



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

METODY PRO POTLAČENÍ KÁRMÁNOVÝCH VÍRŮ

METHODS FOR KÁRMÁN VORTICES SUPPRESSION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Kukrle

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Daniel Kukrle**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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 bakalářské práce:

Metody pro potlačení Kármánových vírů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kármánovy víry vznikají v úplavu za obtékaným tělesem (např. lopatka turbíny, komín, stožáry, mostovky, atd.), způsobují periodické změny rychlostního a tlakového pole a následně ovlivňují i dynamiku obtékaného tělesa (vznik vibrací). Z tohoto důvodu je studium Kármánových vírů, někdy označovaných jako Kármánova vírová stezka, a návrh metod pro jejich potlačení velmi důležité a má velké uplatnění ve všech systémech s proudícími tekutinami.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce bude mít dvě části. V první rešeršní části budou shromážděny informace týkající se vzniku, chování a metod pro výzkum Kármánových vírů a následně ilustrace některých technických objektů potýkajících se s existencí Kármánovy vírové stezky včetně popisu metod pro eliminaci vírových struktur. Ve druhé, experimentální části, bude úkolem návrh a provedení jednoduchého experimentu ukazujícího vznik Kármánovy vírové stezky a aplikaci metod pro její potlačení.

Seznam doporučené literatury:

ROSHKO, A. On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies [online]. In: . Washington: NACA, 7/1954, s. 29 [cit. 2019-09-21]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930083869.pdf>

Wind Effects on Buildings and Structures: Proceedings of the Jubileum Conference on Wind Effects and Structures. DAVENPORT, A.G. a J.D. RIERA. Vortex shedding from bluff bodies. 1. CRC Press, 1998, s. 61-95. ISBN 9054109599.

BEARMAN, P. a E. OBASAJU. An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders. Journal of Fluid Mechanics. 1982, 119, 297-321. DOI: 10.1017/S0022112082001360.

AUSSONI, P., M. FARHAT a F. AVELLAN. Hydrofoil roughness effects on von Kármán vortex shedding. In: Proceedings of the 2nd 2 IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems. Timisoara: Politehnica Timisoara, s. 1-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá Kármánovými víry a jejich potlačením. V teoretické části je popsán princip vzniku fenoménu a pojmy související s ním. Následuje kapitola pojednávající o výskytu a nebezpečnosti Kármánovy vírové stezky. Teoretická část je zakončena přehledem možných metod pro potlačení jevu. Experiment aplikuje vybrané metody potlačení a dokazuje jejich účinnost.

Klíčová slova

Kármánovy víry, metody potlačení, kmitání, mezní vrstva, Reynoldsovo číslo

ABSTRACT

This bachelory thesis is considering a Kármán vorticies and their suppression. The theoretical part describes principle of phenomenon origin and concepts connected with this topic. Following chapter deals with Kármán vortex street occurrence and danger. In the end of the first part there is an overview of phenomenon suppression methods. Experiment applies selected suppression methods and proves their effectiveness.

Key words

Kármán vorticies, suppression method, vibration, boundary layer, Reynolds number

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUKRLE, Daniel. *Metody pro potlačení Kármánových vírů*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125077>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Metody pro potlačení Kármánových vírů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce a také za jeho motivující nadšení do tématu.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Co jsou Kármánovy vírové stezky.....	12
1.1 Základní popis.....	12
1.2 Princip vzniku	12
1.3 Laminární a turbulentní proudění, nestabilita proudění.....	14
1.4 Reynoldsovo číslo	16
1.5 Strouhalovo číslo	16
1.6 Roshkovo číslo.....	17
1.7 Mezní vrstva, vířivost, víry	17
2 Kde se nachází	21
2.1 Příroda.....	21
2.2 Technika.....	22
3 Metody potlačení Kármánových vírů	26
3.1 Proudnicový tvar	27
3.2 Vínutá spirála	28
3.3 Dělicí deska.....	28
3.4 Dělicí deska s porézním válcovým pláštěm.....	28
4 Experiment.....	30
4.1 Návrh aparatury	30
4.2 Vybrané metody pro potlačení vírů	31
4.2.1 Válec.....	31
4.2.2 Dělicí deska	32
4.2.3 Proudnicový Y-profil	32
4.2.4 Proudnicový U-profil	33
4.2.5 Vroubkovaný válec	33
4.2.6 Spirála.....	33
4.3 Průběh a vyhodnocení experimentu	34
ZÁVĚR.....	35
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	36
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	40
SEZNAM PŘÍLOH	41

ÚVOD

Víry jsou všude kolem nás, přitom je ale málokdy považujeme za úkaz zasluhující větší pozornost. Při míchání kávy, vypouštění vody z umyvadla, všude kolem nás v proudícím vzduchu a v nespočtu dalších případech se setkáváme s víry nejrůznějších velikostí, tvarů a uskupení. I něco tak malého a „neviditelného“ nás může ale významně ovlivnit, nebo dokonce ohrozit. Jako život ohrožující vír nás může na prvním místě napadnout tornádo, které je bezpochyby velmi nebezpečné, vír úctyhodných rozměrů budící respekt. Nebezpečí ale číhá i v menším měřítku. Kármánovy víry jsou toho příkladným důkazem, i když na první pohled nejspíš respekt nevzbuzují. V extrémních situacích však i nevinně vyhlížející střídavě odtrhávané víry mohou způsobit katastrofu. Tento zajímavý jev je naštěstí dostatečně prozkoumán a můžeme mu předcházet již při návrhu kritických prvků.

Práce se zabývá Metodami pro potlačení Kármánových vírů. První část řešerše pojednává o popisu principu vzniku jevu a pojmů s tím spojených. V druhé části jsou popsány známé metody pro potlačení jevu. Následuje jednoduchý experiment, kdy byly nejprve na modelovém tělese vytvořeny Kármánovy víry. Poté bylo kmitání tělesa potlačeno pomocí několika vybraných metod a byla tak demonstrována jejich účinnost.

1 Co jsou Kármánovy vírové stezky

1.1 Základní popis

V problematice proudění tekutin je významným faktorem samobuzené kmitání obtékaného tělesa. Samobuzené kmitání na rozdíl od vynuceného kmitání nepotřebuje žádné vnější silové působení ke vzniku a udržení se, potřebná síla vzniká v průběhu kmitání. Přiblíží-li se pak frekvence kmitání vlastní frekvenci obtékaného kmitajícího tělesa, dochází k rezonanci (součet kmitání) a amplituda výchylky se výrazně zvětší. Při nedostatečném tlumení systému nebo nedostatečné tuhosti systému pak hrozí jeho zničení. Po zániku kmitání zaniká i budící síla. [2] Kmitání potřebuje zdroj energie, jelikož samo energii spotřebovává. V případě, že kolem tělesa proudí médium, je právě proudící tekutina zdrojem potřebné energie. Existuje-li zdroj energie pro kmitání, pak schopnost samobuzeně kmitat záleží už jen na dynamické individualitě tělesa, tj. vlastních tvarech, vlastních kmitočtech a tlumení systému. [1]

Následující práce uvažuje jednoduché těleso kruhového průřezu obtékané tekutinou. Za specifických podmínek (viz. kapitola Reynoldsovo číslo) se těleso při působení proudu tekutiny o stálé síle rozkmitá ve směru kolmém na směr toku. Jak je možné, že těleso začne konat takto nepředpokládaný pohyb? Odpověď se nabízí po detailnějším prozkoumání úplavu za tělesem. Zjednodušeně řečeno jsou kmity způsobené periodicky odtrhávanými víry za tělesem – Kármánovými víry.

Střídavé odtrhávání vírů za tělesem má za následek pokles tlaku na stranách tělesa. To má přirozenou tendenci se pohybovat do oblasti nižšího tlaku a může začít lehce kmitat. Zda-li vůbec a jak záleží především na materiálové charakteristice a konstrukci tělesa. Při pokračování průběhu jevu se může stát, že se frekvence odtrhávání vírů, a tedy střídavého poklesu tlaku po stranách tělesa, přiblíží, nebo dokonce ztotožní s vlastní frekvencí obtékaného tělesa. Rezonancí je poté vyvolán počáteční pohyb tělesa a jakmile má těleso minimální pohyb, ke slovu se dostává i samobuzené kmitání a budící síla vzniká v průběhu kmitání. [1] V závislosti na tuhosti a tlumení systému pak na tělese může dojít k omezenému růstu kmitání nebo při nedostatečném tlumení k neomezenému růstu kmitání. Varianta neomezeného růstu kmitání je již na první pohled nebezpečná, pokud neodstraníme zdroj energie kmitání, těleso dospěje ve většině případů ke zničení. U tělesa s omezeným růstem kmitání je důležité dát si pozor na únavové poškození součástí.

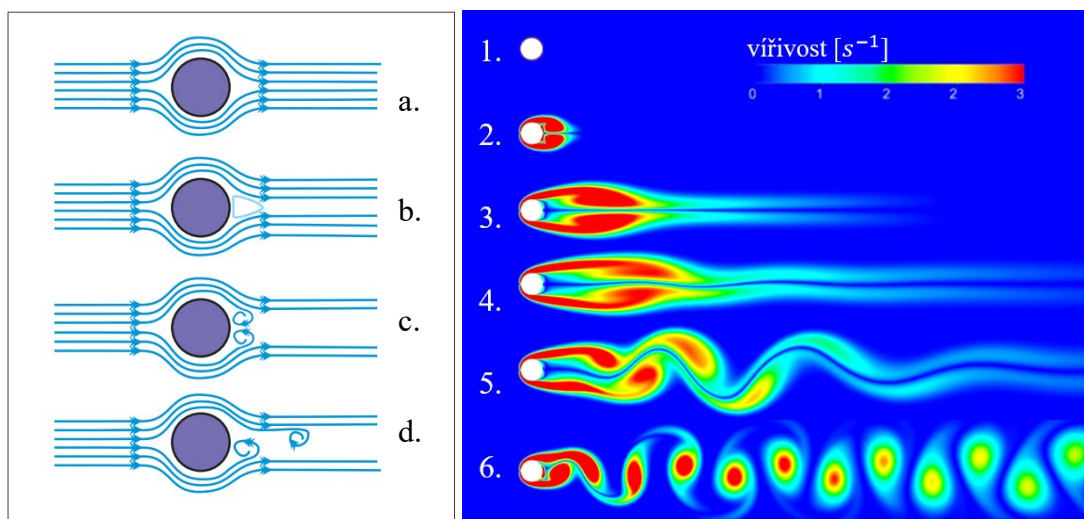
Ve shrnutí jsou Kármánovy víry periodicky se střídající víry vznikající po stranách tělesa umístěného v proudícím médiu. Mohou způsobovat rozkmitání tělesa ve směru kolmém na směr rychlosti proudění. Tento jev je nebezpečný zejména v případě, že dojde ke ztotožnění frekvencí odtrhávání vírů a vlastní frekvenci obtékaného tělesa. Nastává rezonance a následně samobuzené kmitání tělesa.

1.2 Princip vzniku

Jak je uvedeno v předchozí kapitole, Kármánova vírová stezka vzniká za tělesy umístěných do proudu tekutiny. Jako počáteční podmínky vzniku bychom mohli uvést proudící médium směřující kolmo na těleso a Reynoldsovo číslo v potřebném rozmezí. Nejprve bude popsán vliv Reynoldsova čísla na tvorbu vírů za obtékaným tělesem, v druhé části kapitoly pak princip odrtžení mezní vrstvy a tvorbu víru.

K docílení vzniku Kármánovy vírové stezky projde nejprve experiment 4 fázemi, zobrazené na Obr. 1.1 vlevo. Těleso je ponořené do laminárního proudu. V případě aparatury s neměnným médiem a tělesem je jedinou proměnnou rychlost toku. Reynoldsovo číslo je funkce závislá na rychlosti toku, změnu rychlosti tedy v dalším popisu zastupuje změna Reynoldsova čísla (Re), viz. kapitola Reynoldsovo číslo.

