



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta

Katedra aplikované fyziky a techniky

diplomová práce

Aerodynamické měření

Vypracoval: Tomáš Hejna
Vedoucí práce: RNDr. Pavel Kříž, Ph.D.

České Budějovice 2014

Anotace:

Tato diplomová práce je zaměřena na aerodynamické měření ve výuce fyziky pomocí didaktické soupravy od firmy Leybold Didactic. Práce obsahuje návody na 4 základní úlohy s touto soupravou, kdy každá úloha se skládá z teoretického návodu pro student a experimentálního ověření úlohy. Práce by měla přispět k rozšíření praktické výuky fyziky na školách a měla by posloužit vyučujícím a žákům jako návody na zajímavé laboratorní práce, ověřující aerodynamické zákony a veličiny. Naše práce může sloužit po drobných úpravách učitelům a žákům na všech typech škol, od základních kurzů fyziky na základní škole až po technické typy vysokých škol.

Klíčová slova:

Aerodynamické měření, laboratorní práce, rovnice kontinuity, Bernoulliho rovnice, součinitel odporu vzduchu

Abstract:

This MA thesis focuses on the aerodynamic measurement in the teaching of physics using the Leybold Didactic didactic set. The thesis consists of instructions for solving 4 basic problems using the Leybold set; every problem comprises theoretical instructions for students and an experimental verification of the problem. The thesis should contribute to wider use of experimental teaching of physics in schools; also, it is supposed to serve teachers and students as a source of interesting laboratory assignments verifying aerodynamic laws and quantities. After minor adjustments, the thesis can be used in all types of schools, from elementary physics at primary schools to advanced physics at technical universities.

Keywords:

Aerodynamic measurement, laboratory assignment, continuity equation, Bernoulli equation, air resistance coefficient

Prohlašuji, že jsem předkládanou práci zpracoval samostatně a použil jen uvedené prameny a literaturu. Dále prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Dolním Třeboníně dne 1.5.2014

.....
Tomáš Hejna

Touto cestou děkuji svému vedoucímu práce p. RNDr. Pavlovi Křížovi, Ph.D. za trpělivost, cenné rady a připomínky k této diplomové práci.

Obsah

1 Úvod	- 7 -
2 Přehled soustavy LD Didactic	- 8 -
3 Ověření rovnice kontinuity	- 12 -
3.1 Teorie	- 12 -
3.2 Experimentální ověření rovnice kontinuity	- 14 -
3.2.1 Pomůcky	- 14 -
3.2.2 Pracovní úkol	- 14 -
3.2.3 Postup měření	- 15 -
3.2.4 Naměřené hodnoty a vyhodnocení naměřených hodnot	- 18 -
3.2.5 Diskuse	- 22 -
3.2.6 Závěr experimentálního ověření rovnice kontinuity	- 22 -
4 Určení hustoty proudící tekutiny	- 23 -
4.1 Teorie	- 23 -
4.2 Experimentální určení hustoty proudící tekutiny	- 25 -
4.2.1 Pomůcky	- 25 -
4.2.2 Pracovní úkol	- 25 -
4.2.3 Postup měření	- 25 -
4.2.4 Naměřené hodnoty a vyhodnocení naměřených hodnot	- 28 -
4.2.5 Diskuse	- 31 -
4.2.6 Závěr určení hustoty proudící tekutiny	- 31 -
5 Součinitel odporu jednotlivých tvarů	- 32 -
5.1 Teorie	- 32 -
5.2 Experimentální určení součinitele odporu různých těles	- 33 -
5.2.1 Pomůcky	- 33 -
5.2.2 Pracovní úkol	- 33 -
5.2.2 Postup měření	- 34 -

5.2.3 Naměřené hodnoty a vyhodnocení naměřených hodnot	- 37 -
5.2.5 Diskuse	- 42 -
5.2.6 Závěr určení součinitele odporu	- 42 -
6 Studie sil působících na profil křídla	- 43 -
6.1 Teorie	- 43 -
6.2 Experimentální ověření.....	- 45 -
6.2.1 Pomůcky.....	- 45 -
6.2.2 Pracovní úkoly.....	- 45 -
6.2.3 Postup měření.....	- 46 -
6.2.4 Naměřené hodnoty a vyhodnocení naměřených hodnot	- 49 -
6.2.5 Diskuse	- 57 -
6.2.6 Závěr závislost vztlakové a odporové síly na náklonu křídla.....	- 58 -
7 Závěr.....	- 59 -
8 Použitá literatura	- 60 -
9 Přílohy	- 62 -
9.1 Grafický záznam průběhu přetlaku a podtlaku na profilu CLARK-Y.....	- 62 -

1 Úvod

Tato práce je zaměřena na využití didaktické soupravy od firmy Leybold Didactic ve výuce fyziky. Německá firma Leybold Didactic se na trhu s didaktickými pomůckami pohybuje již mnoho let a dosahuje v tomto odvětví velmi vysoké úrovně.

Firma vyrábí didaktické pomůcky pro předměty, jako jsou fyzika, biologie, chemie a technická výuka. Pomůcky této firmy lze použít na všech stupních škol. Měření lze provádět klasickým způsobem, kdy ručně odečítáme naměřená data, nebo při vybavení soupravy měřicím systémem CASSY dochází pomocí speciálních senzorů rovnou k přenosu do již připraveného softwaru od společnosti, kde se nám vykreslují různé grafy a zaznamenávají naměřené hodnoty.

Cílem této práce je navrhnout a následně experimentálně ověřit čtyři základní úlohy. K dispozici je sestava určená k pokusům z fyziky, s kterou se můžeme zaměřit na rychlost proudící tekutiny¹. Budeme experimentálně ověřovat následující úlohy:

- Ověření rovnice kontinuity
- Bernoulliho rovnice a výpočet hustoty proudící tekutiny.
- Součinitel odporu vzduchu jednotlivých tvarů
- Studie sil působících na profil křídla

U každé úlohy si nejdříve uvedeme základní teoretické poznatky k dané problematice, seznámíme čtenáře s pracovním úkolem, který si v úloze dáváme, a následovat bude samotné experimentální ověření úkolu. Všechny výpočty jsou tvořeny pomocí software Microsoft Office – Excel a do práce jsou vkládány pouze tabulky s naměřenými hodnotami a vyhodnocené výsledky.

¹ Pojmeme tekutiny označujeme látky jak ve skupenství plynném tak i ve skupenství kapalném, podle společné vlastnosti, kterou je tekutost. V naší práci budeme uvažovat pouze látky plynné.

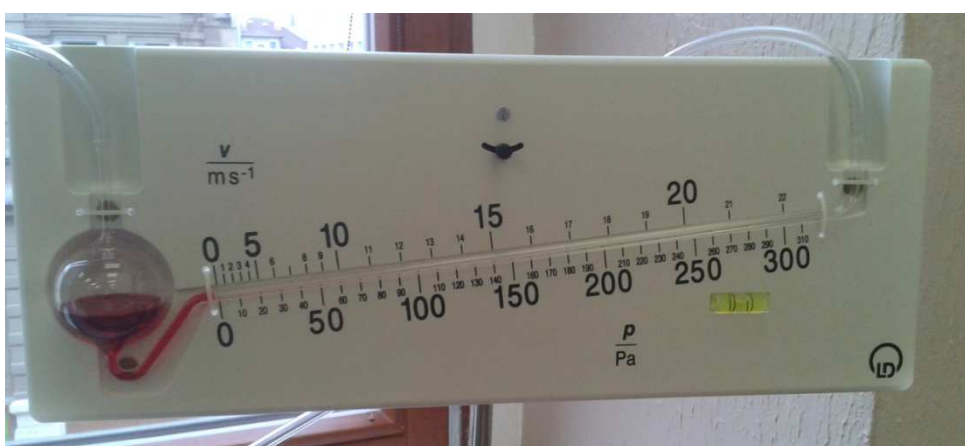
2 Přehled soustavy LD Didactic

K měření v mé diplomové práci využiji základní pomůcky pro měření aerodynamiky, které jsou touto firmou nabízeny na trh. Základní část, kterou budeme potřebovat, je vzduchový fén, na kterém můžeme regulovat rychlost vzduchu, která opouští hlavu fénu.



Obr. č 1

Další důležitou součástí, kterou využijeme u většiny experiment, je manometr, který nám umožní měřit rozdíl tlaků a také rychlost tekutiny. Rozsah pro měření tlaku je od 0 Pa do 320 Pa, kdy stupnice je dimenzována po 5 Pa. Rychlost nám umožní měřit od 0 m/s až do hodnoty 22 m/s s rozestupy po 1 m/s. Stupnice pro měření rychlosti není lineární.



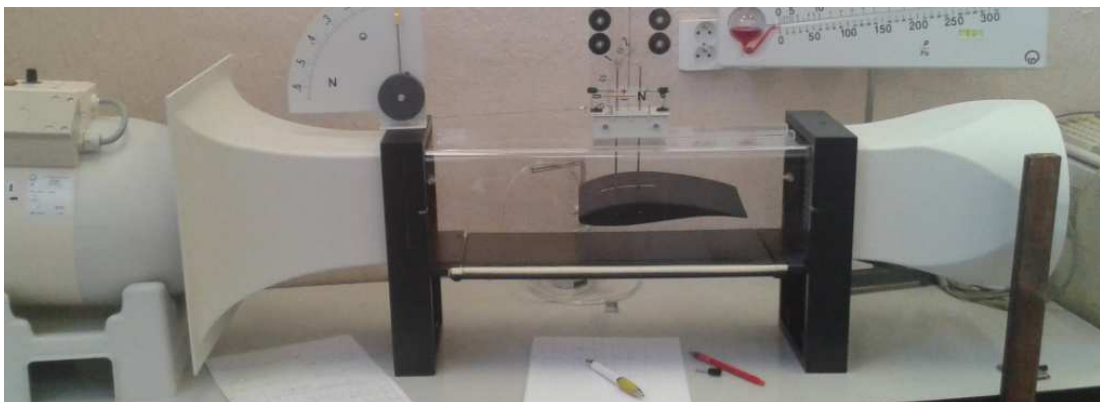
Obr. č 2

Neméně důležitou součástí soupravy je pro měření této práce Venturiho trubice. Tato trubice má na bocích sedm otvorů a díky změně průřezu v jednotlivých otvorech lze touto trubicí ověřit rovnici kontinuity. Po připojení manometru můžeme ověřovat také rovnici kontinuity. Délka této trubice je 40 cm. Nejúžší místo má průměr 5 cm a nejširší místo trubice průměr 10 cm.



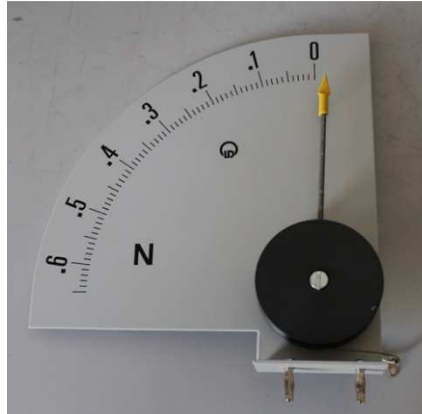
Obr. č 3

Úlohu na ověření vztlakové a odporové síly podle náklonu křídla ověřujeme ve větrném tunelu. Při sestavování tohoto tunelu se objevilo několik problémů spojených s nepřesností vyrobených součástí.



Obr. č 4

Pro měření odporové síly obsahuje soustava siloměr. Siloměr lze přidělat k lyžině využívané pro měření součinitele odporu různých těles a také k vzduchovému tunelu, kde ho využijeme pro určení odporové síly profilu křídla. Siloměr nám dovoluje měřit sílu v rozmezí 0 – 0,65 N. Stupnice na siloměru je rozdělena po 0,01N, a protože je stupnice lineární, není odčítání velikosti síly složité.



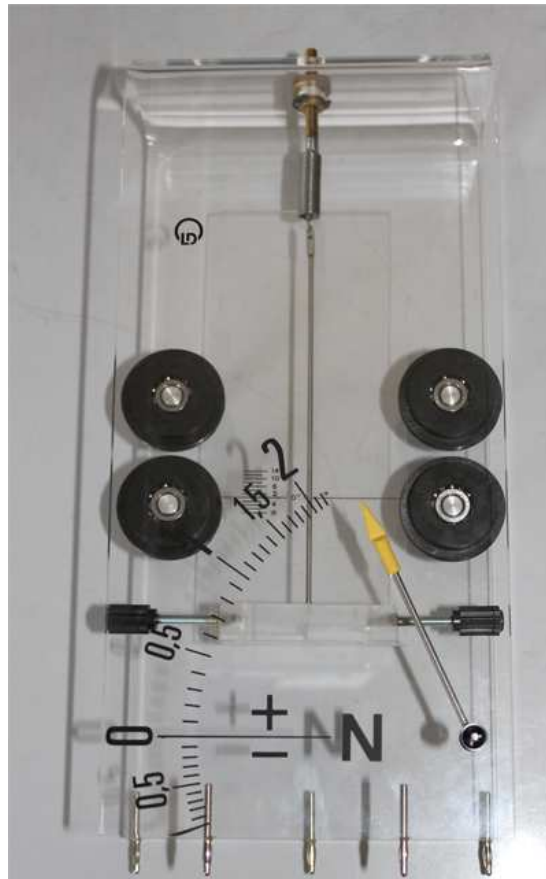
Obr. č 5

K určení velikosti vztlakové síly v okolí profilu křídla je určen dřevěný profil křídla. Profil křídla lze nastavit do náběhového úhlu v rozmezí -50° až 50° , kdy stupnice je ostupňována po 10° . Profil je opatřen devíti otvory, pomocí kterých můžeme měřit velikost tlaku v určitém místě profilu. Čtyry otvory jsou na horní straně řídla, čtyry na spodní a jeden otvor je na náběhové hraně křídla.



Obr. č 6

K uchycení profilu křídla do vzduchového tunelu a k nastavení úhlu náběhu slouží vertikální siloměr. Siloměr je vyroben z plexiskla a dovoluje nám měřit horizontální velikost síly v rozmezí od -1 N do 2 N. Úhel náběhu můžeme upravovat v rozmezí od -8° do 14° . U této součástky je velmi důležité dávat pozor na upevnění křídla, protože závity jsou pouze vsunuty do plastu a může dojít k jejich vytrhnutí.



