
AERODYNAMIKA PROFILŮ

- 2.3 Co je a k čemu je aerodynamika
 - 2.3 Odpor profilu
 - 2.4 Vztlak profilu
 - 2.5 Průběh tlaku kolem profilu
 - 2.6 Výpočet sil působící na profil od proudu tekutiny
 - 2.7 Projevy vnitřního tření v mezní vrstvě profilu
 - 2.8 Úloha 1: Výpočet aerodynamických veličin leteckého modelu při klouzavém letu
 - 2.8 Odkazy
 - 2.9 - 2.10 Přílohy
-

autor: ŠKORPÍK, Jiří ([LinkedIn.com/in/jiri-skorpik](https://www.linkedin.com/in/jiri-skorpik))

datum vydání: Červen 2022; Zář 2025

název: Aerodynamika profilů

sborník: *fluid-dynamics.education*

provenience: Brno (Česká republika)

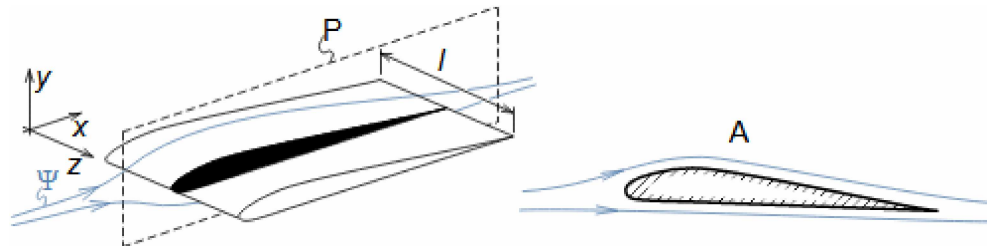
email: skorpik.jiri@email.cz

Copyright©Jiří Škorpík, 2022-2025

Všechna práva vyhrazena.

Co je a k čemu je aerodynamika

Aerodynamika vyšetřuje silové účinky proudění na obtékaná tělesa nebo kanál, ve kterém se nachází. Aerodynamika profilu je speciální oblast aerodynamiky, která zkoumá 2D obtékání těles, které mají proměnné rozměry pouze ve dvou směrech – jedná se o profilovanou desku, viz Obrázek 1. Profilem je nazýván řez profilovanou deskou. Popis geometrie profilů a pravidel pro jejich kreslení je uveden například v článku Tvary lopatek a průtočných částí lopatkových strojů [Škorpík, 2025].



1: Aerodynamický profil-příklad

P-rovina řezu; Ψ -proudnice ve vyšetřované rovině; A-znázornění vyšetřovaného profilu. l [m] délka profilové desky; x, y, z [m] souřadnice.

Nestlačitelná tekutina
Rychlost zvuku
Machovo číslo

Při nízkých rychlostech se plyn chová podobně jako kapalina, která je nestlačitelná, ale s rostoucí rychlostí se začíná projevovat vliv nízké rychlosti zvuku v plynech, které jsou v kapalinách mnohem vyšší. Rychlost zvuku je totiž rychlostí šíření tlakových poruch v tekutině. Navíc při nadzvukových rychlostech proudění může docházet k jevům souvisejícím se skokovými změnami stavových veličin plynu, ke kterým při nižších rychlostech nedochází. Nicméně stlačitelnost plynu se na proudění významně projevuje až od rychlosti cca 0,3 Mach [Kadrnožka, 1991, s. 27]. Z toho důvodu je v tomto článku popsána teorie nestlačitelného proudění a teorie stlačitelného proudění v článku Machovo číslo a jevy při proudění vysokými rychlostmi.

