Odpor telies

Celkový odpor je možné rozložiť na **odpor trecí** (vplyv viskozity) daný integrálom dotyčnicových šmykových síl po povrchu a **tlakový odpor**, spôsobený nesymetrickým rozložením tlaku po povrchu telesa. Vo väčšine prípadov ich nie je možné určiť oddelene [3].

Podľa toho, ktorá zložka odporu prevláda, čo závisí od tvaru, môžeme telesá rozdeliť do troch skupín:

- doskovité a paralelným s prúdom (dominantní trecí odpor),
- doskovité a kolmé k prúdu (dominantný tlakový odpor),
- spojite zakrivené s relatívne veľkou hrúbkou (kombinácia trecieho a tlakového odporu).

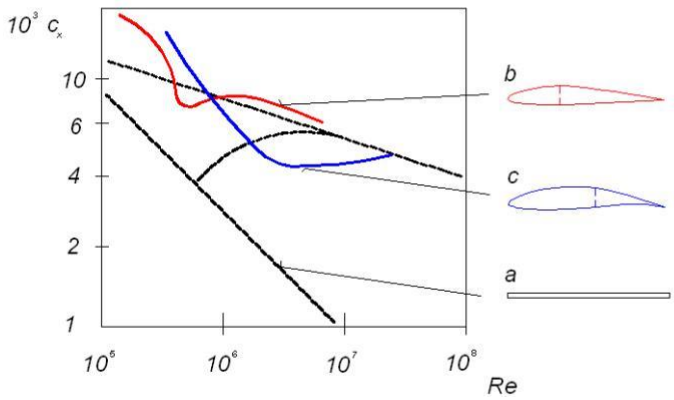
Vzťah pre výpočet celkového odporu je formálne rovnaký, ale v tomto prípade je c_x súčiniteľ celkového odporu, ktorý zahŕňa odpor trecí aj tlakový, S je charakteristická plocha určená ako priečny prierez, pôdorysný priemet alebo zmáčaná plocha podľa dohody[3]..

$$F_x = c_x S \rho \frac{v_\infty^2}{2} \quad . \tag{2.10}$$

2.5.1. Telesá s dominantným trecím odporom

Chvostové plochy lietadiel sú typickými príkladmi profilovaných dosiek, pri ktorých prevláda trecí odpor. Do rovnice (2.10) sa však obyčajne nedosadzuje zmáčaná plocha, ako pri tenkej doske, ale plocha pôdorysu.
Súčiniteľ odporu závisí od tvaru profilu dosky, Reynoldsovho čísla, drsnosti povrchu a turbulencii prúdu. Priebeh súčiniteľa odporu v závislosti od Reynoldsovho čísla je podobný ako pre tenkú dosku, len s o niečo väčším vplyvom malého tlakového odporu. Úplav je malý. Pretože prechod laminárneho prúdenia do turbulentného je silne závislý na tlakovom spáde, je možné vhodným tvarovaním znížiť odpor v určitej oblasti Re. Tento poznatok bol zásadný pri návrhu leteckých profilov krídel. Jedná sa o tzv. **laminárne profily** (Obr. 36) , u ktorých je maximálna hrúbka posunutá do vzdialenosti 40 až 60% od nábežnej hrany, zatiaľ čo pri **klasických profiloch** bola asi 30%, zníženie odporu je zrejmé z grafu na Obr. 37. Dôsledkom tohto zníženia odporu bolo zvýšenie rýchlosti lietadiel[3]..

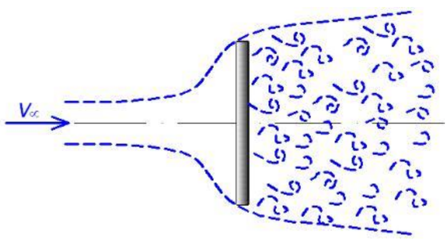
Obr. 36 Schéma klasického a laminárneho leteckého profilu



Obr. 37 Porovnanie hodnôt súčiniteľa odporu pri rôznych Re pre: a) tenkú dosku (súčiniteľ odporu vztiahnutý na plochu pôdorysu dosky), b) klasický profil, c) laminárny profil.

2.5.2. Telesá s dominantným tlakovým odporom

Pri doskovitých telesách postavených kolmo k prúdu (Obr. 38), alebo pri telesách s ostrými hranami na zadnej časti, dochádza k odtrhnutiu prúdu na hranách a k tvorbe vírov a vírových oblastí. Vírová oblasť je ohraničená odtrhnutými prúdnicami a obtekaným povrchom, bod odtrhnutia nemení svoju polohu. Tento odpor prevažuje napríklad pri obtekaní dosky kolmej k prúdu[3]..

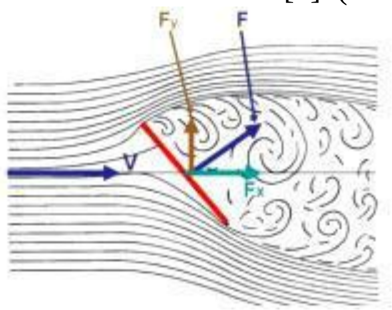


Obr. 38 Obtekanie dosky kolmej k prúdu

Pred telesom je pretlak, za telesom podtlak – čo je nevhodné rozloženie tlaku. Úplav je veľký. Súčiniteľ odporu závisí hlavne na tvare telesa, len pre malé rýchlosti, tj. Re < 10^3 je závislý i na Re, pretože rastie vplyv viskozity. Hodnoty súčiniteľov pri Re > 10^3 sú závislé hlavne na tvare obtekaného telesa, napr. kruhová a štvorcová doska majú c_x = 1,1 ; obdĺžniková doska (s teoreticky nekonečným rozpätím) $c_x = 2$. Ako charakteristickú plochu S dosadzujeme v tomto prípade do rovnice 2.10, plochu priemetu do roviny kolmej k rýchlosti v_∞ , tj. čelný priemet.