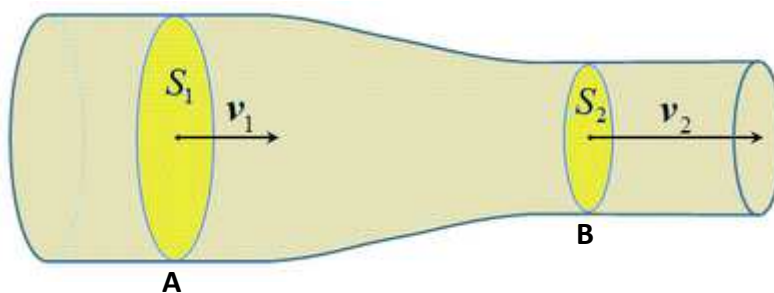
Obr. č 7

3 Ověření rovnice kontinuity

3.1 Teorie

Pro naše výpočty budeme uvažovat, že dochází k proudění ideální tekutiny. Ideální tekutinou nazveme takovou tekutinu, která je dokonale nestlačitelná a dokonale tekutá. Převažuje-li pohyb jedním směrem, mluvíme o proudění tekutiny.

Protože mluvíme o nestlačitelné tekutině, musí být tedy množství tekutiny, která vstoupí do trubice, stejné jako množství, které trubicí opustí. U trubice, která není zúžená to znamená, že tekutina musí ve všech průřezech trubice proudit stejně rychle. My se nyní zaměříme na trubici, která je zúžená. Na obr. č. 8 můžeme právě takovouto trubicí vidět.



Obr. č 8 Proudění kapaliny v zúžené trubici, upraveno a převzato z [1]

Nejdříve se zaměříme na bod A, tekutina tímto místem prochází rychlostí o velikosti v_1 a za časový interval Δt urazí dráhu $v_1 \cdot \Delta t$. Objem tekutiny, který proteče za časový interval Δt bodem A, můžeme určit jako:

$$\Delta V = S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

Nyní provedeme analogickou úpravu pro bod B na trubicí, kde dostaneme po stejné úvaze jako výše následující rovnici:

$$\Delta V = S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t \quad (3.2)$$

Protože mluvíme o dokonale nestlačitelné tekutině, musí za stejný časový interval protéct ve všech místech trubice stejné množství tekutiny. Můžeme tedy uvažovat, že objemy tekutiny, které protečou podle rovnice (3.1) a rovnice (3.2) jsou stejné. Stejně tak je stejný

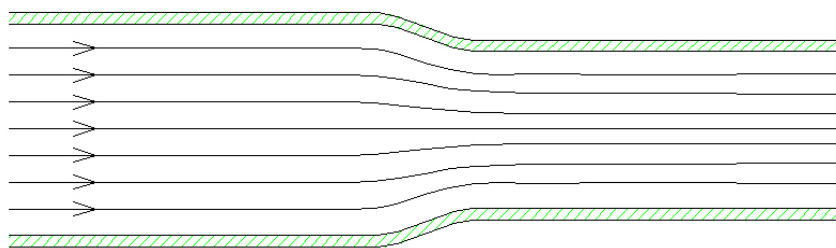
časový interval, za který množství tekutiny měříme. Na základě této úvahy můžeme vyslovit následující rovnost:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (3.3)$$

Podle rovnosti (3.3) vidíme, že musí platit úvaha, podle které v každém místě trubice proteče za stejný časový interval stejný objem tekutiny. Můžeme si tedy zavést veličinu, které říkáme objemový průtok. Veličinu objemový průtok podle domluvy značíme Q_V ² a můžeme ji vyjádřit následovně:

$$Q_V = S_1 \cdot v_1 = \text{konst.} \quad (3.4)$$

Jak již máme zvýrazněno na obr. č. 8, musí se tedy tekutina v užším místě trubice pohybovat vyšší rychlostí, než v místě širším. Právě této vlastnosti proudící tekutiny je využíváno v mnoha praktických situacích v každodenním životě (např.: prst na konci hadice, proudnice u hasičů). Podle obr. č. 9 můžeme vyslovit závěr, že tekutina je rychlejší v místě, kde jsou proudnice³ blíže u sebe a naopak, kde jsou proudnice dále od sebe je tekutina pomalejší. Proudnice se nikdy nemůžou křížit, jak vidíme na obrázku obr. č. 10, měla by částice tekutiny v místě křížení proudnic dva různé směry rychlosti, a to je nemožné. Částice musí mít vždy⁴ pouze jeden směr rychlosti.

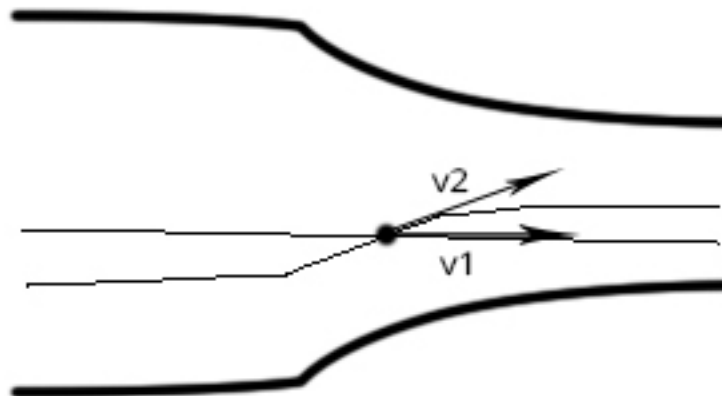


Obr. č 9 Zobrazení proudnic v trubici, upraveno a převzato z [2]

² V některých literaturách se veličina objemový průtok označuje pouze Q . V [3] je objemový průtok označován jako R .

³ Proudnice je trajektorie, po níž se pohybuje částice tekutiny. Vektor rychlosti částice je vždy tečný k proudnici.

⁴ Jedinou výjimkou je případ, kdy tekutina stojí a rychlost částice je 0 m/s. V tomto případě není směr částice určen vůbec.



Obr. č 10 Křížení proudnic a označení směru rychlosti částice

Zvolíme si konstantu k , kterou určíme jako poměr objemového průtoku v užším místě s průtokem v širším místě. Abychom dokázali platnost rovnice kontinuity, musí nám tento koeficient vycházet 1.

$$k = \frac{Q_{V1}}{Q_{V2}} \tag{3.5}$$

3.2 Experimentální ověření rovnice kontinuity

3.2.1 Pomůcky

K měření úlohy využijeme pouze pomůcky dostupné od firmy LD Didactic. Základ celého měření je vzduchový fén kat. č. 373 04, Venturiho trubice dodávaná pod kat. č. 373 091, manometr kat. č. 373 10, kapalinu fialové barvy do manometru kat. č. 391 15, Pitotova trubice kat. č. 373 13, plastové trubičky, držák na vzduchový fén a stojany dodávané též firmou LD Didactic. Dále budeme potřebovat jehlu minimální délky 12 cm a posuvné měřítko.

3.2.2 Pracovní úkol

Ověřte platnost rovnice kontinuity pomocí poměru průtokového objemu v užším místě trubice a průtokového objemu v širším místě trubice.

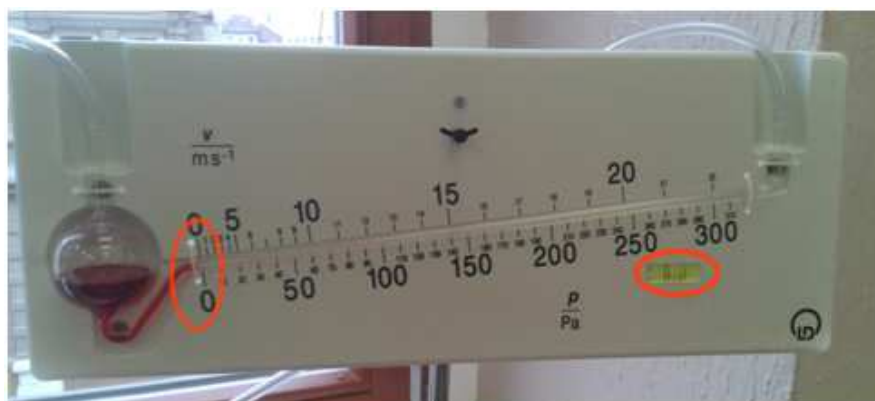
3.2.3 Postup měření

Podle obr. č. 11 si sestavíme měřící aparaturu. Důležité je, abychom regulátor rychlosti měli na horní straně vzduchového fénu a mohli tak snadno měnit rychlost vzduchu, která z fénu vychází. Při nasazování plastových hadiček na manometr si musíme dát pozor, protože manometr je ze skleněné trubičky a hadičky jdou nasadit ztuha. Nesmíme ulomit skleněnou trubičku.



Obr. č 11

Před samotným měřením musíme zkontrolovat vodorovnou polohu manometru, kterou jednoduše dorovnáme podle vodováhy, kterou má manometr vestavěnou. Dále musíme před měřením zkontrolovat, zda je kapalina, kterou obsahuje manometr, zároveň s 0 na stupnici. Případně kapalinu doplníme nebo naopak ubereme. Tuto kontrolu provádíme před každým měřením.



Obr. č 12

Pro naše měření si označíme výstupy z Venturiho trubice stejně jako na obr. č. 13, abychom si mohli snadněji poznamenat, kde měříme rozdíl rychlostí. Po sestavení soupravy a nastavení manometru začneme samotné měření.



Obr. č 13

Měření budeme provádět po následující kombinace otvorů u Venturiho trubice:

- A → B
- A → C
- A → D
- A → E

Pro každou kombinaci budeme provádět 25 měření pro 2 různé rychlosti vzduchu. Při každém měření je vždy důležité kontrolovat si hladinu kapaliny v manometru, musíme vždy počkat, až kapalina klesne zpět na hodnotu 0. Dále musíme ohlídat vodorovné nastavení manometru.

Nejdříve si k manometru připojíme Pitotovu trubici⁵ a změříme si rychlost tekutiny u místa A. Vždy musíme počkat určitý čas, než se ustálí rychlost a než se zastaví pohyb kapaliny v manometru. Po ustálení rychlosti necháme fén stále zapnutý a nesmíme si pohnout

⁵ Pitotova trubice se používá např. pro měření rychlosti letadel

regulátorem rychlosti vzduchu. Připojíme si manometr do otvorů A a B a opíšeme si ze stupnice rozdíl rychlost v_B .

Vypneme fén, připojíme Pitotovu trubici, počkáme až kapalina v manometru klesne na úroveň 0 a celý postup opakujeme. Při jednotlivém měření nehýbeme regulátorem rychlosti, ale pouze fén zapneme a vypneme. Rychlost v bodě A musíme však měřit při každém pokusu.

Další důležitou věcí je zjistit si průměry Venturiho trubice v jednotlivých průřezech. Budeme to provádět pomocí dlouhé jehly, kterou budeme do otvorů umisťovat a zaznamenávat si průměr trubice. Podle katalogu víme, že v místech A a E by měl být průměr 10 cm a místě C by měl být průměr 5 cm, musíme si však průměry zjistit sami a nemůžeme se spolehnout na údaje v katalogu. Údaje budeme měřit pro 2 různé rychlosti, průměr však stačí, když změříme 25krát a použijeme stejné hodnoty pro obě rychlosti, stejně budeme celou dobu využívat jedny rozměry pro průměr u otvoru A. Nedá se předpokládat, že by se trubice během měření změnila.

K vyhodnocování si budeme muset upravit rovnici (3.3), protože nebudeme znát rychlost v bodech B, C, D a E, ale pouze v bodě A. Na manometru si můžeme odečíst v_B .

Nyní si můžeme upravit rovnici (3.3):

$$S_A \cdot v_A = S_B \cdot v_B \quad (3.6)$$

Budeme tedy porovnávat dva koeficienty, díky kterým se přesvědčíme o pravdivosti rovnice kontinuity. Koeficient k , který dostaneme jako poměr Q_{VA} a Q_{VB} . Analogickou záměnou indexů můžeme určit koeficient k i u ostatních bodů.

$$k = \frac{Q_{VA}}{Q_{VB}} = \frac{S_A \cdot v_A}{S_B \cdot v_B} \quad (3.7)$$

3.2.4 Naměřené hodnoty a vyhodnocení naměřených hodnot

1. měření A → B					2. měření A → B				
#	v_A [m/s]	v_B [m/s]	d_A [m]	d_B [m]	#	v_A [m/s]	v_B [m/s]	d_A [m]	d_B [m]
1	5,3	9,5	0,105	0,0759	1	8,6	15,8	0,105	0,0759
2	5,0	9,4	0,1051	0,0764	2	8,0	15,9	0,1051	0,0764
3	4,8	9,4	0,1054	0,0758	3	8,3	16,4	0,1054	0,0758
4	4,9	9,7	0,1052	0,0765	4	8,0	16,1	0,1052	0,0765
5	4,9	9,5	0,1051	0,0756	5	8,4	15,8	0,1051	0,0756
6	4,7	10,0	0,1052	0,0753	6	8,3	16,2	0,1052	0,0753
7	4,7	9,4	0,1046	0,0758	7	8,4	15,8	0,1046	0,0758
8	4,6	10,0	0,1049	0,0764	8	7,8	15,9	0,1049	0,0764
9	4,8	9,8	0,1054	0,0761	9	8,4	16,3	0,1054	0,0761
10	4,7	9,6	0,1054	0,0756	10	8,2	16,3	0,1054	0,0756
11	4,9	9,9	0,1055	0,0762	11	8,5	16,2	0,1055	0,0762
12	5,2	9,8	0,1048	0,0759	12	8,6	16,1	0,1048	0,0759
13	5,1	9,4	0,1052	0,0762	13	8,0	15,6	0,1052	0,0762
14	5,0	10,1	0,1053	0,0764	14	8,2	16,2	0,1053	0,0764
15	4,9	9,2	0,1055	0,0756	15	8,5	16,1	0,1055	0,0756
16	5,4	9,8	0,1052	0,0761	16	7,9	15,6	0,1052	0,0761
17	5,0	9,7	0,1054	0,0759	17	7,9	16,3	0,1054	0,0759
18	4,9	10,3	0,1051	0,0765	18	8,5	15,8	0,1051	0,0765
19	5,3	9,9	0,1056	0,0756	19	7,8	16,2	0,1056	0,0756
20	4,8	10,0	0,1052	0,0758	20	8,6	16,0	0,1052	0,0758
21	5,4	9,3	0,1049	0,0755	21	8,1	16,0	0,1049	0,0755
22	4,6	10,1	0,1056	0,0759	22	8,1	15,6	0,1056	0,0759
23	5,1	9,6	0,1048	0,0749	23	8,3	16,0	0,1048	0,0749
24	5,4	9,4	0,1053	0,0761	24	8,1	15,7	0,1053	0,0761
25	5,1	10,3	0,1057	0,0758	25	8,2	15,9	0,1057	0,0758

