomizace [56]	23
Obr. 6	Perforovaný (A) a vlnový (B) režim rozpadu kapalinové clony [64, 65]	25
Obr. 7	Režim rozpadu kapalinové clony při okraji lemu [65]	26
Obr. 8	Režimy rozpadu v prostoru We-Oh [71]	27
Obr. 9	Schéma oblastí v rozprašované vodní cloně [59]	30
Obr. 10	Schéma úhlu rozstříku a šířky kapalinové clony [80]	30
Obr. 11	Tryska s rozstříkem malého (vlevo) a velkého (uprostřed) dutého vodního kuželu, vzor kapalinové clony na ostříkované ploše (vpravo) [56, 81]	31
Obr. 12	Tvar kapalinové clony axiální (nahore) a spirálové (dole) trysky s plným kuželem a vzory produkované kapalinové clony na ostříkované ploše [56, 81]	32
Obr. 13	Tvar kapalinové clony s pochým rozstříkem s příkladem vzoru na ostříkované ploše [56]	32
Obr. 14	Tvar kapalinové clony a její vzor na ostříkovaném povrchu [56]	33
Obr. 15	Pneumatická rozprašovací tryska (vlevo) a různé vzory kapalinových clon na ostříkovaném povrchu [56]	33
Obr. 16	Schéma přístrojového uspořádání a postup měření PIV [92]	35
Obr. 17	Schéma přístrojového uspořádání a postup měření LDA [94]	36
Obr. 18	Diferenciální a kumulativní distribuční křivka velikosti kapek [56]	39
Obr. 19	Výsledky řešení sledované veličiny Navier-Stokesových rovnic pro jednotlivé metody numerické simulace [106]	43
Obr. 20	Celková struktura toku kapalného paprsku pro všechny vyšetřované případy, kdy barevná škála legendy indikuje axiální rychlost tekutiny v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; a) první případ simulace: vstřikovací rychlost = 30 m/s, $\text{Re} = 440$, $\text{We} = 1270$; b) druhý případ simulace: vstřikovací rychlost = 50 m/s, $\text{Re} = 740$, $\text{We} = 3530$; c) třetí případ simulace: vstřikovací rychlost = 100 m/s, $\text{Re} = 1470$, $\text{We} = 14100$ [109]	44
Obr. 21	Model vyšetřované absorpční věže (vpravo) a rychlostní proudnice plynu pro čtyři uspořádání (vlevo) [114]	46
Obr. 22	Vzhled kapalinové clony a oblasti shluku kapek z PIV měření (vlevo) a LES simulace (vpravo) [115]	47
Obr. 23	Rychlosti plynné a kapalně fáze uvnitř spreje a oblasti shluků kapek části kapalinové clony získané simulací LES [115]	47
Obr. 24	Efekt výsledků LES simulace v závislosti na velikosti elementů výpočetní sítě při vypařování rozstříkovaného spreje; a) velikost výpočetního elementu 1,00 mm, b) velikost výpočetního elementu 0,75 mm, c) velikost výpočetního elementu 0,50 mm [108]	48
Obr. 25	Zjednodušený model sprchového scrubberu; zásobní nádrž kapalného absorbentu s výměníkem tepla (1), cirkulační odstředivé čerpadlo kapalně fáze (2), vstup znečištěné plynné fáze (3), posuvný deflektor (4), výstup přečištěné plynné fáze	

	(5), víko komory s regulační clonou a demistorem (6), skrápěcí komora/hlava (7), nosný rám (8)[120]	49
Obr. 26	Poloprovodní sprchový scrubber sestavený v laboratoři (A) s detailem transparentní sprchové komory (B); detail rotačního cirkulačního čerpadla (1), vnitřní prostor zásobní nádrže se spirálovým trubkovým výměníkem tepla (2), deflektor (3), systém uchycení a poloha umístění spirálové trysky (4)	50
Obr. 27	Znázornění hlavních proudů kapalinové clony (vlevo) a dopadového vzoru (vpravo) spirálové trysky TF-28 150 [122]	52
Obr. 28	Spirálová tryska TF-28 150; A) Celkový pohled; B) Rovina XZ; C) Rovina YZ	52
Obr. 29	Znázornění spirálové trysky TF-28 150; znázornění vzdálenosti jednotlivých dopadových ploch (hladin), vodních paprsků (tyrkysová barva) a vzdáleností zdrojů paprsků od počátku ústí trysky při měření impaktů	54
Obr. 30	Přístrojové uspořádání při měření impaktů v první sadě; upevňující deska (1), kovové pouzdro (2), dopadová plocha (3), spirálová tryska TF-28 150 (4), svrchní pohyblivé rameno (5), spodní pohyblivé rameno (6)	55
Obr. 31	Rozložení tlaku dopadající kapalinové clony v hladině 1 (60 mm od ústí trysky)	56
Obr. 32	Rozložení tlaku dopadající kapalinové clony v hladině 3 (80 mm od ústí trysky)	57
Obr. 33	Rozložení tlaku dopadající kapalinové clony v hladině 4 (100 mm od ústí trysky)	58
Obr. 34	Rozložení tlaku dopadající kapalinové clony v hladině 5 (120 mm od ústí trysky)	59
Obr. 35	Rozložení tlaku dopadající kapalinové clony v hladině 6 (140 mm od ústí trysky)	60
Obr. 36	Přístrojové uspořádání při měření impaktů ve druhé sadě; poloha a natočení spirálové trysky TF-28 150 (1), dopadová deska (2), vyvrtaný otvor (3), kryt tenzometrického snímače (4), upevňující deska dopadové plochy (5)	61
Obr. 37	Příklad rozložení tlaku dopadající kapalinové clony v hladině 2 pro vstupní tlak kapaliny 1,50 bar	62
Obr. 38	Záznam impaktových tlaků u jednotlivých měření v hladině 2; pohled zepředu dle umístění trysky při měřeních	63
Obr. 39	Označení vodních paprsků a grafické znázornění spirál představujících základny vnitřních kuželů pro hladinu 3	65
Obr. 40	Fotografie vyvíjené kapalinové clony s aplikovaným filtrem	67
Obr. 41	Porovnání obdržených fotografií s vyznačením hlavních paprsků (1 až 6) a úhlů (pro 2. měření), které svírají se svislou osou trysky	68
Obr. 42	Vývoj kapalinové clony s instalovanou přepážkou pro otevření kapalinové clony; v levém horním rohu detailnější pohled na trysku s aplikovaným filtrem pro snadnější rozeznání okrajů paprsků	69
Obr. 43	Vývoj kapalinové clony při A) provozním tlaku 1 bar na spirálové trysce a B) provozním tlaku 2 bar na spirálové trysce	70
Obr. 44	Detailnější fotografie vyvíjené kapalinové clony s využitím blesku při A) provozním tlaku 1 bar na spirálové trysce a B) provozním tlaku 2 bar na spirálovité trysce	71
Obr. 45	Model skrápěcí hlavy pro testování kapalinové clony; Canon D70 s objektivem Canon EF (1), pulzní laser Nd:YAG (2), umístění spirálové trysky (3), odstředivé čerpadlo (4)	72

Obr. 46	Fotografie vnější „svrchní“ kapalinové clony klasické (A) a modifikované prosvětlené (B) verze	74
Obr. 47	A) Jednotlivé fáze distribuce kapalinové clony; B) Kapalinová clona, ligamenty (1) a protržení kapalinové clony v celém objemu (2)	75
Obr. 48	A) Kapalinová clona, porucha - díra (1); Detail okraje kapalinové stěny (B); Rozpad na jednotlivé kapky - sekundární atomizace (C)	75
Obr. 49	Detailní fotografie sekundární rozpadové zóny (C, D) a příklad vyhodnocovaných kapek (A, B) z této oblasti	76
Obr. 50	Početní (modrá barva), povrchová (zelená barva) a objemová/hmotnostní (oranžová barva) vážená distribuce kapek v jednotlivých velikostních třídách	77
Obr. 51	Početní histogram s proloženými teoretickými distribučními funkcemi	79
Obr. 52	P-P pravděpodobnostní graf kumulativního rozdělení teoretických distribučních funkcí pro početní rozložení velikosti kapek	80
Obr. 53	Histogram zastoupení povrchu s proloženými teoretickými distribučními funkcemi	80
Obr. 54	P-P pravděpodobnostní graf kumulativního rozdělení teoretických distribučních funkcí pro povrchové rozložení velikosti kapek	81
Obr. 55	Histogram zastoupení objemu/hmotnosti s proloženými teoretickými distribučními funkcemi	81
Obr. 56	P-P pravděpodobnostní graf kumulativního rozdělení teoretických distribučních funkcí pro objemové/hmotnostní rozložení velikosti	82
Obr. 57	Početní histogram se zvýrazněnými hodnotami vybraných středních průměrů	83
Obr. 58	Vizualizace měřených pozic při měření rychlosti kapaliny metodou LDA (A); detailnější popis měřených pozic pro lepší představu (B)	84
Obr. 59	Histogram distribuce radiálních rychlostí v bodě [140,0,40] mm (x,y,z)	84
Obr. 60	Histogram distribuce tangenciálních rychlostí v bodě [140,0,40] mm (x,y,z)	85
Obr. 61	Eulerovo číslo v závislosti na Reynoldsově čísle ve spirálové trysce	86
Obr. 62	Rychlostní profil kapalinové stěny v závislosti na radiální vzdálenosti X	87
Obr. 63	Rychlostní profil kapalinové stěny v ose X v závislosti na axiální vzdálenosti Z	87
Obr. 64	3D graf vyhlazených dat pro radiální vzdálenost X	88
Obr. 65	Rychlostní profil kapalinové stěny v závislosti na poloze Y	89
Obr. 66	Rychlostní profil kapalinové stěny v ose Y v závislosti na axiální vzdálenosti Z	89
Obr. 67	3D graf vyhlazených dat pro vzdálenost Y	90
Obr. 68	Zjednodušený model geometrie skrápěcí hlavy pro CFD simulaci vzdušiny; vstup plynné fáze/inlet (1), výstup plynné fáze/outlet (2), výstup kapalné fáze (3), demistor/separátor kapek (4), soustava přepážek (5), deflektor (6)	92
Obr. 69	Inverzní objem modelu geometrie skrápěcí hlavy; axonometrický pohled na reliéf (A), pohled v řezu roviny XY (B)	92
Obr. 70	Vygenerovaná výpočetní síť pro numerickou analýzu vzdušiny v modelu skrápěcí hlavy (A); graf kvality a počtu elementů v závislosti na relativních velikostech elementů výpočetní sítě (B)	93

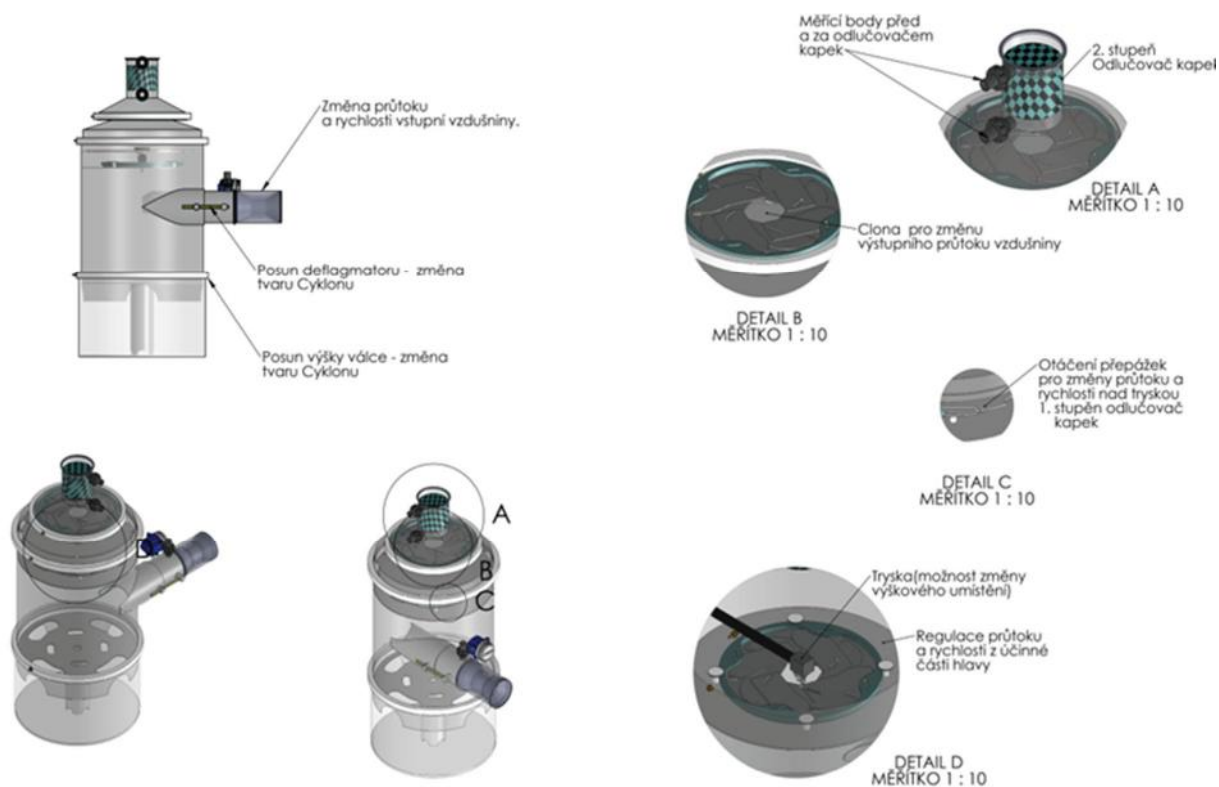
Obr. 71	Nastavení záložek v programu Ansys; záložka turbulentního modelu (A), záložka matematického způsobu řešení CFD simulací (B), záložka spuštění výpočtu CFD (C)	94
Obr. 72	Pozice oblastí ve skrápěcí komoře a orientace jednotlivých rovin; rovina YZ (1), rovina YX (2), protilehlá rovina (3) deflektoru (4)	95
Obr. 73	Velikost rychlosti proudění zobrazena pomocí proudnic; případ A ($V_p = 0,054 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	97
Obr. 74	Kontury velikosti rychlosti v rovinách pro případ A ($V_p = 0,054 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	97
Obr. 75	Kontury radiálních rychlostí a kontury rychlostí s vektory v horizontálních rovinách pro případ A ($V_p = 0,054 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	98
Obr. 76	Kontury dynamického a relativního tlaku pro případ A ($V_p = 0,054 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	98
Obr. 77	Kontury tangenciálních rychlostí pro případ A ($V_p = 0,054 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	99
Obr. 78	Vířivé jádro s filtrací síly nastavenou na 0,06 společně s konturací axiálních rychlostí a kontury axiálních rychlostí v rovinách XY a YZ pro případ A ($V_p = 0,054 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	99
Obr. 79	Velikost rychlosti proudění zobrazena pomocí proudnic; případ B ($V_p = 0,099 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	100
Obr. 80	Kontury velikosti rychlosti v rovinách pro případ B ($V_p = 0,099 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	100
Obr. 81	Kontury radiálních rychlostí a kontury rychlostí s vektory v horizontálních rovinách pro případ B ($V_p = 0,099 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	101
Obr. 82	Kontury dynamického a relativního tlaku pro případ B ($V_p = 0,099 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	101
Obr. 83	Kontury tangenciálních rychlostí pro případ B ($V_p = 0,099 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	102
Obr. 84	Vířivé jádro s filtrací síly nastavenou na 0,06 společně s konturací axiálních rychlostí a kontury axiálních rychlostí v rovinách XY a YZ pro případ B ($V_p = 0,099 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	102
Obr. 85	Velikost rychlosti proudění zobrazena pomocí proudnic; případ C ($V_p = 0,129 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	103
Obr. 86	Kontury velikosti rychlosti v rovinách pro případ C ($V_p = 0,129 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	103
Obr. 87	Kontury radiálních rychlostí a kontury rychlostí s vektory v horizontálních rovinách pro případ C ($V_p = 0,129 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	104
Obr. 88	Kontury dynamického tlaku pro případ C ($V_p = 0,129 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	104
Obr. 89	Kontury tangenciálních rychlostí pro případ C ($V_p = 0,129 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	105
Obr. 90	Vířivé jádro s filtrací síly nastavenou na 0,06 společně s konturací axiálních rychlostí a kontury axiálních rychlostí v rovinách XY a YZ pro případ C ($V_p = 0,129 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	105
Obr. 91	Kontury tangenciálních rychlostí v ploše trysky pro případ A a B; pozice dat v grafech	107
Obr. 92	Grafy vývoje tangenciálních rychlostí v ploše trysky pro různé pozice	107
Obr. 93	Kontury radiálních rychlostí v ploše trysky pro případ A a B; pozice dat v grafech	108
Obr. 94	Grafy vývoje radiálních rychlostí v ploše trysky pro různé pozice	108
Obr. 95	Kontury axiálních rychlostí v ploše trysky pro případ A a B; pozice dat v grafech	109
Obr. 96	Grafy vývoje axiálních rychlostí v ploše trysky pro různé pozice	109

