



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VLIV VSTUPNÍ RYCHLOSTI NA PROUDĚNÍ V INTERIÉRU HYDROCYKLONU

THE EFFECT OF THE INLET VELOCITY ON THE FLOW
IN THE INTERIOR OF THE HYDROCYCLONE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Robin Krček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Roman Klas, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Robin Krček**
Studijní program: Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor: Fluidní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Roman Klas, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv vstupní rychlosti na proudění v interiéru hydrocyklonu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proudění v hydrocyklonech je charakteristické základní vírovou strukturou, která vyplňuje značnou část zařízení. Obvodová složka rychlosti, která je s tímto prouděním spojená, závisí na rozměrech cyklonu, rozměrech vortexové trubice a kinetické energii kapaliny ve vstupním průřezu do cyklonu. Diplomová práce prostředky CFD simulace prozkoumá charakter vírové struktury v interiéru hydrocyklonu a posoudí vliv velikosti vstupní rychlosti na uvedené proudění.

Cíle diplomové práce:

Student provede rešerši cyklonů s ohledem na jejich vlastnosti a užití. Následně vytvoří CFD modely hydrocyklonů s proměnnými rozměry vstupní trubice a uskuteční jejich simulaci. Na základě získaných výsledků posoudí vliv vstupní trubice na proudění v interiéru zejména s ohledem na velikost obvodové složky rychlosti. Tyto výsledky uvede následně do souvislostí s rozměry cyklonu ve vstupním prostoru.

Seznam doporučené literatury:

ŠOB, František. Hydromechanika. Brno: CERM, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2037-5.

POCHYLÝ, František. Dynamika tekutinových systémů. Praha: Československá redakce VN MON, 1990. ISBN 80-214-0139-7.

BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. Mechanika kontinua. Vyd. 2., opr. Praha: Academia, 2000. ISBN 80-200-0772-5.

MACUR, Milan. Úvod do analytické mechaniky a mechaniky kontinua. V Brně: VUTIUM, 2010. ISBN 978-802-1439-443.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vlivem vstupní rychlosti na proudění v interiéru hydrocyklonu pomocí numerických simulací. Pomocí CFD modelování bylo analyzováno rozložení tlaku, vývoj vírové struktury a pohyb částic v závislosti na změně vstupních podmínek. Výpočty byly provedeny s využitím pokročilého turbulence modelu a diskrétního sledování částic. Výsledky ukazují, že vyšší vstupní rychlosti vedou ke zvýšení tangenciální rychlosti a účinnosti odlučování. Získané poznatky přispívají k optimalizaci návrhu a provozních parametrů hydrocyklonů.

Klíčová slova

Cyklon, Hydrocyklon, Odlučování částic, Tangenciální rychlost

Abstract

This thesis focuses on the effect of inlet velocity on the internal flow in a hydrocyclone using numerical simulations. CFD modelling was used to analyse pressure distribution, vortex structure development, and particle motion under varying inlet conditions. Simulations were carried out using an advanced turbulence model and discrete particle tracking. The results show that higher inlet velocities increase tangential velocity and improve separation efficiency. The findings contribute to the optimization of hydrocyclone design and operational performance.

Key Words

Cyclone, Hydrocyclone, Particle Separation, Tangential Velocity

Bibliografická citace

KRČEK, Robin. *Vliv vstupní rychlosti na proudění v interiéru hydrocyklonu*. Online, diplomová práce. Roman KLAS (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/162414>.

Prohlášení autora o původnosti práce

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Vliv vstupní rychlosti na proudění v interiéru hydrocyklonu* zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce. Při zpracování práce jsem využil nástrojů generativní AI výhradně k vyhledávání odborných zdrojů a ke stylistickým a jazykovým úpravám textu.

V Brně dne:

.....

Bc. Robin Krček

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Romanu Klasovi, Ph.D. za jeho cenné rady a pomoc při vypracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia.

Obsah

Úvod	10
1 Vírové odlučovače	11
1.1 Charakteristika proudění	12
1.2 Účinky proudění na částice	16
1.3 Účinnost odlučování.....	19
1.4 Konstrukční řešení.....	22
1.5 Průmyslové využití.....	27
2 Popis problému a cíle řešení	33
3 Způsob řešení	34
3.1 Geometrie hydrocyklonu	34
3.2 Tvorba modelu	36
3.3 Tvorba výpočetní sítě	37
3.4 Nastavení numerické simulace	38
4 Výsledky a jejich analýza	48
4.1 Rozložení tangenciální rychlosti	49
4.2 Rozložení axiální a radiální rychlosti.....	57
4.3 Tlakové pole	58
4.4 Účinnost odlučování.....	60
Závěr	63

Úvod

V mnoha průmyslových odvětvích se při zpracování surovin či úpravě kapalin a plynů setkáváme s potřebou separace vícefázových směsí. Jednou z technologií, která nachází široké uplatnění právě při oddělování pevných částic z tekutin, jsou vírové odlučovače. Tato zařízení jsou ceněna zejména pro svou jednoduchou konstrukci, vysokou provozní spolehlivost a schopnost kontinuálního provozu bez nutnosti použití pohyblivých částí. Separace je u nich zajištěna působením odstředivé síly, která vzniká rotací proudícího média uvnitř vírové komory. Vírové odlučovače tak hrají důležitou roli například v těžebním, chemickém, energetickém nebo potravinářském průmyslu.

Přestože princip fungování těchto zařízení je znám již po desetiletí, jejich návrh zůstává značně komplexním úkolem. Proudění uvnitř vírového odlučovače je totiž vysoce turbulentní, vírové a nelineární, přičemž je silně ovlivňováno geometrií zařízení, vstupními podmínkami i vlastnostmi zpracovávané směsi. Pro efektivní návrh a optimalizaci separačního procesu je proto nezbytné důkladně porozumět vnitřnímu proudění a fyzikálním mechanismům, které ovlivňují účinnost odlučování. Jedním z klíčových parametrů, který určuje charakter proudového pole a odstředivých sil ve vírovém odlučovači, je velikost vstupní rychlosti. Ta přímo ovlivňuje tangenciální složku rychlosti, vývoj vírové struktury i tlakové rozložení uvnitř komory, a tím i celkové chování zařízení.

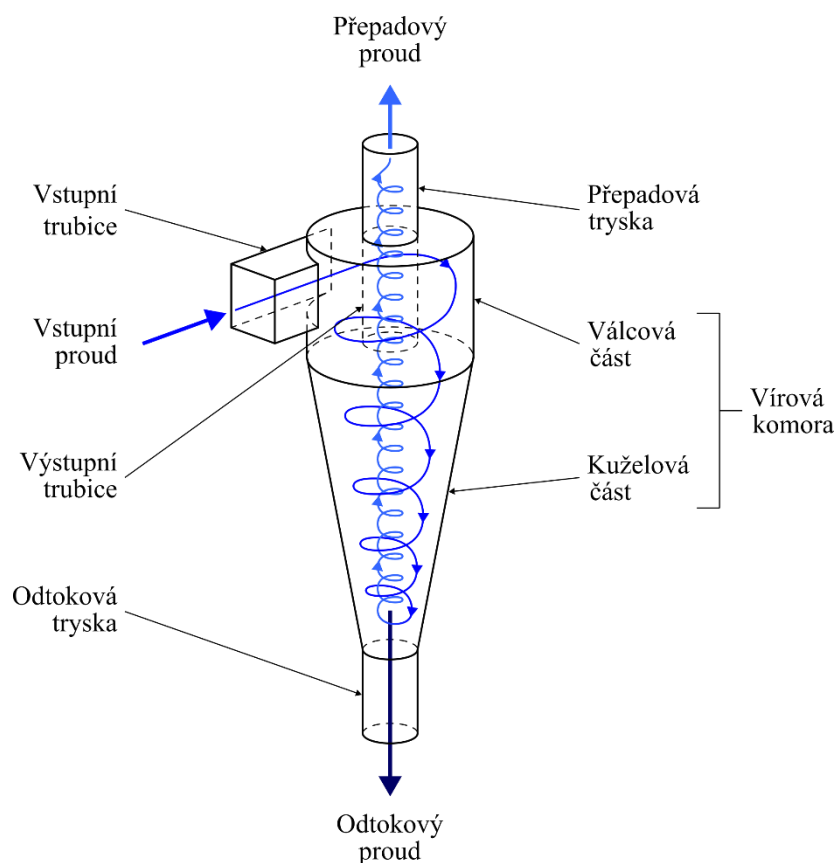
Motivací k vypracování této diplomové práce je snaha přispět k hlubšímu pochopení vlivu vstupní rychlosti na proudění v interiéru hydrocyklonu a identifikovat klíčové souvislosti mezi konstrukčními a provozními parametry. S ohledem na obtížnost experimentálního měření byla zvolena metoda výpočetní dynamiky tekutin (CFD), která umožňuje získat detailní obraz proudového pole, tlakových poměrů i trajektorií částic. Tato metoda je dnes běžně využívána ve výzkumu i průmyslové praxi jako efektivní nástroj pro simulaci složitých proudění.

Hlavním cílem této práce je proto provést systematickou analýzu, jak se mění proudění uvnitř hydrocyklonu při různých vstupních rychlostech, a jak tyto změny ovlivňují odlučování částic. V práci jsou zkoumány různé varianty vstupních podmínek při nominálním objemovém průtoku a posuzován je vliv těchto parametrů na rozložení tlaku, vírové struktury a chování diskrétní fáze. Pozornost je věnována i různým režimům odtoku, které mohou mít významný dopad na rozdělení proudů v zařízení.

Výsledky získané v rámci této diplomové práce mohou přispět ke zefektivnění návrhu hydrocyklonů pro konkrétní aplikace, snížení tlakových ztrát a zvýšení separační účinnosti. Zároveň mohou sloužit jako podklad pro další výzkum v oblasti optimalizace geometrie vírových odlučovačů a aplikace CFD metod v oblasti vícefázových proudění.

1 Vírové odlučovače

Odlučovače jsou technická zařízení sloužící k oddělení rozptýlených částic z proudu nosného média. Princip jejich funkce je založen na působení vnější síly, která způsobí odklonění trajektorie částic od hlavního směru proudění. Mezi tyto síly patří například gravitační, magnetická, elektrostatická či odstředivá. Podle povahy působící síly lze odlučovače rozdělit na gravitační, elektrostatické, mechanické apod.



Obrázek 1 Schéma vírového odlučovače

Vírové odlučovače představují skupinu mechanických odlučovačů, které k separaci částic z plynného nebo kapalného média využívají odstředivou sílu vyvolanou vírovým prouděním směsi. Směs nosného média a částic vstupuje do odlučovače tangenciálně nebo spirálovitě přes vstupní trubici, čímž je uvedena do rotace. Rotující proud se pohybuje ve vírové komoře, která se obvykle skládá z horní válcové části, kde se víření rozvíjí, a dolní kuželové části, která díky zúžení zvyšuje účinnost separace tím, že urychluje proud v obvodovém směru a směřuje částice ke stěnám. Částice s vyšší hustotou se vlivem odstředivých sil pohybují k obvodovým stěnám a klesají do spodní části odlučovače, odkud jsou odváděny skrze odtokovou trysku. Mezitím lehčí nosné médium (plyn nebo kapalina) zůstává v centrální oblasti víru a vystupuje vzhůru přes výstupní trubici (tzv. *vortex finder*) do přepadové trysky, která umožňuje odtok vyčištěné

fáze. Schematické znázornění základního uspořádání vírového odlučovače s vyznačenými hlavními částmi je zobrazeno na obrázku 1.

Rozdíly mezi cyklony a hydrocyklony vyplývají z rozdílných fyzikálních vlastností zpracovávaného média, což se odráží jak v konstrukčním provedení, použitých materiálech i v provozních parametrech. Vzhledem k nízké hustotě plynů je rozdíl mezi hustotou částic a nosného média poměrně velký, což usnadňuje separaci i při nižších odstředivých silách. V případě kapalin je tento rozdíl menší, a proto je pro dosažení srovnatelné separační účinnosti nutné generovat podstatně vyšší vířivé rychlosti a odstředivé síly.

Odloučené částice se hromadí ve spodní části odlučovače a jsou zpravidla odváděny nesusvisle, přičemž z tohoto výstupu unikají prakticky jen samotné pevné nebo kapalné částice bez významného množství nosného plynu. Naproti tomu hydrocyklony pracují za vyšších tlaků, často v rozmezí desítek až stovek kilopascalů, což vyžaduje robustní konstrukci. Významný rozdíl spočívá i ve způsobu odvádění odloučené fáze – hydrocyklon vždy odvádí zahuštěnou směs pevné a kapalné fáze, nikoliv čisté částice. Tato směs obsahuje podstatné množství kapaliny, a proto musí být dále technologicky zpracována nebo oddělena následnými kroky, například sedimentací, filtrací či odstředováním.

1.1 Charakteristika proudění

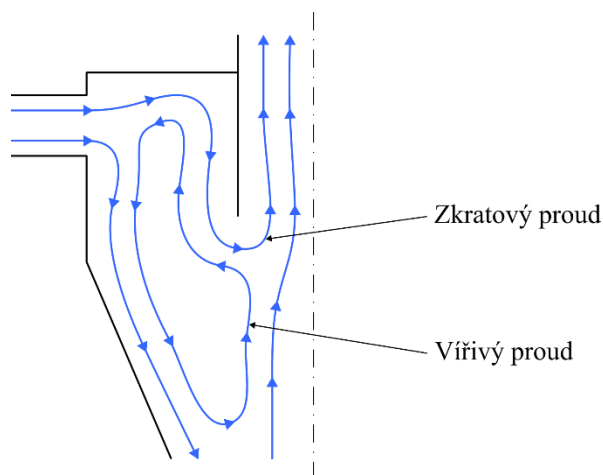
Proudění uvnitř vírového odlučovače je složité třírozměrné vírové proudění, které vzniká v důsledku specifického geometrického uspořádání zařízení. Charakteristickým rysem je přítomnost dvou vírů – klesajícího a stoupajícího, jejichž přítomnost hraje zásadní roli v procesu separace částic.

Po tangenciálním přivedení směsi do vírové komory vzniká primární (vnější) vír, který rotuje směrem dolů podél stěn. V kuželové části je proudění nuceno změnit směr, protože část tekutiny nemůže odtéct odtokovou tryskou. Dochází tak k vytvoření sekundárního (vnitřního) víru, který rotuje stejným směrem, ale proudí vzhůru a je odváděn přepadovou tryskou. Primární vír unáší hrubší a těžší částice k obvodu a dolů do odtokové trysky. Naopak sekundární vír vynáší převážně nosné médium, ale i jemnější a lehčí částice středem do přepadové trysky. Tím vírové odlučovače kontinuálně rozdělují vstupní směs na proud bohatý na hrubé částice (odtok) a čistší proud s jemnými částicemi (přepad). Jak již bylo uvedeno, u cyklonů obsahuje odtok převážně pevné částice s minimálním množstvím plynu, zatímco u hydrocyklonů je odtok tvořen zahuštěnou směsí částic v kapalině. [1; 2]

Rotační pohyb tekutiny způsobuje pokles tlaku v blízkosti osy odlučovače, kde se může tvořit vzdušný sloupec. U cyklonů je tento jev způsoben přísáváním atmosférického vzduchu,

zatímco u hydrocyklonů vzniká vlivem vypařování rozpuštěných plynů z kapaliny. [3]

Kromě hlavních spirálových vírů vznikají uvnitř odlučovače i nežádoucí proudové struktury, které mohou negativně ovlivnit účinnost separace. Jedním z takových jevů je vznik tzv. zkratových proudů. Tyto proudy vznikají v důsledku kombinace tlakové níže v oblasti osy odlučovače a snížené tangenciální rychlosti v blízkosti horní stěny. Dochází tak k nežádoucímu přímému přenosu části kapaliny ze vstupní trubice do přepadové trysky, aniž by směs prošla celou separační zónou. Schématické znázornění zkratového proudu je uvedeno na obrázku 2. Dalším negativním jevem jsou vířivé proudy v okolí výstupní trubice – ta není v některých případech schopna pojmout celý vnitřní vír, a část tohoto proudu se pak vrací zpět do vnějšího víru, čímž může docházet k vícenásobnému oběhu částic v odlučovači (viz obrázek 2). [1; 2]



Obrázek 2 Nežádoucí proudy ve vírovém odlučovači [3]

1.1.1 Rozložení rychlostí

Rychlost proudění lze v každém bodě vírového pole rozložit do tří složek: tangenciální (obvodové), axiální (podél osy) a radiální (směrem ke středu). Největší podíl má tangenciální složka vyvolaná rotací tekutiny. Právě vysoká obvodová rychlost vytváří silné odstředivé síly potřebné pro separaci částic. Rozložení obvodové rychlosti podél poloměru vykazuje kombinaci volného víru a vynuceného víru podle vztahu:

$$v_t \cdot r^n = konst. \quad (1)$$

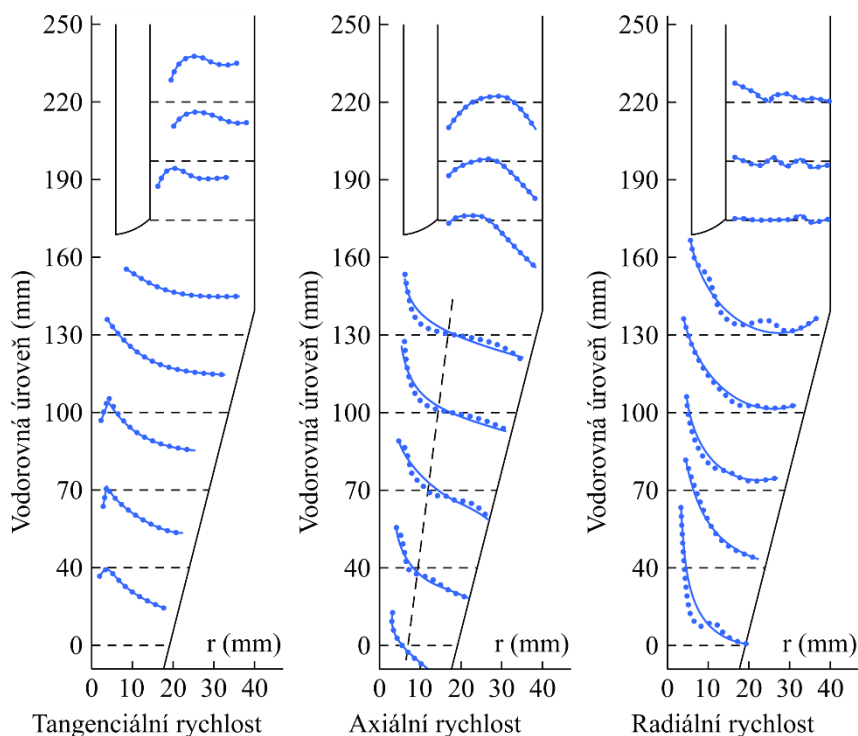
kde: v_t je tangenciální rychlost,

r je vzdálenost od středu otáčení,

n je exponent určující profil,

přičemž vnější vír se blíží volnému víru a exponent n zde nabývá hodnot v rozmezí od 0,5 do 0,8. Vnější vír vykazuje značný smyk mezi vrstvami tekutiny a tangenciální rychlost klesá

s rostoucím poloměrem. Naopak ve vnitřním víru $n = 1$, tedy tangenciální rychlost roste spolu s poloměrem r a vnitřní vír tak rotuje téměř s konstantní úhlovou rychlostí jako tuhé těleso – vynucený vír. To znamená, že od stěny směrem ke středu tangenciální rychlost nejprve roste (díky zachování momentu hybnosti tekutiny vtékající od stěny dovnitř), dosáhne maxima, a blíže k ose pak opět klesá vlivem viskozity, jak je vidět na obrázku 3. [4; 5]



Obrázek 3 Rozložení tangenciální, axiální a radiální rychlosti v hydrocyklonu [5]

Axiální rychlost proudění má dvojí charakter – ve vnějším víru směřuje dolů, zatímco ve vnitřním víru směřuje vzhůru. Mezi těmito dvěma protisměrnými proudy existuje plocha nulové axiální rychlosti, která má přibližně tvar kuželové plochy, jak je patrné z obrázku 3. V prostoru mezi stěnou vírové komory a plochou tedy proudí tekutina i částice směrem dolů k výtokové trysce. Naopak v prostoru mezi plochou nulové axiální rychlosti a osou proudí tekutina vzhůru k přepadové trysce. Axiální rychlost směrem dolů typicky dosahuje maxima poblíž stěny, zatímco axiální rychlost vzhůru vrcholí v blízkosti jádra víru (viz obrázek 3). V blízkosti vstupu (v horní válcové části vírové komory) může být pole axiálních rychlostí poněkud asymetrické vlivem tangenciálního přívodu, avšak dále v kuželové části se profil stává axiálně symetrický. [3; 5]

Zároveň s rotací tekutiny dochází také k jejímu pomalému pohybu směrem od stěny radiálně dovnitř k ose, což zajišťuje zásobování přívodu tekutiny do vnitřního víru. Radiální složka rychlosti tedy směřuje ke středu a je nejmenší ze všech tří složek. Na obrázku 3 lze vidět, že radiální rychlost je u stěny téměř nulová a směrem k ose mírně narůstá. V horní části

odlučovače, pak může radiální rychlost dosahovat i záporných hodnot (směřuje od osy ke stěně). V kuželové části odlučovače lze radiální rychlost přibližně vyjádřit vztahem:

$$v_r = v_a \cdot \operatorname{tg}(\theta) \quad (2)$$

kde: v_r je radiální rychlost,

v_a je axiální rychlost,

θ je úhel kuželové části vzhledem k ose vírového odlučovače.