Obtekanie dosky šikmej k vektoru rýchlosti

Pri šikmej doske okrem odporu vzniká i vztlaková sila[8]. (Obr. 40)



Obr. 39 Obtekanie šikmej dosky [8].

Veľkosti týchto síl sú dané rovnicami

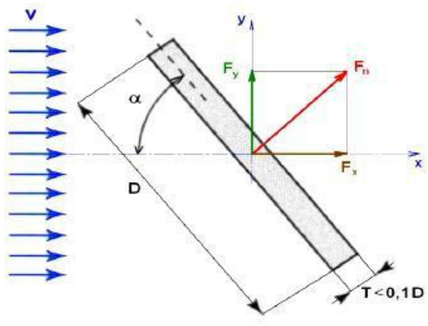
$$F_x = c_x S\rho \frac{v_\infty^2}{2},\quad F_y = c_y S\rho \frac{v_\infty^2}{2},\quad F_z = c_z S\rho \frac{v_\infty^2}{2} \tag{2.11}$$

Pre šikmú dosku podľa obr. 5.9 s uhlom nábehu $\alpha = 0$ až 8° veľkosť celkového odporového súčiniteľa môžeme vypočítať z empirickej rovnice

$$c_n = 2.\pi.\tan\alpha \tag{2.12}$$

Pre šikmú dosku s uhlom nábehu $\alpha = 8$ až 90° veľkosť celkového odporového súčiniteľa je určená empirickou rovnicou

$$c_n = \frac{1}{0{,}222 + \frac{0{,}283}{\sin\alpha}} \tag{2.13}$$



Obr. 40 Šikmá doska [8].

Medzi odporovými súčiniteľmi platia známe vzťahy

$$c_x = c_n .\sin\alpha \quad c_y = c_n .\cos\alpha \tag{2.14}$$

Silu odporovú F_x alebo silu vztlakovú F_y vypočítame podľa rovnice (2.11). Ak je doska (napr. strecha) (Obr. 41) sklonená pod uhlom $\alpha > 90°$, potom výpočet síl sa vykoná použitím vety o zmene hybnosti [8].

$$F = \rho.Q.v_1 - \rho.Q.v_2 = \rho.Q.(v_1 - v_2) \qquad (2.15)$$

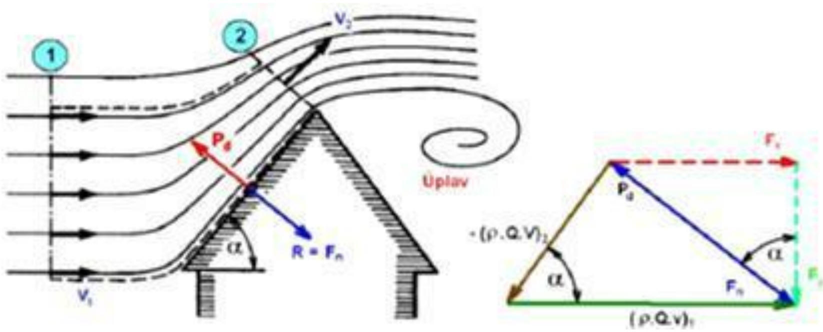
$$\rho_1.Q_1 = \rho_2.Q_2 = \rho.Q = \rho.S.v.\sin\alpha \qquad (2.16)$$

$$F = \rho.Q.v_1.\sin\alpha = \rho.S.v_\infty^{\,2}.\sin^2\alpha = c_n.S.\frac{v_\infty^{\,2}}{2}.\rho \qquad (2.17)$$

kde S - plocha strechy
$v_1 = v_\infty$ rýchlosť pritekajúceho vzduchu

Z rovnice (2.12) pre c_n jednoduchú úpravou dostaneme vzťah

$$c_n = 2.\sin^2\alpha \qquad (2.18)$$



Obr. 41 Obtekanie šikmej dosky - strechy domu [8].

Vodorovná zložka reakcie je daná rovnicou

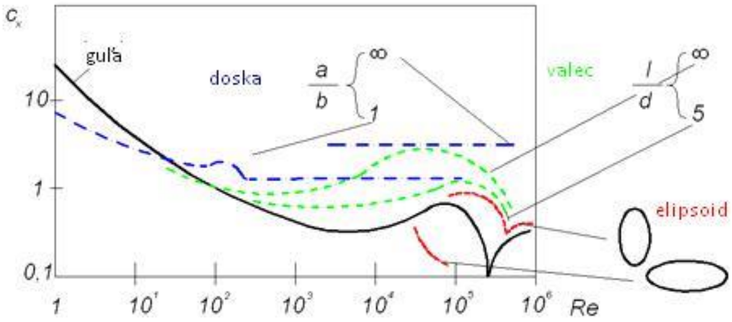
$$F_x = \rho.S.v_\infty^{\,2}.\sin^3\alpha = c_x.S.\frac{v_\infty^{\,2}}{2}.\rho \qquad (2.19)$$

odkiaľ pre c_x platí

$$c_x = c_n.\sin\alpha = 2.\sin^3\alpha \qquad (2.20)$$

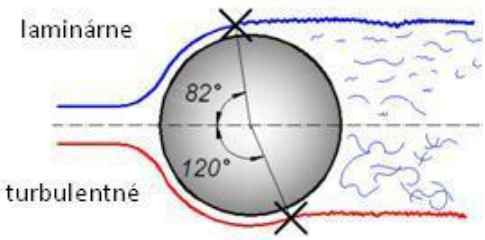
2.5.3. Telesá s kombináciou trecieho a tlakového odporu

Pre telesá spojito zakrivené (gule, elipsoidy, valce a p.) je charakteristické, že pri určitých hodnotách Reynoldsových čísel dochádza k prenikavým zmenám súčiniteľa odporu c_x napr. na Obr. 42, pri Re ≈ 10^5 nastáva tzv. **kríza odporu**. Príčinou je posunutie bodu odtrhnutia medznej vrstvy smerom dozadu pri prechode prúdenia v medznej vrstve z laminárneho na turbulentné. To má za následok zmenšenie úplavu a odporu [3].