Obr. 97	Umístění tlakových sond při experimentech a porovnání jejich hodnot pro případ A ($V_p = 0,054 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$); tlaková sonda na vstupu (1), tlaková sonda před demistorem (2), tlaková sonda na výstupu (3), plochy ohraničující délku demistoru (4)	111
Obr. 98	Porovnání hodnot relativních tlaků ve skrápěcí hlavě z praktických experimentů a simulací pro různé průtoky/případy	112
Obr. 99	Hodnoty koeficientů determinace mezi experimentem a simulacemi pro různé průtoky/případy	112
Obr. 100	Reverzní geometrie výpočetního prostoru rozděleného na 28 oblastí/těles (A); spirálová tryska složená ze 374 ploch (B)	113
Obr. 101	Vygenerovaná výpočetní síť pro rozstřík kapaliny přes spirálovou trysku (A); graf kvality a počtu elementů v závislosti na relativních velikostech elementů výpočetní sítě (B)	114
Obr. 102	Nastavení záložek v programu Ansys; záložka vícefázového modelu (A), záložka turbulentního modelu (B), záložka matematického způsobu řešení CFD simulací (C)	115
Obr. 103	Vzhled produkované kapalinové clony ve výpočetním prostoru reprezentovaný objemovým zlomkem kapalně fáze	116
Obr. 104	Srovnání rozložení dynamických tlaků (impaktů) kapalinové clony v hladině 2 mezi experimentem (A) a simulací (B)	117
Obr. 105	Dopadový vzor vnitřního „malého“ kuželu (C) a srovnání maximálních získaných impaktních tlaků mezi experimentem (A) a simulací (B)	118
Obr. 106	Fotografie trysky s umístěným jazýčkem a aplikovaným filtrem pro snadnější rozeznání okrajů paprsků	119
Obr. 107	Kontury objemového zlomku kapalně v blízkém okolí trysky v rovině YZ	120
Obr. 108	Kontury axiální rychlosti kapalně i plynné fáze v rovině YZ	120
Obr. 109	Kontury radiální rychlosti kapalně i plynné fáze v rovině YZ	121
Obr. 110	Kontury velikosti celkové rychlosti kapalně i plynné fáze v rovině YZ	121
Obr. 111	Skrápěcí komora zjednodušeného modelu scrubberu [120]	148
Obr. 112	Základní popis zjednodušeného modelu scrubberu [120]	148
Obr. 113	Jednotlivé pohledy na zjednodušený model scrubberu [120]	149
Obr. 114	Technologické schéma sprchového scrubberu [120]	150
Obr. 115	Závislost hustoty a dynamické viskozity vzduchu na teplotě [14]	151
Obr. 116	Závislost hustoty a dynamické viskozity vody na teplotě [14]	151
Obr. 117	Kontury rychlostí plynné fáze v ploše trysky pro případ C ($V_p = 0,129 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$) a pozice dat vynesných v grafech	152

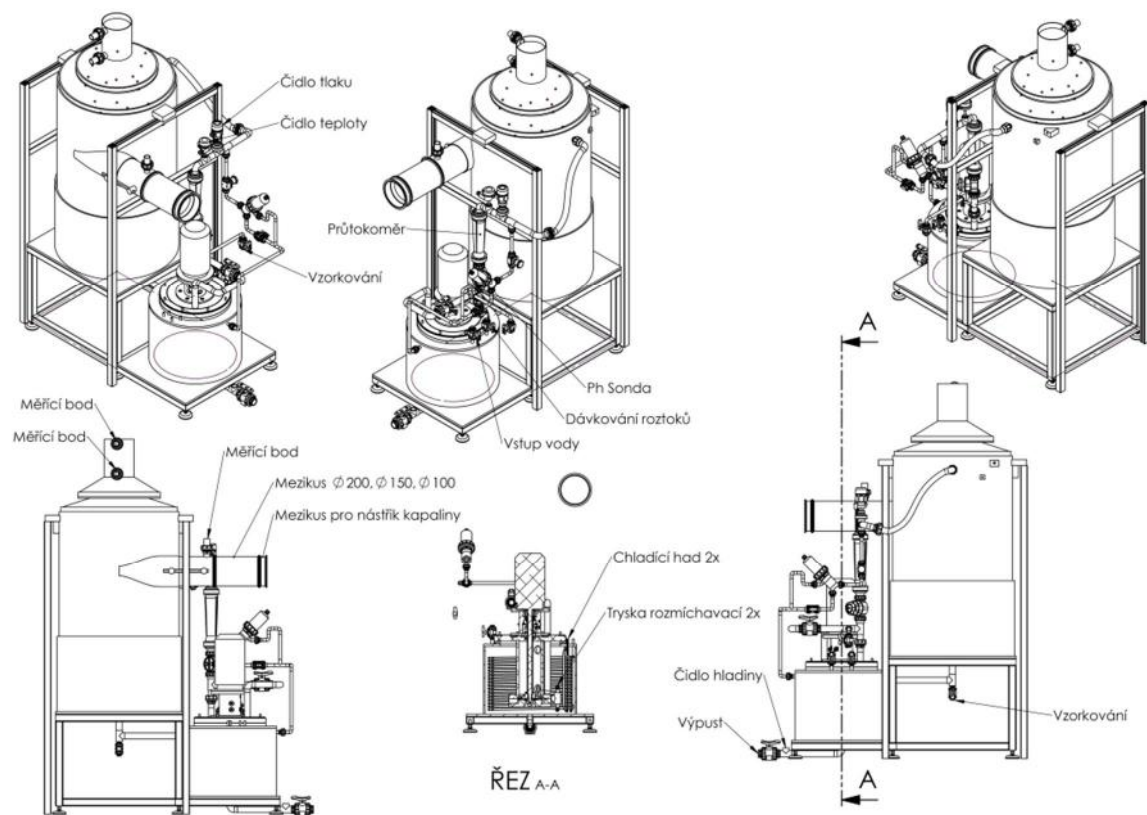
10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Nejběžnější smluvní průměry velikostí kapek pro popis v technické praxi [22]	38
Tab. 2	Závislost objemového průtoku kapaliny na vstupním tlaku trysky TF-28 150 [122]	52
Tab. 3	Vstupní tlaky (p_n) a průtoky kapaliny (V_n) při měření impaktů v druhé sadě měření	61
Tab. 4	Poměr maximálního nárazového tlaku ke vstupnímu tlaku kapaliny na trysku	64
Tab. 5	Hodnoty parametrů „a“ spirálovitých podstav vnitřních kuželů	65
Tab. 6	Efektivní úhly rozstříku γ_{ef} „malého“ a „velkého“ vodního kuželu	66
Tab. 7	Úhly rozstříku jednotlivých paprsků	68
Tab. 8	Efektivní úhly rozstříku γ_{ef} vnějšího („svrchního“) kuželu a vnitřních („malého“ i „velkého“) kuželů	68
Tab. 9	Vyhodnocení statistického Kolmogorov–Smirnovova testu	79
Tab. 10	Okrajové podmínky pro tři případy numerických výpočtů; kde V_p je hmotnostní průtok plynné fáze na vstupu a P_{r0} relativní tlak plynné fáze na výstupu do/ze skrápěcí hlavy	95
Tab. 11	Hodnoty relativních tlaků ve skrápěcí hlavě pro různé průtoky/případy z praktických experimentů a simulací; kde V_p je hmotnostní průtok plynné fáze na vstupu, $P_{ri}/P_{rd}/P_{r0}$ relativní tlak plynné fáze na vstupu/před demistorem/na výstupu	111
Tab. 12	Soubor změřených průměrů velikostí kapek zaokrouhlený na tisíce milimetru; kdy N reprezentuje pořadí (číslo) kapky a D aritmetický průměr velikosti kapky	153
Tab. 13	Průměrná data radiálních a tangenciálních rychlostí a jejich vektorový součet z experimentálně získaných hodnot v jednotlivých bodech; kdy X , Y , Z jsou souřadnicové body, v_R je radiální rychlost kapaliny, σ_R směrodatná odchylka radiální rychlosti, v_T je tangenciální rychlost kapaliny, σ_T směrodatná odchylka tangenciální rychlosti a v_{RR} představuje vektorový součet a tedy i reprezentativní radiální rychlost kapaliny	162

