

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra mechaniky a strojnictví



Bakalářská práce

Coanda efekt a jeho využití v technické praxi

Šimon Odstrčil

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Šimon Odstrčil

Technika a technologie v dopravě a spojích
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Coanda efekt a jeho využití v technické praxi

Název anglicky

Coanda effect and its use in technical practice

Cíle práce

Cílem práce je vysvětlit princip Coanda efektu, popsat výskyt jevu v běžném životě a sestavit detailní přehled možností současného a případně i budoucího využití Coanda efektu v technické praxi.

Metodika

Vypracovat odbornou rešerši na téma Coanda efekt při proudění tekutin, příčiny vzniku a výskyt jevu v běžném životě. Podstatnou část práce zaměřit na možnosti využití Coanda efektu v moderních technických zařízeních. Navrhnout vlastní technický prvek využívající Coanda efekt.

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

tekutina, tryska, zatopený proud, aerodynamika, podtlak, zakřivený povrch

Doporučené zdroje informací

NOOR, A. A. Coanda Effect: Flow Phenomenon and Applications. London: CRC Press, 2019. ISBN 978-1032090320.

NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin : celost. vysokošk. učebnice stud. oborů strojírenství a ostatní kovodělná výroba.* Praha: Alfa, 1987.



Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Vladimír Šleger, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra mechaniky a strojnictví

Elektronicky schváleno dne 28. 1. 2022

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Coanda efekt a jeho využití v technické praxi" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.03.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu doc. Ing. Vladimíru Šlegerovi, CSc. za jeho trpělivost, cenné rady a připomínky při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za veškerou podporu při studiu a také svým kolegům v oddělení konstrukce z firmy Schenck Process, kteří mě obohatili o cenné zkušenosti z praxe, které jsem využil při zpracování této práce.

Coanda efekt a jeho využití v technické praxi

Abstrakt:

Tato práce je zaměřena Coanda efekt a jeho uplatnění v různých technických disciplínách a průmyslových aplikacích. V první části je představena historie objevu a vývoje Coanda efektu, poskytující vhled do jeho původu a evoluce v kontextu mechaniky tekutin. Důkladně je vysvětleno, za jakých specifických podmínek se tento jev projevuje a jak tyto podmínky ovlivňují chování proudění tekutin. Druhá část práce je věnována ukázání a vysvětlení různých příkladů, kde Coanda efekt nachází praktické využití v inženýrství a technologii. Zkoumá, jak tento jev přispívá k inovacím a zlepšení výkonu v různých technických oblastech, včetně leteckého průmyslu, námořní dopravy a energetiky. Tato část poskytuje přehled o tom, jak Coanda efekt ovlivňuje návrh a funkčnost zařízení a systémů, zlepšuje jejich efektivitu a umožňuje nové metody řešení technických problémů. Práce obsahuje také návrh vlastního zařízení na principu tohoto jevu a jeho použití v pneumatické dopravě alternativního paliva cementáren. To ukazuje potenciál Coanda efektu přinést inovativní řešení i v specifických průmyslových odvětvích. Celkově práce nabízí komplexní pohled na Coanda efekt, od teoretických základů až po praktické aplikace, a zdůrazňuje jeho význam a potenciál pro technický pokrok a inovace v průmyslu.

Klíčová slova:

Coanda; tok; proudění; tryska; stěna; tekutina; povrch

Coanda effect and its use in technical practice

Abstract

This bachelor thesis focuses on the Coanda effect and its application in various technical disciplines and industrial applications. The first part introduces the history of the discovery and development of the Coanda effect, providing insight into its origin and evolution in the context of fluid mechanics. It thoroughly explains the specific conditions under which this phenomenon occurs and how these conditions influence the behaviour of fluid flow. The second part of the thesis is dedicated to demonstrating and explaining various examples where the Coanda effect finds practical use in engineering and technology. It examines how this phenomenon contributes to innovation and performance improvement in various technical fields, including the aviation industry, maritime transport, and energy. This section provides an overview of how the Coanda effect influences the design and functionality of devices and systems, improves their efficiency, and enables new methods of solving technical problems. The thesis also includes the design of an original device based on this phenomenon and its use in the pneumatic transportation of alternative fuel for cement plants. This demonstrates the potential of the Coanda effect to bring innovative solutions even in specific industrial sectors. Overall, the work offers a comprehensive view of the Coanda effect, from theoretical foundations to practical applications, and emphasizes its importance and potential for technical progress and innovation in the industry.

Keywords:

Coanda; flow; blow; jet; wall; fluid; surface

Obsah

1 Úvod.....	10
2 Cíl práce a metodika	11
3 Pochopení Coanda efektu a toku proudů	12
3.1 Historie.....	12
3.2 Podstata Coanda efektu	13
3.2.1 Tryska beze stěny.....	14
3.2.2 Tryska u rovné stěny	14
3.2.3 Stěna se schodem	15
3.2.4 Skloněná stěna	16
3.2.5 Konkávní stěna	17
3.2.6 Konvexní stěna	19
3.3 Příklady Coanda efektu	21
3.4 Separace toku	22
3.4.1 Separace laminární mezní vrstvy	22
3.4.2 Separace nestabilní mezní vrstvy.....	22
3.4.3 Separace turbulentní mezní vrstvy.....	22
3.4.4 Separace trojrozměrné mezní vrstvy.....	23
4 Coanda efekt v letectví.....	25
4.1 Zvýšení vztlaku	25
4.1.1 Nepoháněné klapky.....	25
4.1.2 Foukané klapky	27
4.1.3 Proudové klapky	28
4.2 Vývoj V/STOL letadel s využitím Coanda efektu	30
4.3 Vrtulník bez ocasního rotoru (NOTAR)	33
4.4 UAV/MAV letouny.....	34
5 Coanda hořák.....	36
6 Lodní Coanda kormidlo	40
7 Ventilace.....	42
8 Návrh pneumatického separátoru.....	44
8.1 Konstrukce separátoru.....	45
9 Další využití Coanda efektu	46
9.1 Lidské tělo.....	46
9.2 Metereologie	46
10 Závěr.....	47
11 Seznam použitých zdrojů	49

Seznam obrázků

Obrázek 1: Henri Coanda [3]	12
Obrázek 2: Letoun Coanda 1910 [3].....	12
Obrázek 3: Tryska beze stěny [1]	14
Obrázek 4: Tryska blízko rovné stěny [1].....	15
Obrázek 5: Stěna se schodem [1]	15
Obrázek 6: Nakloněná stěna [1].....	16
Obrázek 7: Nakloněná stěna se schodem [1]	17
Obrázek 8: Konkávní stěna [1].....	18
Obrázek 9 : Izometrický pohled na konkávní stěnu s Görtlerovy víry [4].....	18
Obrázek 10: Konvexní stěna [1]	19
Obrázek 11: Tryska ústící zevnitř tělesa na konvexní stěnu [1]	20
Obrázek 12: Dvě vedle sebe zapálené svíčky.....	21
Obrázek 13: Separace toku na křídle [1]	23
Obrázek 14: Jednoduchá klapka [1]	25
Obrázek 15: Zaparkova klapka [1]	25
Obrázek 16: Štěrbínová klapka [1]	26
Obrázek 17: Odklápěcí klapka [1]	26
Obrázek 18: Fowlerova klapka [1]	26
Obrázek 19: Krugerova klapka [1]	26
Obrázek 20: Schéma vnitřně foukané klapky [7].....	27
Obrázek 21: Schéma externě foukané klapky [7]	27
Obrázek 22: Schéma z vrchu foukané klapky [7]	28
Obrázek 24: Schéma proudové klapky s ústí trysky nad odtokovou hranou [9]	29
Obrázek 23: Schéma proudové klapky s ústí trysky pod odtokovou hranou [9]	29
Obrázek 25: Letadlo Hunting H 126 [11]	30
Obrázek 26: Coandův talíř [1]	31
Obrázek 27: Frostova demonstrace Coanda efektu 1952 [12]	31
Obrázek 28: AVRO Car VZ-9 [13].....	32
Obrázek 29: Vrtulník NOTAR [15].....	33
Obrázek 30: Schéma NOTAR vrtulníku [15].....	34
Obrázek 31: Schéma Coanda trysky pro UAV letoun [16]	35
Obrázek 32: Testovací dron s Coanda tryskami [17].....	35
Obrázek 33: Schéma Coanda hořáku	36
Obrázek 34: Detailní schéma Coanda hořáku [1]	37
Obrázek 35: Ozubená objímka na Coanda hořáku [20]	38
Obrázek 36: Podélné víry na Coanda hořáku [20]	38
Obrázek 37: Zažehnutý Coanda hořák [19].....	39
Obrázek 38: Schéma Coanda kormidla [21].....	40
Obrázek 39: Usazení kormidla [21]	41
Obrázek 40: Testování Coanda kormidla [21].....	41
Obrázek 42: Ventilace místnosti jednoduchou tryskou bez difuzoru [1].....	42
Obrázek 41: Schéma trysky s využitím Coanda efektu [23]	42
Obrázek 43: Ústí trysky s použitím difuzoru [1].....	43
Obrázek 44: Zaoblené koleno potrubí ventilačního systému [24].....	43
Obrázek 45: Příklad alternativního paliva pro cementárny [25].....	44
Obrázek 46: Schéma pneumatického separátoru	45

1 Úvod

Coanda efekt je oproti ostatním fyzikálním jevům často opomíjený a nedostává se mu dostatečné pozornosti. Přitom se jedná o velmi důležitý jev v oblasti mechaniky tekutin a bez jeho porozumění by bylo spoustu technických řešení neefektivních či přímo nepoužitelných. Proto je v této práci vynaložené velké úsilí pro vysvětlení, co vlastně Coanda efekt je, za jakých podmínek a proč vzniká, a následně ukázání jednotlivých technických oblastí, kde je Coanda efekt využit. Jedná se o relativně nedávno objevený jev, v porovnání s jinými, poprvé popsán rumunským inženýrem jménem Henri Coanda v roce 1910. Jeho uplatnění je velmi rozsáhlé a ve spoustě případech by neznalého člověka ani nenapadlo, že se jedná o tento jev.

V této práci jsou vybrány pouze příklady využití tohoto jevu v technických oborech a průmyslech, neboť využití Coanda efektu jsou velmi rozsáhlá a se stále se vyvíjející technologií, ještě potenciál tohoto jevu nebyl zcela využit. Je zajímavé sledovat, že použití Coanda efektu se rozvíjí od leteckých vozidel, přes těžkotonážní lodě až do lidského těla.

Jedna z posledních kapitol obsahuje i vlastní návrh zařízení fungující primárně na tomto jevu. Jedná se o pneumatický separátor těžkých nehořlavých částic z alternativního paliva. To je dopravováno pneumatickou dopravou do hořáku, kde je v cementárnách spalováno pro výrobu cementu. Cílem separátoru je rychle, bez ztráty tlaku v pneumatické dopravě, a efektivně odstranit tyto těžké částice z hlavního toku materiálu, aby mohl hořák cementárny fungovat co nejefektivněji.

2 Cíl práce a metodika

Cílem práce je vysvětlit pojem Coanda efekt a uvést jeho příklady v technických odvětvích a jak je tento jev využíván v běžném životě. Ukázat kdy, a za jakých podmínek Coanda efekt vzniká a jaký má vliv na proudění tekutin. Navrhnout vlastní technické zařízení na principu tohoto jevu.

V první části práce je vypracování odborné rešerše na podstatu Coanda efektu a za jakých podmínek tento jev vzniká. Vysvětlení, jak Coanda efekt ovlivňuje tok proudu tekutin u zakřivených povrchů a jak se tyto proudy chovají. V této části práce je kladen důraz na porozumění tohoto jevu a jak určit, zda se v daných situacích jedná o Coanda efekt.

Ve druhé části práce je detailní zpracování příkladů využití Coanda efektu v technických zařízeních a průmyslech. Velké je zaměření na letectví, ale také na námořní nebo těžební průmysl. Zde se práce zaměřuje na ukázání některých využití Coanda efektu v praxi a v situacích se kterými se lidé setkávají běžně, i když neví, že je zde tento jev přítomen.

Na závěr práce obsahuje zpracování návrhu vlastního technického zařízení na principu Coanda efektu. Jedná se o pneumatický separátor těžkých částic z alternativního paliva pro výrobu cementu. Separátor je umístěný v systému pneumatické dopravy alternativního paliva, které je dopravováno do hořáku, kde je v cementárnách spalováno pro výrobu cementu. Snaha je přijít na způsob odstranění těchto těžkých nežádoucích částic ze směsi paliva, aby se proces dopravy k hořáku nezkomplikoval a nezpomalil.

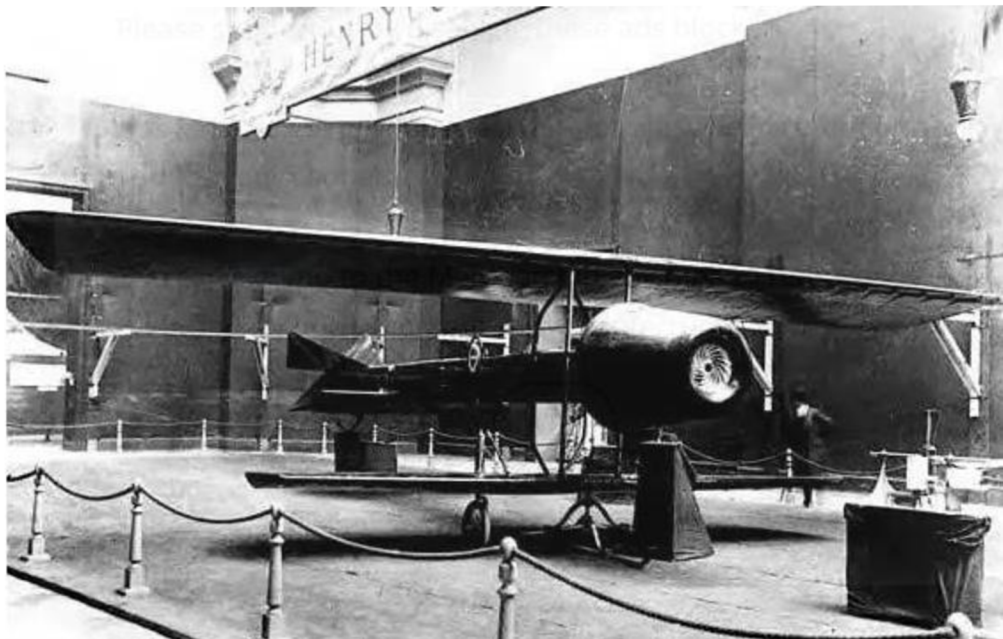
3 Pochopení Coanda efektu a toku proudů

3.1 Historie

Henri Coanda byl rumunský inženýr, vynálezce a průkopník v oblasti letectví [Obr. 1]. Narodil se v roce 1886 v Bukurešti v Rumunsku, a jeho život a kariéra byly významné díky jeho inovacím a příspěvkům k letectví a dalším oborům.



Obrázek 1: Henri Coanda [3]



Obrázek 2: Letoun Coanda 1910 [3]

Coanda vystudoval inženýrství ve Francii a Německu, kde získal široké technické vzdělání. Jeho zájem o letectví ho vedl k tomu, že se stal jedním z prvních lidí, kteří experimentovali s letadly poháněnými reaktivními motory. V roce 1910 na pařížském aerosalonu představil letadlo Coanda-1910 [Obr. 2], které bylo tehdy považováno za první letadlo s reaktivním pohonem, i když ne v moderním slova smyslu.

Během testování svého letadla Coanda pozoroval, že výfukové plyny vystupující z motoru měly tendenci se držet velmi blízko trupu. To bylo dáno tím, že proud výfukových plynů vytvářel ve svém blízkém okolí podtlak. Jelikož proud u stěny trupu neměl přístup k okolnímu vzduchu, přilnul k jeho zakřivenému povrchu a pokračoval v jeho trajektorii – jev, který později popsal jako:

„Tendence proudu kapaliny vystupující z otvoru následovat plochý nebo zakřivený povrch a vtahovat kapalinu z okolí tak, že se vyvine oblast nižšího tlaku.“

Coanda strávil značnou část svého života výzkumem a vývojem v oblasti aerodynamiky, přičemž své objevy aplikoval v různých inženýrských a technologických oborech. Byl uznáván a oceněn za svůj přínos k vědě a technice. Mezinárodní letiště Henriho Coandy v Bukurešti je pojmenované na jeho počest.