Obr. 42 Závislosť súčiniteľa odporu rôznych telies od Reynoldsovho čísla

Napríklad pri obtekaní gule je prúdenie v medznej vrstve laminárne - **podkritické** do Reynoldsovho kritického čísla, ktoré pre guľu nadobúda hodnoty $Re_k = \frac{v_\infty d}{\nu} = (1{,}5 \text{ až } 4)\cdot 10^5$ a bod odtrhnutia medzní vrstvy je ešte pred maximálnym prierezom viď Obr. 43 – modrá krivka. Pri **nadkritickom** obtekaní je bod odtrhnutia za maximálnym prierezom, Obr. 43 – červená krivka, úplav sa zmenší.



Obr. 43 Odtrhnutie prúdu pri obtekaní gule

K odtrhnutiu medznej vrstvy dochádza spravidla vtedy, keď tekutina prúdi do miest s vyšším tlakom napr. na zadnej časti gule, valca, ale i v difúzore a podobne. Tlakové a trecie sily pôsobiace proti pohybu častice sú prekonávané zotrvačnosťou častice tekutiny, jej rýchlosť preto klesá, až v určitom mieste na povrchu telesa má rýchlosť nulovú. Rýchlostný profil v tomto mieste má inflexný bod. Za týmto miestom majú rýchlosti pri stene opačný zmysel, než ako je tomu v prípade hlavného prúdu a pri stene vzniká spätné prúdenie .

V turbulentnej medznej vrstve majú častice pri stene väčšiu kinetickú energiu, pretože rychlostný profil je plnší ako pri laminárnom prúdení. To je príčina posunu bodu odtrhnutia dozadu a zmenšenie úplavu pri prechode laminárneho prúdenia v medznej vrstve do prúdenia turbulentného. Preto pri Reynoldsovom kritickom čísle dôjde k poklesu súčiniteľa odporu, tak ako bolo uvedené skôr.
Pri veľmi malých Reynoldsových číslach, menších než 1, prevláda vplyv viskóznych síl nad tlakovými. V prípade gule a valca je bod odtrhnutia posunutý ďaleko dozadu - nedochádza takmer k odtrhnutiu. Súčiniteľ odporu je silno závislý od Re. Pre guľu odvodil Stokes vzťah

[8] $F = F_t + F_p = 4\pi\eta.r.v + 2\pi\eta.r.v = 6\pi\eta.r.v = 3\pi\eta.v_\infty d$. Odpor je $c_x = \frac{24}{Re}$.

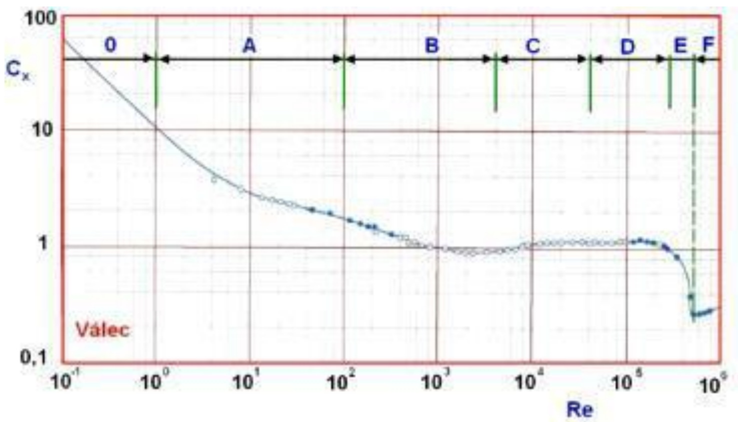
Číslo	Autor	Rovnice	Rozsah Re_*
1	Stokes	$c_x = \frac{24}{Re}$	$Re_* < 0,5$
2	Allen	$c_x = \frac{k}{\sqrt{Re}}$	Re = 10 až 1000
3	Goldstein	$c_x = \frac{12}{Re}\left[1+\frac{3}{16}Re-\frac{19}{1280}Re^2+.....\right]$	$Re < 2$
4	Schiler	$c_x = \frac{12}{Re}\left[1+0,15Re^{0,687}\right]$	$Re < 800$
5	Fair a Geyer	$c_x = \frac{24}{Re}+\frac{3}{\sqrt{Re}}+0,34$	Re = 0,5 až 10^4
6	Bird	$c_x = 18,5.Re^{-\frac{3}{5}}$	Re = 2 až 500
7	Kasatkin	$c_x = \frac{18,5}{Re^{0,6}}$	Re = 2 až 500
8	Mika	$c_x = \frac{24}{Re}\left(1+0,125Re^{0,7}\right)$	$Re < 3.10^3$
9	Brauer	$c_x = \frac{24}{Re}+\frac{4}{\sqrt{Re}}+0,4$	$Re < 3.10^5$
10	Newton	$c_x = 0,44$	Re = 550 až 2.10^5

Obr. 44 Vzťahy pre odpor gule podľa rôznych autorov [8]

Valec, rovnako ako guľa je teleso z jednoduchou geometriou a z hľadiska obtekania je relatívne veľmi podrobne preskúmaný rovnako ako guľa, a to tak pre malé Re čísla (plíživé prúdenie), tak i pre vysoké Re čísla. Analytické riešenie je možné iba pre malé Re čísla $Re < 2$, pre väčšie Re čísla je možné poznatky získať len experimentálnym meraním, napr. v aerodynamickom tunele [8].