Tabulka 1

	1. měření A → B				2. měření A → B			
	v_A [m/s]	v_B [m/s]	d_A [m]	d_B [m]	v_A [m/s]	v_B [m/s]	d_A [m]	d_B [m]
průměr	5,0	9,7	0,1052	0,0759	8,2	16,0	0,1052	0,0759
průměrná odch.	0,2	0,3	0,0002	0,0003	0,2	0,2	0,0002	0,0003
hor. Int.	6,0	11,1	0,1063	0,0775	9,3	17,0	0,1063	0,0775
dol. Int.	3,9	8,4	0,1041	0,0744	7,1	15,0	0,1041	0,0744
průměr	5,0	9,7	0,1052	0,0759	8,2	16,0	0,1052	0,0759
směrodatná odch.	0,2	0,3	0,0003	0,0004	0,2	0,2	0,0003	0,0004
poměr k	0,9838 ± 0,0002				0,9884 ± 0,0003			

Tabulka 2

1. měření A → C					2. měření A → C				
#	v_A [m/s]	v_C [m/s]	d_A [m]	d_C [m]	#	v_A [m/s]	v_C [m/s]	d_C [m]	d_C [m]
1	6,5	19,9	0,105	0,0567	1	2,9	9,6	0,105	0,0567
2	6,0	20,4	0,1051	0,0563	2	3,7	9,5	0,1051	0,0563
3	5,6	20,3	0,1054	0,0559	3	2,7	9,5	0,1054	0,0559
4	5,6	20,6	0,1052	0,0565	4	2,4	10	0,1052	0,0565
5	6,0	20,1	0,1051	0,056	5	2,9	9,9	0,1051	0,056
6	5,9	19,6	0,1052	0,0556	6	2,9	10,2	0,1052	0,0556
7	5,9	20,6	0,1046	0,0558	7	3,5	9,9	0,1046	0,0558
8	5,5	20,6	0,1049	0,0564	8	3	9,9	0,1049	0,0564
9	6,3	19,7	0,1054	0,0561	9	2,9	10,2	0,1054	0,0561
10	6,2	19,9	0,1054	0,0559	10	2,8	9,7	0,1054	0,0559
11	5,6	19,7	0,1055	0,0556	11	2,8	10,2	0,1055	0,0556
12	5,8	20,1	0,1048	0,0559	12	3,4	10,1	0,1048	0,0559
13	6,0	19,6	0,1052	0,0563	13	3,4	10,7	0,1052	0,0563
14	6,3	19,4	0,1053	0,0559	14	3,6	9,9	0,1053	0,0559
15	6,3	19,7	0,1055	0,0556	15	3,5	10,3	0,1055	0,0556
16	6,5	20,1	0,1052	0,0563	16	2,5	10,5	0,1052	0,0563
17	5,9	20,1	0,1054	0,0558	17	3,5	9,7	0,1054	0,0558
18	6,1	20,6	0,1051	0,0557	18	3	10,2	0,1051	0,0557
19	5,9	19,9	0,1056	0,0556	19	3,4	9,5	0,1056	0,0556
20	6,0	20,4	0,1052	0,0561	20	3,4	10,6	0,1052	0,0561
21	5,6	20,0	0,1049	0,0562	21	3	9,7	0,1049	0,0562
22	5,5	20,3	0,1056	0,0559	22	2,6	10,2	0,1056	0,0559
23	5,5	20,6	0,1048	0,0559	23	3,6	9,7	0,1048	0,0559
24	5,9	20,6	0,1053	0,0561	24	2,4	10,7	0,1053	0,0561
25	6,4	20,3	0,1057	0,0562	25	2,4	9,4	0,1057	0,0562

Tabulka 3

	1. měření A → C				2. měření A → C			
	v_A [m/s]	v_C [m/s]	d_A [m]	d_B [m]	v_A [m/s]	v_C [m/s]	d_A [m]	d_B [m]
průměr	6,0	20,1	0,1052	0,0560	3,0	10,0	0,1052	0,0560
průměrná odch.	0,2	0,3	0,0002	0,0003	0,4	0,3	0,0002	0,0003
hor. Int.	7,1	21,7	0,1063	0,0573	4,9	11,6	0,1063	0,0573
dol. Int.	4,8	18,5	0,1041	0,0548	1,2	8,4	0,1041	0,0548
průměr	6,0	20,1	0,1052	0,0560	3,0	10,0	0,1052	0,0560
směrodatná odch.	0,3	0,4	0,0003	0,0003	0,4	0,4	0,0003	0,0003
poměr k	1,04482 ± 0,00009				1,0764 ± 0,0002			

Tabulka 4

1. měření A → D					2. měření A → D				
#	v_A [m/s]	v_D [m/s]	d_A [m]	d_D [m]	#	v_A [m/s]	v_D [m/s]	d_A [m]	d_D [m]
1	9,3	17,7	0,105	0,0759	1	5,2	8,6	0,105	0,0759
2	8,9	18	0,1051	0,0764	2	5,7	8,6	0,1051	0,0764
3	9,3	17,6	0,1054	0,0758	3	4,9	8,4	0,1054	0,0758
4	8,9	17,4	0,1052	0,0765	4	4,7	9,6	0,1052	0,0765
5	8,6	18	0,1051	0,0756	5	4,4	8,9	0,1051	0,0756
6	8,9	17,8	0,1052	0,0753	6	4,4	8,8	0,1052	0,0753
7	9,3	17,3	0,1046	0,0758	7	4,9	8,8	0,1046	0,0758
8	9,3	17,5	0,1049	0,0764	8	5,8	8,7	0,1049	0,0764
9	8,7	17,4	0,1054	0,0761	9	4,7	8,7	0,1054	0,0761
10	8,8	17,3	0,1054	0,0756	10	5,4	9,6	0,1054	0,0756
11	8,7	17,4	0,1055	0,0762	11	5,7	9,4	0,1055	0,0762
12	8,9	17,8	0,1048	0,0759	12	4,9	8,6	0,1048	0,0759
13	9,5	17,2	0,1052	0,0762	13	5,4	8,7	0,1052	0,0762
14	8,5	17,6	0,1053	0,0764	14	5,7	9,0	0,1053	0,0764
15	8,6	17,1	0,1055	0,0756	15	5,8	9,8	0,1055	0,0756
16	8,5	17,1	0,1052	0,0761	16	5,6	8,4	0,1052	0,0761
17	8,6	17,4	0,1054	0,0759	17	4,8	9,3	0,1054	0,0759
18	9,2	17,6	0,1051	0,0765	18	4,9	8,8	0,1051	0,0765
19	9,2	17,8	0,1056	0,0756	19	4,7	8,7	0,1056	0,0756
20	9,4	17,8	0,1052	0,0758	20	4,6	9,4	0,1052	0,0758
21	9	18,1	0,1049	0,0755	21	5,2	8,7	0,1049	0,0755
22	9,4	17,1	0,1056	0,0759	22	5,6	8,7	0,1056	0,0759
23	8,6	17,8	0,1048	0,0749	23	5,1	9,8	0,1048	0,0749
24	9,5	17,2	0,1053	0,0761	24	5,0	9,1	0,1053	0,0761
25	9	17,1	0,1057	0,0758	25	5,0	8,8	0,1057	0,0758

Tabulka 5

	1. měření A → D				2. měření A → D			
	v_A [m/s]	v_D [m/s]	d_A [m]	d_B [m]	v_A [m/s]	v_D [m/s]	d_A [m]	d_B [m]
průměr	9,0	17,5	0,1052	0,0759	5,1	8,9	0,1052	0,0759
průměrná odch.	0,3	0,3	0,0002	0,0003	0,4	0,4	0,0002	0,0003
hor. Int.	10,5	18,9	0,1063	0,0775	7,0	10,8	0,1063	0,0775
dol. Int.	7,5	16,2	0,1041	0,0744	3,2	7,1	0,1041	0,0744
průměr	9,0	17,5	0,1052	0,0759	5,1	8,9	0,1052	0,0759
směrodatná odch.	0,3	0,3	0,0003	0,0004	0,4	0,4	0,0003	0,0004
poměr k	0,9849 ± 0,0003				1,099 ± 0,004			

Tabulka 6

1. měření A → E					2. měření A → E				
#	v_A [m/s]	v_E [m/s]	d_A [m]	d_E [m]	#	v_A [m/s]	v_E [m/s]	d_A [m]	d_E [m]
1	10,6	9,5	0,105	0,1052	1	5,5	5,0	0,105	0,1052
2	10,5	10	0,1051	0,1051	2	5,7	5,2	0,1051	0,1051
3	10,1	10,3	0,1054	0,1052	3	6,1	4,9	0,1054	0,1052
4	10,2	10	0,1052	0,1055	4	5,1	5,6	0,1052	0,1055
5	10,1	9,4	0,1051	0,1053	5	5,5	6,0	0,1051	0,1053
6	10,7	10,5	0,1052	0,1049	6	4,8	5,4	0,1052	0,1049
7	10,2	9,9	0,1046	0,1042	7	4,7	5,4	0,1046	0,1042
8	9,3	10,5	0,1049	0,1054	8	4,7	5,9	0,1049	0,1054
9	10,5	9,5	0,1054	0,1053	9	5,7	6,3	0,1054	0,1053
10	10,3	9,4	0,1054	0,1051	10	5,6	4,8	0,1054	0,1051
11	10,6	10,3	0,1055	0,105	11	5,3	4,9	0,1055	0,105
12	10,6	10,6	0,1048	0,1049	12	5,8	5,5	0,1048	0,1049
13	9,5	9,8	0,1052	0,105	13	5,1	5,0	0,1052	0,105
14	9,8	9,6	0,1053	0,1054	14	5,3	5,2	0,1053	0,1054
15	10,4	9,3	0,1055	0,1051	15	5,3	4,9	0,1055	0,1051
16	10	9,8	0,1052	0,1057	16	5,1	6,2	0,1052	0,1057
17	9,4	9,8	0,1054	0,1049	17	6,2	6,0	0,1054	0,1049
18	9,3	9,9	0,1051	0,1053	18	4,8	6,2	0,1051	0,1053
19	10,1	9,8	0,1056	0,1054	19	5,4	5,5	0,1056	0,1054
20	9,8	10,6	0,1052	0,1055	20	5,4	6,2	0,1052	0,1055
21	10	10,4	0,1049	0,1051	21	5,4	5,6	0,1049	0,1051
22	10,2	10,3	0,1056	0,1056	22	6,1	4,8	0,1056	0,1056
23	10,3	10,2	0,1048	0,1052	23	5,3	4,9	0,1048	0,1052
24	10,1	9,3	0,1053	0,1051	24	5,6	5,5	0,1053	0,1051
25	9,3	10,6	0,1057	0,1055	25	5,3	5,9	0,1057	0,1055

Tabulka 7

	1. měření A → E				2. měření A → 3			
	v_A [m/s]	v_E [m/s]	d_A [m]	d_B [m]	v_A [m/s]	v_E [m/s]	d_A [m]	d_B [m]
průměr	10,1	10,0	0,1052	0,1052	5,4	5,5	0,1052	0,1052
průměrná odch.	0,3	0,4	0,0002	0,0002	0,3	0,4	0,0002	0,0002
hor. Int.	11,8	11,9	0,1063	0,1063	7,0	7,6	0,1063	0,1063
dol. Int.	8,3	8,1	0,1041	0,1041	3,8	3,4	0,1041	0,1041
průměr	10,1	10,0	0,1052	0,1052	5,4	5,5	0,1052	0,1052
směrodatná odch.	0,4	0,4	0,0003	0,0003	0,4	0,5	0,0003	0,0003
poměr k	1,0108 ± 0,0001				0,984 ± 0,002			

Tabulka 8

3.2.5 Diskuse

Koeficient nám sice nevychází přesně 1, ale velice se této hodnotě blížíme. K nepřesnostem v měření docházelo hlavně z důvodu nesnadného odečtu rychlosti z manometru, kdy stupnice pro rychlost není rozdělena lineárně, proto nebylo snadné přesně určit rychlost. Další problém je určitě měření průřezu Venturiho trubice pomocí jehly. Bohužel do otvoru se nevejde zařízení u posuvného měřítka, které je určeno pro měření hloubky otvorů. Musíme tak označit délku na jehle a poté změřit tuto vzdálenost.

V neposlední řadě je měření zatíženo i tím, že ve výpočtech a úvahách uvažujeme s ideální tekutinou. My máme však v trubici vzduch, vzniká zde tak tření a vzduch v trubici zpomaluje. Měření je obtížné také z technického důvodu, a to hlavně protože musíme přepojovat na manometr Pitihho trubici a Venturiho trubici. Důležité je zajistit si vždy vodorovnou úroveň manometru.

3.2.6 Závěr experimentálního ověření rovnice kontinuity

Koeficient k při měření mezi body A a B nám vyšel $(0,9838 \pm 0,0002)$ a $(0,9884 \pm 0,0003)$. Mezi otvory A a C nám vyšel koeficient k $(1,04482 \pm 0,00009)$ a $(1,0764 \pm 0,0002)$. Při měření mezi body A a D nám vyšlo $(0,9844 \pm 0,0003)$ a $(1,099 \pm 0,0004)$. Posledním měřením mezi body A a E nám vyšel koeficient k $(1,0108 \pm 0,0003)$ a $(0,984 \pm 0,002)$.

Na základě výsledků experimentálního měření, se nám povedlo ověřit rovnici kontinuity pro Venturiho trubici. Vidíme, že koeficient k se v mnoha případech velmi blíží k 1, což znamená, že musí platit rovnost:

$$Q_{v1} = Q_{v2}$$

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

Můžeme tedy považovat rovnici kontinuity za ověřenou a v dalším měření můžeme právě tohoto poznatku využít.