To znamená, že radiální rychlost v_r je úměrná axiální rychlosti v_a a úhlu kuželové části θ v blízkosti stěny, což potvrzuje malý sklon proudu směřovat šikmo dovnitř. [5]

1.1.2 Rozložení tlaku

Vírové proudění uvnitř cyklonu i hydrocyklonu generuje charakteristické tlakové pole. Toto pole je dáno převážně odstředivou silou působící na rotující tekutinu, jež musí být v rovnováze s radiálním gradientem statického tlaku. V radiálním směru tedy platí rovnice:

$$\frac{dp}{dr} = \rho_f \cdot \frac{v_\theta^2}{r} \quad (3)$$

kde: p je statický tlak,

r je vzdálenost od středu otáčení,

ρ_f je hustota tekutiny,

v_θ je tangenciální rychlost.

Tato rovnice formálně odpovídá analogii mezi statickým tlakem a tzv. odstředivým tlakem, který vzniká v důsledku zakřivené trajektorie proudění.

Výsledkem je tlakový profil, kde tlak roste od osy víru směrem ke stěně. V blízkosti osy se tvoří oblast nejnižšího tlaku – v hydrocyklonech se zde často utváří vzduchové jádro, v cyklonech jde o oblast velkého podtlaku. Tlakové pole má tedy dominantní radiální složku, přičemž axiální pokles tlaku je méně výrazný a souvisí zejména se ztrátami a transportem tekutiny ze vstupní trubice k odtokové a přepadové trysce.

Rozložení tlaku v obou typech zařízení je podobné co do tvaru, ale odlišné velikostí. Kapaliny mají vyšší hustotu než plyny, a proto generují při stejných obvodových rychlostech podstatně vyšší odstředivé tlaky. V hydrocyklonech tak dosahuje radiální pokles tlaku až stovek kilopascalů, zatímco v cyklonech se pohybuje v jednotkách kilopascalů. [3]

Klíčovým parametrem vírových odlučovačů je jejich tlaková ztráta, která představuje rozdíl mezi statickým tlakem ve vstupní trubici a v přepadové trysce. Tato ztráta vzniká v důsledku

odporu proudění, tření na stěnách, změn směru proudění a turbulentních disipací. Její velikost přímo souvisí s intenzitou vírového pohybu, a tedy i s obvodovou rychlostí, která je zpravidla určena rychlostí proudění na vstupu.

Tlaková ztráta nejen ovlivňuje energetickou náročnost provozu (čerpání nebo ventilaci), ale také účinnost separace – vyšší tlaková ztráta často znamená účinnější separaci díky silnějším odstředivým silám.

1.2 Účinky proudění na částice

Účinnost odlučování částic ve vírových odlučovačích závisí nejen na charakteru proudění, ale také na složité interakci mezi částicemi a proudící tekutinou. Každá částice je v turbulentním vírovém poli vystavena souboru sil, které ovlivňují její pohyb a výslednou trajektorii. Tyto síly, jako je odstředivá síla, gravitační síla, vztlak a odporová, působí různým směrem a intenzitou v závislosti na vlastnostech částice a lokálním stavu proudění. Vzájemné působení těchto sil určuje, zda se částice pohybuje směrem ke stěně odlučovače a je zachycena v odtokovém proudu, nebo zůstává v centrální oblasti víru a je unášena k přepadu.

1.2.1 Síly působící na částice

Hlavním separačním mechanismem vírových odlučovačů je odstředivá síla, která působí radiálně od osy odlučovače v důsledku vírového proudění. Tato síla je dána vztahem:

$$F_C = \frac{V_p \cdot \rho_p \cdot v_t^2}{r} \quad (4)$$

kde: F_C je odstředivá síla na částici,

V_p je objem částice,

ρ_p je hustota částice,

v_t je tangenciální složka rychlosti,

r je vzdálenost od středu otáčení.

Z rovnice vyplývá, že síla roste úměrně s hmotností částice a s kvadrátem tangenciální rychlosti. Odstředivá síla typicky dosahuje mnohonásobku (v malých odlučovačích až tisícinásobků) gravitační síly. [6]

Jelikož je však i tekutina podrobena odstředivé síle, vzniká navíc odstředivá vztlaková síla, obdobná klasickému vztlaku dle Archimédova zákona. Pro tuto odstředivou tlakovou sílu platí:

$$F_{CB} = \frac{V_p \cdot \rho_f \cdot v_t^2}{r} \quad (5)$$

kde: F_{CB} je odstředivá vztlaková síla na částici,

V_p je objem částice,

ρ_f je hustota tekutiny,

v_t je tangenciální složka rychlosti,

r je vzdálenost od středu otáčení.

U částic s nižší hustotou, než má tekutina odstředivá vztlaková síla převládá nad silou odstředivou a tyto částice jsou tekutinou vytlačovány směrem k ose odlučovače. Naopak u částic hustších, než je tekutina působí výslednice těchto sil směrem ven. V důsledku tohoto jevu se částice o hustotě vyšší, než tekutina budou pohybovat ke stěně vírové komory, zatímco částice lehčí, než tekutina budou mít tendenci pohybu k ose odlučovače.[6]

Dalšími silami působícími na částice jsou síly vyvolané gravitačním zrychlením, přičemž většina vírových odlučovačů je orientována vertikálně a tyto síly tak směřují rovnoběžně s osou odlučovače. Gravitační síla působící na částice směrem dolů je vyjádřena vztahem:

$$F_G = V_p \cdot \rho_p \cdot g \quad (6)$$

kde: F_G je gravitační síla na částici,

V_p je objem částice,

ρ_p je hustota částice,

g je gravitační zrychlení.

Zároveň na částice působí i klasická vztlaková síla, která směřuje vzhůru:

$$F_B = V_p \cdot \rho_f \cdot g \quad (7)$$

kde: F_G je gravitační síla na částici,

V_p je objem částice,

ρ_f je hustota tekutiny,

g je gravitační zrychlení.

Ačkoliv hlavní separaci v hydrocyklonu zajišťuje odstředivá síla, síly od gravitačního zrychlení stále ovlivňují pohyb částic v axiálním směru a přispívají zejména k odvádění hustších částic směrem dolů k odtokové trysce.[7]

Odporová síla prostředí působí proti relativnímu pohybu částice vůči tekutině. Tato síla

závisí na tvaru a velikosti částice, její rychlosti vůči kapalině a na vlastnostech kapaliny, jako jsou viskozita a hustota. Pro výpočet odporové síly ve vírových odlučovačích se obvykle využívá empirický vztah:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_f \cdot A_p \cdot v_{rel} \quad (8)$$

kde: F_D je odporová síla na částici,

C_d je odporový součinitel,

ρ_f je hustota tekutiny,

A_p je čelní plocha částice,

v_{rel} je relativní rychlost částice vůči tekutině.

Ve vírových odlučovačích působí odporová síla směrem dovnitř k ose, neboť částice jsou unášeny vírovým proudem. Pokud se částice snaží pohybovat směrem k obvodu rychleji než okolní tekutina, odpor ji strhává zpět s tekutinou. Odporová síla tedy nutí částice k pohybu spolu s tekutinou. V důsledku toho malé lehké částice téměř kopírují proudění kapaliny a pohybují se po složitých spirálových drahách, zatímco větší částice mají tendenci se z proudu vymaňovat. [6]

Kromě uvedených sil působí na částice i další síly, jako je síla setrvačná, Coriolisova, Magnusova nebo Saffmanova. Tyto účinky jsou významné především u velmi jemných nebo silně rotujících částic. [7]

1.2.2 Pohyb částic

Za výše popsaného proudění a působení sil se částice ve vírovém odlučovači třídí podle velikosti a hustoty. Směs vstupující do vírového odlučovače je uvedena do rotačního pohybu a na částice začne okamžitě působit odstředivé zrychlení mnohonásobně vyšší, než je gravitace. Hrubé a husté částice (s vyšší setrvačností) jsou vrhány směrem ke stěně vírové komory, tedy odstředivá síla na ně působící převládá nad silou odporovou. Jakmile se dostanou do blízkosti stěny, jsou zachyceny v proudu primárního víru směřujícího dolů, a pokračují šroubovitou dráhou dolů kuželem. Tyto částice se hromadí v odtokovém proudu a opouštějí odlučovač odtokovou tryskou. [3]

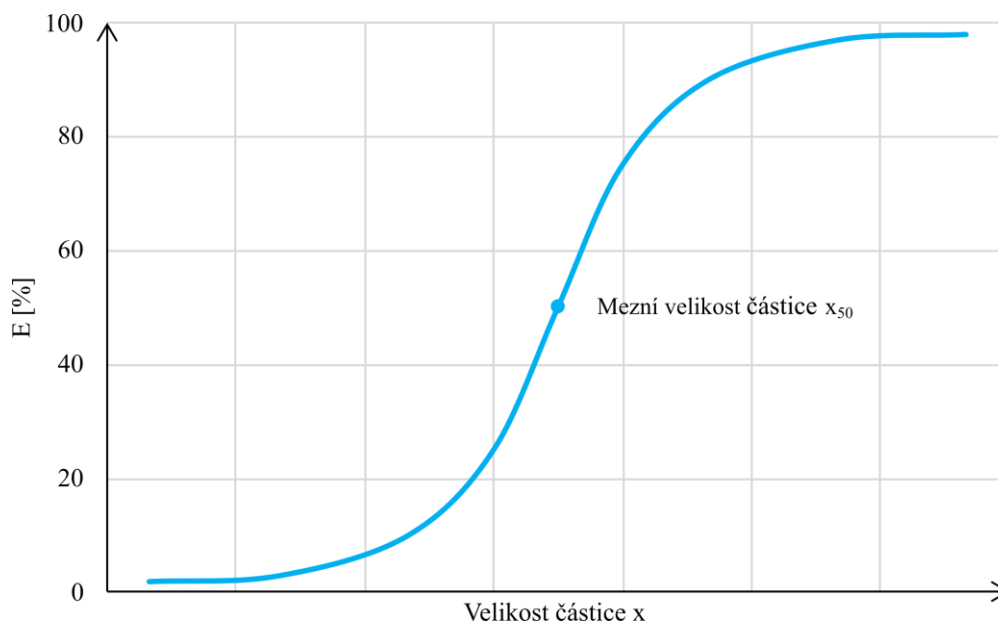
Naproti tomu jemné a lehké částice (s nízkou hmotností či hustotou) jsou silně ovlivněny proudem. Jejich malá setrvačnost znamená, že odolávají odstředění – dominujícím působením je na ně odporová síla okolní tekutiny, která je stáčí společně s proudem směrem dovnitř a nahoru. Tyto částice tedy zůstávají blíže středu víru, kde je většina z nich zachycena vzestupným sekundárním vírem a spolu s hlavním podílem tekutiny jsou jemné částice vynášeny vzhůru do přepadové trysky. [3]

Je třeba zmínit, že vírové odlučovače stejně jako ostatní typy odlučovačů, jejichž princip odlučování je založen na relativním pohybu částic vůči tekutině, nejsou ideální. Nevyhnutelně totiž dochází k mísení: určité množství hrubších částic se může dostat do přepadového proudu, a naopak část jemných může být stržena do odtokového proudu. Příčinou je jak turbulence proudění, tak omezená doba, kterou částice stráví uvnitř zařízení. [3]

1.3 Účinnost odlučování

Při hodnocení různých typů zařízení určených k separaci fází je výhodné zavést standardizovaný parametr, který umožní porovnání jejich výkonnosti. Existuje více přístupů k definici takového ukazatele účinnosti separace.

Nejjednodušší a současně nejčastěji používaný způsob spočívá ve vyjádření účinnosti jediným číslem, které závisí pouze na celkových průtocích obou fází vstupujících do zařízení a vystupujících z něj. Tento přístup poskytuje srozumitelný a prakticky použitelný ukazatel, jehož interpretace je snadná. Je však třeba zdůraznit, že jeho použití je smysluplné pouze tehdy, pokud porovnáváme zařízení pracující za shodných provozních podmínek a se stejným složením vstupní směsi. [3]



Obrázek 4 Křivka separační účinnosti v závislosti na velikosti částice [1]

V případech, kdy je cílem stanovit účinnost samotného odlučovače jakožto zařízení, tedy definovat parametr, který bude záviset pouze na jeho konstrukčních vlastnostech a nikoli na charakteristikách směsi, se zavádí tzv. mezní (nebo dělicí) velikost částic x_{50} . Ta reprezentuje velikost částice, pro kterou je pravděpodobnost odloučení rovna 50 %, tzn. částice má stejnou šanci být odvedena do přepadového i odtokového proudu. Tento koncept je dále rozvíjen do

podoby křivky separační účinnosti, která znázorňuje závislost účinnosti odlučování na velikosti částic – od nulové účinnosti pro velmi jemné částice až po téměř 100% účinnost pro částice hrubé (viz obrázek 4). [1]

Plynové cyklony se obvykle používají ve spojení s výsypkou nebo zásobníkem, který slouží k zachycení odloučených částic. Množství plynu, jež by případně unikalo do odtokové trysky spolu s pevnou fází, je v ideálním případě zanedbatelné. Účinnost cyklonu se v takovém případě definuje vztahem:

$$E = \frac{G_1}{G_0} \quad (9)$$

kde: E je účinnost cyklonu,

G_1 je hmotnostní tok částic do cyklonu,

G_0 je hmotnostní tok částic odtokovou tryskou.

Tento vztah poskytuje jednoduchý popis funkce cyklonu v konkrétním provozu, nicméně je třeba zdůraznit, že nejde o vlastní charakteristiku cyklonu jako zařízení. Výsledná účinnost je totiž výrazně ovlivněna provozními podmínkami – především hmotnostním průtokem, hustotou a viskozitou plynu a rovněž velikostí, tvarem a hustotou částic. [1]

V případě hydrocyklonů je situace složitější, neboť na rozdíl od plynových cyklonů hydrocyklony v některých případech pracují s trvalým odtokem kapaliny odtokovou tryskou. Tento aspekt nelze při hodnocení účinnosti opomenout. Pokud bychom mechanicky aplikovali výše uvedený vztah, dospěli bychom k závěru, že účinnost hydrocyklonu roste až ke 100 % prostým zvýšením průtoku odtokovou tryskou, čímž by veškerá směs odtékala tímto směrem a do přepadu by neodcházel žádný objem. Taková situace by ve skutečnosti znamenala, že k žádné separaci nedochází. [1]

Na účinnost odlučování v hydrocyklonu mají zásadní vliv dva parametry: celkový objemový průtok a poměr objemového průtoku odtokovou tryskou k celkovému objemovému průtoku podle vztahu:

$$\phi = \frac{Q_{underflow}}{Q} \quad (10)$$

kde: ϕ je poměr objemového průtoku odtokovou tryskou k celkovému objemovému průtoku,

$Q_{underflow}$ je objemový průtok odtokovou tryskou,

Q je celkový objemový průtok.

Zvyšování celkového průtoku vede zpravidla ke zvýšení tlakové ztráty, avšak současně

se většinou zlepšuje účinnost odlučování, protože zařízení je schopno separovat i menší částice.

Poměr průtoku odtokovou tryskou k celkovému průtoku ovlivňuje účinnost dvojitým způsobem. V případě, že je odtok velmi malý a současně je koncentrace pevných částic ve vstupní směsi vysoká, nemusí být kapacita odtokové trysky dostatečná k odvedení všech částic. Tyto částice pak zůstávají uvnitř zařízení a jsou následně unášeny do přepadové trysky. Minimální objemový odtok, který v takovém případě zaručí odvod všech odloučených částic, se skládá ze součtu objemu samotných částic a kapaliny, která vyplňuje nejmenší možné mezery mezi nimi. Maximálně dosažitelná účinnost separace je v takovém případě omezena vztahem:

$$E = \frac{Q_{underflow} \cdot (1 - \varepsilon)}{Q_p} \quad (11)$$

kde: E je účinnost cyklonu,

$Q_{underflow}$ je objemový tok odtokovou tryskou,

ε je minimální objem kapaliny vyplňující prostor mezi částicemi,

Q_p je objemový tok částic ve vstupní směsi.

V opačném případě, kdy hydrocyklon prakticky neodděluje žádné částice, přechází část vstupních částic do odtokové trysky jednoduše proto, že jsou unášeny kapalinou. Nedochozí tedy k separaci, nýbrž k mechanickému transportu částic proudem kapaliny, a to v poměru odpovídajícím poměru průtoků. V tomto případě lze účinnost vyjádřit následovně:

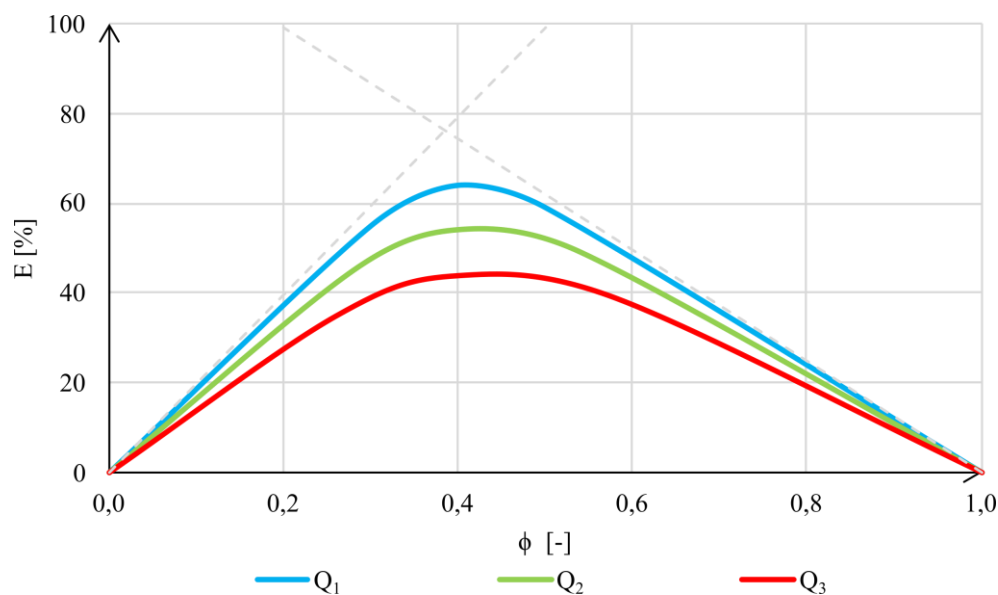
$$E = 1 - \frac{Q_{underflow} - Q_p}{Q - Q_p} \quad (12)$$

kde: E je účinnost cyklonu,

$Q_{underflow}$ je objemový průtok odtokovou tryskou,

Q_p je objemový průtok částic ve vstupní směsi;

Q je celkový objemový průtok.



Obrázek 5 Křivky separační účinnosti v závislosti na poměru průtoků [1]

Z výše uvedených důvodů je zřejmé, že účinnost hydrocyklonu nemůže překročit určité mezní hodnoty. Tyto meze lze graficky znázornit pomocí dvou přímk, jak ukazuje obrázek 5. Sklon levé přímky je dán koncentrací pevných částic ve vstupní směsi – čím vyšší je tato koncentrace, tím menší je sklon přímky a tím nižší je maximální dosažitelná účinnost za daných podmínek. Graf zobrazuje tři křivky účinnosti pro průtoky $Q_1 > Q_2 > Q_3$. [1; 3; 8]

1.4 Konstrukční řešení

Konstrukce vírových odlučovačů vychází z požadavku vytvořit uvnitř zařízení vírové proudění, které umožní účinnou separaci částic. Hlavním cílem návrhu je dosáhnout vysoké separační účinnosti při současné minimalizaci tlakových ztrát a celkové energetické náročnosti provozu. Toho lze dosáhnout optimalizací geometrie zařízení, která má přímý vliv na charakter a intenzitu vírového proudění.

Při návrhu konstrukce je nezbytné zohlednit specifické provozní podmínky, zejména objemový průtok, vlastnosti a složení proudící směsi i požadované vlastnosti oddělených fází. Návrhový proces tak představuje hledání rovnováhy mezi hydraulickým chováním zařízení, jeho účinností, provozními náklady a zároveň dlouhodobou spolehlivostí a životností. Konstrukce musí odolávat mechanickému i chemickému namáhání, zajišťovat stabilní provoz s minimálními požadavky na údržbu a umožňovat snadnou obsluhu.

1.4.1 Vstupní trubice

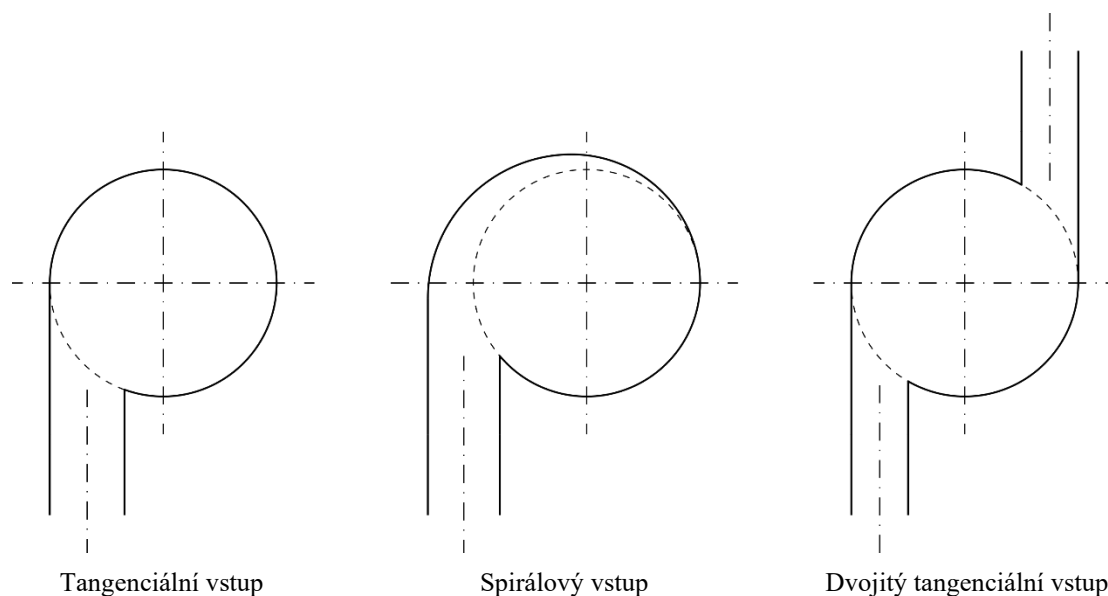
Vstupní trubice představuje jednu z klíčových konstrukčních částí vírového odlučovače, protože určuje způsob, jakým je proudící směs uvedena do vírové komory. Jejím hlavním úkolem je zajistit účinnou přeměnu tlakové energie na rotační pohyb a vytvořit stabilní vírové

proudění, které je nezbytné pro efektivní separaci částic. Správné uspořádání vstupu má zásadní vliv na symetrii víru, rozložení rychlostního pole i vznik turbulentních struktur, a tím přímo ovlivňuje odlučovací účinnost i tlakové ztráty zařízení.