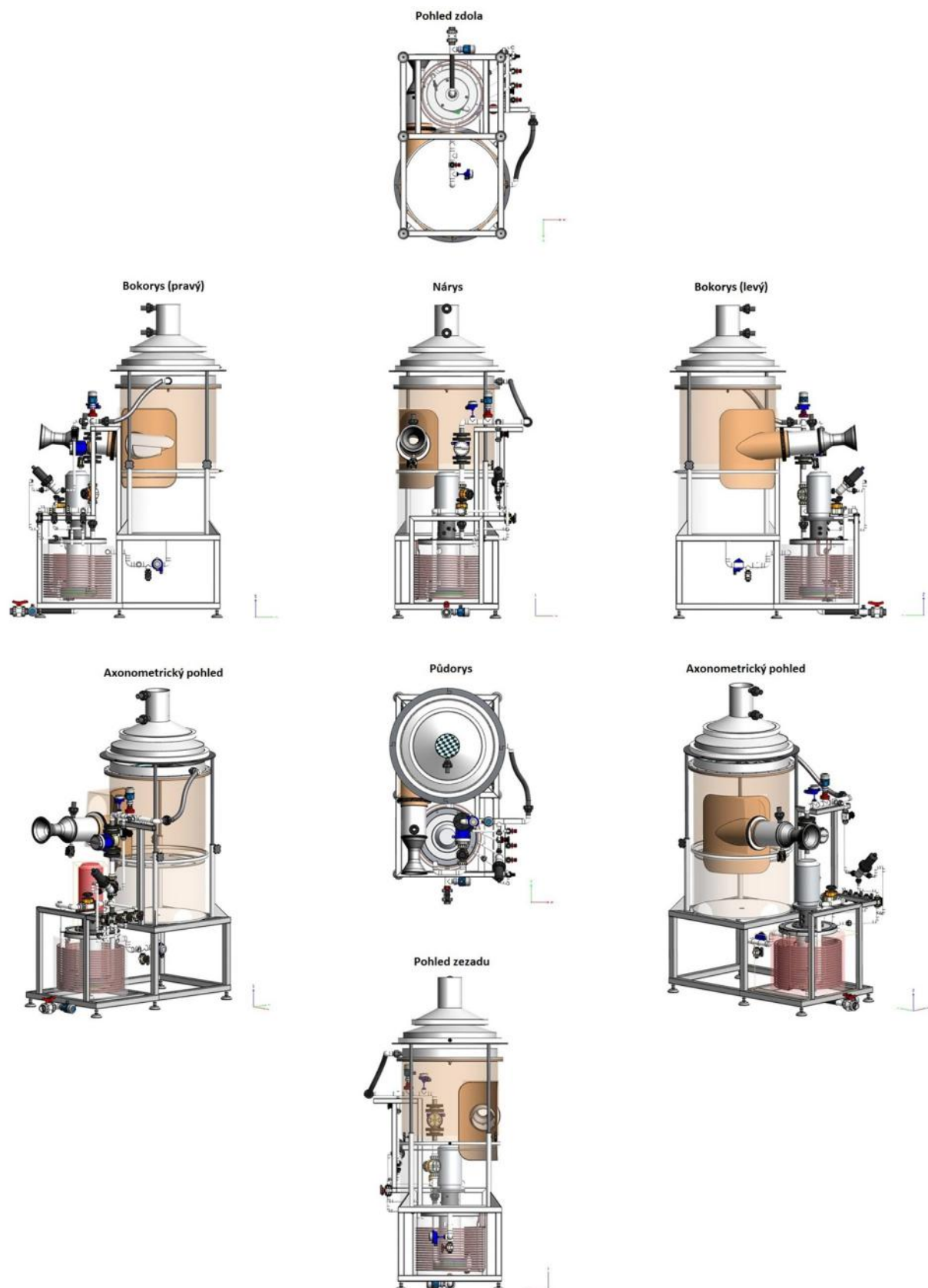
11 PŘÍLOHY



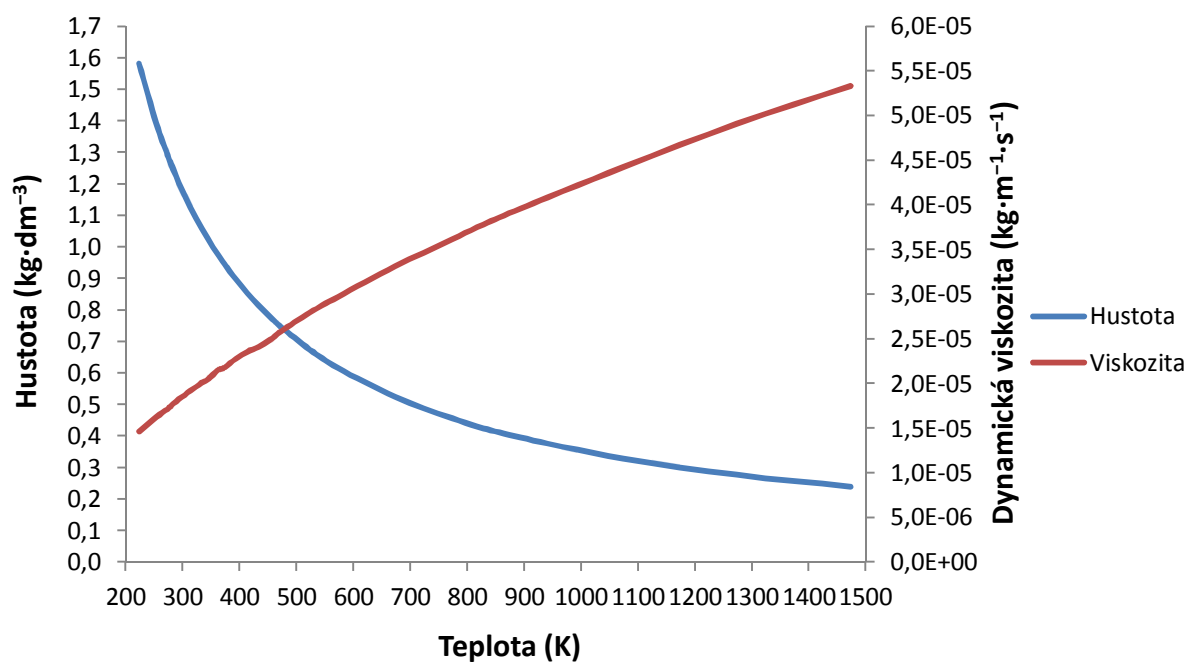
Obr. 111 Skrápěcí komora zjednodušeného modelu scrubberu [120]



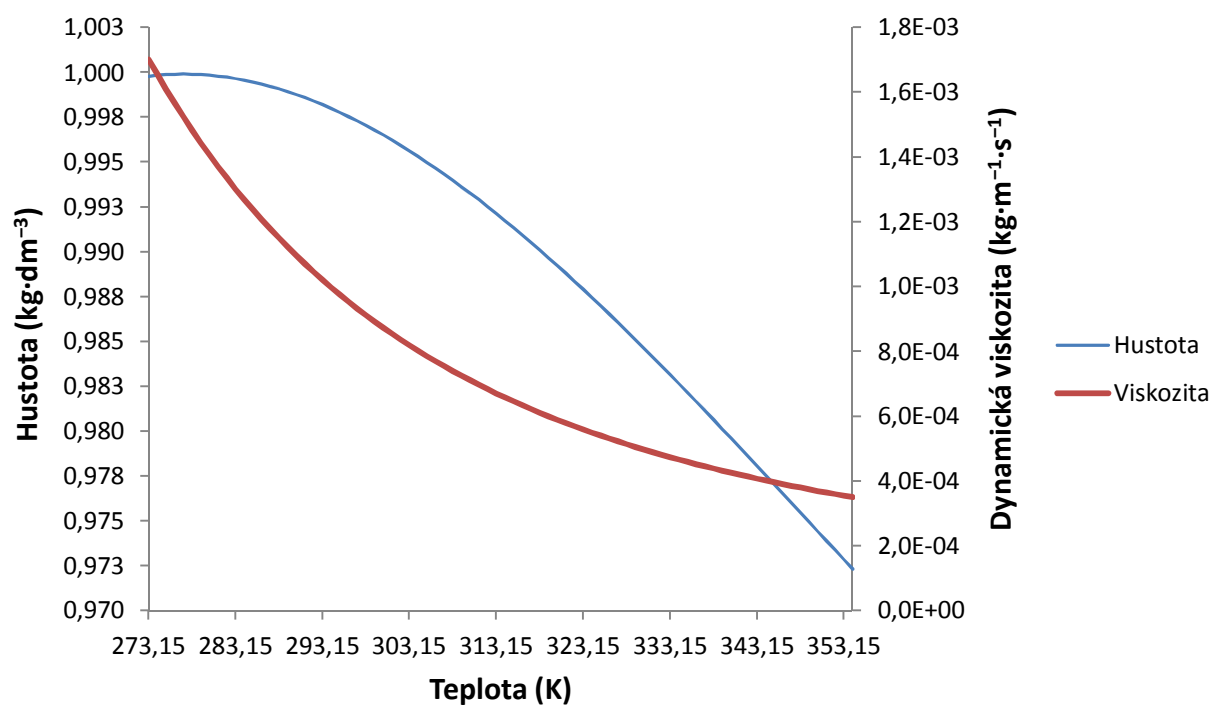
Obr. 112 Základní popis zjednodušeného modelu scrubberu [120]



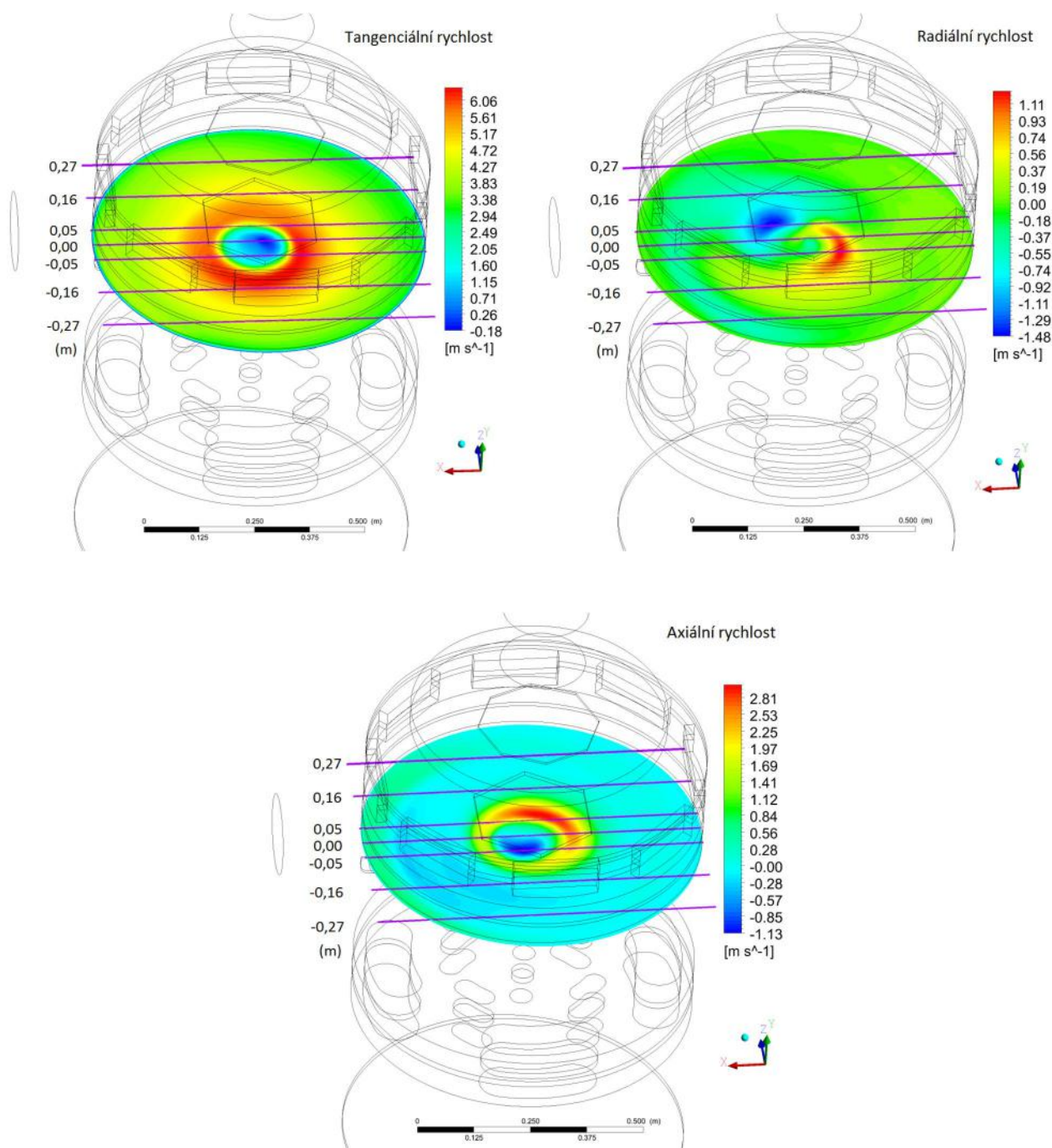
Obr. 113 Jednotlivé pohledy na zjednodušený model scrubberu [120]



Obr. 115 Závislost hustoty a dynamické viskozity vzduchu na teplotě [14]



Obr. 116 Závislost hustoty a dynamické viskozity vody na teplotě [14]



Obr. 117 Kontury rychlostí plynné fáze v ploše trysky pro **případ C** ($V_p = 0,129 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) a pozice dat vynesných v grafech

Tab. 12 Soubor změřených průměrů velikostí kapek zaokrouhlený na tisíciny milimetru; kdy N reprezentuje pořadí (číslo) kapky a D aritmetický průměr velikosti kapky

N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)
1	0,166	40	0,279	79	0,319	118	0,354	157	0,386
2	0,176	41	0,280	80	0,320	119	0,355	158	0,386
3	0,180	42	0,281	81	0,320	120	0,357	159	0,386
4	0,186	43	0,282	82	0,320	121	0,358	160	0,387
5	0,192	44	0,286	83	0,320	122	0,361	161	0,387
6	0,203	45	0,286	84	0,321	123	0,361	162	0,387
7	0,211	46	0,287	85	0,323	124	0,361	163	0,389
8	0,214	47	0,287	86	0,327	125	0,362	164	0,389
9	0,215	48	0,287	87	0,327	126	0,363	165	0,390
10	0,215	49	0,290	88	0,327	127	0,363	166	0,390
11	0,224	50	0,291	89	0,328	128	0,363	167	0,391
12	0,225	51	0,292	90	0,331	129	0,363	168	0,391
13	0,225	52	0,292	91	0,331	130	0,364	169	0,391
14	0,226	53	0,295	92	0,334	131	0,364	170	0,391
15	0,230	54	0,295	93	0,335	132	0,365	171	0,391
16	0,234	55	0,298	94	0,337	133	0,365	172	0,391
17	0,241	56	0,298	95	0,337	134	0,366	173	0,392
18	0,246	57	0,303	96	0,337	135	0,368	174	0,392
19	0,248	58	0,304	97	0,338	136	0,369	175	0,392
20	0,248	59	0,305	98	0,339	137	0,370	176	0,393
21	0,254	60	0,306	99	0,339	138	0,372	177	0,394
22	0,255	61	0,308	100	0,341	139	0,372	178	0,394
23	0,257	62	0,308	101	0,342	140	0,373	179	0,395
24	0,257	63	0,308	102	0,342	141	0,373	180	0,395
25	0,257	64	0,309	103	0,343	142	0,373	181	0,395
26	0,260	65	0,311	104	0,343	143	0,373	182	0,396
27	0,261	66	0,311	105	0,343	144	0,375	183	0,397
28	0,262	67	0,312	106	0,344	145	0,376	184	0,397
29	0,262	68	0,312	107	0,345	146	0,378	185	0,398
30	0,264	69	0,313	108	0,346	147	0,378	186	0,398
31	0,264	70	0,315	109	0,346	148	0,378	187	0,399
32	0,267	71	0,315	110	0,347	149	0,379	188	0,399
33	0,267	72	0,316	111	0,347	150	0,381	189	0,400
34	0,268	73	0,316	112	0,348	151	0,382	190	0,400
35	0,275	74	0,317	113	0,350	152	0,384	191	0,401
36	0,276	75	0,317	114	0,350	153	0,384	192	0,401
37	0,276	76	0,318	115	0,351	154	0,385	193	0,404
38	0,276	77	0,318	116	0,352	155	0,385	194	0,404
39	0,278	78	0,319	117	0,354	156	0,386	195	0,404

