

Odpor vzduchu

JAKUB BENDA, MILAN ROJKO
Gymnázium Jana Nerudy, Praha

V kroužku experimentální fyziky jsme ověřovali vztah:

$$F = \frac{1}{2} SC\rho v^2 \quad (1)$$

V tomto vztahu je

F odporová aerodynamická síla působící na těleso obtékané tekutinou,

S plošný obsah průřezu kolmý na směr rychlosti,

ρ hustota tekutiny,

v rychlost obtékání a

C tvarový faktor, tzv. *součinitel odporu*.

Tato rovnice běžně uváděná v učebnicích jako Newtonův vztah pro aerodynamickou odporovou sílu se dá odvodit jednoduchým způsobem [1]:

Uvažujme těleso pohybující se v tekutině rychlostí v . Maximální (tzv. *stínový*) průřez tělesa ve směru kolmém na směr rychlosti v označme S . Toto těleso za čas Δt opíše objem

$$\Delta V = Sv\Delta t$$

Při tomto pohybu rozpohybuje i tekutinu, kterou má v cestě. Hmotnost této tekutiny je nepochybně

$$\Delta m = \rho\Delta V = \rho Sv\Delta t$$

a tedy dodaná (kinetická) energie

$$\Delta E = \frac{1}{2} \Delta m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho Sv^3 \Delta t \quad (2)$$

Abychom udrželi těleso v rovnoměrném pohybu při dané odporové síle, musí být náš výkon

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = F \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} = F \cdot v,$$

tedy

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = F \cdot v \quad (3)$$

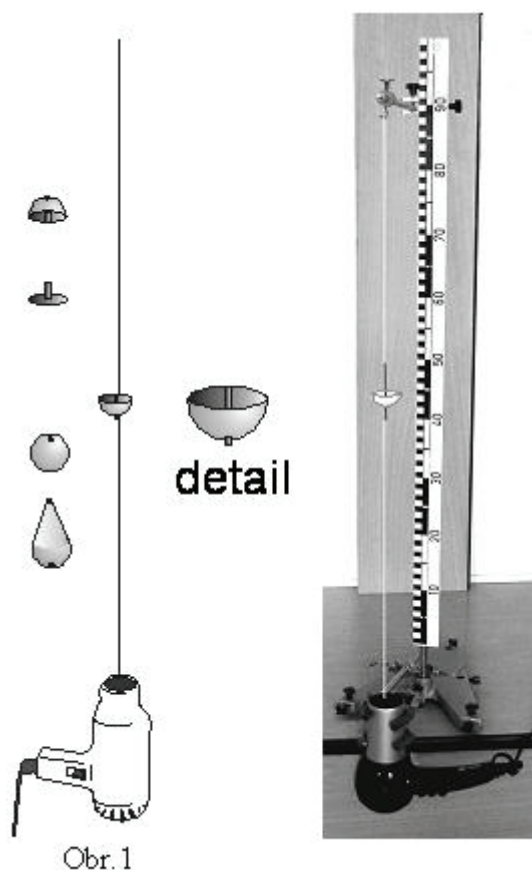
Po dosazení do vztahu (3) za energii podle (2) dostáváme

$$\begin{aligned} \frac{\frac{1}{2} \rho Sv^3 \Delta t}{\Delta t} &= F \cdot v \\ \Rightarrow F &= \frac{1}{2} \rho Sv^2 \end{aligned}$$

Tato úvaha byla samozřejmě značně zjednodušená. Například v předpokladu, že těleso uvede do pohybu pouze tekutinu, která odpovídá jeho průřezu. Ve skutečnosti tomu tak téměř nikdy není. Vztah je tedy proto doplňován tzv. *tvarovou konstantou C* (*součinitel odporu*), která funguje jako experimentálně zjištěná korekce účinného průřezu daného předmětu.

