

Vzhůru do oblak

ZDENĚK BOCHNÍČEK

Přírodovědecká fakulta MU, Brno

Abstrakt

Příspěvek se nejdříve věnuje vzniku aerodynamického vztlaku a nabízí dvě možná netradiční vysvětlení jeho existence. Oba výklady využívají pouze Newtonovy pohybové zákony a obejdou se bez Bernoulliovy rovnice. Jednoduchost argumentace umožňuje jejich využití i na střední škole.

V dalším textu je popsán let ptáků, význam mávání křídel a V formace letu. Při popisu letu hmyzu jsou komentovány příčiny odlišností mezi malými a velkými letci a elementárně vyloženy hlavní mechanismy, které u malých letců zvyšují vztlakovou sílu nad hodnotu obvyklou u větších ptáků a letadel.

Příloha textu upozorňuje na některá úskalí při interpretaci Bernoulliovy rovnice.

Úvod

Člověk od nepaměti toužil napodobit ptáky a létat. Známy je mytologický příběh o Daidalovi a Ikarovi i řada naivních středověkých úvah a snad i pokusů o létání vlastními silami. Bylo však nutné nejprve dosáhnout určitého technického pokroku, aby se člověk dokázal ptákům nejen vyrovnat, ale vysoce je překonat.

V příspěvku se nejprve budeme věnovat základním fyzikálnímu popisu interakce letícího objektu se vzduchem, a pak si všimneme některých zvláštností letů ptáků a hmyzu.

Letící nebo plovoucí objekt musí pro zajištění svého pohybu vyřešit dva základní problémy:

- 1) Kompenzaci tíhové síly silou, která míří svisle vzhůru a kterou nazýváme silou vztlakovou.
- 2) Získat vodorovnou sílu pro dopředný pohyb, tedy vodorovné zrychlení a překonání aerodynamického odporu.

Při pohybu po souši je situace jednoduchá a obě potřebné síly přirozeně zajistí opora pevné podložky. Letec nebo plavec však nemá k dispozici nic jiného, než tekutinu ve svém okolí a obě síly tedy musí realizovat pouze interakcí s touto tekutinou.

Vztlaková síla

V zásadě jsou dvě základní možnosti, jak získat vztlakovou sílu

1) Statický vztlak

Statická vztlaková síla je popsána velmi dobře známým Archimédovým zákonem

$$F = V\rho g$$

kde jednotlivé symboly mají zřejmý význam. Se statickým vztlakem se však mohou spokojit pouze plavci pohybující se ve vodě. Statická vztlaková síla ve vzduchu za běžných podmínek dosahuje jen asi tisícinu hodnoty potřebné pro let libovolného živočicha a žádný živý organismus není schopen samostatně letět pouze s využitím Archimédova zákona. Jen výrobky člověka, balóny a vzducholodě, toto dokáží a to tak, že malá hustota vzduchu je kompenzována velkým objemem lehkého letícího objektu.

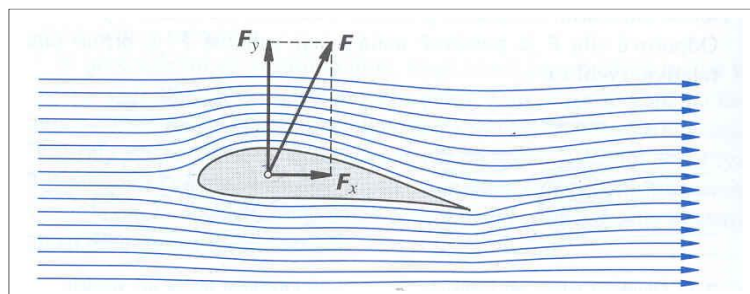
2) Dynamický vztlak

Dynamický vztlak již vyžaduje obtékání letícího objektu, tedy vzájemný pohyb letce a okolního vzduchu. Standardním příkladem, který se pro výklad dynamického vztlaku používá, je asymetrický křídlový profil.