4 Určení hustoty proudící tekutiny

4.1 Teorie

Uvažujeme-li trubici s nestejnými průřezy S_1 a S_2 tak že platí $S_1 > S_2$ musí podle výše ověřené rovnice kontinuity platit pro rychlosti vztah $v_1 < v_2$. Protože uvažujeme ideální tekutinu, musí tedy platit, že má ve všech místech stejnou hustotu a tedy ΔV tekutiny, která proteče místy S_1 a S_2 má stejnou hmotnost.

Uvažujeme pohybující se tekutinu, můžeme si pro ΔV tekutiny, která proteče průřezy S_1 a S_2 za Δt , vyjádřit kinetickou⁶ energii v průřezech S_1 a S_2 :

$$E_{k1} = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot v_1^2$$

$$E_{k2} = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot v_2^2$$

(4.1)

Platí-li nerovnost $v_1 \neq v_2$ musí platit také nerovnost $E_{k1} \neq E_{k2}$. Již ze základních kurzů fyziky víme, že musí platit zákon zachování energie. Uvažujeme tedy kromě kinetické energie, také energii potenciální⁷. Z již zmiňovaného zákona zachování energie víme, že musí platit následující rovnost⁸:

$$E_k + E_p = \text{konst.}$$

(4.2)

Je potřeba ještě zjistit, jak určíme potenciální energii v průřezech S_1 a S_2 . Protože vodorovné osy v trubici jsou ve stejné výšce, nejde o změnu potenciální energie tíhové, ale o změnu potenciální energie tlakové. Tlakovou potenciální energii ideálního plynu určíme jako práci, kterou vykoná síla při přemístění pístu, který má průřez S o vzdálenost Δx . Průřez a vzdálenost, o kterou se posune za časový interval Δt , můžeme označit jako ΔV .

⁶ Kinetická energie = pohybová energie. Z latinského kinesis – pohyb.

⁷ Potenciální energie = polohová energie.

⁸ Uvažujeme ideální tekutinu, kde nedochází k vnitřnímu tření a budeme tedy uvažovat vnitřní energii konstantní a nebudeme ji započítávat.

$$W = \Delta x \cdot F = p \cdot S \cdot \Delta x = p \cdot \Delta V \quad (4.3)$$

Když dáme dohromady rovnice (4.1), (4.2) a (4.3), které společně můžeme vydělit členem ΔV , který je obsažen jak v energii kinetické, tak energii potenciální, tak dostaneme výraz, kterému říkáme Bernoulliho rovnice. Bernoulliho rovnice hovoří o zachování energie u proudící tekutiny.

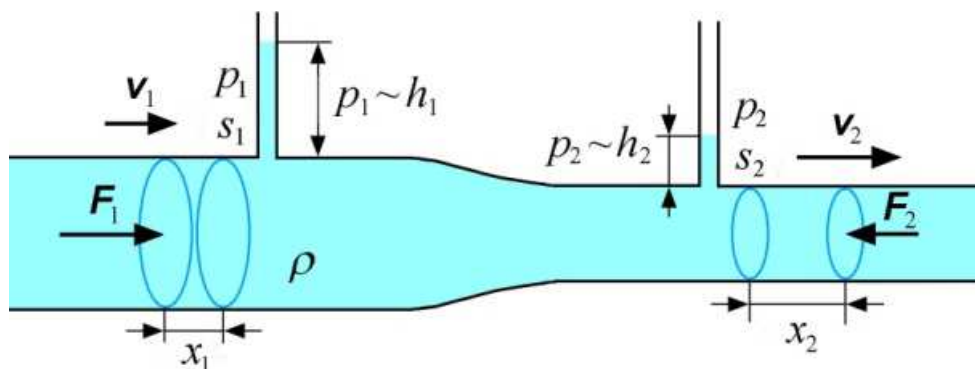
$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p = \text{konst.} \quad (4.4)$$

Pro naše další výpočty ohledně hustoty proudící kapaliny musíme uvažovat Bernoulliho rovnici ve dvou místech, můžeme ji tedy upravit na tvar:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + p_2 \quad (4.5)$$

Naše úloha je zaměřena na měření hustoty tekutiny, která protéká Venturiho trubicí. Stále předpokládáme ideální tekutinu, která má ve všech místech svého pohybu stejnou hustotu, můžeme tedy upravit (4.5) do tvaru:

$$\rho = \frac{2 \cdot \Delta p}{(v_1^2 - v_2^2)} \quad (4.6)$$



Obr. č 14 Bernoulliho rovnice, převzato z [1]

4.2 Experimentální určení hustoty proudící tekutiny

4.2.1 Pomůcky

K měření úlohy využijeme pouze pomůcky dostupné od firmy LD Didactic. Základ celého měření je vzduchový fén kat. č. 373 04, Venturiho trubice dodávaná pod kat. č. 373 091, manometr kat. č. 373 10, kapalinu fialové barvy do manometru kat. č. 391 15, Pitotova trubice kat. č. 373 13, plastové trubičky, držák na vzduchový fén a stojany dodávané též firmou LD Didactic.

4.2.2 Pracovní úkol

Změřte hustotu tekutiny proudící Venturiho trubicí.

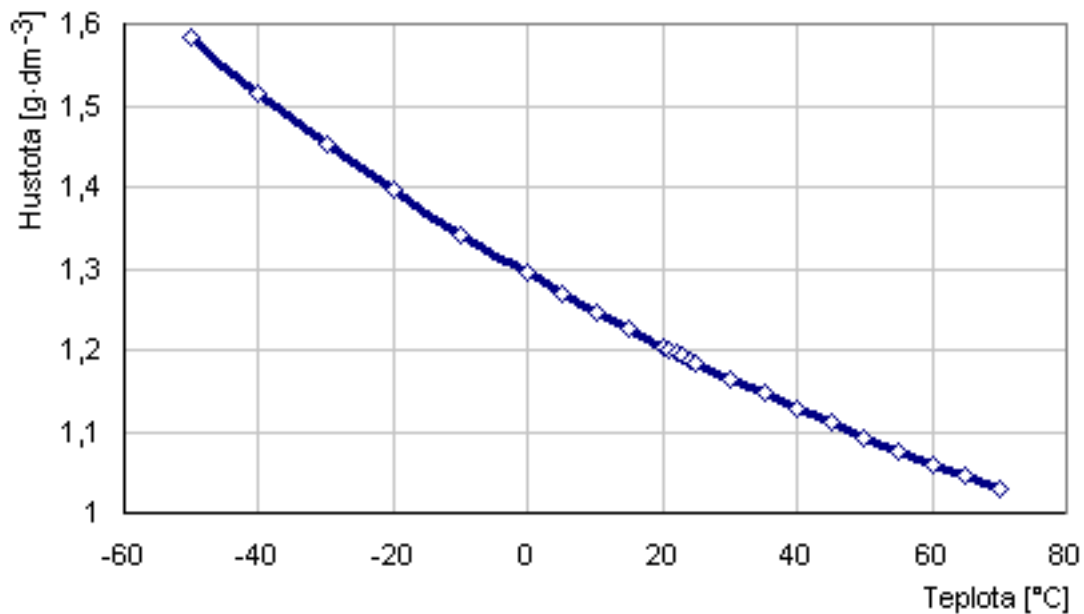
4.2.3 Postup měření

Podle obr. č. 11 si sestavíme měřicí soupravu. Měření této úlohy je velmi podobné jako měření úlohy předchozí a můžeme dokonce tyto úlohy měřit najednou. Abychom však mohli uplatnit tento postup měření, musíme si nejdříve ověřit, zda v naší trubici platí rovnice kontinuity. Toto ověření jsme prováděli právě v předchozí úloze.

Před měřením si musíme ověřit, zda je manometr ve vodorovné poloze a zda je kapalina v manometru přesně na hodnotě 0. Jak vidíme podle rovnice (4.6) budeme si muset zjistit jednotlivé rychlosti v místech, mezi nimiž budeme měřit rozdíl tlaků. Na konci trubice budeme měřit rychlost tekutiny pomocí Pitotovy trubice a pomocí rovnice kontinuity si určíme rychlost v průřezech B, C a D na Venturiho trubicí.

Po určení rychlosti, připojíme místo Pitotovy trubice k manometru samotnou Venturiho trubicí a měříme mezi jednotlivými místy rozdíl tlaků. Opět při přeměně Pitotovy trubice za Venturiho trubicí nesmíme fén vypínat, aby se nám nezměnila naměřená rychlost. Zde se nabízí právě možnost sloučit měření této úlohy s měřením úlohy předchozí, kdy si můžeme s manometru opsat jak rozdíl rychlostí tekutiny mezi jednotlivými otvory, tak i rozdíl tlaků mezi těmito místy.

I při tomto postupu je však nutné si nejdříve ověřit platnost rovnice kontinuity a až poté právě pomocí rovnice kontinuity určovat rychlost tekutiny pro výpočet hustoty vzduchu. Důležitou informací při měření hustoty vzduchu je také teplota vzduchu v místnosti, ve které měření provádíme. Jak ukazuje graf 1 a tabulka 9, hustota vzduchu se s měnící se teplotou vzduchu mění.



Graf 1 Převzato a upraveno z [4]

t [°C]	ρ [kg/m ³]
-50	1,582
-40	1,514
-30	1,452
-20	1,395
-10	1,342
0	1,295
5	1,269
10	1,247
15	1,225
20	1,204

t [°C]	ρ [kg/m ³]
21	1,2
22	1,196
23	1,192
24	1,188
25	1,184
30	1,164
40	1,127
50	1,092
60	1,06
70	1,029

Tabulka 9 Převzato a upraveno z [4]

Samotné měření budeme provádět pro následující kombinaci otvorů:

- $A \rightarrow B$
- $A \rightarrow C$
- $A \rightarrow D$

Kombinaci otvorů $A \rightarrow E$ v tomto měření vynecháme, protože ve výrazu (4.6) by nám v ideálním případě vyšla nula ve jmenovateli.

Pro každou kombinaci provedeme 20 měření pro 2 různé rychlosti tekutiny v trubici. Při každém měření si musíme opět zkontrolovat vodorovnou polohu manometru a také si musíme zkontrolovat hladinu kapaliny v manometru, zda je na hodnotě 0. Právě tyto dva faktory mohou negativně ovlivnit výsledek naší práce. Není dobré provádět měření v místnosti, kde máme na začátku měření výrazně chladněji než v průběhu měření. Výrazná změna teploty v místnosti a tedy i teploty vzduchu, který v úloze využíváme, jako proudící kapalinu se může podepsat na nesrovnalostech v měření.

4.2.4 Naměřené hodnoty a vyhodnocení naměřených hodnot

Teplota vzduchu v místnosti byla na začátku experimentu 21°C a na konci experimentu 22°C. Můžeme tedy počítat střední teplotu vzduchu 21,5°C. Změna byla zanedbatelná a neměla by ovlivnit výsledek měření.

1. měření A → B				2. měření A → B			
v_1 [m/s]	d_1 [m]	d_2 [m]	Δp [Pa]	v_1 [m/s]	d_1 [m]	d_2 [m]	Δp [Pa]
8,0	0,1050	0,0754	104	10,2	0,1050	0,0754	181
8,1	0,1051	0,0759	113	10,0	0,1051	0,0759	173
7,8	0,1054	0,0754	100	10,5	0,1054	0,0754	172
7,5	0,1052	0,0756	102	10,6	0,1052	0,0756	171
8,1	0,1051	0,0759	101	9,6	0,1051	0,0759	170
7,8	0,1052	0,0752	114	10,2	0,1052	0,0752	178
7,7	0,1046	0,0756	105	9,6	0,1046	0,0756	172
7,6	0,1053	0,0754	108	10,1	0,1053	0,0754	170
7,4	0,1049	0,0757	100	9,8	0,1049	0,0757	182
7,5	0,1067	0,0759	103	10,0	0,1067	0,0759	172
7,4	0,1057	0,0754	106	9,9	0,1057	0,0754	170
8,1	0,1053	0,0753	101	9,6	0,1053	0,0753	172
7,8	0,1048	0,0755	110	9,7	0,1048	0,0755	171
7,6	0,1061	0,0753	101	10,4	0,1061	0,0753	178
7,8	0,1057	0,0758	112	9,6	0,1057	0,0758	174
7,3	0,1054	0,0754	113	9,7	0,1054	0,0754	181
7,9	0,1058	0,0758	109	10,6	0,1058	0,0758	176
7,9	0,1049	0,0759	105	9,5	0,1049	0,0759	170
8,1	0,1052	0,0752	115	10,6	0,1052	0,0752	170
7,7	0,1057	0,0754	100	9,9	0,1057	0,0754	175

Tabulka 10

	1. měření A → B				2. měření A → B			
	v_1 [m/s]	d_1 [m]	d_2 [m]	Δp [Pa]	v_1 [m/s]	d_1 [m]	d_2 [m]	Δp [Pa]
průměr	7,8	0,1054	0,0756	106	10,0	0,1054	0,0756	174
průměrná odch.	0,2	0,0004	0,0002	5	0,3	0,0004	0,0002	3
hor. Int.	8,8	0,1072	0,0767	129	11,6	0,1072	0,0767	191
dol. Int.	6,7	0,1035	0,0744	83	8,4	0,1035	0,0744	157
průměr	7,8	0,1054	0,0756	106	10,0	0,1054	0,0756	174
směrodatná odch.	0,2	0,0005	0,0002	5	0,4	0,0005	0,0002	4
ρ [kg/m ³]	1,268 ± 0,004				1,2493 ± 0,0008			

Tabulka 11

1. měření A → C				2. měření A → C			
v_1 [m/s]	d_1 [m]	d_2 [m]	Δp [Pa]	v_1 [m/s]	d_1 [m]	d_2 [m]	Δp [Pa]
4,0	0,1050	0,059	89	7,2	0,1050	0,059	264
3,8	0,1051	0,058	89	6,6	0,1051	0,058	259
4,2	0,1054	0,058	90	6,5	0,1054	0,058	257
4,1	0,1052	0,059	90	6,7	0,1052	0,059	264
4,0	0,1051	0,057	87	6,7	0,1051	0,057	264
4,2	0,1052	0,058	89	7,2	0,1052	0,058	264
3,9	0,1046	0,060	92	6,7	0,1046	0,060	265
4,1	0,1053	0,059	90	6,7	0,1053	0,059	261
3,5	0,1049	0,059	89	7,1	0,1049	0,059	261
3,4	0,1067	0,058	89	6,9	0,1067	0,058	261
4,1	0,1057	0,061	90	6,7	0,1057	0,061	263
3,7	0,1053	0,057	88	6,9	0,1053	0,057	262
4,2	0,1048	0,055	91	6,4	0,1048	0,055	265
3,5	0,1061	0,061	89	6,7	0,1061	0,061	264
3,9	0,1057	0,058	92	6,7	0,1057	0,058	268
3,7	0,1054	0,056	89	6,8	0,1054	0,056	267
4,1	0,1058	0,059	92	6,7	0,1058	0,059	262
3,5	0,1049	0,060	87	6,6	0,1049	0,060	268
4,1	0,1052	0,057	88	7,2	0,1052	0,057	268
4,0	0,1057	0,059	91	6,4	0,1057	0,059	262