Při velmi nízké rychlosti toku ($Re < 4$) proudnice laminárního proudění okopírují tvar tělesa a v úplavu je pozorováno opět laminární proudění bez turbulencí (Obr. 1.1a vlevo). Zvýší-li se rychlost proudění k mezní hodnotě ($Re = 4$), tekutina má již tendenci v důsledku setvračnosti směřovat dopředu za obtékané těleso, ne jej přesně kopírovat, za válcem tak vzniká malá oblast s nižším tlakem (Obr. 1.1b vlevo). Při dalším zvyšování rychlosti ($4 < Re < 40$) je pozorován vznik oblát nižšího tlaku s nestabilním prouděním v úplavu těsně za tělesem. Kapsa s nižším tlakem se neodtrhává, ale uvnitř se mění tlak a utváří se dva stálé víry, rotující proti sobě, symetricky po obou stranách tělesa (Obr. 1.1c vlevo). Tyto víry zůstávají přimknuté za válcem a nemají tendenci se odtrhávat. V průběhu intervalu ($4 < Re < 40$) se s rostoucím Re prodlužují, ale neoddelují. Ve chvíli překročení mezní hodnoty ($40 < Re$) začínají být víry pomalu střídavě unášeny hlavním proudem. Oba víry se drží přimknuté za tělesem dokud se rychlost toku nedostane ke kritické hodnotě ($Re = 80$), poté se jeden vír definitivně odtrhne od tělesa a dá tak možnost druhému víru narůst. Ten je po dosažení určité velikosti opět stržený hlavním proudem a tím uvolní místo pro vytvoření víru od druhé strany tělesa (Obr. 1.1d vlevo). V rozmezí přibližně ($80 < Re < 2400$), proudění laminárního, se vytváří stabilní Kármánova vírová stezka. Při vyšších hodnotách Re ($2400 < Re < 300\,000$) je za tělesem stále pozorována Kármánova vírová stezka, avšak s rozdílem, že režim proudění se změní na turbulentní. S rostoucí vzdáleností od obtékaného tělesa víry ztrácí svoji energii a zanikají. Kármánova vírová stezka vzniká i po přechodu do turbulentního režimu proudění až do vysokých Reynoldsových čísel ($Re = 300\,000$). S dalším zvyšováním Re se ztácí Kármánova stezka a úplav za tělesem vzniká chaotický turbulentní úplav. [4,5,7]



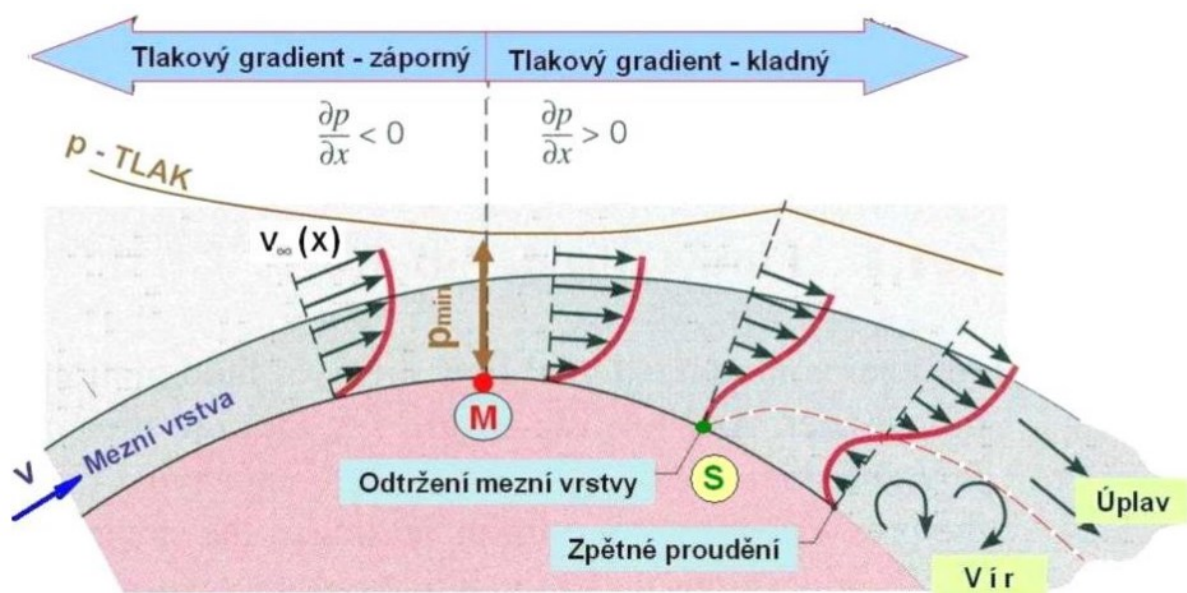
Obr. 1.1 Vznik Kármánovy vírové stezky – **vlevo** obecně [16]; **vpravo** CFD simulace ($Re = 140$) [6]

Tab. 1.1 Popis vlivu Reynoldsova čísla na tvorbu vírů za obtékaným tělesem, viz Obr. 1.1 **vpravo** [4,5]

1.	2.	3.	4.	5.	6.
$Re < 4$	$4 \leq Re$	$4 < Re < 40$	$Re \approx 40$	$40 < Re < 80$	$80 < Re < 300\,000$

Nyní k popisu samotného tvoření víru za tělesem a problematiku mezní vrstvy. Celý princip je zobrazen na Obr. 1.2. Vznik Kármánovy vírové stezky je přímý následek odtržení mezní vrstvy za obtékaným tělesem. Ponořené těleso určité tloušťky v proudícím médiu nutí tekutinu téct kolem jeho průřezu po proudnicích kopírujících zmíněný průřez, tato skutečnost je vyobrazena na Obr. 1.1 vlevo. Obtékání náběžné hrany tělesa způsobí zrychlení toku,

kteří tímto zajistí vyrovnaní dostředivých sil vytvářených zakřivenými proudnicemi. Souvislost mezi tlakem a rychlostí závisí na změně tření v proudícím médiu. V oblasti klesajícího tlaku, úsek je nazýván konfuzorní a je v něm záporný tlakový gradient, se snižují třecí síly a to umožní nárůst rychlosti. To platí až do bodu M, kde je předpokládán nejnižší tlak, a tudíž se v něm tlakový gradient mění na kladný. Tlak se začíná zvyšovat, což způsobuje nárůst tření mezi částicemi v médiu (mezi jednotlivými vrstvami proudění pohybujícími se různou rychlostí) a snižování rychlosti proudění. Úsek s kladným tlakovým gradientem je nazýván difuzorní. Rychlost se snižuje až do bodu S, kde se u povrchu tělesa částice zastaví a následně tu dojde k odtržení mezní vrstvy (viz. kapitola 1.7 Mezní vrstva, vířivost, víry). Za zmínku stojí charakteristický rychlostní profil pro odtržení. Bude-li proudění pozorováno dál ve směru toku, z rychlostního profilu je jasně vidět změna směru proudění, tzv. zpětné proudění. Nad mezní vrstvou, v dostatečné vzdálenosti od ní, se v tuto chvíli nalézá laminární proudění. V mezní vrstvě je proudění zpomalováno působením narůstajících třecích sil a pod mezní vrstvou se proudění mění na turbulentní. Zpětné proudění vyváří víry, jejichž další pohyb mapuje předchozí část kapitoly popisující tvorbu vírů za obtékaným tělesem. [5,7,8]



Obr. 1.2 Princip odtržení mezní vrstvy [11]

1.3 Laminární a turbulentní proudění, nestabilita proudění

Typ proudění je určován bezrozměrným Reynoldsovým číslem (viz. kapitola Reynoldsovo číslo). Přesná hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním není přesně stanovena, jelikož se mezi nimi nachází ještě tzv. přechodová část. Uváděná kritická hodnota, podle níž je rozděleno proudění v úzkých trubicích je přibližně $Re = 2300$. Jako laminární proudění pak jsou označovány všechny proudění s $Re < 2300$. Turbulentní proudění jsou tedy všechny, pro které platí $Re > 4000$. Oblast $2300 < Re < 4000$ se nazývá přechodová oblast, viz. kapitola 1.7 Mezní vrstva. [9]

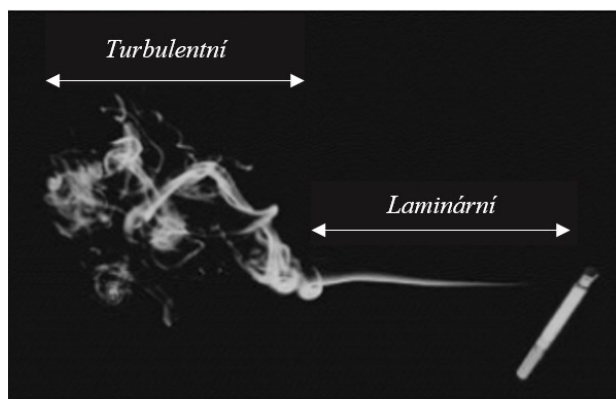
Laminárním prouděním se označuje pohyb tekutiny v soustavě rovnoběžných vrstev (rovnoběžné proudnice), které se vůči sobě navzájem posouvají. Makroskopické částice pohybující se v jednotlivých vrstvách se mezi vrstvami nepromíchávají, přechází mezi nimi jen molekuly. Ve volném prostoru dostatečně vzdáleném od stěny trubice, v níž médium proudí, mají vrstvy stejnou rychlost. Proudí-li ale médium úzkou trubicí, proudění je ovlivňováno stěnami a rychlost jednotlivých vrstev se liší. Rychlostní profil nabývá přibližného tvaru

paraboly a maximum je v ose trubice (Obr. 1.3 vlevo). Laminární proudění je typické pro toky s nízkou rychlostí a pro proudění v úzkých trubicích. Tento jev způsobuje mezní vrstva, viz. kapitola Mezní vrstva, vířivost, víry. [4,9,12]

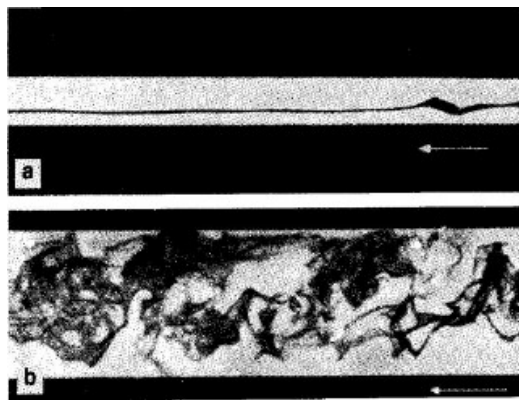


Obr. 1.3 Laminární proudění v trubici **vlevo**; turbulentní proudění v trubici **vpravo** [12]

V případě turbulentního proudění makroskopické částice přechází mezi jednotlivými vrstvami (díky malým vírům vytvářejících se ve vrstvách), dochází tak k promíchávání vrstev. Částice nevykonávají jen translační pohyb, ale i složitý pohyb, kterým jsou pak utvářeny víry. Rychlost částic se neustále mění, z tohoto důvodu se proudění nazývá nestacionární. Turbulentní proudění v úzké trubici zjednodušeně zobrazuje Obr. 1.3 vpravo. Skutečnou podobu obou režimů proudění v trubici můžeme vidět na Obr. 1.5.



Obr. 1.4 Laminární a turbulentní proudění kouře ve volném prostoru [10]



Obr. 1.5 **a)** Laminární proudění v trubici
b) Turbulentní proudění v trubici [10]

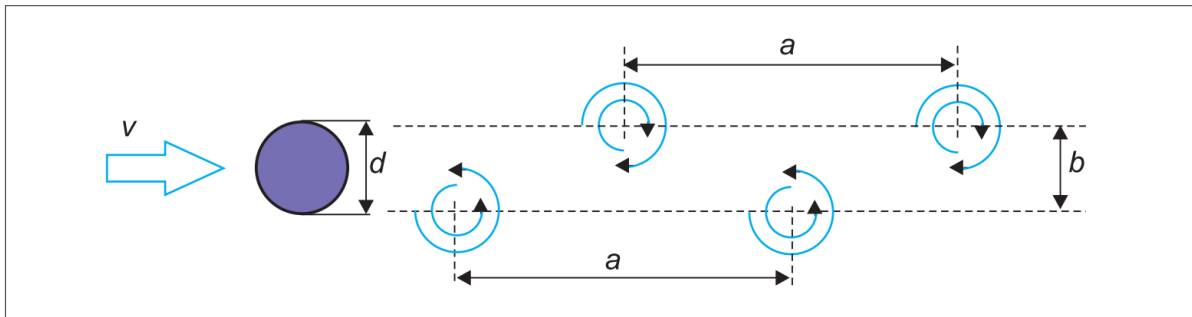
Významným jevem v oblasti proudění je vznik a vývoj nestabilit proudění. Nestabilita proudění je chápána jako nějaký nástroj pro vyrovnání se s celkovými silami působícími v proudícím médiu. Mezi síly způsobující nestabilitu se řadí hlavně setrvačná, dostředivá, gravitační, vztlaková, elektromagnetická síla, sílu od Coriolisova zrychlení a další. Stabilní proudění se působením sil stane nestabilním a po určité době může opět dojít ke stabilizaci proudění. Nic nevylučuje ale nové působení sil a opětovná změna systému v nestabilní. Souběžně se vznikem nestability vznikají i určité vírové struktury. [5]

Za určitých podmínek, vyjádřených Reynoldsovým číslem, se z laminárního proudění stává nestabilní a dochází k přeměně režimu proudění na turbulentní. Fáze mezi těmito dvěma typy proudění se nazývá přechodový režim proudění. V něm se často vyskytují zajímavé vírové struktury, např. turbulentní skvrna nebo vlásečnicové víry. Největší podíl na přeměně mají zejména setrvačné síly. [4]

Kármánova vírová stezka je jedním z příkladů jevů vzniklých nestabilitou proudění. Jak bylo již výše uvedeno, nestabilní proudění se může stát opět stabilním po uplynutí dostatečně dlouhé doby. Další možnost ustálení proudění je periodicky se opakující nestabilní, tzv. nestacionární proudění. Příkladem nestacionárního periodického proudění je právě

Kármánova vírová stezka. Tento jev je charakteristický svým periodickým střídavým vznikem vírů za obtékaným tělesem.