Obrázek 1 je kopií z učebnice Mechanika pro gymnázia [1].

Výklad vztlaku bývá v učebnicových textech součástí partie mechanika tekutin a v argumentaci se využívá Bernoulliovy rovnice:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p = \text{konst}$$



Obr. 1: Obvyklé znázornění obtékání křídla. Proudnice jsou zde zakresleny chybně, viz text.

Nad křídlem se vzduch pohybuje vyšší rychlostí než pod křídlem, tedy nad křídlem je menší tlak a rozdíl tlakových sil na spodní a horní plochu křídla dává výslednou vztlakovou (a odporovou) sílu.

Tato argumentace je v podstatě v pořádku, problém je, jak zdůvodnit rozdílnou rychlost vzduchu pod a nad křídlem. Dnes již jen výjimečně, ale stále, můžeme najít dva základní způsoby, oba chybné¹.

a) Teorie stejného času

Vzhledem k asymetrii křídlového profilu musí vzduch nad horním povrchem urazit větší vzdálenost, a proto musí letět vyšší rychlostí.

Tento výklad předpokládá, že molekuly vzduchu musí nad křídlem i pod křídlem proletět za stejný čas. Ale k tomuto předpokladu není vůbec žádný důvod a je zcela neobhajitelný. Ve skutečnosti vzduch nad křídlem doopravdy letí rychleji, ale mnohem rychleji, než by odpovídalo teorii stejného času, viz například [2]. Nesmyslnost této

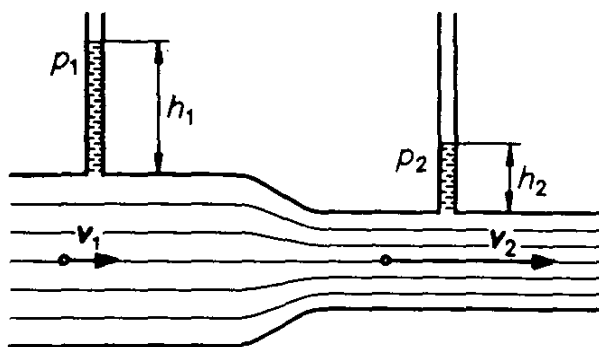
¹ Bernoulliova rovnice bývá někdy mylně interpretována a chybně jsou pak i vysvětlovány některé oblíbené experimenty s proudící tekutinou. Bližší komentář najde čtenář v příloze na konci tohoto textu.

argumentace plyne i z toho, že by tímto způsobem nebylo možné vysvětlit například reálně existující vztlak na rovné skloněné desce.

b) Teorie zúženého průřezu

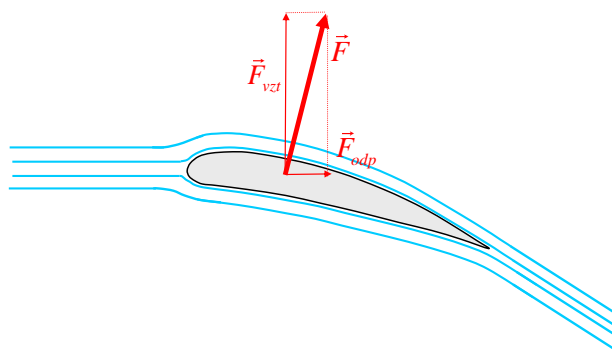
Nad křídlem jsou proudnice zhuštěny, což připomíná situaci proudění v zužující se trubici, kdy lze snadno vysvětlit vyšší rychlost v užší části pomocí rovnice kontinuity, viz obrázek 2.