Tabulka 12

	1. měření A → C				2. měření A → C			
	v_1 [m/s]	d_1 [m]	d_2 [m]	Δp [Pa]	v_1 [m/s]	d_1 [m]	d_2 [m]	Δp [Pa]
průměr	3,9	0,1054	0,0584	90	6,8	0,1054	0,0584	263
průměrná odch.	0,2	0,0004	0,0012	1	0,2	0,0004	0,0012	2
hor. Int.	5,0	0,1072	0,0646	96	7,7	0,1072	0,0646	275
dol. Int.	2,8	0,1035	0,0522	83	5,8	0,1035	0,0522	252
průměr	3,9	0,1054	0,0584	90	6,8	0,1054	0,0584	263
směrodatná odch.	0,3	0,0004	0,0015	1	0,2	0,0005	0,0015	3
ρ [kg/m ³]	1,228 ± 0,004				1,199 ± 0,005			

Tabulka 13

1. měření A → D				2. měření A → D			
v_1 [m/s]	d_1 [m]	d_2 [m]	Δp [Pa]	v_1 [m/s]	d_1 [m]	d_2 [m]	Δp [Pa]
4,8	0,105	0,0751	42	11,1	0,1050	0,0751	223
5,0	0,1051	0,0756	47	10,7	0,1051	0,0756	220
5,2	0,1054	0,0753	45	10,8	0,1054	0,0753	216
5,4	0,1052	0,0759	44	10,9	0,1052	0,0759	219
4,8	0,1051	0,0754	47	11,1	0,1051	0,0754	219
5,4	0,1052	0,0758	41	11,0	0,1052	0,0758	224
5,3	0,1046	0,0759	44	10,9	0,1046	0,0759	223
4,6	0,1053	0,0752	47	11,2	0,1053	0,0752	223
5,0	0,1049	0,0754	43	11,0	0,1049	0,0754	216
5,0	0,1067	0,0758	46	10,7	0,1067	0,0758	223
5,3	0,1057	0,0757	41	11,2	0,1057	0,0757	222
5,0	0,1053	0,0754	41	10,8	0,1053	0,0754	215
5,3	0,1048	0,0758	44	11,1	0,1048	0,0758	222
4,6	0,1061	0,0753	47	11,0	0,1061	0,0753	219
4,7	0,1057	0,0753	46	11,2	0,1057	0,0753	216
5,3	0,1054	0,0754	41	10,9	0,1054	0,0754	223
5,2	0,1058	0,0759	44	11,2	0,1058	0,0759	223
5,2	0,1049	0,0756	43	10,9	0,1049	0,0756	216
5,3	0,1052	0,0753	42	10,9	0,1052	0,0753	225
5,0	0,1057	0,0759	43	10,8	0,1057	0,0759	221

Tabulka 14

	1. měření A → D				2. měření A → D			
	v_1 [m/s]	d_1 [m]	d_2 [m]	Δp [Pa]	v_1 [m/s]	d_1 [m]	d_2 [m]	Δp [Pa]
průměr	5,1	0,1054	0,0756	44	11,0	0,1054	0,0756	220
průměrná odch.	0,2	0,0004	0,0002	2	0,1	0,0004	0,0002	3
hor. Int.	6,2	0,1072	0,0768	53	11,7	0,1072	0,0768	235
dol. Int.	3,9	0,1035	0,0743	35	10,3	0,1035	0,0743	206
průměr	5,0	0,1054	0,0756	44	11,0	0,1054	0,0756	220
směrodatná odch.	0,3	0,0005	0,0003	2	0,2	0,0005	0,0003	3
ρ [kg/m ³]	1,263 ± 0,001				1,317 ± 0,007			

Tabulka 15

Měření	ρ [kg/m ³]
1. měření A → B	1,268
2. měření A → B	1,2493
1. měření A → C	1,228
2. měření A → C	1,199
1. měření A → D	1,263
2. měření A → D	1,317

Tabulka 16

	ρ [kg/m ³]
průměr	1,25
průměrná odch.	0,23
hor. int.	2,40
dol. int.	0,11
průměr	1,25
směrodatná odch.	0,04

4.2.5 Diskuse

Hustota nám nevyšla úplně přesně podle tabulky. Je však třeba uvažovat chyby, které při měření vznikají. Při odvození Bernoulliho rovnice jsme vycházeli z představy ideální tekutiny, kde nedochází k tření mezi částicemi ani k tření mezi tekutinou a stěnou trubice. V našem případě však toto tření může zkreslit výsledek.

Výrazná chyba může vzniknout také nesnadným odečtení průměru trubice v jednotlivých místech měření. Snadné není ani určení rychlosti, proudící tekutiny a rozdíl tlaků mezi místy měření. Na výsledku se také může projevit vlhkost vzduchu a změna stavby vzduchu za dobu experimentu, kdy nedocházelo k místnosti k větrání a vzduch obsahoval více CO₂ než na začátku měření.

Při měření se neobjevil žádný technický problém, který by nám v měření bránil. Jediný technický problém může nastat při zapojování Pitotovy trubice do manometru a následné odpojování a připojení otvorů Venturiho trubice, kdy hadičky jdou na skleněné trubičky navléci s problémy.

4.2.6 Závěr určení hustoty proudící tekutiny

Podle tabulky 9 nám hustota měla vyjít 1,2 kg·m⁻³. V našem měření nám vyšla hustota vzduchu (1,25 ± 0,04) kg·m⁻³. I přesto, že nám hodnota nevyšla přesně podle tabulek, můžeme měření považovat za úspěšné, protože bylo zatíženo několik chybami, které mohou výsledek ovlivnit.

5 Součinitel odporu jednotlivých tvarů

5.1 Teorie

Při obtékání tělesa reálnou kapalinou dochází k poměrně složitému jevu, který vzniká díky přemísťování mnoha částic tekutiny vzhledem k povrchu tělesa. U reálné tekutiny nemůžeme zanedbat tření, jako jsme mohli u tekutiny ideální.

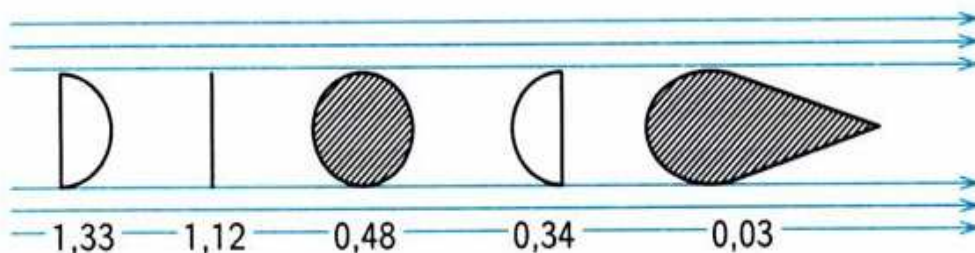
Právě v důsledku vnitřního tření mezi tělesem a částicemi tekutiny vznikají odporové síly, které působí vždy proti pohybu tělesa v tekutině. My provádíme pokus pomocí plynu, proto budeme mluvit o aerodynamické odporové síle. Tento fyzikální jev nazýváme odpor prostředí.

Pro měření velikosti aerodynamické odporové síly, která působí na těleso libovolného tvaru, odvodil Newton vztah. Tento vztah platí pouze u středně velkých rychlostí, které nepřekračují rychlost šíření zvuku v daném prostředí⁹:

$$F = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \tag{5.1}$$

V naší úloze se zaměříme na součinitel odporu C_x . Jde o bezrozměrný koeficient, který závisí na tvaru tělesa. Největší součinitel odporu má dutá polokoule, jejíž dutina je obrácena proti směru proudění. Tohoto se využívá např. u padáků, naopak nejmenší součinitel odporu má těleso proudnicového neboli aerodynamického tvaru. Tvar toho tělesa připomíná kapku a využití tohoto tělesa je hlavně u letadel či u závodních automobilů. Podoba s aerodynamickým tvarem nastává také ve zvířecí říši, kdy hlavně ryby a také ptáci mají tvar těla velmi podobný tomuto tělesu.

⁹ Pro vzduch se uvádí rychlost šíření zvuku přibližně 335 ms⁻¹.



Obr. č 15 Hodnoty součinitele odporu u různých tvarů, upraveno a převzato z [5]

Platí, že čím menší je součinitel odporu vzduchu, tím menší odpor klade prostředí tělesu při průchodu.

Pro naše měření musíme z rovnice (5.1) vyjádřit C_x :

$$C_x = \frac{2 \cdot F}{\rho \cdot v^2 \cdot S} \quad (5.2)$$

V případě, kdy těleso překročí rychlost zvuku, vytváří rázovou vlnu. Tento jev můžeme vidat hlavně u nadzvukových letadel, při jejich průletu.

5.2 Experimentální určení součinitele odporu různých těles

5.2.1 Pomůcky

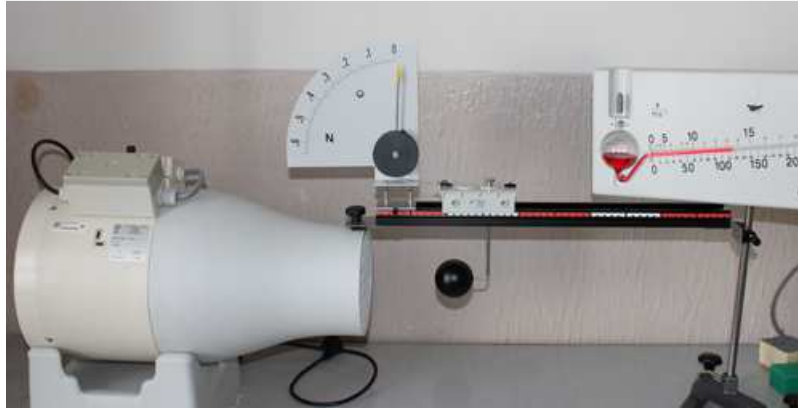
K měření úlohy využijeme pouze pomůcky dostupné od firmy LD Didactic. Základ celého měření je vzduchový fén kat. č. 373 04, manometr kat. č. 373 10, kapalinu fialové barvy do manometru kat. č. 391 15, Pitotova trubice kat. č. 373 13, siloměr kat. č. 373 14, tělesa různých tvarů kat. č. 373 071, plastové trubičky, držák na vzduchový fén a stojany dodávané též firmou LD Didactic, posuvné měřítko.

5.2.2 Pracovní úkol

Ověřte součinitel odporu jednotlivých těles.

5.2.2 Postup měření

Abychom mohli zjistit součinitel odporu těles různých tvarů, musíme si sestavit zařízení podle obrázku 16. Místo Venturiho trubice, kterou jsme používali v předchozích dvou úlohách, si nyní na hlavici fénu přiděláme lyžinu pro pojízdný vozíček. Po sestavení zařízení můžeme přikročit k vlastnímu měření.



Obr. č 16

Princip měření této úlohy je zaměřen na měření odporové síly tělesa a rychlosti proudícího vzduchu kolem tělesa. S využitím 1. Newtonova zákona, můžeme vyslovit hypotézu, která nám říká, že pokud těleso setrvává v klidu, jsou odporová síla a síla, která uvádí těleso do pohybu, stejně velké. Protože měříme sílu, která působí na těleso, respektive na vozík, na kterém je těleso umístěno, musí platit, že tato síla je stejná jako odporová síla daného tvaru.

Podle upraveného Newtonova vztahu (5.2) potřebujeme pro výpočet součinitele odporu znát velikost odporové síly, velikost rychlosti proudící tekutiny a také průřez tělesa. Právě při měření průřezu tělesa nastává v této úloze největší problém. Průřez tělesa musíme měřit v nejširším místě tělesa a měření opakujeme desetkrát pro každé těleso. Podle vzorce známého z matematiky, si vypočítáme obsah průřezu tělesa:

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

(5.3)

Pomocí Pitotovy trubice, která je připojena na manometr, stejně jako v předchozích úlohách, změříme velikost rychlosti proudícího vzduchu těsně u tělesa. Měření rychlosti opakujeme 20 krát pro každé těleso a pro dvě různá nastavení regulátoru rychlosti. Při každém měření rychlosti si také zapíšeme výslednou sílu.

Protože nepřipouštíme deformační účinky síly, můžeme uvažovat, že tvar tělesa se při měření nemění a obsah průřezu, nemusíme měřit při každém měření rychlosti. Průřez nám stačí si změřit před upevněním tělesa do držáku.

V naší úloze se zaměříme na tělesa tvaru:

- koule
- malého a velkého puku (rozdíl pouze v průměru)
- duté polokoule
- tělesa Aerodynamického tvaru

Při měření úlohy nám největší problém může dělat odčítání velikosti síly z přiloženého siloměru. Protože měříme pouze rychlost proudícího vzduchu, nemusíme při měření odpojovat Pitotovu trubici, pomocí které právě rychlost proudícího vzduchu měříme. Průměr těles si určíme pomocí posuvného měřítka.

Hodnota součinitele odporu vzduchu se určuje pouze experimentálně a nelze ji stanovit výpočtem na základě rozměrů těles. Ověříme tedy, zda se přibližujeme hodnotám na obrázku 158. Protože výsledek nezáleží pouze na tvaru a rozměrech tělesa, ale také na kvalitě materiálu, z kterého je těleso vyrobeno, na teplotě a vlhkosti vzduchu, můžeme dostat rozdílná čísla. Výsledek bude zatížen také chybou, kterou způsobuje tření na siloměru, protože nám zde nebudou vycházet vysoké hodnoty, je tato chyba podstatným faktorem, který zkreslí náš výsledek.

