

Magnusův jev

Pavel Konečný

MU PŘF Ústav fyzikální elektroniky

Abstrakt

Přijmeme-li vysvětlení Magnusova jevu jako silovou reakci dle třetího Newtonova zákona na odklonění proudu tekutiny v důsledku posunu místa, kde se proudění od povrchu válce odtrhne vlivem rozdílu v tření na opačných stranách válce, nabízí se porovnat tento efekt s jinými způsoby ovlivnění mezní vrstvy, jako je odsávání, nebo strukturou povrchu, tzv. turbulátorem. Byla zkonstruována aparatura, s cílem tyto efekty kvalitativně demonstrovat.

Úvod

Magnusův efekt patří mezi ty fyzikální úkazy, kterým se školská fyzika nemůže úplně vyhnout, protože se s ním setká každý, kdo hraje nebo alespoň sleduje míčové hry. Je tedy poměrně vysoká pravděpodobnost, že učitel bude na tento jev dotázán. Žádný hydrodynamický efekt se nevysvětluje zrovna snadno a Magnusův jev je komplikovaný navíc tím, že tření je hlavní příčinou, nikoliv zanedbatelnou poruchou. Proto je třeba zacházet s Bernoulliovou rovnicí opatrně, protože pokud je změna rychlosti způsobená třením, nejsou splněny podmínky, za jakých je odvozena. (Odvození Bernoulliovy rovnice [2], nebo včetně příkladů chybné aplikace v [1]). Tvzení, že na jedné straně rotujícího válce má třením urychlený vzduch menší tlak, než na druhé straně třením zpomalený právě v důsledku Bernoulliovy rovnice podle pravidla větší rychlost menší tlak, tedy není v pořádku. Z toho vyvozené silové působení má sice správný směr výsledné síly, ale jen pro normální Magnusův jev, ale už nikoliv pro negativní Magnusův jev.

Vysvětlení normálního i negativního Magnusova efektu lze nalézt v řadě článků. Velmi podrobný přehled včetně exkurse do historie a aplikací nalezne čtenář v [3], nebo také v [4].

Z publikovaných pozorování v aerodynamickém tunelu i počítačových simulací plyne, že efekt je způsoben ovlivněním mezní vrstvy v důsledku tření o povrch. Obvykle platí, že víc zabrzděná vrstva se od povrchu odtrhne dřív, než méně zabrzděná. Na straně, kde vzduch obtéká válec ve směru jeho rotace, je zabrzděn méně, na opačné straně víc. Čím dál dospěje proudění po povrchu válce, tím víc je stočeno ze svého přímého směru. Dospěje-li na jedné straně dál, než na druhé, znamená to, že proud vzduchu je celkově odchýlen z přímého směru. Z třetího Newtonova pohybového zákona pak plyne normální Magnusův efekt [4]. Publikované experimenty není možné zopakovat bez odpovídajícího vybavení, jako je nízko turbulentní aerodynamický tunel a zařízení na zviditelnění proudění. Lze však provést experimenty, které mezní vrstvu ovlivňují jiným způsobem a tím také i místo, kde se proudění odtrhne proudění.

Nejjednodušší způsob ovlivnění mezní vrstvy kromě změny relativní rychlosti povrchu vůči proudícímu vzduchu je její odsátí nebo rozvíření strukturovaným povrchem, tzv. turbulátorem, například v podobě na povrch nalepeného vlákna vhodného průměru.