Nejběžnějším řešením je tečný vstup (viz obrázek 6), kdy je vstupní trubice zaústěna tangenciálně ke stěně válcové části vírové komory. Tento typ vstupu přirozeně generuje silné vírové proudění a je oblíbený díky jednoduché konstrukci, vysoké účinnosti a relativně nízké tlakové ztrátě. [1]

Variací tohoto řešení je tzv. spirálovitý (evolventní) vstup (viz obrázek 6), při kterém je směs přiváděna po zakřivené trajektorii obíhající podél stěny. Spirálovitý vstup zajišťuje plynulejší náběh víru, menší turbulence a rovnoměrnější rozložení proudění, což je výhodné zejména při vyšších průtocích nebo při odlučování jemnějších částic. [1]

Další variantou je axiální vstup s vírovými lamelami, při kterém je směs přiváděna shora ve směru osy odlučovače a rotace je generována pomocí šikmo orientovaných lopatek. Toto řešení umožňuje kompaktní konstrukci a je často využíváno v multicyklonových jednotkách, kde jsou odlučovače uspořádány těsně vedle sebe. Axiální vstupy se však používají téměř výhradně u cyklonů určených pro plynné směsi. V případě hydrocyklonů, které pracují s kapalinou a často abrazivními částicemi, se axiální vstupy neuplatňují – lamely by zde byly nevhodné z hlediska rizika zanášení, opotřebení a ztráty rovnoměrnosti proudění. U hydrocyklonů se proto používají téměř výhradně tangenciální nebo spirálovité vstupy. [1]



Obrázek 6 Varianty napojení vstupní trubice vírových odlučovačů

Pro zvýšení kapacity nebo dosažení symetrického vírového pole lze použít také dvojitý tangenciální vstup (viz obrázek 6), kdy jsou dvě vstupní trubice umístěny naproti sobě. Tato

konfigurace snižuje jednostranné zatížení stěn, zlepšuje rozložení víru a umožňuje zpracování většího množství směsi bez výrazného poklesu účinnosti. Je však nutné zajistit rovnoměrné rozdělení proudění mezi obě vstupní větve. [2]

1.4.2 Vírová komora

Vírová komora tvoří centrální prostor vírového odlučovače, ve kterém probíhá vlastní proces separace částic působením odstředivé síly. Konstrukčně se obvykle skládá ze dvou částí – válcové horní sekce, kde dochází ke stabilizaci vírového proudění, a kuželové dolní části, která slouží k zesílení odstředivé akcelerace a směrování částic k odtokové trysce.

Jedním z klíčových parametrů je poměr výšky komory k jejímu průměru. Delší komory s větší štíhlostí (větším poměrem výšky ku průměru) prodlužují dobu setrvání částic ve vírovém poli, čímž se zlepšuje separace jemnějších frakcí. Příliš vysoká komora však zvyšuje tlakové ztráty a může vést k větším třecím odporům bez výrazného přínosu pro účinnost. [9]

Dalším významným konstrukčním parametrem je úhel kužele, který ovlivňuje rychlost sbíhání proudění směrem k odtokové trysce. Menší kuželové úhly podporují účinnější odlučování jemných částic díky delšímu působení odstředivé síly. Naopak větší úhly zkracují odlučovací zónu, ale snižují celkovou tlakovou ztrátu, a proto jsou vhodné spíše pro hrubší separaci při menších energetických nárocích. [1]

U hydrocyklonů bývá konstrukce štíhlejší – celková výška komory může být až 6–10násobkem průměru, což zajišťuje delší dobu setrvání a tím i vyšší účinnost zejména při separaci jemných částic v kapalném prostředí. [3]

Stabilita vírového proudění v komoře je zásadní pro udržení vysoké účinnosti. Nestabilní vír nebo předčasné narušení vírové struktury mohou vést k tzv. přetahování částic do výstupní trubice, což výrazně snižuje kvalitu separace. Vhodným návrhem tvaru komory lze tyto jevy omezit a zároveň optimalizovat interakci mezi oběma fázemi proudění.

1.4.3 Odtoková tryska

Odtoková tryska se nachází ve spodní části vírové komory a slouží k odvádění koncentrované separované fáze – buď suchého prachu (v případě cyklonů), nebo suspenze (v případě hydrocyklonů). V případě cyklonů bývá často opatřena uzavírací klapkou, rotačním podavačem nebo jiným těsnicím prvkem, který omezuje zpětný průnik plynu. [3]

U hydrocyklonů má odtok obvykle podobu omezeného kruhového otvoru, tzv. apexu, kterým odtéká separovaná suspenze. Průměr tohoto otvoru ovlivňuje velikost odtékajícího objemu kapaliny, ale také stabilitu celého vírového pole. Nesprávně zvolený průměr může vést ucpávání a nestabilnímu provozu. V návrhu apexu se často uvažuje s poměrem průtoku přes odtokovou trysku k celkovému průtoku (viz kapitola 1.3). [10]

1.4.4 Přepadová tryska

Přepadová tryska je tvořena výtláčnou trubicí, označovanou často jako vortex finder, která je zasunuta shora do vírové komory. Jejím hlavním úkolem je zachytit a odvádět vnitřní stoupající vír, obsahující především čistou nosnou fázi, zatímco částice s vyšší hustotou zůstávají ve vnějším víru směřujícím dolů. Konstrukce této trubice výrazně ovlivňuje rozdělení proudů uvnitř odlučovače. [10]

Délka a průměr výstupní trubice musí být navrženy tak, aby nedocházelo k narušení vnějšího víru a zároveň aby trubice neodsávala částice, které nebyly určeny k separaci. Příliš hluboké zasunutí trubice může negativně ovlivnit vírové pole v dolní části odlučovače a způsobit nežádoucí přísávání částic zpět do stoupajícího proudu. Naopak nedostatečně hluboké zasunutí zvyšuje riziko vzniku zkratových proudů a vniknutí částic do přepadové trysky, čímž se snižuje účinnost separace. [10]

Poměr průměru výstupní trubice ku průměru vírové komory patří společně s velikostí vstupní rychlosti k nejvýznamnějším parametrům, kterými lze ovlivnit velikost obvodové rychlosti, a tím i účinnost separace.

1.4.5 Konstrukční uspořádání zařízení

V praxi často nestačí využít pouze jeden vírový odlučovač, a proto se navrhuje komplexnější sestavy s více jednotkami, které jsou zapojeny paralelně, sériově, nebo ve vícestupňových kombinacích.

Paralelní zapojení několika odlučovačů se využívá tehdy, když požadovaný celkový průtok překračuje kapacitu jednoho zařízení, nebo když je třeba zmenšit rozměry jednotlivých odlučovačů kvůli prostoru či dostupnosti. Takto uspořádané jednotky sdílejí vstupní a výstupní potrubí a proudění je mezi ně rozděleno pomocí rozvodných komor. Výhodou paralelního zapojení je zvýšení kapacity bez výrazného poklesu účinnosti, neboť menší odlučovače bývají obecně účinnější než jeden velký při zachování obdobného tlakového spádu. [3]

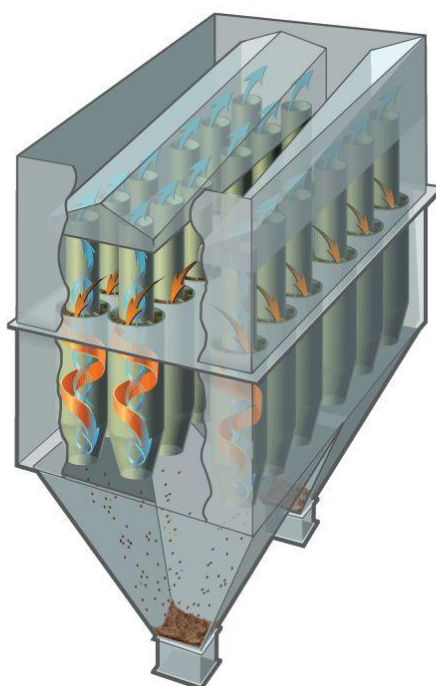
Pokud jsou vírové odlučovače sestaveny do jednoho konstrukčního celku se společným opláštěním, označuje se taková jednotka jako multicyklon (v případě plynných médií) nebo multihydrocyklon (pro kapaliny). Příklad takového řešení je zobrazen na obrázku 7. Výhodou je kompaktní konstrukce a snadnější instalace. [10]

Sériové zapojení se využívá v aplikacích s velmi přísnými požadavky na čistotu výstupního média, kdy jeden odlučovač nestačí zajistit potřebnou separační účinnost. Nejčastější konfigurací je dvoustupňové uspořádání: první odlučovač s větším průměrem slouží k oddělení hrubých částic a zajištění hrubé separace, zatímco ve druhém stupni se uplatňují menší odlučovače optimalizované pro zachycení jemnějších frakcí. Tento princip tzv. kaskádového

odlučování umožňuje postupnou separaci širokého spektra částic. [10]

Použití více než dvou stupňů se vyskytuje jen výjimečně, obvykle v případech extrémních nároků na účinnost (např. v jaderném nebo farmaceutickém průmyslu), nebo tam, kde je cílem postupné oddělení frakcí s rozdílnou velikostí. Nevýhodou sériového uspořádání je výrazný nárůst celkové tlakové ztráty systému, vyšší náklady na instalaci a větší prostorové nároky. [10]

V některých aplikacích se kombinuje sériové a paralelní zapojení, případně jsou vírové odlučovače integrovány do technologických celků s jinými separačními nebo filtračními zařízeními. Volba optimálního uspořádání je vždy výsledkem kompromisu mezi účinností, stabilitou, provozními náklady a prostorovými možnostmi konkrétního provozu. [11]



Obrázek 7 Schéma multicyklonu s axiálními vstupy [12]

1.4.6 Konstrukční materiály

Volba vhodného konstrukčního materiálu vírového odlučovače představuje jeden z klíčových aspektů návrhu, který přímo ovlivňuje provozní spolehlivost, životnost zařízení i náklady na údržbu. Při výběru materiálu je třeba zohlednit zejména abrazivitu separovaných částic, chemické složení směsi, teplotní režim provozu, a také mechanické namáhání jednotlivých částí zařízení.

Pro běžné aplikace v oblasti odlučování prachových částic z plynů se často využívají uhlíkové oceli. Pro agresivnější prostředí, zejména s výskytem vlhkosti, kyselin nebo zásad, jsou vhodnější nerezové oceli, jež zajišťují vyšší korozní odolnost a delší životnost zařízení.

V aplikacích s vysokým stupněm abraze, například při odlučování popílku, cementového

prachu nebo minerálních částic, je nutné chránit vnitřní stěny odlučovače otěruvzdornými materiály. Běžně se používá vulkanizovaná pryž, keramické dlaždice, případně vysokopevnostní litina. Tato řešení významně prodlužují provozní intervaly mezi odstávkami a snižují opotřebení exponovaných částí, zejména v oblasti vstupního hrdla a spodní části kužele. [13]

Pro méně náročné aplikace, nižší teploty a menší odlučovače se využívají také plasty, zejména polypropylen (PP), polyetylen (PE), PVC, případně sklolaminátové kompozity (GRP). Plastové konstrukce mají výhodu v nízké hmotnosti, dobré chemické odolnosti a snadné výrobě, jejich hlavní nevýhodou je však omezená mechanická pevnost a nízká teplotní odolnost – zpravidla do 60–80 °C. [13]

V oblasti hydrocyklonů jsou nároky na odolnost vůči korozi a abrazi ještě vyšší, neboť proudící kapalina často obsahuje tvrdé minerální částice a chemicky agresivní složky. Těleso hydrocyklonu je nejčastěji vyrobeno z oceli nebo litiny, přičemž vnitřní povrch bývá chráněn polyuretanovou vložkou, která vykazuje vynikající odolnost vůči abrazivnímu opotřebení. Polyuretan se díky své pružnosti a houževnatosti osvědčil jako velmi účinný ochranný materiál i při vysokých tlacích a průtocích. [13]

U menších hydrocyklonů a mobilních jednotek se opět uplatňují konstrukce z plastů, které poskytují dostatečnou chemickou odolnost a umožňují snadnou manipulaci. V provozech s extrémními podmínkami (např. vysokotlaké aplikace v těžebním průmyslu) se někdy využívají i kombinované konstrukce – kovový plášť s výměnnou vnitřní vložkou z keramiky, polyuretanu nebo pryže. [13]

Volba materiálu tedy vždy vychází z konkrétního provozního prostředí a očekávané životnosti zařízení. S ohledem na dostupnost náhradních dílů, technologii výroby a servisní intervaly je vhodné již při návrhu zohlednit i konstrukční modularitu a možnost snadné výměny nejvíce zatížených komponent.

Hydrocyklony bývají konstruovány z materiálů vysoce odolných proti korozi a abrazi, protože suspenze často obsahují tvrdé částice a prostředí může být chemicky agresivní. Běžným materiálem tělesa hydrocyklonů je ocel (často opatřená ochranným nátěrem nebo gumovou vložkou) nebo litina s vnitřní polyuretanovou vložkou. Polyuretan a podobné elastomery jsou oblíbené pro svou vynikající odolnost vůči abrazivnímu opotřebení v proudící kapalině. U menších hydrocyklonů se opět používají plasty. [10]

1.5 Průmyslové využití

Vírové odlučovače se v praxi uplatňují v celé řadě průmyslových aplikací, kde je požadováno mechanické oddělení tuhých částic nebo kapek z nosného média. Jejich nasazení je

obvykle ekonomicky výhodné v provozech s vyššími objemovými průtoky, srovnatelně hrubými částicemi a požadavkem na kontinuální provoz bez nutnosti časté údržby.

Mezi hlavní výhody vírových odlučovačů patří jednoduchá konstrukce bez pohyblivých částí, zajišťující vysokou provozní spolehlivost a nízké nároky na údržbu. Zařízení jsou kompaktní, snadno modulárně rozšiřitelná a vykazují relativně nízké investiční i provozní náklady ve srovnání s jinými separačními metodami. Další výhodou je jejich schopnost odolávat agresivnímu chemickému prostředí a pracovat v širokém rozsahu tlakových i teplotních podmínek.

Na druhé straně je třeba zmínit i některá omezení těchto zařízení. Patří k nim nižší účinnost odlučování velmi jemných částic při běžných provozních tlacích, citlivost na kolísání průtoku nebo citlivost proměnlivé složení směsi. Mezi nevýhody patří rovněž tlaková ztráta a omezená možnost řízení výstupní frakce bez zásahu do geometrie zařízení nebo změny režimu proudění.

Z hlediska provozních parametrů jsou cyklony nejčastěji využívány pro odlučování částic větších než 5 až 10 μm , při objemových průtocích od jednotek až po tisíce m^3/hod a s tlakovými ztrátami v rozmezí 0,5 až 1,5 kPa v závislosti na konkrétní konfiguraci. Hydrocyklony jsou naopak vhodné pro separaci pevných částic nebo kapalných složek o velikosti zpravidla nad 10 μm , přičemž u vysokotlakých jednotek mohou být účinně odlučovány částice i od 5 μm . Typické průtoky kapalin se pohybují od několika l/min až po stovky m^3/hod , zatímco vstupní přetlak se běžně pohybuje v rozmezí od 0,2 do 2,5 MPa. [3; 4]

1.5.1 Těžební a zpracovatelský průmysl

V těžebním a zpracovatelském průmyslu nacházejí vírové odlučovače široké uplatnění především při separaci pevných částic z kapalných médií. Hydrocyklony byly původně vyvinuty právě pro účely separace minerálů v uhelném průmyslu a při těžbě železných rud, kde se využívají k třídění, zahušťování a odvodňování rudných i nerudných surovin (viz obrázek 8).

Z hlediska technologického procesu se hydrocyklony často uplatňují v první fázi úpravy suroviny, kde slouží k odstranění nečistot, nebo naopak v závěrečné fázi, kde dochází k dočištění produktového proudu. [14]

Významnou roli hrají rovněž při separaci produktů po mletí – zařazují se za rudné mlýny, kde rozdělují výstupní suspenzi na jemnou frakci odváděnou přepadem a hrubší frakci, která se vrací zpět do mlýna. Tento režim umožňuje regulaci výsledné velikosti zrna v kontinuálních mlecích obězích.

Důležitou oblastí aplikace je rovněž zpracování kalů vznikajících při úpravě rud a minerálů. Vírové odlučovače zde přispívají ke snižování objemu kalové suspenze a ke zvýšení koncentrace tuhých složek před jejich dalším zpracováním, zahuštěním nebo likvidací. [13]



Obrázek 8 Hydrocyklon pro minerální směsi [15]

1.5.2 Energetický průmysl

V energetickém průmyslu hrají vírové odlučovače klíčovou roli především při odlučování tuhých částic z proudů spalin. Typickým příkladem jsou cyklony integrované do kotlů spalujících uhlí, biomasu nebo komunální odpad, kde slouží k zachycení popílku a dalších pevně dispergovaných složek spalovaného paliva před jejich vstupem do atmosféry nebo do dalších stupňů čištění. Díky své konstrukční jednoduchosti, schopnosti odolávat vysokým teplotám i tlakovým výkyvům jsou cyklony v těchto aplikacích vnímány jako spolehlivá a ekonomicky efektivní zařízení. [16]

Významné uplatnění nacházejí cyklony také ve fluidních spalovacích systémech, kde je separace pevné fáze nezbytnou součástí recirkulace paliva a inertního ložového materiálu. V oblasti plynárenství slouží cyklony jako součást systémů pro čištění zemního plynu a dalších procesních plynů. Jsou často zařazovány před jemné filtrační jednotky, kde z proudu odstraňují kapalně kapky a hrubý prach, například v distribučních a měřicích stanicích.[17]

Hydrocyklony se zde uplatňují v systémech chlazení a úpravy vody, kde slouží k odlučování nerozpuštěných látek z chladicích a napájecích okruhů, případně v systémech pro čištění kondenzátu a technologické vody. Specifickou aplikací je pak zahušťování sádrovcového kalu,

který vzniká v uhelných elektrárnách při odsiřování spalin. [16]

1.5.3 Chemický a petrochemický průmysl

V chemickém a petrochemickém průmyslu se vírové odlučovače uplatňují především při separaci pevných částic nebo kapalných aerosolů z plynné fáze. Tyto procesy často probíhají za zvýšených tlaků a teplot, v prostředí s přítomností agresivních či hořlavých látek, což klade vysoké nároky na spolehlivost a chemickou odolnost použité technologie. Právě schopnost pracovat v náročných podmínkách a absence pohyblivých částí činí vírové odlučovače v těchto aplikacích dlouhodobě preferovaným řešením.

Cyklony jsou zde často začleňovány do technologických celků za sušárny, mlecí zařízení nebo reaktory, kde slouží k odloučení produktu z nosného plynu nebo k ochraně citlivých částí zařízení před zanášením. Typickými příklady jsou odlučování katalytického prachu, polymerních částic nebo produktů fluidní polymerace. Kromě toho jsou cyklony běžně využívány jako předseparační stupeň před citlivějšími separačními technologiemi, například tkaninovými filtry nebo adsorpčními jednotkami. [18]

Další oblastí využití cyklonů je klasifikace krystalů, například při výrobě solí nebo jiných chemikálií, kde napomáhají odlučovat krystaly od matečného roztoku, regulovat jejich velikost a odstraňovat nežádoucí příměsi. [19]

Hydrocyklony se v chemickém průmyslu uplatňují především při oddělování pevných nečistot ze suspenzí, regeneraci katalyzátorů nebo zahušťování kalů. Vzhledem ke schopnosti pracovat s emulzemi nacházejí uplatnění i například při oddělování vody od olejových nebo ropných složek.