Následující odvození nám ukazuje, že součinitel odporu vzduchu je bezrozměrná veličina¹⁰.

¹⁰ Veličina, u které se neuvádí jednotka

Abychom mohli udělat odvození výsledné jednotky, nahradíme si každou veličinu ve výrazu (5.2) jednotkou.

$$\frac{\text{N}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \text{m}^2} = \frac{\frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{s}^2}}{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^4}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2}}$$

Nyní máme ve výrazu pouze základní SI jednotky. Následně můžeme zkrátit metry ve jmenovateli a dostaneme výraz:

$$\frac{\frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{s}^2}}{\frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{s}^2}} = 1$$

Vidíme, že nám vyjde pouze číselná hodnota 1 a tím jsme si ověřili, že součinitel odporu vzduchu je opravdu bezrozměrná jednotka. Stejným postupem, můžeme většinu fyzikálních jednotek vyjádřit v základních jednotkách SI nebo, když si nemůžeme vzpomenou na jednotku, můžeme si jí tímto způsobem odvodit.

5.2.3 Naměřené hodnoty a vyhodnocení naměřených hodnot

Hustotu vzduchu jsme určili podle tabulkové hodnoty pro teplotu vzduchu 15 °C. Budeme tedy uvažovat hustotu vzduchu $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, tuto hodnotu si můžeme zjistit v tabulce 9.

koule 1			koule 2		
v [m/s]	F [N]	d [m]	v [m/s]	F [N]	d [m]
9,8	0,06	0,0554	13,2	0,10	0,0554
10,3	0,07	0,0555	12,6	0,11	0,0555
10,2	0,06	0,0555	13,3	0,10	0,0555
10,4	0,06	0,0553	13,3	0,11	0,0553
10,6	0,07	0,0554	13,4	0,10	0,0554
10,2	0,07	0,0556	12,7	0,10	0,0556
10,4	0,06	0,0555	13,4	0,10	0,0555
9,9	0,07	0,0554	13,1	0,10	0,0554
10,0	0,07	0,0556	12,6	0,10	0,0556
9,9	0,07	0,0555	12,7	0,10	0,0555
9,9	0,07		13,2	0,10	
9,8	0,06		13,0	0,10	
10,5	0,06		13,3	0,10	
10,1	0,07		13,3	0,10	
9,8	0,07		13,0	0,10	
10,2	0,07		12,6	0,10	
10,0	0,06		12,6	0,10	
10,4	0,07		13,2	0,10	
10,1	0,07		12,9	0,10	
10,5	0,07		13,2	0,10	

Tabulka 17

	koule 1			koule 2		
	v [m/s]	F [N]	d [m]	v [m/s]	F [N]	d [m]
průměr	10,2	0,067	0,0555	13,0	0,101	0,0555
průměrná odch.	0,2	0,002	0,0001	0,3	0,003	0,0001
hor. Int.	11,3	0,076	0,0559	14,3	0,115	0,0559
dol. Int.	9,0	0,057	0,0551	11,7	0,086	0,0551
průměr	10,2	0,067	0,0555	13,0	0,101	0,0555
směrodatná odch.	0,3	0,002	0,0001	0,3	0,003	0,0001
C_x	0,427 ± 0,009			0,394 ± 0,003		

Tabulka 18

malý puk 1			malý puk 2		
v [m/s]	F [N]	d [m]	v [m/s]	F [N]	d [m]
13,1	0,17	0,042	12,1	0,125	0,042
13,4	0,165	0,0425	11,8	0,129	0,0425
13,2	0,175	0,042	11,7	0,121	0,042
13,5	0,168	0,042	12,2	0,125	0,042
13,2	0,17	0,0425	12,3	0,123	0,0425
13,3	0,165	0,0425	11,8	0,122	0,0425
13,1	0,175	0,042	11,9	0,125	0,042
13,2	0,168	0,0423	12,4	0,123	0,0423
13,4	0,175	0,0426	12,3	0,122	0,0426
13,3	0,168	0,0425	12,2	0,123	0,0425
13,3	0,175		11,8	0,124	
13,2	0,165		11,9	0,122	
13,5	0,167		11,7	0,123	
13,1	0,165		12,1	0,12	
13,6	0,168		12,2	0,125	
13,5	0,165		11,9	0,126	
13,4	0,167		11,8	0,124	
13,5	0,172		12,1	0,125	
13,4	0,175		11,7	0,125	
13,3	0,168		12,1	0,122	

Tabulka 19

	malý puk 1			malý puk 2		
	v [m/s]	F [N]	d [m]	v [m/s]	F [N]	d [m]
průměr	13,3	0,169	0,0423	12,0	0,124	0,0423
průměrná odch.	0,1	0,003	0,0002	0,2	0,002	0,0002
hor. Int.	14,0	0,186	0,0435	13,0	0,132	0,0435
dol. Int.	12,7	0,153	0,0411	11,0	0,115	0,0411
průměr	13,3	0,169	0,0423	12,0	0,124	0,0423
směrodatná odch.	0,1	0,004	0,0001	0,2	0,002	0,0001
C_x	1,095 ± 0,006			0,99 ± 0,02		

Tabulka 20

velký puk 1			velký puk 2		
v [m/s]	F [N]	d [m]	v [m/s]	F [N]	d [m]
12,9	0,565	0,0798	5,1	0,09	0,0798
12,8	0,554	0,0796	5,6	0,095	0,0796
12,8	0,561	0,0798	5,3	0,11	0,0798
12,7	0,556	0,0798	5,5	0,095	0,0798
12,9	0,563	0,0795	5,5	0,105	0,0795
13,1	0,55	0,0798	5,6	0,095	0,0798
12,8	0,561	0,0796	5,2	0,098	0,0796
12,8	0,555	0,0793	5,3	0,095	0,0793
12,7	0,565	0,0798	5,6	0,091	0,0798
12,6	0,568	0,0799	5,4	0,105	0,0799
12,9	0,562		5,2	0,095	
13,1	0,561		5,3	0,09	
12,9	0,554		5,5	0,11	
12,8	0,553		5,2	0,095	
12,9	0,562		5,1	0,098	
12,7	0,565		5,3	0,095	
12,8	0,554		5,2	0,095	
12,6	0,553		5,3	0,095	
12,9	0,561		5,2	0,095	
12,7	0,568		5,6	0,095	

Tabulka 21

	velký puk 1			velký puk 2		
	v [m/s]	F [N]	d [m]	v [m/s]	F [N]	d [m]
průměr	12,8	0,560	0,0797	5,4	0,097	0,0797
průměrná odch.	0,1	0,005	0,0002	0,2	0,004	0,0002
hor. Int.	13,4	0,584	0,0805	6,1	0,119	0,0805
dol. Int.	12,3	0,535	0,0789	4,6	0,075	0,0789
průměr	12,8	0,560	0,0797	5,4	0,097	0,0797
směrodatná odch.	0,1	0,005	0,0001	0,2	0,006	0,0001
C_x	1,101 ± 0,003			1,097 ± 0,009		

Tabulka 22

dutá polokoule 1 - padák			dutá polokoule 2 - padák		
v [m/s]	F [N]	d [m]	v [m/s]	F [N]	d [m]
13,1	0,41	0,0557	8,1	0,135	0,0557
12,8	0,38	0,0561	7,8	0,13	0,0561
12,9	0,395	0,0559	8,2	0,14	0,0559
13,1	0,385	0,0557	8,4	0,135	0,0557
12,9	0,415	0,0561	7,9	0,139	0,0561
13,1	0,405	0,0558	8,2	0,145	0,0558
12,7	0,395	0,0556	7,9	0,145	0,0556
12,9	0,385	0,0557	7,5	0,133	0,0557
13,1	0,405	0,0559	8,2	0,136	0,0559
12,8	0,395	0,0561	7,9	0,137	0,0561
12,9	0,39		8,3	0,143	
13,2	0,405		7,8	0,139	
12,9	0,415		8,2	0,145	
12,9	0,395		8,2	0,139	
12,8	0,405		7,9	0,138	
12,9	0,395		8,3	0,145	
13,1	0,4		7,9	0,135	
13	0,415		7,8	0,138	
12,9	0,395		8,1	0,145	
13,1	0,385		7,9	0,139	

Tabulka 23

	dutá polokoule 1 - padák			dutá polokoule 2 - padák		
	v [m/s]	F [N]	d [m]	v [m/s]	F [N]	d [m]
průměr	13,0	0,40	0,0559	8,0	0,139	0,0559
průměrná odch.	0,1	0,01	0,0002	0,2	0,004	0,0002
hor. Int.	13,6	0,44	0,0567	9,0	0,157	0,0567
dol. Int.	12,4	0,35	0,0550	7,0	0,121	0,0550
průměr	13,0	0,40	0,0559	8,0	0,139	0,0559
směrodatná odch.	0,1	0,01	0,0001	0,2	0,004	0,0001
C_x	1,56 ± 0,02			1,42 ± 0,03		

Tabulka 24

Aerodynamický tvar 1			Aerodynamický tvar 2		
v [m/s]	F [N]	d [m]	v [m/s]	F [N]	d [m]
12,7	0,01	0,0557	20,0	0,017	0,0557
12,8	0,01	0,0561	20,2	0,019	0,0561
12,7	0,01	0,0559	20,0	0,016	0,0559
12,8	0,01	0,0557	20,4	0,017	0,0557
12,9	0,01	0,0561	20,5	0,025	0,0561
12,8	0,01	0,0558	20,5	0,017	0,0558
12,7	0,01	0,0556	20,3	0,017	0,0556
12,9	0,01	0,0557	19,6	0,021	0,0557
13,1	0,01	0,0559	20,5	0,016	0,0559
12,9	0,01	0,0561	19,7	0,018	0,0561
12,7	0,01		20,5	0,02	
13,1	0,01		20,1	0,017	
12,8	0,01		19,6	0,019	
12,9	0,01		19,8	0,015	
13,1	0,02		19,7	0,024	
12,9	0,01		19,7	0,025	
13,1	0,01		19,5	0,025	
12,8	0,01		19,8	0,019	
12,7	0,01		20,4	0,02	
13,1	0,02		20,4	0,015	

Tabulka 25

	aerodynamický tvar 1			aerodynamický tvar 2		
	v [m/s]	F [N]	d [m]	v [m/s]	F [N]	d [m]
průměr	12,9	0,011	0,0559	20,1	0,021	0,0559
průměrná odch.	0,1	0,002	0,0002	0,3	0,002	0,0002
hor. Int.	13,5	0,022	0,0567	21,7	0,033	0,0567
dol. Int.	12,2	0,001	0,0550	18,4	0,009	0,0550
průměr	12,9	0,011	0,0559	20,1	0,021	0,0559
směrodatná odch.	0,1	0,002	0,0001	0,4	0,003	0,0001
C_x	0,0423 ± 0,0009			0,037 ± 0,002		

Tabulka 26

5.2.5 Diskuse

Podařilo se nám měřením zjistit součinitel odporu u 5 základních těles. Hodnoty nám nevycházejí sice přesně podle hodnot tabulkových. Náš experiment je zatížen několika chybami. Chybu způsobuje upevnění tělesa k siloměru, kdy osička na upevnění těles působí také odpor protékající tekutině. Nemůžeme porovnávat naše naměřené hodnoty a hodnoty tabulkové, protože u součinitele odporu záleží také na povrchu tělesa, ne pouze na tvaru a velikosti. My však povrch tělesa nebereme v úvahu.

Při měření je třeba měřit rychlost vzduchu přesně u tělesa, aby nedocházelo ke zkreslení. Díky tření prostředí je jiná rychlost vzduchu při východu z fénu a rychlost vzduchu v okolí tělesa a jiná v okolí tělesa. Stupnice siloměru je velmi jemná, a není proto problém s odčítáním naměřené hodnoty. Při měření se nevyskytl žádný technický problém. Protože na manometru měříme pouze rychlost a neměříme tlak, nemusíme manometr přepojovat a nehrozí tak ulomení skleněných trubiček.

U tělesa aerodynamického tvaru musíme měřit součinitel odporu vzduchu pro vysokou rychlost, protože pro malé rychlosti nejsme schopni sílu naměřit. Měřitelná síla začíná až po překonání hranice rychlosti proudící tekutiny 12 m/s.

Úlohu lze upravit o část, kdy budeme měřit součinitel odporu těles stejného tvaru, ale s výrazným rozdílem hrubosti povrchu. Díky zařízení pro upnutí vlastního tvaru můžeme hlavně na technických školách měřit součinitel odporu vlastního tvaru.

5.2.6 Závěr určení součinitele odporu

Podařilo se nám určit součinitel odporu těchto základních těles:

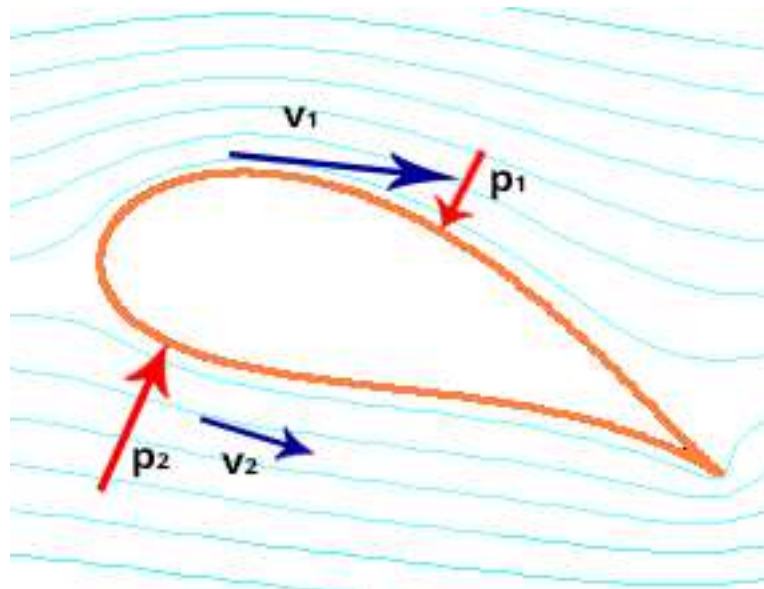
- koule: $(0,427 \pm 0,009)$ a $(0,394 \pm 0,003)$
- puk malý: $(1,095 \pm 0,006)$ a $(0,99 \pm 0,02)$
- puk velký: $(1,101 \pm 0,003)$ a $(1,097 \pm 0,009)$
- dutá polokoule - padák: $(1,56 \pm 0,02)$ a $(1,42 \pm 0,03)$
- aerodynamické těleso: $(0,0423 \pm 0,0009)$ a $(0,037 \pm 0,002)$

6 Studie sil působících na profil křídla

6.1 Teorie

Při konstrukci křídla se vychází z poznatku o obtékání těles a součiniteli odporu jednotlivých tvarů. Konstrukteři se snaží co nejvíce přiblížit tvar křídla právě ideálnímu aerodynamickému tvaru. U křídla často dochází k většímu zakulacení horní náběhové hrany před dolní hranou, ale jsou i výjimky jako například profily s označením E475, Eppler 270 či NACA 0018.¹¹ Profily těchto typů mají spodní hranu delší než hranu horní. My jsme měřili profil křídla typu CLARK-Y¹², který má horní hranu delší než spodní. Budeme se tedy věnovat tomuto typu křídla.