Pre plíživé obtekanie nekonečne dlhého valca, v nekonečne veľkom priestore a za predpokladu, že vektor rýchlosti tekutiny je kolmý na os valca, pre súčiniteľ odporu odvodil Lamb rovnicu

$$c = c_X = \frac{8\pi}{Re\left(2,002 - \ln Re\right)} \tag{2.21}$$

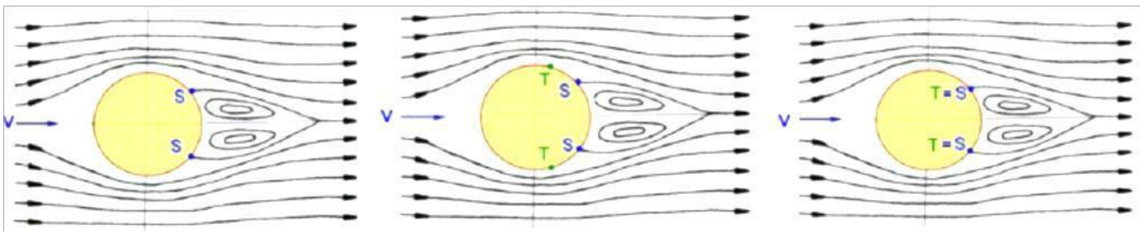


Obr. 45 Závislosť c_X = f (Re), pre valec

- Oblasť „0“ pre Re < 1 - jedná sa o plíživé prúdenie, obtekanie valca je symetrické, je to tzv. Stokesovo prúdenie pri ktorom bola zanedbaná zotrvačná sila.
- Oblasť „A“ pre 1 < Re < 100 – jedná sa o prechodovú oblasť, odporový súčiniteľ s rastúcim Re rýchle klesá, prevláda trecí odpor nad tlakovým.

a) Re > 1 – prúdenie sa s rastúcim Re stáva postupne asymetrickým, pre Re = 6,23 sa začnú za valcom symetricky k pozdĺžnej osi vytvárať dve oblasti s uzavretými prúdnicami, tieto sa prejavujú ako víry, ich veľkosť s rastúcim Re rastie a sa zväčšuje sa uhol, ktorý charakterizuje bod odtrhnutia medznej vrstvy.
b) Re = 40 – začína sa prejavovať malá asymetrie vírov za valcom.
c) Re > 60 – v úplave za valcom vznikajú pravidelné oscilácie spojené so striedavým zväčšovaním vírov, tieto odplávajú, vytvára sa Kármanova vírová cesta (popísaná v ďalšom textu tejto kapitoly).
d) Re < 100 – prúdenie je laminárne, vírová rada sa udrží cca 100 až 150 D za valcom, v dôsledku väzké difúzii sa víry začnú rozpadávať. Od Re > 200 vírová rada prejde na určitej vzdialenosti do turbulentného úplavu[8].

- Oblasť „B“ pre 100 < Re < 4.10^3 - odtrhávanie vírov v zadnej časti gule má za následok pokles súčiniteľa odporu c_x. Postupne začína prevažovať odpor tlakový nad odporom trecím. V prednej časti valca je stále laminárna medzná vrstva. Bod odtrhnutia medznej vrstvy „S“ – Obr. 46 s rastúcim Re-číslom sa posúva proti prúdu, dĺžka úplavu sa s rastúcim Re-číslom rovnako predlžuje, veľkosť (objem) úplavu sa zväčšuje [8]



Obr. 46 Vývoj bodu odtrhnutia medznej vrstvy pri obtekaní valca [8]

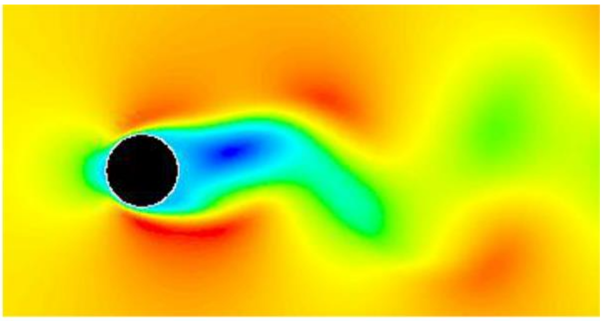
a) 100 < Re < 500 – vírová rada a úplav si nesú v sebe prvé prejavy turbulencie. Každý z odplávajúcich vírov má v sebe zárodok nestability, čo postupne vedie k vzniku turbulencie.
b) Pri Re = 500 sa víry stávajú turbulentné, ich vzdialenosť sa začne zmenšovať, zreteľný tvar vírovej rady sa začne strácať, vírová štruktúra úplavu však nezmizne.
c) Re > 1000 – za valcom sa začnú vytvárať pôvodné dva víry, k odtrhávaniu týchto vírov však začína už na povrchu valca. Pre Re < 1000 bol pôvodný mechanizmus úplavu difúzia vírivosti, potom pre Re > 1000 sa jedná o nestabilitu prúdenia. V tomto prípade tekutina nie je schopná stlmiť malé poruchy, ktoré sa v prúdovom poli zosilňujú a vytvárajú periodickú vírovú radu. Na valci sa vytvára medzná vrstva.

- Oblasť „C“ pre 4.10^3 < Re < 4.10^4 - je charakteristický mierny nárast súčiniteľa odporu cx„ čo je možné vysvetliť zvýšením vírenia v zadnej časti za valcom. Stále sa vytvára Kármanova vírová cesta. Prevažuje vplyv tlakového odporu. V prednej časti valca je laminárna medzná vrstva až do bodu odtrhnutia medznej vrstvy – „S“
- Oblasť „D“ pre 4.10^4< Re < 3.10^5 - pre túto oblasť je c_x = 1,3 a je prakticky konštantné. V tejto oblasti dochádza k výraznej zmene v spôsobe obtekania valca. Laminárna medzná vrstva v bode „T“ prechádza do turbulentnej medznej vrstvy, pričom s rastúcim Re číslom sa bod prechodu „T“ premiestňuje k bodu odtrhnutia medznej vrstvy – „S“, pretože sa zvyšuje turbulencia v zadnej vírovej oblasti.