V roce 1904 představil Ludwig Prandtl, průlomovou práci, ve které zkoumal roli velmi malého tření nebo mizející viskozity v toku kapaliny. Viskozita je hlavní příčinou odporu, který působí na těleso v pohybu. V 18. století poskytli Navier a Stokes matematickou formulaci pohybu kapaliny, která zahrnovala účinky viskozity. Bohužel parciální diferenciální charakter rovnic znamenal, že byly obtížně použitelné a zůstaly nevyřešené, dokud si jich nevšiml Prandtl.

Nyní poprvé bylo možné vypočítat účinky viskozity v blízkosti povrchu pohybujícího se tělesa. Vědecká komunita si jeho práce nevšimla, dokud několik let poté v roce 1908 Blasius neprokázal platnost Prandtlovy hypotézy fyzikálním experimentováním na ploché desce. To byl zlomový bod ve výzkumu toků kapalin, které byly do té doby studovány bez zohlednění viskózních efektů a produkované výsledky byly nerealistické. Důsledkem byl vývoj toho, co se nyní nazývá "teorie mezní vrstvy", a s tím začátek moderní dynamiky kapalin.

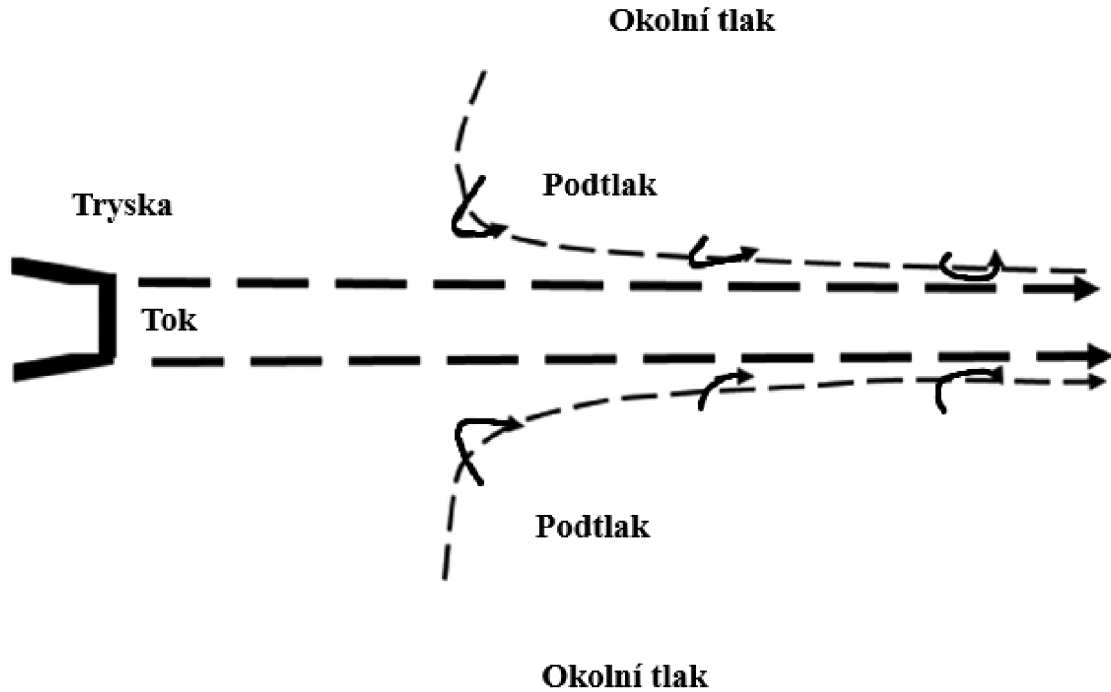
Je tedy zřejmé, že Coanda byl vynálezce a inženýr, který se zaměřil především na aplikace nového jevu toku spíše než na jeho podrobné pochopení. Prandtl na druhé straně byl akademik a výzkumník, který poskytl teoretický základ pro lepší pochopení některých základních mechanismů toku kapalin. [1] [2] [3] [5]

3.2 Podstata Coanda efektu

Na následujících obrázcích jsou vysvětleny příčiny vzniku Coanda efektu. Pro zjednodušení budeme používat dvourozměrný proud tekutiny, který bude ústít do statického prostoru. Budeme pozorovat změny v toku tekutiny v přítomnosti pevné stěny blízko trysky. Ve všech následujících případech se předpokládá, že úst'ová rychlost proudu zůstává konstantní.

3.2.1 Tryska beze stěny

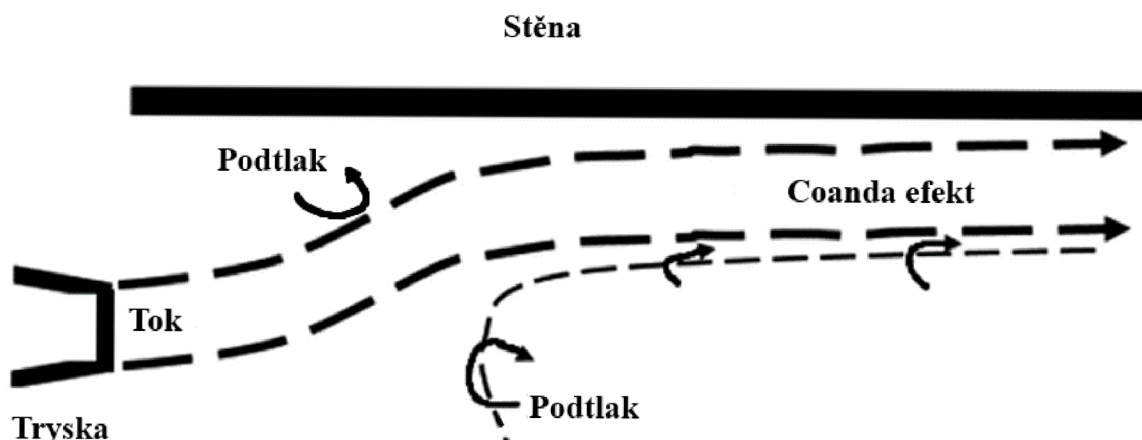
V tomto případě bude tryska bez přítomnosti pevné stěny. Proud tekutiny z trysky vlivem viskozity strhává částice okolní tekutiny a nutí ji proudit směrem kterým teče. To vede ke snížení tlaku v okolí hlavního toku a způsobí místo se sníženým tlakem (low pressure area) neboli podtlak, jak je ukázáno na Obr. 3. [1] [2]



Obrázek 3: Tryska beze stěny [1]

3.2.2 Tryska u rovné stěny

Případ trysky v blízkosti rovné stěny, umístěné v rovnoběžném směru toku z trysky [Obr. 4] Proud toku bude mít na okolí stejný vliv jako v prvním případě, ale proces bude ovlivněn blízko umístěnou rovnou stěnou. Částice tekutiny v blízkosti stěny nebude možné doplnit okolní tekutinou. To způsobí větší pokles tlaku blízko povrchu stěny než na straně trysky, kde stěna není. Jako důsledek se proud toku blíže ke stěně zakříví a poteče s ní paralelně.



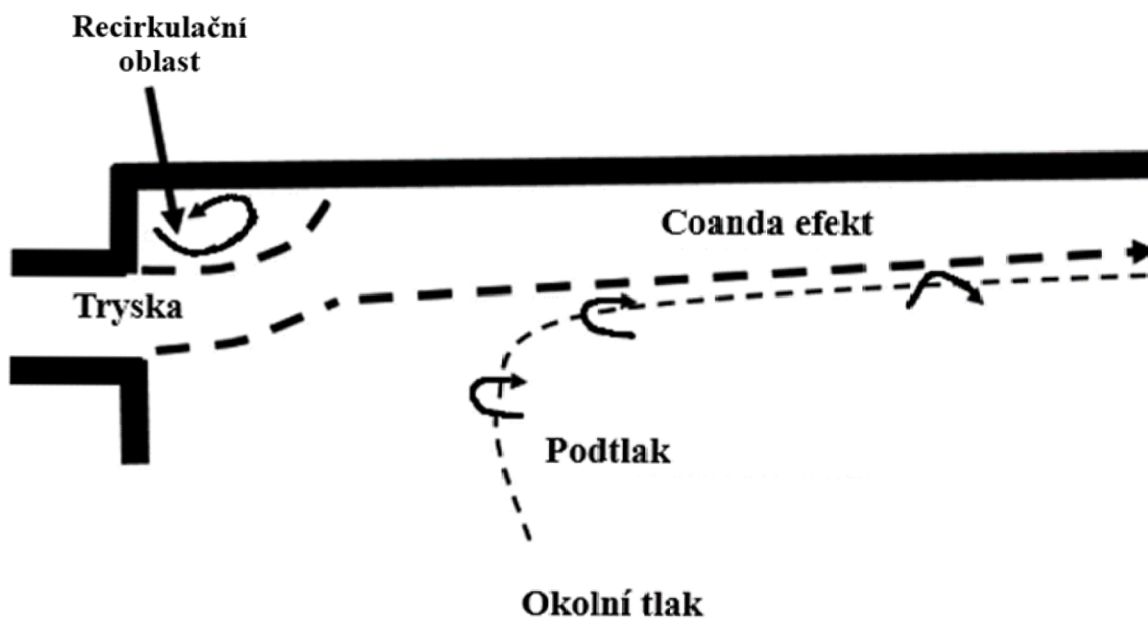
Okolní tlak

Obrázek 4: Tryska blízko rovné stěny [1]

Čím blíže je rovná stěna umístěna k trysce, dojde k většímu poklesu tlaku tekutiny a v určitém bodě nakonec způsobí přilnutí toku ke stěně, jak je ukázáno na obrázku. V tomto případě tryska potlačí růst mezní vrstvy a proud trysky bude pokračovat přilnutý ke stěně. [1] [2]

3.2.3 Stěna se schodem

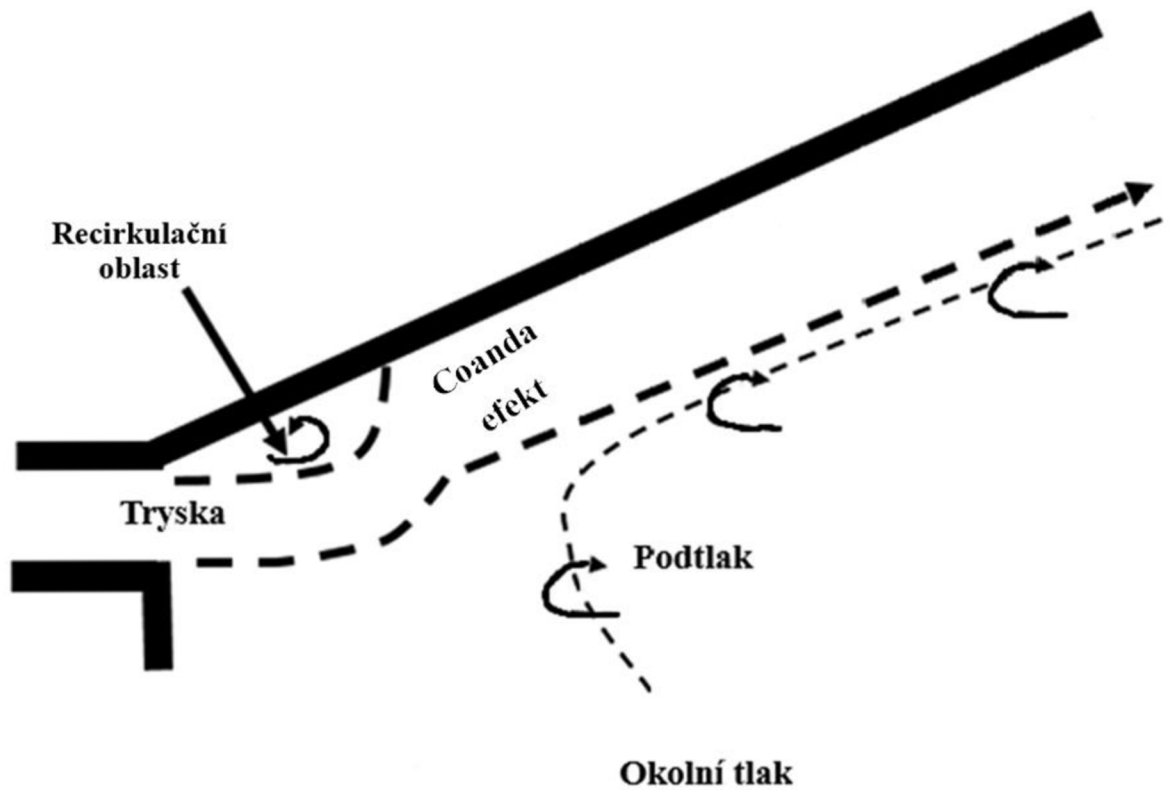
Když ke stěně přidáme schod v místě ústí trysky, chování toku bude podobné jako v předchozím případě až na to, že v místě schodu se vytvoří recirkulační oblast [Obr. 5]. Za schodem tok opět přilne ke stěně a bude pokračovat v jejím směru díky Coanda efektu. [1] [2]



Obrázek 5: Stěna se schodem [1]

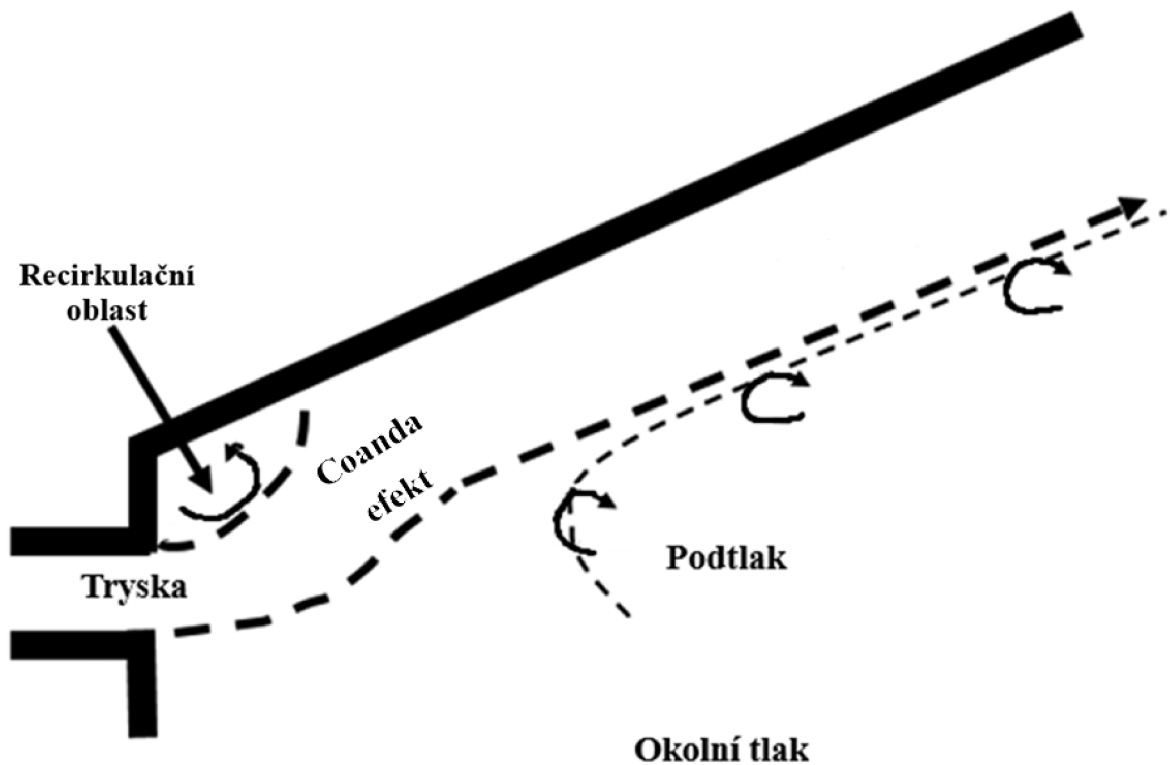
3.2.4 Skloněná stěna

V tomto případě stěna není rovnoběžná ve směru toku z trysky [Obr. 6]. Coanda efekt se vytvoří, i přes to, že stěna není s tokem rovnoběžná. U ústí trysky se opět vytvoří recirkulační oblast, ale za ní se tok ohne ke skloněné stěně a pokračuje v jejím směru.