Zde skutečně v místě hustších proudnic můžeme očekávat vyšší rychlost, avšak zúžená „trubice“ není shora nijak ohraničena a nelze změnu rychlosti z rovnice kontinuity určit. Navíc, podobně jako v předchozím případě, takto nelze vysvětlit vztlak na skloněné rovné desce, kde naopak nad deskou se průřez podél desky zvětšuje, což by podle rovnice kontinuity znamenalo pokles rychlosti (a nárůst tlaku).



Obr. 2: Ilustrace rovnice kontinuity a Bernoulliovy rovnice.

V dalším nabídneme dva různé způsoby výkladu vztlaku na křídlovém profilu, které jsou velmi jednoduché, argumentačně přímočaré a nesporné. Překvapivě však žádný z nich nevyužívá Bernoulliovu rovnici.



Obr. 3: Proudnice se za křídlem stácejí směrem dolů.

Základem obou výkladů je fakt, který je obvykle ve středoškolských učebnicích opomíjen: Při obtékání křídlového profilu se proudnice vzduchu stáčí směrem dolů, viz obrázek 3, respektive experimentální potvrzení [3].

Na obrázku 1 jsou tedy proudnice zakresleny chybně a je skutečně paradoxní, že to, co je pro existenci vztlakové síly naprosto klíčové, je v základních učebnicích zcela ignorováno.

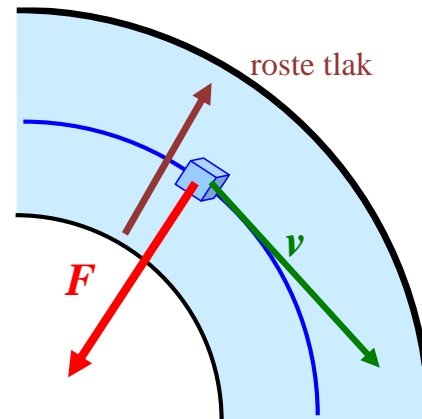
A) Zatáčení proudnic a dostředivá síla

Uvažujme tekutinu proudící v zahnutém potrubí, neměnného průřezu, viz obrázek 4. Myšlený objemový element se pohybuje po kruhové trajektorii a musí tedy na něj působit dostředivá síla. Zdrojem silového působení je však pouze okolní tekutina a dostředivá síla bude mít správný směr pouze v případě, kdy směrem od středu bude narůstat tlak.

Při obtékání křídlového profilu se proudnice nad i pod křídlem stáčí stejným směrem. Tedy v obou případech směrem vzhůru (a dozadu) roste tlak. Představme si, že se zesponu přibližujeme ke křídlovému profilu. Začínáme v místě atmosférického tlaku, a jak se ke křídlu blížíme, tlak roste. Pod křídlem tedy musí být přetlak. Obdobně při vzdalování od horní plochy křídla směrem vzhůru tlak roste, ale ve větší vzdálenosti je tlak atmosférický. Nad křídlem tedy musí být podtlak. Rozdíl tlaků pod a nad křídlem je příčinou existence vztakové síly.

B) Zatáčení proudnic a třetí Newtonův zákon

Druhý způsob je ještě jednodušší. Pokud křídlo stáčí proudnice vzduchu dolů, musí na vzduch působit silou směrem dolů. Tedy podle zákona akce a reakce působí vzduch na křídlo silou opačnou, tedy směrem vzhůru.



Obrázek 4: Proudění tekutiny v zahnuté trubici.

Pro existenci aerodynamického vztaku je zcela podstatné, aby křídlo, případně jiný objekt, odkláněl proud vzduchu směrem dolů. Nebo jinak řečeno: Cokoliv, co odkloní proud vzduchu dolů, nebo prostě „fouká“ vzduch dolů, má vztak. U nosného rotoru vrtulníku to všichni považujeme za samozřejmé a zcela stejné je to také u křídel ptáků nebo letadel.