Profil křídla a jeho nosných ploch je konstruován tak, aby nad křídlem docházelo ke zhuštění proudnic. My však již víme, že vzdálenost proudnic nám udává graficky velikost rychlosti proudící tekutiny nebo-li, když jsou proudnice blíže u sebe, je rychlost tekutiny, která profil obtéká, vyšší než v místě s větším rozestupem proudnic. Podle Bernoulliho rovnice však musí platit, že v místě s vyšší rychlostí tekutiny je nižší tlak než v místě, kde tekutina protéká pomaleji. Právě tento poznatek způsobuje vzlet a udržení letadla ve vzduchu.



Obr. č 17 Schéma profilu letadla v porudící tekutině, upraveno a staženo z [6]

¹¹ Vybráno z databáze softwaru pro letecké modeláře Profili 2.16

¹² Vycházíme podle rozměrů, které uvádí výrobce v [7] a podle databáze softwaru Profili 2.16

Na profil křídla tedy působí vztlaková síla F_{vz} , která překonává sílu tíhovou a udržuje tak letadlo ve vzduchu. Další síla, která působí na křídlo, je síla odporová F_x , kterou způsobuje proudící tekutina. Tuto sílu musí vyrovnávat motory letadel. Jak víme podle 1. NZ, který zní [8]:

Těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, pokud je výslednic sil na něho působící nulová.

Musí se při letu, kdy se letadlo pohybuje rovnoměrně přímočaře, rovnat odporová síla vzduchu tažné síle motorů. Konstrukteři se tedy snaží najít takový profil křídla, který bude klást proudící tekutině neměnný odpor, a bude tedy potřeba menší tažná síla motoru a letadlo ušetří na spotřebě paliva.

Celková odporová aerodynamická síla, která působí na křídlo letadla, se určí jako vektorový součet síly vztlakové a síly odporové. Směr této síly je opačný, než je směr pohybu letadla. K číselnému určení celkové odporové aerodynamické síly nám stačí znalost Pythagorovy věty, která nám říká [9]:

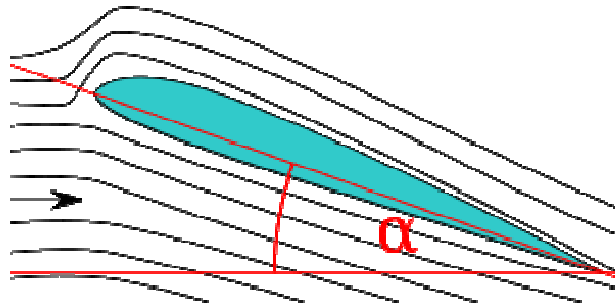
Obsah čtverce sestrojeného nad přeponou, se rovná součtu obsahů čtverců sestrojených nad oběma jeho odvěsnami.

Výslednou aerodynamickou sílu tedy můžeme vyčíslit jako:

$$F = \sqrt{F_{vz}^2 + F_x^2}$$

(6.1)

Úhel náběhu je v aerodynamice označení pro úhel, který svírá vektor nabíhajícího proudu vzduchu s referenční přímkou tělesa (nejčastěji tětivou profilu křídla).



Obr. č 18 Úhel náběhu, převzato z [10]

Při porovnávání vlastností jednotlivých profilů křidel se nejčastěji porovnávají hodnoty F_{vzmax} a F_{xmin} . Na každý typ letadla je potřeba jiný profil křídla, proto se porovnává při jakém úhlu náběhu je nejvyšší vztlaková síla a při jakém úhlu náběhu je nejnižší síla odporová. Častý ukazatel používaný při porovnávání jednotlivých profilů je také maximální hodnota poměru síly vztlakové a síly odporové. Pro porovnání různých profilů křídla je tedy důležité, při jakém úhlu náběhu je poměr vztlakové a odporové síly nejvyšší.

6.2 Experimentální ověření

6.2.1 Pomůcky

K měření úlohy využijeme pouze pomůcky dostupné od firmy LD Didactic. Základ celého měření je vzduchový fén kat. č. 373 04, vzduchový tunel kat. č. 373 12, profilkřídla a siloměr pro měření vztlakové síly kat. č. 373 08, siloměr kat. č. 373 14 nastavitelný profil křídla kat. č. 373 70, Pitotova trubice kat. č. 373 13, plastové trubičky, držák na vzduchový fén a stojany dodávané též firmou LD Didactic.

6.2.2 Pracovní úkoly

- Určete poměr vztlakové s odporové síly křídla, při různém úhlu náběhu.
- Určete velikost vztlakové síly v různých místech profilu křídla.

6.2.3 Postup měření

Ad úkol a)

Zařízení k měření této úlohy si sestavíme podle obrázku 19. S velkou opatrností musíme přidělovat profil křídla do vertikálního siloměru, kde jsou závity pouze vloženy do plastového obalu a při dotažení větší silou může dojít k jejich vytrhnutí. Stejně jako u předchozí úlohy nastává problém při sestavování vzduchového tunelu, jehož díly na sebe nepasují přesně podle návodu.

Na vertikálním zařízení k měření síly můžeme také upravovat úhel náběhu profilu křídla. Tento údaj lze upravovat od 14° až do -8° s rozestupem 2° . Pro každý úhel náběhu měříme vztlakovou i odporovou sílu desetkrát.



Obr. č 19

Vztlakovou sílu odečítáme na vertikálním siloměru, kde také nastavujeme velikost úhlu náběhu a sílu odporovou odčítáme na siloměru, který je přidělán na začátku vzduchového tunelu. V této úloze nepotřebujeme znát rychlost vzduchu, nemusíme tedy připojovat Pitotovu trubici a manometr. Pouze si musíme zajistit, aby rychlost byla konstantní, a nemohlo dojít ke zkreslení výsledku.

..

Ad úkol b)

Pro měření velikosti vztlakové síly v daných místech profilu křídla si sestavíme zařízení podle obrázku 20.



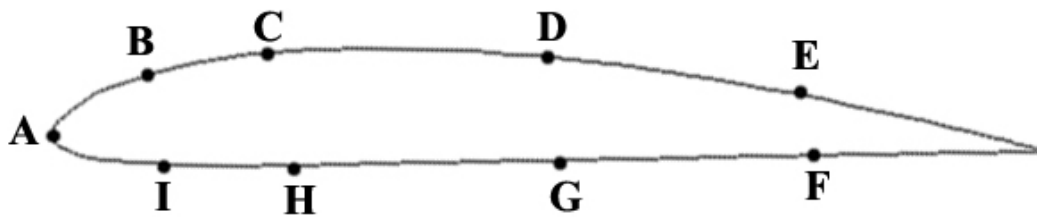
Obr. č 20

Při samotném měření si vždy musíme změřit rychlost proudící tekutiny v okolí křídla. Měření rychlosti provádíme pomocí Pitotovy trubice a manometru. Zde si musíme dávat pozor, aby úroveň kapaliny byla na 0 m/s. Po změření rychlosti tekutiny připojíme na manometr profil křídla a nastavíme hladinu kapaliny v manometru na 150 Pa, abychom mohli měřit také podtlak. Při připojování trubiček na manometr musíme dávat pozor, abychom neulomili skleněnou součást manometru.

Z manometru si budeme opisovat hodnotu Δp , což je rozdíl mezi tlakem atmosférickým¹³ v prostoru měření a tlakem u profilu křídla. Pokud nám vyjde $\Delta p > 0$ vzniká v místě okolo křídla přetlak, protože je zde vyšší tlak, než je tlak v okolním prostoru. Při hodnotě $\Delta p < 0$ vzniká v okolí křídla podtlak.

Na profilu si můžeme snadno nastavit velikost náběhového úhlu. Tento úhel je však třeba vždy kontrolovat, protože připojováním trubičky do různých otvorů může dojít k nechtěné změně tohoto úhlu. Pro další vyhodnocování si označíme otvory na profilu podle obrázku 21.

¹³ Hodnota atmosférického tlaku pro České Budějovice je 1011,8 hPa [11]



Obr. č 21

Měření budeme provádět pro 3 různé náběhové úhly a pro 3 různé rychlosti. Vyhodnocení provedeme graficky pomocí naznačení síly do profilu křídla. Budeme uvádět kladné i záporné hodnoty tlaku hlavně z důvodu, aby bylo dobře vidět, kde je podtlak a kde přetlak. Kladné hodnoty znamenají přetlak, v našem značení je budeme označovat červenou barvou a záporné hodnoty znamenají podtlak a budeme je označovat barvou zelenou.

Pro grafické znázornění tohoto pokusu použijeme zmenšený obrázek profilu, abychom mohli uvést pro jednu rychlost všechny 3 obrázky na jednu stránku.

6.2.4 Naměřené hodnoty a vyhodnocení naměřených hodnot

Ad úkol a)

A	14°	12°	10°	8°	6°	4°	2°	0°	-2°	-4°	-6°	-8°
F_{vz} [N]	1,75	1,55	1,35	1,20	1,05	0,85	0,70	0,55	0,30	0,05	-0,15	-0,40
	1,70	1,50	1,40	1,15	1,10	0,80	0,75	0,50	0,35	0,05	-0,20	-0,40
	1,70	1,55	1,40	1,25	1,15	0,80	0,70	0,55	0,35	0,00	-0,10	-0,45
	1,75	1,50	1,35	1,20	1,10	0,85	0,70	0,50	0,30	-0,05	-0,15	-0,45
	1,75	1,50	1,35	1,20	1,10	0,80	0,65	0,50	0,25	0,05	-0,20	-0,35
	1,75	1,55	1,45	1,15	1,05	0,75	0,75	0,45	0,35	0,05	-0,20	-0,40
	1,70	1,50	1,35	1,25	1,15	0,85	0,65	0,50	0,30	0,00	-0,15	-0,40
	1,75	1,55	1,40	1,20	1,10	0,80	0,70	0,55	0,35	-0,05	-0,15	-0,45
	1,75	1,45	1,40	1,15	1,15	0,80	0,75	0,45	0,30	0,00	-0,20	-0,35
	1,70	1,50	1,40	1,20	1,10	0,85	0,70	0,50	0,35	0,00	-0,15	-0,40
F_x [N]	0,34	0,25	0,18	0,13	0,08	0,07	0,07	0,00	0,01	0,04	0,01	0,07
	0,32	0,23	0,20	0,14	0,09	0,04	0,05	0,03	0,02	0,06	0,03	0,04
	0,35	0,25	0,19	0,12	0,07	0,05	0,04	0,02	0,01	0,02	0,02	0,05
	0,38	0,27	0,18	0,13	0,11	0,07	0,07	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
	0,35	0,21	0,18	0,13	0,09	0,06	0,06	0,03	0,02	0,06	0,04	0,02
	0,32	0,24	0,20	0,14	0,08	0,04	0,07	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04
	0,34	0,29	0,21	0,15	0,12	0,06	0,04	0,03	0,02	0,07	0,05	0,03
	0,35	0,24	0,19	0,13	0,09	0,05	0,06	0,02	0,03	0,01	0,01	0,05
	0,36	0,25	0,18	0,12	0,08	0,04	0,04	0,03	0,01	0,04	0,05	0,01
	0,35	0,23	0,19	0,14	0,08	0,05	0,05	0,01	0,02	0,02	0,01	0,06