Typy mezní vrstvy

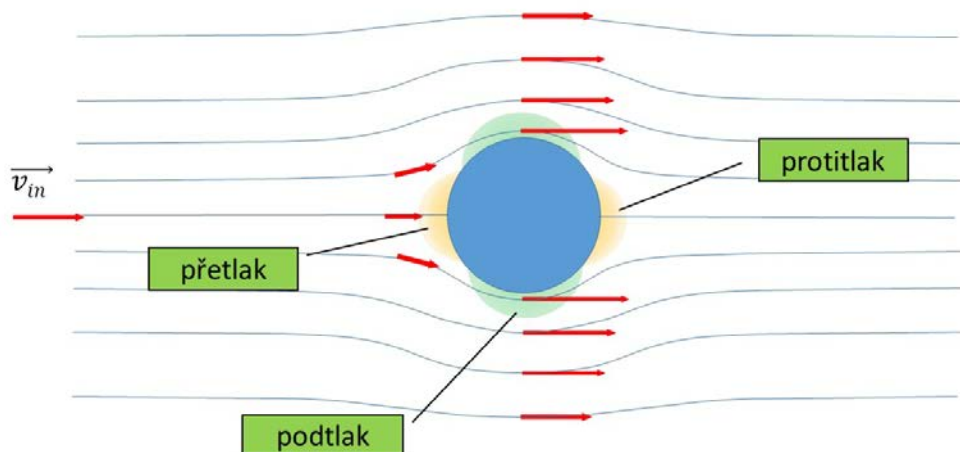
Mezní vrstva je oblast, kam výrazně zasahuje vliv tření tekutiny o povrch. Může být laminární nebo turbulentní. Laminární mezní vrstva se může v důsledku nestabilit změnit na turbulentní. Tloušťka laminární mezní vrstvy postupně ve směru proudění narůstá, podobně i turbulentní mezní vrstva.

V případě nulové viskozity by bylo ustálené proudění kolem válce laminární, protože by chyběly třecí síly a moment tlakových sil je nulový. Mezní vrstva by neexistovala. Struktura proudnic by byla předozadně symetrická stejně jako tlakové pole [5] [6]. Na válec pak nepůsobí žádné třecí síly a součet všech tlakových sil je roven nule, válec se pohybuje bez odporu.

V případě velmi velké viskozity, přesněji řečeno velmi malého Reynoldsova čísla, tedy například v situaci, kdy by se uvažovaný válec pohyboval rovnoměrně a dostatečně pomalu například v melase, k turbulenci také nedojde, ale z jiných důvodů, než v případě neviskózní tekutiny, viskozita všechno víření tlumí. Mezní vrstva vlastně také neexistuje, nelze najít hranici mezi třením ovlivněnou a zanedbatelně ovlivněnou tekutinou. Rozložení proudnic je v tomto případě přibližně předozadně symetrické, podobně jako by bylo v případě hypotetické ideální tekutiny [7]. Na válec však působí třecí síly a i součet všech tlakových sil je nenulový, válec je brzděn.

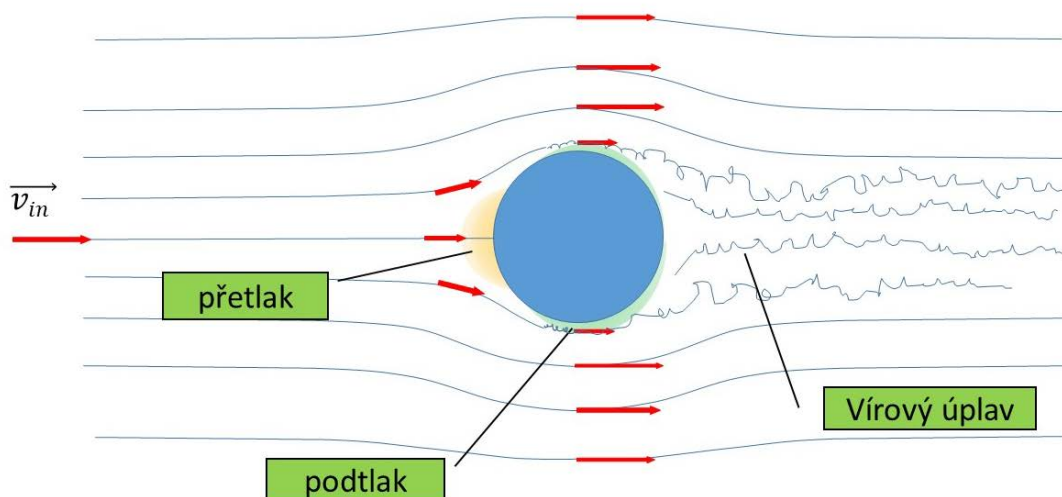
Vliv mezní vrstvy na obtékání tělesa

Uvažujme válec obtékáný ideální tekutinou, kde je proudění i rozložení tlaku symetrické. Tlak je s rychlostí svázán Bernoulliovou rovnicí. V náběžné části před válcem je přetlak, protože existuje proudnice kolmá na povrch válce a tam se tekutina zastaví a za válcem vzhledem k symetrii proudění taky. Tlaku za válcem říkáme protitlak. Po stranách válce je podtlak, protože tekutina válec obchází a má tedy v této části vyšší rychlost a tím i nižší tlak. Směrem od náběžné části před válcem je zprvu urychlovaná tlakovým spádem k boční části válce a poté zpomalovaná již zmíněným protitlakem. Dá se říct, že pro ideální tekutinu jsou tlakové poměry v ní právě takové, aby tekutina válec obešla tak, aby se za válcem uvedla do původního stavu. Proudění je předozadně symetrické. Protitlak je shodný s přetlakem na náběžné části válce, celková síla působící na válec je nulová, viz obr. 1.