Odpor profilu

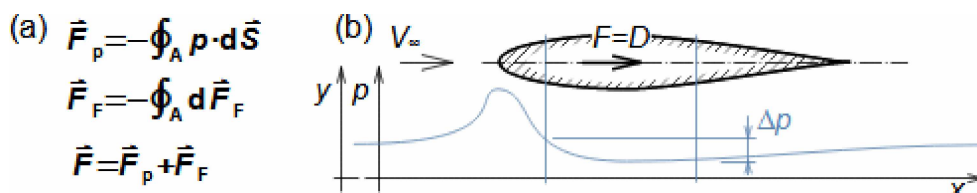
Proudění tekutiny v okolí tělesa působí na toto těleso silou od tření v mezní vrstvě a tlakovou silou od změn dynamického tlaku v okolí tělesa. tekutiny působí na obtékané těleso vzniká obtékání jakéhokoliv tělesa proudem tekutiny působí tato tekutina na těleso silou. Výsledná síla ve směru nátokové rychlosti (směr volného proudu před tělesem) se nazývá odpor.

Třecí odpor
Dynamický odpor
(Tvarový odpor)

Příspěvek k odporu od třecích sil se nazývá zkráceně třecí odpor, a od tlakových sil dynamický odpor (tvarový odpor). Výsledný odpor profilu je součtem těchto dvou sil, viz Rovnice 2a.

Základní profil
Nátoková rychlost

Na Obrázku 2b je příklad vzniku odporu při obtékání základního profilu (symetrický profil). V tomto případě veškeré síly ve směru osy- y mají nulovou výslednici, ve směru osy- x vzniká odpor. Dynamický odpor v tomto směru vznikne tak, že na nátokové straně profilu je vyšší tlak než na odtokové.



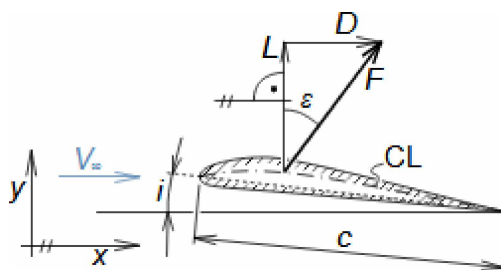
2: Princip vzniku sil na obtékáný profil

(a) rovnice síly působící na profil od proudu tekutiny; (b) příklad vzniku sil působící na profil od proudu tekutiny při obtékání symetrického profilu. V_∞ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] nátoková rychlost (rychlost před obtékáním profilem); p [Pa] statický tlak u profilu; S [m^2] povrch profilové desky; F [N] síla (index p od tlaku, index F od tření); $D=F_x$ [N] odpor; x [m] souřadnice ve směru proudění.

Vztlak profilu

Nátokový úhel
Základní profil

Jestliže se nátoková rychlost odklání od osy základního profilu (profil je do proudu vložen se sklonem) nebo je profil nesymetrický, pak může mít síla na profil F dvě složky, viz Obrázek 3. Složka ve směru nátokové rychlosti se nazývá odporem D a složka kolmá na směr proudění vztlakem L .



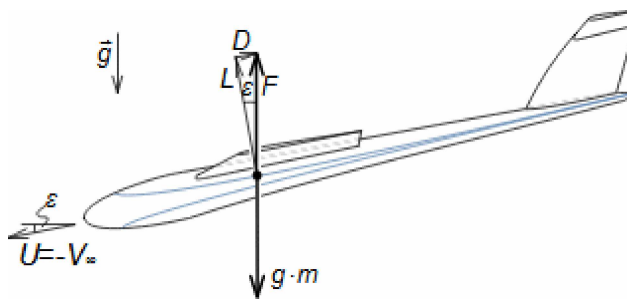
3: Definice vztlaku

CL-střední čára profilu (osa profilu) (ang. Camber line); ϵ [$^\circ$] klouzavý úhel; c [m] tětiva profilu; i [$^\circ$] nátokový úhel; $L=F_y$ [N] vztlak.

Odpor
Klouzavý úhel

Vztlak a odpor profilu jsou funkcí tvaru profilu, nátokového úhlu a Reynoldsova čísla.

Úhel mezi vztlakem a odporem profilu nazýváme klouzavým úhlem ϵ . Název klouzavý úhel pochází z klouzavého letu letounu (ustálený bezmotorový let), kdy síla F působí proti směru gravitačního zrychlení a ϵ označuje sklon vztlaku vůči gravitačnímu zrychlení, viz Obrázek 4.