1.5.4 Potravinářský a farmaceutický průmysl

V potravinářském a farmaceutickém průmyslu je kladen mimořádný důraz na hygienickou nezávadnost, konzistenci výrobních procesů a přesné řízení kvality produktů. Vírové odlučovače zde nacházejí uplatnění především při manipulaci s jemně rozptýlenými sypkými materiály, dále pak při sušení, mletí, třídění nebo granulaci. Nejčastěji se využívají suché cyklony, které slouží k odlučování prachových částic z proudů vzduchu – například po pneumatické dopravě mouky, škrobu, cukru nebo sušeného mléka. Jejich výhodou je možnost provozu bez přímého kontaktu s okolním prostředím, což minimalizuje riziko kontaminace a umožňuje splnění přísných hygienických standardů. [20; 21]

V sušárenských aplikacích, zejména při sprejovém sušení, cyklony zajišťují efektivní separaci jemného práškového produktu z proudu horkého vzduchu. Jsou vhodné i pro práci s teplotně citlivými látkami, protože při odlučování nedochází k mechanickému namáhání ani k významnému tepelnému přenosu, což je výhodné při zpracování enzymů, vitamínů a dalších

bioaktivních sloučenin. [22]

Hydrocyklony se v potravinářství využívají méně často, ale nacházejí specifická uplatnění například ve výrobě bramborového nebo kukuřičného škrobu. Ve vinařství jsou nasazovány k oddělení kalů z moštu před fermentací nebo k finálnímu čištění vína před lahvováním. Obdobně se používají i při výrobě džusů či ciderů, kde slouží k odstranění dužniny, slupkových částí či jader. V cukrovarnictví se testují pro čištění vápenného mléka a cukerných šťáv, kde pomáhají oddělit jemný písek, kal nebo vápenaté sraženiny před následnou filtrací. [23]

1.5.5 Papírenský průmysl

V papírenském průmyslu se vírové odlučovače, zejména hydrocyklony, využívají především k separaci pevných nečistot z vlákniny. Jejich hlavní úlohou je odstraňování těžkých příměsí, jako jsou písek, sklo, kovy či plastové částice, které by jinak negativně ovlivnily kvalitu výrobku a způsobovaly opotřebení technologického zařízení. [24]

Další důležitou oblastí použití je oddělování páry z mechanicky zpracovávané buničiny. Tlakové cyklony se zde uplatňují při separaci páry vznikající při rafinaci, čímž umožňují její zpětné využití a současně odvodnění vlákniny před dalším zpracováním.

Vírové odlučovače se také běžně používají v systémech pro manipulaci s odřezky papíru, které vznikají při řezání a navíjení. Pomocí pneumatické dopravy jsou tyto materiály zachyceny v cyklonech, kde dochází k oddělení vzduchu od pevných částic. Oddělený papír je následně recyklován a vrácen zpět do výroby. [25]

1.5.6 Průmysl zpracování odpadů a recyklace

V oblasti odpadového hospodářství a recyklačního průmyslu se vírové odlučovače využívají jak při primárním zpracování odpadních materiálů, tak při úpravě odpadních médií a přípravě frakcí k dalšímu využití. Cyklony se zde běžně uplatňují při odlučování prachu a jemných částic z proudů vzduchu, typicky v drtičkách, pneumatických dopravnících, třídících linkách a regeneračních jednotkách. Díky své schopnosti pracovat v nepřetržitém režimu a vysoké mechanické odolnosti vůči abrazivním částicím jsou vhodné pro široké spektrum druhotných surovin – od stavebních a demoličních odpadů, přes plasty, až po recyklaci elektrozařízení. [16]

Hydrocyklony nacházejí uplatnění především při zpracování kalů, popílku a suspenzí, které vznikají v rámci chemického či biologického čištění odpadních vod. Umožňují efektivní zahuštění nerozpuštěných látek a jejich separaci od recyklovatelné kapalné složky. V mechanicko-biologických úpravách komunálního odpadu se používají například ke třídění organické frakce od nežádoucích anorganických příměsí, čímž přispívají ke zvýšení účinnosti dalších separačních nebo biologických stupňů.

V recyklaci plastů mohou vírové odlučovače tvořit součást separačních systémů, kde

slouží k oddělení polymerů s různou hustotou, případně k odstranění jemného prachu a zbytkových kontaminantů z plastového granulátu. [26]

1.5.7 Zemědělství a lesnictví

V zemědělském a lesnickém průmyslu se vírové odlučovače uplatňují především při manipulaci s velkým množstvím sypkých materiálů, jako jsou obiloviny, semena, moučka, piliny nebo dřevní štěpka. Cyklonové odlučovače jsou zde běžnou součástí předčisticích systémů obilných sil, mlýnů, sušáren či dopravních tras, kde slouží k odlučování prachu, lehkých částic a dalších příměsí, které mohou snižovat kvalitu produktu nebo způsobovat zanášení zařízení. Tímto způsobem prodlužují životnost následných technologických stupňů a zároveň přispívají ke zlepšení hygieny a bezpečnosti provozu.

V lesnickém sektoru se vírové odlučovače uplatňují zejména v provozech na zpracování dřeva, jako jsou pily, truhlárny nebo výrobní dřevěných aglomerovaných materiálů. Slouží zde k separaci pilin a třísek z odsávacích systémů, kde snižují množství prachu ve vzduchu a zároveň umožňují zpětné využití dřevního odpadu. [21]

2 Popis problému a cíle řešení

Vírové odlučovače představují významnou skupinu mechanických separačních zařízení, jejichž efektivita spočívá v jednoduchosti konstrukce a schopnosti provozu bez pohyblivých částí. Vzhledem k široké škále využití, od úpravy rud v těžebním průmyslu přes recyklaci odpadních materiálů až po odlučování v chemických a energetických procesech, roste potřeba jejich cílené optimalizace. Rostoucí nároky na provozní účinnost, úspory energie i snížení emisí v průmyslu vyžadují hlubší porozumění fyzikálním principům fungování těchto zařízení a jejich interakci s proudícími směsmi.

Navzdory tomu, že základní princip fungování hydrocyklonů je dobře znám, zůstává jejich návrh a optimalizace značně složitým úkolem. Důvodem je vysoká citlivost výsledného chování zařízení na konkrétní konstrukční uspořádání a provozní podmínky. Geometrické parametry, jako jsou rozměry a tvar vstupní trubice, průměr vírové komory nebo úhly kuželových částí, ovlivňují tok kapaliny, rozložení tlaku i trajektorie částic. Stejně tak má zásadní vliv velikost vstupní rychlosti a poměr průtoku odtokovou tryskou k celkovému průtoku, které určují výsledné rozdělení fází i míru separační účinnosti. V praxi proto neexistuje univerzální návrh vhodný pro všechny aplikace. Naopak každý vírový odlučovač musí být navržen s ohledem na specifické podmínky provozu a požadovaný separační účinek.

Zcela klíčovým parametrem je tangenciální složka rychlosti, která určuje velikost odstředivé síly působící na částice. Právě tato síla je hlavním mechanismem odlučování, protože způsobuje odklon těžších částic směrem ke stěnám odlučovače. Optimalizace proudění z hlediska dosažení vysoké tangenciální rychlosti je proto zásadním předpokladem pro účinné oddělení dispergované fáze

Tato diplomová práce se proto zaměřuje na systematické zkoumání vlivu vstupní rychlosti na proudění v interiéru hydrocyklonu, přičemž hlavní důraz je kladen na identifikaci obecných vztahů mezi provozními podmínkami, konstrukčními parametry a výsledným proudovým polem. Cílem práce je porozumět tomu, jak změny rychlosti na vstupu a různé výstupní režimy ovlivňují rozložení tlaku, charakter vírového proudění a separační chování částic.

V širším kontextu má práce za cíl přispět k lepšímu návrhu hydrocyklonů pro specifické technické aplikace. Výsledky by měly sloužit jako podklad pro optimalizaci konstrukce vstupní části zařízení a nastavení provozních parametrů tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší separační účinnosti při současném respektování energetických nároků a provozní stability. Výstupy mohou rovněž napomoci při výběru vhodného typu vírového odlučovače pro konkrétní provozní podmínky, případně sloužit jako srovnávací základ při vývoji nových konstrukčních řešení.

3 Způsob řešení

Experimentální měření proudění uvnitř vírového odlučovače je v reálných podmínkách velmi obtížné nebo zcela nemožné, protože vnitřní prostor je typicky velmi kompaktní a nepřístupný pro standardní měřicí techniky. Složitost problematiky je dále umocněna turbulentní povahou proudění, což výrazně komplikuje jak samotné snímání dat, tak i jejich následné vyhodnocení.

Vzhledem k tomu nabývá na významu využití pokročilých metod výpočetní dynamiky tekutin (CFD – Computational Fluid Dynamics). CFD nástroje umožňují numerické řešení rovnic popisujících proudění tekutin v celém objemu zařízení. Díky tomu lze získat komplexní informace o rozložení rychlostí, tlaku, turbulence a dalších fyzikálních veličin s vysokým prostorovým i časovým rozlišením. Tato metoda je zvláště užitečná pro složité proudové systémy, jako jsou hydrocyklony, kde experimentální měření může být obtížné nebo zcela nemožné.

Pro numerické simulace proudění tekutin existuje celá řada specializovaných CFD softwarových nástrojů, z nichž mezi nejčastěji využívané patří ANSYS Fluent, OpenFOAM, Simcenter STAR-CCM+, Simcenter FloEFD nebo SolidWorks Flow Simulation. Tyto nástroje se liší nejen v rozsahu podporovaných fyzikálních modelů a numerických metod, ale i v uživatelské přívětivosti, cenové dostupnosti a možnostech integrace s dalšími inženýrskými softwary. Výběr konkrétního programu by měl vycházet z charakteru řešené úlohy, požadované přesnosti, výpočetních nároků, zkušeností uživatele i dostupného hardwarového a licenčního zázemí.

Pro tuto práci byl zvolen software ANSYS Fluent, což je pokročilý nástroj pro numerické simulace proudění tekutin, běžně využívaný ve vědeckém i průmyslovém prostředí. Umožňuje simulaci jednofázového i vícefázového proudění s možností sledování pohybu dispergovaných částic, přenosu tepla a interakce mezi tekutinou a pevnou fází. Disponuje širokou škálou fyzikálních modelů, včetně pokročilých turbulence modelů (např. RANS, LES, DES), a podporuje paralelní výpočty i automatizaci pomocí skriptování. Tento nástroj byl zvolen také z praktických důvodů, neboť je běžně využíván při výuce a výzkumu na Vysokém učení technickém v Brně, kde je k dispozici potřebná licence i odpovídající výpočetní infrastruktura. [27]

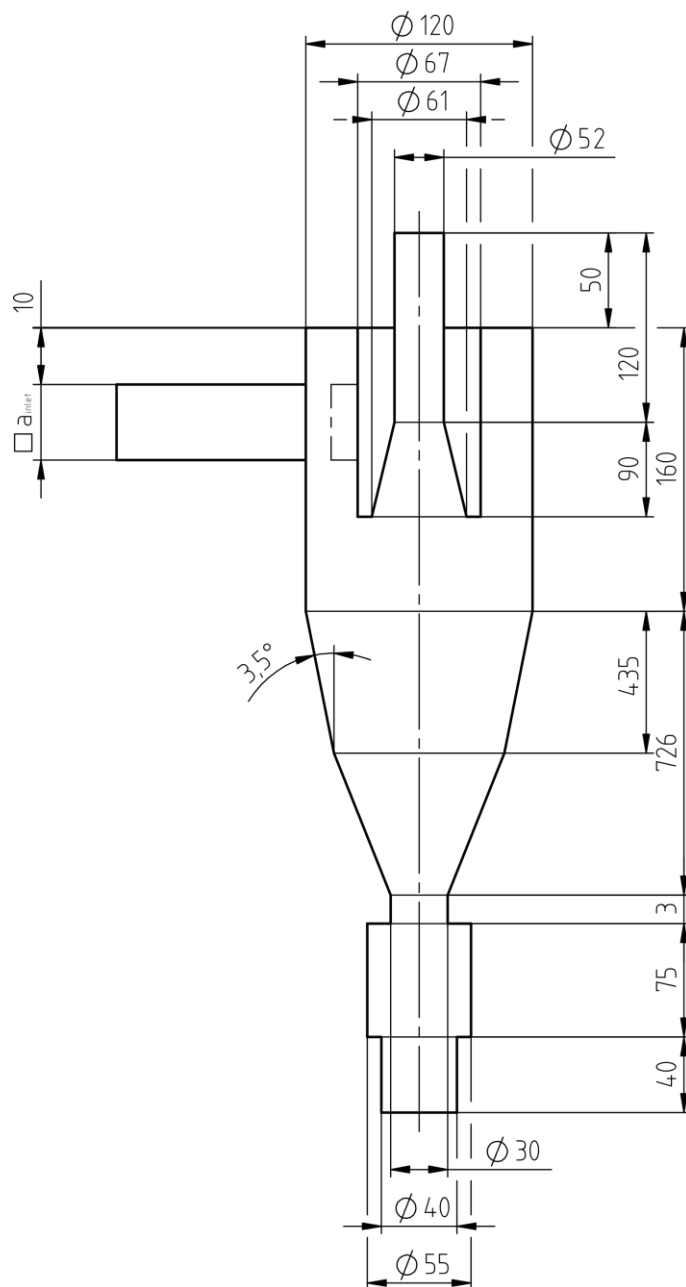
3.1 Geometrie hydrocyklonu

Numerické simulace byly prováděny na základě ideálního axiálně-symetrického modelu hydrocyklonu, který odpovídá běžnému konstrukčnímu řešení používanému v průmyslové praxi. Pro účely simulací byl zvolen stálý objemový průtok kapalně fáze $Q = 400$ l/min, což odpovídá hmotnostnímu průtoku 6,655 kg/s při hustotě vody 998,2 kg/m³.

Na základě tohoto průtoku byla vytvořena sada osmi geometrických variant, které se mezi

sebou liší rozměrem vstupního potrubí. Vstupní rychlost a_{inlet} byla pro jednotlivé varianty nastavena na hodnoty 1 až 8 m/s v krocích po 1 m/s. Při zachování nominálního průtoku bylo tedy nutné pro každou variantu odpovídajícím způsobem upravit rozměr vstupní trubice a_{inlet} .

Přehled navržených rozměrů vstupní trubice pro jednotlivé rychlostní varianty je uveden v tabulce 1. Schematická geometrie modelu s vyznačenými hlavními rozměry je zobrazena na obrázku 9.



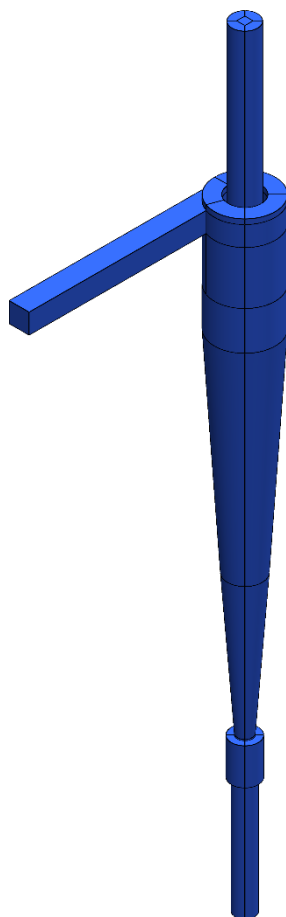
Obrázek 9 Schéma geometrie hydrocyklonu

Tabulka 1 Rozměry vstupní trubice a_{inlet} a vstupní rychlosti v_{inlet} pro nominální průtok $Q = 400 \text{ l/min}$

a_{inlet} [mm]	81,6	57,7	47,1	40,8	36,5	33,3	30,9	28,9
v_{inlet} [m/s]	1	2	3	4	5	6	7	8

3.2 Tvorba modelu

Na základě návrhu geometrie byla ve 3D CAD softwaru SolidWorks vytvořena sada osmi modelů hydrocyklonu odpovídajících různým variantám vstupní rychlosti. Vstupní a výstupní oblasti byly oproti skutečné konstrukci prodlouženy, aby bylo zajištěno ustálení proudění před vstupem do vírové komory a minimalizován vliv okrajových podmínek na řešenou oblast. Tento software byl zvolen pro svou flexibilitu při modelování složitých tvarů. Celkový 3D model hydrocyklonu je znázorněn na obrázku 10.



Obrázek 10 Schéma geometrie hydrocyklonu

Hotové modely byly přeneseny do prostředí ANSYS SpaceClaim, které slouží ke kontrole a finální úpravě geometrie před generováním výpočetní sítě. V rámci této fáze byla provedena kontrola těsnosti objemů a následně sloučení všech objemů do jedné výpočetní domény. Tento krok je zásadní pro bezproblémové chování modelu ve výpočtu, neboť ANSYS Fluent vyžaduje

pro výpočet proudění spojitý objem.

V prostředí SpaceClaim byly rovněž vytvořeny pojmenované oblasti (*named selections*), které jsou nezbytné pro přiřazení okrajových podmínek v simulaci v ANSYS Fluent. Vstupní plocha vstupní trubice byla označena jako *inlet*, výstupní plocha přepadové trysky nesla označení *outlet_up*, zatímco plocha odtokové trysky byla označena jako *outlet_dwn*. Všechny zbývající plochy tvořící vnější obálku výpočetní domény byly pojmenovány jako *wall*.

3.3 Tvorba výpočetní sítě

Po dokončení úprav geometrie v prostředí ANSYS SpaceClaim následovala tvorba výpočetní sítě, která je nezbytným krokem pro numerické řešení rovnic proudění tekutin. Síť byla generována v modulu ANSYS Meshing a byla tvořena výhradně strukturovanými hexahedrálními elementy. Využití tohoto typu sítě bylo umožněno díky předchozímu dělení objemu modelu do 108 částí s jednoduchou topologií, které jsou vhodné pro pravidelné mapování. Tento přístup přispěl k lepší kontrole nad rozmístěním elementů a vyšší kvalitě sítě.

Pro každou z osmi geometrických variant byla vytvořena samostatná výpočetní síť s přibližně stejným počtem prvků, pohybujícím se kolem 2,7 milionu. Hustota sítě byla lokálně přizpůsobena charakteru proudění – v oblastech s očekávanými vysokými rychlostními gradienty a intenzivní turbulencí, zejména v oblasti vstupní trubice a přepadové trysky, byla síť výrazně zjemněna. Naopak v méně exponovaných oblastech bylo zvoleno hrubší rozvržení elementů s cílem omezit výpočetní náročnost bez ztráty přesnosti.

Pro každou z osmi variant geometrie byla vytvořena samostatná výpočetní síť s přibližně stejným počtem hexahedrálních prvků, pohybujícím se okolo 2,7 milionu. Hustota sítě byla lokálně přizpůsobena charakteru proudění – nejjemnější rozvržení bylo aplikováno v oblasti vstupního potrubí a přepadové trysky, kde se očekávají vysoké rychlostní gradienty a intenzivní turbulence. Naopak v oblastech s méně dynamickým prouděním, byla síť záměrně hrubší s cílem snížit výpočetní náročnost bez ztráty přesnosti.

Kvalita výpočetních sítí byla následně vyhodnocena pomocí základních geometrických ukazatelů. Výsledky pro jednotlivé varianty jsou shrnuty v tabulce 2. Hodnoty ortogonální kvality (*orthogonal quality*) se ve všech případech pohybovaly nad 0,98, což svědčí o výborné ortogonalitě buněk. Průměrná kvalita elementu (*element quality*) se mírně snižovala s rostoucí vstupní rychlostí, avšak ve všech případech zůstávala nad obecně doporučovanou hodnotou 0,3. Hodnoty šikmosti (*skewness*) se pohybovaly hluboko pod doporučovanou průměrnou hodnotou 0,33, což potvrzuje minimální geometrické zkreslení buněk. Poměr stran (*aspect ratio*) byl u všech variant přibližně 8,8 – mírně nad ideální hodnotou (do 5), ale stále v rámci

akceptovatelného rozsahu. [28]

Tabulka 2 Ukazatele kvality výpočetní sítě

a_{inlet} [m/s]	Počet elementů [mil.]	Průměrné hodnoty			
		Poměr stran	Kvalita elementu	Ortogonální kvalita	Šikmost
1	2,760	8,722	0,336	0,982	0,059
2	2,727	8,808	0,329	0,983	0,058
3	2,753	8,852	0,326	0,983	0,058
4	2,706	8,866	0,325	0,983	0,057
5	2,701	8,880	0,324	0,984	0,056
6	2,697	8,892	0,323	0,984	0,056
7	2,697	8,95	0,322	0,984	0,056
8	2,692	8,904	0,322	0,984	0,056

Celkově lze konstatovat, že vytvořené sítě splňují požadavky na kvalitativní parametry pro simulace turbulentního proudění. Přestože v některých lokálních oblastech mohou existovat méně kvalitní buňky, během výpočtů nebyly zaznamenány známky numerické nestability ani potíže s konvergencí. Výsledné sítě tak byly vyhodnoceny jako dostatečně přesné a robustní pro účely této práce.

3.4 Nastavení numerické simulace

Veškeré nastavení simulací v prostředí ANSYS Fluent bylo provedeno prostřednictvím journal souboru, což umožnilo plně automatizovaný výpočetní proces bez nutnosti ručních zásahů v grafickém uživatelském rozhraní. Tento přístup přináší řadu výhod, mezi které patří zejména opakovatelnost nastavení napříč variantami, snadná modifikace vstupních parametrů pomocí proměnných a možnost dávkového zpracování simulací na výpočetním clusteru.

Journal soubor byl vytvořen jako univerzální šablona pro všechny varianty geometrie s možností snadné modifikace klíčových parametrů, jako jsou hmotnostní průtoky vody a částic nebo podmínky na výstupech. Obsahuje kompletní sadu příkazů potřebných pro konzistentní nastavení simulace – od importu výpočetní sítě, přes aktivaci fyzikálních modelů, přiřazení výpočetních oblastí a materiálových vlastností, až po definici okrajových podmínek, nastavení vstřikování částic diskrétní fáze a výběr numerických schémat.

3.4.1 Řešič a režim výpočtu

Numerické simulace byly prováděny s využitím tlakově založeného řešiče (*pressure-*

based solver) v pseudo-transientním režimu. Tento přístup byl zvolen s ohledem na charakter řešené úlohy, která předpokládá ustálené proudění kapaliny za časově neměnných okrajových podmínek, zatímco pohyb dispergovaných částic je neustálený a probíhá v turbulentním vířivém poli. Pseudo-transientní režim zavádí fiktivní časový krok, který umožňuje dynamické přizpůsobení proudového pole bez nutnosti plně nestacionární simulace, čímž se výrazně snižuje časová náročnost výpočtu při zachování dostatečné fyzikální věrnosti simulace. Hodnota pseudočasového kroku byla nastavena na 0,001 s.