Obrázek 6: Nakloněná stěna [1]

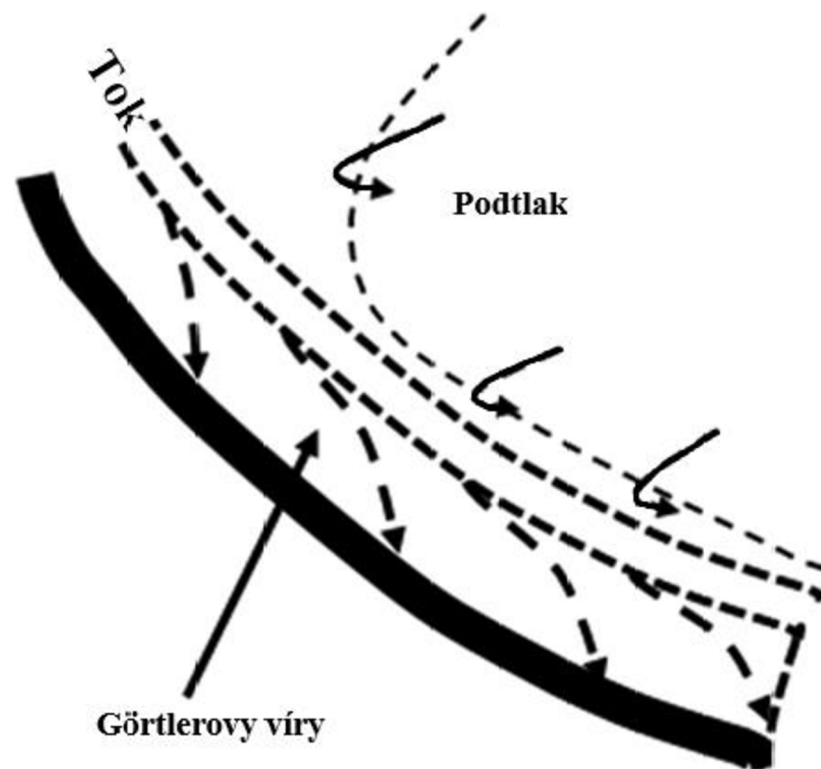
Přidáním schodu k nakloněné stěně, podobně jako v případě rovné stěny, se v podstatě nic nezmění. Opět dojde k vytvoření recirkulační oblasti a za ní tok pokračuje ve směru stěny [Obr. 7]. [1] [2]



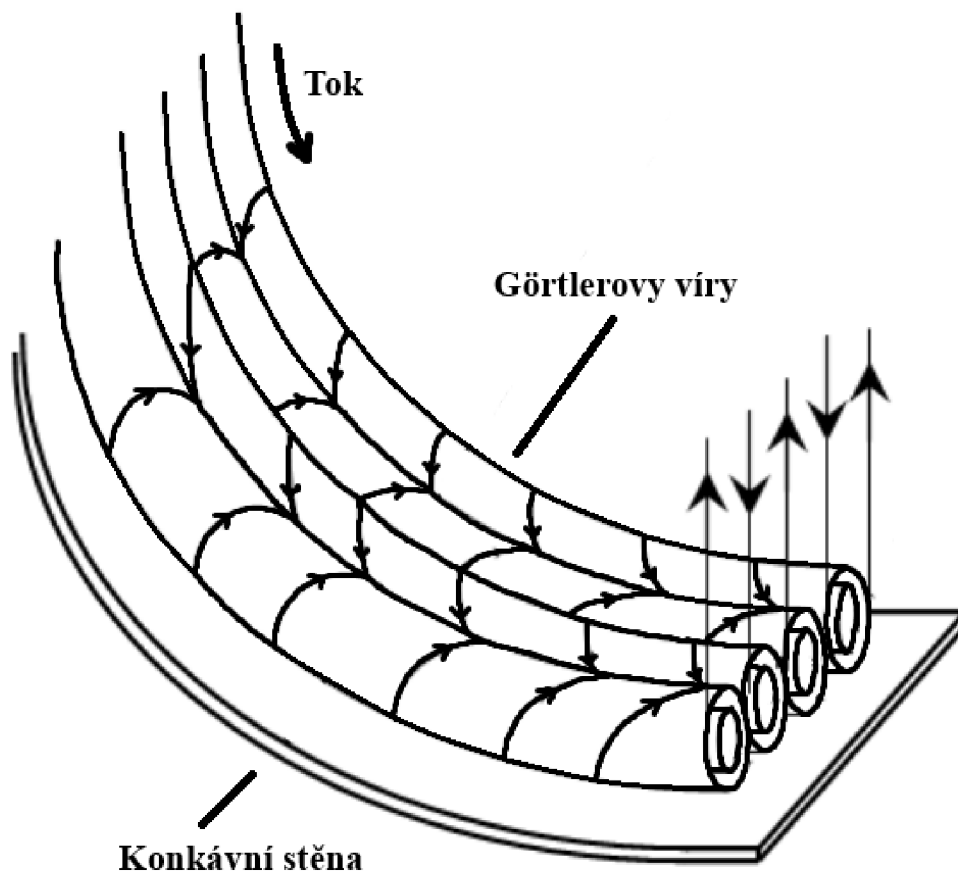
Obrázek 7: Nakloněná stěna se schodem [1]

3.2.5 Konkávní stěna

U konkávní stěny [Obr. 8] se tok také bude snažit přilnout a kopírovat konturu stěny, ale Coanda efekt v tomto případě nebude tolik efektivní. Kvůli konkávnímu zakřivení se tok smotá a zpomalí. To vytvoří víry, které vyvolají v toku nestabilitu. Tyto víry, které destabilizují tok na konkávním povrchu, se nazývají Görtlerovy víry [Obr. 9]. Görtlerovy víry se objevují v proudění mezní vrstvy na konkávních površích v důsledku centrifugální nestability způsobené nerovnováhou mezi radiálním gradientem tlaku a odstředivou silou. [1] [4]



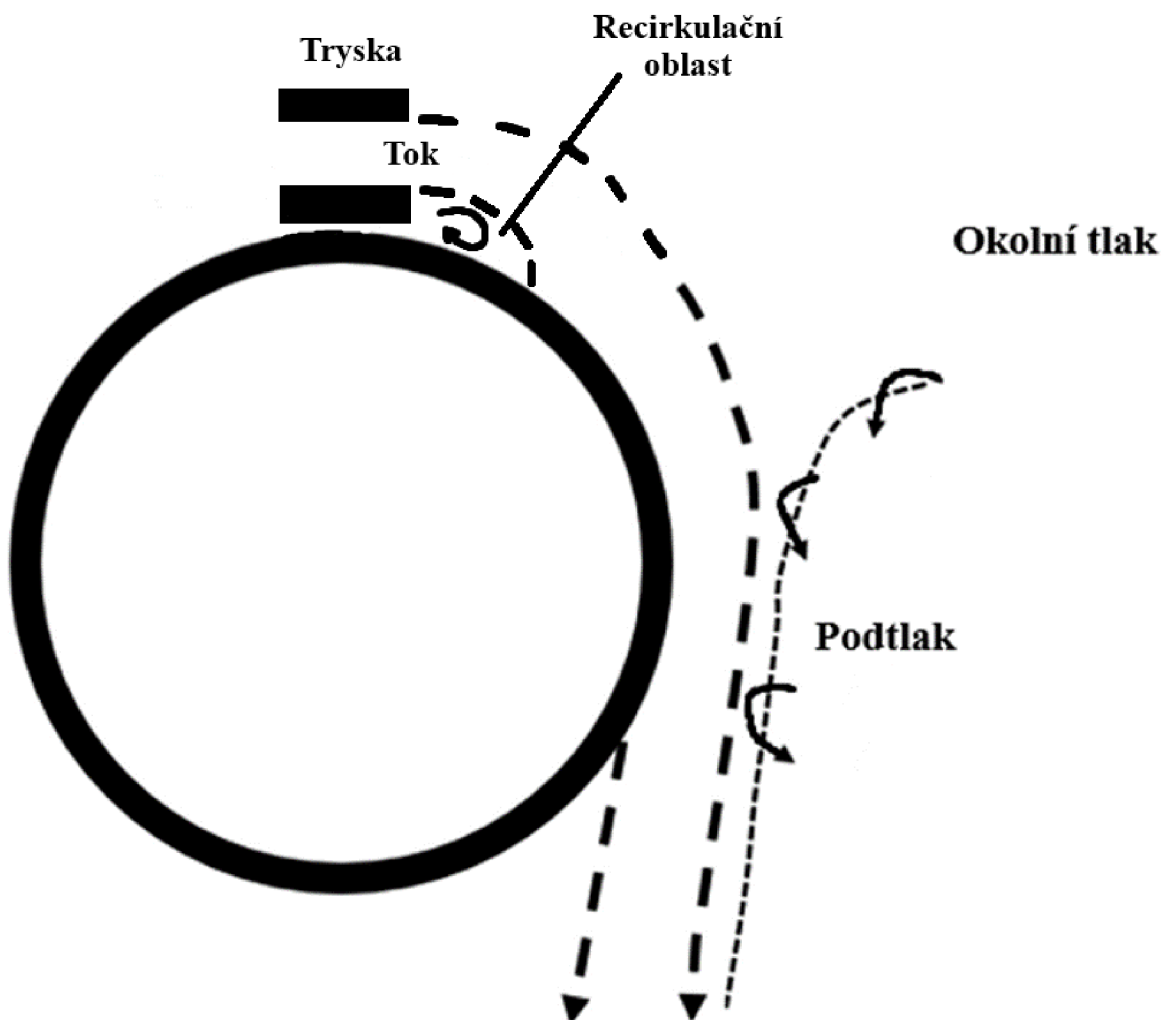
Obrázek 8: Konkávní stěna [1]



Obrázek 9 : Izometrický pohled na konkávní stěnu s Görtlerovy víry [4]

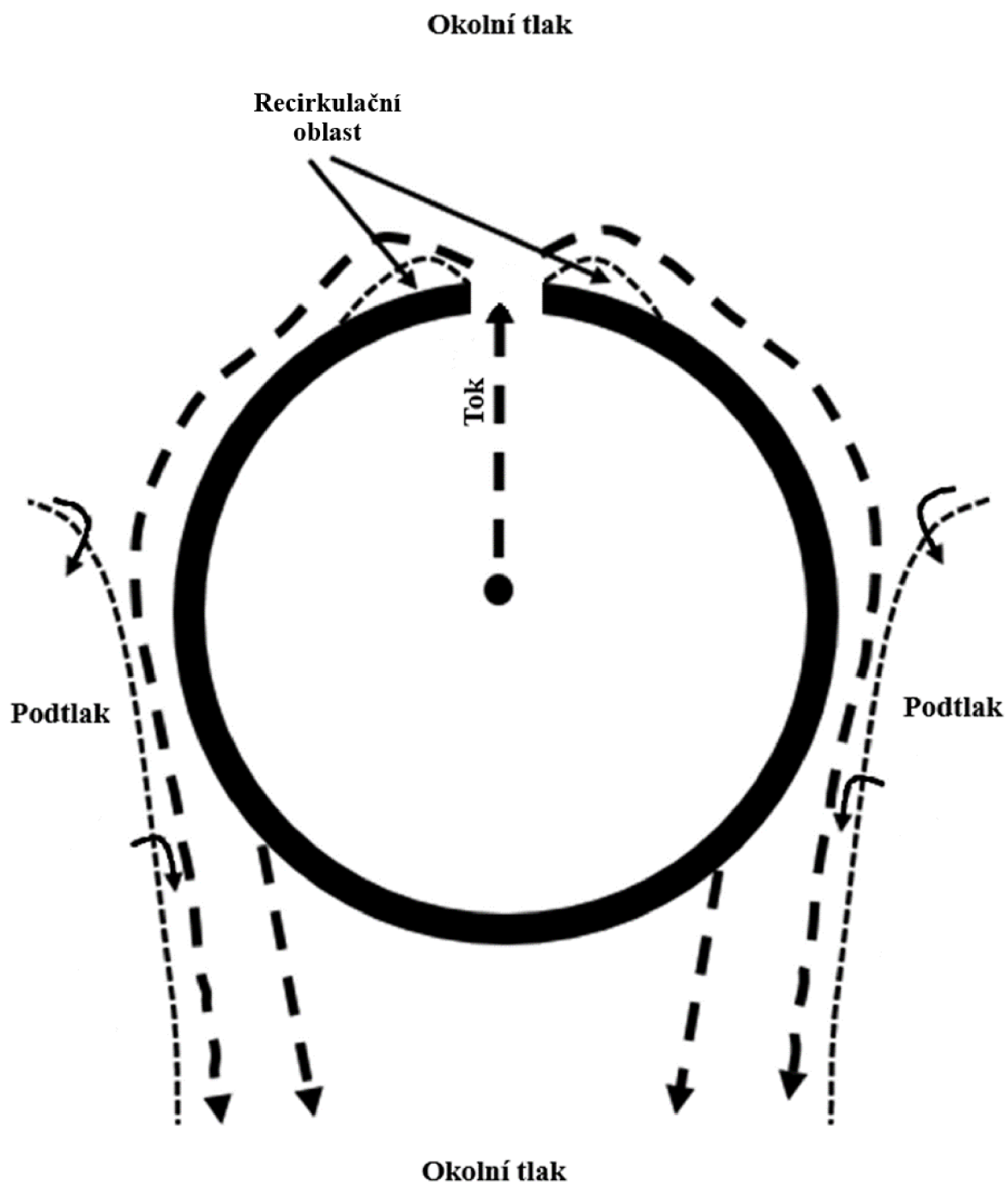
3.2.6 Konvexní stěna

Tok na konvexní stěně má oproti konkávní menší ztráty a je z pravidla mnohem stabilnější. To je dáno tím, že konvexní zakřivení má tendenci tok směřovat od okolní tekutiny než do ní, jako v případě konkávní stěny. Nedochozí tedy k vytvoření Görtlerových vírů a tok může po stěně pokračovat méně rozvířený [Obr. 10].



Obrázek 10: Konvexní stěna [1]

Ve všech předchozích případech byl pozorován tok z trysky aplikovaný na pevný povrch externě. Tryska ovšem může být nastavená tak, že tok proudí na povrch zevnitř tělesa pomocí štěrbin [Obr. 11]. Tento způsob aplikace Coanda efektu je také v praxi často využíván. [1] [2] [5]



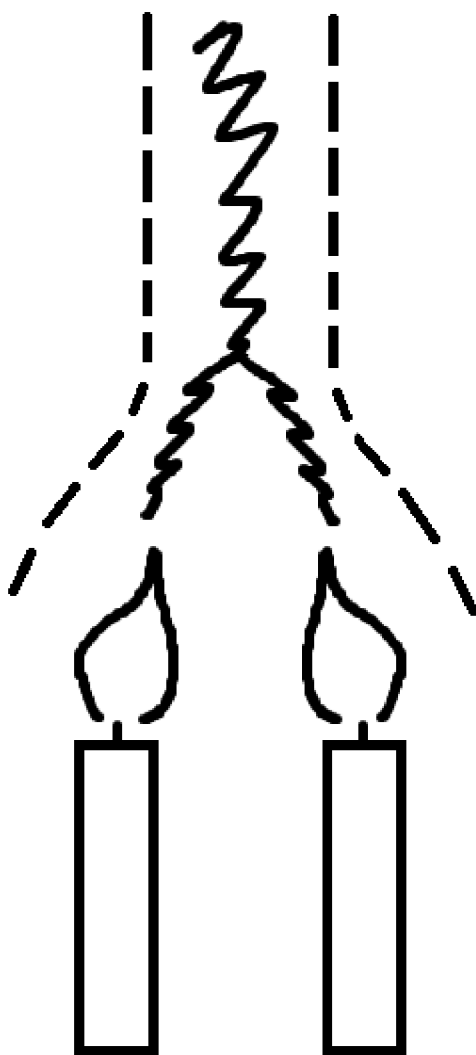
Obrázek 11: Tryska ústící zevnitř tělesa na konvexní stěnu [1]

3.3 Příklady Coanda efektu

Je důležité zmínit, že pojem Coanda efekt je často používán nesprávně. Hlavní podmínka pro existenci Coanda efektu je, že hlavní proud a okolní tekutina musí být ve stejné fázi. Jako je například plynová tryska proudící do tělesa plynu nebo proud kapaliny vypouštěný do okolní kapaliny.