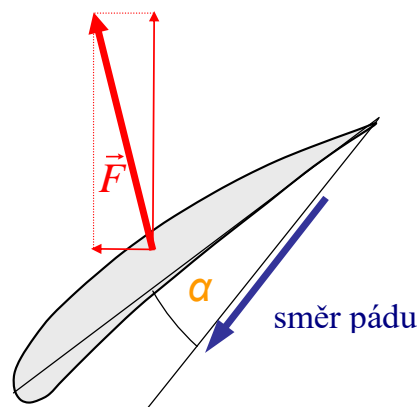
Ještě zbývá odpovědět na otázku: „A proč vlastně křídlo odklání proud vzduchu dolů?“ Při nenulovém úhlu náběhu křídla, nebo i rovné desky je jasné, že vzduch proudící pod křídlem je nucen stočit směr svého pohybu dolů. Ale nad křídlem to jasné není; proudnice by po dosažení nejvyššího bodu mohly dále postupovat vodorovně. Skutečnost, že proudnice sledují vyklenutý horní povrch křídla je tzv. Coandův jev, viz například [4]. Proudící sloupec vzduchu díky viskozitě strhává molekuly okolního vzduchu. Pokud vzduch proudí nad pevným povrchem, tak tímto strháváním vytváří podtlak a proud vzduchu je podtlakem nasáván k povrchu. Je-li povrch vyklenutý, tak se proudící vzduch snaží povrch sledovat, což odklání směr jeho pohybu tak, jak se děje nad křídlem.

Síla pro dopředný pohyb

Letouny zajišťují dopřednou sílu vrtulí nebo proudovým motorem. Pták/bezmotorový letoun má jen křídla, pomocí kterých musí získat nejen vztak, ale i dopřednou sílu. Výslednice vztakové a odporové síly míří při vodorovném letu svisle dozadu. Pro udržení vodorovného letu konstantní rychlostí je třeba, aby výslednice směřovala svisle vzhůru, a nebo dokonce byla skloněna dopředu

(např. pro překonání aerodynamického odporu trupu letadla/ptáka). Nejjednodušší způsob, jak to udělat je celý obrázek 3 sklonit. Dostaneme tak situaci z obr. 5. Reálně to znamená, že letec se skloněným křídlem trvale padá mírně šikmo dolů. A takto lze realizovat i velmi dlouhý let. Je totiž nutné padat vzhledem ke vzduchu a ve stoupavých vzdušných proudech může být vzhledem k zemi takový pád vodorovný nebo i stoupavý let.

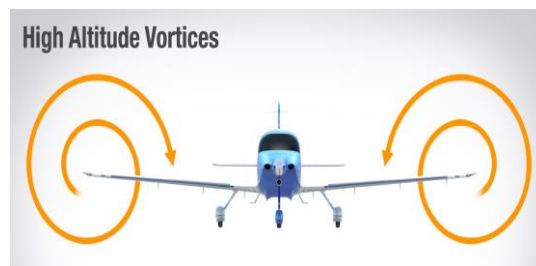
Druhý způsob je mávání křídel – nejběžnější let ptáka. Mávnutí dolů je vlastně krátký pád se skloněným křídlem. Vhodným nastavením úhlu náběhu je možné získat dopřednou složku síly i při pohybu křídla vzhůru.



Obrázek 5: Sklonění situace z obr. 3.

Indukovaný vír a V formace letu

Je známo, že stěhovaví ptáci při dlouhých letech zaujímají tzv. V formaci. Využívají tak tzv. indukovaných vírů, které vznikají na koncích křídel. Příčina vzniku těchto vírů je jednoduchá. Pod křídlem je přetlak a na nad křídlem podtlak. Vzduch spontánně proudí z míst většího tlaku do míst tlaku menšího, na koncích křídel se tak roztáčí vír odspodu křídla směrem vzhůru dle obr. 6. Vně křídla je oblast, kde ve víru vzduch stoupá a do té pozice se usadí další, vzadu letící pták. Stoupavý proud tak usnadňuje zadnímu ptáku let. Uvádí se, že let ve V formaci prodlužuje dolet až o 70%. Je zajímavé, že let ve V-formaci pomáhá i ptákovi, který letí vpředu. Působivé zobrazení indukovaných vírů lze nalézt zde [6].