Obr. 1. Proudění tekutiny bez vnitřního tření – schematicky.

Uvažujme, že tekutinu proudící po povrchu na cestě od náběžné části k boční straně ovlivní malá porucha v podobě tření a trochu ji přibrzdí. Tato malá porucha idylický obrázek symetrického proudění změní. Přibrzděná tekutina už nebude mít dostatek kinetické energie k tomu, aby po stejné proudnici, jakou by měla při proudění bez tření, vyběhla do stejného protitlaku, jaký by měla při proudění bez tření. Jinými slovy předozadně symetrické rozložení proudnic se nemůže uskutečnit. Svoji pouť po povrchu tekutina v mezní vrstvě skončí dřív a proudění se odtrhne a za válcem vznikne vírový úplav, viz obr. 2.



Obr. 2. Proudění reálné tekutiny – schematicky.

Jsou-li překročeny meze stability, laminární mezní vrstva se změní v turbulentní, případně se odtrhne, s následným přimknutím zpravidla už jako turbulentní mezní vrstva, nebo se nepřimkne vůbec. I turbulentní mezní vrstva se může odtrhnout. Pokud se z nějakých důvodů (například v důsledku struktury na obtékaném povrchu, tzv. turbulátoru) vyvine turbulentní mezní vrstva v oblasti, kde by jinak mohla být ještě laminární, turbulentní mezní vrstva se odtrhne později.

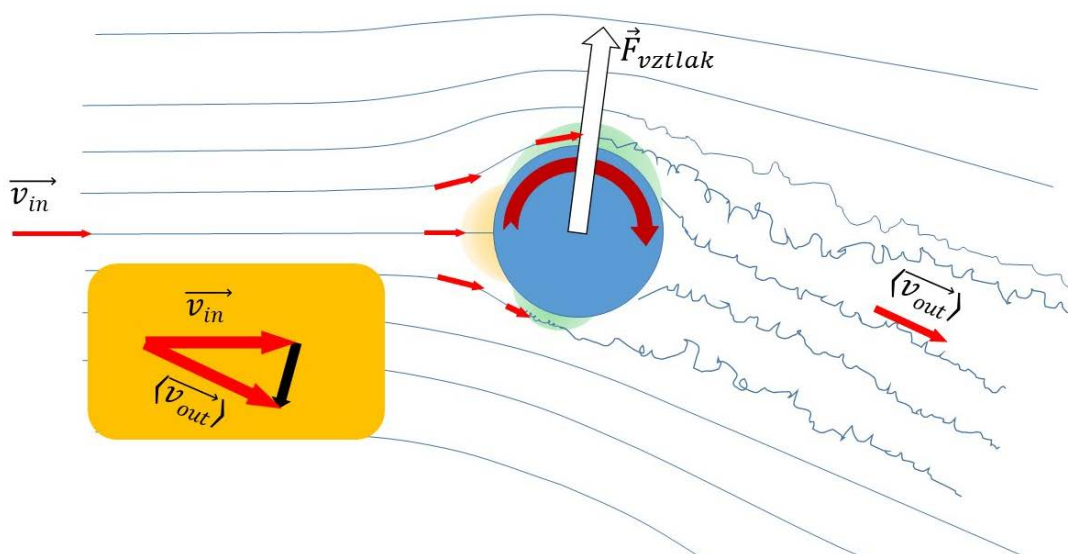
Turbulence zajistí promíchávání vrstvy povrchem silně bržděné s těmi vzdálenějšími, méně zbrzděnými. Tímto mechanismem získává přilehlá vrstva energii a může doběhnout dál do protitlaku.