(Tab. 12 pokračování)

N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)
196	0,404	239	0,425	282	0,452	325	0,475	368	0,495
197	0,405	240	0,425	283	0,452	326	0,476	369	0,495
198	0,405	241	0,425	284	0,452	327	0,476	370	0,495
199	0,405	242	0,426	285	0,453	328	0,476	371	0,496
200	0,407	243	0,426	286	0,453	329	0,476	372	0,496
201	0,408	244	0,427	287	0,454	330	0,477	373	0,498
202	0,408	245	0,428	288	0,455	331	0,477	374	0,498
203	0,409	246	0,428	289	0,455	332	0,478	375	0,498
204	0,410	247	0,430	290	0,456	333	0,478	376	0,498
205	0,411	248	0,432	291	0,456	334	0,478	377	0,498
206	0,411	249	0,433	292	0,456	335	0,480	378	0,499
207	0,412	250	0,433	293	0,457	336	0,480	379	0,501
208	0,413	251	0,434	294	0,457	337	0,480	380	0,501
209	0,413	252	0,436	295	0,458	338	0,480	381	0,501
210	0,413	253	0,436	296	0,459	339	0,481	382	0,502
211	0,414	254	0,437	297	0,459	340	0,482	383	0,502
212	0,414	255	0,438	298	0,460	341	0,483	384	0,503
213	0,414	256	0,438	299	0,460	342	0,483	385	0,503
214	0,414	257	0,438	300	0,460	343	0,484	386	0,503
215	0,415	258	0,439	301	0,460	344	0,485	387	0,503
216	0,415	259	0,440	302	0,460	345	0,485	388	0,506
217	0,416	260	0,440	303	0,461	346	0,486	389	0,507
218	0,416	261	0,442	304	0,461	347	0,487	390	0,507
219	0,416	262	0,442	305	0,462	348	0,487	391	0,507
220	0,418	263	0,442	306	0,462	349	0,487	392	0,508
221	0,418	264	0,442	307	0,462	350	0,488	393	0,509
222	0,420	265	0,442	308	0,463	351	0,489	394	0,509
223	0,420	266	0,443	309	0,463	352	0,489	395	0,509
224	0,421	267	0,444	310	0,464	353	0,490	396	0,509
225	0,421	268	0,444	311	0,466	354	0,490	397	0,510
226	0,421	269	0,444	312	0,467	355	0,490	398	0,511
227	0,421	270	0,445	313	0,468	356	0,490	399	0,512
228	0,422	271	0,445	314	0,468	357	0,490	400	0,512
229	0,422	272	0,446	315	0,469	358	0,490	401	0,513
230	0,423	273	0,447	316	0,470	359	0,491	402	0,514
231	0,423	274	0,448	317	0,470	360	0,491	403	0,515
232	0,423	275	0,448	318	0,471	361	0,491	404	0,515
233	0,424	276	0,448	319	0,471	362	0,492	405	0,515
234	0,424	277	0,448	320	0,472	363	0,492	406	0,516
235	0,424	278	0,449	321	0,473	364	0,493	407	0,516
236	0,424	279	0,449	322	0,473	365	0,494	408	0,516
237	0,424	280	0,451	323	0,474	366	0,494	409	0,517
238	0,425	281	0,451	324	0,475	367	0,495	410	0,518

(Tab. 12 pokračování)

N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)
411	0,518	454	0,537	497	0,558	540	0,578	583	0,596
412	0,519	455	0,538	498	0,558	541	0,579	584	0,597
413	0,520	456	0,538	499	0,560	542	0,580	585	0,598
414	0,520	457	0,540	500	0,560	543	0,580	586	0,598
415	0,521	458	0,540	501	0,560	544	0,580	587	0,598
416	0,521	459	0,540	502	0,561	545	0,581	588	0,599
417	0,522	460	0,540	503	0,561	546	0,581	589	0,599
418	0,522	461	0,541	504	0,562	547	0,581	590	0,599
419	0,522	462	0,541	505	0,563	548	0,582	591	0,599
420	0,524	463	0,541	506	0,564	549	0,582	592	0,599
421	0,524	464	0,543	507	0,564	550	0,583	593	0,599
422	0,525	465	0,543	508	0,564	551	0,583	594	0,599
423	0,525	466	0,543	509	0,564	552	0,583	595	0,600
424	0,525	467	0,543	510	0,565	553	0,583	596	0,600
425	0,525	468	0,544	511	0,565	554	0,584	597	0,600
426	0,526	469	0,544	512	0,566	555	0,584	598	0,600
427	0,526	470	0,544	513	0,566	556	0,586	599	0,601
428	0,526	471	0,546	514	0,567	557	0,586	600	0,602
429	0,526	472	0,546	515	0,567	558	0,586	601	0,602
430	0,526	473	0,546	516	0,568	559	0,588	602	0,603
431	0,527	474	0,546	517	0,569	560	0,588	603	0,604
432	0,527	475	0,546	518	0,569	561	0,588	604	0,604
433	0,527	476	0,546	519	0,569	562	0,588	605	0,605
434	0,528	477	0,547	520	0,569	563	0,590	606	0,606
435	0,528	478	0,547	521	0,570	564	0,590	607	0,606
436	0,528	479	0,548	522	0,570	565	0,590	608	0,607
437	0,529	480	0,548	523	0,570	566	0,591	609	0,608
438	0,529	481	0,549	524	0,571	567	0,591	610	0,609
439	0,529	482	0,550	525	0,572	568	0,591	611	0,609
440	0,530	483	0,550	526	0,572	569	0,592	612	0,610
441	0,531	484	0,551	527	0,572	570	0,592	613	0,611
442	0,532	485	0,551	528	0,572	571	0,592	614	0,611
443	0,532	486	0,553	529	0,573	572	0,593	615	0,611
444	0,532	487	0,553	530	0,573	573	0,593	616	0,611
445	0,532	488	0,554	531	0,573	574	0,594	617	0,612
446	0,532	489	0,554	532	0,574	575	0,594	618	0,613
447	0,533	490	0,555	533	0,574	576	0,594	619	0,614
448	0,533	491	0,556	534	0,576	577	0,595	620	0,616
449	0,534	492	0,556	535	0,576	578	0,595	621	0,616
450	0,534	493	0,556	536	0,577	579	0,595	622	0,618
451	0,535	494	0,556	537	0,577	580	0,595	623	0,619
452	0,535	495	0,557	538	0,577	581	0,596	624	0,619
453	0,537	496	0,557	539	0,578	582	0,596	625	0,619

(Tab. 12 pokračování)

N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)
626	0,620	669	0,640	712	0,662	755	0,678	798	0,696
627	0,620	670	0,640	713	0,663	756	0,679	799	0,696
628	0,620	671	0,640	714	0,663	757	0,679	800	0,697
629	0,620	672	0,640	715	0,664	758	0,679	801	0,697
630	0,620	673	0,643	716	0,665	759	0,679	802	0,697
631	0,620	674	0,643	717	0,665	760	0,679	803	0,698
632	0,622	675	0,643	718	0,665	761	0,679	804	0,698
633	0,623	676	0,643	719	0,665	762	0,680	805	0,698
634	0,624	677	0,643	720	0,666	763	0,681	806	0,699
635	0,625	678	0,643	721	0,666	764	0,681	807	0,699
636	0,625	679	0,644	722	0,666	765	0,681	808	0,700
637	0,625	680	0,644	723	0,667	766	0,682	809	0,700
638	0,626	681	0,644	724	0,667	767	0,682	810	0,700
639	0,627	682	0,645	725	0,667	768	0,683	811	0,700
640	0,627	683	0,647	726	0,668	769	0,683	812	0,700
641	0,628	684	0,648	727	0,668	770	0,684	813	0,701
642	0,628	685	0,650	728	0,668	771	0,684	814	0,702
643	0,628	686	0,650	729	0,668	772	0,684	815	0,702
644	0,629	687	0,650	730	0,669	773	0,685	816	0,702
645	0,630	688	0,651	731	0,669	774	0,685	817	0,703
646	0,630	689	0,651	732	0,669	775	0,686	818	0,703
647	0,630	690	0,651	733	0,669	776	0,686	819	0,703
648	0,630	691	0,651	734	0,670	777	0,686	820	0,704
649	0,631	692	0,651	735	0,670	778	0,687	821	0,704
650	0,631	693	0,651	736	0,671	779	0,687	822	0,705
651	0,631	694	0,651	737	0,671	780	0,687	823	0,705
652	0,631	695	0,651	738	0,671	781	0,688	824	0,705
653	0,631	696	0,651	739	0,671	782	0,688	825	0,706
654	0,632	697	0,651	740	0,672	783	0,688	826	0,706
655	0,632	698	0,652	741	0,672	784	0,689	827	0,707
656	0,632	699	0,653	742	0,672	785	0,689	828	0,707
657	0,632	700	0,653	743	0,672	786	0,689	829	0,708
658	0,633	701	0,654	744	0,673	787	0,690	830	0,708
659	0,633	702	0,656	745	0,673	788	0,690	831	0,708
660	0,633	703	0,659	746	0,673	789	0,691	832	0,710
661	0,634	704	0,659	747	0,673	790	0,691	833	0,710
662	0,635	705	0,660	748	0,673	791	0,691	834	0,710
663	0,636	706	0,660	749	0,674	792	0,692	835	0,711
664	0,637	707	0,660	750	0,674	793	0,693	836	0,711
665	0,637	708	0,660	751	0,674	794	0,695	837	0,711
666	0,638	709	0,660	752	0,676	795	0,695	838	0,712
667	0,639	710	0,661	753	0,676	796	0,695	839	0,713
668	0,639	711	0,661	754	0,678	797	0,696	840	0,713

(Tab. 12 pokračování)

N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)
841	0,714	884	0,740	927	0,761	970	0,783	1013	0,806
842	0,714	885	0,740	928	0,763	971	0,784	1014	0,806
843	0,717	886	0,741	929	0,763	972	0,784	1015	0,808
844	0,718	887	0,742	930	0,764	973	0,785	1016	0,808
845	0,718	888	0,742	931	0,764	974	0,785	1017	0,808
846	0,719	889	0,743	932	0,765	975	0,786	1018	0,809
847	0,719	890	0,743	933	0,766	976	0,787	1019	0,809
848	0,720	891	0,744	934	0,767	977	0,787	1020	0,810
849	0,720	892	0,744	935	0,767	978	0,789	1021	0,811
850	0,721	893	0,744	936	0,767	979	0,790	1022	0,811
851	0,721	894	0,744	937	0,768	980	0,791	1023	0,812
852	0,721	895	0,745	938	0,769	981	0,792	1024	0,813
853	0,721	896	0,746	939	0,770	982	0,792	1025	0,815
854	0,722	897	0,746	940	0,770	983	0,793	1026	0,815
855	0,723	898	0,746	941	0,770	984	0,793	1027	0,816
856	0,725	899	0,747	942	0,770	985	0,793	1028	0,816
857	0,725	900	0,748	943	0,771	986	0,793	1029	0,817
858	0,725	901	0,748	944	0,772	987	0,793	1030	0,818
859	0,725	902	0,748	945	0,773	988	0,795	1031	0,818
860	0,726	903	0,748	946	0,773	989	0,795	1032	0,819
861	0,727	904	0,748	947	0,773	990	0,795	1033	0,820
862	0,727	905	0,748	948	0,774	991	0,796	1034	0,820
863	0,728	906	0,749	949	0,774	992	0,796	1035	0,820
864	0,728	907	0,750	950	0,774	993	0,797	1036	0,820
865	0,728	908	0,750	951	0,774	994	0,797	1037	0,820
866	0,729	909	0,751	952	0,774	995	0,797	1038	0,821
867	0,730	910	0,751	953	0,775	996	0,798	1039	0,821
868	0,730	911	0,752	954	0,775	997	0,798	1040	0,821
869	0,730	912	0,752	955	0,775	998	0,799	1041	0,822
870	0,731	913	0,753	956	0,776	999	0,799	1042	0,823
871	0,731	914	0,753	957	0,777	1000	0,800	1043	0,824
872	0,732	915	0,753	958	0,777	1001	0,801	1044	0,824
873	0,732	916	0,754	959	0,777	1002	0,802	1045	0,824
874	0,732	917	0,755	960	0,777	1003	0,802	1046	0,825
875	0,735	918	0,755	961	0,778	1004	0,803	1047	0,826
876	0,735	919	0,755	962	0,778	1005	0,804	1048	0,827
877	0,736	920	0,756	963	0,779	1006	0,804	1049	0,827
878	0,737	921	0,756	964	0,779	1007	0,805	1050	0,827
879	0,738	922	0,758	965	0,780	1008	0,805	1051	0,828
880	0,738	923	0,758	966	0,782	1009	0,805	1052	0,829
881	0,738	924	0,759	967	0,782	1010	0,805	1053	0,829
882	0,739	925	0,759	968	0,782	1011	0,806	1054	0,830
883	0,740	926	0,760	969	0,782	1012	0,806	1055	0,831

(Tab. 12 pokračování)