Obrázek 6: Vznik indukovaného víru. Převzato z [5].

Se vznikem indukovaného víru je spojen tzv. indukovaný odpor, který zvyšuje celkový aerodynamický odpor při letu. Zadní pták ve V-formaci potlačuje vír předního ptáka a tím snižuje jeho letový odpor.

Indukovaný odpor je významným nežádoucím jevem i při letu letadel. Konstrukteři jeho efekt potlačují například zahnutím konců křídel, tzv. winglety, viz obrázek 7.



Obrázek 7: Winglety na koncích křídel.

Podobný význam mají u velkých plachtících ptáků dlouhá pera na koncích křídel, která se tlakem vzduchu při letu ohýbají nahoru, a tak potlačují indukovaný vír.

Let hmyzu

Let hmyzu je v mnohém odlišný od letu ptáků a nelze jej vysvětlit teoriemi vztlaku používanými pro ptáky a letadla. Dokonce i experimentálně určené hodnoty vztlaku na reálném **statickém** hmyzím křídle dávají jen asi třetinu potřebné hodnoty.

Let hmyzu se experimentálně i teoreticky začal detailně zkoumat až na konci minulého století a dodnes není plně pochopen. Podmínky pro let hmyzu se liší ve dvou zásadních skutečnostech:

1) **Hmyz je malý** a proudění tekutin při změně měřítka nezachovává podobnost. Charakter proudění je dán tzv. Reynoldsovým číslem R , které je definováno jako

$$R = \frac{Dv\rho}{\eta}$$

kde D je charakteristický rozměr (například velikost obtékaného tělesa), v rychlost proudění, ρ hustota a η dynamická viskozita.

Zmenšení rozměrů, respektive rychlosti obtékání, má tedy obdobný důsledek jako zvětšení viskozity tekutiny.

2) **Hmyz při relativně pomalém letu rychle mává křídly.** Například včela letící rychlostí 2,5m/s mává křídly s frekvencí 250Hz. Tedy při jedné periodě mávnutí urazí dráhu 1cm. To znamená, že při opětovném návratu křídla do některé polohy se vrací do místa, ve kterém je vzduch ještě rozvířen předchozím mávnutím. Navíc při rychlém pohybu křídel je proudění silně nestacionární, což přináší nové efekty. Naproti tomu obtékání křídla ptáka či letadla je možné považovat za stacionární a tito letci stále prolétávají „čerstvým“ vzduchem.

Detailní výklad fyziky hmyzího letu lze nalézt například zde [7].

Při letu hmyzu byly identifikovány tři významné mechanismy, které mění vztlak a které u větších letců nemají analogii.

A) Neodtržení víru od náběžné hrany

Při zvyšování úhlu náběhu křídla zprvu výrazně roste vztlak, avšak odpor se zvětšuje jen málo. Při jistém úhlu náběhu již proudnice přestanou sledovat horní vyklenutý povrch křídla a odtrhnou se za vzniku víru. Vztlak prudce klesá a odpor roste. Pro velká křídla k tomuto efektu dochází při poměrně malých úhlech, asi $10^\circ - 15^\circ$ a například pro letadlo je odtržení proudnic havarijní stav.

Hmyz je schopen letět s mnohem většími úhly náběhu, až 45° , a takto získá větší vztlak. Při velmi krátkém mávnutí křídel nemá vznikající vír dost času, aby se odtrhnul od

křídla, ve tvořícím se víru vzduch stále nad křídlem zatáčí správným směrem, což zachovává potřebný vztlak.