Tlakově založený řešič je obecně určen pro simulace nekompresibilního nebo slabě kompresibilního proudění, kdy změny hustoty v důsledku změn tlaku nejsou významné. Tento typ řešiče iterativně řeší rovnice kontinuity a hybnosti prostřednictvím aproximací korekcí tlaku, což umožňuje efektivní výpočet i v geometriích s výraznou vířivostí.

Pro zohlednění gravitačních účinků působících na obě fáze (kapalinu i částice) bylo aktivováno gravitační zrychlení ve směru osy hydrocyklonu s hodnotou $-9,81 \text{ m/s}^2$. Toto nastavení odpovídá vertikálnímu uspořádání hydrocyklonu a umožňuje modelovat sedimentaci a vztlačkové efekty v gravitačním poli.

3.4.2 Model turbulence

Proudění uvnitř hydrocyklonu je charakteristické intenzivní turbulencí, složitými vířivými strukturami a velkými gradienty rychlosti i tlaku. Pro numerické modelování takto komplexních proudových polí jsou k dispozici různé modely turbulence, které se liší úrovní fyzikální věrnosti i výpočetní náročností.

V inženýrských výpočtech se nejčastěji využívají modely založené na Reynoldsově průměrování Navierových–Stokesových rovnic (RANS – *Reynolds-Averaged Navier–Stokes*). Tento přístup umožňuje popis turbulentního proudění pomocí časově průměrovaných veličin, čímž výrazně snižuje výpočetní náročnost. [29]

V důsledku průměrování vznikají v rovnicích nové neznámé členy – tzv. Reynoldsova napětí, která popisují vliv turbulentních fluktuací na střední proudové pole. Pro jejich modelování je zapotřebí doplnit systém rovnic o další rovnice pro turbulentní veličiny. Nejčastěji se používají dvourovnicové modely, které zavádějí rovnice pro turbulentní kinetickou energii k a buď její disipaci ε nebo specifickou disipaci ω . Pro simulace proudění v hydrocyklonech mají praktický význam zejména následující modely turbulence. [29]

Základní variantu představuje standardní k – ε model, který je robustní, numericky stabilní a výpočetně nenáročný. Jeho hlavní nevýhodou je nižší přesnost v oblastech s rotací, zakřivením proudnic nebo při odtržení proudu, kde předpoklad izotropní turbulence a jednoduchá formulace napěťového tenzoru není dostatečně přesná. [29]

RNG (*Renormalization Group*) k - ε model zavádí korekce pro rychlostní gradienty a poskytuje přesnější popis disipace turbulence v oblastech se silnými změnami rychlosti. Výsledkem je lepší predikce v oblastech s intenzivním smykem nebo vířivým prouděním, a současně zlepšená konvergence řešení. Oproti standardnímu modelu je ale o něco náročnější na výpočetní výkon. [29]

Realizable k - ε model je nejmodernější variantou v rámci skupiny k - ε modelů. Vyznačuje se upravenou formulací turbulentní viskozity a používá diferenciální rovnici pro disipaci energie, která zohledňuje lokální vlastnosti proudění. Mezi jeho hlavní přednosti patří zajištění fyzikální realizovatelnosti výsledků (kladné turbulentní viskozity, omezené napěťové tenzory) a schopnost přesněji zachytit jevy spojené s rotací, zakřivením proudnic a anizotropními turbulentními strukturami. Tento model je doporučován právě pro proudění s dominantní vířivostí a složitým chováním, jako je tomu u hydrocyklonů. [29]

Alternativou k modelům k - ε je model k - ω SST (*Shear Stress Transport*), který kombinuje výhody modelu k - ω v blízkosti stěn s robustností modelu k - ε ve volném proudění. Zatímco model k - ω lépe popisuje proudění v mezní vrstvě a je méně citlivý na hrubost výpočetní sítě u stěn, model k - ε poskytuje vyšší stabilitu v oblastech volného turbulentního proudu. Hybridní model SST tak umožňuje přesnější simulaci proudění s odtržením, zakřivením proudnic a složitou stěnovou vrstvou, což jej činí vhodným například pro aerodynamické aplikace nebo proudění kolem překážek. [29]

Pro složité proudové struktury je k dispozici také RSM (*Reynolds Stress Model*), který přímo řeší jednotlivé složky Reynoldsova napětí a poskytuje nejvyšší míru věrnosti v případech výrazně anizotropní turbulence. Jeho hlavní nevýhodou je velmi vysoká výpočetní náročnost a horší konvergenční chování. [29]

Nejvyšší přesnost pak poskytuje metoda LES (*Large Eddy Simulation*), která přímo simuluje velké turbulentní víry. LES umožňuje velmi podrobný popis proudového pole, avšak za cenu extrémních výpočetních nároků, jemné výpočetní sítě a malého časového kroku, což ji činí prakticky nevhodnou pro většinu běžných inženýrských aplikací s rozsáhlou výpočetní doménou. [29]

S ohledem na povahu proudění v hydrocyklonu, ale také na požadavky na výpočetní náročnost a reálné možnosti dostupné výpočetní infrastruktury, byl v této práci zvolen model turbulence *realizable* k - ε . Ve srovnání se standardní variantou poskytuje tento model výrazně lepší výsledky v oblastech s rotací, zakřivením proudnic a výrazným smykem, které jsou pro proudění v hydrocyklonu typické. Oproti pokročilejším modelům, jako je RSM nebo LES, nabízí vhodný kompromis mezi přesností a výpočetní efektivitou, a zároveň stabilní konvergenční

i při složitých vířivých proudech. Model $k-\omega$ SST, ačkoliv přesnější v oblasti mezních vrstev, je výrazně citlivější na kvalitu výpočetní sítě a vyžaduje jemnější rozvržení v blízkosti stěn.

Kombinace modelu *realizable* $k-\varepsilon$ s volbou nerovnovážných stěnových funkcí (*non-equilibrium wall functions*) navíc umožňuje dostatečně přesnou predikci turbulentního napětí v oblasti stěn při zachování rozumné hustoty výpočetní sítě. Tyto funkce zohledňují nestacionární charakter proudění v přechodové oblasti mezi laminární a turbulentní mezní vrstvou, a lépe zachycují změny v tlakovém gradientu i nerovnovážné proudění, což je pro hydrocyklon zcela zásadní.

Model turbulence byl dále doplněn o korekci zakřivení (*curvature correction*), která upravuje transport turbulentních veličin s ohledem na zakřivení proudnic a rotaci proudění. Tato korekce je vhodná zejména pro rotační zařízení, jako jsou cyklony, turbíny nebo odstředivá čerpadla, kde existuje silná vazba mezi vírovým napětím a zakřivením toku. Celkově tak zvolená kombinace modelu turbulence představuje optimální poměr mezi přesností, numerickou stabilitou a výpočetní efektivitou pro simulaci vírového proudění v hydrocyklonu. Pro simulace proudění v hydrocyklonech mají praktický význam zejména následující modely turbulence.

3.4.3 Materiálové vlastnosti fází

Simulace proudění v hydrocyklonu byla provedena jako vícefázová úloha, ve které vystupují dvě oddělené fáze – kontinuální kapalina a dispergované pevné částice. Kontinuální fází tvořila voda, která byla načtena z vestavěné databáze Fluentu pod označením *water-liquid*. Jedná se o nestlačitelnou Newtonovskou kapalinu s teplotně nezávislými vlastnostmi. Všechny simulace byly vedeny při teplotě 20 °C, pro kterou má voda hustotu 998,2 kg/m³ a dynamickou viskozitu $1,003 \times 10^{-3}$ Pa·s.[28]

Za dispergovanou pevnou fází byly zvoleny částice polystyrenu, které byly do simulace zavedeny jako inertní částice v rámci modelu diskretní fáze (DPM – *Discrete Phase Model*). Polystyren byl definován jako pevný materiál s konstantní hustotou 1050 kg/m³. Nebyla uvažována teplotní závislost vlastností ani interakce mezi jednotlivými částicemi. Dále se předpokládalo, že dispergovaná fáze má nízkou objemovou koncentraci, což umožňuje uvažovat jednosměrnou vazbu – částice jsou ovlivňovány proudovým polem kapaliny, ale samy na něj zpětně nepůsobí. [30]

3.4.4 Okrajové podmínky

Každé hranici výpočetní domény byla přiřazena odpovídající okrajová podmínka, a to na základě pojmenovaných ploch (*named selections*) vytvořených dříve v prostředí ANSYS SpaceClaim.

Plocha vstupní trubice (*inlet*) byla definována jako hmotnostní vstup (*mass-flow-inlet*),

což umožňuje přímé zadání hmotnostního průtoku kapaliny. Základní varianty byly počítány s nominálním objemovým průtokem $Q = 400$ l/min, což odpovídá hmotnostnímu průtoku vody $\dot{m} = 6,655$ kg/s při hustotě vody $998,2$ kg/m³. Pro každou ze základních variant byla simulována také sada dalších šesti průtokových podvariant odpovídajících 70 % až 130 % základního objemového průtoku (viz tabulka 3). Referenční soustava byla nastavena jako absolutní (*absolute*) a směr proudění byl specifikován jako kolmý na hraniční plochu (*normal to boundary*). Turbulence byla zadána pomocí metody *intensity and hydraulic diameter*, přičemž turbulentní intenzita byla nastavena na 10. Pro diskrétní fázi byla na vstupu použita podmínka typu *escape*.

Tabulka 3 Hodnoty průtoků pro jednotlivé podvarianty

Q [%]	70	80	90	100	110	120	130
Q [l/min]	280	320	360	400	440	480	520
\dot{m} [kg/s]	4,658	5,324	5,989	6,655	7,320	7,986	8,651

Plocha odtokové trysky (*outlet_lwr*) byla nastavena jako hmotnostní výstup (*mass-flow-outlet*) s referenční soustavou vztaženou k přilehlé výpočetní buňce (*relative to adjacent cell zone*). Tento typ podmínky umožňuje explicitně řídit hmotnostní průtok výstupem, což je vhodné při potřebě kontrolovat rozdělení toku mezi odtokovou a přepadovou tryskou. V rámci této diplomové práce byly analyzovány tři podvarianty hmotnostního průtoku odtokovou tryskou: 0,6655 kg/s, 1,331 kg/s a 1,9965 kg/s, odpovídající 10 %, 20 % a 30 % z celkového objemového průtoku, přičemž v reálném provozu se podíl průtoku odtokovou tryskou pohybuje typicky v rozmezí 5–30% z celkového průtoku v závislosti na konstrukci a provozních podmínkách hydrocyklonu. Pro dispergovanou fázi byla i zde použita podmínka typu *escape*, což znamená, že částice, které dosáhnou této plochy, doménu opouštějí a nejsou dále sledovány.

Plocha přepadové trysky (*outlet_up*) byla definována jako tlakový výstup (*pressure-outlet*) s hodnotou nulového přetlaku (0 Pa). Tato podmínka umožňuje volný výstup kapaliny bez nutnosti specifikace průtoku. Byla aktivována volba radiální rovnováha tlakové distribuce (*radial equilibrium pressure distribution*), která zachovává radiálně vyvážený tlakový profil v rotačním proudění. Směr zpětného proudění byl určen jako kolmý na hraniční plochu (*normal to boundary*) a tlak byl zadán jako celkový tlak (*total pressure*). Intenzita turbulence odpovídala hodnotě definované na vstupní ploše (10%). Také zde byla pro diskrétní fázi použita podmínka *escape*.

Všechny ostatní plochy ohraničující výpočetní doménu byly označeny jako pevná stěna (*stationary wall*) s podmínkou bez skluzu (*no-slip*). Tento přístup odpovídá předpokladu adheze kapaliny ke stěně, běžnému při simulaci v uzavřených geometriích. Pro diskrétní fázi byla

nastavená interakce typu *reflect*, což znamená, že se částice od stěn odrážejí. Použit byl polynomiální odrazový model ve směru normálovém i tečném, přičemž součinitel tření byl ponechán na výchozí hodnotě 0,2.

Celý objem výpočtové domény hydrocyklonu byl definován jako fluidní zóna (*fluid*) a vyplněn vodou (*water-liquid*).

3.4.5 Model diskretní fáze

Pro simulaci chování dispergované pevné fáze v hydrocyklonu byl v prostředí ANSYS Fluent aktivován model diskretní fáze (DPM – *Discrete Phase Model*). Tento model umožňuje numerické sledování trajektorií jednotlivých částic, které se pohybují v kontinuu proudící kapaliny a mohou s ním interagovat prostřednictvím přenosu hybnosti.

V rámci této práce byla uvažována tzv. dvousměrná vazba (*two-way coupling*), což znamená, že částice jsou nejen ovlivňovány proudovým polem kapaliny, ale zároveň na něj zpětně působí. Tento přístup je vhodný v případech, kdy koncentrace dispergované fáze již není zanedbatelná, a tedy její setrvačnost či hmotnostní podíl může ovlivnit lokální rychlosti, turbulentní veličiny nebo rozložení tlaku. V simulacích byla tedy aktivována interakce částic s kontinuální fází a aktualizace jejich parametrů v každé výpočetní iteraci, čímž bylo zajištěno konzistentní obousměrné propojení mezi kapalnou a částicovou složkou. [31]

Současně bylo zapnuto sledování průměrných hodnot (*mean values*) i kvadratických odchylek (*RMS – Root Mean Square Values*) diskretních veličin. Tyto statistické ukazatele poskytují informace o prostorovém rozložení středních hodnot (i jejich odchylek) rychlosti, koncentrace a pohybu částic v turbulentním proudovém poli. Vzhledem k tomu, že pohyb částic není ustálený, byl aktivován režim neustáleného sledování částic (*unsteady particle tracking*), ve kterém se trajektorie vyhodnocují nezávisle na časovém kroku řešení pro kapalinu. Časový krok pro pohyb částic byl nastaven na 0,001 s, přičemž v každé iteraci výpočtu byl proveden jeden časový krok. Tato hodnota byla zvolena tak, aby byla v souladu s hodnotou pseudo-transientního časového kroku pro řešení proudění, což zajišťuje časovou konzistenci výpočtu.

Pro zvýšení numerické přesnosti výpočtu pohybu částic bylo aktivováno vysoké rozlišení sledování (*high-resolution tracking*) a nastaven parametr délky (*length scale*) o hodnotě 5×10^{-4} m. Tento parametr slouží jako měřítko pro adaptivní řízení délky kroku pohybu částic a umožňuje lépe sledovat jejich trajektorie v oblastech s prudkými změnami rychlosti.

Maximální počet výpočetních kroků na částici byl stanoven na 100 000, což poskytuje dostatečnou rezervu pro výpočet složitých trajektorií ve vírovém proudění hydrocyklonu, a zároveň chrání simulaci před numerickými chybami v případě nevhodného směřování částic.

Byl rovněž aktivován automatický režim řízení přesnosti (*accuracy control*), ve kterém

program adaptivně upravuje délku kroku na základě místních podmínek. Tolerance byla nastavena na 1×10^{-5} a maximální počet zpřesňovacích cyklů na 20. Pro výpočet trajektorie částic bylo použito trapezoidální schéma druhého řádu (*second-order trapezoidal scheme*), které využívá informace o poloze částice na začátku i konci časového kroku. Paralelně bylo aktivováno i implicitní schéma, které zlepšuje stabilitu výpočtu v případech s obtížnou numerickou konvergencí.

Z hlediska působících sil byly na částice aplikovány: odporová síla (*drag force*) podle kulového modelu částic (*spherical drag law*), tlaková gradientní síla (*pressure gradient force*) a virtuální hmotnostní síla (*virtual mass force*) s koeficientem 0,5. Tyto síly významně ovlivňují chování částic v oblastech s prudkými změnami rychlosti kapaliny, což je typické právě pro vířivé proudění v hydrocyklonu. Nebyly uvažovány interakce mezi částicemi ani jejich srážky, protože koncentrace pevné fáze byla uvažována jako dostatečně nízká.

Pro přesnější zachycení pohybu částic v turbulentním prostředí byly aktivovány i pokročilé modely rozšiřující standardní popis diskrétní fáze. Zapnuta byla rotace částic (*particle rotation*), která umožňuje zohlednit momentové účinky vyvolané interakcí s prouděním nebo stěnami. Pro výpočet odporové síly u rotujících částic byl použit Dennisův model odporu (*Dennis drag law*), který modifikuje klasický odporový koeficient s ohledem na rozdíl relativní rychlosti mezi rotující částicí a okolním proudem.

Současně byl aktivován model vztlakové síly dle Oesterle–Bui-Dinh (*Magnus lift model*), který zohledňuje boční sílu působící na rotující částici v proudícím médiu. Tento tzv. Magnusův vztlak způsobuje odklon trajektorie částic.

Dále byl zapnut stochastický disperzní model (*discrete random walk model*), který zohledňuje vliv turbulence na pohyb částic tím, že k průměrné rychlosti proudění přidává náhodnou flukтуаční složku. Tento přístup umožňuje simulovat chaotický pohyb částic v turbulentním poli bez nutnosti přímého modelování turbulence (např. pomocí LES). Pro realističtější chování byla aktivována volba náhodné životnosti víření (*random eddy lifetime*), která každému turbulentnímu víru přiřazuje dobu trvání podle exponenciálního rozdělení. Časová škála vírové struktury byla nastavena na 0,15 s, což odpovídá doporučeným hodnotám pro vířivé procesy s vysokou intenzitou turbulence.

3.4.6 Vstřikování diskrétní fáze

Částice byly do výpočetní domény zaváděny pomocí plošného vstřikování (*surface injection*) z plochy vstupní trubice (*inlet*). Byly definovány jako inertní pevné částice z materiálu polystyren o průměru 5×10^{-4} m, přičemž byla zvolena uniformní distribuce velikosti (*uniform distribution*). Počáteční rychlost částic byla v každé variantě rovna rychlosti kapaliny na vstupu,

čímž bylo zajištěno fyzikálně konzistentní směšování bez uměle zavedených setrvačných efektů.

Hmotnostní tok částic byl nastaven na přibližně 2 % z hmotnostního průtoku kapaliny, což odpovídá běžným hodnotám používaným při modelování separačních procesů. Doporučované rozmezí pro tento typ simulací je zpravidla 0,5–5 %. Zvolený podíl umožňuje dostatečně sledovat interakci částic s proudovým polem, a přitom zachovat platnost předpokladu řídké disperze, při kterém lze zanedbat vzájemné srážky částic a zpětný vliv částic na kapalinu.

Samotné spuštění diskrétní fáze bylo realizováno až v pozdější fázi výpočtu, kdy, již bylo dosaženo ustáleného proudového pole. Detailní popis výpočetního postupu je uveden v následující kapitole.

3.4.7 Výpočetní schémata a postup simulace

Numerická simulace proudění v hydrocyklonu byla provedena ve třech navazujících výpočetních fázích, přičemž každá z nich využívala odlišná numerická schémata, která odpovídala aktuálním požadavkům na stabilitu a přesnost výpočtu. Cílem tohoto postupu bylo nejprve dosáhnout stabilního ustáleného proudového pole, a teprve poté aktivovat model diskrétní fáze (DPM), který je výpočetně náročnější.

Ve všech fázích byl použit tlakově založený řešič (*pressure-based solver*) v režimu pseudo-transientního výpočtu. Pro spojení tlakového a rychlostního pole bylo zvoleno tzv. spřažené schéma (*coupled scheme*), které řeší rovnice kontinuity a hybnosti současně v jednom výpočetním kroku. Tato metoda poskytuje rychlejší konvergenci a vyšší numerickou stabilitu zejména v případech s vířivým prouděním a výrazným zakřivením proudnic. Pro výpočet objemových toků byl použit interpolační algoritmus Rhie–Chow, který eliminuje tzv. *pressure checkerboarding*, tedy umělé oscilace tlaku mezi sousedními buňkami. Tento přístup je standardně doporučován při použití spřaženého řešiče.

Pro aproximaci gradientů polí byla zvolena metoda LSCB (*Least Squares Cell-Based*), která využívá hodnot veličin v okolních buňkách k výpočtu gradientu v centru buňky metodou nejmenších čtverců. Ve srovnání s metodou Green–Gauss Node-Based, která je citlivější na interpolaci uzlových hodnot a kvalitu sítě, je metoda LSCB robustnější a méně náchylná k numerickému šumu.

V první fázi simulace, která probíhala po dobu 5 000 iterací, byla použita prostorová diskretizace prvního řádu (*first-order upwind*) pro všechny transportní rovnice – hybnosti, turbulentní kinetické energie k i míry disipace turbulence ε . Toto schéma určuje hodnoty konvekčních členů na základě směru proudění z tzv. návětrné buňky (*upwind cell*). Hodnota na hranici buněk je pak jednoduše převzata z této buňky, čímž se zajišťuje stabilní chování výpočtu.

Nevýhodou tohoto schématu je numerická difuze, která vyhlazuje strmé gradienty a může snížit přesnost v oblastech s rychlou změnou proudění. Pro úvodní ustalování proudového pole je však toto schéma vhodné.

Pro tlak byla v první fázi použita standardní diskretizace (*standard scheme*), založená na centrální diferenciaci, kdy je tlakový gradient počítán jako průměr hodnot ze sousedních buněk, přičemž se předpokládá lineární průběh veličiny mezi nimi. Tento přístup poskytuje dobrý kompromis mezi stabilitou a výpočetní náročností.

Pro tlak bylo použito standardní diskretizační schéma, které je založené na centrální diferenciaci, tedy výpočtu tlakového gradientu jako průměru hodnot ze sousedních buněk, přičemž se předpokládá lineární průběh veličiny mezi nimi. Toto schéma poskytuje dobrý poměr mezi stabilitou a výpočetní efektivitou.