N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)
1056	0,831	1099	0,858	1142	0,890	1185	0,909	1228	0,936
1057	0,832	1100	0,858	1143	0,891	1186	0,909	1229	0,936
1058	0,833	1101	0,859	1144	0,891	1187	0,909	1230	0,937
1059	0,833	1102	0,859	1145	0,891	1188	0,910	1231	0,938
1060	0,834	1103	0,859	1146	0,892	1189	0,910	1232	0,939
1061	0,834	1104	0,860	1147	0,892	1190	0,911	1233	0,939
1062	0,835	1105	0,861	1148	0,892	1191	0,911	1234	0,940
1063	0,837	1106	0,863	1149	0,892	1192	0,911	1235	0,941
1064	0,837	1107	0,863	1150	0,892	1193	0,911	1236	0,941
1065	0,839	1108	0,863	1151	0,892	1194	0,912	1237	0,942
1066	0,839	1109	0,864	1152	0,892	1195	0,914	1238	0,942
1067	0,840	1110	0,864	1153	0,892	1196	0,914	1239	0,942
1068	0,840	1111	0,865	1154	0,893	1197	0,914	1240	0,943
1069	0,840	1112	0,867	1155	0,893	1198	0,914	1241	0,944
1070	0,840	1113	0,868	1156	0,893	1199	0,915	1242	0,945
1071	0,841	1114	0,869	1157	0,894	1200	0,915	1243	0,947
1072	0,841	1115	0,869	1158	0,894	1201	0,916	1244	0,947
1073	0,841	1116	0,869	1159	0,895	1202	0,916	1245	0,949
1074	0,842	1117	0,870	1160	0,896	1203	0,917	1246	0,950
1075	0,842	1118	0,870	1161	0,897	1204	0,917	1247	0,951
1076	0,842	1119	0,870	1162	0,897	1205	0,917	1248	0,951
1077	0,846	1120	0,871	1163	0,897	1206	0,918	1249	0,953
1078	0,846	1121	0,871	1164	0,897	1207	0,918	1250	0,953
1079	0,846	1122	0,873	1165	0,897	1208	0,919	1251	0,953
1080	0,847	1123	0,873	1166	0,898	1209	0,920	1252	0,954
1081	0,847	1124	0,875	1167	0,898	1210	0,920	1253	0,955
1082	0,847	1125	0,875	1168	0,899	1211	0,921	1254	0,956
1083	0,847	1126	0,875	1169	0,899	1212	0,921	1255	0,956
1084	0,848	1127	0,876	1170	0,900	1213	0,923	1256	0,957
1085	0,849	1128	0,879	1171	0,901	1214	0,924	1257	0,958
1086	0,849	1129	0,879	1172	0,901	1215	0,924	1258	0,958
1087	0,849	1130	0,879	1173	0,901	1216	0,924	1259	0,958
1088	0,849	1131	0,879	1174	0,901	1217	0,925	1260	0,959
1089	0,849	1132	0,880	1175	0,902	1218	0,925	1261	0,959
1090	0,850	1133	0,880	1176	0,905	1219	0,925	1262	0,961
1091	0,850	1134	0,880	1177	0,905	1220	0,928	1263	0,961
1092	0,853	1135	0,881	1178	0,905	1221	0,928	1264	0,961
1093	0,853	1136	0,882	1179	0,905	1222	0,929	1265	0,962
1094	0,854	1137	0,883	1180	0,905	1223	0,930	1266	0,963
1095	0,854	1138	0,883	1181	0,906	1224	0,930	1267	0,963
1096	0,856	1139	0,886	1182	0,908	1225	0,932	1268	0,964
1097	0,856	1140	0,888	1183	0,908	1226	0,934	1269	0,965
1098	0,857	1141	0,888	1184	0,909	1227	0,935	1270	0,966

(Tab. 12 pokračování)

N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)
1271	0,967	1314	0,996	1357	1,027	1400	1,071	1443	1,117
1272	0,967	1315	0,997	1358	1,028	1401	1,075	1444	1,117
1273	0,968	1316	0,999	1359	1,030	1402	1,075	1445	1,119
1274	0,968	1317	0,999	1360	1,032	1403	1,076	1446	1,119
1275	0,969	1318	1,000	1361	1,034	1404	1,079	1447	1,120
1276	0,971	1319	1,000	1362	1,034	1405	1,081	1448	1,120
1277	0,971	1320	1,001	1363	1,034	1406	1,081	1449	1,120
1278	0,973	1321	1,001	1364	1,037	1407	1,083	1450	1,120
1279	0,973	1322	1,001	1365	1,037	1408	1,083	1451	1,121
1280	0,973	1323	1,001	1366	1,037	1409	1,083	1452	1,125
1281	0,976	1324	1,002	1367	1,038	1410	1,084	1453	1,128
1282	0,976	1325	1,002	1368	1,038	1411	1,085	1454	1,129
1283	0,979	1326	1,007	1369	1,040	1412	1,085	1455	1,131
1284	0,979	1327	1,007	1370	1,041	1413	1,086	1456	1,132
1285	0,980	1328	1,012	1371	1,042	1414	1,087	1457	1,132
1286	0,981	1329	1,012	1372	1,046	1415	1,089	1458	1,132
1287	0,981	1330	1,013	1373	1,046	1416	1,090	1459	1,133
1288	0,982	1331	1,015	1374	1,048	1417	1,090	1460	1,134
1289	0,982	1332	1,015	1375	1,049	1418	1,090	1461	1,135
1290	0,982	1333	1,015	1376	1,049	1419	1,091	1462	1,135
1291	0,983	1334	1,015	1377	1,050	1420	1,091	1463	1,135
1292	0,984	1335	1,015	1378	1,052	1421	1,091	1464	1,137
1293	0,985	1336	1,016	1379	1,052	1422	1,092	1465	1,137
1294	0,985	1337	1,016	1380	1,053	1423	1,093	1466	1,139
1295	0,985	1338	1,017	1381	1,055	1424	1,093	1467	1,139
1296	0,986	1339	1,017	1382	1,056	1425	1,094	1468	1,140
1297	0,986	1340	1,017	1383	1,056	1426	1,094	1469	1,141
1298	0,987	1341	1,017	1384	1,058	1427	1,094	1470	1,143
1299	0,988	1342	1,018	1385	1,059	1428	1,095	1471	1,145
1300	0,988	1343	1,018	1386	1,059	1429	1,095	1472	1,145
1301	0,988	1344	1,019	1387	1,059	1430	1,096	1473	1,146
1302	0,988	1345	1,020	1388	1,062	1431	1,096	1474	1,147
1303	0,989	1346	1,020	1389	1,064	1432	1,098	1475	1,147
1304	0,990	1347	1,020	1390	1,064	1433	1,102	1476	1,148
1305	0,990	1348	1,020	1391	1,064	1434	1,102	1477	1,148
1306	0,991	1349	1,021	1392	1,064	1435	1,105	1478	1,150
1307	0,992	1350	1,021	1393	1,066	1436	1,105	1479	1,151
1308	0,993	1351	1,022	1394	1,066	1437	1,107	1480	1,152
1309	0,993	1352	1,022	1395	1,067	1438	1,109	1481	1,154
1310	0,993	1353	1,024	1396	1,067	1439	1,111	1482	1,156
1311	0,994	1354	1,024	1397	1,067	1440	1,111	1483	1,157
1312	0,996	1355	1,026	1398	1,069	1441	1,114	1484	1,157
1313	0,996	1356	1,026	1399	1,070	1442	1,117	1485	1,157

(Tab. 12 pokračování)

N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)	N	D (mm)
1486	1,157	1529	1,217	1572	1,269	1615	1,359	1658	1,461
1487	1,158	1530	1,218	1573	1,270	1616	1,360	1659	1,465
1488	1,159	1531	1,218	1574	1,271	1617	1,367	1660	1,470
1489	1,161	1532	1,221	1575	1,271	1618	1,369	1661	1,474
1490	1,161	1533	1,221	1576	1,273	1619	1,369	1662	1,479
1491	1,162	1534	1,222	1577	1,273	1620	1,373	1663	1,480
1492	1,162	1535	1,223	1578	1,273	1621	1,374	1664	1,480
1493	1,163	1536	1,227	1579	1,277	1622	1,377	1665	1,481
1494	1,164	1537	1,231	1580	1,279	1623	1,378	1666	1,483
1495	1,165	1538	1,231	1581	1,283	1624	1,378	1667	1,484
1496	1,166	1539	1,231	1582	1,284	1625	1,384	1668	1,486
1497	1,168	1540	1,234	1583	1,284	1626	1,386	1669	1,491
1498	1,173	1541	1,239	1584	1,288	1627	1,390	1670	1,492
1499	1,176	1542	1,240	1585	1,290	1628	1,392	1671	1,493
1500	1,181	1543	1,241	1586	1,293	1629	1,398	1672	1,494
1501	1,184	1544	1,241	1587	1,296	1630	1,399	1673	1,498
1502	1,184	1545	1,242	1588	1,300	1631	1,399	1674	1,498
1503	1,186	1546	1,243	1589	1,304	1632	1,402	1675	1,501
1504	1,186	1547	1,244	1590	1,305	1633	1,404	1676	1,507
1505	1,186	1548	1,244	1591	1,305	1634	1,405	1677	1,508
1506	1,186	1549	1,244	1592	1,308	1635	1,407	1678	1,509
1507	1,188	1550	1,244	1593	1,310	1636	1,407	1679	1,511
1508	1,189	1551	1,246	1594	1,312	1637	1,407	1680	1,514
1509	1,189	1552	1,246	1595	1,312	1638	1,410	1681	1,514
1510	1,190	1553	1,249	1596	1,314	1639	1,412	1682	1,515
1511	1,193	1554	1,250	1597	1,317	1640	1,415	1683	1,524
1512	1,194	1555	1,252	1598	1,321	1641	1,420	1684	1,526
1513	1,196	1556	1,253	1599	1,324	1642	1,423	1685	1,526
1514	1,197	1557	1,254	1600	1,326	1643	1,425	1686	1,527
1515	1,197	1558	1,254	1601	1,327	1644	1,426	1687	1,534
1516	1,197	1559	1,254	1602	1,329	1645	1,431	1688	1,537
1517	1,198	1560	1,256	1603	1,330	1646	1,432	1689	1,539
1518	1,199	1561	1,258	1604	1,331	1647	1,433	1690	1,543
1519	1,199	1562	1,258	1605	1,332	1648	1,433	1691	1,544
1520	1,200	1563	1,260	1606	1,335	1649	1,437	1692	1,548
1521	1,203	1564	1,260	1607	1,336	1650	1,440	1693	1,559
1522	1,206	1565	1,261	1608	1,339	1651	1,440	1694	1,565
1523	1,207	1566	1,261	1609	1,340	1652	1,444	1695	1,579
1524	1,208	1567	1,262	1610	1,343	1653	1,448	1696	1,588
1525	1,208	1568	1,264	1611	1,346	1654	1,450	1697	1,591
1526	1,215	1569	1,265	1612	1,349	1655	1,452	1698	1,595
1527	1,215	1570	1,267	1613	1,352	1656	1,455	1699	1,599
1528	1,216	1571	1,268	1614	1,356	1657	1,458	1700	1,600

(Tab. 12 pokračování)

N	D (mm)	N	D (mm)
1701	1,601	1744	1,909
1702	1,619	1745	1,916
1703	1,620	1746	1,921
1704	1,622	1747	1,937
1705	1,629	1748	1,937
1706	1,630	1749	1,940
1707	1,633	1750	1,969
1708	1,647	1751	1,995
1709	1,652	1752	2,000
1710	1,658	1753	2,003
1711	1,659	1754	2,015
1712	1,660	1755	2,018
1713	1,660	1756	2,058
1714	1,670	1757	2,070
1715	1,678	1758	2,131
1716	1,679	1759	2,136
1717	1,694	1760	2,163
1718	1,700	1761	2,164
1719	1,715	1762	2,200
1720	1,728	1763	2,204
1721	1,733	1764	2,344
1722	1,746	1765	2,358
1723	1,747	1766	2,362
1724	1,748	1767	2,385
1725	1,749	1768	2,391
1726	1,754	1769	2,431
1727	1,764	1770	2,638
1728	1,775	1771	2,689
1729	1,777	1772	2,733
1730	1,780	1773	2,912
1731	1,781		
1732	1,788		
1733	1,799		
1734	1,803		
1735	1,823		
1736	1,827		
1737	1,831		
1738	1,855		
1739	1,872		
1740	1,876		
1741	1,892		
1742	1,893		
1743	1,898		

Tab. 13 Průměrná data radiálních a tangenciálních rychlostí a jejich vektorový součet z experimentálně získaných hodnot v jednotlivých bodech; kdy X , Y , Z jsou souřadnicové body, v_R je radiální rychlost kapaliny, σ_R směrodatná odchylka radiální rychlosti, v_T je tangenciální rychlost kapaliny, σ_T směrodatná odchylka tangenciální rychlosti a v_{RR} představuje vektorový součet a tedy i reprezentativní radiální rychlost kapaliny