4: Princip klouzavého letu

U [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] rychlost letounu; m [kg] hmotnost letounu; g [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] gravitační zrychlení.

Jestliže obtékání profilu vznikne vztlak L , pak to znamená, že tlaková diference mezi dvěma body profilu, které leží proti sobě kolmo na směr nátokové rychlosti, je různá od nuly, tj. vztlak závisí na průběhu tlaku kolem profilu.

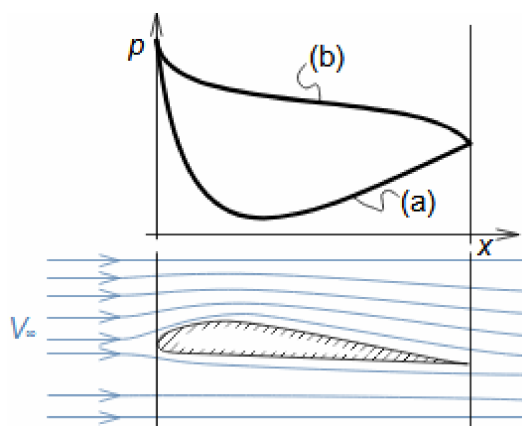
Průběh tlaku kolem profilu

Na Obrázku 5 je průběh tlaku kolem profilu, u kterého vzniká vztlak. Proto rozlišujeme přetlakovou stranu a sací stranu profilu, tedy stranu profilu v průměru s vyšším tlakem a stranu v průměru s nižším tlakem. Na sací straně profilu je průměrně nižší tlak a vyšší rychlost, protože proudění na této straně má delší trajektorie v okolí profilu než na přetlakové straně profilu.

Přetlaková strana

Sací strana

Vztlak

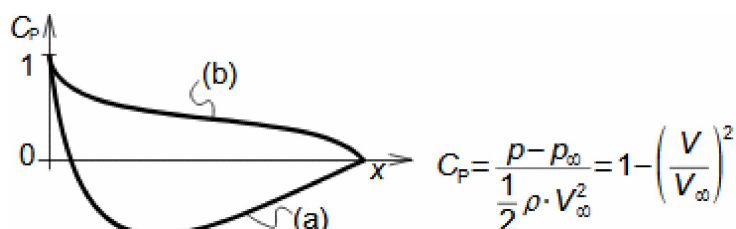


5: Změna tlaku podél osamoceneného profilu

V okolí profilu je nejvyšší tlak u nátokové hrany, jejíž stěna je téměř kolmá na nátokovou rychlost a proto v těchto místech dojde k prudkému poklesu dynamického tlaku a nárůstu tlaku statického. (a) průběh tlaku na sací straně; (b) průběh tlaku na přetlakové straně.

Tlakový součinitel

Pro popis změn statického a dynamického tlaku se používá veličina tlakový součinitel (Vzorec 6). Tlakový součinitel profilu C_p popisuje jak se mění statický tlak v okolí profilu na úkor dynamického před profilem. Tlakový součinitel profilu může dosahovat maximální hodnoty 1 (veškerý dynamický tlak se transformuje na statický $p_{\max} = p_{\infty} + 0,5 \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2$) a jestliže je záporný, pak to znamená, že ve vyšetřovaném bodě poklesl tlak pod tlak před profilem p_{∞} , respektive rychlost tekutiny je větší než nátoková rychlost (Obrázek 6).



6: Tlakový součinitel

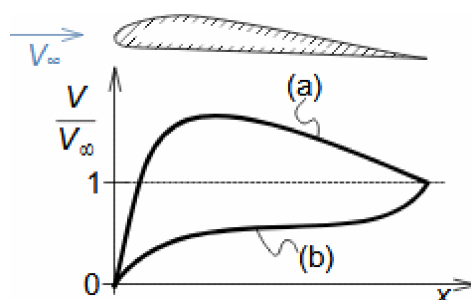
(a) průběh tlakového součinitele na sací straně; (b) průběh tlakového součinitele na přetlakové straně. C_p [1] tlakový součinitel profilu [Nožička, 1967, s. 27]; ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] hustota; V [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] rychlost ve vyšetřovaném místě v okolí profilu; p_∞ [Pa] tlak před profilem.