Tento vztah jsme nejdříve ověřili jednoduchými prostředky pro obtékání kruhové destičky vzduchem. V druhé fázi jsme hledali hodnotu součinitele C pro 5 různých těles různých tvarů ale stejné hmotnost.

K získání proudu vzduchu jsme použili běžný fén. Z klasických laboratorních stojanů jsme vytvořili přibližně dva metry vysoký stativ (na ilustračním foto je zkrácený), a v jeho spodní části jsme upevnili fén. Ze středu jeho ústí bylo svisle napnuto tenké vlákno, které sloužilo jako vedení pro tělesa vystavená tlakové síle proudícího vzduchu (viz. obr.1).

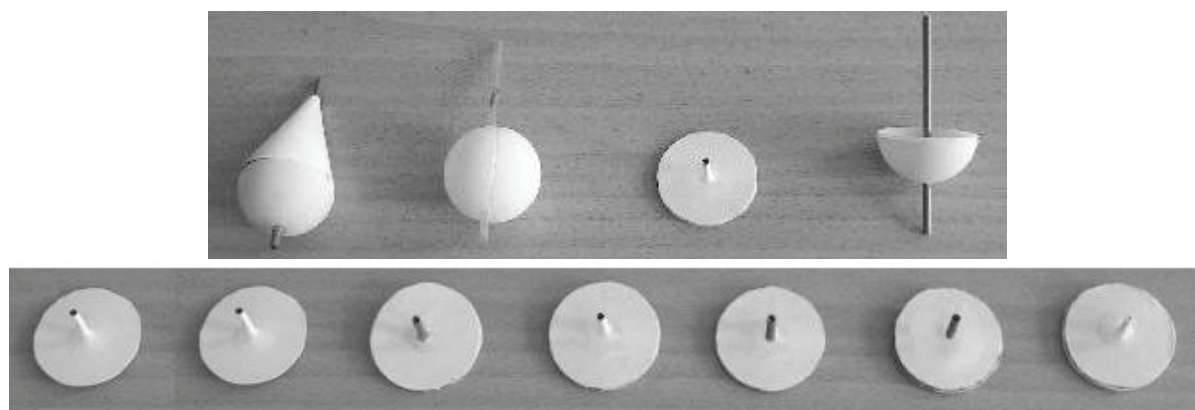


Obr. 1

Při prvních pokusech jsme používali jako vodící vlákno tenký pozinkovaný drátek. Fluktuace v proudění vzduchu ale způsobovaly, že i při konstantních podmínkách byla poloha tělesa na drátě silně nestabilní (neustále se pohybovalo s vertikální odchylkou až 10 cm). Tyto fluktuace se podařilo snížit použitím textilního vlákna na polovinu.

K pokusům jsme použili různě těžké kruhové kotoučky s průměrem 38 mm a 5 stejně těžkých tělísek shodného průřezu.

Středem každého z těles procházela vodící trubička - kousek náplně do propisky, kterou jsme pečlivě vyčistili lihem. (viz obr.2)



Obr.2

Tab.1 hmotnosti těles.

těleso	4 tělís- ka	kotouč 1	kotouč 2	kotouč 3	kotouč 4	kotouč 5	kotouč 6	kotouč 7
Hmotnost [g]	3,55	0,62	1,07	2,19	3,20	3,55	7,80	12,02
tíhová síla [mN]	34,8	6,08	10,5	21,5	31,4	34,8	76,5	118,1