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	v_R (m·s ⁻¹)	σ_R (m·s ⁻¹)	v_T (m·s ⁻¹)	σ_T (m·s ⁻¹)	v_{RR} (m·s ⁻¹)
110	0	0	-4,107	3,693	-0,082	0,852	4,107
115	0	0	-2,676	3,358	-0,122	0,821	2,678
120	0	0	-3,468	3,684	-0,150	0,820	3,471
125	0	0	-3,061	3,541	-0,146	0,663	3,064
130	0	0	-2,742	3,250	-0,099	0,622	2,744
135	0	0	-3,419	3,580	-0,092	0,537	3,420
140	0	0	-2,507	3,040	-0,107	0,574	2,509
145	0	0	-2,308	2,862	-0,085	0,457	2,309
150	0	0	-1,901	2,466	-0,082	0,375	1,903
155	0	0	-2,105	2,833	-0,093	0,394	2,107
160	0	0	-1,411	1,890	-0,081	0,474	1,413
165	0	0	-1,605	2,169	-0,100	0,315	1,608
145	-80	0	-3,944	2,483	-0,091	0,514	3,945
145	-75	0	-2,942	2,427	-0,129	0,368	2,945
145	-70	0	-1,218	1,420	-0,035	0,305	1,218
145	-65	0	-1,087	1,174	-0,090	0,349	1,091
145	-60	0	-1,770	2,200	-0,068	0,482	1,771
145	-55	0	-1,478	1,887	-0,077	0,448	1,480
145	-50	0	-1,580	2,026	-0,066	0,487	1,581
145	-45	0	-1,187	1,559	-0,047	0,456	1,188
145	-40	0	-1,170	1,697	-0,052	0,526	1,171
145	-35	0	-1,411	1,981	-0,039	0,363	1,411
145	-30	0	-1,219	1,680	-0,055	0,423	1,220
145	-25	0	-1,851	2,562	-0,036	0,348	1,851
145	-20	0	-1,798	2,428	-0,032	0,406	1,798
145	-15	0	-2,239	2,876	-0,044	0,433	2,239
145	-10	0	-1,729	2,392	-0,051	0,547	1,730
145	-5	0	-2,501	3,052	-0,043	0,541	2,502
145	0	0	-2,492	3,076	-0,029	0,373	2,492
145	5	0	-2,434	3,010	-0,066	0,496	2,435
145	10	0	-3,573	3,268	-0,068	0,438	3,574
145	15	0	-3,585	3,395	-0,056	0,461	3,586
145	20	0	-4,333	3,150	-0,063	0,472	4,333
145	25	0	-4,043	3,165	-0,051	0,356	4,044
145	30	0	-2,255	2,779	-0,074	0,418	2,256
145	35	0	-1,841	2,314	-0,110	0,421	1,844
145	40	0	-2,897	2,700	-0,087	0,419	2,898
145	45	0	-2,014	2,591	-0,094	0,511	2,016
145	50	0	-2,506	2,709	-0,082	0,372	2,508
145	55	0	-1,659	1,932	-0,128	0,494	1,664

(Tab. 13 pokračování)

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	v_R (m·s ⁻¹)	σ_R (m·s ⁻¹)	v_T (m·s ⁻¹)	σ_T (m·s ⁻¹)	v_{RR} (m·s ⁻¹)
145	60	0	-3,067	2,429	-0,107	0,367	3,068
145	65	0	-2,539	2,227	-0,084	0,466	2,540
145	70	0	-3,097	2,778	-0,114	0,393	3,099
145	75	0	-3,296	2,407	-0,073	0,373	3,296
145	80	0	-1,882	1,798	-0,108	0,432	1,886
110	0	10	-7,274	2,171	0,026	0,735	7,274
115	0	10	-7,276	2,092	-0,033	0,944	7,276
120	0	10	-7,116	2,318	-0,004	0,908	7,116
125	0	10	-6,941	2,474	-0,022	0,856	6,941
130	0	10	-6,741	2,582	-0,051	0,792	6,742
135	0	10	-6,148	2,967	-0,013	0,769	6,148
140	0	10	-5,974	3,024	-0,052	0,731	5,974
145	0	10	-5,432	3,248	-0,047	0,640	5,432
150	0	10	-5,205	3,201	-0,062	0,697	5,206
155	0	10	-4,582	3,339	-0,033	0,544	4,582
160	0	10	-3,793	3,221	-0,052	0,439	3,793
165	0	10	-3,972	3,170	-0,041	0,588	3,973
145	-80	10	-4,813	1,970	0,145	1,033	4,815
145	-75	10	-4,642	2,290	0,074	0,796	4,643
145	-70	10	-5,041	2,238	0,110	0,865	5,042
145	-65	10	-5,718	2,078	0,149	0,930	5,720
145	-60	10	-6,479	1,992	0,194	0,933	6,482
145	-55	10	-6,914	1,822	0,307	1,124	6,921
145	-50	10	-7,029	1,681	0,400	1,306	7,040
145	-45	10	-6,390	2,048	0,360	1,350	6,400
145	-40	10	-6,187	2,091	0,166	0,928	6,189
145	-35	10	-5,789	2,437	0,065	0,614	5,790
145	-30	10	-5,330	2,457	0,030	0,669	5,330
145	-25	10	-5,706	2,450	0,013	0,722	5,706
145	-20	10	-5,254	2,662	-0,008	0,631	5,254
145	-15	10	-4,867	2,981	-0,032	0,624	4,867
145	-10	10	-5,244	3,318	-0,077	0,545	5,245
145	-5	10	-4,954	3,478	-0,041	0,574	4,954
145	0	10	-5,396	3,179	-0,042	0,700	5,396
145	5	10	-5,805	3,082	-0,049	0,645	5,805
145	10	10	-5,599	3,146	-0,052	0,670	5,599
145	15	10	-5,206	3,309	-0,053	0,783	5,207
145	20	10	-5,433	3,129	-0,064	0,645	5,433
145	25	10	-5,290	3,109	-0,054	0,712	5,290
145	30	10	-5,542	2,810	-0,029	0,591	5,542
145	35	10	-4,951	3,011	-0,093	0,704	4,952
145	40	10	-5,077	2,854	-0,039	0,644	5,077
145	45	10	-5,362	2,484	-0,081	0,617	5,363
145	50	10	-5,656	2,222	-0,051	0,653	5,657

(Tab. 13 pokračování)

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	v_R (m·s ⁻¹)	σ_R (m·s ⁻¹)	v_T (m·s ⁻¹)	σ_T (m·s ⁻¹)	v_{RR} (m·s ⁻¹)
145	55	10	-5,281	2,242	-0,067	0,661	5,282
145	60	10	-4,891	2,355	-0,101	0,603	4,892
145	65	10	-5,117	2,039	-0,090	0,721	5,118
145	70	10	-4,960	2,147	-0,107	0,816	4,961
145	75	10	-4,996	2,072	-0,172	0,835	4,999
145	80	10	-4,700	2,180	-0,189	0,851	4,704
110	0	20	-6,840	2,316	-0,122	0,678	6,841
115	0	20	-7,238	1,959	-0,204	0,951	7,241
120	0	20	-6,829	2,332	-0,120	0,642	6,830
125	0	20	-6,888	2,381	-0,100	0,638	6,889
130	0	20	-6,863	2,334	-0,085	0,534	6,864
135	0	20	-6,662	2,413	-0,106	0,645	6,663
140	0	20	-6,547	2,311	-0,087	0,698	6,547
145	0	20	-6,405	2,233	-0,086	0,798	6,405
150	0	20	-6,380	2,154	-0,073	0,726	6,380
155	0	20	-6,267	2,248	-0,068	0,758	6,268
160	0	20	-6,211	2,228	-0,060	0,810	6,211
165	0	20	-6,085	2,223	-0,053	0,701	6,086
145	-80	20	-5,841	1,973	3,362	2,323	6,739
145	-75	20	-5,674	1,866	3,483	2,472	6,658
145	-70	20	-5,597	1,873	2,989	2,578	6,345
145	-65	20	-5,688	1,741	3,014	2,444	6,437
145	-60	20	-5,647	1,849	1,932	2,386	5,969
145	-55	20	-5,732	2,278	1,149	1,976	5,846
145	-50	20	-6,358	2,424	0,803	1,575	6,408
145	-45	20	-6,984	2,090	1,079	1,669	7,066
145	-40	20	-7,304	1,903	0,926	1,608	7,363
145	-35	20	-7,529	1,672	1,351	1,407	7,649
145	-30	20	-7,415	1,832	0,995	1,442	7,481
145	-25	20	-6,815	2,277	0,454	1,175	6,830
145	-20	20	-6,333	2,433	0,161	0,877	6,335
145	-15	20	-5,944	2,251	-0,027	0,895	5,944
145	-10	20	-6,503	2,100	-0,102	1,023	6,503
145	-5	20	-6,365	2,347	-0,043	0,653	6,365
145	0	20	-6,110	2,705	-0,065	0,521	6,111
145	5	20	-6,028	2,710	-0,059	0,548	6,028
145	10	20	-6,380	2,586	-0,089	0,692	6,381
145	15	20	-6,116	2,763	-0,132	0,925	6,117
145	20	20	-6,233	2,653	-0,111	0,812	6,234
145	25	20	-6,068	2,703	-0,120	0,845	6,069
145	30	20	-5,937	2,587	-0,123	0,854	5,938
145	35	20	-5,789	2,651	-0,112	0,809	5,790
145	40	20	-5,819	2,472	-0,114	0,793	5,820
145	45	20	-5,784	2,379	-0,123	0,790	5,785

(Tab. 13 pokračování)

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	v_R (m·s ⁻¹)	σ_R (m·s ⁻¹)	v_T (m·s ⁻¹)	σ_T (m·s ⁻¹)	v_{RR} (m·s ⁻¹)
145	50	20	-5,659	2,330	-0,120	0,811	5,660
145	55	20	-5,373	2,231	-0,108	0,822	5,374
145	60	20	-5,224	2,249	-0,137	0,869	5,225
145	65	20	-5,251	2,147	-0,198	0,985	5,255
145	70	20	-5,148	2,038	-0,219	1,032	5,153
145	75	20	-5,103	2,037	-0,238	1,082	5,108
145	80	20	-4,856	1,904	-0,218	1,084	4,861
110	0	30	-7,171	1,761	-0,077	0,740	7,171
115	0	30	-7,393	1,714	-0,101	0,764	7,394
120	0	30	-7,395	1,557	-0,143	0,732	7,397
125	0	30	-7,307	1,612	-0,137	0,815	7,308
130	0	30	-7,214	1,558	-0,156	0,842	7,216
135	0	30	-7,150	1,564	-0,166	0,906	7,152
140	0	30	-7,065	1,579	-0,194	1,005	7,067
145	0	30	-7,008	1,603	-0,190	1,125	7,010
150	0	30	-6,928	1,610	-0,230	1,294	6,932
155	0	30	-6,814	1,797	-0,306	1,927	6,821
160	0	30	-6,768	1,777	-0,326	2,146	6,776
165	0	30	-6,809	1,777	-0,374	2,134	6,819
145	-80	30	-5,960	1,954	1,163	1,967	6,073
145	-75	30	-6,006	2,004	0,914	1,977	6,075
145	-70	30	-5,853	2,018	0,771	1,872	5,903
145	-65	30	-5,831	1,954	0,648	1,778	5,867
145	-60	30	-5,847	1,791	0,801	1,935	5,902
145	-55	30	-5,827	1,688	1,166	2,227	5,943
145	-50	30	-5,896	1,911	1,003	2,098	5,981
145	-45	30	-6,393	2,240	0,487	1,545	6,412
145	-40	30	-6,831	2,115	0,242	1,144	6,835
145	-35	30	-7,172	2,058	0,147	1,099	7,174
145	-30	30	-7,553	2,217	0,392	1,396	7,563
145	-25	30	-7,426	1,803	0,518	1,307	7,445
145	-20	30	-7,176	1,927	0,305	1,074	7,183
145	-15	30	-6,708	2,164	0,146	1,101	6,710
145	-10	30	-6,311	1,976	-0,157	1,311	6,312
145	-5	30	-6,885	1,684	-0,407	1,651	6,897
145	0	30	-6,905	1,868	-0,233	1,429	6,909
145	5	30	-7,046	1,980	-0,520	1,530	7,065
145	10	30	-7,024	1,859	-0,818	1,718	7,071
145	15	30	-7,151	1,807	-1,278	1,863	7,264
145	20	30	-6,860	1,980	-1,719	2,060	7,072
145	25	30	-6,780	1,934	-2,019	2,100	7,074
145	30	30	-6,711	1,962	-2,238	2,153	7,074
145	35	30	-6,536	1,990	-2,424	2,218	6,971
145	40	30	-6,383	2,055	-2,692	2,294	6,928

(Tab. 13 pokračování)

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	v_R (m·s ⁻¹)	σ_R (m·s ⁻¹)	v_T (m·s ⁻¹)	σ_T (m·s ⁻¹)	v_{RR} (m·s ⁻¹)
145	45	30	-6,268	2,040	-2,855	2,388	6,888
145	50	30	-6,116	2,011	-3,113	2,410	6,862
145	55	30	-5,998	1,967	-3,415	2,421	6,902
145	60	30	-5,795	1,986	-3,566	2,432	6,804
145	65	30	-5,620	1,963	-3,891	2,448	6,835
145	70	30	-5,453	1,840	-4,094	2,483	6,819
145	75	30	-5,388	1,819	-4,263	2,436	6,870
145	80	30	-5,235	1,823	-4,325	2,438	6,791
110	0	40	-8,264	1,873	-0,084	0,868	8,264
115	0	40	-8,185	1,798	-0,082	0,840	8,185
120	0	40	-8,122	1,853	-0,153	1,022	8,123
125	0	40	-8,067	1,941	-0,184	1,165	8,069
130	0	40	-8,013	1,981	-0,209	1,228	8,016
135	0	40	-7,905	1,975	-0,208	1,271	7,908
140	0	40	-7,777	2,037	-0,173	1,280	7,779
145	0	40	-7,651	1,905	-0,144	1,251	7,652
150	0	40	-7,475	1,907	-0,099	1,230	7,475
155	0	40	-7,397	1,895	-0,104	1,410	7,397
160	0	40	-7,306	1,871	-0,101	1,527	7,307
165	0	40	-7,220	1,924	-0,104	1,810	7,221
145	-80	40	-3,762	2,497	0,426	1,371	3,786
145	-75	40	-3,366	2,596	0,273	1,141	3,377
145	-70	40	-3,350	2,813	0,231	1,088	3,358
145	-65	40	-4,281	3,183	0,344	1,255	4,295
145	-60	40	-5,117	3,188	0,502	1,425	5,142
145	-55	40	-5,937	3,055	0,446	1,513	5,954
145	-50	40	-6,773	2,710	0,724	1,758	6,811
145	-45	40	-6,281	2,514	0,517	1,391	6,302
145	-40	40	-5,387	2,791	0,575	1,363	5,418
145	-35	40	-4,779	2,812	0,313	1,004	4,789
145	-30	40	-5,588	2,701	0,138	0,849	5,590
145	-25	40	-6,722	2,549	0,278	1,270	6,727
145	-20	40	-6,607	2,569	0,237	1,166	6,612
145	-15	40	-6,960	2,469	0,062	0,899	6,960
145	-10	40	-7,502	1,949	-0,006	0,790	7,502
145	-5	40	-7,725	1,890	0,004	0,941	7,725
145	0	40	-7,614	1,978	-0,123	1,318	7,615
145	5	40	-7,646	1,936	-0,334	1,522	7,653
145	10	40	-7,634	1,863	-0,433	1,627	7,646
145	15	40	-7,468	1,968	-0,525	1,671	7,487
145	20	40	-7,336	1,933	-0,621	1,846	7,363
145	25	40	-7,147	2,000	-0,635	1,845	7,175
145	30	40	-6,967	2,016	-0,709	1,896	7,003
145	35	40	-6,700	2,070	-0,740	1,945	6,740