Xfoil

Změna tlaku v okolí profilu se měří pomocí otvorů v sací i přetlakové straně. Konkrétní hodnoty tlakového součinitele z měření jsou uvedeny např. v [Kousal, 1980, s. 142]. Existují ale i velmi přesné numerické modely profilu, které dokaží měření nahradit, například software Xfoil.

Rychlost kolem profilu

Tlakový součinitel lze také použít při výpočtu rychlosti V v okolí profilu (Obrázek 7) pomocí Vzorce 6.



7: Průběh rychlosti podél osamoceneného profilu

(a) situace na sací straně; (b) situace na přetlakové straně.

Výpočet sil působící na profil od proudu tekutiny

Vztlak

Součinitel vztlaku

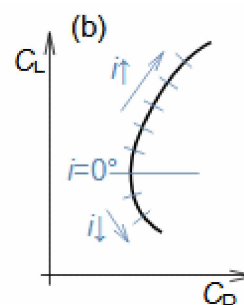
Odpor

Součinitel odporu

Polára profilu

Výpočet vztlaku pomocí průběhu tlakového součinitele C_p kolem profilu je komplikované a nezahrnuje vliv tření (viz Příloha 2), proto se v technické praxi vztlak počítá pomocí tzv. součinitele vztlaku C_L , který lze z tlakového součinitele určit. Součinitel vztlaku je definován tak, aby vztlak byl součinem dynamického tlaku před profilem a součinitele vztlaku, viz Vzorec 8a. Podobně je počítán i odpor, který je funkcí tzv. součinitele odporu. Hodnoty obou součinitelů se mění tak, jak se mění z nátokovým úhlem a Reynoldsovým číslem odpor a tlakový součinitel a lze je měřit přímo, přičemž naměřená data se tabelují nebo uvádějí graficky ve formě tzv. poláry profilu, viz Obrázek 8b.

$$(a) L = C_L \frac{1}{2} \rho \cdot V_\infty^2 \cdot c \cdot l; \quad D = C_D \frac{1}{2} \rho \cdot V_\infty^2 \cdot c \cdot l$$



8: Rovnice vztlaku a odporu profilu

(a) vztahy pro výpočet odporu a vztlaku profilové desky; (b) graf závislosti C_L na C_D a i pro $Re = \text{konst.}$, tzv. polára profilu. C_D [1] součinitel odporu; C_L [1] součinitel vztlaku; Re [1] Reynoldsovo číslo. Odvození vzorců pro odpor a vztlak profilu je v Příloze 2.

Aerodynamická data

Katalogy naměřených aerodynamických dat pro různé tvary profilů jsou široce dostupné, začít lze třeba zde: [Abbott and Doenhoff, 1959], [Hošek, 1949, s. 390], [Kneubuehl, 2004, s. 76]. Existují i neveřejné, soukromé katalogy firem. U profilů se zároveň měří i další aerodynamické veličiny (např. profilový moment [Hošek, 1949, s. 278], [Abbott and Doenhoff, 1959, s. 4], který je důležitý pro návrh polohy těžiště letounu a pro pevnostní výpočet křídel na krut apod).

Projevy vnitřního tření v mezní vrstvě profilu

Tření tekutiny o plochy profilové desky vytváří také tzv. mezní vrstvu, ve které dochází ke ztrátě tlakové a kinetické energie tekutiny. Tato disipace energie způsobuje jednak odklon proudu za profilem o **deviační úhel** a jednak může způsobit **odtržení proudu** od profilu.

Deviační úhel

Hybnosti tekutiny mezi přetlakovou i sací stranou profilu na odtokové hraně se mohou lišit, protože vnitřní tření tekutiny v mezní vrstvě je funkcí rychlosti, která může být na sací a přetlakové straně různá. To znamená, že směr proudění těsně za profilem nemusí mít směr daný tvarem profilu, respektive směrem střední čáry profilu CL , protože převáží směr proudu s vyšší hybností. Odklon tohoto směru od střední čáry profilu CL se nazývá deviační úhel, Obrázek 9.