Druhá fáze simulace trvala 10 000 iterací a před jejím začátkem byla všechna prostorová schémata změněna na schémata druhého řádu (*second-order upwind*). Tato schémata zvyšují přesnost výpočtu konvekčních členů díky využití Taylorovy řady a hodnot nejen z návětrné buňky, ale i z jejího okolí. Výsledkem je snížení numerické difuze a zlepšená věrohodnost výsledků, zejména v oblastech se strmými gradienty. Schémata druhého řádu jsou však citlivější na kvalitu sítě a vyžadují stabilní počáteční podmínky, proto byla použita až ve druhé fázi.

Také tlakové pole bylo v této fázi počítáno přesnějším schématem druhého řádu (*second-order*). Na rozdíl od standardního schématu, které využívá pouze sousední buňky, tato varianta interpoluje tlakové hodnoty z širšího okolí buněk a předpokládá hladké rozložení tlaku, čímž se zvyšuje přesnost jeho aproximace.

Ve třetí fázi simulace, která probíhala rovněž po dobu 10 000 iterací, byl aktivován model diskrétní fáze (DPM). Tato fáze navazovala na již ustálený výpočet a byla vedena se stejnými numerickými schématy jako druhá fáze, tedy s diskretizací druhého řádu. Aktivace DPM až po dosažení ustáleného proudového pole je osvědčeným přístupem, který minimalizuje numerické oscilace a zajišťuje, že částice jsou zaváděny do fyzikálně realistického proudového prostředí. Tento postup zároveň přispívá k lepší konzistenci výpočtu a spolehlivější analýze pohybu částic v turbulentním vírovém poli hydrocyklonu.

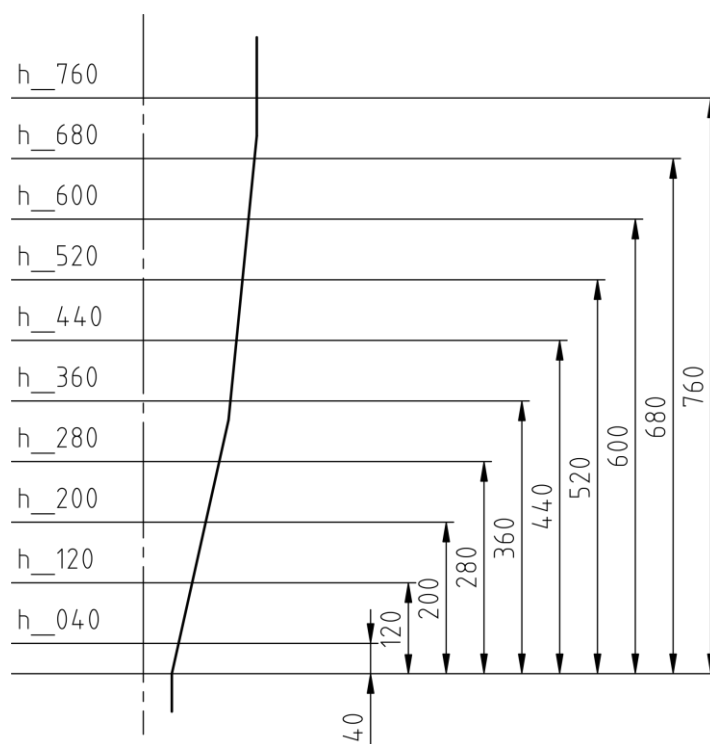
Přestože byl výpočet nastaven na pevný počet iterací bez automatického vyhodnocování konvergence, výsledky průběhu reziduí svědčí o ustálení řešení. Hodnoty reziduí hybnosti ve všech směrech (x , y , z) i turbulentních veličin (turbulentní kinetická energie k a míra disipace ε) postupně klesly a ustálily se pod hranicí 10^{-4} , což je obecně považováno za dostatečné kritérium pro stabilní a fyzikálně věrné řešení v technických aplikacích. Nejnižších hodnot dosahují rezidua vektorových složek rychlosti, které klesají až k hodnotám pod 10^{-5} . Mírně vyšší,

avšak stabilní zůstává reziduum rovnice kontinuity, jehož hodnota se pohybuje kolem 10^{-3} . Tento jev je u vířivých proudění běžný, neboť vysoké rychlostní gradienty a silná turbulence v blízkosti vírového jádra často vedou k obtížnější numerické konvergenci této rovnice. Přesto průběh reziduí neobsahuje žádné výrazné oscilace či náhlé změny, což potvrzuje dobrou numerickou stabilitu výpočtu a ustálenost proudového pole. Výpočet lze proto z hlediska spojitě fáze považovat za konvergentní a vhodný pro další analýzu rozložení tlaků, rychlostí a trajektorií částic v interiéru hydrocyklonu.

4 Výsledky a jejich analýza

Získané výsledky z CFD simulací proudění v hydrocyklonu byly analyzovány za účelem posouzení vlivu vstupní rychlosti na charakter proudění kapaliny uvnitř zařízení, a to zejména s ohledem na obvodovou složku rychlosti. V souladu se zadáním diplomové práce byly provedeny simulace pro osm variant, které se lišily rozměrem vstupní trubice a_{inlet} a vstupní rychlostí v_{inlet} v rozsahu od 1 do 8 m/s při nominálním objemovém průtoku $Q = 400$ l/min. Rozměry vstupní trubice a vstupní rychlosti jsou uvedeny v tabulce 1 v kapitole 3.1.

Pro každou z těchto variant byla navíc analyzována sada sedmi průtokových podvariant odpovídajících 70 % až 130 % nominálního objemového průtoku. Jednotlivé průtokové podvarianty jsou uvedeny v tabulce 3 v kapitole 3.4.4. V každém z těchto 56 případů bylo proudění modelováno se stanoveným poměrem průtoku odtokovou tryskou k celkovému průtoku $\phi = 0,2$. Dále byly vyhodnoceno ale také vyhodnoceny varianty pro vstupní rychlosti v rozsahu od 1 do 8 m/s při nominálním objemovém průtoku $Q = 400$ l/min s poměrem $\phi = 0,1$ a $\phi = 0,3$.



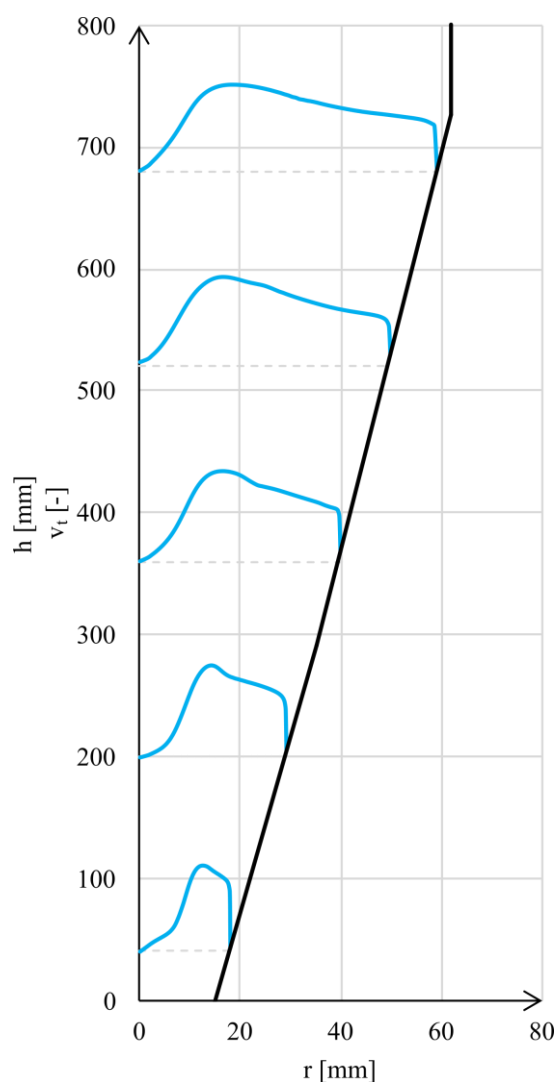
Obrázek 11 Schéma rozmístění rovin po výšce hydrocyklonu

Hodnocení bylo provedeno na soustavě horizontálních rovin ve výšce h , umístěných podél osy hydrocyklonu v pravidelných rozstupech po 80 mm, přičemž počátek souřadnice byl zvolen v úrovni odtokové trysky. Přesné umístění a označení těchto rovin je patrné ze schématu na obrázku 11, kde jsou jednotlivé výšky označeny a zakótovány. Vyhodnocení bylo zaměřeno zejména na spodní část vírové komory, neboť v horní části komory v blízkosti vstupní trubice

se vírové proudění teprve formuje a proudové pole zde bývá výrazně ovlivněno vstupními podmínkami. Dochází zde ke vzniku asymetrického a nepravidelného turbulentního proudění, které by mohlo zkreslit vyhodnocení typického rozložení tangenciální složky ve stabilizované vírové struktuře.

4.1 Rozložení tangenciální rychlosti

Pro kvantitativní posouzení rozložení vírového pole v interiéru hydrocyklonu byla provedena analýza tangenciální složky rychlosti v_t v závislosti na výšce ve vírové komoře h poloměru r . Na obrázku 12 jsou zobrazeny typické profily tangenciální rychlosti v jednotlivých výškách kuželové části vírové komory pro vstupní rychlost $v_{inlet} = 4$ m/s.



Obrázek 12 Rozložení tangenciální rychlosti v závislosti na výšce a poloměru pro nominální průtok $Q = 400$ l/min, rozměr vstupní trubice $a_{inlet} = 40,8$ mm a poměr $\phi = 0,2$

Z průběhu rychlostních profilů v jednotlivých výškových rovinách je zřejmé, že tangenciální složka dosahuje maxima ve střední části vírového pole a směrem ke stěně i k ose klesá.

Tento tvar odpovídá očekávanému fyzikálnímu chování, kdy se v blízkosti středu projevuje vynucený vír – tekutina se zde otáčí přibližně jako tuhé těleso a tangenciální rychlost roste lineárně s poloměrem. Naopak ve vzdálenější oblasti od osy rotace, směrem ke stěně, se profil mění a přechází do režimu volného víru, kde je tangenciální rychlost nepřímo úměrná poloměru (pokles). V některých výškových hladinách je navíc patrný poměrně ostrý pokles tangenciální rychlosti blízko stěny, což lze přičíst vlivu viskozity a turbulentního smyku v mezní vrstvě.

Takto rozdělené proudění potvrzuje, že ve vírovém poli dochází ke kombinaci obou typů víru, což je typické pro proudění v hydrocyklonech. Přechod mezi vynuceným a volným vírem je pozvolný a poloměr, ve kterém dochází k maximu tangenciální rychlosti, se s rostoucí výškou mírně posouvá směrem ke středu. Tento jev lze interpretovat jako důsledek axiálního přenosu hybnosti a změny geometrie z válcové na kuželovou.

4.1.1 Závislost tangenciální rychlosti na vstupní rychlosti

Tangenciální složka rychlosti představuje zásadní parametr z hlediska účinnosti odlučování, neboť přímo určuje velikost odstředivé síly působící na částice. Vzhledem k tomu, že intenzita vířivého proudění se začíná formovat již v oblasti vstupu do vírové komory, bylo vyhodnoceno chování střední tangenciální rychlosti v_t právě v mezikruhovém prostoru mezi vnějším okrajem výstupní trubice a stěnou vírové komory.

Z hlediska hodnocení proudového pole byla jako klíčový parametr zvolena střední hodnota tangenciální rychlosti v_t ve zvolených výškových rovinách. Tento přístup lépe odpovídá potřebám kvantitativního vyhodnocení intenzity vírového proudění, neboť reprezentuje celkovou míru rotace kapaliny v daném řezu. Tato veličina je zároveň vhodná pro regresní analýzu a umožňuje srovnání mezi jednotlivými variantami vstupních podmínek.

Vyhodnocení bylo provedeno na základě již vypočtených variant proudění, které odpovídaly osmi různým rozměrům vstupní trubice a_{inlet} při nominálním objemovém průtoku $Q = 400$ l/min. Pro každou z těchto konfigurací byla známa vstupní rychlost v_{inlet} , která se v důsledku změn průřezu vstupního potrubí pohybovala v rozmezí 1 až 8 m/s.

Získané hodnoty byly vykresleny jako funkce vstupní rychlosti a výsledná závislost byla aproximována kvadratickým regresním polynomem:

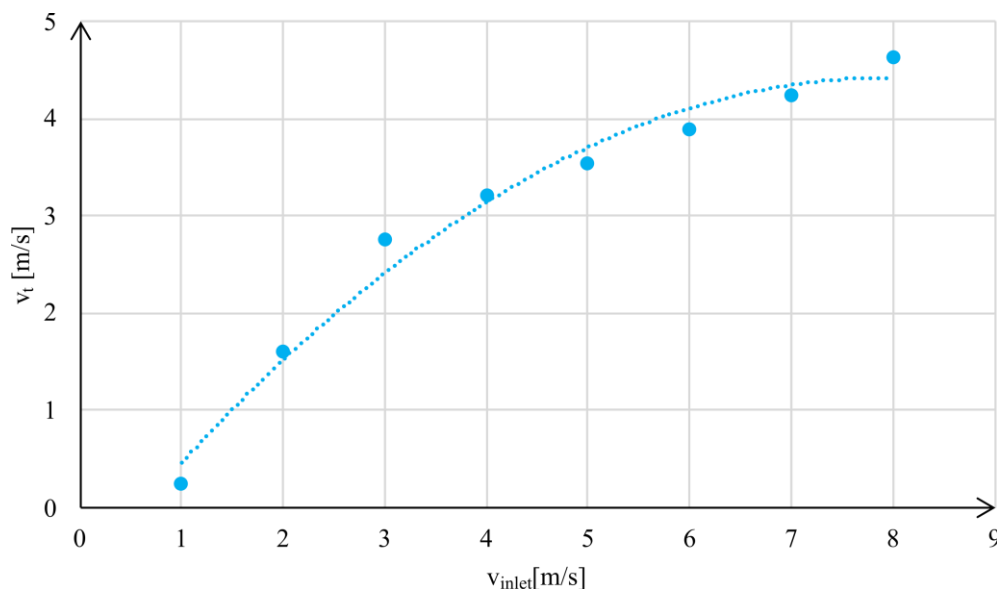
$$v_t(v_{inlet}) = -0,082 \cdot v_{inlet}^2 + 1,305 \cdot v_{inlet} - 0,767 \quad (13)$$

kde: v_t je tangenciální rychlost,

v_{inlet} je vstupní rychlost.

Výsledná křivka (viz obrázek 13) ukazuje, že tangenciální rychlost výrazně narůstá se

vstupní rychlostí, avšak nelineárním způsobem. Zatímco v oblasti nižších rychlostí dochází k prudkému nárůstu při vyšších hodnotách se růst zpomaluje, což lze přičíst zvýšenému podílu ztrát v důsledku turbulence a nerovnoměrného víření. Tento trend je v souladu s očekáváním, neboť přenos hybnosti do rotační složky není lineární a je ovlivněn komplexní interakcí proudových struktur v blízkosti vstupu.



Obrázek 13 Závislost tangenciální rychlosti v_t na vstupní rychlosti v_{inlet} ve vstupní oblasti pro nominální průtok $Q = 400$ l/min a poměr $\phi = 0,2$

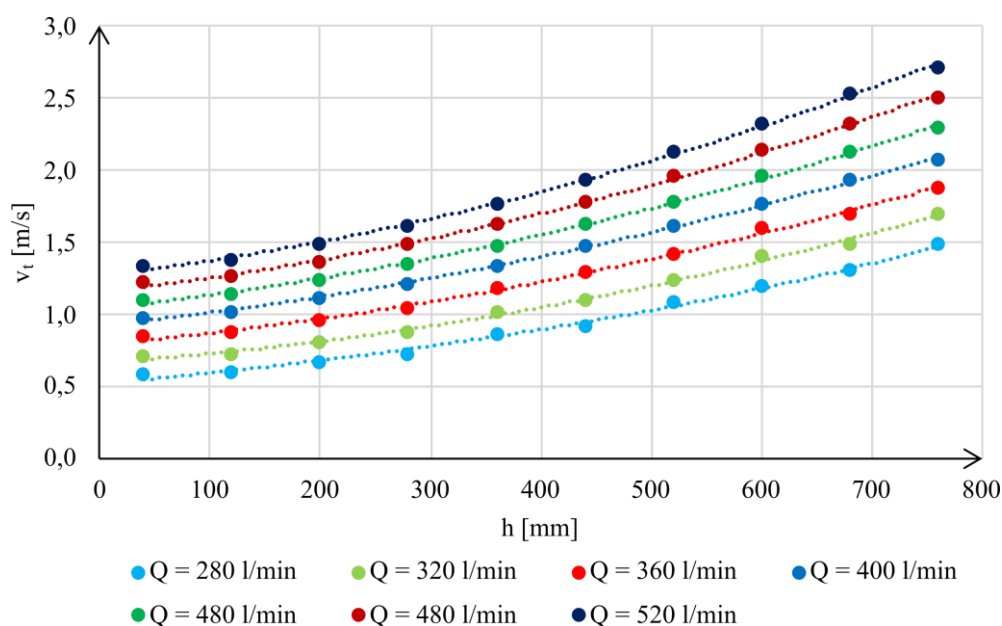
Je důležité poznamenat, že výsledný model zachycuje nejen přímý vliv vstupní rychlosti, ale nepřímo také vliv poměru mezi rozměrem vstupní trubice a_{inlet} a průměrem vírové komory D , neboť při jinak neměnné geometrii hydrocyklonu byl měněn rozměr vstupní trubice. Poměr se tedy mezi jednotlivými variantami měnil a jeho vliv je implicitně zakódován ve funkčním vztahu mezi vstupní a tangenciální rychlostí. Výsledný model tak tvoří částečně zobecněný vztah pro odhad intenzity vířivosti ve vstupní oblasti a umožňuje orientační porovnání různých konstrukčních konfigurací bez nutnosti provádět samostatnou simulaci každého případu. Pro úplné zobecnění by však bylo zapotřebí zahrnout i vlivy dalších geometrických poměrů, zejména průměru výstupní trubice k průměru vírové komory či poměru odtokové trysky k průměru vírové komory, jejichž variabilita nebyla v rámci této práce uvažována.

4.1.2 Závislost tangenciální rychlosti na výšce komory

Pro každou simulovanou kombinaci průtoku a rozměru vstupní trubice byly z výpočtového řešení extrahovány profily střední hodnoty tangenciální rychlosti v axiálním směru. Výsledky byly zpracovány formou grafického výstupu, který zobrazoval závislost tangenciální rychlosti na výšce komory h .

S rostoucím vstupním průtokem i klesajícím rozměrem vstupní trubice dochází k výraznému nárůstu tangenciální rychlosti a zesílení vírového pole v komoře hydrocyklonu. Menší vstupní průřez při zachovaném průtoku totiž vede ke zvýšení vstupní rychlosti, a tím i k intenzivnějšímu přenosu hybnosti do obvodové složky proudění. Pro menší rozměry vstupní trubice a_{inlet} jsou dosažené hodnoty tangenciální rychlosti výrazně vyšší, průběhy mají strmější kvadratický charakter a maximum se posouvá výše.

Typickým příkladem vývoje tangenciální rychlosti podél výšky komory je na obrázku 14, který ukazuje průběhy pro různé hodnoty průtoku při rozměru vstupní trubice $a_{inlet} = 40,8$ mm.



Obrázek 14 Závislost tangenciální rychlosti v_t na výšce vírové komory h pro různé průtoky Q , rozměr vstupní trubice $a_{inlet} = 40,8$ mm a poměr $\phi = 0,2$

Na základě těchto dat byla provedena kvadratická regrese ve tvaru:

$$v_t(h) = a_1 \cdot h^2 + b_1 \cdot h + c_1 \quad (14)$$

kde: v_t je tangenciální rychlost,

h je výška ve vírové komoře,

a_1, b_1, c_1 jsou koeficienty kvadratického polynomu.

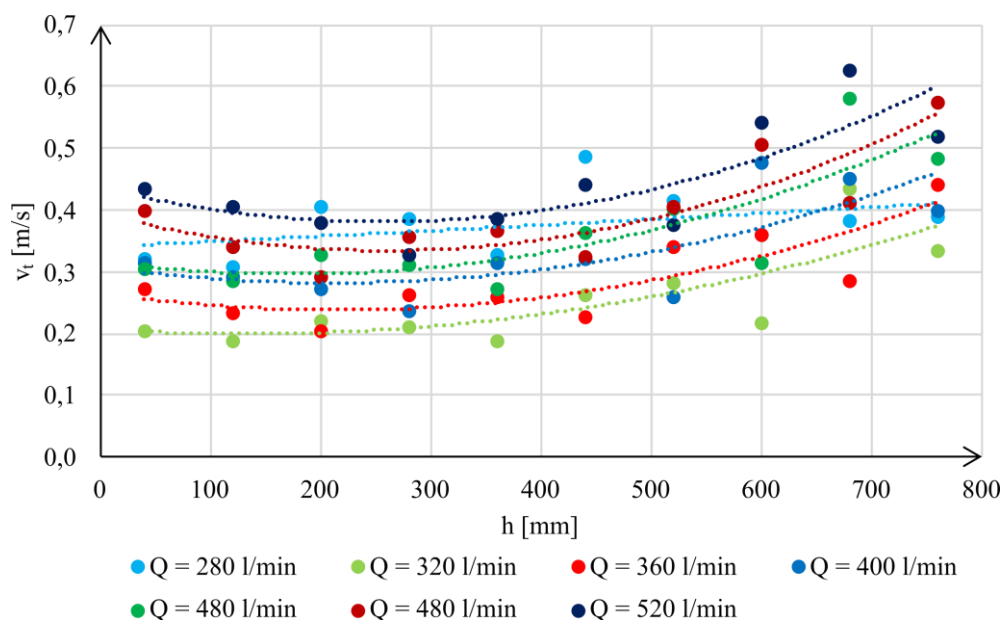
Provedením kvadratické regrese bylo možné jednotlivé simulované varianty kvantitativně porovnat na základě tvaru jejich výškových profilů. Koeficient a_1 udává míru zakřivení profilu – čím vyšší je jeho hodnota, tím výraznější je gradient tangenciální rychlosti. Koeficient b_1 ovlivňuje polohu maxima rychlosti podél výšky komory. Koeficient c_1 odpovídá hodnotě rychlosti poblíž dna separátoru. Hodnoty jednotlivých regresních koeficientů pro křivky závislosti zobrazené na obrázku 14 jsou uvedeny v tabulce 4. Tyto hodnoty odrážejí variabilitu tvaru

výškového profilu tangenciální rychlosti v závislosti na průtoku a rozměru vstupní trubice.