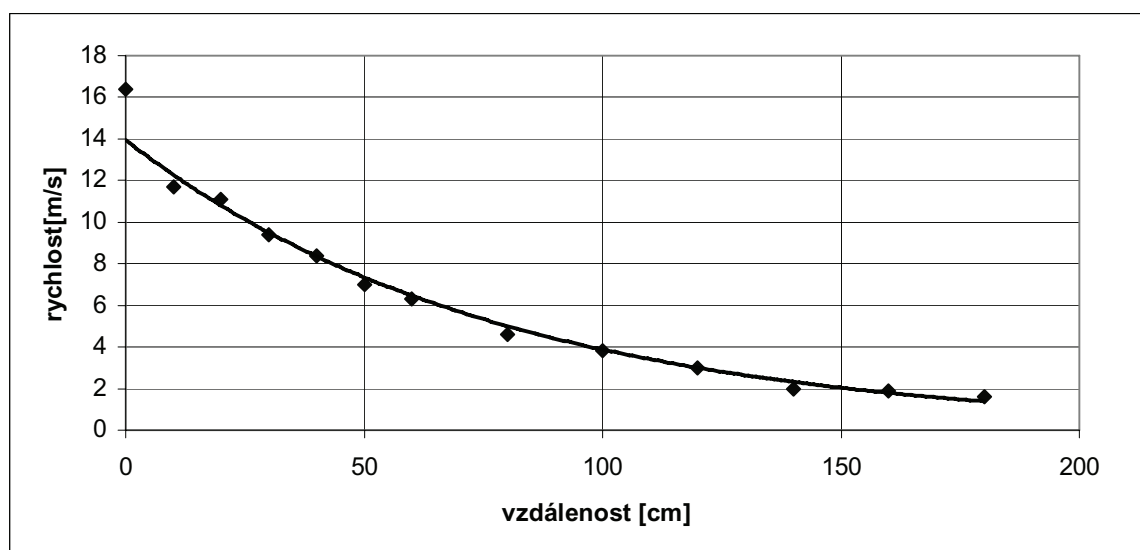
Princip námi zvolené metody je jednoduchý.

Anemometrem změříme velikost rychlosti proudu vzduchu v různé vzdálenosti od ústí fěnu. Vystavíme-li pak těleso dané hmotnosti proudu vzduchu, „ustálí“ se s přijatelnými fluktuacemi v takové poloze, při níž je tlaková síla proudícího vzduchu v rovnováze s tíhovou silou na něj působící.

Výsledky měření rychlosti proudu vzduchu v v závislosti na vzdálenosti od ústí fěnu uvádí Tab.2 a graf na obr.3.

Tab.2

vzdálenost od ústí [cm]	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180
rychlost vzduchu [m·s ⁻¹]	16,4	11,7	11,1	9,4	8,4	7,0	6,3	4,6	3,8	3,0	2,0	1,9	1,6



Obr.3

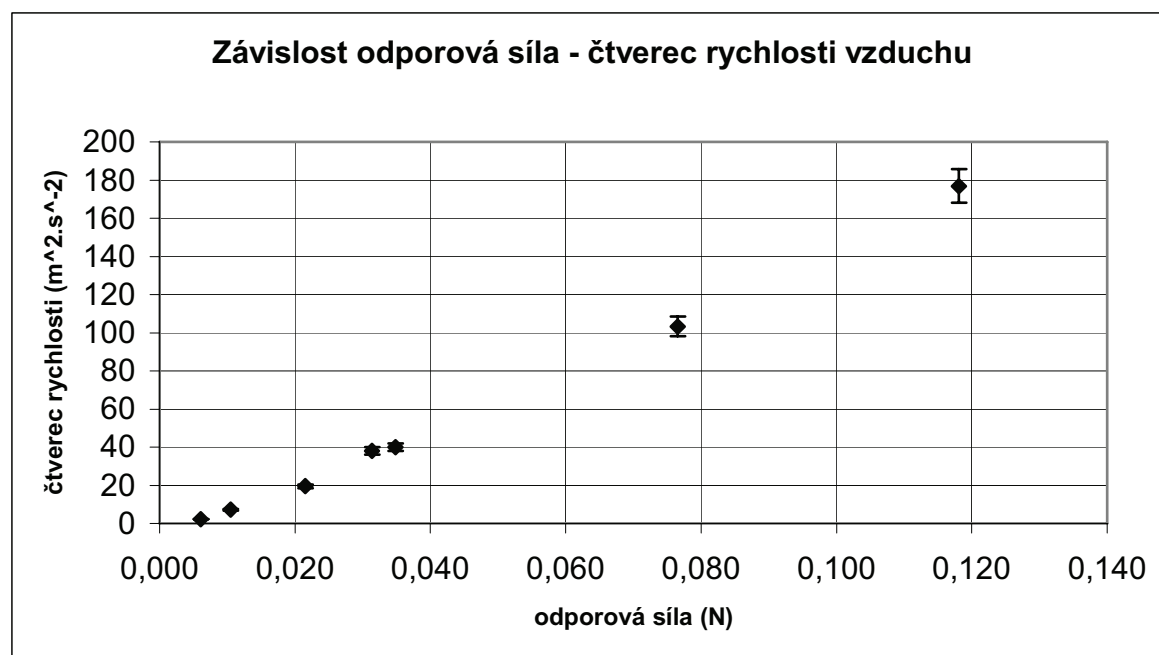
Získaný průběh je, s výjimkou nejbližší vzdálenosti od fěnu, blízký exponenciální křivce, pro kterou nám Excel poskytnul rovnici $v = 14 \cdot e^{-0,0128x}$. Podle tohoto vztahu pro vzdálenost x od ústí fěnu v centimetrech vychází rychlost vzduchu v v metrech za sekundu.