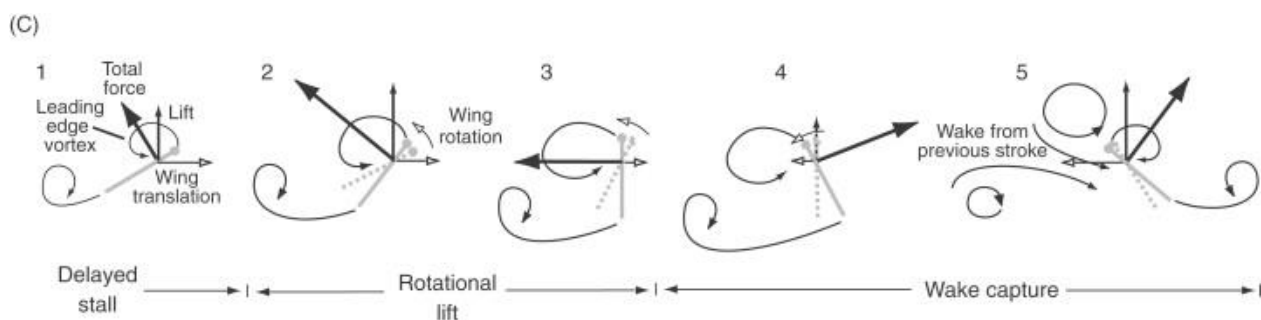
B) Vztlak jako důsledek rotace

Při mávání křídly „tam a zpět“ je nutné někde v blízkosti amplitudy křídlo otočit, aby i při zpětném pohybu mělo křídlo vhodný úhel náběhu. Z experimentálních měření na zvětšeném modelu křídla, které mávalo v oleji – prostředí s vyšší viskozitou, plyne, že vztlak je velmi závislý na fázovém posuvu mezi máváním a otáčením křídel. Pokud se křídla otáčí v předstihu před mávnutím, takže na počátku zpětného pohybu je otoční křídla prakticky ukončeno, výsledný vztlak se zvětší. Naopak při opožděném otočení je se vztlak snižuje. Malou změnou časování fázového posuvu tak lze dosáhnout významné změny vztlaku, což dává hmyzu možnost dobře manévrovat.

C) Využití energie předchozího víru

Díky rychlému mávání se křídla vrací do místa, ve kterém existují víry vzniklé při předchozím mávnutím. Proud vzduchu mezi víry podfukuje křídlo, a tak přispívá k většímu vztlaku.

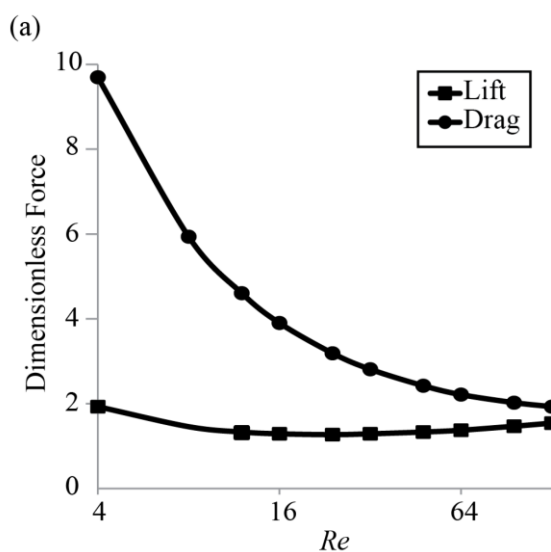
Všechny tři mechanismy jsou znázorněny na obr. 8.



Obrázek 8: Ilustrace tří hlavních mechanismů zvýšení vztlaku 1 Neodtržení vírů náběžné a odtokové hrany (Delayed stall), 2 Změna vztlaku způsobená rotací křídla (Rotational lift), 3 Podfouknutí křídla z předchozího mávnutí (Wake capture). Převzato z [8].