Proto často ukazované příklady Coanda efektu jako například zadní hrana lžice pod proudem vody nebo voda vylévaná z konvice nejsou důsledky Coanda efektu. Jedná se totiž o takzvaný “teapot effect”, tedy efekt čajové konvice. Tento jev je závislý na povrchovém napětí kapaliny nikoliv na Coanda efektu.

Coanda efekt lze demonstrovat i bez přítomnosti pevného povrchu pomocí dvou vedle sebe zapálených svíček. Nahoru stoupající ohřátý vzduch z každé svíčky se snaží vtáhnout okolní vzduch v oblasti nad a mezi plameny, což způsobuje, že dva proudy kouře jsou skloněny směrem k sobě [Obr. 12]. [2]



Obrázek 12: Dvě vedle sebe zapálené svíčky

3.4 Separace toku

3.4.1 Separace laminární mezní vrstvy

K určení bodu separace pro stabilní dvourozměrnou laminární mezní vrstvu lze použít přímé a inverzní numerické metody. Přímá metoda zahrnuje předepsání známého tlakového gradientu pro řešení rovnic mezní vrstvy. Tato metoda, známá také jako Goldsteinova metoda, poskytuje singulární řešení, kde se stříhové napětí stává nulovým, zatímco normálová rychlost, tloušťka posunutí a gradient stříhového napětí v podélném směru se v bodě separace stávají nekonečnými. Inverzní metody byly vyvinuty, aby se vyhnuly singularitě a poskytly vylepšená a jednodušší řešení. V těchto metodách je obvykle předepsána tloušťka posunutí a rozložení rychlostí na okraji mezní vrstvy k získání tlakového gradientu $[\delta p/\delta x]$.

Oblasti lokálního odtržení mezní vrstvy vytvořené při separaci laminární mezní vrstvy lze také vypočítat pomocí inverzních metod. Pokud se však stříhové napětí stane záporným, dochází k zpětnému toku nebo k obrácení toku u stěny. To představuje určité obtíže v pokračování výpočtů mezní vrstvy. V takových případech lze použít nějakou formu metody interakce mezní vrstvy k získání řešení. [1] [6]

3.4.2 Separace nestabilní mezní vrstvy

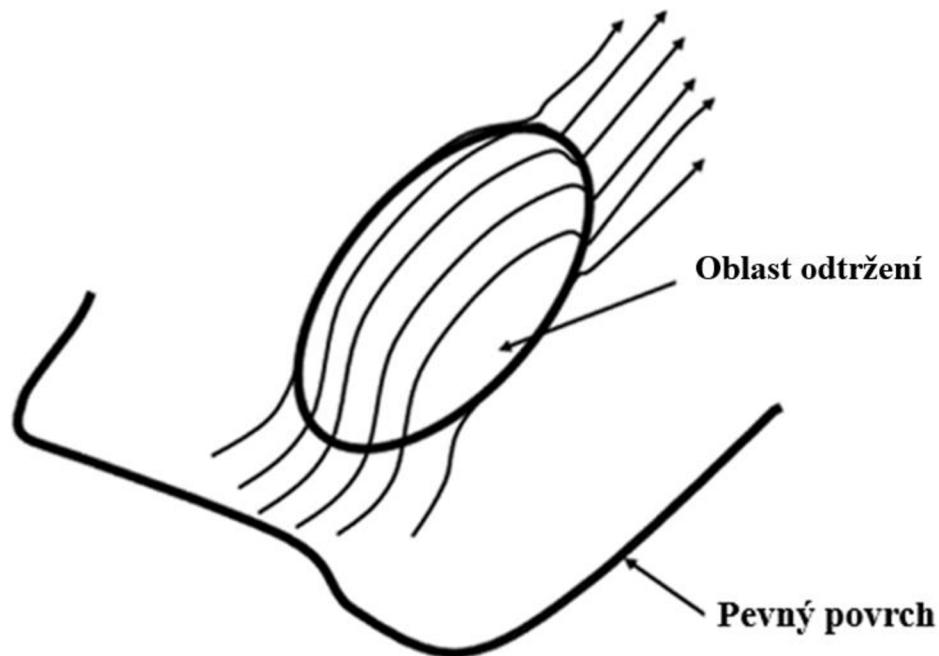
V nestabilním dvourozměrném toku, dokonce i s mizejícím tečným napětím na stěně nebo s obrácením toku, nemusí dojít k separaci toku. Tři fyzikové a matematici, Rott, Sears a Moor, pracující nezávisle na sobě, dospěli k závěru, že separace nestabilní mezní vrstvy je podobná situaci, kdy stříhové napětí a rychlost separace zanikají současně nad pohyblivou stěnou, nebo když jsou pozorovány ve vztažné soustavě, která se pohybuje s bodem separace. Ale obtížnost určení rychlosti, s jakou se bod separace pohyboval, ztěžovala lokalizaci bodu separace, když byla stěna stacionární. Tento problém vyřešili v roce 1974 fyzici Williams a Johnson, kteří použili metodu polo-podobných řešení k transformaci nestabilního toku na stabilní tok pro tok kolem pohyblivé stěny a získali řešení, která byla spojená s nestabilním případem. [1] [6]

3.4.3 Separace turbulentní mezní vrstvy

Separace turbulentní mezní vrstvy je také oblastí s obrovským praktickým významem. Struktura separovaných turbulentních toků vykazuje významné rozdíly ve srovnání s připojenými toky. V separovaných smykových vrstvách existují velké struktury, které produkují velké tlakové kolísání, jež mohou ovlivnit zónu zpětného toku s nízkou rychlostí. Obecně se zpětný tok znovu zapojuje do vnější oblasti toku a produkuje silné interakce mezi tlakovým a rychlostním kolísáním. Další aspekty, jako jsou vnucená a samovolně vyvolaná nestálost, mohou také významně ovlivnit separované vrstvy. To jsou oblasti, které stále zůstávají předmětem dalších studií. [1] [6]

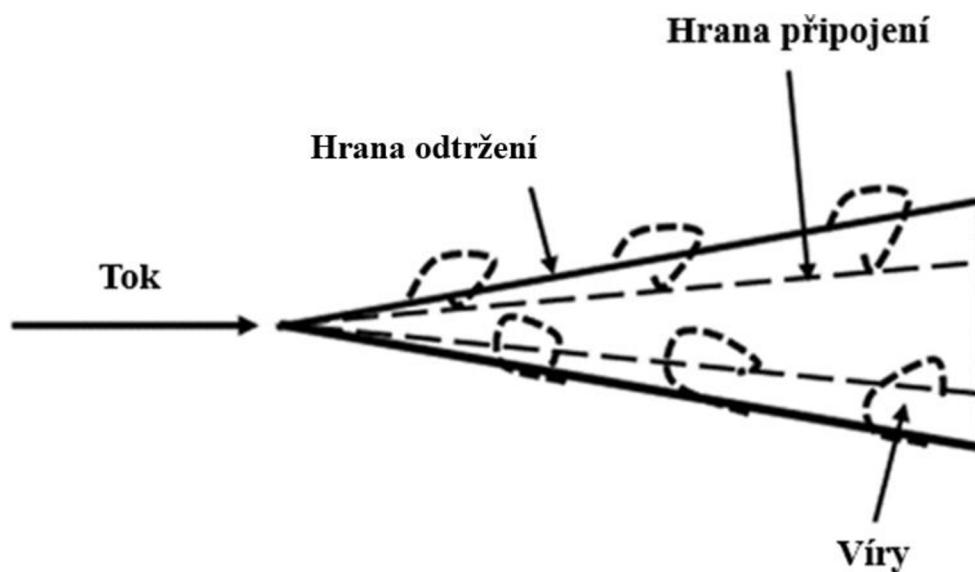
3.4.4 Separace trojrozměrné mezní vrstvy

Doposud byly zvažovány pouze dvourozměrné toky. Separace toku ve třech rozměrech je ovšem mnohem složitější. Obr. 18 ukazuje separaci toku na trojrozměrném tělese, tvorbu oblasti lokálního odtržení mezní vrstvy a znovu připojení toku.



Obrázek 18: Separace toku na trojrozměrném tělese [1]

Obr. 13 znázorňuje odtržení toku na delta křídle, kde se tok odděluje podél jeho hran, což dělá odtržení kontrolovaným procesem. Odtržený tok se svíjí do vírů, které se znovu připojují zpět na povrch křídla, což vede k sekundárním tokům a dodatečnému vztlaku na křídle.



Obrázek 13: Separace toku na křídle [1]

Ve trojrozměrných mezních vrstvách je vidět vytváření tenkých viskózních oblastí. To závisí na tom, zda dochází k postrannímu sblížení nebo rozcházení toku. Pokud se tok rozchází, řekněme od osově symetrického stagnačního bodu, pak princip zachování hmotnosti zajistí, že dojde k ztenčení hranice. V podobné argumentaci mezní vrstva zhoustne, pokud se proudnice sbíhají ke stagnačnímu bodu.

Podélný tlakový gradient způsobuje, že rovinný tok se zrychluje nebo zpomaluje. Pokud je přítomen příčný gradient, přidává další rozměr vrstvám a mění směr proudnic do stran. Statický tlak uvnitř mezní vrstvy se však neměnný a zůstává konstantní. To má za následek, že částice s nízkou rychlostí blíže k povrchu mezní vrstvy následují těsnější křivku než částice s vyšší rychlostí na okraji mezní vrstvy. To je důsledkem zahájení sekundárního toku.

Mírná přítomnost příčného tlakového gradientu může způsobit, že trajektorie proudnic bude silně zakřivená a tok se stane trojrozměrným. Obecně platí, že separace ve trojrozměrném toku je velmi složitý jev a většina znalostí byla získána na základě experimentů s vizualizací toku, a proto může být charakterizována jako kvalitativní.

[1] [6] [9] [10]

4 Coanda efekt v letectví

Generování vysokého vztlaku při nízkém odporu je důležitým faktorem výkonnosti leteckých vozidel a Coanda efekt v této souvislosti hraje významnou roli. V následujících kapitolách si ukážeme některá využití Coanda efektu pro zvýšení vztlaku u leteckých vozidel.

Tato témata nejsou omezena pouze na aeronautické studie. Vhodné prostředky kontroly a integrace produkce vztlaku s pohonným mechanismem pro námořní vozidla jsou také důležité v hydronautice a v mnoha neleteckých aplikacích, jako je například zvýšení výkonu silničních vozidel a další. [1]

4.1 Zvýšení vztlaku

Zařízení používaná pro zvýšení vztlaku na křídle se nazývají klapky. Klapky mohou být buď nepoháněné nebo poháněné. Probereme oba tyto typy předtím, než zvážíme jejich význam pro Coanda efekt.

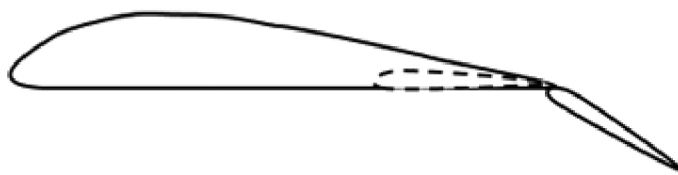
4.1.1 Nepoháněné klapky

Konvenční systémy pro zvýšení vztlaku obvykle zahrnují mechanické klapky. Mechanické klapky jsou nazývány nepoháněné klapky. Jsou integrální součástí křídla a jsou instalovány na odtokové hraně, náběžné hraně nebo na obou. Na odtokové nebo náběžné hraně mohou být klapky během vzletu nebo přistání rozšířeny nebo sklopeny dolů od hlavního křídla.

Výběr klapky je dán účelem a požadovaným výkonem letadla. Obvykle zahrnují úvahy o koeficientu vztlaku, koeficientu odporu a variacích koeficientu momentu s úhlem náběhu (zejména pod úhlem překročení mezního úhlu) stejně jako úhlem klapky. Následující obrázky [Obr. 14-19] ukazují výběr různých dvourozměrných reprezentací mechanických klapky používaných na křídlech. [1]



Obrázek 14: Jednoduchá klapka [1]



Obrázek 15: Zaparkova klapka [1]

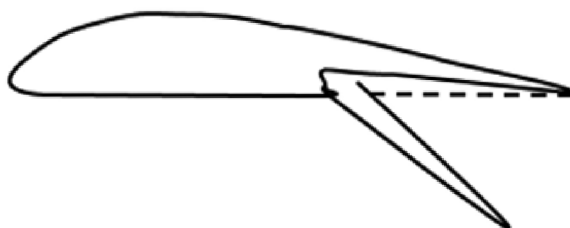
S



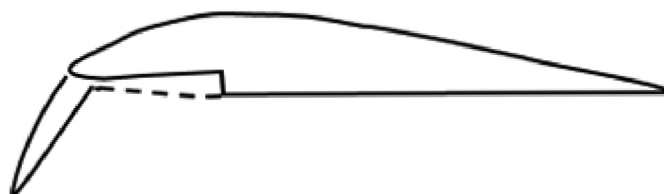
Obrázek 16: Štěrbínová klapka [1]



Obrázek 17: Odklápěcí klapka [1]



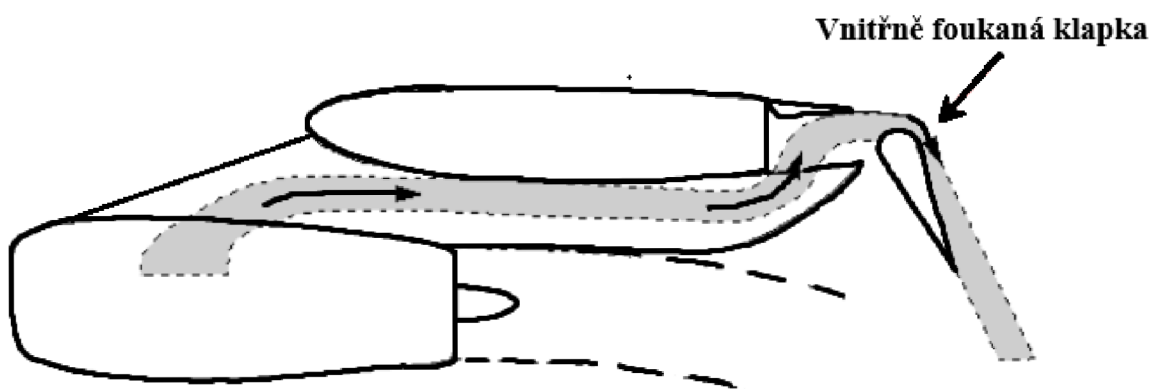
Obrázek 18: Fowlerova klapka [1]



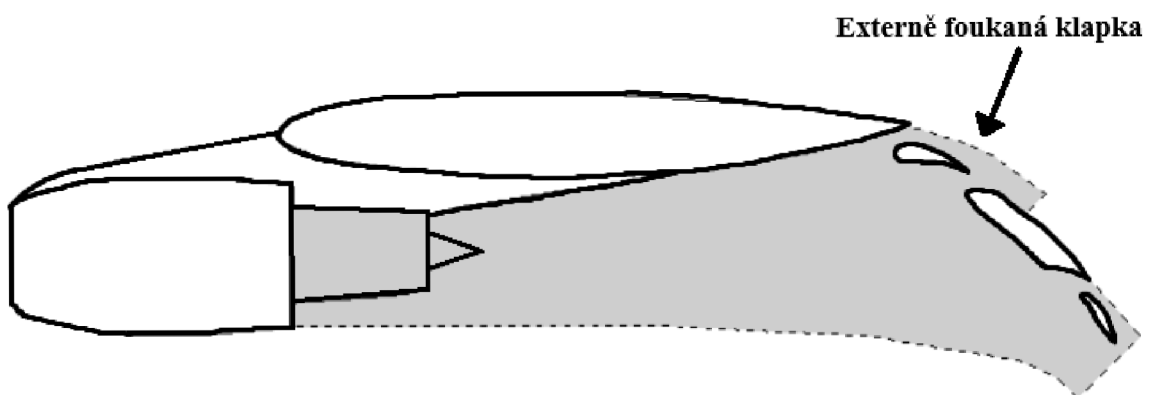
Obrázek 19: Krugerova klapka [1]

4.1.2 Foukané klapky

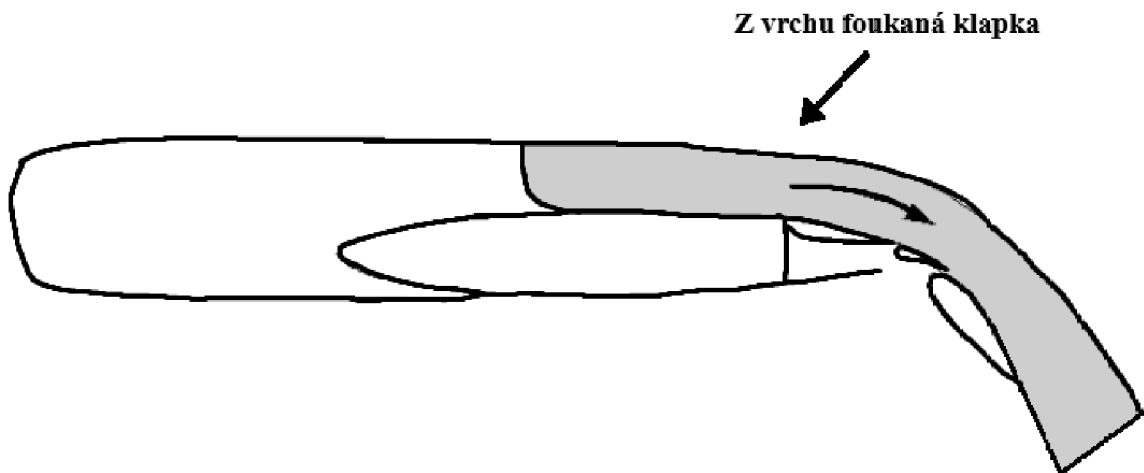
Foukané klapky zahrnují jak mechanické klapky, tak vzduchové trysky. V tomto uspořádání se snaží zlepšit účinnost mechanických klapek instalací vzduchových trysek s vysokou rychlostí proudu umístěné nad, pod, nebo skrz klapku [Obr. 20-22]. Většinou je k tomuto využito odváděného vzduchu z motoru nebo výfukových toků motoru. Když se používají pouze vzduchové trysky a mechanické klapky jsou úplně odstraněny, uspořádání se nazývá "čistě trysková klapka". Čistě tryskové klapky jsou odkloněny přímo z odtokového okraje, aby produkovaly stejné efekty jako mechanické klapky. Charakteristikou křídel s foukanými klapkami je schopnost odklonit proud o velké úhly, někdy blížícím se 90° .