- Pre Re < 3.10^5 – na celom povrchu valca je medzná vrstva laminárna až do svojho odtrhnutia, uhol odtrhnutia má veľkosť cca 110°.
- Oblasť „E“ pre 3.10^5 < Re < 5.10^5 - po dosiahnutie kritickej hodnoty Re čísla - Rekr = 5.10^5 splynie bod prechodu medznej vrstvy „T“ s bodom odtrhnutia „S“. Turbulentná medzná vrstva má väčšiu odolnosť proti odtrhnutiu, pretože turbulenciu sa privádza do medznej vrstvy viac energie, preto sa bod odtrhnutia „S“ premiestňuje v smere prúdu a súčasne sa zmenšuje veľkosť úplavu. Súčiniteľ odporu sa z hodnoty cx = 1,3 prakticky skokom zníži na cx = 0,3, cx dosiahne minimum pre Rekr = 5.10^5
- Oblasť „F“ pre Re > 5.10^6 - s ďalším zvyšovaním Re čísla sa zvyšuje aj súčiniteľ odporu cx . Pre 5.10^5 < Re < 3.10^6 – dochádza k nestacionárnemu prechodu laminárnej medznej vrstvy na turbulentnú, úhol odtrhnutia je 80 až 50° , z úplavu sa vytráca periodicita.
- Pre Re > 3.10^6 – medzná vrstva je už spravidla turbulentná, uhol odtrhnutia je cca 70°, znovu sa obnoví periodická štruktúra úplavu. S ďalším zväčšovaním Re čísla sa úhol odtrhnutia zväčšuje, odtrhnutie medznej vrstvy sa posúva proti prúdu [8].

Pri valcoch dochádza v oblasti 40 < Re < 500 k pravidelnému, striedavému odtrhávaniu vírov a za valcom vzniká tzv. **Kármánova vírová cesta,** Obr. 47 [8].

a) 

b) 

Obr. 47 Kármanova vírová cesta [8] a) v mrakoch za vrcholom hory, b) za obtekaným valcom – numerická simulácia

Tento jav je nutné rešpektovať pri rôznych stavebných konštrukciách, a dbať na to, aby nedošlo k rezonancii frekvencie odtrhávaniu vírov a vlastnej frekvencie konštrukcie. Tento jav je tiež príčinou "spievania" telefónnych drátov - tzv. Strouhalových trecích tónov.
Odtrhávanie vírov za obtekaným telesom valcom spôsobí periodické zmeny rýchlostného i tlakového poľa, preto odporová sila nie je konštantná, ale má amplitúdovo namodulovanú periodickú zložku s frekvenciou *f*, veľkosť tejto frekvencie odpovedá Strouhalovmu číslu.

$$Sh = \frac{f.d}{\nu} \tag{2.22}$$

kde *f* je frekvencia odtrhávania vírov
d – priemer valca
ν – kinematická viskozita

Ak je vlastná frekvencia obtekaného telesa f_v určená vzťahom

$$f_v = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.23}$$

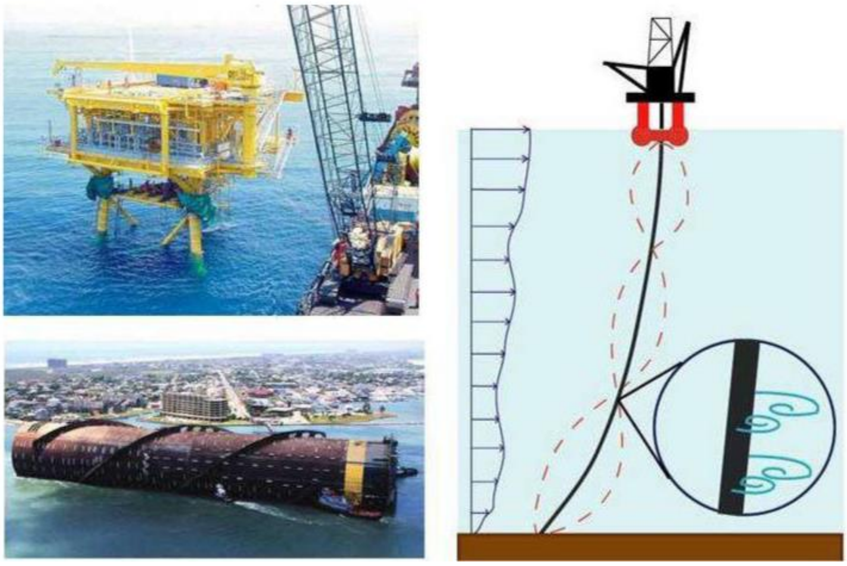
kde k je tuhosť telesa,
m – hmotnosť telesa

potom pri riešení praktických úloh je nutné zabezpečiť, aby nebola rovnaká vlastná frekvencia a frekvencia odtrhávaných vírov $f_v \neq f$. Tuto podmienku je nutné rešpektovať pri návrhu štíhlych stavieb ako sú napr. stožiare, veže, továrne komíny, chladiace veže, mrakodrapy apod. V technickej praxi sú známe prípady, kedy táto podmienka nebola dodržaná a vznikli problémy, alebo aj havárie. Asi najznámejší prípadom je zrútenie káblového mostu cez Tacomskú úžinu v USA v štáte Washington. Most bol dlhý 1,6 míle a k zrúteniu došlo 1. 6. 1940. Udalosť bola dobre zdokumentovaná tak formou fotografií, tiež bola zaznamenaná filmovou kamerou [8].

Aby sa eliminoval vplyv periodickej sily na komíny, prípadne iné zvislé a štíhle stavby - veže a pod., na tieto stavby sa inštaluje prvok v tvare skrutkovice, ktorá bola zvolená preto, aby sa eliminoval smer vetra. Na hrane tejto skrutkovice dôjde k odtrhnutiu medznej vrstvy, čo zníži vplyv periodickej sily. Názory v odbornej verejnosti sa na tento problém však rozchádzajú.