Aby byla Kármánova vírová stezka stabilně udržitelná, existuje podmínka přesného poměru mezi vzdálenostmi mezi víry v jedné řadě vírů a vzdáleností mezi dvěma řadami vírů vznikajících od protilehlých stran tělesa. Je-li poměr $b/a = 0.28$, velikosti a a b vidíme pro znázornění na Obr. 1.6, pak se jedná o stabilní Kármánovu vírovou stezku. Všechny ostatní uspořádání se ukázaly být nestabilní. [5]



Obr. 1.6 Určující rozměry Kármánova víru (a = délka mezi víry v jedné řadě vírů, b = vzdálenost mezi dvěma řadami vírů vznikajících od protilehlých stran tělesa) [3]

1.4 Reynoldsovo číslo

Patří do skupiny podobnostních čísel. Podobnostní čísla jsou bezrozměrné vzájemné vztahy dávající do poměru různé fyzikální veličiny. Pomocí nich je možné porovnávat systémy mezi sebou i přes různé fyzikální vlastnosti. Podobnostní čísla jsou využívány zejména právě v mechanice tekutin. [13]

Reynoldsovo číslo je definováno vztahem

$$Re = \frac{v \times L}{\nu} \quad [-] \quad (1.1)$$

kde v je střední rychlost proudícího média, L je charakteristický rozměr (v našem případě kruhového průřezu je to průměr) a ν je součinitel kinematické viskozity proudícího média. [8]

V poměru Reynoldsova čísla jsou síly setrvačné a síly třecí. Při laminárním proudění působí třecí síly s větším vlivem než při proudění turbulentním, protože turbulentní proudění nastává při vyšších rychlostech a tudíž v něm působí větší setrvačné síly a třecí síly již nemají tak významný vliv.

Kritické Reynoldsovo číslo je definováno třemi skutečnostmi – stavem povrchu obtékaného tělesa, stupni turbulence vnějšího proudu a rychlostním gradientem. Kritická hodnota Reynoldsova čísla definuje hranici kdy se laminární režim proudění stává nestabilním a objevují se drobné turbulence. Jeho hodnota je závislá na konkrétní aplikaci. [8] Například pro proudění v potrubí se udává hodnota $Re = 2320$. Proudění vyskytující se při Reynoldsově číslu $Re < 2320$ je pro tento konkrétní případ vždy laminární. V rozmezí $Re = 2320$ až přibližně $Re = 4000$ se jedná o přechodovou fázi, po ní je proudění již plně turbulentní. [46]

1.5 Strouhalovo číslo

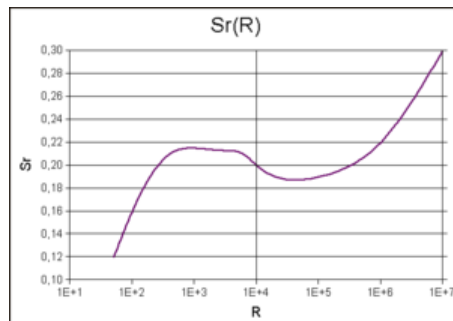
Strouhalovo číslo je další z podobnostních čísel, vztah pro jeho výpočet:

$$Sh = \frac{f \times L}{v} \quad [-] \quad (1.2)$$

kde f je frekvence odtrhávání vírů za obtékáním tělesem, L je charakteristický rozměr tělesa a v je střední rychlost proudícího média. [3]

Strouhalovo číslo vychází z poměru hybnostní a setrvačné síly a popisuje frekvenci vzniku vírů střídavě na protilehlých stranách obtékaného tělesa tekutinou. Frekvence vzniku vírů je klíčová veličina při kontrole bezpečnosti systému. O problematice vlastní frekvence obtékaného tělesa a rezonance pojednává kapitola 1.1 Základní popis.

V nízkých Reynoldsových číslech $Re < 800$ vykazuje Strouhalovo číslo lineární závislost k Re . Pro velký interval rychlostí (přibližně $800 < Re < 200\,000$) a velký rozsah tvarů těles se dá Strouhalovo číslo považovat za konstantní $Sh = 0.2$, viz. Obr. 1.7. [14]



Obr. 1.7 Přibližná závislost Strouhalova čísla na Reynoldsově čísle pro dlouhé válcové těleso[4]

1.6 Roshkovo číslo

Roshkovo číslo je bezrozměrné číslo popisující kmitající mechanismy v proudění, umožňuje určit frekvenci ze známé rychlosti proudění. Roshkova rovnice platí pouze pro omezený rozsah Reynoldsových čísel $50 \leq Re \leq 2000$. [15]

Pro rozsah $50 \leq Re < 200$ platí rovnice

$$Ro = 0.212 \times Re - 4.5 \quad [-] \quad (1.3)$$

Pro rozsah $200 \leq Re < 2000$ platí rovnice

$$Ro = 0.212 \times Re - 2.7 \quad [-] \quad (1.4)$$

Roshkova rovnice pro výpočet frekvence má tvar

$$Ro = Sh \times Re = \frac{f \times L^2}{\nu} \quad [-] \quad (1.5)$$

kde f je frekvence kmitání tělesa, L je charakteristický rozměr tělesa a ν je kinematická viskozita.

1.7 Mezní vrstva, vířivost, víry

Reálné tekutiny jsou mimo jiné charakterizovány vlastností zvanou viskozita, tj. míra tekutosti. Na viskozitě závisí třecí síly působící v pohybuující se tekutině a právě v důsledku třecích sil vzniká u povrchu tělesa oblast zvaná mezní vrstva.

Než proudění začne obtékat těleso, má ve všech bodech průřezu kolmého na směr toku stejnou rychlost, vliv turbulencí v turbulentním proudění není pro zjednodušení popisu uvažován. V momentě, kdy tekutina dosáhne náběhové hrany tělesa, proud začne kopírovat jeho tvar. Těleso má oproti tekutině nulovou rychlost a právě vlivem viskozity je tenká vrstva

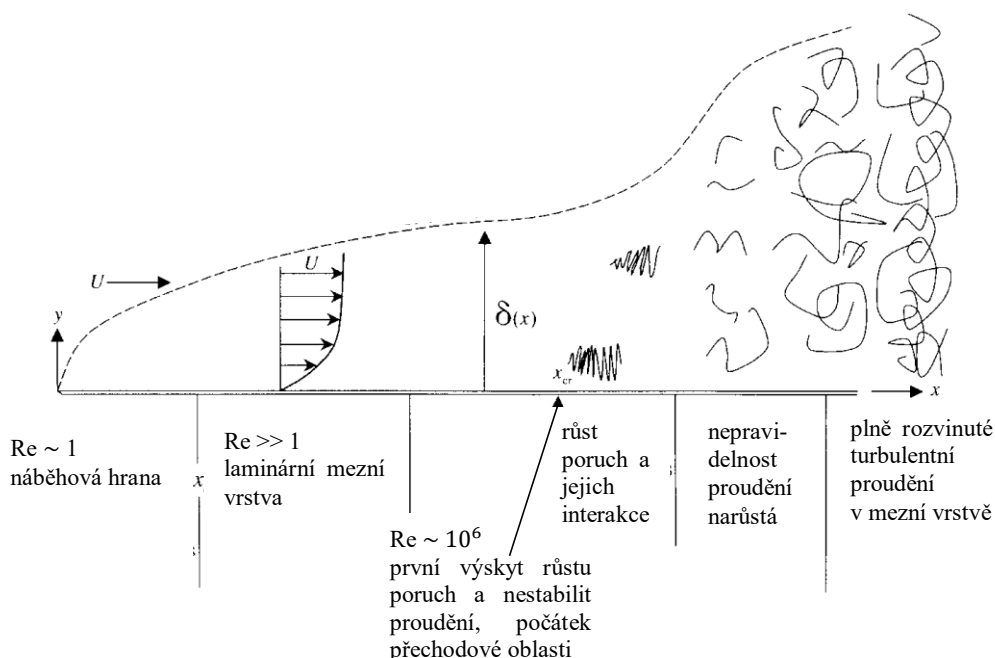
tekutiny nejbližší jeho povrchu zpomalena a v těsné blízkosti u povrchu zcela zastaví. S nárůstem vzdálenosti od obtékaného tělesa se rychlost tekutiny vyrovnává s rychlostí volného proudu tělesem neovlivněným. Aby nemusel být vliv třecích sil uvažován v celém průřezu proudu, čím by se úvahy nad prouděním a výpočetní úkony značně prodloužily a ztížily, je proudění kolem tělesa rozlišeno do dvou oblastí.

V blízkosti stěny existuje tenká vrstva, kde se rychlost mezi jednotlivými sousedícími vrstvami výrazně mění (rozdíl rychlostí je větší než 1% [10]), rychlostní gradient dosahuje vysokých hodnot a vliv třecích sil je nezanedbatelný. Tato oblast se nazývá mezní vrstva. Druhá oblast nacházející se dál od stěny, za mezní vrstvou, nemá rychlostní gradient tak velký a vliv viskozity je zde pro většinu řešených problémů zanedbatelný. [8] Hranice mezi těmito dvěma oblastmi není přesně určena. [10]

Proudění v mezní vrstvě je rozlišitelné na tři druhy:

- laminární
- přechodové
- turbulentní

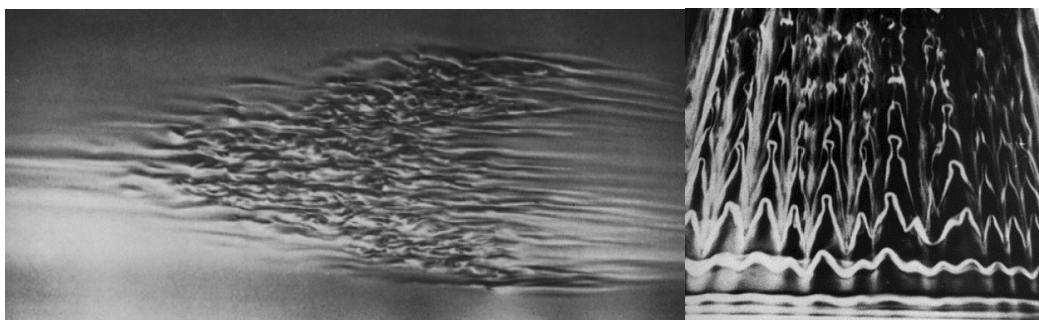
Laminární proudění znamená pochopení pohybu tekutiny jako pohyb soustavy rovnoběžných vrstev, makroskopické částice se nepohybují mezi jednotlivými vrstvami, neovlivňují je. V turbulentní proudění vlivem vyšší vířivosti makroskopické částice přecházejí mezi jednotlivými vrstvami a mají tak tak vliv na jejich chování. Pohyb již není jednoznačný a lehce předvídatelný, viz. kapitola 1.3 Laminární a turbulentní proudění, nestabilita proudění. Oblasti přechodu mezi laminární a turbulentní mezní vrstvou říkáme přechodová oblast. [8]



Obr. 1.8 Popis přechodu mezi laminární a turbulentní mezní vrstvou [5]

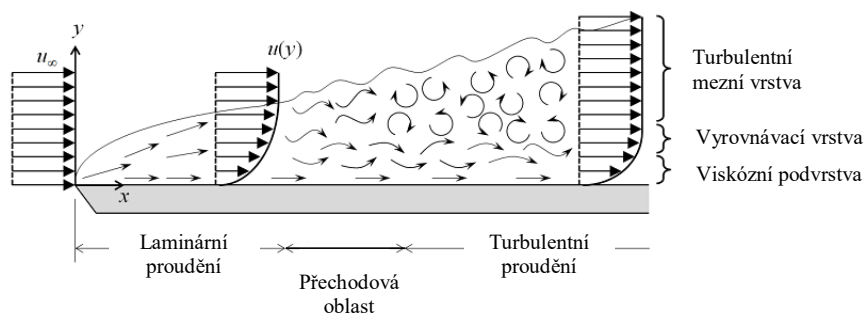
Laminární proudění přichází do kontaktu s náběžnou hranou. Tlakový gradient je zde největší, jelikož proudění zde výrazně sníží svoji rychlost. S narůstající rychlostí (a záporným tlakovým gradientem) začne obtékat kolem tělesa. Na Obr. 1.8 je obtékané těleso plochá deska, v případě tělesa s kruhovým průřezem je princip chování mezní vrstvy stejný. Se zvyšující se rychlostí roste i Re. Jsou-li podmínky (tj. rychlost proudění, viskozita a tvar obtékaného

tělesa) takové, že se Re při obtékání tělesa nepřiblíží ke kritické hodnotě Re_{krit} (pro ploché těleso $Re_{krit} \sim 10^6$), pak se od tělesa v bodě odtržení odtrhne mezní vrstva s laminárním režimem proudění. Těleso také může být obtékáno, aniž by se mezní vrstva odtrhnula. Takový případ je ale podmíněn okrajovými podmínkami (příliš nízká rychlost proudění, velmi malý charakteristický rozměr nebo naopak vysoká viskozita), které nemají praktickou využitelnost. V opačném případě Re dosáhne kritické hodnoty, přesáhne ji a proudění se dostává do tzv. přechodného režimu, kde laminární proudění ztrácí stabilitu a mění se z laminárního na turbulentní. V nestabilním laminárním proudění vznikají zajímavé úkazy, které mohou být chápány jako počátek vzniku turbulentního proudění, viz. Obr. 1.9. Výskyt poruch laminárního proudění roste dokud se režim proudění nezmění na turbulentní. V místě odtržení je pak proudění v mezní vrstvě charakteru turbulentního. [5]



Obr. 1.9 Důsledky nestability laminárního proudění, **vlevo**: turbulentní skvrna [4], **vpravo**: vlásečnicové víry [19]