Obrázek 20: Schéma vnitřně foukané klapky [7]



Obrázek 21: Schéma externě foukané klapky [7]



Obrázek 22: Schéma z vrchu foukané klapky [7]

Tyto systémy dosahují zvýšeného vztlaku zvýšením cirkulace křídla a odkloněním tahu dolů. Foukané klapky mohou významně zvýšit maximální koeficient vztlaku letounu a tím poskytnout schopnost STOL (Short Take-Off and Landing - krátký vzlet a přistání). Typicky může křídlo pomocí klapky s Coanda efektem přeměnit horizontální tah motoru na vertikální vztlak za cenu ztráty 20 až 30 % tahu.

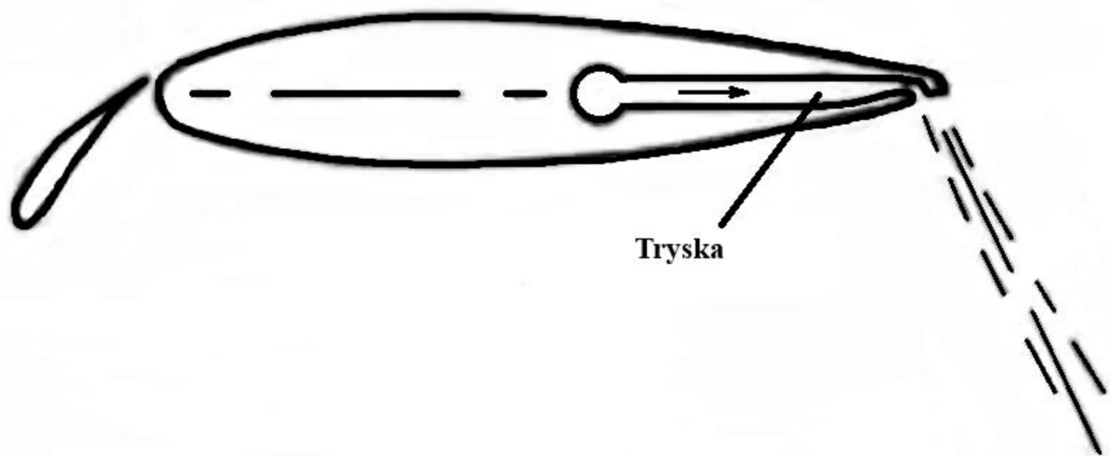
Systémy foukaných klapek lze rozdělit do dvou obecných kategorií, systémy vnitřního toku a systémy vnějšího toku. Systémy vnitřního toku využívají vnitřní potrubí k vypouštění vzduchu nad klapku, a systémy vnějšího toku využívají výhodné umístění motoru a klapky.

Koncept foukané tryskové klapky existuje již dlouho. Schubauer byl pravděpodobně první, kdo prozkoumal využití trysek k zvýšení vztlaku. Koncept získal větší pozornost s vývojem proudových motorů, které poskytly snadno dostupný prostředek pro foukání vzduchu. Další podnět přišel s uvědoměním, že vztlakový systém lze kombinovat s pohonným systémem. V důsledku toho byly prozkoumány různé návrhy pneumatických zařízení využívajících foukané trysky. Většina z nich může být považována za nekonvenční návrhové koncepty s různými stupni úspěchu. [1] [7] [8] [9] [10]

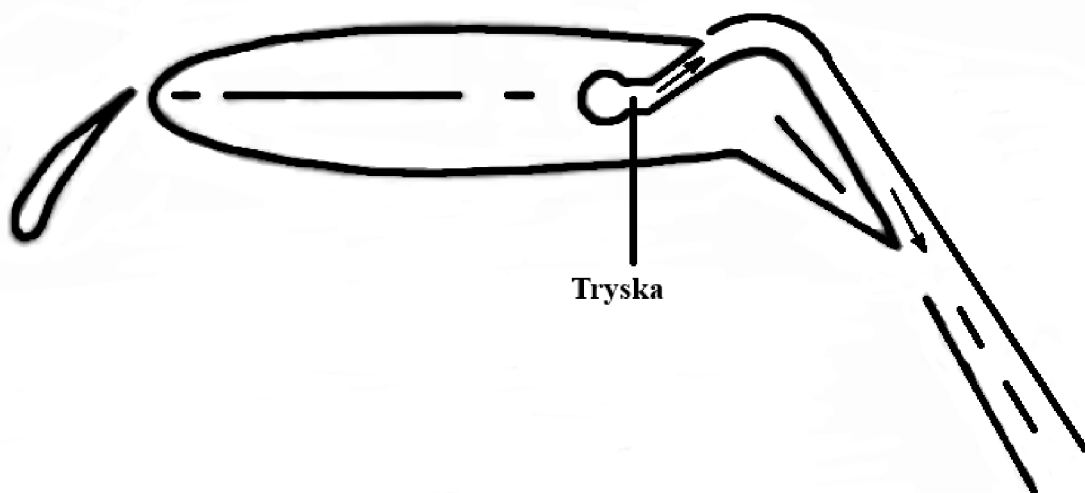
4.1.3 Proudové klapky

V této konfiguraci tryska ústí ze štěrbině umístěné těsně nad nebo pod odtokovou hranou klapky a na výstupu k ní zůstává přilnutá.

Termín "proudová klapka" vznikl z analogie mezi mechanickou klapkou a efekty trysky. Ale Kuchemann poukázal, že toto odůvodnění je pouze částečné. Analogie platí v tom smyslu, že jakákoli vířivost za vzduchovým profilem může indukovat vztlak, ale jinak je analogie sporná.



Obrázek 24: Schéma proudové klapky s ústí trysky pod odtokovou hranou [9]



Obrázek 23: Schéma proudové klapky s ústí trysky nad odtokovou hranou [9]

Proudění opouští klapku tangenciálně k odtokové hraně, jak je ukázáno na *Obr. 23-24*. Tok je zakřivený a úhel, pod kterým opouští odtokovou hranu ve vztahu k hlavnímu toku, není konstantní a může být upraven. Přes tento zakřivený tok z trysky je vytvořen významný tlakový rozdíl. To zase produkuje zatížení na odtokové hraně.

Koncept proudové klapky jako takové, oddělené od přímých studií Coanda efektu byl zkoumán již dříve. První známá studie o proudových klapkách je připisována Hagedornovi a Rudenovi. Stejně jako u jiných schémat vyžadujících trysky, studie proudových klapek také získaly obnovenou pozornost s rychlým vývojem proudového motoru po 2. světové válce.

Hunting H 126 je první výzkumné letadlo, které využívalo koncept proudové klapky [Obr. 25]. Od března 1963 provádělo úspěšné lety s koeficienty vztlaku až 7,5. Letadlo mělo ostré charakteristiky ztráty vztlaku, což vyžadovalo dostatečnou rezervu proti pádu. To společně s bočními řídicími charakteristikami omezovalo maximálně využitelnou hodnotu C_L na 5,5. [1] [7] [8] [9] [10]



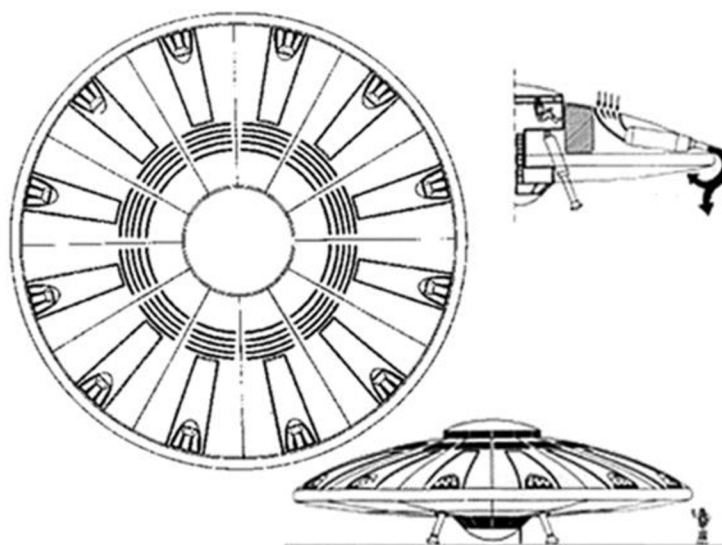
Obrázek 25: Letadlo Hunting H 126 [11]

4.2 Vývoj V/STOL letadel s využitím Coanda efektu

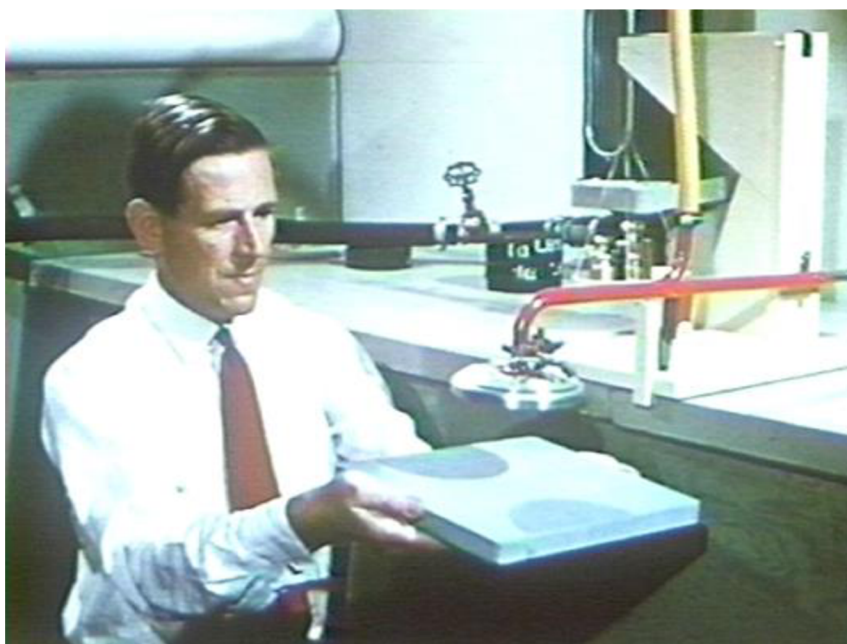
Koncept letadel V/STOL byl implicitně obsažen v patentu Henriho Coandy. Cílem myšlenky bylo vytvořit zrychlení vzduchového proudu nad konkávním diskem. Během okupace Paříže ve druhé světové válce se německá armáda dozvěděla o Coandově práci a požádala ho o pomoc při návrhu velkého létajícího vozidla, které by mohlo být poháněno jejich nejnovější technologií proudových motorů. Coanda tak přišel s návrhem vozidla ve tvaru disku o průměru přibližně 20 metrů, které vyžadovalo 12 velkých proudových motorů pro jeho pohon. Kvůli konci války a pádu Říše Coandovo vozidlo, jak je skicováno na Obr. 26, nepostoupilo dále než do fáze testování ve větrném tunelu.

Po válce byl Coandův koncept oživen spojeneckými vědci, zejména Johnem Frostem v Kanadě. Na Obr. 27 je vidět, jak Frost demonstruje Coanda efekt tím, že nechává stlačený

vzduch z konce trubice proudit přes vrchol kovového disku. Proud se zakřivil dolů podél okrajů bez oddělení a udržel disk ve vzduchu.



Obrázek 26: Coandův talíř [1]



Obrázek 27: Frostova demonstrace Coanda efektu 1952 [12]

Frost byl schopen přesvědčit americké vojenské velení, aby poskytlo financování. V roce 1958 bylo v Kanadě společností Avro Aircraft, Ltd. jako součást tajného amerického vojenského projektu postaveno AVRO Car VZ-9, které připomínalo létající talíř, jak je znázorněno na Obr. 28.



Obrázek 28: AVRO Car VZ-9 [13]

Od samého počátku byl vývoj Avrocaru poznamenán technickými problémy a požadovaný výkon nebyl téměř dosažen. Projekt byl nakonec zrušen v roce 1961. Ačkoliv se Avrocar nikdy nestal realitou jako operační vozidlo, inspiroval mnoho inovací, jako je technologie ventilátorů.

Zájem o integraci generování vztlaku s pohonem je stále silný a využití Coanda efektu neklesá. Většina výzkumných snah zahrnuje kombinaci kontroly řízení mezní vrstvy a kontroly řízení cirkulace. Rychlý pokrok ve vývoji vhodných pohonů, jako jsou plynové turbíny s nízkou specifickou hmotností (hmotnost motoru/statický tah), dal další podnět k vývoji letadel vyžadujících krátké vzletové a přistávací dráhy.

To vedlo k vývoji radikálních konceptů letadel s krátkým vzletem a přistáním (STOL), vertikálním vzletem a přistáním (VTOL) nebo V/STOL jako možných řešení. Bohužel, letadla vyrobená dosud mají špatný výkon během vzletu a přistání a vysoký odpor při letu.

Byly navrženy různé typy schémat pro dosažení výkonu V/STOL. Mezi ně patří, mimo jiné:

- Kombinovaná letadla, tj. helikoptéra s pevným křídlem
- Letadla s naklápěcím křídlem, která otáčejí celé křídlo a vrtule o 90 stupňů při udržení pevného trupu
- Letadla s naklápěcími tryskami, vrtulemi nebo rotory, která otáčejí tlačné prvky při udržení vodorovné polohy trupu
- Letadla s ventilátorem ve křídle, která používají ventilátory ponořené do křídel
- Letadla na proudový pohon, která používají motory s vektorovým tahem

Letadla, která se snaží využít Coanda efekt, však spadají mimo výše uvedené typy a obecně zahrnují sací nebo foukací kontrolu cirkulace nebo kombinaci obou. Je však důležité si uvědomovat aerodynamické koncepty, které definují jejich rozlišovací rysy. [1] [13]

4.3 Vrtulník bez ocasního rotoru (NOTAR)

Termín NOTAR ("no tail rotor") je nyní široce akceptován jako popis vrtulníku, který nepoužívá ocasní rotor. Vrtulník NOTAR používaný například německou policií, ukázaný na *Obr. 29*, je příkladem úspěšné komerční aplikace Coanda proudového efektu.