Obr. 48 Komíny so špirálou

Kármánova vírová cesta sa tiež uplatňuje pri obtekaní vrtných veží a plošín pre ťažbu nafty z morského dna. Stojany týchto plošín, pokiaľ sú postavené na morskom dne a majú tvar valca (trubky), sa opatria skrutkovicou ‑ Obr. 48. Touto úpravou sa eliminuje vplyv periodickej sily, ktorá vzniká v dôsledku obtekania morskými prúdmi, efekt je rovnaký ako pri komínoch[8].



Obr. 49 Plošina pre ťažbu ropy z morského dna

Keď je hĺbka mora veľká, nedá sa plošina postaviť na morskom dne, potom je plošina iba ukotvená a potrubím je spojená s vrtom na morskom dne. V dôsledku obtekania tohto potrubia morskou vodou vzniká Kármánova vírová cesta, potrubie môže kmitať, pretože môže byť vybudené periodickou silou od Kármánovej vírovej cesty (Obr. 48) [8].

Ak by sme mali zhrnúť od čoho je závislá aerodynamická sila, tak je možné konštatovať že výsledná aerodynamická sila teda závisí od týchto veličín [27]:

1. Dynamický tlak prúdu,
2. Veľkosti telesa
3. Tvaru telesa,
4. Nastavenie telesa vzhľadom k prúdu
5. Reynoldsovho čísla
6. Machovho čísla, vyjadrujúcom vplyv stlačiteľnosti,
7. Turbulencie prúdu
8. Hladkosti povrchu

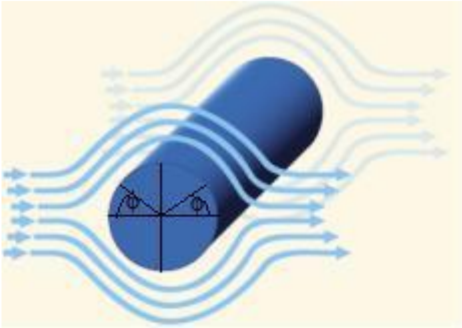
Vplyvy 1 a 2 sú obsiahnuté v rovnici aerodynamickej sily. Vplyvy 3 – 8 sú zahrnuté v súčiniteli aerodynamického odporu telesa.

2.6. Potenciálne obtekanie valca

Ak je valec obtekaný ideálnou tekutinou a prúdenie je nevírivé, hovorí sa o potenciálnom prúdení, alebo tiež o potenciálnom obtekaní valca. Toto obtekanie môže byť s cirkuláciou, alebo bez cirkulácie [8].

Pri obtekaní valca bez cirkulácie (Obr. 50) je výsledná rýchlosť na povrchu valca určená rovnicou

$$v_0 = 2.v_\infty .\sin\varphi \tag{2.24}$$



Obr. 50 Obtekanie valca bez rotácie [19]

Rýchlosť v smere osi x a y bude

$$v_x = v_\infty\left[1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \cos 2\varphi\right], \quad v_y = -v_\infty \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \sin 2\varphi \qquad (2.25)$$

Tlak na povrchu valca sa bude meniť v dôsledku zmeny rýchlosti. Celkový tlak na povrchu je

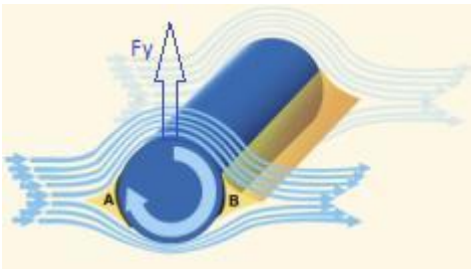
$$p_0 = p_\infty + \frac{\rho . v_\infty^2}{2}\left(1 - 4.\sin^2\varphi\right) \qquad (2.26)$$

Maximálny tlak na nábehovej a teoreticky aj v odtokovej hrane (bode) je

$$p_{0\,max} = p_\infty + \frac{v_\infty^2}{2}\rho \qquad (2.27)$$

Pri obtekaní valca s cirkuláciou (Obr. 51) je potrebné uvažovať so zložením troch základných potenciálnych prúdení a to rovnobežný prúd, dipól a cirkulácia a získa sa prúdové pole. Superponovaný krúživý pohyb častíc tekutiny a potenciálneho víru poruší symetriu v rozložení rýchlosti na povrchu valca, a tým aj rozloženie tlaku. Účinkom cirkulácie vznikne vztlaková sila.

$$F_y = \rho . v . \Gamma \qquad (2.28)$$



Obr. 51 Obtekanie valca s rotáciou

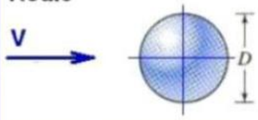
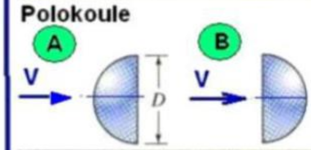
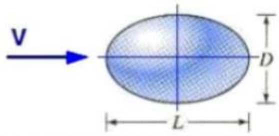
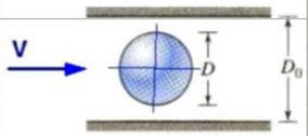
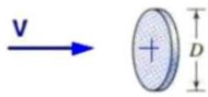
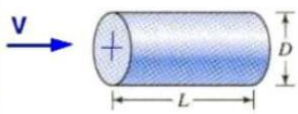
Rýchlosť na povrchu valca je

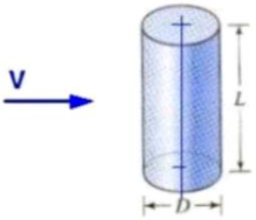
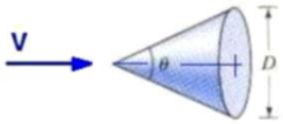
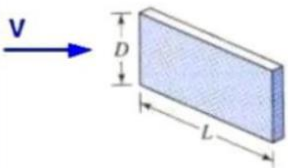
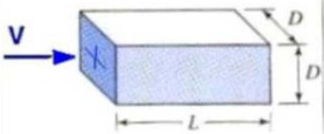
$$v_0 = -2v_\infty \sin\varphi - \frac{\Gamma}{2\pi r} \tag{2.31}$$

Ako už bolo uvedené pri obtekaní telesa s cirkuláciou vznikne vztlaková sila, ktorá sa tiež nazýva Magnusova. Vznik cirkulácie pri obtekaní valca sa dá prakticky realizovať jeho otáčaním, musí však súčasne tekutina prúdiť (napr. fúkať vietor). Magnusova sila je kolmá na rýchlosť tekutiny (vetra).