Čtenáře může ale poněkud zmást, jak to, že by rychleji se pohybující vzduch měl kopírovat zakřivený povrch, zatímco pomalý ne, když přece při průjezdu zatáčkou to funguje právě obráceně. Odpověď na otázku, proč v určité situaci „nevyletí rychleji se pohybující vzduch“ ze zatáčky, zatímco „pomalý“ ano, je poměrně komplikovaná a mimo rámec tohoto článku. Souvisí s Coandovým efektem, který je poměrně podrobně popsán např. v [8].

Obtékání rotujícího válce

Rotující válec je ten případ, kdy se mezní vrstva vyvíjí na straně povrchu pohybujícího se ve směru proudění odlišně než mezní vrstva na straně druhé, kde se povrch válce pohybuje vůči vzduchu obráceně. Tam, kde je povrch válce v pohybu v souhlasném směru s prouděním, budou ztráty kinetické energie v mezní vrstvě menší a vzduch doběhne po

zadní straně válce dál, než na opačné straně, kde budou ztráty naopak větší. Proud vzduchu se stočí na jednu stranu. Teď zbývá aplikovat třetí Newtonův zákon a porovnat zjištěný směr silového působení s experimentem. Výsledný silový efekt je v souladu s tzv. normálním Magnusovým efektem, viz obr. 3.



Obr. 3. Obtékání rotujícího válce – schematicky.

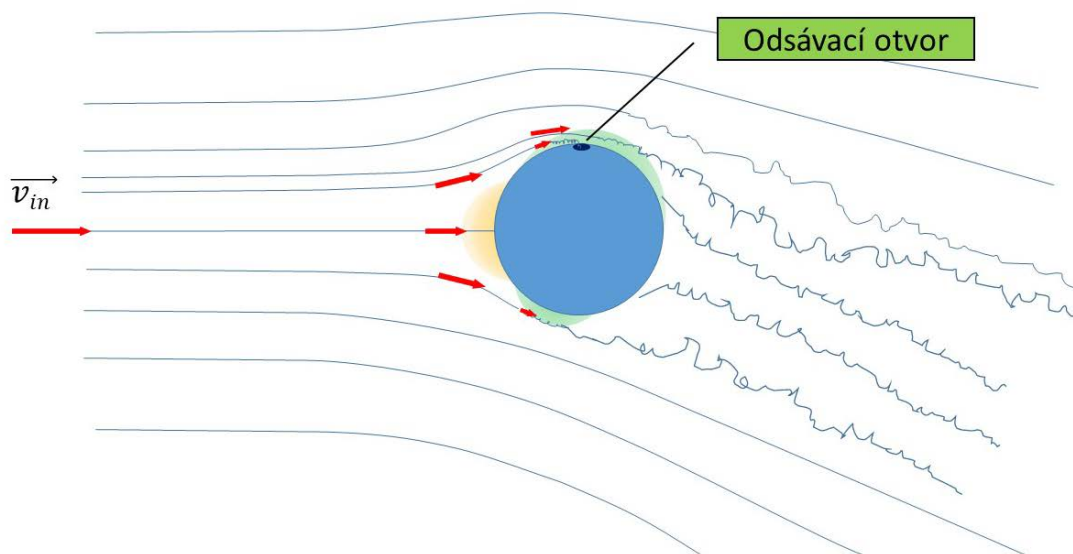
Negativní Magnusův jev

Bohužel ve všech případech to tak jednoduché není. Pro určité kombinace aerodynamických parametrů, jako je hladkost povrchu válce, rychlost otáčení, relativní rychlost válce vůči vzduchu a Reynoldsovo číslo, nastává silový efekt opačný, proud vzduchu se odtrhne dříve na té straně, kde je relativní rychlost povrch-vzduch menší a tedy i tření je menší.