Obrázek 29: Vrtulník NOTAR [15]

Původní koncept návrhu NOTAR byl vytvořen v roce 1975 ve společnosti Hughes Helicopters Incorporated. V návrhu NOTAR je tradiční ocasní rotor nahrazen Coanda tryskami foukajícími kolem ocasního nosníku. Návrh zahrnuje uzavřený ventilátor, vertikální ventilátor, ocasní nosník s Coanda řízením cirkulace a řadu ventilačních klapek [*Obr. 30*]. Sestupný proud z hlavního rotoru je kombinován s Coanda tryskou, která vychází tangenciálně z kruhového ocasního nosníku. To vytváří proti točivou boční sílu na ocasním nosníku. Boční síla takto vytvořená řízeným nosníkem poskytuje většinu stabilizace tím, že kompenzuje hlavní točivý moment během vznášení. Testy letu vrtulníku ukázaly, že systém NOTAR poskytuje zvýšenou bezpečnost, stejně jako vysoké kvality ovládání při nízké rychlosti, dobrou stabilitu, snížené vibrace a hlavně nízký hluk. Vrtulníky NOTAR jsou jedny z nejnižších na světě což v jejich využití hraje velkou roli.

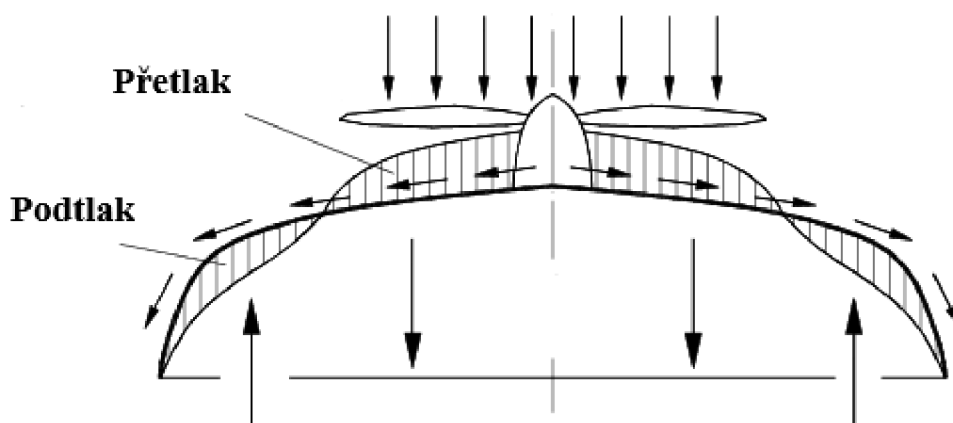
1991 během války v Zálivu, kdy americké a spojenecké síly provedly více než 300 bojových misí s UAV.

Tradiční UAV se liší od UAV s Coanda efektem tím, že tradiční UAV mají pevná křídla. Tyto tradiční UAV vyžadují dráhy pro vzlet a přistání. Mají také nižší schopnosti vznášení. Proto jsou v tradičních UAV často používány rotory podobné těm, které se používají u vrtulníků nebo VTOL/STOL letadel, aby se zlepšila jejich manévrovatelnost.

Hlavními cíli UAV nebo MAV s Coanda efektem je vytvořit efektivní cestovní rychlost i schopnost vznášení. Konfigurace UAV nebo MAV s Coanda efektem jsou proto obecně polokulovité nebo talířové typy, které pomáhají vytvářet Coandovy plochy.

MAV s Coanda efektem byly studovány profesorem Ahmedem, který použil konfigurace typu talíře. Analýzy byly nicméně dvourozměrné a založené na zjednodušujících předpokladech. Přesto se mu podařilo modelovat síly a momenty na jejich zvolené geometrii. Další studie, jako například ty od profesora Lee, se zabývaly stabilitou a ovládním UAV pomocí dynamických simulačních modelů.

Většina těchto studií o UAV s Coanda efektem je však ve svém počátečním stadiu a omezuje se na numerická vyšetřování nebo simulace. Je zapotřebí většího úsilí, než budou schopny poskytovat praktická řešení pro vojenské nebo komerční aplikace. [1] [16] [17]



Obrázek 31: Schéma Coanda trysky pro UAV letoun [16]

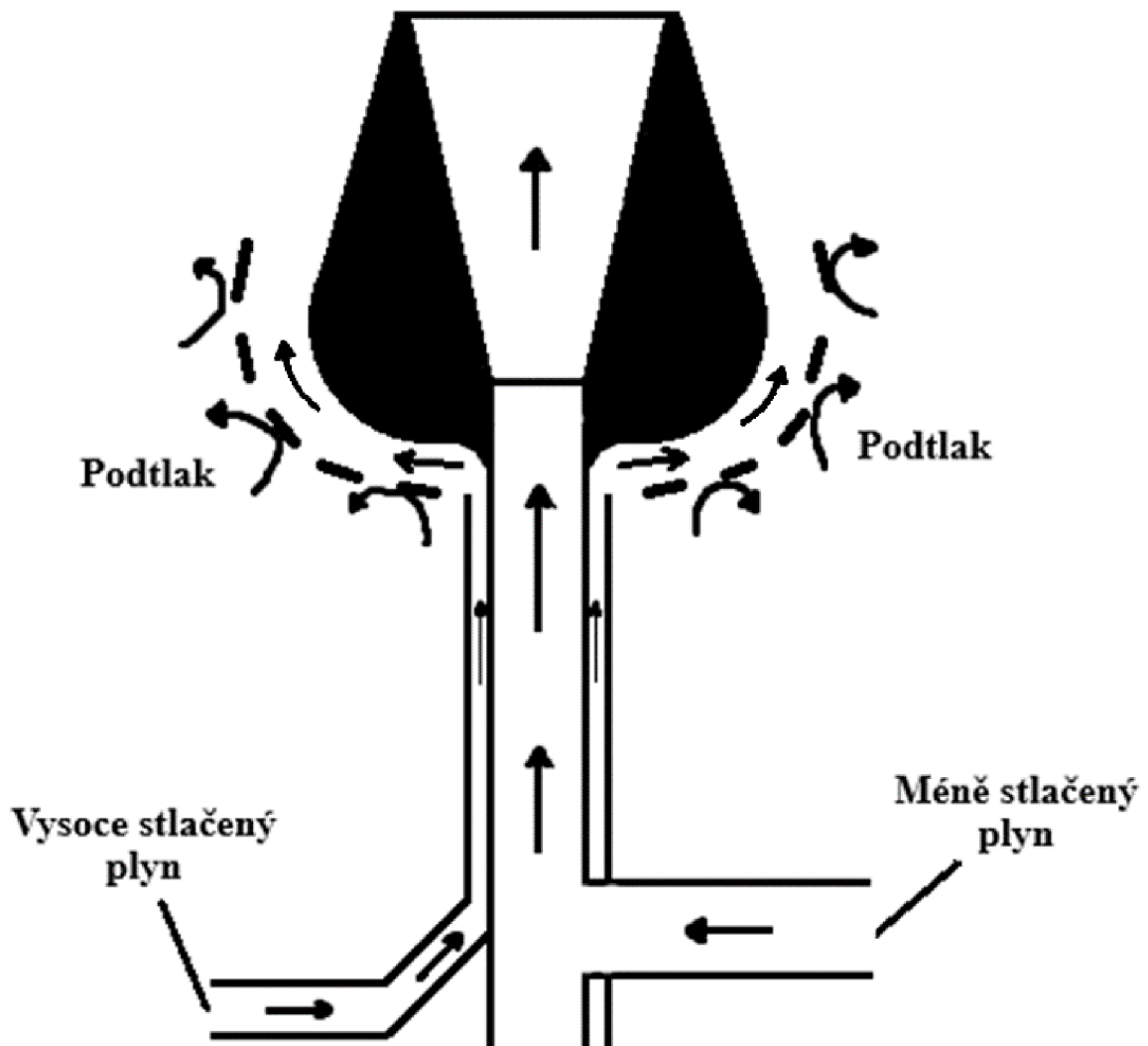


Obrázek 32: Testovací dron s Coanda tryskami [17]

5 Coanda hořák

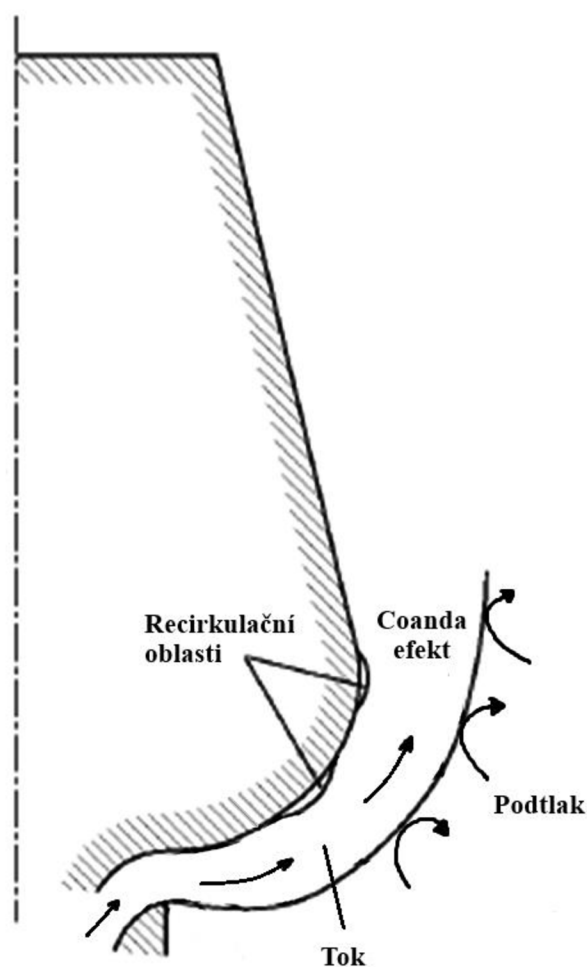
Coanda hořák je primárně využíván při těžbě ropy, kde jako vedlejší produkt vzniká zemní plyn. Ten je třeba odvádět z místa těžby a buď nějakým způsobem energeticky využít nebo pokud to není možné, co neefektivněji spálit, tak aby neunikal do atmosféry. V případě spalování se snaží docílit co nejdokonalejšího spalování, aby do atmosféry unikalo co nejméně škodlivých látek, které při spalování vznikají. Historicky, vzniklo mnoho způsobů spalování odpadního plynu, nejvíce se však používá Coanda hořák.

Coanda hořák tvoří dvě trubice kterými proudí hořlavý plyn. Vnitřní, ve které je plyn pod menším tlakem a vnější, kde plyn proudí rychlostí zvuku. U ústí vnější trubice je umístěna konvexní stěna, ke které tok plynu díky Coanda efektu přilne a podtlakem vtahuje velké množství vzduchu, jak je ukázáno na *Obr. 33-34*.



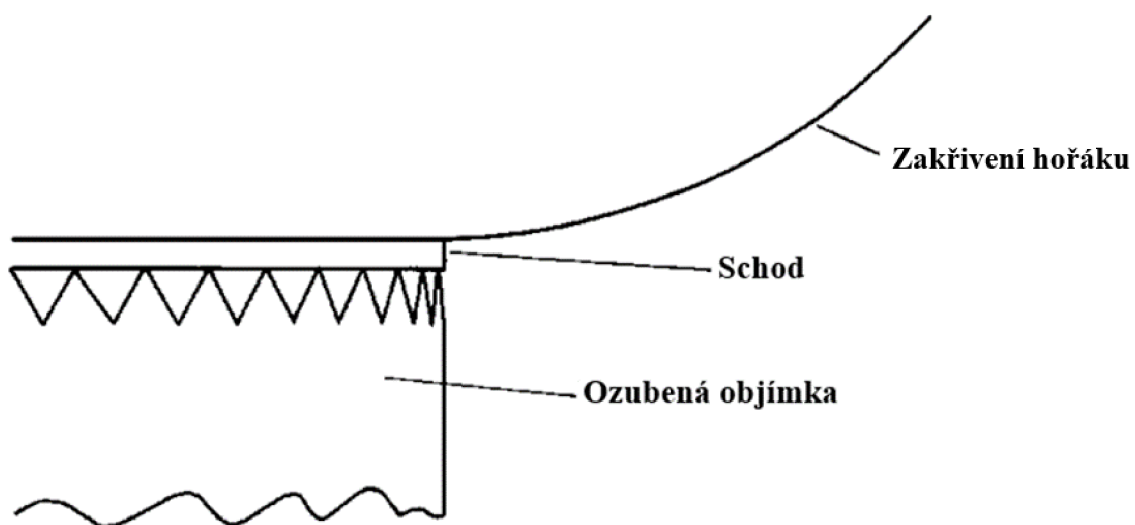
Obrázek 33: Schéma Coanda hořáku

U Coanda hořáku bylo zjištěno, že vtažování objemu vzduchu je až 20krát vyšší než objem palivového proudu plynu a mají téměř trojnásobnou kapacitu ve srovnání s ostatními typy světlic a hořáků např. Bunsenova typu. Pro spalování to znamená dobré promíchání paliva a vzduchu, a že proces je schopen produkovat téměř stechiometrický poměr, který je příznivý pro generování kompaktního, nesvitivého plamene po zapálení. Pro větší účinnost hořáku se k ústí vnější trubice přidává schod, který umožní vytvoření recirkulační oblasti a posouvá bod odtrhnutí mezní vrstvy.

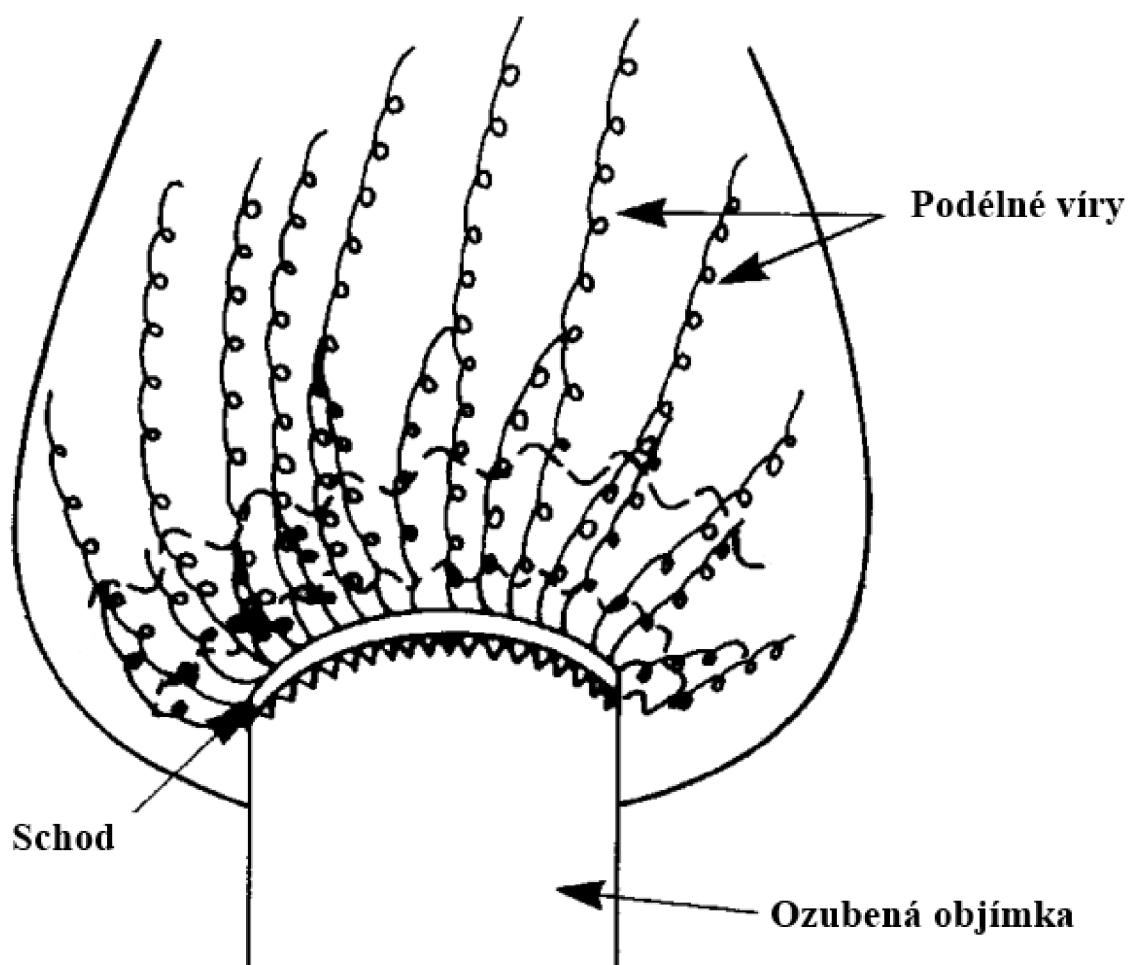


Obrázek 34: Detailní schéma Coanda hořáku [1]