2.7. Odpor vybraných telies

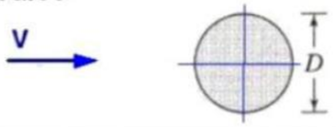
Pri obtekaní telies najrôznejších tvarov je možné tvrdiť, že odporová sila je tvorená tak odporom trecím, ako aj tlakovým (tvarovým, profilovým, čelným a pod.). Ak má obtekané teleso taký tvar, že je presne definovaný bod odtrhnutia medznej vrstvy, potom prevláda odpor tlakový a vplyv Reynoldsovho čísla je obvykle malý. V ostatných prípadoch je potrebné počítať s tím, že odporový súčiniteľ bude funkciou Reynoldsovho čísla. V nižšie uvedených tabuľkách je uvedená veľkosť súčiniteľa odporu pre rôzne vybrané 2D alebo 3D telesa a veľkosť Reynoldsovho čísla [8].

GEOMETRIE	PLOCHA	SOUČINITEL ODPORU C_x
Koule 	$\frac{\pi D^2}{4}$	Re: 10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 5.10^6 C_x: 1,0; 0,41; 0,39; 0,52; 0,12; 0,18 Pro Re < 1 $C_x = 24/(Re(1+3.Re/16))$
Polokoule 	$\frac{\pi D^2}{4}$	A $c_x = 0{,}42$ V - proti kulové ploše B $c_x = 1{,}17$ V - proti kruhové ploše
Elipsoid 	$\frac{\pi D^2}{4}$	$C_x = 0{,}44(D/L) + 0{,}016(L/D) + 0{,}016(D/L)^{0,5}$ $1 < L/D < 10$ $Re < 2.10^5$, laminární proudění
Koule v trubce 	$\frac{\pi D^2}{4}$	$C_x = \left[1 + 1{,}45\left(\frac{D}{D_0}\right)^{4,5}\right]$ $0 < D/D_0 < 0{,}92$
Kruhový disk 	$\frac{\pi D^2}{4}$	Re: 1, 2, 5, 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5 C_x: 25; 15; 6; 3,6; 1,5; 1,1; 1,1; 1,15
Válec-osa rovnob. s rychl. 	$\frac{\pi D^2}{4}$	L/D – C_x: 0 – 1,15; 0,5 – 1,10; 1,0 – 0,93; 1,5 – 0,85; 2,0 – 0,83; 3,0 – 0,85; 4,0 – 0,85; 5,0 – 0,85 $Re > 10^4$

GEOMETRIE	PLOCHA	SOUČINITEL ODPORU C_x		
Válec kolmý na "v" 	$L \times D$	**L/D**	**c_x**	$Re > 10^4$
		1,0	0,64	
		1,98	0,68	
		2,96	0,74	
		10	0,82	
		20	0,91	
		40	0,98	
		oo	1,20	
Kužel 	$\frac{\pi D^2}{4}$	**θ deg**	**c_x**	$Re > 10^4$
		10	0,3	
		20	0,4	
		30	0,55	
		40	0,65	
		60	0,80	
		75	1,05	
		90	1,15	
		180	1,40	
Deska kolmá na "v" 	$L \times D$	**L/D**	**c_x**	$Re > 10^4$
		1	1,05	
		2	1,10	
		4	1,12	
		8	1,20	
		10	1,20	
		12	1,22	
		18	1,33	
		oo	1,90	
Hranol 	D^2	**L/D**	**c_x**	$Re > 10^4$
		0	1,25	
		0,5	1,25	
		1,0	1,15	
		1,5	0,97	
		2,0	0,87	
		2,5	0,90	
		3,0	0,93	
		4,0	0,95	
		5,0	0,95	
Člověk 	Součin $c_x \cdot S$ závisí na poloze těla při pádu	→ $c_x.S = 0{,}84\ m^2$ ↑ $c_x.S = 1{,}11\ m^2$ ■ $c_x.S = 0{,}46\ m^2$ Sedící : $c_x.S = 0{,}56\ m^2$ Skrčený : $c_x.S = 0{,}19$ až $0{,}28\ m^2$		

GEOMETRIE	SOUČINITEL ODPORU c_x

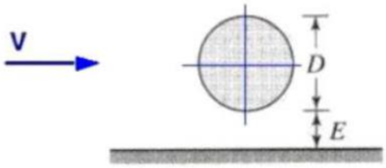
Válec



Re	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
c_x	1,4	1,0	1,1	1,2	0,4	0,8

Pro Re < 1, $c_x = 8\pi / \left[Re.\lg(7{,}4/Re) \right]$

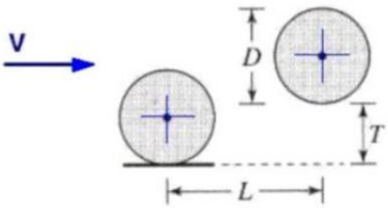
Válec u stěny



E/D	c_x	c_y
0	0,8	0,6
0,25	1,1	0,25
0,5	1,2	0,15
1,0	1,3	0,05
1,5	1,2	0,02
2,0	1,2	0
4,0	1,2	0
6,0	1,2	0