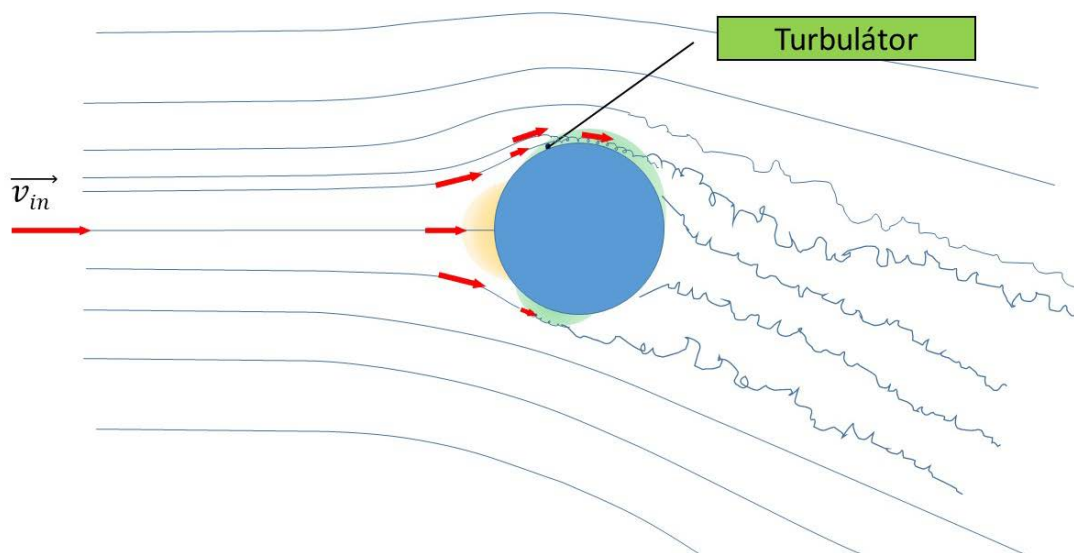
Existence negativního Magnusova jevu ilustruje problematičnost kvalitativních výkladů aerodynamických jevů. S aparaturou, která je předmětem tohoto textu, pozorován nebyl. Rozbor negativního Magnusova jevu je mimo rámec tohoto článku.

Vliv odsávání a turbulátoru

Vliv odsávání (viz obr. 4) je zřejmý, odstraněním kriticky zpomalené mezní vrstvy k odtržení dojde později, podobného efektu dosáhneme vygenerováním dostatečně jemné turbulence promíchávající brzděnou přilehlou vrstvu se vzdálenější, méně brzděnou, viz obr. 5.



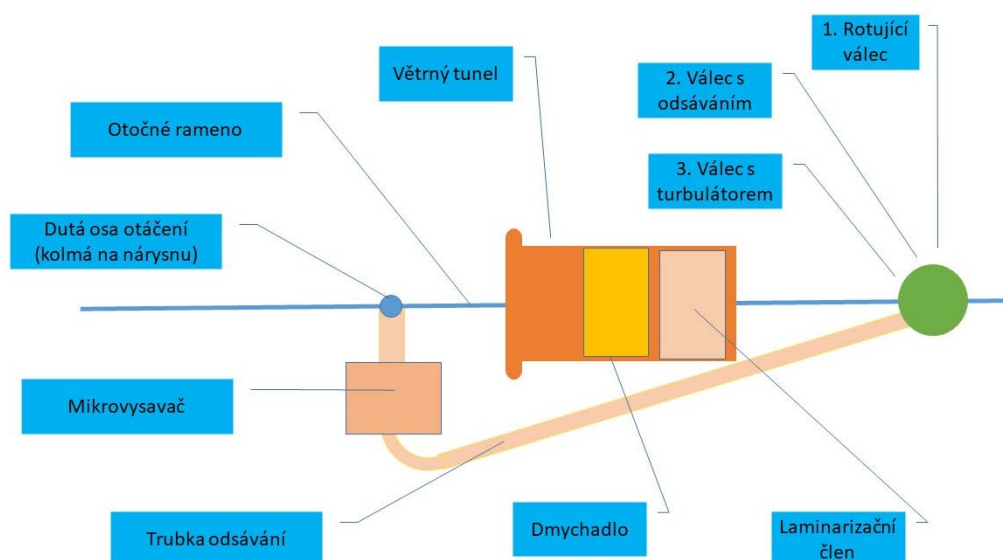
Obr. 4. Vliv odsávání – schematicky.



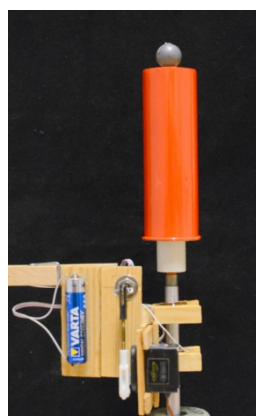
Obr. 5. Vliv turbulátoru – schematicky.