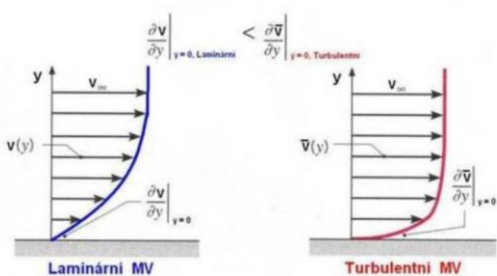
Mezní vrstva s turbulentním prouděním je rozlišitelná ještě na další části, viz. Obr. 1.10. V těsné blízkosti stěny je velmi tenká viskózní podvrstva. Zpočátku byla označovaná jako laminární, jelikož proudění v ní je laminární. Po bližším zkoumání ale byla zjištěna přítomnost nezanedbatelného kolísání, a pojmenování laminární podvrstva tak již nebylo správné. Charakter změny rychlosti je zde lineární. Naopak nejdále v mezní vrstvě se nachází turbulentní oblast. Ta je v kontaktu s vnější vrstvou, mezi nimi je pomyslná hranice mezní vrstvy. Rychlost v ní má logaritmický průběh. Oblast, kde viskózní podvrstva přechází do turbulentní oblasti, je pojmenována vyrovnávací vrstva a charakter změny rychlosti není lineární ani logaritmický. [5]



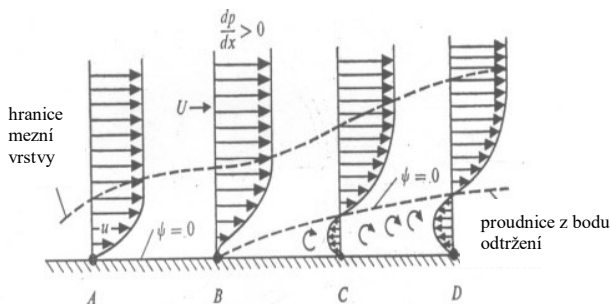
Obr. 1.10 Turbulentní mezní vrstva a viskózní podvrstva [20]

Velmi důležitou roli hraje při odtržení mezní vrstvy skutečnost, v jakém režimu bylo proudění v místě odtržení. Rozdíl se nalézá v rychlostním profilu v blízkosti obtékané stěny, kde je z Obr. 1.11 patrný rozdílný nárůst rychlosti v závislosti na vzdálenosti od stěny. V případě laminárního proudění je rychlostní gradient menší, protože změnu rychlosti

jednotlivých vrstev způsobují jen třecí síly na okrajích těchto vrstev. Vrstvy v turbulentním režimu jsou narušeny od toho ovlivňovány (urychlovány) ještě makroskopickými částicemi, přecházejícími mezi jednotlivými vrstvami v důsledku turbulencí, a tedy je nárůst rychlosti výraznější.



Obr. 1.11 Rychlostní profily laminárního a turbulentního režimu proudění u stěny [8]



Obr. 1.12 Održení mezní vrstvy [18]

Održení mezní vrstvy nastává v momentě, kdy se v oblasti zvyšujícího se tlaku zvyšují i třecí síly v tekutině a zároveň klesá rychlost proudění. V určitém okamžiku je rychlost natolik nízká, že se na hranici mezi stěnou a tekutinou objeví inflexní bod křivky a pokračuje dál směrem od stěny. V důsledku toho se vytvoří křivka popisující pohyb inflexního bodu dále po proudu, která vyznačuje hranici odtržené mezní vrstvy. V tomto okamžiku se pod hranicí odtržené mezní vrstvy mění profil rychlosti proudění a vzniká zpětné proudění, viz. Obr. 1.12.[18] Nachází-li se proudění v mezní vrstvě v režimu laminárním, odtrhne se podstatně dříve (82°, platí pro kruhový průřez), než kdyby bylo v režimu turbulentním (odtržení ve 125°, platí pro kruhový průřez). Za pozdější odtržení turbulentní mezní vrstvy jsou zodpovědné fluktuace turbulentního proudění, které přitlačují proudění k obtékanému tělesu. Mezní vrstva má tedy více energie a turbulence v ní způsobují větší tlakový gradient, který mezní vrstvu dokáže déle udržet u stěny obtékaného tělesa. Ve výsledku se turbulentní mezní vrstva odtrhne později, úplav je užší a tlakový odpor vznikající z podtlaku za tělesem je nižší. [18]

Vířivost je vektorové pole, které lokálně popisuje okamžitou rotaci, jinak řečeno změnu směru, určité oblasti tekutiny. Své uplatnění má v dynamice tekutin, kde její význam můžeme přirovnat k pojmu úhlové rychlosti v oboru mechaniky pevných těles. [17] Pole vířivosti je vektorové pole, jehož jednotlivé vektory jsou určeny jako tečny k proudnicím, určující tak okamžitou změnu směru proudění. [5]

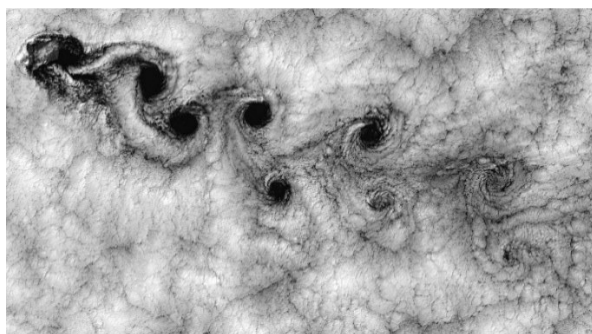
Víry jsou hlavní součástí turbulentního proudění. Pojem vír je v dynamice tekutin označení oblasti proudu tekutiny, která se otáčí okolo přímé nebo zakřivené osy. Pro stacionární vír je typická proudnice kruh, jehož středem prochází osa víru. Měřítka k popisu vírů je výše zmíněná vířivost, která popisuje rozložení rychlosti kolem osy víru. Ve většině případů je nejvyšší rychlost těsně u osy rotace a se vzdáleností od osy rychlost klesá. S tím souvisí rozložení tlaku, kdy ve středu víru je tlak nejnižší. Ve všech případech je osa víru uzavřenou smyčkou nebo vír začíná nebo končí na hranici tekutiny. To neplatí jen v okamžiku tvoření nebo zániku víru v neustáleném toku. [48]

2 Kde se nachází

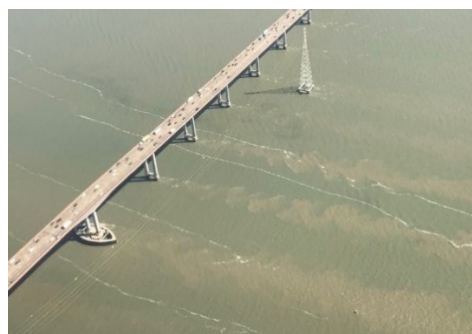
Fenomén Kármánova vírová stezka se přirozeně vyskytuje ve volné přírodě. S příchodem technického pokroku si jej lidé začali více všimát a následně se tento fenomén snažili zkrátit. Ať už z důvodu cíleného odstranění nechtěného výskytu úkazu nebo naopak, v méně případech, vyvolat tento jev.

2.1 Příroda

Mezi nejpozorovanější úkazy ve volné přírodě patří stezky vytvořené např. ve vodě za předměty v proudu řeky (Obr. 2.2), ve vzduchu zviditelněné oblaky pohybujících se kolem skal, hor, nebo úkazy vznikající kolem ostrovů zviditelněné vrstvou přízemních mraků (Obr. 2.1).



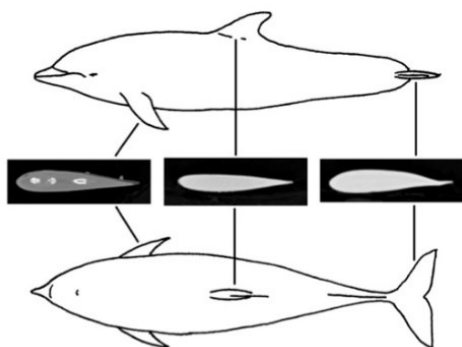
Obr. 2.1 Vírová stezka nad pobřeží Chile [22]



Obr. 2.2 Vírová stezka vzniklá za mostovými pilíři [23]

V říši zvířat se nejčastěji s Kármánovou vírovou stezkou setkávají ptáci a ryby. Noční můry a motýli zabraňují vzniku turbulencí pomalým máváním křídel, vydávají tak jen téměř neslyšitelný infrazvuk. Ptáci se s turbulencemi potýkat musí, protože nejsou schopni snížit frekvenci mávání křídel. Alespoň se snaží co nejvíce snížit víření a tím energetické ztráty při pohybu ve vzduchu. Z toho důvodu mají na koncích křídel silná obrysová pera, která velké víry narušují a přetváří na menší. Sovy, které mají obrysovými pery lemovanou hlavu, se díky tomuto evolučnímu přizpůsobení noci pohybují téměř neslyšně. [21]

Z ryb je příkladným zástupcem delfín, podle jehož profilu ploutve (Obr. 2.3) byl na konci 18. století inspirován jeden z prvních návrhů křídla letadla. Pro co nejhladší pohyb ve vodě má delfín uzpůsobený tvar těla a ploutví tak, že za ním vznikají minimální turbulence. Největší tloušťka profilu se nachází přibližně ve 45 % délky, tím se oddaluje bod odtržení mezní vrstvy a minimalizuje se odpor. V polovině 20. století byl tento tvar inspirací také pro tvar moderních lodí a ponorek (Obr. 2.4). [18]



Obr. 2.3 Proudnicový tvar trupu a ploutví delfína [18]



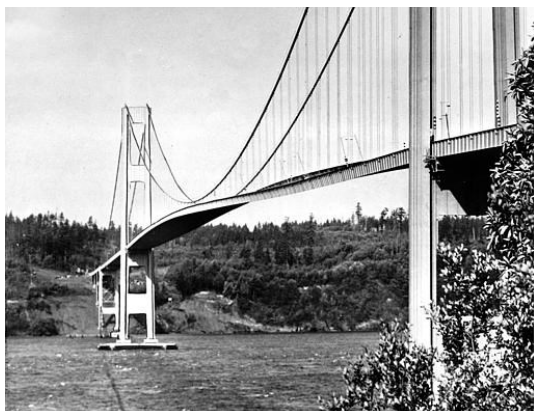
Obr. 2.4 Ponorka USS Albacore inspirovaná delfínem [18]

2.2 Technika

S postupným pokrokem a vývojem techniky se Kármánovy vírové stezky začaly projevovat i v této oblasti. Stačilo k tomu splnit počáteční podmínky, které platí i pro výskyt v přírodě. Vhodná rychlost proudění, viskozita tekutiny a odpovídající průřez tělesa zapříčinili vznik fenoménu v oblasti techniky, dostávající se do kontaktu s prouděním.

Mezi méně významné projevy patří neustálé bzučení napnutých lan a drátů při sebemenším proudění vzduchu. Dále pak například plápolání vlajek ve větru v typickém vlnicím se tvaru, který kopíruje pohyb odtrhávaných vítrů za stožárem, pravidelné pohyby vlajících záclon nebo kmitání vodičů rozvodných sítí. Ve všech těchto případech se jedná o nedestruktivní kmitání, i když při velké amplitudě kmitání drátů vysokého napětí může děj způsobit výraznější komplikace kvůli zkratu. Významnější a nebezpečnější důsledky způsobeny jevem jsou zejména poškození a případné zničení lopatek vodních turbín, ovlivnění stability válcových i neválcových staveb, ovlivnění stability visutých mostů, rozestavěných mostů, kdy kmitala jen savba v určitém okamžiku výstavby, a nebo vliv na stojny ropných plošin. [1, 5].

Za zvláštní zmínku stojí nehoda visutého mostu Tacoma Narrows bridge, který se v roce 1940 zřítil poblíž amerického města Tacoma. Už dřív zde byly náznaky, že něco není v pořádku, most se totiž čas od času samovolně rozkmitával ve vertikálním směru. Díky tomu dostal přezdívku „cválající Gertie“. V osudný den byl silný vítr a most se opět rozkmital ve vertikálním směru. Když vítr dosáhl rychlosti kolem 60km/h, kmitání se změnilo z vertikálního na silné střídavé kroucení podél středové čáry silnice (Obr. 2.5, Obr. 2.8). Po hodině a půl krouživého pohybu se most zřítil (Obr. 2.6). [7]

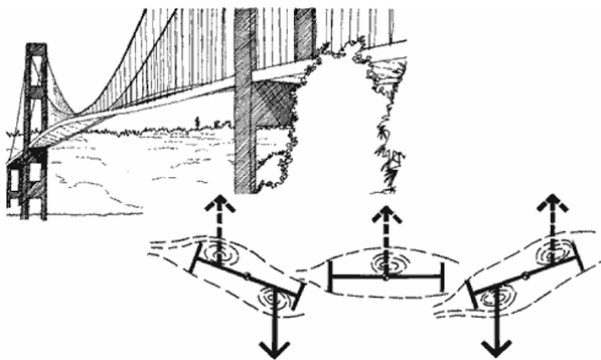


Obr. 2.5 Kmitající Tacoma bridge [26]

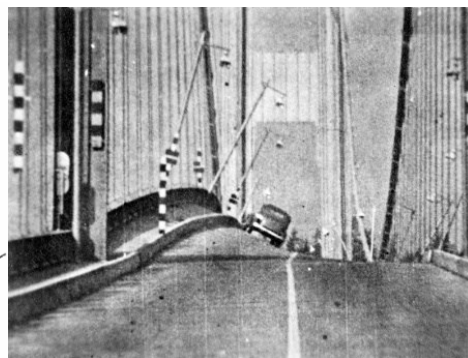


Obr. 2.6 Zřícení mostu [27]