$10^4 < Re < 10^5$

Dva přesazené válce



T/D = 0

L/D	c_x
1,0	-0,4
1,5	-0,2
2,0	0,0
2,5	0,2
3,0	0,2
4,0	0,3

T/D = 0,5

L/D	c_x
1,0	0,65
1,5	0,50
2,0	0,45
2,5	0,45
3,0	0,40
4,0	0,40

T/D = 1

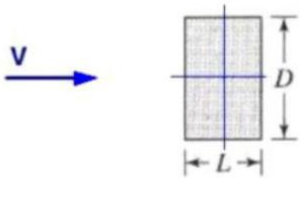
L/D	c_x
1,0	1,1
1,5	1,0
2,0	0,7
2,5	0,7
3,0	0,65
4,0	0,65

T/D = 2

L/D	c_x
1,0	1,1
1,5	1,0
2,0	1,0
2,5	1,0
3,0	1,0
4,0	1,0

$10^4 < Re < 10^5$

Hranol



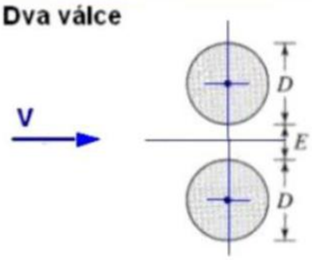
L/D	c_x
0,1	1,9
0,2	2,1
0,4	2,35
0,5	2,5
0,65	2,9
0,8	2,3

L/D	c_x
1,0	2,2
1,2	2,1
1,5	1,8
2,0	1,6
2,5	1,4
3,0	1,3
6,0	0,89

$Re > 10^4$

GEOMETRIE	SOUČINITEL ODPORU c_x

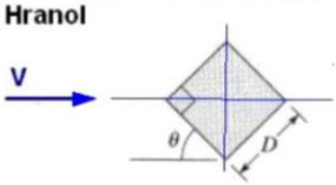
Dva válce



E/D	c_x	c_y
0	1,6	0,8
0,25	1,0	0,6
0,5	0,9	0,4
1,0	1,2	0,4
1,5	1,3	0,1
2,0	1,2	0,05
4,0	1,2	0
6,0	1,2	0

$10^4 < Re < 10^5$

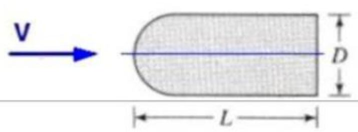
Hranol



θ - deg	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
c_x	2,2	2,1	1,8	1,3	1,9	2,1	2,2	2,3	2,4	2,4

$Re > 10^4$

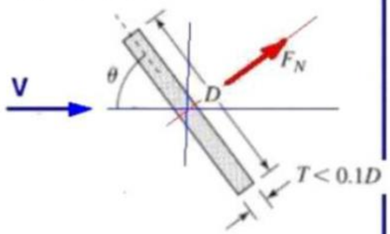
Deska se zaoblenou hranou



L/D	c_x
0,5	1,16
1,0	0,90
2,0	0,70
4,0	0,68
6,0	0,64

$Re > 10^4$

Šikmá deska



$c_n = 2.\pi.\mathrm{tg}\,\theta$ pro $\theta < 8^\circ$

$$c_n = \frac{1}{0{,}222 + 0{,}283/\sin\theta}$$ pro $90^\circ > \theta > 12^\circ$

$c_x = c_n.\sin\theta$

$c_y = c_n.\cos\theta$

$Re > 10^4$

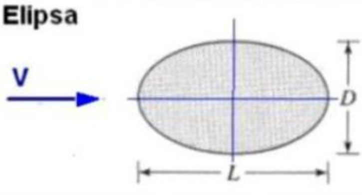
Hranice diskontinuity je pro úhel $8^\circ < \theta < 12^\circ \rightarrow c_n \doteq 0{,}8$

Svislá deska - stěna

$c_x = 1{,}4$

$Re > 10^4$

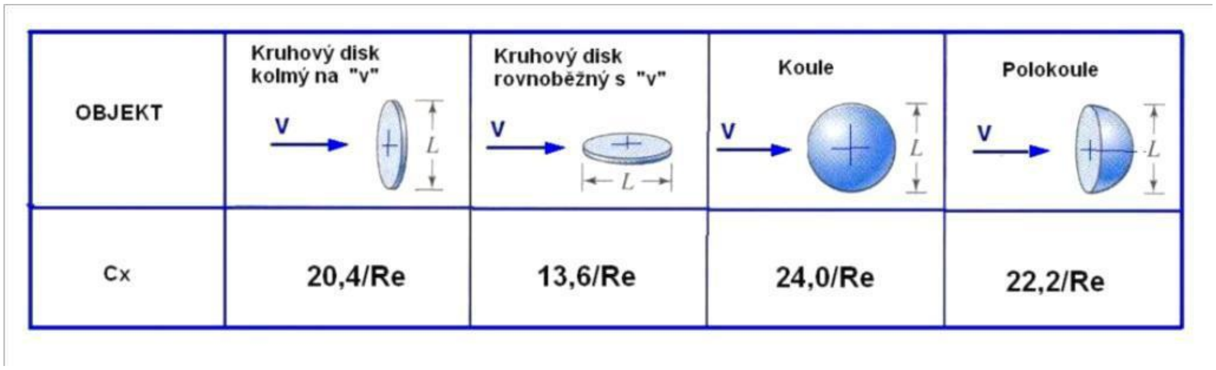
Elipsa



D/L	c_x
0,125	0,22
0,25	0,3
0,5	0,6
1,0	1,0
2,0	1,6

$Re > 10^4$

Pouze pro laminární proudění



OBJEKT	Kruhový disk kolmý na "v"	Kruhový disk rovnoběžný s "v"	Koule	Polokoule
Cx	20,4/Re	13,6/Re	24,0/Re	22,2/Re

Obr. 52 Súčinitele odporu pre vybrané objekty [8]