Coanda hořáky mají pro těžební průmysl několik velkých výhod. Především je to jednoduché provedení oproti ostatním druhům hořáků. Jednoduchá koncepce umožňuje relativně nenákladnou výrobu a instalaci, což je z provozního hlediska velká výhoda. Velmi důležitým aspektem Coanda hořáku je také menší hlučnost, což se může zprvu zdát jako nedůležitý detail, nicméně v provozních podmínkách je významný. Pro větší snížení hlučnosti hořáku se na vnější okraj, ze kterého ústí vysoce přetlakovaný plyn přidává ozubení, které vytvoří v toku víry [Obr. 35]. Tyto víry narušují axiální symetrii koherentních struktur v míchací vrstvě oblasti Coanda tryskového proudu v blízkosti výstupního slotu a tím rapidně snižují hlučnost nadzvukového proudění plynu [Obr. 36]. [1] [2] [18] [20]



Obrázek 35: Ozubená objímka na Coanda hořáku [20]



Obrázek 36: Podélné víry na Coanda hořáku [20]



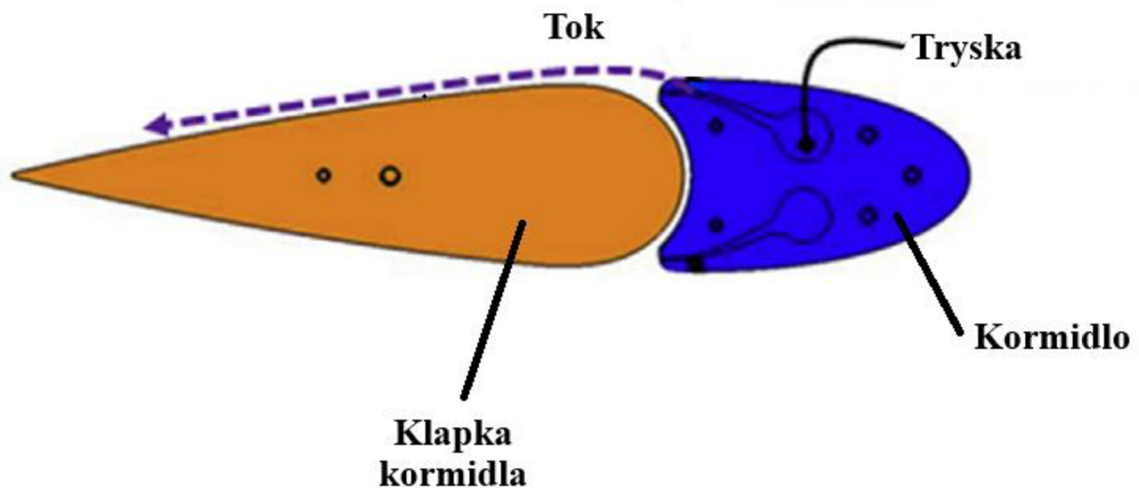
Obrázek 37: Zažehnutý Coanda hořák [19]

6 Lodní Coanda kormidlo

Coanda efekt má velký potenciál praktického využití v oblasti vodní hydrodynamiky, kde jsou různé vztahové plochy široce využívány pro kontrolu chování lodí a lodních konstrukcí.

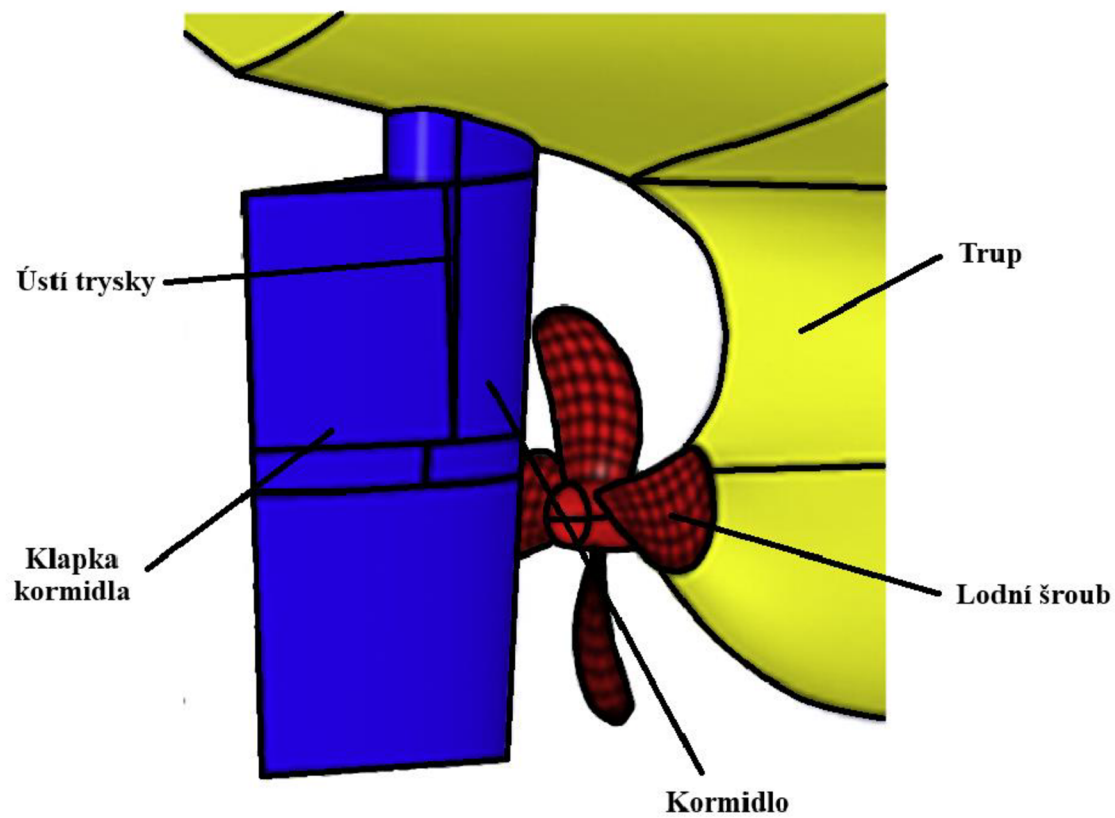
Pomalé lodě s velkým trupem, jako jsou ropné tankery, mají někdy problém dosáhnout dostatečné vztahové síly kormidla pro zajištění manévrovatelnosti. Obzvláště když se loď plaví pomalou rychlostí, zvyšuje se úhel záběru kormidla, ale malá vztahová síla kormidla vede k nedostatečné manévrovatelnosti. To může způsobit nebezpečné situace například v přístavech.

Pro zvýšení vztahové síly kormidla se použije Coanda tryska. Ta se umístí do samotného kormidla a tangenciálně ústí k začátku kormidlové klapky [Obr. 38-40]. Na povrch klapky tryska proudí dodatečný proud vody, který pomůže klapce k vytvoření dodatečného vztahu a dostatečné síle k otočení lodí.



Obrázek 38: Schéma Coanda kormidla [21]

V malých rychlostech, kdy se lodní šroub netočí natolik, aby mělo kormidlo dostatečný vztah na manévrování tankeru, je Coanda kormidlo zásadní. Coandův proud zvyšuje koeficient vztahu kormidla až o 52 % a velmi pomáhá velkým lodím a tankerům k soběstačnosti v místech, kde by jinak musely být použity remorkéry. [21] [22]



Obrázek 39: Usazení kormidla [21]

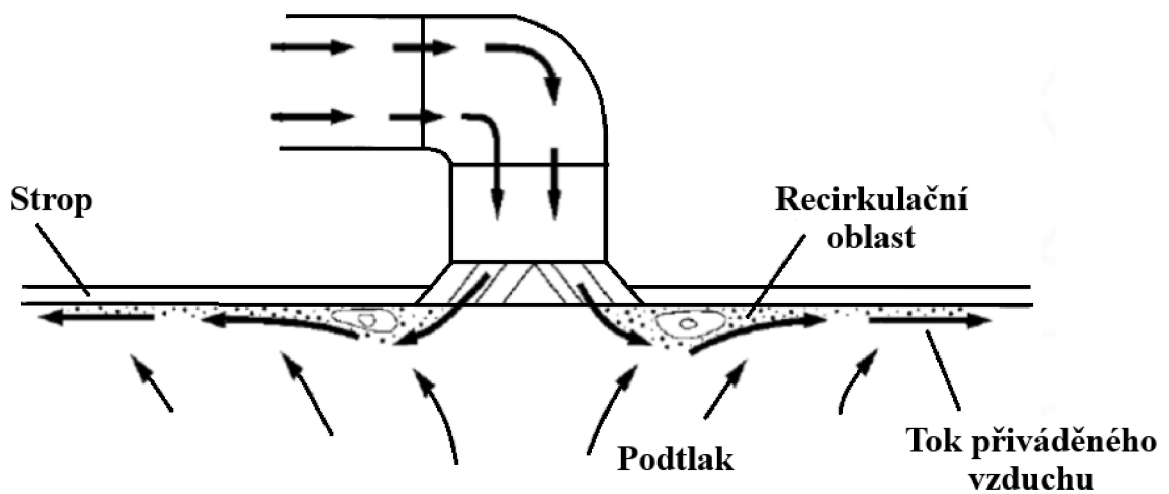


Obrázek 40: Testování Coanda kormidla [21]

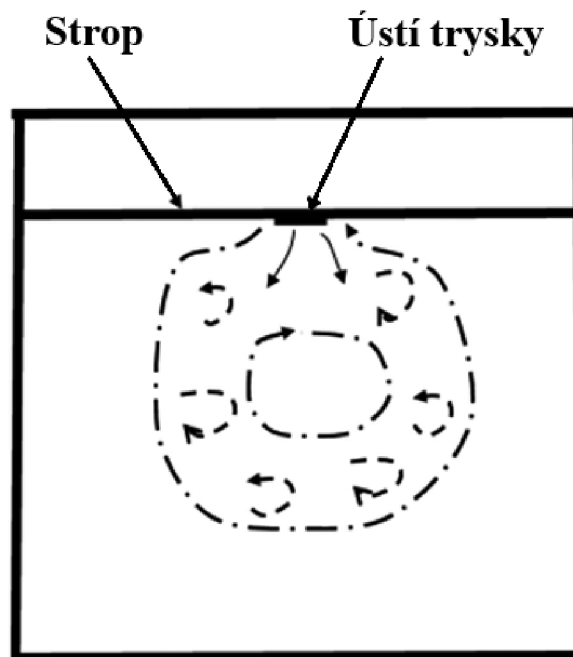
7 Ventilace

Principy Coanda efektu lze také využít v systémech ventilace, ať už budov či prostředcích hromadné dopravy.

Hlavní problém ventilačních systémů je, že přiváděný teplý nebo studený vzduch se dostatečně nepromíchá se vzduchem v prostoru. Často se tedy stává, že ventilace je neefektivní a zvýšení proudu ventilace tento problém také nevyřeší a pokud ano, tak za cenu vynaložení zbytečně velkého množství energie. Jedním řešením tohoto problému je přizpůsobení trysky. Hrany na ústí trysky se zaoblí nebo se přidá konvexní povrch, aby se tok neodtrhl, ale pomocí Coanda efektu přilnul ke stropu a rozprostřel se lépe po prostoru [Obr. 41].

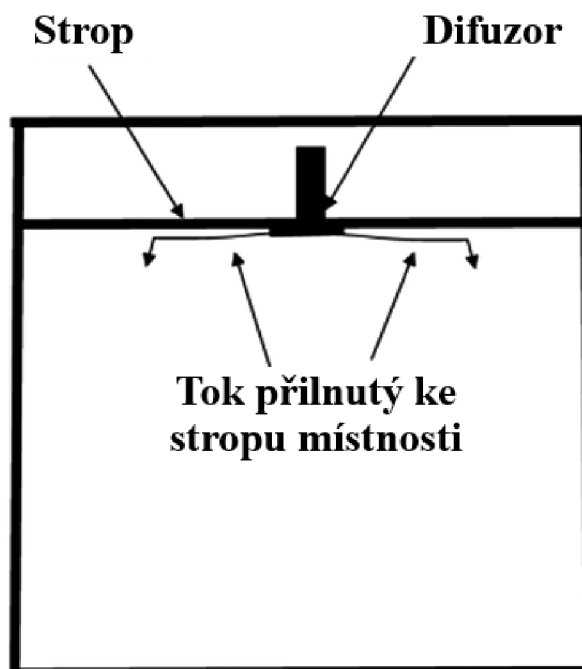


Obrázek 42: Schéma trysky s využitím Coanda efektu [23]



Obrázek 41: Ventilace místnosti jednoduchou tryskou bez difuzoru [1]

Druhým praktickým řešením takového problému je umístění difuzoru k ústí ventilační trysky. Difuzor zajistí rovnoměrné rozprostření toku přiváděného vzduchu a pomocí Coanda efektu tok zůstane přilnutý ke stropu místnosti a rozprostře se po celé místnosti, jak je ukázáno na *Obr. 43*.



Obrázek 43: Ústí trysky s použitím difuzoru [1]

Coanda efekt se ve ventilačních systémech používá i v samotném potrubním systému [*Obr. 44*]. Místo ostrých kolen v potrubí se začala používat zaoblená kolena, jak je ukázáno na obrázku. To pomáhá k menším turbulencím vzduchu v potrubí, a tedy k menším tlakovým výkyvům. Zaoblený Coanda povrch také vytváří v potrubí vztlak. Tato vlastnost se také využívá v situacích, kdy je například potřeba hnát vzduch do vyšších pater a šetří se tak velké množství energie. [1] [23] [24]

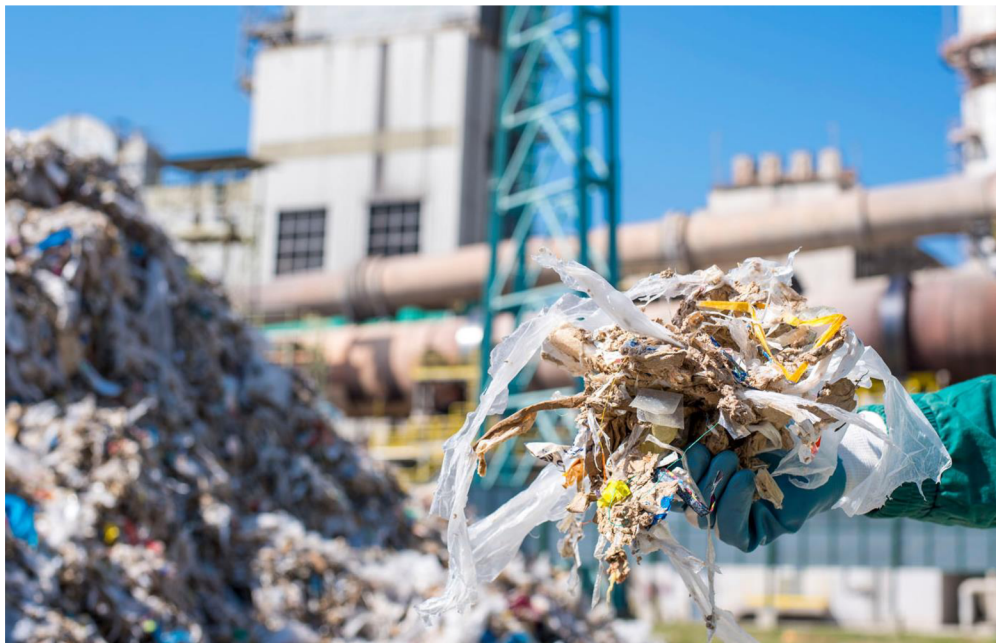


Obrázek 44: Zaoblené koleno potrubí ventilačního systému [24]

8 Návrh pneumatického separátoru

V tomto návrhu zařízení pro separaci částic využijeme získané znalosti Coanda efektu. Nejprve určíme prostředí a účel pro takové zařízení.