Nejmenší letci

Pro zcela nejmenší letce – hmyz s rozpětím křídel řádu desetin milimetru – je situace zcela odlišná. Pro velmi malá Reynoldsova čísla koeficient odporu prudce roste, zatímco koeficient vztlaku zůstává v podstatě konstantní, viz obrázek [9]. Výhodnější je tedy využívat odporové síly namísto vztlakové. Pohyb křídel těchto letců připomíná veslování, kdy se při pohybu dolů křídlo nastaví naplocho, zatímco při zpětném pohybu je plocha křídla tečná k rychlosti. Pro tento způsob letu není potřeba, aby křídlo tvořilo aerodynamickou plochu podobnou blanitým křídlovům větších druhů hmyzu. Křídla tvoří trásně či brvy, což dalo název řádu trásnokřídlí nebo čeledi brvuškovití. Srovnání způsobu letu hmyzu s různými Reynoldsovými křídly lze nalézt například v [9].



Obr. 9: Závislost vztlakové (lift) a odporové (drag) síly na Reynoldsově čísle. Převzato z [10].

Závěr

Aerodynamika její aplikace v živé přírodě a technice jsou zajímavým a atraktivním tématem, které může přiblížit výuku fyziky reálnému životu. Ukazuje se, že vznik vztlaku na křídlovém profilu lze vysvětlit pouze na základě Newtonových pohybových zákonů a není třeba obvyklé argumentace využívající Bernoulliovu rovnici. Výklad je zcela přímočarý a nesporný, prostý slabých míst, která lze nalézt ve standardním učebnicovém postupu.

Dynamika viskózní tekutiny je velmi obtížná část fyziky, přesto lze některé její důsledky při popisu letu ptáků, hmyzu i těch nejmenších letců elementarizovat na středoškolskou úroveň.

Příloha: Bernoulliho rovnice a její použití

Jednoduchým důsledkem Bernoulliho rovnice je fakt, že v místech s vyšší rychlostí proudění je nižší tlak. Tento závěr však neplatí zcela obecně a nelze říci, že v místě s větší rychlostí proudění je vždy menší tlak. Tvzení platí, pokud posuzujeme situaci na jediné proudnici, případně pokud srovnávané proudnice vycházejí ze stejných počátečních podmínek.

Interpretujeme-li Bernoulliho rovnice jako zákon zachování mechanické energie pro nestlačitelnou tekutinu, můžeme ji použít jen tehdy, pokud se energie skutečně zachovává. Bohužel ne vždy se toto respektuje a často můžeme najít případy, kdy se oblíbené a známé experimenty s proudící tekutinou vysvětlují chybně.

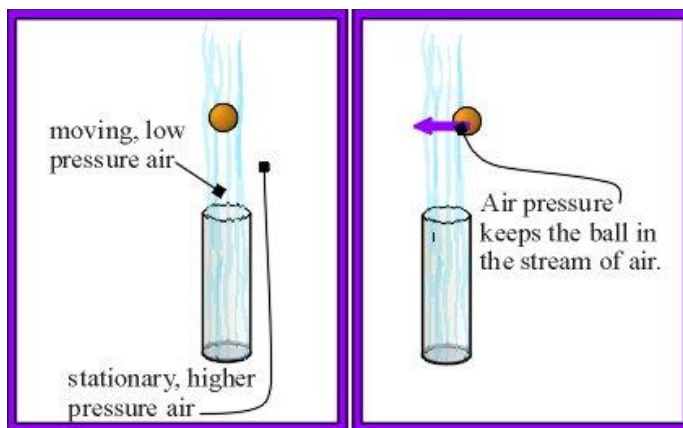
Jako jeden příklad ze všech si vyložíme experiment s míčkem levitujícím ve stoupavém proudu vzduchu (V anglických textech je tento pokus nazýván „Bernoulli ball“).