(Tab. 13 pokračování)

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	v_R (m·s ⁻¹)	σ_R (m·s ⁻¹)	v_T (m·s ⁻¹)	σ_T (m·s ⁻¹)	v_{RR} (m·s ⁻¹)
145	40	40	-6,461	1,999	-0,867	2,056	6,519
145	45	40	-6,379	2,004	-0,991	2,127	6,455
145	50	40	-6,296	1,999	-1,055	2,202	6,384
145	55	40	-5,967	1,963	-1,171	2,267	6,081
145	60	40	-5,632	1,961	-1,470	2,516	5,820
145	65	40	-5,469	1,851	-1,720	2,676	5,733
145	70	40	-5,565	1,778	-2,184	2,867	5,978
145	75	40	-5,677	1,746	-2,582	2,826	6,237
145	80	40	-5,445	1,796	-2,656	2,853	6,059
110	0	50	-7,876	1,495	-0,035	0,625	7,876
115	0	50	-7,784	1,374	-0,033	0,617	7,784
120	0	50	-7,741	1,408	-0,033	0,525	7,742
125	0	50	-7,710	1,469	-0,033	0,614	7,710
130	0	50	-7,647	1,511	-0,029	0,564	7,647
135	0	50	-7,648	1,495	-0,021	0,589	7,649
140	0	50	-7,561	1,653	-0,007	0,568	7,561
145	0	50	-7,585	1,607	-0,012	0,704	7,585
150	0	50	-7,508	1,792	-0,004	0,671	7,508
155	0	50	-7,404	1,970	0,006	0,561	7,404
160	0	50	-7,203	2,234	0,022	0,927	7,203
165	0	50	-7,163	2,175	-0,007	0,908	7,163
145	-80	50	-3,024	2,782	0,110	0,759	3,026
145	-75	50	-2,023	2,342	0,082	0,557	2,025
145	-70	50	-1,543	2,039	0,027	0,444	1,543
145	-65	50	-1,612	2,003	-0,006	0,455	1,612
145	-60	50	-2,380	2,940	-0,029	0,492	2,381
145	-55	50	-4,438	3,246	0,060	0,768	4,438
145	-50	50	-6,080	2,378	0,482	1,354	6,099
145	-45	50	-6,824	1,400	0,518	1,303	6,844
145	-40	50	-6,511	2,104	0,094	0,680	6,512
145	-35	50	-6,224	2,122	0,082	0,538	6,224
145	-30	50	-6,085	2,287	0,117	0,735	6,086
145	-25	50	-6,616	1,883	0,053	0,578	6,617
145	-20	50	-6,798	1,801	0,131	0,835	6,800
145	-15	50	-7,068	1,705	0,053	0,610	7,068
145	-10	50	-7,333	1,329	-0,017	0,546	7,333
145	-5	50	-7,538	1,140	0,002	0,409	7,538
145	0	50	-7,568	1,622	-0,018	0,581	7,568
145	5	50	-7,540	1,655	-0,071	0,760	7,540
145	10	50	-7,501	1,630	-0,073	0,850	7,501
145	15	50	-7,438	1,898	-0,173	1,024	7,440
145	20	50	-7,348	1,855	-0,228	1,120	7,351
145	25	50	-7,253	1,968	-0,216	1,202	7,256
145	30	50	-6,986	2,257	-0,302	1,313	6,992

(Tab. 13 pokračování)

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	v_R (m·s ⁻¹)	σ_R (m·s ⁻¹)	v_T (m·s ⁻¹)	σ_T (m·s ⁻¹)	v_{RR} (m·s ⁻¹)
145	35	50	-6,878	2,163	-0,331	1,260	6,886
145	40	50	-6,611	2,328	-0,408	1,451	6,623
145	45	50	-6,128	2,468	-0,474	1,507	6,147
145	50	50	-5,860	2,463	-0,567	1,658	5,887
145	55	50	-5,556	2,550	-0,638	1,787	5,593
145	60	50	-5,107	2,644	-0,672	1,861	5,151
145	65	50	-4,874	2,526	-0,836	2,109	4,945
145	70	50	-4,811	2,443	-1,019	2,272	4,918
145	75	50	-4,898	2,324	-0,965	2,157	4,992
145	80	50	-4,704	2,345	-0,993	2,128	4,808
110	0	60	-7,315	1,399	-0,112	0,688	7,316
115	0	60	-7,374	1,364	-0,112	0,735	7,375
120	0	60	-7,266	1,345	-0,149	0,785	7,268
125	0	60	-7,209	1,355	-0,089	0,644	7,210
130	0	60	-7,227	1,364	-0,055	0,560	7,227
135	0	60	-7,252	1,423	-0,035	0,478	7,252
140	0	60	-7,285	1,481	-0,026	0,406	7,285
145	0	60	-7,285	1,581	-0,032	0,508	7,285
150	0	60	-7,190	1,929	-0,018	0,520	7,190
155	0	60	-7,137	1,984	0,020	0,435	7,137
160	0	60	-7,143	2,270	0,009	0,623	7,143
165	0	60	-6,975	2,483	0,025	0,586	6,975
145	-80	60	-4,575	2,541	-0,049	0,764	4,575
145	-75	60	-4,786	2,657	0,023	0,838	4,786
145	-70	60	-6,110	2,307	0,183	1,254	6,113
145	-65	60	-6,277	1,781	0,553	1,458	6,301
145	-60	60	-6,519	1,818	0,247	1,269	6,524
145	-55	60	-6,399	1,625	0,298	1,115	6,406
145	-50	60	-5,136	2,882	0,114	0,694	5,137
145	-45	60	-5,083	2,983	0,054	0,601	5,083
145	-40	60	-5,234	2,772	0,072	0,540	5,235
145	-35	60	-5,833	2,515	0,055	0,597	5,833
145	-30	60	-6,747	1,840	0,198	0,917	6,750
145	-25	60	-7,120	1,389	0,142	0,942	7,122
145	-20	60	-7,397	1,342	0,023	0,455	7,397
145	-15	60	-7,546	1,205	0,015	0,372	7,546
145	-10	60	-7,439	1,243	0,004	0,404	7,439
145	-5	60	-7,436	1,413	0,004	0,453	7,436
145	0	60	-7,397	1,414	-0,016	0,386	7,397
145	5	60	-7,136	1,615	-0,041	0,559	7,136
145	10	60	-7,095	1,646	-0,052	0,608	7,095
145	15	60	-7,074	1,566	-0,091	0,699	7,074
145	20	60	-6,753	1,815	-0,101	0,770	6,753
145	25	60	-6,904	1,618	-0,097	0,743	6,905

(Tab. 13 pokračování)

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	v_R (m·s ⁻¹)	σ_R (m·s ⁻¹)	v_T (m·s ⁻¹)	σ_T (m·s ⁻¹)	v_{RR} (m·s ⁻¹)
145	30	60	-6,732	1,852	-0,041	0,833	6,732
145	35	60	-6,243	2,254	-0,044	0,896	6,243
145	40	60	-5,740	2,578	-0,045	1,119	5,740
145	45	60	-5,326	2,644	0,006	1,109	5,326
145	50	60	-4,541	2,948	0,011	1,198	4,541
145	55	60	-4,042	2,962	0,116	1,056	4,043
145	60	60	-3,345	2,700	-0,028	1,301	3,345
145	65	60	-3,568	2,815	-0,098	1,447	3,570
145	70	60	-3,134	2,608	-0,114	1,381	3,136
145	75	60	-2,765	2,272	-0,163	1,288	2,770
145	80	60	-2,938	2,420	-0,254	1,385	2,949
110	0	70	-7,127	1,608	-0,406	1,378	7,139
115	0	70	-7,009	1,574	-0,479	1,461	7,026
120	0	70	-6,989	1,499	-0,492	1,548	7,007
125	0	70	-6,948	1,493	-0,381	1,369	6,958
130	0	70	-6,925	1,516	-0,190	1,122	6,928
135	0	70	-6,982	1,512	-0,092	0,875	6,983
140	0	70	-7,005	1,493	-0,046	0,750	7,005
145	0	70	-6,991	1,526	-0,038	0,649	6,991
150	0	70	-6,958	1,572	-0,040	0,566	6,958
155	0	70	-6,901	1,595	-0,036	0,500	6,901
160	0	70	-6,740	1,742	-0,062	0,594	6,740
165	0	70	-6,718	1,961	-0,076	0,682	6,718
145	-80	70	-4,546	2,033	-0,122	0,945	4,548
145	-75	70	-4,521	2,170	-0,130	0,988	4,523
145	-70	70	-4,950	2,133	0,028	1,110	4,950
145	-65	70	-5,761	1,960	0,166	1,223	5,763
145	-60	70	-6,293	1,491	0,516	1,428	6,314
145	-55	70	-6,603	1,481	0,517	1,451	6,623
145	-50	70	-6,582	1,429	0,246	1,141	6,587
145	-45	70	-6,479	1,527	0,125	0,908	6,480
145	-40	70	-6,535	1,448	0,080	0,742	6,535
145	-35	70	-6,496	1,471	0,203	0,990	6,499
145	-30	70	-6,724	1,472	0,183	0,919	6,726
145	-25	70	-6,910	1,428	0,158	0,976	6,912
145	-20	70	-7,080	1,352	0,039	0,674	7,081
145	-15	70	-7,175	1,285	0,027	0,591	7,175
145	-10	70	-6,945	1,402	0,031	0,655	6,945
145	-5	70	-7,044	1,452	0,003	0,615	7,044
145	0	70	-6,939	1,497	-0,031	0,589	6,939
145	5	70	-6,675	1,529	-0,114	0,720	6,676
145	10	70	-6,813	1,444	-0,112	0,674	6,814
145	15	70	-6,686	1,591	-0,121	0,712	6,687
145	20	70	-6,572	1,423	-0,148	0,866	6,573

(Tab. 13 pokračování)

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	v_R (m·s ⁻¹)	σ_R (m·s ⁻¹)	v_T (m·s ⁻¹)	σ_T (m·s ⁻¹)	v_{RR} (m·s ⁻¹)
145	25	70	-6,711	1,573	-0,143	0,877	6,713
145	30	70	-6,546	1,586	-0,139	0,881	6,547
145	35	70	-6,087	1,629	-0,141	0,945	6,089
145	40	70	-6,128	1,594	-0,173	1,087	6,131
145	45	70	-6,091	1,730	-0,054	0,999	6,092
145	50	70	-5,589	2,044	-0,009	1,133	5,589
145	55	70	-5,446	2,080	-0,104	1,377	5,447
145	60	70	-5,149	2,523	-0,139	1,358	5,151
145	65	70	-4,371	2,382	-0,086	1,438	4,371
145	70	70	-4,016	2,499	0,006	1,124	4,016
145	75	70	-3,213	2,283	-0,022	1,069	3,213
145	80	70	-3,107	2,171	-0,076	1,097	3,108

12 VÝZKUMNÁ ČINNOST AUTORA

12.1 PUBLIKACE VZTAHUJÍCÍ SE K DIZERTAČNÍ PRÁCI

KRIŠTOF, Ondřej, Pavel BULEJKO a Tomáš SVĚRÁK. Experimental Study on Spray Breakup in Turbulent Atomization Using a Spiral Nozzle. Processes [online]. 2019, 7(12), 911. Dostupné z: doi:10.3390/pr7120911

KRIŠTOF, O.; SVĚRÁK, T.; KEJÍK, P.; BULEJKO, P.; MAYEROVÁ, K.; KALIVODA, J. Experimental investigation of the breakup of spiral-nozzle-produced liquid curtain for absorption processes. 22nd International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2016 and the 19th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2016. Praha: Czech Society of Chemical Engineering, 2016.

KRIŠTOF, O.; SVĚRÁK, T.; BULEJKO, P.; KEJÍK, P.; KALIVODA, J. Experimental and CFD investigation of gas and liquid phase in scrubber for absorption processes. In 44th International Conference of the Slovak Society of Chemical Engineering. 2017. p. 448-453. ISBN: 978-80-89597-58-1.

KRIŠTOF, O.; SVĚRÁK, T.; BULEJKO, P.; KEJÍK, P.; SIKOROVÁ, K. Pilot-plant shower scrubber for cleaning polluted gas. 22nd international conference on materials and technology. Ljubljana, Slovenia: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana, Lepi pot 11, Ljubljana, Slovenija, 2014. p. 128-128. ISBN: 978-961-92518-7-4.

KRIŠTOF, O.; BULEJKO, P.; SVĚRÁK, T. CFD simulation of a gas phase and spiral nozzle-sprayed liquid in a wet scrubber. 23rd International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2018 Prague. 2018. p. 1-2.

VLASÁK, J.; SVĚRÁK, T.; KRIŠTOF, O.; KALIVODA, J. Poloprovozní plynový scrubber a jeho účinnost. Hotel Jezerka, Seč: CHISA - VŠCHT Praha, 2019. s. 1 (1 s.).