Separátor by byl součástí pneumatické dopravy jako pasivní prvek pro odstranění těžkých nehořlavých částic z alternativního paliva. Alternativním palivem jsou myšleny odštěpky a granule ze zpracovaného odpadu, jako jsou použité pneumatiky, plasty, obaly atd. [Obr. 25]. Alternativní paliva se používají jako přídavek do směsi, která se následně dopravuje do hořáku v cementárnách pro výrobu cementu. Alternativní paliva z odpadu totiž mají velkou potenciální energii, která může být využita například tímto způsobem. Některé cementárny už dnes nahrazují své starší hořáky za nové, které mohou pracovat i se směsí tvořené ze 100 % zpracovaným odpadem.



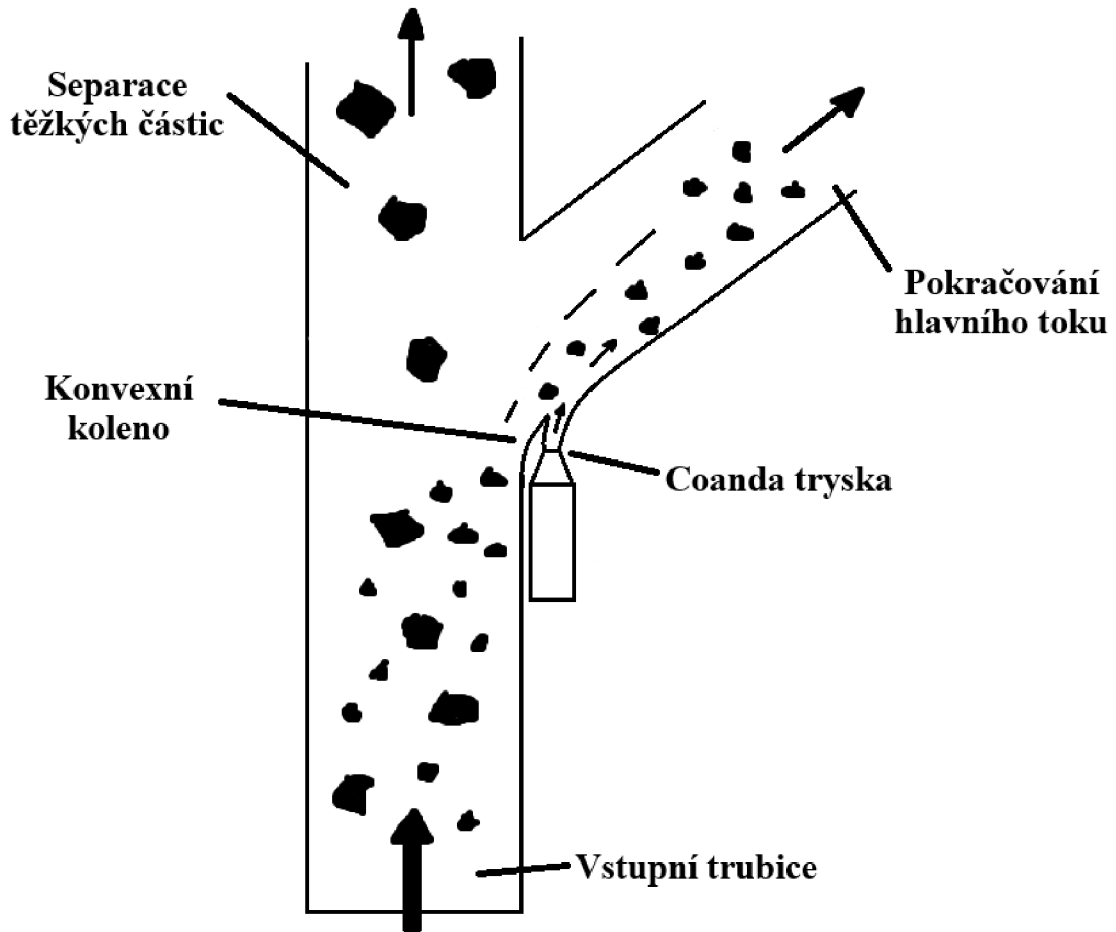
Obrázek 45: Příklad alternativního paliva pro cementárny [25]

Někdy jsou ale dodavatelé takových paliv nespolehliví, především v zemích třetího světa, a nesplní granulometrii potřebnou pro hořák dané cementárny. V tu chvíli je potřeba do sestavy pneumatické dopravy (pokud cementárna takový systém pro přepravu paliva používá) začlenit i nějakou formu síta, které by nežádané prvky paliva odstranilo. Ty by se totiž mohly v potrubí pneumatické dopravy zaseknout nebo znemožňovat hořáku pracovat na požadovanou efektivitu.

Dalším efektem separátoru by bylo prodloužení životnosti pneumatické dopravy za separátorem, jelikož budou těžké abrazivní částice vyloučeny z další pneumatické dopravy.

8.1 Konstrukce separátoru

Separátor jako takový by tvořila vstupní trubice pneumatické dopravy, která by na konci byla rozdělena na dvě. Na stěnu jedné by se přidalo konvexní koleno s Coanda tryskou, která by tangenciálně ústila do prostoru kolene, jak je ukázáno na obrázku. Vytvořená vztlaková síla pomocí Coanda trysky by zakřivila hlavní tok požadovaně těžkých částic a ty by pokračovaly dále v systému pneumatické dopravy k hořáku. Příliš těžké nežádoucí částice by nebyly strženy vztlakovou silou Coanda trysky a pokračovaly by v původním směru, kde by byl umístěn zásobník.



Obrázek 46: Schéma pneumatického separátoru

Síla proudu trysky by se zvyšovala nebo snižovala podle požadavku cementárny. Tedy na jak velké a těžké granule alternativního paliva by byl přizpůsoben hořák cementárny. Podle toho by bylo možné upravovat i ostrost rádia kolene.

Je zřejmé, že takové zařízení by nemělo 100 % úspěšnost v odstraňování těžkých a velkých částic z materiálu. To ale není účelem. Minimální úspěšnost takového zařízení, aby bylo pro cementárnu efektivní je 50 %. Takové úspěšnosti by nemělo být nemožné dosáhnout, ale dokud se nevyrobí prototyp a nezačne testování nic není definitivní. Pokud by takový separátor částic byl zrealizován a využíván, jeho hlavní vlastnosti by byly jednoduchost výroby a designu, minimální tlaková ztráta v pneumatické dopravě a vysoká životnost v porovnání s jinými zařízeními pro separaci materiálu.

9 Další využití Coanda efektu

9.1 Lidské tělo

V kontextu lidského těla může být Coanda efekt pozorován a využíván v různých oblastech, zejména v kardiologii a pneumologii.

Díky Coanda efektu mohou kardiologové identifikovat a posoudit závažnost regurgitace (zpětného toku krve) u srdečních chlopní. Když se chlopeň neuzavírá správně, krev se vrací zpět do komory nebo předsíně, odkud přišla. Coanda efekt způsobuje, že tento zpětný tok krve přilne k stěnám srdce, což může být na echokardiogramu viditelné a pomáhá tak lékařům lépe určit závažnost regurgitace.

V kardiologii je Coanda efekt dále využíván k analýze, jak krev proudí skrz různé části srdce a jak efektivně je srdce schopno čerpat krev do těla. Změny v charakteristice toku mohou indikovat různé patologické stavy, jako jsou srdeční defekty nebo obstrukce v srdečních komorách.

V pneumologii je Coanda efekt uplatňován při vysvětlování a manipulaci s prouděním vzduchu v dýchacích cestách. Porozumění Coanda efektu pomáhá lékařům lépe diagnostikovat, monitorovat a léčit různé respirační stavy a patologie. U pacientů, kteří potřebují podporu dýchání prostřednictvím mechanické ventilace, je důležité správně nastavit proudění vzduchu, aby bylo zajištěno efektivní a bezpečné ventilování plic. Coanda efekt ovlivňuje distribuci vzduchu v plicích tím, že proud vzduchu preferuje určité cesty v dýchacím systému v závislosti na geometrii dýchacích cest a nastavení ventilátoru.

Coanda efekt je využíván při hodnocení, jak je vzduch distribuován v plicních lobech a segmentech. To je důležité pro diagnostiku a sledování různých plicních onemocnění, jako jsou obstrukční plicní onemocnění, zápal plic nebo plicní embolie. Znalost chování vzduchových toků v dýchacích cestách, pomáhá lékařům lépe interpretovat diagnostické testy, jako je spirometrie nebo plicní scintigrafie. [1] [2]

9.2 Metereologie

V meteorologii je Coanda efekt využíván k pochopení chování vzduchových mas při jejich interakci s povrchovými strukturami, jako jsou hory nebo velké budovy.

Když se vzduchové masy pohybují přes nerovný terén, jako jsou hory, jsou nuceny stoupat, otáčet se nebo se točit kolem překážek v důsledku Coanda efektu. To má za následek změnu větrných vzorců v určitých oblastech, což ovlivňuje lokální klima a počasí.

V urbanizovaných oblastech vysoké budovy a komplexní architektura mění proudění vzduchu v městském prostředí. To ovlivňuje místní klima a rozložení znečištění. Coanda efekt hraje roli v tom, jak vzduch obíhá a interaguje s těmito strukturami. [26]

10 Závěr

V této práci byly vypracovány a shrnuty poznatky o jevu zvaném Coanda efekt a jeho použití v technických zařízeních.

V první části práce byla uvedena krátká historie Coanda efektu. Bylo ukázáno jak si tohoto jevu rumunský inženýr a vynálezce Henri Coanda všiml a využil k ovlivnění toku. Následně bylo vysvětleno jak a za jakých okolností Coanda efekt vzniká a jaký má vliv v oblasti mechaniky tekutin. Ukázány byly specifické příklady, kdy má tento jev vliv na zakřivení proudu toku a jak se tento vliv projevuje. Bylo zajímavé zjistit, že mnoho příkladů demonstrace Coanda efektu, které lze najít ve spoustě publikací, jsou ve skutečnosti úplně jiný jev a s Coanda efektem toho mají pramálo společného. Proto byl v této části práce kladen důraz na specifické situace, kdy se Coanda efekt objeví, aby mohl čtenář tento jev lépe pochopit a vyhodnotit, zda se v daných situacích jedná o Coanda efekt či nikoliv.

Ve druhé části byly uvedeny příklady využití Coanda efektu v technických zařízeních a průmyslech. Bylo podrobně probráno aplikování tohoto jevu v letectví, především u poháněných klapek ať už foukaných či proudových. Bylo vysvětleno, jak Coanda efekt zvyšuje vztakovou sílu u zakřiveného povrchu, která je následně využita jak u leteckých vozidel, tak Coanda hořáků nebo ventilace či u lodních kormidel. V této části práce byla snaha přiblížit čtenáři praktické využití Coanda efektu a ukázání využití tohoto jevu v zařízeních používaných v běžném životě, jako například zmiňovaná ventilace či klapky komerčních letadel. V poslední kapitole byly zmíněny i příklady Coanda efektu v netechnických odvětvích, jako například vliv tohoto jevu v lidském těle nebo meteorologii.

V jedné z posledních kapitol je návrh vlastního technického zařízení na principu Coanda efektu. Jedná se o pneumatický separátor těžkých částic z alternativního paliva. To je v cementárnách dopravované pneumatickou dopravou do hořáku, kde je spalováno pro výrobu cementu. Požadavky pro takové zařízení jsou levná a jednoduchá výroba, malá ztráta tlaku v potrubí dopravy a efektivita odstraňování nežádoucích částic alespoň 50 %. V této kapitole bylo využito všech získaných znalostí o Coanda efektu a jejich aplikování na specifický problém ve výrobním průmyslu.

Z této práce je značně vidět, že pojem Coanda efekt je pro spoustu lidí neznámý, a to velkým neprávem. Tento jev je zásadní pro efektivní fungování mnoha moderních zařízení a průmyslů. To, jakým způsobem Coanda efekt ovlivňuje chování toku proudů v blízkosti zakřivených povrchů je významné nejen pro vědce a technické inženýry, ale i pro běžného člověka. Ten si ho na první pohled pravděpodobně nikdy nevšimne, ale bez jeho využití by společnost byla značně negativně ovlivněna. Coanda efekt je nadále zkoumán a testován inženýry po celém světě, kteří posouvají hranice využití tohoto jevu každým dnem dál. Ve spoustě odvětvích není potenciál tohoto jevu zcela využit, kvůli omezení našich současných technologií. I to je důvod sledovat vývoj a využití tohoto jevu do budoucna.

11 Seznam použitých zdrojů

- [1] Noor A., A. Coanda Effect: Flow Phenomenon and Applications, 1st ed.; Taylor & Francis Group, 2019. ISBN 9780429441240
- [2] Caroline, L. On Some Recent Applications of the Coanda Effect. *International Journal of Acoustics and Vibration*, Vol. 16, No. 3, 2011, 144–153.
- [3] Warzecha, J. The World's First Jet Engine Came From Romania. 3 Seas Europe. [online] <https://3seaseurope.com/henri-coanda-jet-engine-romania/>.
- [4] Winoto, H.; et al. Concave Surface Boundary Layer Flows in the Presence of Streamwise Vortices. *International Journal of Fluid Machinery and Systems* 2011, Vol. 4, No. 1, 33–46.
- [5] Cîrciu, I. Review Of Applications On Coandă Effect. History, Theories, New Trends. Aerospace Department, Polytechnic University of Bucharest, Romania, 2010.
- [6] Walter, J. Porovnání Experimentálního a Numerického Řešení Vývoje Mezní Vrstvy Na Leteckém Profilu. Diplomová práce, České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky, 2023.
- [7] Lank, K. High Lift Devices, 2015. Slide Player. [online] <https://slideplayer.com/slide/3853351/>.
- [8] Yaros F., S.; et al. Synergistic Airframe-Propulsion Interactions and Integrations. Aeronautics Technical Committee 1998,
- [9] Gainer G., T. Comparison Of Aerodynamic Theory And Experiment For Jet-Flap Wings. NASA Langley Research Center 1976, 103–118.
- [10] Colin, P. Advisory Group For Aerospace Research And Development; AGARD, 1971.
- [11] Hunting H.126. Wikipedia. [online] https://en.wikipedia.org/wiki/Hunting_H.126.
- [12] John Carver Meadows Frost. Wikipedia. [online] https://en.wikipedia.org/wiki/John_Carver_Meadows_Frost.
- [13] Desire Francine, F. Avrocar: a real flying saucer. Cornell University Library, 2015
- [14] In-Depth Exploration of NOTAR Technology in Helicopters, 2023. Fair Flights. [online] <https://www.fairlifts.com/helicopters/technology/in-depth-exploration-of-notar-technology-in-helicopters/>.
- [15] NOTAR. Wikipedia. [online] <https://en.wikipedia.org/wiki/NOTAR>.

- [16] About Aerodynamic Design of a Coanda Effect UAV, E-Health and Bioengineering Conference; Dinca, L.; et al., Ed.; 2019.
- [17] Coanda Effect Drone Propulsion. YouTube. [online] https://www.youtube.com/watch?v=Irp_vnmUWZ4&t=481s&ab_channel=TomStanton.
- [18] Desty, D. H. No Smoke with Fire. *Journal of Power and Energy* 1983, Vol. 197, No. 3, 159–170.
- [19] Flare Tip Design and Refurbishment. Argo Flares. [online] <https://argoflares.com/design-supply/flare-tips/>.
- [20] Carpenter, P. W. The Aeroacoustics And Aerodynamics Of High-Speed Coanda Devices, Part 2: Effects Of Modifications For Flow Control And Noise Reduction. *Journal of Sound and Vibration* 1997, Vol. 208, No. 5, 803–822.
- [21] Dae-Won, S.; et al. Performance analysis of a horn-type rudder implementing the Coanda effect. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 2017, Vol. 9, No. 2, 177–184.
- [22] Bong-Joon, P.; et al. An Experimental Evaluation of the Coanda Jet Applied High Efficient Rudder System for VLCC. *Journal of Ship and Ocean Technology* 2004, Vol. 8, No. 2, 1–12.
- [23] THE COANDA EFFECT. Karsons Consulting. [online] <http://www.karsonsconsulting.com/blog/31032021092604-the-coanda-effect/>.
- [24] Duct Dynasty: Understanding the Coanda Effect. Continental Industries. [online] <https://www.continentalindustries.com/DD-Coanda>.
- [25] Cementárny. Jak Třídít. [online] <https://www.jaktridit.cz/cz/odpady/nakladani-s-odpady/energeticke-vyuziti/cementarny/>
- [26] Giles, B. D. Fluidics, the Coanda Effect, and some orographic winds. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie* 1977, Vol. 25, 273–279.