Konstrukce aparatury

Ve všech třech případech (rotace, odsávání, turbulátor) mají válečky stejný průměru 28 mm a umísťují se na otočné rameno. Délka ramene je podle montáže cca 45 cm. Větrný tunel může být umístěn jak na rameni, tak na nezávislém stojanu. Druhá možnost umožňuje snadnou čitelnost efektu, otáčení a změnu směru otáčení nelze přehlédnout. Na druhé straně mohou vzniknout jisté pochybnosti co do interpretace pozorovaného efektu, protože reakční síly větrného tunelu nemusí být nulové, stejně tak vytváří moment síly i změna působíště aerodynamického odporu válečku. Zařízení je citlivé i na dvojici sil. Například při rozběhu válce by mělo být pozorovatelné roztáčení celé točny v opačném směru. Moment setrvačnosti válečku je však natolik malý, že tento efekt nebylo potřeba kompenzovat (druhým, opačně zapojeným motorkem).



Obr. 6. Schéma aparatury.



Obr. 7. Rotační váleček.

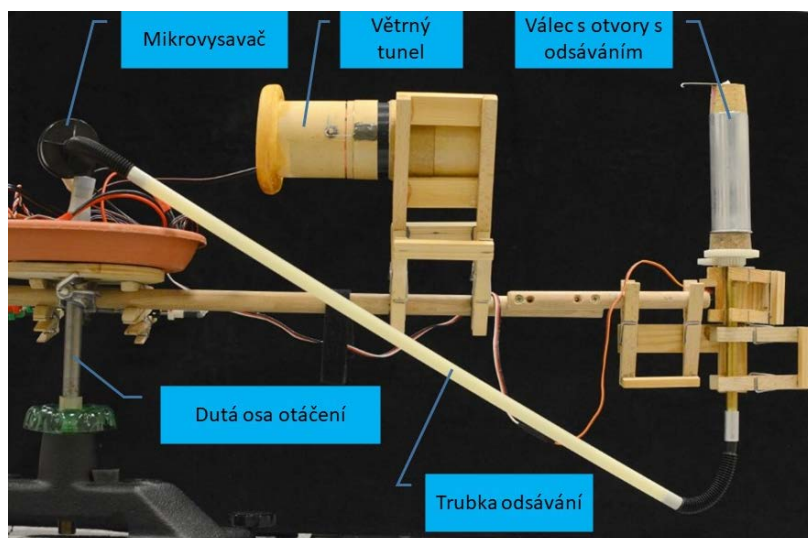
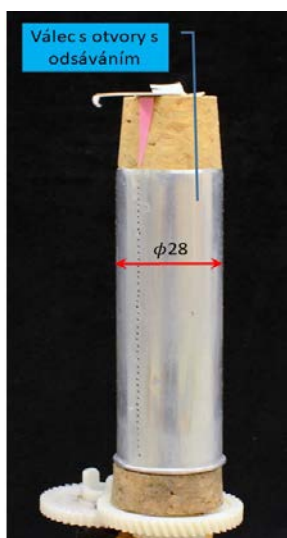
Odsávání

Odsávání je uskutečněno soustavou 45 otvorů o průměru 0,6 mm ve vertikální linii s průměrnou roztečí 1,75 mm. Odsávací podtlak zajišťuje miniaturní vysavač na čtyři AA články určený původně k čištění elektroniky. Čerpadlo je možné dálkově zapínat a vypínat. Odstředivé čerpadlo generuje na 4 AA články při úplném zaškrcení vstupu podtlak asi 1000 Pa, při čerpání válečku s otvory asi 900 Pa. Při tom odsává $9 \pm 10 \%$ l vzduchu/min. Na tři AA články vytváří při čerpání válečku podtlak asi 450 Pa při odsávaném množství vzduchu $6,5 \pm 10 \%$ l vzduchu/min. Je umístěno horizontálně a při rozběhu tedy nemění moment hybnosti ve směru osy točny. Vystupující vzduch je vyveden dutou hřídelí točny a nepůsobí tedy na točnu momentem sil.

Geometrické poměry a rozměry jednotlivých prvků aparatury nejsou pro její funkci kritické. V aerodynamice (podzvukových rychlostí) rozhoduje o podobnosti Reynoldsovo číslo, které je pro předmětnou aparaturu poměrně malé,

$$Re = \frac{\rho * D * v}{\mu} \approx \frac{28 * 10^{-3} * 5,6}{16 * 10^{-6}} \approx 9800$$

a je otázka, jak by to dopadlo, kdyby se aparatura dále výrazněji miniaturizovala.