KALIVODA, J.; SVĚRÁK, T.; KRIŠTOF, O.; MAYEROVÁ, K. Removing a CO₂ from air masses by a pilot plant scrubber equipped with a spiral nozzle. 7th Meeting on Chemistry and Life 2018. Book of abstracts. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018. p. 37-37. ISBN: 978-80-214-5488-0.

KALIVODA, J.; SVĚRÁK, T.; KRIŠTOF, O.; MAYEROVÁ, K. Absorption with chemical reaction in pilot-plant scrubber equipped with a spiral nozzle. Prague: ČSCHI, 2018.

KRIŠTOF, O. CFD and Experimental investigation of gas-liquid phase in wet shower scrubber. 10th World Congress of Chemical Engineering - Abstract Book. Barcelona: 2017. p. 1 (1 s.). ISBN: 987-84-697-8629-1.

KALIVODA, J.; SVĚRÁK, T.; KRIŠTOF, O.; MAYEROVÁ, K. Simple mathematical absorption model with system analysis technique. Prague: ČSCHI, 2016.

KRIŠTOF, O.; SVĚRÁK, T.; KEJÍK, P.; BULEJKO, P.; SIKOROVÁ, K. CO₂ absorption to the NaOH solution using pilot-plant wet shower scrubber. 21st International Congress of Chemical Engineering CHISA 2014 and 17th Conference PRES 2014, 23 - 27 August 2014, Praha, Czech Republic, Czech Society of Chemical Engineering. 2014. ISBN: 978-80-02-02555-9.

12.2 OSTATNÍ PUBLIKACE

KALIVODA, J.; SVĚRÁK, T.; ŽŮREK, M.; MAYEROVÁ, K.; KRIŠTOF, O.; BULEJKO, P. Prototyp kontaktorové stěny pro testování separace amoniaku z fugátu. Praha: VŠCHT v Praze, 2019. s. 1 (1 s.).

BULEJKO, P.; KRIŠTOF, O.; DOHNAL, M.; SVĚRÁK, T. Fine/ultrafine particle air filtration and aerosol loading of hollow-fiber membranes: A comparison of mathematical models for the most penetrating particle size and dimensionless permeability with experimental data. *JOURNAL OF MEMBRANE SCIENCE*, 2019, roč. 592, č. 117393, s. 1-11. ISSN: 0376-7388.

BULEJKO, P.; DOHNAL, M.; KRIŠTOF, O.; SVĚRÁK, T. Pressure drop evolution during dust loading of hollow-fiber membranes. In International Conference and Exhibition for Filtration and Separation Technology, Filtech 2019. Kolín n. Rýnem: 2019. p. 1-8. ISBN: 978-3-941655-17-1.

BULEJKO, P.; SVĚRÁK, T.; KRIŠTOF, O.; DOHNAL, M.; ONDRÁČEK, J. Aerosol separation efficiency and pressure drop evolution with intense particle loading of hollow-fiber membranes. 23rd International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2018 Prague. 2018. p. 1 (1 s.).

BULEJKO, P.; DOHNAL, M.; POSPÍŠIL, J.; KRIŠTOF, O.; SVĚRÁK, T.; KEJÍK, P. Air filtration using hollow-fibre membranes for nanoparticle removal. In FILTECH 2018, March 13-15, Cologne – Germany. 2018. p. 1-12. ISBN: 978-3-941655-15-7.

BÓGYIOVÁ, C.; BULEJKO, P.; FEKETE, R.; KEJÍK, P.; KALIVODA, J.; KRIŠTOF, O.; TKACZ, J.; VLASÁK, J.; WASSERBAUER, J.; SVĚRÁK, T. Bulk properties of pyrolysis coke. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Chemistry, 2017. p. 1-44.

SVĚRÁK, T.; BULEJKO, P.; OSTREZI, J.; KRIŠTOF, O.; KALIVODA, J.; KEJÍK, P.; MAYEROVÁ, K.; ADAMČÍK, M. Separation of gaseous air pollutants using membrane contactors. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, vol. 92, no. 1, p. 1-5. ISSN: 1755-1315.

KRIŠTOF, O.; KALIVODA, J.; SVĚRÁK, T. Nízkoteplotní separace plyných polutantů prostřednictvím trubkových tepelných výměníků. 2017. s. 1-10.

BULEJKO, P.; DOHNAL, M.; POSPÍŠIL, J.; KRIŠTOF, O.; KEJÍK, P.; SVĚRÁK, T. Efficiency of hollow-fiber membranes for air filtration of submicron particles. In 44th International Conference of the Slovak Society of Chemical Engineering. 2017. p. 495-499. ISBN: 978-80-89597-58-1.

SVĚRÁK, T.; BULEJKO, P.; KRIŠTOF, O.; KEJÍK, P.; KALIVODA, J.; HORSKÝ, J. Covering ability of aluminum pigments prepared by milling processes. POWDER TECHNOLOGY, 2017, vol. 305, no. 1, p. 396-404. ISSN: 0032-5910.

BULEJKO, P.; SVĚRÁK, T.; DOHNAL, M.; POSPÍŠIL, J.; KRIŠTOF, O.; KEJÍK, P.; KALIVODA, J. Filtrační účinnost membrán na bázi dutých vláken při odstraňování částic ze vzduchu. In Sborník XVII. výroční konference České aerosolové společnosti, 25. – 26. října 2016, Měkulev. Praha: Česká aerosolová společnost, 2016. s. 65-68. ISBN: 978-80-86186-85-6.

KEJÍK, P.; BULEJKO, P.; SVĚRÁK, T.; KRIŠTOF, O.; MAYEROVÁ, K. Self-supported Geopolymer-based Barriers for Filtration Applications. 24th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND TECHNOLOGY. Ljubljana, Slovenia: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, 2016. ISBN: 978-961-94088-0-3.

BULEJKO, P.; SVĚRÁK, T.; DOHNAL, M.; KEJÍK, P.; KRIŠTOF, O.; MAYEROVÁ, K. Air filtration using polymeric hollow-fibre membranes. 22nd International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2016 and the 19th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2016. Praha: Czech Society of Chemical Engineering, 2016.

SVĚRÁK, T.; BULEJKO, P.; MAYEROVÁ, K.; KEJÍK, P.; KRIŠTOF, O.; RAUDENSKÝ, M. Hiding Power of Aluminum Metal Pigments Development in the Ball Mill Grinding Process. Solid State Phenomena, 2016, vol. 244, no. 1, p. 19-25. ISSN: 1662-9779.

HORSKÝ, J.; BROŽOVÁ, T.; LUKS, T.; KEJÍK, P.; KRIŠTOF, O.; BULEJKO, P. Heat Transfer measurement of secondary cooling in continuous casting. 2015. p. 1-119.

KEJÍK, P.; SVĚRÁK, T.; BORGULOVÁ, E.; BULEJKO, P.; KRIŠTOF, O.; MAYEROVÁ, K.; HURYCHOVA, H.; ŠKLUBALOVA, Z.; PECIAR, P. Surfactants grinding activation of clinker. Scientific proceedings, 2015, no. 23, p. 53-56. ISSN: 1338-1954.

SVĚRÁK, T.; BULEJKO, P.; KEJÍK, P.; MAYEROVÁ, K.; KRIŠTOF, O.; RAUDENSKÝ, M. Bulk properties of surface treated limestone powders. In Conference Proceedings 1st International Conference on Applied Mineralogy & Advanced Materials – AMAM2015. Conference Proceedings 1st International Conference on Applied Mineralogy & Advanced Materials - AMAM2015. Digilabs S.a.s., 2015. p. 71-76. ISSN: 2283-5954.

KEJÍK, P.; SVĚRÁK, T.; KRIŠTOF, O.; BULEJKO, P.; MAYEROVÁ, K. Attritor iron content measurement via objective colour determination. 23rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND TECHNOLOGY PROGRAM AND BOOK OF ABSTRACTS. Ljubljana, Lepi pot 11, Ljubljana, Slovenija: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, 2015. p. 125-125. ISBN: 978-961-92518-8-1.

GUZEJ, M.; BARTULI, E.; KRIŠTOF, O. Water jet cooling of aluminium alloy. In METAL 2015, 24rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. Ostrava: TANGER Ltd., 2015. p. 1439-1444. ISBN: 978-80-87294-58-1.

SVĚRÁK, T.; BAKER, C. G. J.; SIKOROVÁ, K.; KEJÍK, P.; BULEJKO, P.; KRIŠTOF, O. Progress of the IR measurement in the area of the fine particulate material water content. International Journal of Environmental Engineering, 2015, vol. 2, no. 1, p. 146-149. ISSN: 2374-1724.

HORSKÝ, J.; BROŽOVÁ, T.; LUKS, T.; KEJÍK, P.; KRIŠTOF, O.; BULEJKO, P. Heat Transfer measurement of secondary cooling in continuous casting. 2015. p. 1-16.

SVĚRÁK, T.; Baker, G. J. CH.; SIKOROVÁ, K.; KEJÍK, P.; BULEJKO, P.; KRIŠTOF, O. Progress of the IR measurement in the area of the fine particulate material water content. In Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Applied Science and Environmental Engineering. USA: Institute of Research Engineers and Doctors, 2014. p. 20-23. ISBN: 978-1-63248-033-0.

KEJÍK, P.; SVĚRÁK, T.; SIKOROVÁ, K.; KRIŠTOF, O.; BULEJKO, P. Coir-based fillers grinding and bulk properties. 22nd international conference on materials and technology. Ljubljana, Slovenia: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana, Lepi pot 11, Ljubljana, Slovenija, 2014. p. 111-111. ISBN: 978-961-92518-7-4.

BULEJKO, P.; SIKOROVÁ, K.; KEJÍK, P.; KRIŠTOF, O.; SVĚRÁK, T. Filtration Membranes Based on Secondary Materials: Preparation, Characterization, and Properties. 22nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND TECHNOLOGY. Ljubljana, Slovenia: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana, Lepi pot 11, Ljubljana, Slovenija, 2014. ISBN: 978-961-92518-7-4.

KEJÍK, P.; SVĚRÁK, T.; SIKOROVÁ, K.; KRIŠTOF, O.; BULEJKO, P. Specific grinding energy and phase changes of the limestone and corundum ground stock in the ultrafine activated comminution process. 21st International Congress of Chemical Engineering CHISA 2014 and 17th Conference PRES 2014, 23 - 27 August 2014, Praha, Czech Republic, Czech Society of Chemical Engineering. 2014. p. 1 (1 s.). ISBN: 978-80-02-02555-9.

BULEJKO, P.; SVĚRÁK, T.; KEJÍK, P.; KRIŠTOF, O.; SIKOROVÁ, K. The potential use of geopolymer-based materials in filtration applications. 21st International Congress of Chemical Engineering CHISA 2014 and 17th Conference PRES 2014, 23 - 27 August 2014, Praha, Czech Republic, Czech Society of Chemical Engineering. 2014. ISBN: 978-80-02-02555-9.

SVĚRÁK, T.; KEJÍK, P.; SLANINA, O.; SIKOROVÁ, K.; BULEJKO, P.; KRIŠTOF, O. Bulk properties of micro-fine ligneous fillers. In 21st International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2014 and 17th Conference PRES 2014, Authors of papers. Praha: Orgit Ltd., 2014. p. 1-10. ISBN: 978-80-02-02555-9.

SVĚRÁK, T.; KEJÍK, P.; SLANINA, O.; KRIŠTOF, O.; SIKOROVÁ, K.; FEKETE, R. Mletí a sypné vlastnosti netypických dřevinových plniv. In Sborník CHISA 2013. 1. Srní: ČSCHI, 2013. s. B2.5-1 (B2.5-10 s.) ISBN: 978-80-02-02500-9.

12.3 PRODUKTY A PATENTY

ŽŮREK, M.; SVĚRÁK, T.; KALIVODA, J.; KRIŠTOF, O.; MVB OPAVA CZ s.r.o., Ostravská 350/2b, Opava, 74770, CZ Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, Brno, 601 90, CZ: Čističky vzduchu. 5887296, průmyslový vzor. (2018)

ŽŮREK, M.; SVĚRÁK, T.; KRIŠTOF, O.: FV/LPTP; Funkční vzorek pilotní jednotky miniaturizované pračky plynů 1. generace. VUT v Brně, FSI. (funkční vzorek)

HORSKÝ, J.; KEJÍK, P.; KRIŠTOF, O.: FV10/LPTP/12/2013; Stend na měření chlazení hliníkových vzorků. LPTP/D3. (funkční vzorek)

HRAZDIL, V.; KRIŠTOF, O.; KEJÍK, P.: FV07/12/2012; Vertikální stend. LPTP/ D3/0010. (funkční vzorek)

12.4 PROJEKTY

TJ02000170, Filtrace nanočástic z 3D tisku pomocí membrán z dutých vláken, zahájení: 01.05.2019, ukončení: 30.04.2021

TH04030198, Odstraňování amoniaku z fugátu bioplynových stanic pomocí membránového kontaktoru., zahájení: 01.01.2019, ukončení: 31.12.2022

Parametry dvoufázového proudění ovlivňující chlazení pevných povrchů, zahájení: 01.01.2017, ukončení: 31.12.2019

TH01030820, Komplexní snížení plynných polutantů "malých" producentů emisí, zahájení: 01.01.2015, ukončení: 31.12.2018

Vliv oxidu na přenos tepla, na výsledné materiálové vlastnosti a na mikrostrukturu, zahájení: 01.01.2014, ukončení: 31.12.2016

12.5 OPONOVANÉ VYSOKOŠKOLSKÉ PRÁCE

HORVÁT, P. Výměna tepla v trubkových výměnících. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2019, 59 s., diplomová práce

HORVÁT, P. Účinnost tepelných výměníků v kryogenních procesech. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2017. 45 s., bakalářská práce

BÓGYIOVÁ, C. Sypné vlastnosti jemných partikulárních materiálů v průmyslové praxi, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2016. 51 s., bakalářská práce