Důvodem zřícení mostu jsou samozřejmě Kármánovy vírové stezky. Zde jsou již následky fenoménu dohnány do úplného zničení, které tak dokazuje nebezpečnost jevu. Ocelová lana kruhového průřezu a bočnice bez jakýchkoliv otvorů (Obr. 2.7) v kombinaci s rychlostí větru zapříčinily vznik vírových stezek. Frekvence odtrhávaných vírů se přiblížila vlastní frekvenci mostu a rezonance s neustále dodávanou energií vanoucího větru způsobovala rostoucí kmitání a následnou destrukci. Do té doby byly mosty a ostatní stavby vypočítávány jen na vliv statického zatížení od gravitace a konstantního zatížení větrem. Dynamické namáhání bylo pozorováno, ale považováno za zanedbatelné. [7]



Obr. 2.7 Princip rozkmitání v důsledku specifického obtékaného průřezu [28]



Obr. 2.8 Kmitání podél střednice [29]

Podobný osud dostihl chladicí věže elektrárny Ferrybridge v nové Anglii v roce 1965. Elektrárna měla osm věží ve dvou řadách, viz. Obr. 2.9. Zajímavostí je, že se zřítily tři věže na závětrné straně. Důvodem nehody bylo opět buzení vírových struktur za věžemi obtékanými vzduchem. Na rozdíl od amerického mostu se vírové stezky za první řadou věží vzájemně ovlivnily a teprve až modifikované vírové struktury komplikované geometrie měly odpovídající vlastnosti k rozkmitání a zničení věží na závětrné straně (Obr. 2.10). [34]



Obr. 2.9 Uspořádání chladicích věží elektrárny Ferrybridge, 3 věže jsou již zničeny [30]



Obr. 2.10 Zřícení 3. chladicí věže [31]

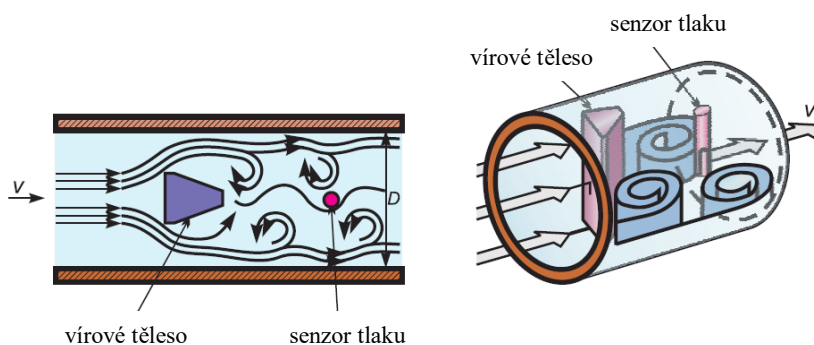
Jako třetí a opět inženýry nečekaný jev v důsledku odtrhávání vírových struktur za obtékaným tělesem je kmitání části mostu přes řeku Volhu ve Volgogradu. Celková délka mostu je 29,8 km a most je tvořen kontinuálním nosíkem ocelovo-betonové konstrukce. V roce 2010 se kilometrová část mostu v silném větru rozkmitala s amplitudou jednoho metru (Obr. 2.11, Obr. 2.12). Tato událost je kuriózní, jelikož se jedná o historicky první pozorovaný most typu jednodílného nosníku s pevnými podporami, který vykazuje stejnou nestabilitu v silném větru jako mosty visuté. [34]



Obr. 2.11 Rozkmitaný most ve Volgogradu [32] Obr. 2.12 Rozkmitaný most [33]

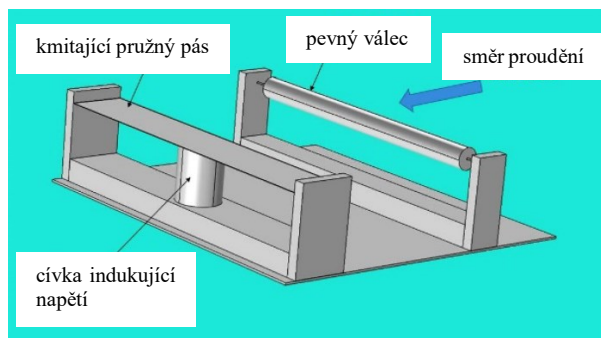
Kármánovy vírové stezky ale nezapříčiňují jen nežádoucí jevy a události. Již dlouho před popisem a pochopením jejich principu lidé tento jev využívali, aniž by o něm věděli. Už jen primitivní pískání na stéblo trávy doprovází fenomén vířivých struktur. Změny tlaků střídající se ve stejné nebo podobné frekvenci jako je vlastní frekvence stébla jej rozvibrují pomocí rezonance a specifický zvuk je na světě. Na stejném principu, i když technicky náročnějším, funguje flétna a všechny hudební nástroje založené na tomtéž principu. Vibrace jazýčku vyvolávají stojaté vlny – zvukové tóny s určitou frekvencí. [21]

V technice se velmi úspěšně uchytilo využití fenoménu ve vírových průtokoměrech (Obr. 2.13). Hlavní výhodou je úplná absence jakýchkoliv pohyblivých částic, a tedy velmi nízká možnost poruchy. Do místa požadovaného měření průtoku je instalováno těleso přesně definovaného tvaru a vytvářené víry za tělesem jsou snímány a převáděny na rychlost proudění. Měřicí aparatura sestává z obtékaného tělesa budící víry a piezoelektrickým senzoru zaznamenávajícího změny tlaku. Z počátku se využívaly tělesa válcového průřezu. Kvůli jejich nepřesnosti vzniklé přesouváním měřicího bodu v závislosti na rychlosti tekutiny byli výrobci nuceni najít alternativu. Přechod na tělesa s ostrými hranami zlepšil předvídatelnost jevu, v současné době je nejvyužívanější deltovitý nebo lichoběžníkový průřez. V určitém místě za obtékaným tělesem je umístěn senzor snímající změny tlaku, ty jsou přepočítány na rychlost proudění. [3]



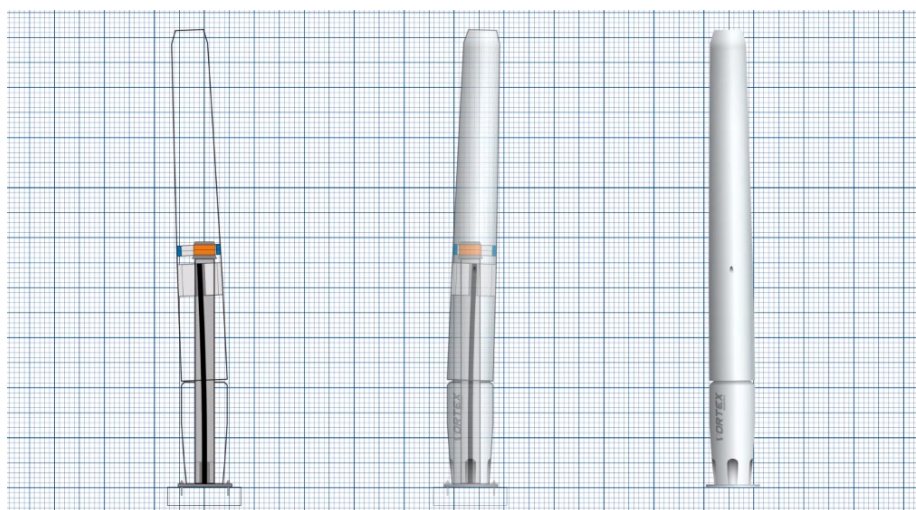
Obr. 2.13 Vírový průtokoměr [3]

Další možné využití jevu je pro výrobu elektrické energie. Jeden z možných způsobů je založený na principu horizontálně nehybně uloženého válce, který vytváří Kármánovu stezku a za ním po proudu je opět horizontálně orientovaná deska která je změny tlaků vychylována nahoru a dolů. Posuvný pohyb je převeden pomocí magnetu v cívce na indukovaný proud, viz. Obr. 2.14. [35]



Obr. 2.14 Model zařízení tvorby elektrické energie [35]

Nejnovější návrh větrné elektrárny pracující s fenoménem vírové stezky pochází ze Španělska od firmy Vortex Bladeless. Princip přeměny proudění vzduchu na elektrickou energii vychází ze stejného pohybu jako když ve větru kmitá komín nebo stožár. Spodní část zařízení je pevně uchycena k podkladu (může být instalována i na střechy domů, atd.), horní část je pak pomocí speciálně vyvinutých tyčí z uhlíkového vlákna a plastu spojena se spodní částí, viz Obr. 2.15. Tím jí je umožněn kmitavý pohyb v horizontálním směru buzený odtrháváním víry kolem kruhového průřezu zařízení. Zcela nový typ alternátoru vyvinutý a patentovaný firmou vyvíjející vertikální kmitající elektrárnu pak přetváří kmitavý pohyb na elektrickou energii. Oproti klasickým rotujícím větrným elektrárnám nemá tento typ žádné pohybující se součástky, čímž se minimalizuje potřeba údržby a únavy mechanismu. Zároveň vy tato technologie měla být méně rušivá a šetrnější k přírodě, zejména k ptákům, pro které znamenají konce rozujících listů klasických větrných elektráren velké nebezpečí. V roce 2020 by měl být na evropský trh uveden první komerční model. [36]



Obr. 2.15 Alternativní větrná elektrárna [49]

3 Metody potlačení Kármánových vírů

Z předešlé kapitoly je zřejmé, jak nutné je dbát na důsledky fémónému Kármánových vírových stezek. Dokáží být velmi nebezpečné, v některých případech můhou být následky fatální a ohrožovat lidské životy.

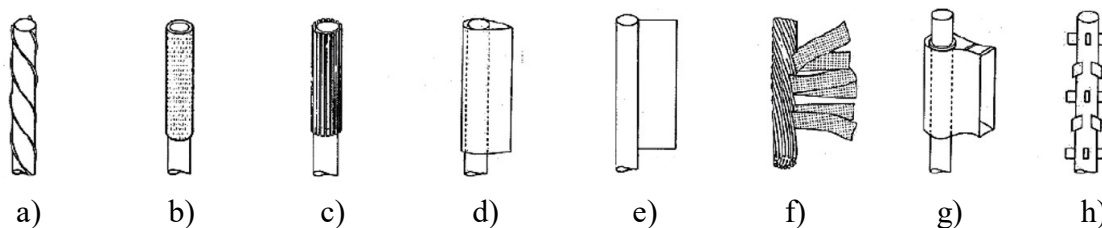
Teoreticky existují tři způsoby jak jevu zabránit. Prvním je dostatečné tlumení a dostatečně pevná konstrukce. Dnes již existují systémy s predikcí kmitání, které jej automaticky umí vyrovnat, ne vždy je ovšem možnost je aplikovat. Druhý způsob je změna vlastní frekvence tělesa a vyhnutí se rezonanci. To je schůdné u jednodušších těles, ale v otázce například rozkmitaného mostu se jedná o velmi obtížné řešení. Spektrum okrajových podmínek vyvolávající kmitání je v proměnlivém prostředí velmi široké, a předejít tak všem situacím je obtížné. Třetí, často uplatňovaná metoda, je odstranění nebo alespoň zeslabení zdroje energie kmitání. Jak je uvedeno v 1. kapitole, zdrojem energie kmitání je Kármánův fémón.

Hlavní problém a síla vlivu odtrháváných vírů spočívá ve faktu, že jsou odtrhávány koherentně po celé obtákané délce tělesa. Výsledné působení se nasčítá a konstrukce pak vlivu odolává obtížně. Odstraněním odtrháváných vírů nebo alespoň jejich zmenšením a roztržtšením se dosáhne požadovaného rušení, víry zaniknou nebo je jejich společné působení oslabeno v důsledku posunutých fází. Toho může být docíleno změnou tvaru obtékaného průřezu nebo narušením odtrhové hrany.

V případě válcových těles větších rozměrů jsou použitelné varianty zobrazené na Obr. 3.1. V praktickém využití je nejvíce aplikován model na Obr. 3.1 a), spirála vinutá kolem válcového tělesa. Ty jsou nejčastěji umístovány na komíny nebo potrubí vedoucí na dlouhé vzdálenosti Obr. 3.3 vlevo. Spirála zaručuje potlačení jevu při proudění z jakékoliv strany bez potřeby úprav geometrie, a to pomocí narušení koherence odtrháváných vírů, viz. Obr. 3.3 vpravo.

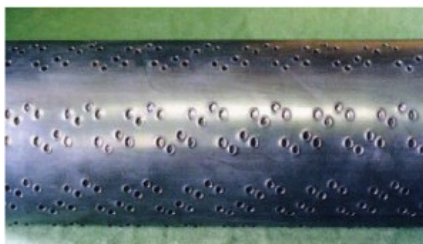
Je-li proudění směrováno stále stejným směrem bez výraznějších odchylek, pak je výhodnější uvažovat geometrii na Obr. 3.1 d), e). V případě, že tekutina teče stále stejným směrem, použitím těchto geometrií, v porovnání například s geometrií Obr. 3.1 a), se významně sníží plocha kolmá na tok tekutiny a tím se zmenší tlaková síla vyvíjená na těleso ve směru proudění. U rotačně symetrických tvarů rušivých elementů (Obr. 3.1 a), b), c), h)) není tato tlaková síla ovlivnitelná. Možnost použití nesymetrických tvarů prvků při proměnlivém směru proudění není vyloučena, je však zapotřebí aplikovat mechanismus, který zajistí správnou orientaci geometrie a tím správnou funkčnost rušivého prvku.