9: Deviační úhel

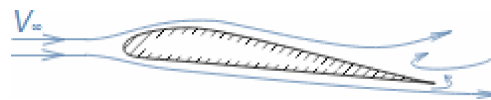
δ [°] deviační úhel.

Održení proudu

Nátokový úhel

Prohnutí profilu

V blízkosti odtokových hran, kde má proudění v mezní vrstvě nejnižší energie, může dojít k odtržení proudu od profilu – kolaps mezní vrstvy v důsledku průniku okolní tekutiny do mezní vrstvy, viz Obrázek 10. Při odtržení proudu dochází ke změně sil působící na profil a může dojít i ke ztrátě potřebného vztlaku. Pravděpodobnost odtržení proudu roste s nátokovým úhlem a s prohnutím profilu, ale k částečnému odtržení dojde téměř vždy. Održení proudu je obvykle přetržitý proces (nestacionární) – po odtržení se může mezní vrstva opět stabilizovat (sníží se tlak v oblasti odtokové hrany) a záhy opět odtrhnout.

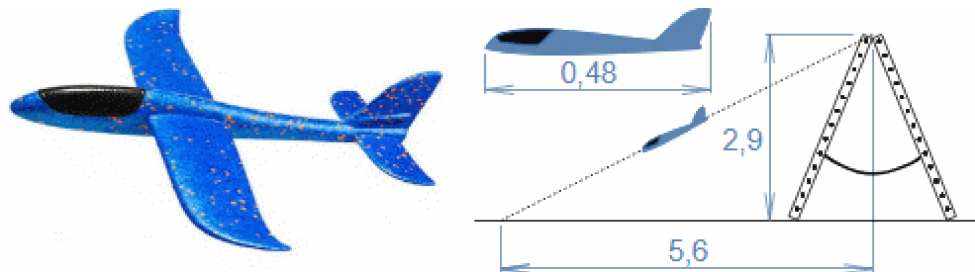


10: Proudění v oblasti odtokové hrany profilu při odtržení proudu

Úlohy

Úloha 1:

Vypočítejte vztlak, odpor a kluzací úhel leteckého modelu při klouzavém letu. Při experimentu model uletěl vzdálenost 5,6 m, jestliže byl vypuštěn z výšky 2,9 m rychlostí $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Hmotnost modelu je 42 g. Experiment proběhl při teplotě $24 \text{ }^\circ\text{C}$. Řešení úlohy je uvedeno v Příloze 1.



Rozměry jsou v metrech.

§1:	zadáni:	$d; h; m$	výpočet:	$\epsilon; F; L; D$
§2:	odečet:	g		

Popisek symbolů je uveden v Příloze 1.

Odkazy

- ŠKORPÍK, Jiří, 2025, Tvary lopatek a průtočných částí lopatkových strojů, turbomachinery.education/, Brno, <https://turbomachinery.education/tvary-lopatek-a-prutocnych-casti-lopatkovych-stroju.html>.
- ABBOTT, Ira, DOENHOFF, Albert, 1959, *Theory of wing sections, including a summary of airfoil data*, Dover publications, inc., New York, ISBN-10:0-486-60586-8.
- HOŠEK, Josef, 1949, *Aerodynamika vysokých rychlostí*, Naše vojsko, Praha.
- KADRNOŽKA, Jaroslav, 1991, *Teorie lopatkových strojů*, Vysoké učení technické, Brno, ISBN 80-214-0275-X.
- KNEUBUEHL, Beat, 2004, *Balistika střely, přesnost střelby, účinek*, Naše vojsko, Praha, ISBN 80-206-0749-8.
- KOUSAL, Milan, 1980, *Spalovací turbíny*, Nakladatelství technické literatury n. p., Praha.
- NOŽIČKA, Jiří, 1967, *Analogové metody v proudění*, Academia, Praha.