Výsledky měření výšek ve kterých se „ustálil“ kotouček dané hmotnosti a odpovídající rychlost přiřazenou uvedenou exponenciální funkcí popisuje Tab.3.

Tab.3.

číslo kotoučku	1	2	3	4	5	6	7
<u>vzdálenost od ústí</u> [cm]	175	129	90	64	62	25	4
<u>rychlost vzduchu</u> [m·s ⁻¹]	1,5	2,7	4,5	6,2	6,3	10,2	13,2

Graf na obr.4 ukazuje závislost $v^2(F)$.



Obr.4

Linearita grafu na obr.4 dostatečně průkazně ukazuje, že v námi proměřovaném intervalu rychlostí je Newtonův vzorec použitelný pro popis závislosti odporové síly na rychlosti.

Ze směrnice tohoto grafu $k = \frac{v^2}{F} = 1560 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ můžeme ještě odhadnout součinitele odporu C kruhové destičky.

$C = \frac{2}{\rho \cdot S} \cdot \frac{1}{k} \approx 0,9$ což je hodnota, která leží v oblasti hodnot, které jsou pro kruhovou desku uváděny v literatuře.

Výsledky druhé skupiny měření pro určení součinitelů odporu C jednotlivých těles jsou přehledně zachyceny v následující tabulce.

Tab.4

	vzdálenost od fénu [m]	rychlost vzduchu [m·s ⁻¹]	rychlost vzduchu ² [m ² ·s ⁻²]	součinitel odporu
	0,005	16	256	0,2
	0,03	13	169	0,3
	0,17	11	121	0,4
	0,62	6,3	40	0,9
	0,68	5,8	34	1,3

Chyby při popisových měřeních jsou v rozhodující míře jsou dány nepřesným určením „rovnovážných“ poloh těles. Chyba ve stanovení těchto vzdáleností od fénu klesala od pěti centimetrů u největší vzdálenosti (pro nejlehčí kruhovou destičku) až k milimetrové hodnotě pro kapkovitý tvar. Chybové úsečky v grafu na obrázku 4 i výsledné hodnoty pro součinitele C ukazují, že tyto nepřesnosti kvalitativně výsledek neovlivňují.

Nakonec drobná poznámka pro ty, kteří by podobné měření chtěli provádět. Obtížnější je optimální nastavení svislého vodícího vlákna do osy vzduchového proudu z fénu. Nám se to podařilo nejlépe tak, že jsme vlákno s nejlehčím kotoučkem upevnili do směru, ve kterém kotouček vystoupal do největší výšky.

Literatura:

[1] Vybíral, B., Zdeborová, L.: *Odporové síly*, MAFY Hradec Králové 2001 s. 20