Princip dělicí desky na Obr. 3.1 e) je založený na znemožnění střídavého přesouvání oblasti nízkého tlaku kolem zadní plochy obtékaného tělesa. Tím zaniká schopnost vzniku vírů a jejich odtrhávání, a za tělesem vznikne pouze stabilní oblast s nižším tlakem. Tento princip je využíván například u periskopů ponorek. Opláštění s proudnicovým tvarem (tvar kopírující proudnice vedoucí kolem obtékaného tělesa) kolem válcového tělesa na Obr. 3.1 d) využívá proudnicového profilu, jenž má schopnost oddalovat bod odtržení mezní vrstvy. Pozdější odtrhnutí mezní vrstvy znemožní vytvoření střídavých vírů a za tělesem vznikne opět pouze oblast s nižším tlakem. [36]

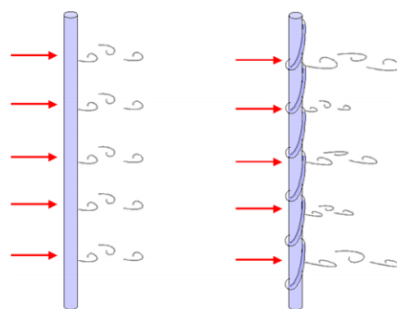
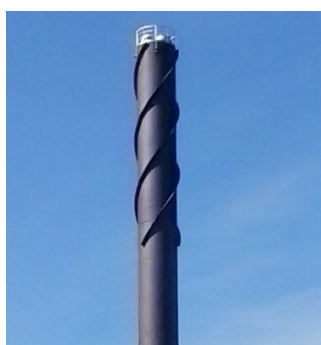


Obr. 3.1 a) vinutá spirála; b) perforovaný plášť; c) axiální drážky/vroubky; d) proudnicový tvar; e) dělicí deska; f) ribboned cable; g) otočné vodící opláštění; h) rušící výstupky [36]

Pro řešení kmitání mostových lan bývají aplikovány, viz. Obr. 3.1 b), c). Podélné lamely nebo výstupky narušující hladký válcový povrch, který bez úpravy způsobuje vznik vírů. Podobně jako Obr. 3.1 b) může vypadat povrch s důlky. Opomenuto by nemělo zůstat i řešení skrývající odsazené opláštění s dírami, viz Obr 3.2.



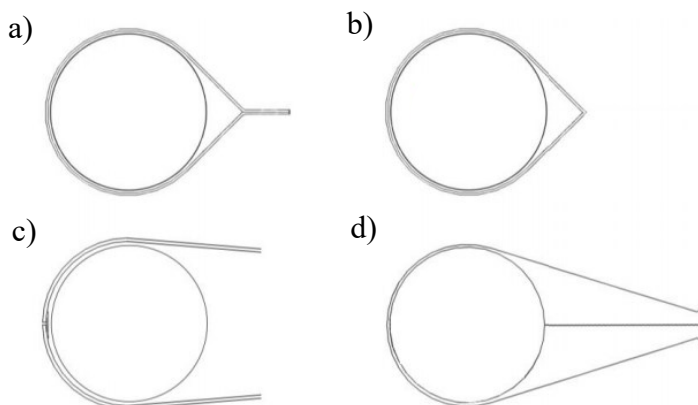
Obr. 3.2 Perforované opláštění použité na lanech Tatara bridge v Japonsku [39]



Obr. 3.3 Vinutá spirála na komínu **vlevo** [50]; narušená koherence vírů **vpravo** [51]

3.1 Proudnicový tvar

Proudnicový tvar je vyvíjen posledních 50 let. Z počátku byla délka oproti šířce průřezu značně delší, což mohlo způsobovat třepetání v případě proudění se silnými turbulentcemi (fairing flutter). Na konci tvaru byl kvůli tomu většinou umístěn stabilizátor. Dnes se tvar vyvinul a podobá se kapce s výrazněji kratší délkou než u výše zmíněného předchůdce, viz. Obr. 3.4 a), b). Tvar kapky je buď V-tvaru zakončený bodem, ve kterém se spojují protilehlé stěny, nebo Y-tvaru který je zakončen krátkým rovným koncem – přírubou, viz. Obr. 3.4 a). Paralelně s Y-tvarem kapky s rovným koncem se vyvinul U-tvar, jeho bočnice pokračují rovně za těleso ale nespojují se, jen se lehce přibližují, viz. Obr. 3.4 c). [40]



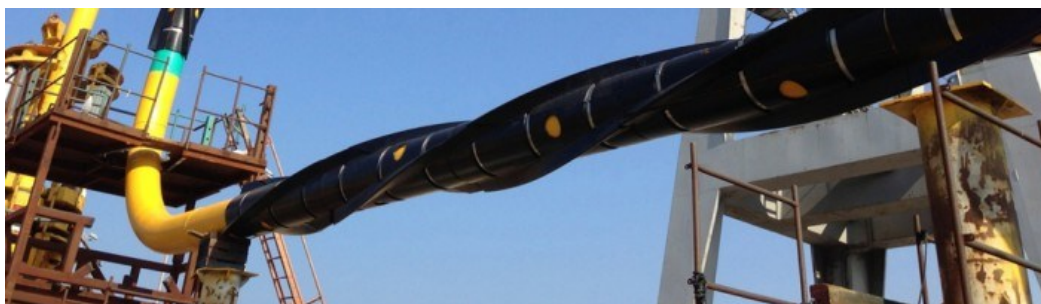
Obr. 3.4 Proudnicové tvary opláštění: a) Y-tvar; b) V-tvar; c) U-tvar; d) dlouhý plášť se stabilizátorem [40]

3.2 Vinutá spirála

Technologie vinutá spirála je primárně používána pro potlačování tvorby vírových struktur za tělesem ve vzduchu. Pro komíny a jiné dlouhé valcovité stavby a předměty je nejúčinnější geometrie sestávající ze 3 lamel vinutých ve spirále s rozestupy 120° . Tloušťka samotných lamel pak vychází z charakteristického rozměru – průměru válce. Rozměry lamel a vlastní charakteristiky systému jsou odlišné podle prostředí, ve kterém je technologie instalována (vzduch / voda), viz Obr. 3.5. Důležité specifikace a vztahy jsou uvedeny v tab. 3.1. Tato technologie je dodnes velmi populární v aplikaci ve vzduchu, použití ve vodě se tím ale nijak neponižuje. [42]

Tab. 3.1 Výchozí hodnoty pro návrh vinuté spirály (D = vnější průměr) [43]

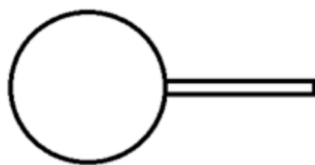
Prostředí aplikace	voda (3 lamely)	vzduch (3 lamely)
Výška lamely	$0.15 - 0.25 \times D$	$0.03 - 0.12 \times D$
Rozteč lamel	$12 - 18 \times D$	$3 - 6 \times D$
Cd	$\approx 1.3 - 1.64$	$\approx 1.0 - 1.3$
Účinnost	$\geq 95 \%$	$\geq 90 \%$



Obr. 3.5 Vinutá spirála aplikovaná v praxi [43]

3.3 Dělicí deska

Dělicí deska (Obr. 3.6) připojená za obtékaným tělesem je použitelná v prostředí s proměnlivým směrem proudění, obtékané těleso může být natáčeno dělicí deskou do správné pozice. Geometrie dělicí desky je dána poměrem mezi délkou desky (L) a průměrem válcového tělesa (D). Je-li tento poměr L/D v intervalu od 0.5 do 1.1, pak bude Kármánova vírová struktura potlačena s vysokou účinností bez dalšího třepetání nebo náznaků kmitání. Velikost dělicí desky se odvíjí od Reynoldsova čísla, tzn. rychlosti proudění, průměru obtékaného tělesa a kinematické viskozity. Vyžadují-li tyto okrajové podmínky poměr $L/D > 1.1$, funkční zůstává až do hodnoty 2.5. Poté je ale pravděpodobnost výskytu mírného kmitání nebo třepetání, které se se zvyšujícím L/D začínají objevovat. [47]

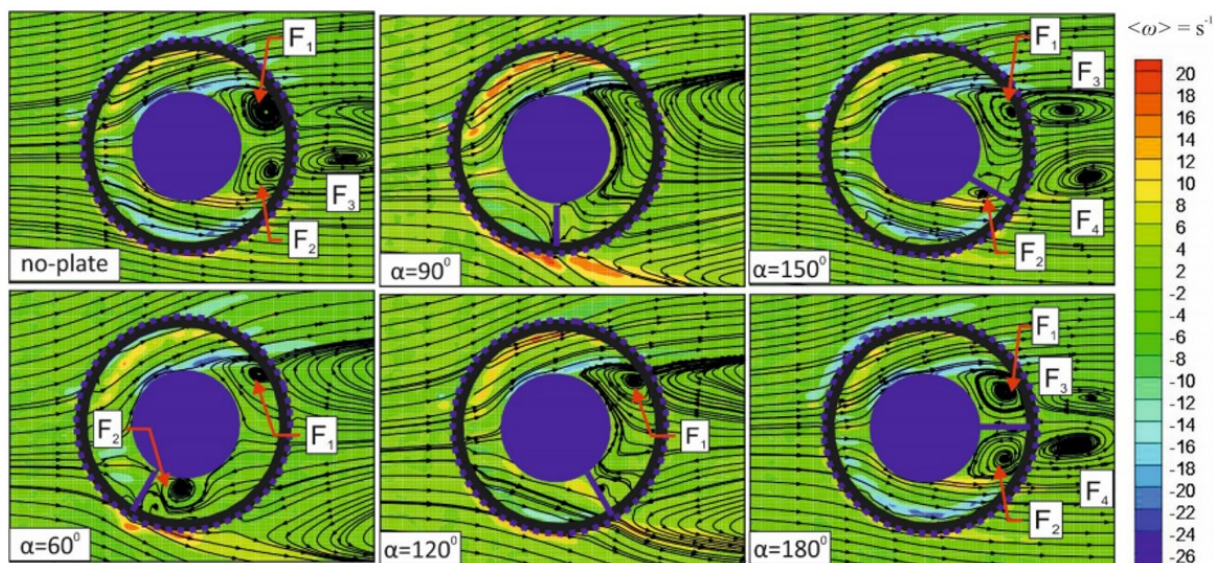


Obr. 3.6 Dělicí deska [47]

3.4 Dělicí deska s porézním válcovým pláštěm

Porézní válec kolem obtékaného válcového tělesa je schopný korigovat kmitání tělesa, avšak ne zcela úplně. Ve vnitřním prostoru porézního obalu vznikají za válcovým tělesem stále

nekontrolované turbulence. V návaznosti na tento fakt vznikla kombinace s dělicí deskou ve vnitřním prostoru mezi válcovou slupkou a obtékaným tělesem. Výzkum se zabýval aplikací dělicí desky s různých úhlech, jak je znatelné z Obr. 3.7. Z experimentu vyšly nejlépe hodnoty od 60° do 120° , při kterých má úplav ve vnitřním prostoru porézní plochy minimální nebo žádné víry. [44]



Obr. 3.7 Porézní plášť s různými úhly natočení dělicí desky [44]

4 Experiment

V druhé části práce bylo cílem provést jednoduchý experiment ukazující vznik Kármánovy vírové stezky a následně aplikovat metody pro potlačení jevu. Součástí práce je Příloha 1, která obsahuje video s celým experimentem.

4.1 Návrh aparatury

Aparatura experimentu byla inspirována podobným pokusem (viz. video [45]) a sestávala z dřevěného obdélníkového rámečku ve vertikální poloze a v něm bylo na čtyřech tažných pružinách umístěno obtékané těleso, viz. Obr. 4.1. Jako modelové těleso byla použita papírová rulička od papírových utěrek, díky jejíž nízké hmotnosti nebyla potřeba masivní konstrukce. Jeden z rozhodujících faktorů vzniku Kármánovy vírové stezky, a s tím spojeným kmitáním, je v případě válcového tělesa jeho průměr. Další faktor je kinematická viskozita, v případě tohoto experimentu neměnná hodnota, a třetí a poslední proměnná ovlivňující vznik jevu je rychlost proudění tekutiny.



Obr. 4.1 Aparatura experimentu



Obr. 4.2 První uspořádání aparatury

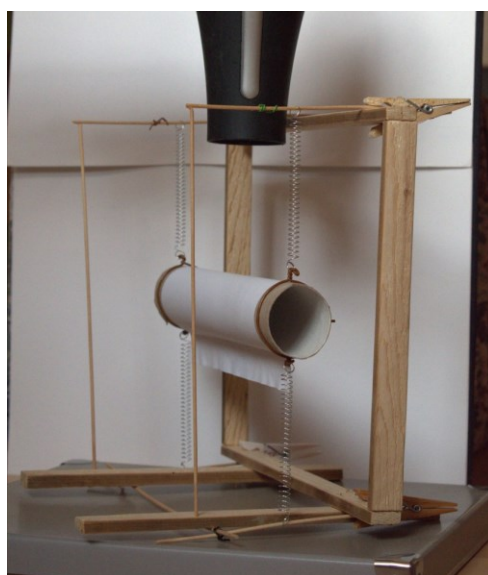
Pro experiment byl jako první možnost použit fén na vlasy, jakožto nejdostupnější zdroj proudění. Jako další možnost zdroje byla uvažována vrtule pro letecké modelářství poháněná stejnosměrným elektromotorem napájeným regulovatelným zdrojem napětí. Tato možnost byla ponechána kvůli složitějšímu provedení až jako druhá pro případ, kdyby rychlost fěnu nebyla postačující. Rychlost proudění byla v případě použití fěnu neměnná, řídící hodnotou pro dosažení vhodného Reynoldsova čísla byl tedy pouze průměr obtékaného tělesa. Ještě před variantou výroby přesného požadovaného průměru byla vyzkoušena výše zmiňovaná papírová rulička, a to ve dvou průměrech – 20 mm (role od kuchyňské hliníkové folie) a 50 mm (role od papírových utěrek). V kombinaci s rychlostí proudění fěnu a viskozitou vzduchu byla pro jednoznačně lepší výsledek (výraznější rozkmit) vybrána role s větším průměrem.