Tabulka 4 Koefficienty kvadratického polynomu pro regresi závislosti tangenciální rychlosti v_t na výšce vírové komory h pro různé průtoky Q , rozměr vstupní trubice $a_{inlet} = 40,8$ mm a poměr $\phi = 0,2$

Q [l/min]	a_1 [mm ⁻² ×10 ⁻⁶]	b_1 [mm ⁻¹ ×10 ⁻⁴]	c_1 [-]
280	0,7135	0,6575	0,3890
320	0,8274	0,3994	0,4687
360	0,9482	0,0821	0,5494
400	1,0757	-0,2871	0,6310
440	1,2093	-0,7209	0,7141
480	1,3479	-1,1974	0,7980
520	1,4912	-1,7093	0,8826

Obvodová složka rychlosti zpravidla dosahuje svých maximálních hodnot v oblasti tečného vstupu, tedy v horní části vírové komory, kde je proud tangenciálně a přenos hybnosti do vírového pohybu je nejintenzivnější. S klesající výškou, tedy směrem ke kuželové části a spodnímu výstupu, pak tangenciální rychlost obvykle klesá, neboť část kinetické energie víru se přeměňuje v axiální pohyb.



Obrázek 15 Závislost tangenciální rychlosti v_t na výšce vírové komory h pro různé průtoky Q při rozměru vstupní trubice $a_{inlet} = 81,6$ mm a poměr $\phi = 0,2$

Na obrázku 15 je pak zobrazena závislost tečné rychlosti pro konfiguraci s největším uvažovaným rozměrem vstupní trubice $a_{inlet} = 81,6$ mm. V porovnání s ostatními variantami zde

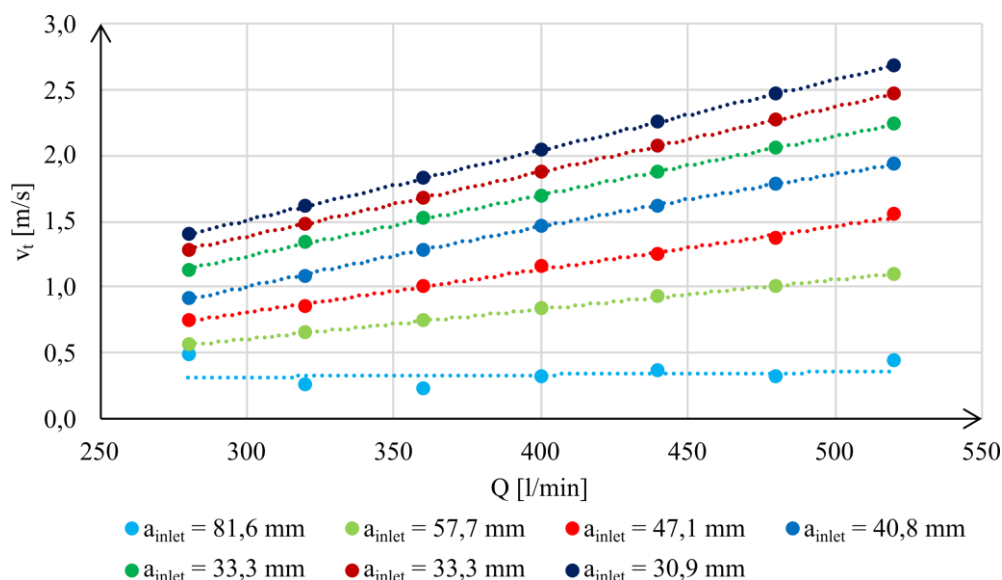
však nebyl zaznamenán konzistentní kvadratický charakter výškových profilů. Zvláště při nejnižším simulovaném průtoku $Q = 280$ l/min se tangenciální rychlost s rostoucí výškou prakticky nezvyšovala a průběh regrese měl až konkávní tvar. To nasvědčuje tomu, že vírové pole se při takto nízké vstupní rychlosti neformuje typickým způsobem a nedochází k výraznému přenosu hybnosti do tangenciální složky proudění.

Naopak u vyšších průtoků již byly křivky zakřivené přibližně kvadraticky, nicméně i tyto profily vykazovaly vyšší míru rozptylu a méně konzistentní průběh v porovnání s ostatními variantami. Tento rozptyl pravděpodobně souvisí s projevy lokálních turbulentních jevů a nestabilit vírového pole, které jsou typické pro případy s nízkou vstupní rychlostí a slabším vířením.

Z hlediska další analýzy tak tato varianta představuje okrajový případ, a proto byla tato konfigurace vstupní trubice z další analýzy vyčleněna, a to ve prospěch variant s menšími vstupními rozměry, u nichž byly profily rychlosti výrazněji zakřivené, hladší a lépe popsateľně závislé.

4.1.3 Závislost tangenciální rychlosti na průtoku

Pro všechny vyhodnocované roviny po výšce hydrocyklonu byly vykresleny grafy závislosti tangenciální rychlosti v_t na vstupním průtoku Q , a to pro každou variantu rozměru vstupní trubice a_{inlet} . Cílem bylo sledovat, jak se mění intenzita vírového pole s rostoucím objemovým tokem a jak tento vývoj závisí na velikosti vstupního průřezu.



Obrázek 16 Závislost tangenciální rychlosti v_t na průtoku Q pro různé rozměry vstupní trubice a_{inlet} , výšku ve vírové komoře $h = 440$ mm a poměr $\phi = 0,2$

Na obrázku 16 je tato závislost zachycena na rovině ve výšce $h = 440$ mm, která se nachází přibližně v polovině kuželové části vírové komory. Všechny varianty vykazují téměř

lineární nárůst obvodové rychlosti s rostoucím průtokem, přičemž přímky se vzájemně liší především svou polohou. Nejvyšších hodnot je dosaženo u variant s nejmenším vstupním rozměrem, kde je vírové pole nejintenzivnější. To odpovídá očekávanému fyzikálnímu chování, kdy menší vstupní průřez způsobuje vyšší vstupní rychlost a tím i silnější přenos hybnosti do rotačního pohybu. Výrazně se však od ostatních odlišuje průběh pro rozměr $a_{inlet} = 81,6$ mm, který nelze popsat jednoduchým lineárním vztahem.

Je zároveň vhodné poznamenat, že výsledky ukazují, že v provozním rozsahu 70 až 130 % nominálního průtoku $Q = 400$ l/min si obvodová rychlost zachovává téměř lineární průběh, což svědčí nikoliv o ideálním, ale o poměrně zdařilém návrhu geometrie hydrocyklonu, zejména z hlediska poměru průměru výstupní trubice k průměru vírové komory.

Na základě grafů provedena lineární regrese ve tvaru:

$$v_t(Q) = b_2 \cdot Q + c_2 \quad (15)$$

kde: v_t je tangenciální rychlost,

Q je celkový objemový průtok,

b_2, c_2 jsou koeficienty lineárního polynomu.

Regresní rovnice slouží pro interpolaci mezi simulovanými průtoky a kvantitativní porovnání variant. Výsledky ukazují, že hodnota směrového koeficientu b_2 klesá s rostoucím rozměrem vstupní trubice, což numericky potvrzuje, že menší vstupy reagují na změnu průtoku citlivěji a generují vyšší gradient tangenciální rychlosti. Hodnoty koeficientů lineárního polynomu jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 Koeficienty lineárního polynomu pro regresi závislosti tangenciální rychlosti v_t na průtoku Q pro různé rozměry vstupní trubice a_{inlet} , výšku ve vírové komoře $h = 440$ mm a poměr $\phi = 0,2$

a_{inlet} [m/s]	b_1 [m/s·(l/min) ⁻¹ ×10 ⁻²]	c_1 [m/s×10 ⁻¹]
2	1,0534	0,0990
3	1,5507	-0,5345
4	2,0842	-0,0615
5	2,7616	-1,4376
6	3,2664	-0,6040
7	3,7932	-1,3713
8	4,2715	-1,5432

4.1.4 Sestavení zobecněného modelu tangenciální rychlosti

Na základě předchozích výsledků, které ukázaly závislost tangenciální rychlosti na výšce h , průtoku Q a rozměru vstupní trubice a_{inlet} , byl učiněn pokus o sestavení zobecněného prediktivního modelu ve tvaru:

$$v_t(h, Q, a_{inlet}) = a(Q, a_{inlet}) \cdot h^2 + b(Q, a_{inlet}) \cdot h + c(Q, a_{inlet}) \quad (16)$$

kde: v_t je tangenciální rychlost,

h je výška ve vírové komoře,

Q je celkový objemový průtok,

a_{inlet} je rozměr vstupní trubice,

a, b, c jsou koeficienty kvadratického polynomu.

Postup tvorby tohoto modelu vycházel z předpokladu, že výškový profil tangenciální rychlosti lze pro každou kombinaci vstupních parametrů aproximovat kvadratickou funkcí výšky s regresními koeficienty a, b, c . Tato aproximace byla provedena na základě výsledků CFD simulací, jak bylo podrobněji rozebráno v kapitole 4.1.2.

Následně byl proveden vícestupňový aproximační postup: pro každou výšku byly hodnoty koeficientu a vyjádřeny nejprve jako lineární funkce průtoku Q , a poté byl koeficient aproximován kvadratickou funkcí rozměru vstupní trubice a_{inlet} . Tímto způsobem vznikla zobecněná regrese koeficientu a (koeficient zakřivení výškového profilu tangenciální rychlosti), která je funkcí obou proměnných Q a a_{inlet} . Výsledná rovnice má následující tvar:

$$a(Q, a_{inlet}) = \gamma_1 \cdot Q^2 + \gamma_2 \cdot Q + \gamma_3 \cdot a_{inlet}^2 + \gamma_4 \cdot a_{inlet} + \gamma_5 \cdot Q \cdot a_{inlet} + \gamma_6 \quad (17)$$

kde: v_t je tangenciální rychlost,

Q je celkový objemový průtok,

a_{inlet} je rozměr vstupní trubice,

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6$ jsou regresní koeficienty.

Obdobným vícestupňovým regresním postupem byly určeny také koeficienty b a c , které ovlivňují polohu a základní úroveň výškového profilu. I pro ně byly provedeny samostatné regrese nejprve v závislosti na průtoku a následně v závislosti na rozměru vstupu. Tím vznikl soubor funkcí, které umožňují predikovat průběh tangenciální rychlosti v prostoru hydrocyklonu jako funkci všech tří vstupních parametrů.

I když byl výsledný model matematicky konzistentní a výpočetně realizovatelný, jeho přesnost nebyla dostatečná pro spolehlivé vyhodnocení. Při porovnání predikovaných hodnot

s výstupy z CFD simulací byly zaznamenány odchylky až v řádu 0,6 m/s, zejména u krajních kombinací vstupních podmínek. Tento rozdíl byl způsoben především kumulací aproximačních chyb v každé z regresních fází a silnou vzájemnou interakcí proměnných, která nebyla dostatečně zachycena jednoduchým polynomickým modelem.

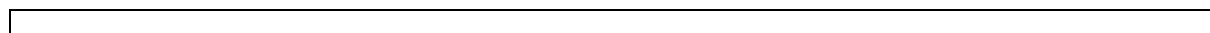
Z těchto důvodů nebyl zobecněný model použit pro finální interpretaci výsledků, ale slouží jako doplňkový nástroj ilustrující trend vývoje tangenciální rychlosti v závislosti na všech třech parametrech. Výsledky zároveň ukazují, že přesnější popis vírového pole v hydrocyklonu vyžaduje samostatné zpracování závislosti na každé proměnné zvlášť, jak bylo provedeno v předchozích kapitolách. Tento přístup umožnil lépe identifikovat fyzikální souvislosti a zajistit vyšší přesnost při hodnocení vlivu jednotlivých vstupních parametrů na charakter proudění.

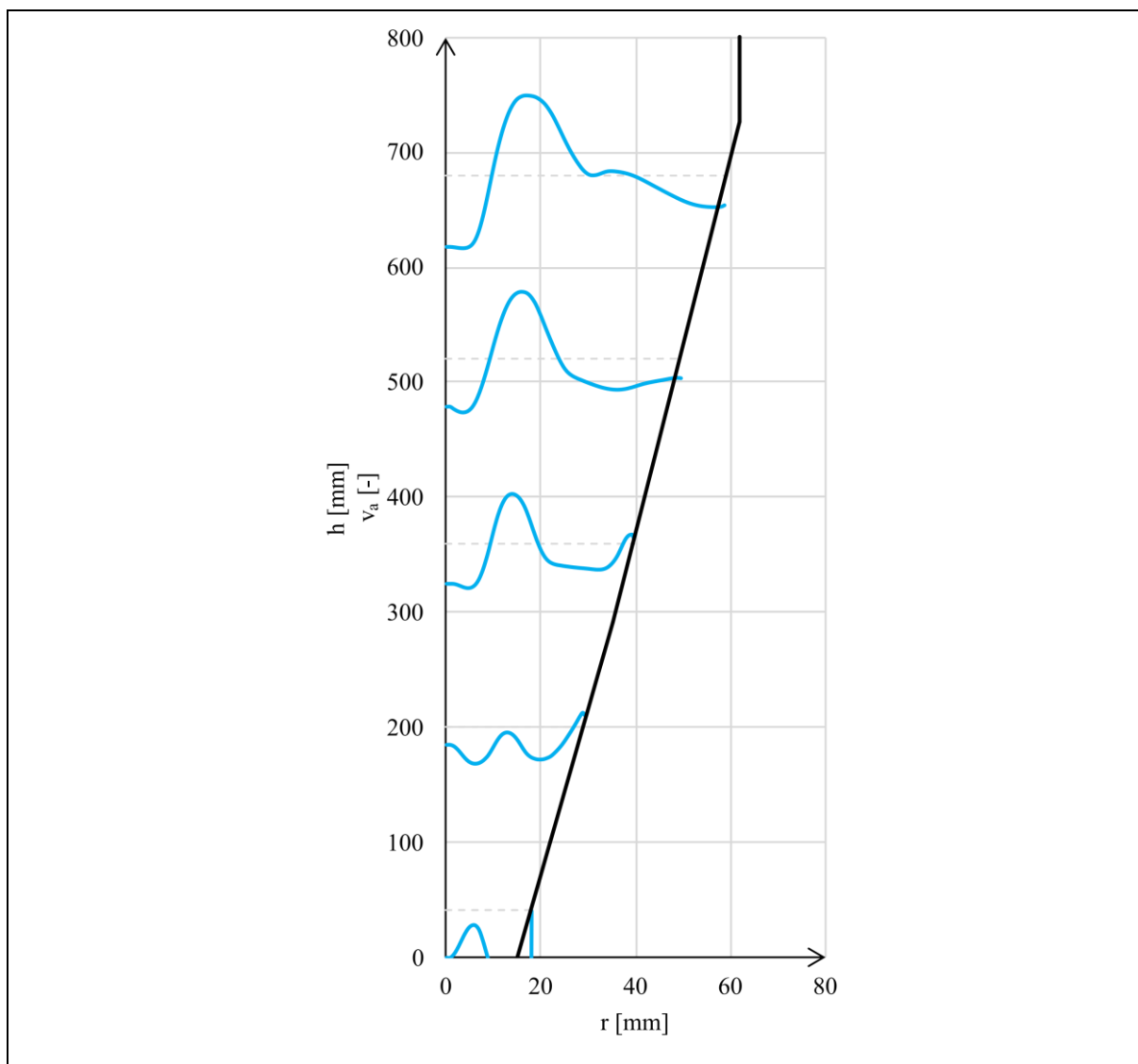
4.2 Rozložení axiální rychlosti

Axiální složka rychlosti představuje podstatnou součást vírového proudění v hydrocyklonu, neboť přímo ovlivňuje transport kapaliny podél svislé osy zařízení. Na základě CFD simulací byly vyhodnoceny profily axiální rychlosti v_a v závislosti na poloměru pro několik výškových rovin. Přehledně jsou výsledky shrnuty na obrázku 17, který zachycuje reprezentativní případ vstupní rychlosti $v_{inlet} = 4$ m/s, kde je patrná více vrstvá struktura axiálního proudění.

Z grafu je zřejmé, že axiální rychlost mění znaménko napříč průřezem komory. V blízkosti stěn zařízení proudí kapalina směrem dolů – odpovídá to primárnímu sestupnému víru přivádějícímu kapalinu k odtokové trysce. V centrální části se axiální rychlost stává kladnou, což odpovídá vzestupnému sekundárnímu víru směřujícímu k přepadové trysce. Zajímavým rysem je však výskyt záporné axiální rychlosti i v těsné blízkosti osy rotace – tekutina zde proudí opět směrem dolů.

Tento jev je důsledkem interakce mezi geometrií výstupní trubice a vírovým polem v jádru. Pokud je výstupní trubice (*vortex finder*) příliš široká, nedochází k dostatečné akceleraci kapaliny v jejím středu a proudění se odděluje – ve středu tak vzniká sestupný vír, který narušuje ideálně souvislý výstupný proud. Úpravou průměru výstupní trubice je možné tento jev potlačit a zajistit, aby byl výstupný vír rozvinut až po osu, čímž se vytvoří stabilnější a jednodušší dvouvrstvá struktura proudění.



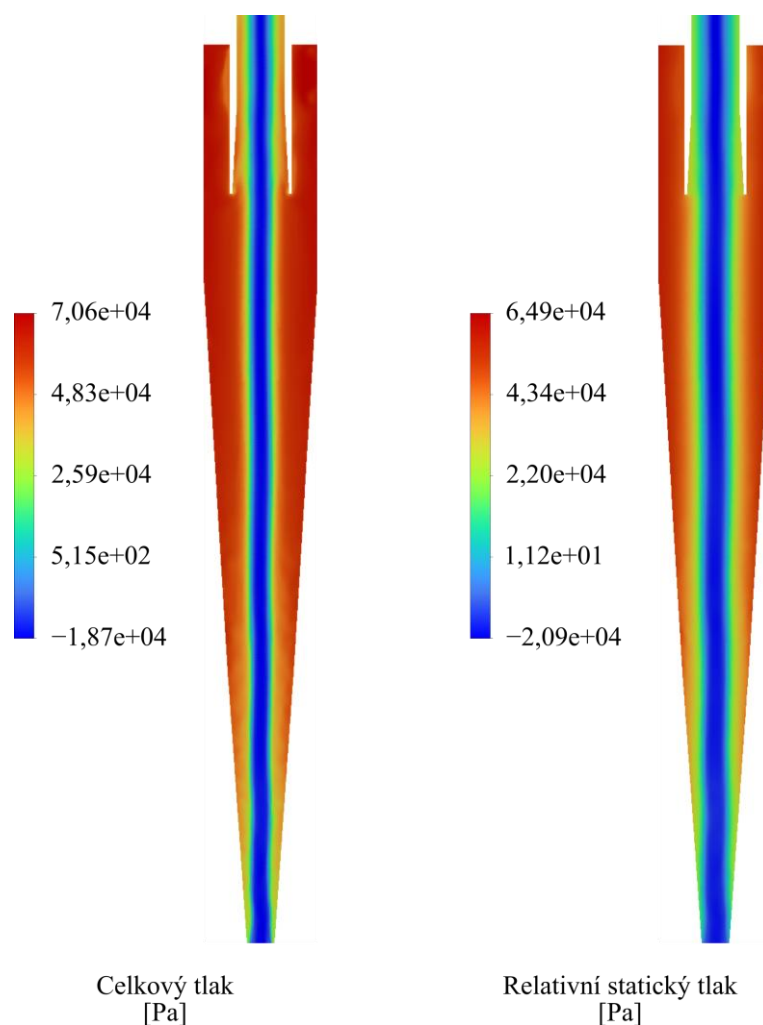


Obrázek 17 Rozložení tangenciální rychlosti v závislosti na výšce a poloměru pro nominální průtok $Q = 400 \text{ l/min}$, rozměr vstupní trubice $a_{inlet} = 40,8 \text{ mm}$ a poměr $\phi = 0,2$

4.3 Tlakové pole

Tlakové pole uvnitř hydrocyklonu je přímo vázáno na vířivé charakteristiky proudění a vychází z rovnováhy mezi odstředivou silou a radiálním gradientem statického tlaku. V ideálním případě dochází k výraznému poklesu tlaku směrem od stěny ke středu vírového jádra, kde se vytváří podtlaková oblast. Tento tlakový spád podporuje axiální pohyb tekutiny směrem vzhůru a je nezbytný pro vznik stabilního vírového pole.