Obr. 8. Váleček s odsáváním.

Obr. 9. Aparatura s válečkem s otvory a odsáváním.

Ovládání aparatury

Celé zařízení je dálkově ovládané 4 kanálovou modelářskou soupravou HITEC Laser4, pracující na kmitočtu 40,765 MHz. Regulovat lze otáčky dmychadla větrného tunelu po krocích, pro většinu experimentů byla rychlost vzduchu nastavena na 5,6 m/s (s přesností na 5 %). Váleček se otáčí rychlostí 1200 otáček/minutu. Dálkově lze ovládat zapnutí vypnutí a směr otáčení válečku. U čerpaného válečku i válečku s turbulátorem se dálkově ovládá orientace sacích otvorů nebo turbulátoru vůči proudu vzduchu (pozice 0° je sacími otvory nebo turbulátorem proti nabíhajícímu proudu vzduchu pozice, 90° kolmo na něj).

Turbulátor

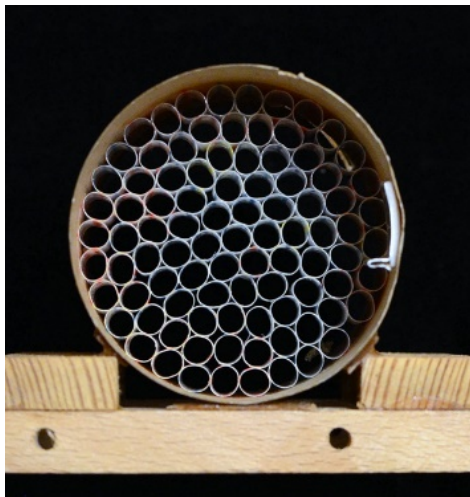
Turbulátor je tvořen dvěma vlákny o průměru 0,6 mm natažených na povrchu axiálně těsně vedle sebe. Pozice turbulátoru je indikována pointerem.



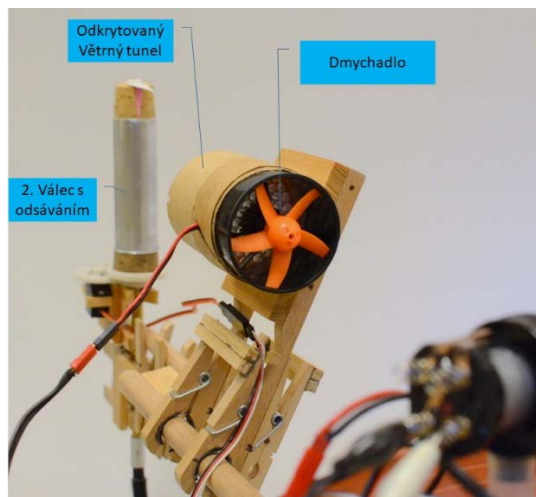
Obr. 10. Váleček s turbulátorem.

Větrný tunel

Ve větrném tunelu je vzduch urychlován modelářským dmychadlem o vnitřním průměru 50mm a hmotnosti pouhých 30 g. Plášť tunelu je vyroben laminováním z papíru a je do něho vlepena pláštěv ze slánek na limonádu o průměru 5 mm a délce 16 mm. Tato pláštěv usměrňuje proudění, ale nezabrání turbulenci, proto lze očekávat, že efekty, které předpokládají velmi nízkou turbulenci prostředí, nebudou fungovat, např. negativní Magnusův efekt.



Obr. 11. Usměrňovač proudění.



Obr. 12. Odkrytovaný větrný tunel.

Experiment

Vyvážení točny

Pozornost je třeba věnovat vyvážení točny a nastavení vertikální pozice osy otáčení. Pokud by byla točna dokonale vyvážená, na svislosti osy otáčení by nezáleželo. Ale protože není možné dostatečně přesně provést jedno nebo druhé, zabránit kývání (s velmi dlouhou periodou) lze jen nastavením obojího.

Seřízení větrného tunelu a válečku

Platí stejně pro všechny tři varianty tj. rotace, odsávání a turbulátor. Nejprve se nastaví pozice tunelu tak, aby jeho tah při maximálních otáčkách dmychadla nevytvářel měřitelný moment. Pak se nastaví pozice válečku, aby se točna neroztáčela jak při malém, tak při velkém výkonu dmychadla.