První uspořádání aparatury bylo inspirováno výše zmíněným videem se stejným pokusem - rámeček orientovaný vertikálně a proudění od fěnu směřující horizontálně na válec, viz. Obr. 4.2. Po sestavení aparatury a vyzkoušení funkčnosti vyšel jasný závěr, zvolené pružiny jsou příliš tuhé a těleso není schopné se rozkmitat za žádných okolností. Řešením by bylo nahradit pružiny jinými s odlišnou tuhostí a do tělesa přidat malé závaží a mírně zvýšit jeho hmotnost. Jenže v experimentu už byly použity ty nejméně tuhé pružiny, co bylo možné koupit. To by se dalo vyřešit pružinovým drátem a vytvořením vlastní pružiny požadovaných specifikací.

Druhá myšlenka uspořádání obsahovala rámeček orientovaný horizontálně, kdy by bylo využito daleko menší tuhosti systému ve směru kolmém na osu pružin, viz. Obr. 4.3. Těleso bylo ale příliš lehké a kmitání pro důkaz vzniku Kármánových vírů nedostatečně vyvinuté. Zvýšení hmotnosti obtékaného tělesa (závaží umístěné do válcového tělesa) sice umožnilo tělesu výrazněji kmitat, ale perioda kmitů nebyla charakteristická pro Kármánovu vírovou stezku – byla příliš nízká. Takto nízká frekvence měla příčinu ve zvýšené hmotnosti, kdy se těleso sice začalo s odtrhnutým vírem u horní hrany pohybovat směrem dolů, ale následný odtrhnutý vír u spodní hrany nedodal tělesu dostatečnou energii aby to v kombinaci s tuhostí pružin stačilo na okamžitý pohyb nahoru. Těleso tak nekmitalo ve frekvenci odtrhávání vírů, ale jen se po malém rozkmitání pohupovalo kvůli tíhové síle. Pokud by byl vliv tíhové síly v jiném směru než je směr kmitajícího tělesa, tíhová síla kmitání nebude ovlivňovat a tak by měl vzniknout funkční experiment.



Obr. 4.3 Druhé uspořádání aparatury



Obr. 4.4 Finální uspořádání aparatury

Ve finálním ideálním uspořádání se rámeček nalézal opět ve vertikální poloze, proudění směřovalo taktéž vertikálně, ve směru od pružin, viz. Obr. 4.4. Kmitání tělesa probíhalo horizontálně, zatímco tíhová síla působila vertikálně a neovlivňovala tak samotné kmitání. V tělese bylo umístěno lehké závaží pro zvýšení amplitudy kmitu. Poslední úprava spočívala v podložení rámečku, aby byl výš nad podložkou, jelikož při stávajícím uspořádání se proud vzduchu rozbíjel o podložku a narušoval tak proudění kolem obtékaného tělesa. Podložení rámečku posunulo těleso do neovlivňované části proudění.

4.2 Vybrané metody pro potlačení vírů

Pro experiment byly vybrány a otestovány následující metody pro potlačení Kármánovy vírové stezky.

4.2.1 Válec

Pro určení správné konfigurace experimentu, tedy zjištění plně vyvinutého jevu Kármánovy vírové stezky bylo nejprve potřeba provést experiment s tělesem bez aplikované metody potlačení jevu, tj. s tělesem kruhového průřezu – válcovým tělesem, viz. Obr. 4.5. Jak bylo výše zmíněno, model byl vyroben z papírové ruličky o průměru 50 mm.

Na modelu válcového tělesa bylo dodatečně odlazeno umístění zdroje proudění. Ideální pozice byla dosažena, jakmile se kmitání modelu ustálilo a nedocházelo k nestabilitám a útlumu

kmitání. Stabilní kmitání bylo jasným signálem plně rozvinuté Kármánovy vírové stezky v úplavu za obtékaným tělesem a tedy základem pro smysluplný experiment. Princip vzniku Kármánovy vírové stezky za válcovým tělesem je podrobně rozepsán v 1. kapitole.

4.2.2 Dělicí deska

Nejjednodušejí zhotovitelný model byla dělicí deska (Obr. 4.6), anglicky tzv. „splitter plate“. Konkrétní doporučení rozměrů dělicí desky je poměr L/D v rozmezí $<0,5; 2,5>$, kde L je délka desky a D průměr tělesa. První vyrobený model splňoval požadavek $L/D = 0,5$ a hned tato verze potlačila kmitání tělesa s velmi dobrým výsledkem. Dělicí deska zabraňuje přesouvání oblasti nižšího tlaku z jedné strany tělesa na druhou a těleso tak ztrácí buzení pro rozkmitání. Po stranách desky vznikají dvě stabilní samostatné oblasti s nízkým tlakem.



Obr. 4.5 Model válec



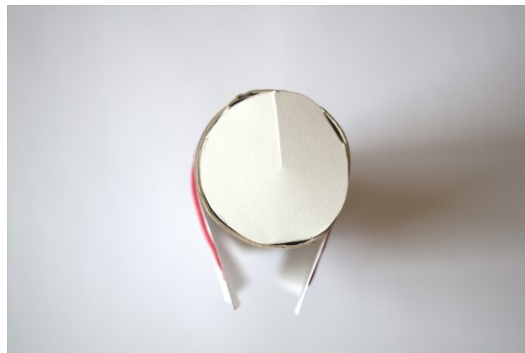
Obr. 4.6 Model dělicí deska

4.2.3 Proudnicový Y-profil

Geometrie proudnicového profilu tvaru Y není přesněji rozměrově specifikována, doporučení jsou pouze obecného charakteru. Výroba experimentálního modelu z tohoto důvodu neměla přesný cílový rozměr a odvíjela se až od konkrétních výsledků po provedení prvního experimentu. Model byl vyroben podle přibližného tvaru v kapitole 3.1 a opět hned první pokusný model (Obr. 4.7) dokonale potlačil jev a nebylo nutné v několika iteracích hledat nejlepší geometrii. Tvar tělesa kopíruje proudnice obtíkáajícího média (nebo se o to alespoň snaží). V úplavu díky tomu buď vůbec nedojde k odtržení mezní vrstvy (za tělesem nedojde k víření) nebo, jak tomu je ve většině případů, se mezní vrstva odtrhne mnohem později. Vzniklé víření v úplavu nemá dostatečnou energii pro vyvolání jevu a za tělesem opět vzniká pouze oblast s nižším tlakem.



Obr. 4.7 Proudnicový Y-profil



Obr. 4.8 Proudnicový U-profil

4.2.4 Proudnicový U-profil

U-profil je v této práci pojmenování pro zužující se opláštění s počátkem na bocích obtékaného tělesa a pokračující za těleso, viz. Obr. 4.8. Provedení modelu použitého v experimentu je navrženo pouze na základě vizuální podobnosti bez konkrétních hodnot. Pro zhotovení finální podoby byla upravena délka opláštění, která byla v předešlé verzi delší, ale pro nedostatečnou pevnost papíru měla koncová hrana tendenci třepetat. Ve stávajícím modelu je mírné třepetání taktéž patrné, ale pro názornou ukázkou funkčnosti této metody zanedbatelné. Tato metoda podobně jako dělicí deska zabraňuje migraci oblasti nízkého tlaku po zadní straně tělesa. Oblast s nízkým tlakem setrvává stabilně mezi dvěma hranami opláštění bez možnosti pohybu, tedy bez možnosti rozkmitání tělesa.

4.2.5 Vroubkovaný válec

Detailně se tato práce metodou potlačení pomocí žebrovaného/vroubkovaného povrchu nezabývá. Geometrie metody bývá opět řešena u každého jednotlivého použití individuálně v závislosti na podmínkách v místě působení, a tedy i konkrétní hodnoty odpovídají pouze jednomu určitému případu. Model, viz. Obr. 4.9, byl vytvořen bez jakékoliv předlohy. Narušení hladkého povrchu způsobí turbulence u povrchu tělesa, mezní vrstva se díky tomu udrží delší dobu u stěny tělesa a rozvířené proudění spolu s později odtrženou mezní vrstvou vedou k stabilní oblasti nižšího tlaku za tělesem bez vzniku střídavých vírů.

4.2.6 Spirála

Poslední metoda potlačení vinutou spirálou, viz. Obr. 4.10. Do vzniklého modelu nebyla vkládána příliš velká naděje, jelikož bylo obtížné vyrobit alespoň trochu přesnou spirálu kopírující obvod válce. Model byl zhotoven zejména kvůli faktu, že tato metoda je velmi rozšířená pro použití ve vzduchu, viz. kapitola 3.3. Aplikování metody na modelu nebylo stoprocentní, jelikož spirála na modelu byla vinutá pouze z jedné lamely, zatímco nejlepší výsledky přichází s trojitou spirálou. Ta nebyla v možnostech jednoduchého provedení a tak byl experiment ukončen jen s částečným úspěchem utlumení kmitání. Spirála naruší koherentnost odtrhávání vírů po celé délce tělesa a jev tím ztratí na své síle. Při aplikaci se třemi lamelami je pak zajištěno absolutní potlačení možného vzniku vírové struktury i na jednotlivých částech tělesa.



Obr. 4.9 Vroubkovaný válec



Obr. 4.10 Model spirála

4.3 Průběh a vyhodnocení experimentu

V sestavené aparatuře experimentu byly postupně vystřídány všechny vytvořené modely, viz. Příloha 1. Každý model byl vystaven proudění vzduchu po dobu 20 sekund, aby se mohlo projevit a ustálit případné kmitání.

Jak je uvedeno v předešlé kapitole, jako první bylo pozorováno chování válcového tělesa. Po vytvoření proudu vzduchu se model během malé chvíle rozkmital a v ustáleném kmitání setrval až do zániku proudění. Prokázala se tak přítomnost Kármánovy vírové stezky, jelikož ve směru kmitání na model nepůsobila jiná síla, než síla vzniklá od změn tlaků po stranách obtékaného tělesa. Frekvence kmitání $f = 4,5$ Hz byla odečtena ze zpomaleného záznamu.

Rychlost proudění byla změřena pouze orientačně a výsledek je pravděpodobně zatížen výraznou odchylkou, kvůli použité metodě měření. Do proudu vzduchu vytvořeného použitým zdrojem (fénem), byly pouštěny jednotlivě malé kuličky z toaletního papíru. Materiál k výrobě kuliček byl vybrán pro jeho nízkou hmotnost. Výsledné kuličky tak byly dostatečně lehké a zároveň působení tlakové síly na jejich velkou plochu (v porovnání s jejich hmotností) zajistilo, v rámci možností, důvěryhodné zobrazení rychlosti proudění. Ze zpomaleného záznamu pak byl u několika kuliček odečten čas překonání stanovené dráhy a výsledkem je přibližná rychlost proudění $v = 1,9$ m.s⁻¹.

Ze získaných hodnot frekvence, rychlosti proudění a známého průměru tělesa bylo vypočítáno Strouhalovo číslo $Sr = 0,12$. Tento výsledek se neshoduje s předpokládaným řešením $Sh \approx 0.2$. Důvod bude s velkou pravděpodobností v určení střední rychlosti proudění, jelikož použitá metoda vnáší do výpočtu vysokou odchylku.

Na válcové těleso se poté aplikovaly postupně všechny vybrané metody. Metoda užívající dělicí plochu, proudnicový Y-profil a proudnicový U-profil dokonale potlačily nechtěný jev, těleso se po celou dobu proudění nacházelo v klidu bez náznaků kmitání. Za zmínku stojí pouze fakt, že z důvodu použití obyčejného papíru, k vytvoření těchto prvků, volné hrany papíru mírně třepetaly. Kdyby bylo použito silnějšího materiálu, síly způsobující třepetání by byly natolik malé, že by se nijak jinak neprojevily. Dalším aplikovaným tvarem byl vroubkovaný povrch. I tento model obstál bez jakýchkoliv výrazných kmitů nasvědčujících tvorbu vírové stezky. Poslední vybraná metoda k experimentálnímu ověření byla vinutá spirála. Nedokonalé provedení modelu mělo za následek nedokonalé potlačení jevu a model byl periodicky částečně rozkmitáván a zase tlumen. Tuto metodu nelze na základě tohoto pozorování považovat za nedostatečnou, jelikož jak bylo řečeno, na vině je nedokonalý model.

Na základě pozorování lze prohlásit experiment za úspěšný. V první části bylo provedeno zdařilé vytvoření nechtěného jevu Kármánových vírových stezek a v druhé části jejich ukázkové potlačení.