Častý výklad argumentuje Bernoulliho rovnicí tak, že v okolním klidném vzduchu je vyšší tlak, než ve vzdušném proudu. Při vychýlení z proudu vzduchu je okolním vyšším tlakem míček vrácen zpět do nízkotlaké oblasti, viz obrázek 10.

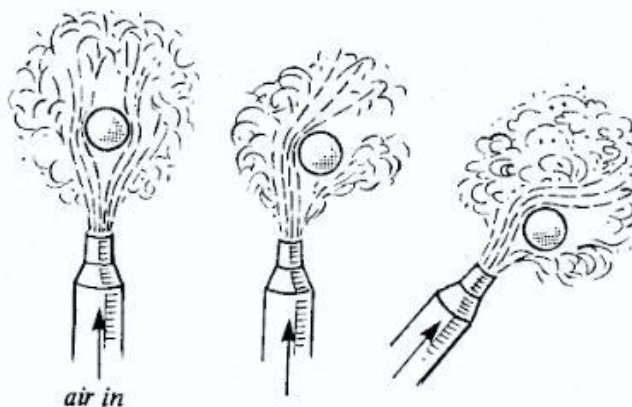
Zde však nemůžeme srovnávat stav okolního klidného vzduchu se stavem vzduchu proudícího. Vzdušný proud byl urychlen dmychadlem a jeho celková energie (vztažená na objemovou jednotku) je vyšší, než energie vzduchu okolního. Ve skutečnosti je tlak uvnitř proudu stejný, jako v okolí, což lze velmi snadno ověřit jednoduchým experimentem s U trubicí.

Pro správné vysvětlení je nutné uvážit asymetrii obtékání míčku, která nastává při relativně úzkém svazku proudícího vzduchu, viz obrázek 11. Budeme komentovat situaci na prostřední části obrázku 11.

Při vychýlení míčku ze vzdušného proudu obtéká vzduch asymetricky. Na straně, kde proud vzduchu naráží na míček více tečně, tedy vlevo, se proudnicím díky Coandově efektu daří déle sledovat



Obr. 10: Ilustrace chybného výkladu levitujícího míčku. Převzato z [11].



Obr. 11: K výkladu levitujícího míčku. Převzato z [12].

zakřivený povrch míčku, což v konečném důsledku vede k vychýlení vzdušného proudu doprava. Míček tedy svou přítomností vychýlil proud vzduchu doprava, na vzduch působil silou směrem vpravo. Podle zákona akce a reakce vzduch působí na míček silou mířící vlevo, což míček vrátí zpět do vzdušného proudu. Obdobně bychom argumentovali i v případě skloněného proudu vzduchu, na obrázku 11 napravo.

Literatura

- [1] Bednařík M. a kol., *Mechanika pro gymnázia*, Prometheus Praha, 1993.
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=iwA-pD96vxI>.
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=6UlsArvbTeo>.
- [4] <https://www.youtube.com/watch?v=AvLwqRCbGKY>.
- [5] <https://www.boldmethod.com/blog/lists/2017/02/5-factors-that-affect-vortex-strength/>
- [6] <https://www.youtube.com/watch?v=22wcTz4VMJg> (od času 2:20).
- [7] Sane S.: *The aerodynamics of insect flight*, Journal of Experimental Biology 206, 4191-4208, 2004, ke stažení na https://www.researchgate.net/publication/9037046_The_aerodynamics_of_insect_flight/link/572f5f1d08aee022975b691f/download.
- [8] <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374144-8.00109-0>.
- [9] <https://www.youtube.com/watch?v=nXOd0mE0s3c>.
- [10] Santhanakrishnan A. et al., *Flow Structure and Force Generation on Flapping Wings at Low Reynolds Numbers Relevant to the Flight of Tiny Insects*, Fluids, 3(3), 45, 2018
- [11] <https://demos.smu.ca/index.php/demos/fluid-mechanics/94-bernoulli-floating-ball>
- [12] <https://sites.google.com/site/hsa2013ana96/my-pbl-project>