Magnusův efekt

Proud vzduchu se nastaví na rychlost 5,6 m/s. Vyšší rychlost už efekt zesiluje jen málo. (Pozn.: není jasné proč. Příčina spočívá pravděpodobně v tom, že na rozdíl od pohybu rotujícího válce v nekonečném prostředí, kde by měla vztahová síla narůstat s rychlostí lineárně, zde máme úzký nehomogenní jemně turbulentní proud vzduchu s turbulencí na rozhraní. S rostoucími otáčkami dmychadla se nemění jen rychlost proudu vzduchu, ale i jeho profil, i turbulence.) Dálkovým ovládáním se zapne rotace válečku postupně

v jednom a po chvíli v druhém směru. Točna se roztáčí ve směru opačném, než je rotace válečku, což odpovídá Magnusovu efektu.

Experiment s odsáváním

Pro experiment s odsáváním je potřeba vyměnit koncový modul rotujícího válečku za odsávací modul. Točna se opět vyváží popsáním způsobem. S pozicí sacích otvorů kolmo k ose aerodynamického tunelu (pozice 90°) při zapnutém sání a vypnutém větrném tunelu se ověří, že odsávání samo o sobě negeneruje žádný parazitní silový moment. V proudu vzduchu při optimální poloze odsávacích otvorů vzniká výrazný vztlak, což se projeví roztáčením točny. Točna se roztáčí na tu stranu, kde vlivem odsávání zůstane proudění déle přilehlé. Přetočením válečku otvory na druhou stranu se dosáhne reverzace efektu. Maximální efekt nastane pro pozici kolem 90° . Vypnutím odsávání efekt zmizí.

Experiment s turbulátorem

Pro experiment s turbulátorem se vymění váleček s otvory za váleček s turbulátorem. Pozice se měří stejně jako u odsávaného válečku. Maximum efektu nastává pro pozici turbulátoru v rozmezí úhlů přibližně 45° až 60° . Vzniká vztlak na tu stranu, kde turbulátorem modifikovaná mezní vrstva zůstává déle přilehlá.

Diskuse

Nejčastější námitka proti tomuto způsobu demonstrace výše zmíněných jevů se týká možnosti falešných efektů způsobených tím, že točna je citlivá na momenty sil, které nemají s Magnusovým efektem a vztlakem na válci nic společného a (z principu) na dvojici sil, které by v případě umístění válečku např. na koleje nehrály žádnou roli. Pokud je aparatura dobře seřízena, jsou tyto parazitní momenty výrazně slabší, což ale není na první pohled zřejmé. Podpořit toto tvrzení rozbořem a experimenty znamená si s tím tak zvaně pohrát a zabere to víc času.

Literatura

- [1] Bernoulli's principle. Dostupné na: https://en.wikipedia.org/wiki/Bernoulli%27s_principle
- [2] Landau, Lifshits: *Fluid Mechanics* Pergamon Press 1987 p 8-9. Dostupné na: <https://users-physics.au.dk/srf/hydro/Landau+Lifschitz.pdf>
- [3] Jost Seifert: *A review of the Magnus effect in aeronautics*. Progress in Aerospace Sciences 55(2012), p. 17-45. Dostupné na: <http://www.homepages.ed.ac.uk/shs/Climatechange/Flettner%20ship/Seifert%20Flettner%20apps.pdf>
- [4] Magnus effect. Dostupné na: https://en.wikipedia.org/wiki/Magnus_effect
- [5] Fluids eBook. Dostupné na: https://www.ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=fl&chap_sec=07.4&page=theory

- [6] Potential flow around a circular cylinder. Dostupné na:
https://en.wikipedia.org/wiki/Potential_flow_around_a_circular_cylinder
- [7] Mehmet Ishak Yuce, Dalshad Ahmed Kareem: A Numerical Analysis of Fluid Flow Around Circular and Square Cylinders. Dostupné na:
https://www.researchgate.net/publication/305876539_A_Numerical_Analysis_of_Fluid_Flow_Around_Circular_and_Square_Cylinders
- [8] Coandă effect. Dostupné na: https://en.wikipedia.org/wiki/Coand%C4%83_effect