ZÁVĚR

Úvodní částí práce je řešerše věnující se základním znalostem z tématu Kármánových vírových stezek, které jsou nepostradatelné pro jeho komplexní pochopení. První kapitola vysvětluje důvod, proč je daný jev ve velké většině případů nežádoucí. Následuje detailní popis principu vzniku jevu, jsou zde také definované nutné počáteční podmínky vedoucí k vytvoření plně rozvinuté Kármánovy vírové stezky. Ve zbytku kapitoly jsou vysvětleny důležité pojmy laminární a turbulentní režim proudění a s tím spojená nestabilita proudění, mezní vrstva a vířivost, které jsou úzce spjaté s tématem. Do první kapitoly je také zařazen popis nejdůležitějších podobnostních čísel pojících se s Kármánovou stezkou – Reynoldsovo, Strouhalovo a Roshkovo číslo.

Druhá kapitola je zaměřená na výskyt Kármánovy vírové stezky v přírodě a v technice. Důležitým bodem je inspirace přírodou a využití pozorovaných metod potlačení nechtěného jevu u zvířat pro následnou aplikaci poznatků v technice. Následný rozbor výskytu v technice je podložen třemi názornými příklady skutečných nehod zapříčiněných Kármánovou vírovou stezkou. Tyto tři významné události jsou nepopíratelnou známkou nebezpečnosti pojednávaného jevu. Poslední odstavce druhé kapitoly zkoumají fenomén z druhé stránky, ze stránky pozitivního využití. Stejně jako u většiny negativních věcí, tak i zde existují možnosti zuzitkování většinou nechtěného jevu. Kármánova vírová stezka má poměrně široké pole využití od hudebních nástrojů přes vírové průtokoměry až po výrobu elektrické energie.

Téma třetí kapitoly se zaměřuje na metody potlačení Kármánovy vírové stezky. Jsou v ní shrnuty dostupné možnosti, z nichž většina je běžně aplikovaná v praxi. Podrobnější rozbor několika z nich obsahuje konkrétnější informace k jejich použití a charakteru fungování. Některé vybrané metody jsou v následující kapitole ověřeny v experimentu.

Poslední kapitola popisuje vlastní experiment. V první části kapitoly jsou rozepsány úvahy nad tvorbou co nejlépe fungujícího experimentu a jeho praktické zhotovení. Následně je uvedeno pět vybraných metod potlačení, které budou experimentálně otestovány. U každé z nich jsou poznatky a úvahy vedoucích k nejlepší dosažitelné efektivitě a funkčnosti. Závěrečná část kapitoly shrnuje průběh experimentu, jeho technické provedení a následně hodnotí úspěšnost jednotlivých použitých metod potlačení.

První model aplikovaný do experimentu bylo válcové těleso bez použití metod potlačení. S jeho pomocí byl experiment odladěn a vznikla stabilní Kármánova vírová stezka. Experiment byl následně proveden s vybranými metodami potlačení. Úspěšné potlačení bylo zaznamenáno u čtyř metod – dělicí deska, proudnicový Y-profil, proudnicový U-profil a vroubkovaný válec. Tyto metody v jednoduchém experimentu velmi dobře potlačily jev. Výsledek u poslední metody potlačení vinutou spirálou už tak úspěšný nebyl. V důsledku obtížnější geometrie a použití jednoho namísto tří lamel se model střídavě rozkmitával a zase tlumil. V experimentu jsou možnosti pro zlepšení, jako např. výroba kvalitnějších modelů nebo otestování modelů v různých rychlostech proudění. Experiment měl být ale v první řadě jednoduchý a demonstrativně prokázat funkčnost metod potlačení, což se podařilo a experiment může být považován za úspěšný.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BISHOP, R.E.D. *Kmitání*. SNTL, 1978. ISBN 04-211-78.
- [2] PALÁDI, Ondřej. *Hodnocení tlumících charakteristik strojních součástí z plastů*. 2011. Dostupné také z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16948/pal%E1di_2011_dp.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.
- [3] KADLEC, Karel. *Vírové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití* [online]. 2014, (10) [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/53030.pdf
- [4] JÍZDNÝ, Martin. *VLASTNÍ TVARY VÍROVÉHO PROUDĚNÍ*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. PAVEL RUDOLF, Ph.D.
- [5] KUNDU, Pijush K. a Ira M. COHEN. *Fluid Mechanics* [online]. Druhé vydání. California: Academic Press, 2002 [cit. 2020-06-25]. ISBN 0-12-178251-4. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=AFVnbQqCJSQC&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=true>
- [6] *Direct Numerical Simulation of Karman vortex street. $Re = 140$* [online]. In: . 27.3.2017 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=vBZDR0gMEEI>
- [7] The von Kármán Vortex Street and Tacoma Narrows Disaster. *AEROSPACEENGINEERING* [online]. 15.12.2016 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://aerospaceengineeringblog.com/the-von-karman-vortex-street-and-tacoma-narrows-disaster/>
- [8] VOREL, Jaroslav. *Experimentální vyšetření místa odtržení proudy od stěny v difuzoru*. Zlín, 2012. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita v Plzni. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Linhart, Cs.
- [9] *Experimentální výzkum obtékání těles v tažné nádrži* [online]. 2016 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/149906/V_16316_Sb.pdf?sequence=1&isAllowed=y%20-. Technická Univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Petra Dančová, Ph.D.
- [10] On Boundary Layers: Laminar, Turbulent and Skin Friction. *AEROSPACEENGINEERING* [online]. 18.9.2016 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://aerospaceengineeringblog.com/boundary-layers/>
- [11] JANALÍK, J. *Obtékání a odpor těles* [online]. 2008 [cit. 2020-06-25]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [12] Laminar Flow vs Turbulent Flow. In: *Theengineeringconcepts* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.theengineeringconcepts.com/laminar-flow-vs-turbulent-flow/>

- [13] Soustavy veličin a jednotek – Terminologie. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:61963/soustavy-velicin-a-jednotek-terminologie>
- [14] *Strouhal number* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://hmf.enseiht.fr/travaux/projnum/book/export/html/1388>
- [15] GOVARDHAN, Raghuraman N. a O. N. RAMESH. *A stroll down Kármán street* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/226092720_A_stroll_down_Karman_street
- [16] Transition-from-laminar-flow-to-turbulent-flow. In: *Researchgate.net* [online]. 2007 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Transition-from-laminar-flow-to-turbulent-flow-as-a-function-of-increasing-Reynolds_fig7_268742405
- [17] Vorticity. *Sciencedirect* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/vorticity>
- [18] Bio-mimetic Drag Reduction – Part 2: Aero- and Hydrodynamics. *AEROSPACEENGINEERING* [online]. 31.3.2012 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://aerospaceengineeringblog.com/bio-mimetic-drag-reduction-2/>
- [19] LIM, T. T. *HAIRPIN VORTICES* [online]. In: . Singapore: National University of Singapore [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://www.efluids.com/efluids/gallery/gallery_pages/Lim_hairpin.jsp
- [20] Transitional Flat Plate. In: *Su2code.github* [online]. 3.3.2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://su2code.github.io/tutorials/Transitional_Flat_Plate/
- [21] PETŘÍK, Milan. Kármánovy víry v tekutinách. *Lidovky.cz* [online]. 29.11.2009 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://petrik.bigblogger.lidovky.cz/c/108307/Karmanovy-viry-v-tekutinach.html>
- [22] *Kármán vortex street in Chile* [online]. In: . [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=3328
- [23] *Vortex street* [online]. In: . [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://pbs.twimg.com/media/DjDGKCmV4AAwD6Q.jpg>
- [24] Theodor von Kármán. *Letmodel* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.letmodel.cz/23/Theodor%20von%20Karman.htm>
- [25] MELCER, Jozef. *Important moments in the history of structural aerodynamics* [online]. In: . 2017 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317132346_Important_moments_in_the_history_of_structural_aerodynamics
- [26] ROBERTSON, Kipp. TACOMA BRIDGE COLLAPSES. *MyNorthwest* [online]. 16.5.2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://mynorthwest.com/gallery/the-fall-of-galloping-gertie/tacoma-bridge-collapses/>
- [27] LONG, Priscilla. Tacoma Narrows Bridge collapses on November 7, 1940. *HistoryLink* [online]. 12.11.2014 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://historylink.org/File/5048>

- [28] *Destruction of the Takom Bridge*. [online]. In: . 1/2019 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333464438_The_study_of_wind_effects_on_the_bridge_constructions/figures?lo=1a
- [29] Tacoma Narrows Bridge collapse, 1940. *SciencePhotoLibrary* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.sciencephoto.com/media/461146/view>
- [30] *Collapse of cooling towers in Ferrybridge, November 1, 1965*. [online]. In: . 1/2017 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317132346_Important_moments_in_the_history_of_structural_aerodynamics/figures?lo=1
- [31] FERRYBRIDGE C POWER STATION - THROUGH THE DECADES (1966 - 2016). *Sse* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.sse.com/news-and-views/2016/03/ferrybridge-c-power-station-through-the-decades>
- [32] Destruction of Volgograd Bridge. *Researchgate* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Destruction-of-the-Volgograd-Bridge_fig2_333464438
- [33] Massive Waves on Russian Bridge. In: *Youtube* [online]. 21.5.2010 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=rVzYDIIBQ0w>
- [34] MELCER, Jozef. *Important moments in the history of structural aerodynamics* [online]. In: . 2017 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317132346_Important_moments_in_the_history_of_structural_aerodynamics
- [35] ATRAH, Ahmed B., Mohammad S. A. RAHMAN a Hanim SALLEH. *Karman Vortex Creation Using Cylinder for Flutter Energy Harvester Device* [online]. 7/2017 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/318612543_Karman_Vortex_Creation_Using_Cylinder_for_Flutter_Energy_Harvester_Device
- [36] *Vortexbladeless* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://vortexbladeless.com/>
- [37] DALTON, C. *FUNDAMENTALS OF VORTEX-INDUCED VIBRATION* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/tap-technical-assessment-program//485ab.pdf>
- [38] C-profiles [online]. In: . [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0889974616303012-gr3.jpg>
- [39] FUJINO, Yozo, Kichiro KIMURA a Hiroshi TANAKA. *Wind Resistant Design of Bridges in Japan* [online]. New York: Springer, 2012 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1007/978-4-431-54046-5 11. ISBN 978-4-431-54045-8. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=VLsK3dB-takC&pg=PA228&lpg=PA228&dq=A+Means+for+Avoiding+Wind-excited+Oscillations+of+Structures+with+Circular+Or+Nearly+Circular+Cross-section&source=bl&ots=2N0jF_2dfO&sig=ACfU3U38tVHWxcQyYjOcUI_51v2Yo7x-OA&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKewj9isXQnYvoAhWJCOWKHR-LDjUQ6AEwCnoECAsQAQ#v=onepage&q&f=true

- [40] *Fairing shapes* [online]. VIV Solutions, [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vivsolutions.com/wp-content/uploads/2018/08/VIV-Solutions-Technical-Note-Fairing-Shapes.pdf>
- [41] *CFD of Trail Fairing* [online]. VIV Solutions, 2013 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vivsolutions.com/wp-content/uploads/2018/07/CFD-of-Tail-Fairing-700x563.jpg>
- [42] *Helical Strakes* [online]. VIV Solutions, 2013 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.helicalstrakes.com/index.html>
- [43] *Helical Strakes Are a Popular Choice for Suppressing Vortex-Induced Vibration* [online]. VIV Solutions [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vivsolutions.com/helical-strakes/>
- [44] OZKAN, G. M., T. DURHASAN, E. PINAR, A. YENUCIUN, H. AKILLI a B. SAHIN. *Control of the flow in the annular region of a shrouded cylinder with splitter plate* [online]. 2016 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1051/epjconf/201714302088. Dostupné z: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2017/12/epjconf_efm2017_02088/epjconf_efm2017_02088.html
- [45] ROUSE, Hunter. *Flow-induced vibrations (Karman vortex)* [online]. In: . [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.iahrmedialibrary.net/the-library/methods-in-hydraulics/fluid-mechanics/flow-induced-vibrations-karman-vortex/270>
- [46] *Critical Reynolds Number* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/reynolds-number/critical-reynolds-number/>
- [47] *Vorticies and splitter plate* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610517302349?dgcid=raven_sd_recommender_email
- [48] BATCHELOR, G. K. *An Introduction To Fluid Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1973. ISBN 0521098173.
- [49] Vortex Bladeless How it Works, scheme (2020). In: *Youtube* [online]. Vortex Bladeless Wind Power, 26.11.2019 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=liR0hO4nKIc>
- [50] *Why do chimneys have these spiral “wings”?* [online]. In: . [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://physics.stackexchange.com/questions/75459/why-do-chimneys-have-these-spiral-wings>
- [51] HOLLAND, Vegard, Tahsin TEZDOGAN a Elif OGUZ. *Full-Scale CFD Investigations of Helical Strakes as a Means of Reducing the Vortex Induced Forces on a Semi-Submersible* [online]. Glasgow [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://strathprints.strath.ac.uk/60458/1/Holland_Tezdogan_Oguz_OE_2017_Full_scale_CFD_investigations_of_helical_strakes.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
C_d	Aerodynamický odpor vzduchu	—
D	Průměr tělesa	m
f	Frekvence	Hz
L	Charakteristický rozměr	m
Re	Reynoldsovo číslo	—
Ro	Roshkovo číslo	—
Sh	Strouhalovo číslo	—
v	Střední rychlost proudícího média	$m \cdot s^{-1}$
ν	Kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$

SEZNAM PŘÍLOH

- 1 Záznam provedeního experimentu