Na obrázku 18 jsou znázorněny kontury celkového a statického tlaku pro variantu s průtokem $Q = 400 \text{ l/min}$ a vstupní rychlostí $v_{inlet} = 4 \text{ m/s}$. Vlevo je zobrazena kontura celkového tlaku, která zahrnuje jak statickou, tak dynamickou složku. Lze si povšimnout poklesu celkového tlaku směrem dolů, což odpovídá postupné disipaci energie proudící kapaliny. Vpravo je kontura čistě statického tlaku, kde je patrná výrazný pokles v okolí výstupní trubice.



Obrázek 18 Rozložení celkového (vlevo) a relativního statického (vpravo) tlaku ve svislém řezu osou hydrocyklonu ($Q = 400 \text{ l/min}$, vstupní rychlost $v_{inlet} = 4 \text{ m/s}$, poměr $\phi = 0,2$)

V oblasti vstupu je patrný menší lokální výkyv tlaku, který souvisí s náhlou změnou směru proudění při tangenciálním zaústění směsi do vírové komory. Dochází zde ke vzniku vírových struktur, což se projevuje lokálním poklesem i nárůstem tlaku v této oblasti.

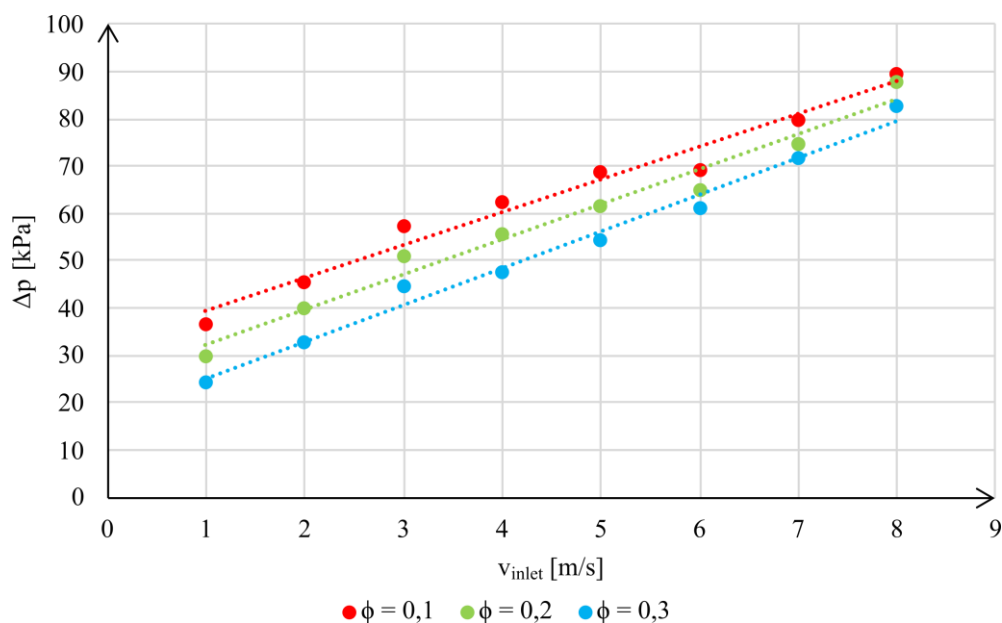
4.3.1 Tlaková ztráta

Tlaková ztráta Δp představuje důležitý parametr, který ovlivňuje energetickou náročnost provozu hydrocyklonu. Tlaková ztráta je definována jako rozdíl tlaku mezi vstupní trubicí a přepadovou tryskou.

Z vypočtených hodnot vyplývá, že tlaková ztráta roste pro zvolený hydrocyklon přibližně lineárně se vstupní rychlostí v_{inlet} . Tento trend naznačuje, že navýšení kinetické energie vstupního proudu se v tomto konkrétním případě neprojevuje kvadratickým nárůstem, jak bývá běžné u jiných zařízení. Na obrázku 19 je znázorněna závislost tlakové ztráty na vstupní rychlosti.

Vývoj tlakové ztráty úzce souvisí s intenzitou vírového pole a s rostoucí vstupní rychlostí v_{inlet} nevyhnutelně roste. Tento nárůst je však současně doprovázen zvyšující se účinností

odlučování E , jak bude ukázáno v následující kapitole.



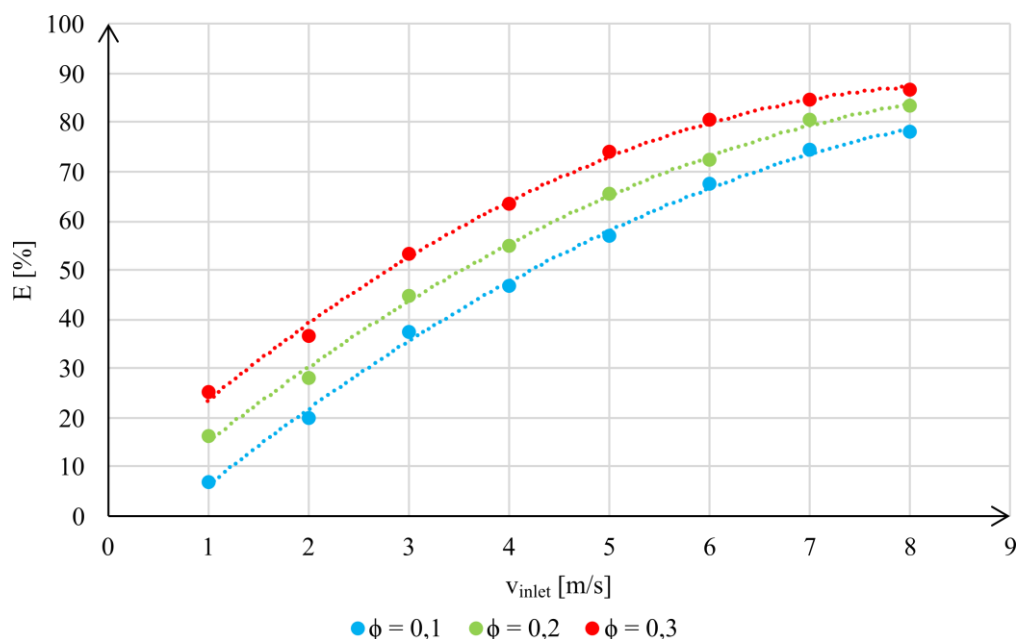
Obrázek 19 Závislost tlakové ztráty Δp na vstupní rychlosti v_{inlet} pro průtok $Q = 400$ l/min a poměr $\phi = 0,2$

4.4 Účinnost odlučování

Zatímco tlakové pole popisuje především charakter proudění a související energetické ztráty v zařízení, účinnost odlučování E slouží jako přímý ukazatel funkčnosti hydrocyklonu z hlediska oddělení částic. Vysoká účinnost E je typicky spojena s intenzivním vírovým pohybem a silnou tangenciální složkou proudění, avšak za cenu zvýšené tlakové ztráty Δp .

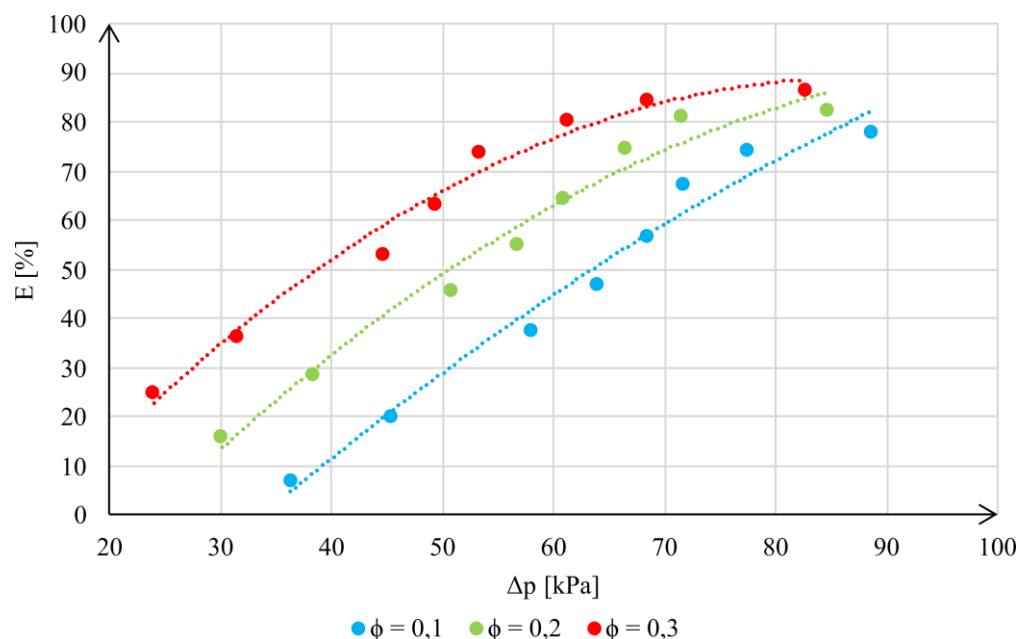
Účinnost odlučování E vyjadřuje, jak velká část pevné fáze je zachycena ve spodní odtokové trysce, a tím efektivně oddělena z proudícího média. Výpočet proběhl podle zjednodušeného vztahu vyjádřeného rovnicí 9 v kapitole 1.3, která definuje účinnost jako poměr hmotnostního toku částic opouštějících spodní výstup ku celkovému hmotnostnímu toku na vstupu.

Výpočty byly provedeny pro nominální objemový průtok $Q = 400$ l/min, přičemž proměnným parametrem byl rozměr vstupní trubice a_{inlet} . Změnou tohoto rozměru bylo dosaženo různé vstupní rychlosti, pohybující se v rozmezí 1 až 8 m/s. Pro každou variantu vstupní rychlosti byly dále zkoumány tři různé poměry průtoku odtokovou tryskou k celkovému průtoku poměr $\phi = 0,1$, $\phi = 0,2$, $\phi = 0,3$.



Obrázek 20 Závislost účinnosti odlučování E na vstupní rychlosti v_{inlet} pro různé poměry průtoku odtokovou tryskou k celkovému průtoku ϕ

Výsledky jsou znázorněny na obrázku 20, kde je patrný výrazný růst účinnosti E společně s rostoucí vstupní rychlostí v_{inlet} , což potvrzuje, že vyšší tangenciální složka proudění zvyšuje tangenciální rychlost proudění, a tedy i odstředivé síly na částice. Tento trend však přímo souvisí i s růstem tlakové ztráty, jak bylo ukázáno v kapitole 4.3.1 a jak vidět na obrázku 21. Vyšší odlučovací účinnost je tak vykoupena většími hydraulickými ztrátami a vyšší energetickou náročností. Hodnocení separačního procesu by proto mělo vždy zohlednit kompromis mezi účinností a provozními náklady.



Obrázek 21 Závislost účinnosti odlučování E na tlakové ztrátě Δp pro různé poměry průtoku odtokovou tryskou k celkovému průtoku ϕ

Zároveň byl pozorován vliv poměru průtoku odtokovou tryskou k celkovému průtoku ϕ . Nejvyšší účinnost vykazovaly konfigurace s poměrem $\phi = 0,3$, tedy s větším podílem toku odváděného spodním výstupem. Naopak při poměru $\phi = 0,1$ účinnost klesala, neboť podstatná část proudu – a s ním i část částic – byla odváděna přepadovou tryskou. Tento trend potvrzuje, že účinnost odlučování hydrocyklonu s kontinuálním odtokem směsi kapaliny s částicemi odtokovou tryskou naráží na definici rovnice 9. S rostoucím průtokem odtokovou tryskou roste účinnost odlučování až na 100%, kdy veškerý a průtok odchází odtokovou tryskou, ale k odlučování reálně nedochází.

Závěr

V úvodní části práce byla zpracována literární rešerše zaměřená na princip fungování vírových odlučovačů, a jejich uplatnění v průmyslové praxi. Pozornost byla věnována jak fyzikálním mechanismům separace, tak konstrukčním aspektům, které ovlivňují proudění uvnitř zařízení. Klíčovým prvkem, jenž se ukázal jako určující pro charakter proudového pole, je obvodová složka rychlosti, vyvolaná rotací vstupujícího média. Tato složka závisí především na velikosti vstupní rychlosti, geometrii vstupní trubice a konstrukci vírové komory. Právě tato závislost se stala středobodem následné numerické analýzy.

Ve druhé části práce byla provedena konstrukce osmi variant 3D modelu hydrocyklonu, které se lišily rozměrem vstupní trubice. Tato variabilita umožnila studovat vliv vstupní rychlosti při zachování nominálního objemového průtoku. Návrh geometrie respektoval axiální symetrii zařízení a reálné rozměrové poměry běžně využívaných průmyslových vírových odlučovačů. Na takto připravených modelech byla vytvořena výpočetní síť složená ze strukturovaných objemových prvků, která byla lokálně zjemněna v oblastech s očekávanými vysokými gradienty proudění – zejména v okolí vstupního otvoru, přepadové trysky a vírového jádra. Kvalita sítě byla hodnocena pomocí standardních geometrických ukazatelů a ukázala se jako dostatečná pro stabilní výpočet turbulentního proudění i sledování pohybu částic.

Numerické simulace byly provedeny v prostředí ANSYS Fluent. Využit byl model turbulence *realizable* $k-\varepsilon$, který byl doplněn o korekci zakřivení a nerovnovážné stěnové funkce. Chování částic bylo modelováno pomocí diskretní fáze (DPM), přičemž byla uvažována jejich interakce s kontinuální kapalinou, včetně vztlaku, odporu, vlivu tlakového gradientu i rotace částic. Simulace probíhaly ve třech výpočetních fázích s postupným zpřesňováním numerického schématu a následným zapnutím diskretní fáze.

Z výsledků vyplynulo, že s rostoucí vstupní rychlostí dochází ke zvýšení tangenciální složky rychlosti a tím i k výraznému nárůstu odstředivých sil. Tlakové pole vykazuje vyšší gradienty a hlubší podtlak v ose víru, což podporuje efektivní separaci částic ke stěně. Změny výstupního režimu dále ukázaly, že poměr výstupních průtoků ovlivňuje nejen rozložení tlaku, ale i chování částic – vyšší podíl odtoku podporuje pohyb částic ke stěně vírové komory a tím i efektivnější odlučování.

Součástí práce byl také pokus o vytvoření více proměnného modelu, který by umožnil hodnotit současný vliv více parametrů na separační účinnost. Tento přístup měl za cíl vytvořit zobecněný pohled na rozložení tangenciální rychlosti po výšce hydrocyklonu v závislosti na vstupním průtoku a rozměru vstupní trubice. Během zpracování se však ukázalo, že vzájemné vazby mezi proměnnými jsou výrazně nelineární a že jejich kombinovaný vliv nemůže být

uspokojivě popsán bez mnohem rozsáhlejší sady simulací, vyšší časové a výpočetní kapacity a případně i pokročilejších statistických metod. Navržený model tedy neposkytl obecně využitelné výsledky, avšak prokázal citlivost systému na vícenásobné změny parametrů. Do budoucna by tento přístup mohl být dále rozpracován, například pomocí strojového učení, které by umožnilo efektivně mapovat složitější interakce mezi jednotlivými provozními i konstrukčními parametry vírových odlučovačů.

Závěrem lze konstatovat, že práce přinesla ucelený přehled o vlivu vstupní rychlosti na proudění v hydrocyklonu, poskytla důležité poznatky o vírovém proudění uvnitř hydrocyklonu. Zároveň poukázala na omezení zjednodušených přístupů při snaze o predikci vícenásobných vlivů a naznačila, že přesnější popis těchto souvislostí by vyžadoval rozsáhlejší simulace a detailnější numerické zpracování.

Seznam použitých zdrojů

- [1] RIETEMA, K. a C.G. VERVER, ed. *Cyclones in industry: a collection of papers on the principles and utilization of industrial cyclones, originally presented at the two symposia on this subject, organized in 1953 and 1958 by the Royal Dutch Institute of Engineers and the Royal Netherlands Chemical Society* [online]. Amsterdam: Elsevier, 1961 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/4313704/32112.pdf>
- [2] BRADLEY, D. Hydrocyclones. *Thermopedia* [online]. 2011 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.thermopedia.com/pt/content/862/>
- [3] BRADLEY, D. *The Hydrocyclone*. Oxford: Pergamon Press, 1965. ISBN 978-0-08-010399-0.
- [4] SVAROVSKY, L. *Gas Cyclones*. 1993.
- [5] CONCHA, Fernando. Flow Pattern in Hydrocyclones. *KONA Powder and Particle Journal* [online]. 2007, (25), 97-132 [cit. 2025-05-07]. ISSN 2187-5537. Dostupné z: [doi:10.14356/kona.2007011](https://doi.org/10.14356/kona.2007011)
- [6] MEDEK, Jaroslav. *Hydraulické pochody*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2640-3.
- [7] SHANDONG ZHONGPENG SPETIAL CERAMICS CO., LTD. Hydrocyclones. SHANDONG ZHONGPENG SPETIAL CERAMICS CO., LTD. *ZPC* [online]. May-07-2019 [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://www.rbsic-sisic.com/news/hydrocyclones>
- [8] KASHIWAYA, Kouki, Takahiko NOUMACHI, Naoki HIROYOSHI, Mayumi ITO a Masami TSUNEKAWA. Effect of particle shape on hydrocyclone classification. *Powder Technology* [online]. August 2012, (226), 147-156 [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: [doi:10.1016/j.powtec.2012.04.036](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.04.036)
- [9] Hydroclone Seperators. *American Water Chemicals* [online]. c2025 [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://www.membranechemicals.com/water-treatment/hydroclone-seperators/>
- [10] PERRY, John H. *Perry's Chemical engineers' handbook*. 4. New York: McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [11] *KREBS Industrial Water Treatment Brochure* [online]. BROWN & MORRISON, LTD. [cit. 2025-05-09]. Dostupné z: <https://www.brownandmorrison.com/wp-content/uploads/2022/07/KREBS-Industrial-Water-Treatment-Brochure.pdf>

- [12] Cyclones and Multicyclones. *StratGem* [online]. c2022 [cit. 2025-05-09]. Dostupné z: <https://www.stratgemprojects.com/Cyclones-Multiclones.html>
- [13] Hydrocyclones. *McLanahan* [online]. c2025 [cit. 2025-05-09]. Dostupné z: <http://www.mclanahan.com/products/hydrocyclones>
- [14] DINTER, Oskar. *Hydrocyklóny a jejich použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Hornické aktuality.
- [15] High-efficiency KREBS heavy-media hydrocyclones. *FLSmidth* [online]. 2025 [cit. 2025-05-22]. Dostupné z: <https://fls.com/en/equipment/classification/heavy-media-hydrocyclones>
- [16] Power. *Salter Cyclones* [online]. c2025 [cit. 2025-05-09]. Dostupné z: <https://www.saltercyclones.com/industries/power/>
- [17] Cyclone Separator. *HC Petroleum Equipment* [online]. c2019 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: <https://www.hcpetroleum.hk/product-detail/Cyclone-Separator>
- [18] SHAH, Shaunak. Applications of Hydrocyclones. *HIS Pumps* [online]. 27 January 2022 [cit. 2025-05-13]. Dostupné z: harshindustrial.com/blog-details/hydrocyclones-applications
- [19] Chemical. *Salter Cyclones* [online]. c2025 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: <https://www.saltercyclones.com/industries/chemical/>
- [20] BANDSTRA, Wietse. How a Cyclone Separator Improves Industrial Dust Collection. *JOA Air solutions* [online]. January 2025 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: <https://joaairsolutions.com/blog/how-cyclone-separator-improves-industrial-dust-collection>
- [21] Industrial Cyclone Separators: Exploring Their Various Uses. *CECO Enviromental* [online]. 25 April 2024 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: <https://www.cecoenviro.com/industrial-cyclone-separators-exploring-their-various-uses>
- [22] BICALHO, Isabele C., José L. MOGNON, Juliana SHIMOYAMA, Carlos H. ATAÍDE a Claudio R. DUARTE. Separation of yeast from alcoholic fermentation in small hydrocyclones. *Separation and Purification Technology* [online]. Elsevier, 5 March 2012, (87), 62-70 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2011.11.023
- [23] What is the function of hydrocyclone station in the production process of cassava starch? In: *DOING HOLDINGS* [online]. 15 July 2022 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: https://www.starchprojectsolution.com/faq/the_function_of_hydrocyclone_station_150

4.html

- [24] Pulp cleaning with Valmet Hydrocyclones. *Valmet* [online]. c2025 [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://www.valmet.com/board-and-paper/stock-preparation/pulp-cleaning>
- [25] KASHIKAR, Shantanu a D. S. SHEVADE. Review of Cyclone Separator in Trim Handling System in Paper Industry. *International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM)* [online]. 2018, **2018**, 4 [cit. 2025-05-20]. ISSN 2454-9150. Dostupné z: doi:10.18231/2454-9150.2018.1473
- [26] How Does Cyclone Separator Work? *Energycycle* [online]. 23 February 2025 [cit. 2025-05-13]. Dostupné z: <https://www.energycycle.com/how-does-cyclone-separator-work>
- [27] Navigating the CFD Software Landscape: A Comprehensive Comparison and User Insights. *Resolved Analytics* [online]. c2020 [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://www.resolvedanalytics.com/theflux/comparing-cfd-software>
- [28] *ANSYS Fluent 12.0 User's Guide* [online]. c2009 [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm
- [29] Comparative Analysis of Turbulence Models Used in ANSYS Fluent. *Medium* [online]. 19 June 2023 [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://medium.com/@learningmentorme/comparative-analysis-of-turbulence-models-used-in-ansys-fluent-a1dce6705d4a>
- [30] Polystyrene. *Science Direct* [online]. c2025 [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/polystyrene>
- [31] DPM: Overview, Conceptions, Assumption, Governing equations and Limitations. *MR-CFD* [online]. c2023 [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://www.mr-cfd.com/dpm-spray-overview-conceptions-assumption-grid-size-dependency-and-limitations/>