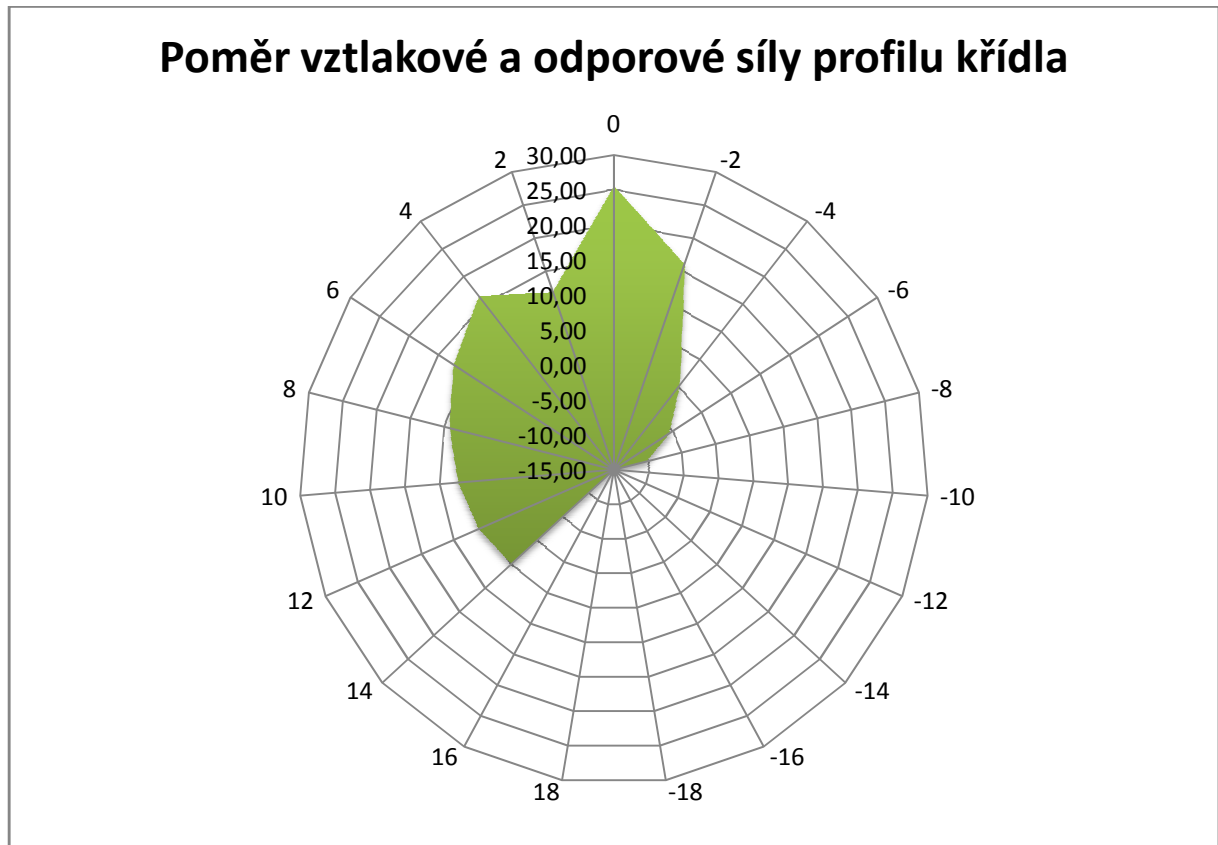
Tabulka 27

α	14°	12°	10°	8°	6°	4°	2°	0°	-2°	-4°	-6°	-8°
F_{vz} [N]												
průměr	1,73	1,52	1,39	1,20	1,11	0,82	0,71	0,51	0,32	0,01	-0,17	-0,41
prům. odch.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
hor.int.	1,77	1,56	1,43	1,24	1,15	0,86	0,75	0,55	0,37	0,06	-0,12	-0,36
dol. int.	1,69	1,47	1,34	1,15	1,06	0,77	0,66	0,46	0,27	-0,04	-0,21	-0,45
F_x [N]												
průměr	0,35	0,25	0,19	0,13	0,09	0,05	0,06	0,02	0,02	0,04	0,03	0,04
směr. odch.	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01
hor.int.	0,37	0,27	0,20	0,15	0,11	0,07	0,07	0,04	0,03	0,07	0,05	0,06
dol. int.	0,32	0,22	0,18	0,12	0,07	0,04	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02

Tabulka 28

α	14°	12°	10°	8°	6°	4°	2°	0°	-2°	-4°	-6°	-8°
F_{vz} [N]	1,73	1,52	1,39	1,20	1,11	0,82	0,71	0,51	0,32	0,01	-0,17	-0,41
F_x [N]	0,35	0,25	0,19	0,13	0,09	0,05	0,06	0,02	0,02	0,04	0,03	0,04
F_{vz}/F_x	4,94	6,08	7,32	9,23	12,33	16,40	11,83	25,50	16,00	0,25	-5,67	-10,25

Tabulka 29



Graf 2

Ad úkol b)

$\alpha = 30^\circ$	1. měření		2. měření		3. měření	
otvor	Δp [Pa]	v [m/s]	Δp [Pa]	v [m/s]	Δp [Pa]	v [m/s]
A	-10	11,6	-5	5,8	0	2,9
	-15	11,6	-4	5,1	1	2,9
	-13	11,5	-5	5,1	-3	3,2
	-14	11,9	-5	5,0	-2	3,4
	-10	11,1	-6	5,6	0	3,4
B	-140	11,6	-58	5,4	-49	3,1
	-141	11,4	-61	5,5	-48	3,7
	-145	11,7	-60	5,8	-42	3,8
	-143	11,7	-59	5,3	-48	3,1
	-145	11,7	-58	5,1	-45	3,5
C	-98	11,7	-54	5,6	-38	3,7
	-100	11,6	-55	5,2	-35	3,2
	-99	11,3	-53	5,7	-36	3,1
	-95	11,4	-50	5,7	-37	2,9
	-102	11,8	-52	5,8	-32	3,0
D	-75	11,1	-20	5,6	-5	3,0
	-78	11,2	-24	5,5	-4	2,9
	-80	11,5	-19	5,4	-6	3,3
	-75	11,7	-22	5,7	-8	3,2
	-76	11,5	-20	5,6	-5	3,1
E	-40	11,2	-5	5,3	0	3,4
	-35	11,8	-7	5,1	1	3,1
	-41	11,3	-5	5,3	-1	3,6
	-42	11,8	-6	5,7	3	3,8
	-35	11,4	-7	5,5	4	3,6
F	10	11,9	1	5,5	5	3,7
	13	11,4	0	5,7	7	3,8
	10	11,4	-2	5,3	5	3,1
	11	11,6	5	5,2	4	2,9
	15	11,3	-1	5,2	6	2,9
G	22	11,6	20	5,1	17	3,0
	25	11,3	22	5,4	15	3,2
	20	11,3	19	5,6	16	3,4
	22	11,4	18	5,8	17	3,3
	21	11,7	20	5,8	15	3,7
H	23	11,4	-9	5,7	-13	3,5
	25	11,5	-8	5,4	-10	3,1
	26	11,3	-8	5,3	-11	3,0
	20	11,8	-10	5,2	-9	2,9
	21	11,5	-9	5,4	-12	3,2
I	42	11,4	-10	5,6	-15	3,4
	43	11,5	-11	5,8	-16	3,5
	40	11,4	-12	5,1	-15	3,7
	43	11,7	-10	5,2	-13	3,8
	40	11,7	-12	5,4	-14	3,6

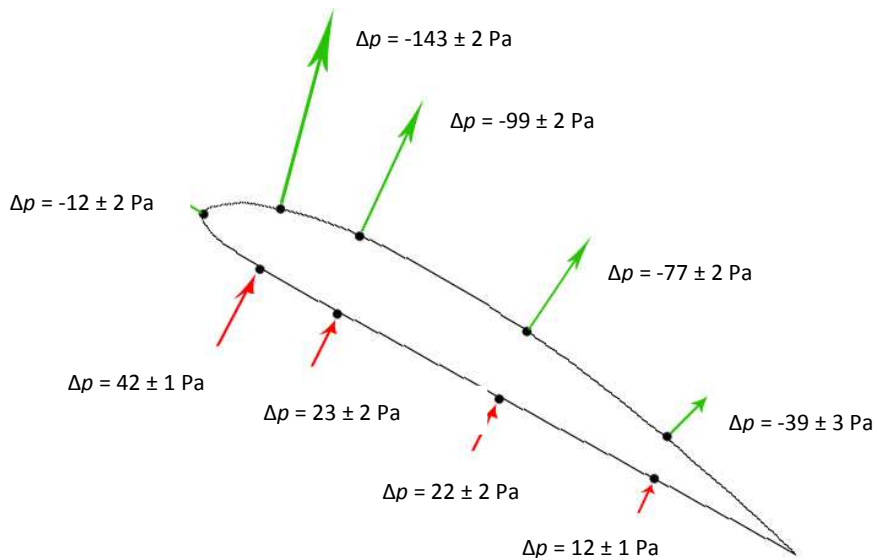
Tabulka 30

$\alpha = 0^\circ$	1. měření		2. měření		3. měření	
otvor	Δp [Pa]	v [m/s]	Δp [Pa]	v [m/s]	Δp [Pa]	v [m/s]
A	35	11,7	10	5,6	5	3,1
	31	11,3	15	5,4	6	2,9
	33	11,4	16	5,6	7	3,3
	35	11,9	14	5,2	10	3,3
	36	11,2	15	5,2	5	2,8
B	-60	11,5	-35	5,6	-20	3,2
	-55	11,6	-45	5,3	-21	3,2
	-60	11,4	-43	5,5	-28	3,2
	-62	11,2	-39	5,4	-27	2,8
	-53	11,8	-42	5,6	-25	3,1
C	-94	11,4	-62	5,1	-32	3,0
	-93	11,2	-65	5,5	-34	3,1
	-95	11,1	-64	5,5	-35	3,0
	-97	11,5	-65	5,3	-32	2,9
	-98	11,6	-63	5,4	-29	3,3
D	-45	11,1	-32	5,5	-25	3,0
	-43	11,3	-35	5,2	-20	2,8
	-48	11,2	-30	5,3	-19	3,0
	-50	11,9	-35	5,2	-25	3,2
	-45	11,7	-33	5,6	-27	2,9
E	-20	11,6	-15	5,2	-10	2,8
	-22	11,6	-16	5,1	-8	3,2
	-20	11,2	-14	5,1	-10	2,9
	-21	11,4	-15	5,1	-7	2,8
	-19	11,8	-16	5,3	-5	3,3
F	0	11,7	-15	5,2	-15	3,1
	1	11,5	-16	5,1	-18	2,9
	0	11,6	-14	5,5	-20	3,0
	2	11,7	-15	5,4	-18	3,1
	0	11,6	-16	5,2	-19	3,0
G	0	11,2	-20	5,2	-25	2,9
	3	11,3	-28	5,6	-31	2,8
	5	11,6	-22	5,5	-25	2,9
	2	11,5	-25	5,3	-35	2,9
	0	11,2	-24	5,5	-30	2,8
H	-5	11,1	-40	5,3	-45	2,8
	-4	11,1	-39	5,6	-43	3,2
	-4	11,5	-42	5,5	-39	3,0
	-5	11,8	-39	5,3	-45	3,0
	0	11,5	-43	5,2	-46	3,3
I	-10	11,5	-44	5,3	-49	2,9
	-13	11,7	-46	5,6	-51	3,2
	-9	11,1	-43	5,3	-52	3,0
	-12	11,1	-44	5,5	-48	2,8
	-18	11,4	-43	5,2	-49	3,3

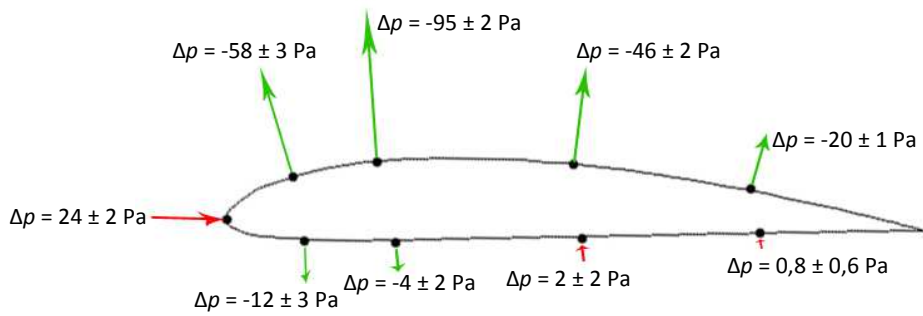
Tabulka 31

$\alpha = -30^\circ$	1. měření		2. měření		3. měření	
otvor	Δp [Pa]	v [m/s]	Δp [Pa]	v [m/s]	Δp [Pa]	v [m/s]
A	25	12,0	9	5,6	2	3,3
	23	12,2	12	5,4	3	3,5
	21	11,8	8	5,7	2	3,2
	23	12,3	8	5,3	1	3,4
	25	12,2	9	5,5	2	3,3
B	93	12,3	62	5,7	48	3,4
	95	11,9	67	5,6	49	3,1
	92	12,1	65	5,3	48	3,2
	89	11,8	63	5,7	51	3,5
	92	12,1	65	5,6	49	3,3
C	82	12,1	59	5,9	42	3,1
	80	12,1	57	5,4	41	3,5
	85	12,4	57	5,9	43	3,4
	81	12,1	59	5,9	42	3,2
	83	11,8	55	5,8	43	3,1
D	35	12,0	25	5,8	13	3,5
	35	11,8	24	5,4	14	3,5
	37	11,7	25	5,4	13	3,5
	41	12,1	25	5,9	12	3,1
	36	12,3	28	5,3	14	3,4
E	29	11,8	15	5,8	5	3,2
	30	11,9	14	5,3	7	3,3
	32	12,3	16	5,6	6	3,1
	28	12,3	17	5,6	7	3,1
	30	12,3	15	5,9	8	3,4
F	22	12,0	9	5,9	-3	3,3
	23	11,9	6	5,5	-4	3,5
	20	12,3	9	5,3	-2	3,4
	25	12,0	8	5,3	-3	3,1
	20	11,7	7	5,7	0	3,1
G	5	12,3	-14	5,9	-17	3,2
	7	12,4	-14	5,9	-18	3,4
	5	12,3	-16	5,7	-17	3,3
	6	12,3	-15	5,3	-20	3,3
	5	12,1	-13	5,8	-19	3,1
H	-3	12,2	-8	5,4	-14	3,2
	-2	11,7	-9	5,6	-15	3,4
	-5	12,2	-7	5,8	-13	3,2
	0	11,7	-8	5,6	-14	3,1
	-5	12,2	-8	5,3	-12	3,4
I	0	12,0	-5	5,8	-12	3,4
	3	11,8	-7	5,9	-13	3,3
	-5	11,9	-6	5,7	-12	3,3
	0	12,3	-8	5,5	-11	3,1
	-2	11,7	-6	5,6	-14	3,4

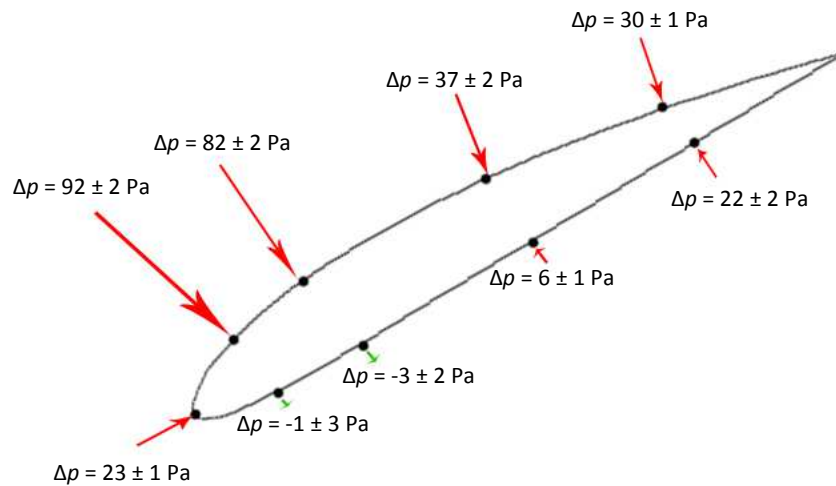
Tabulka 32



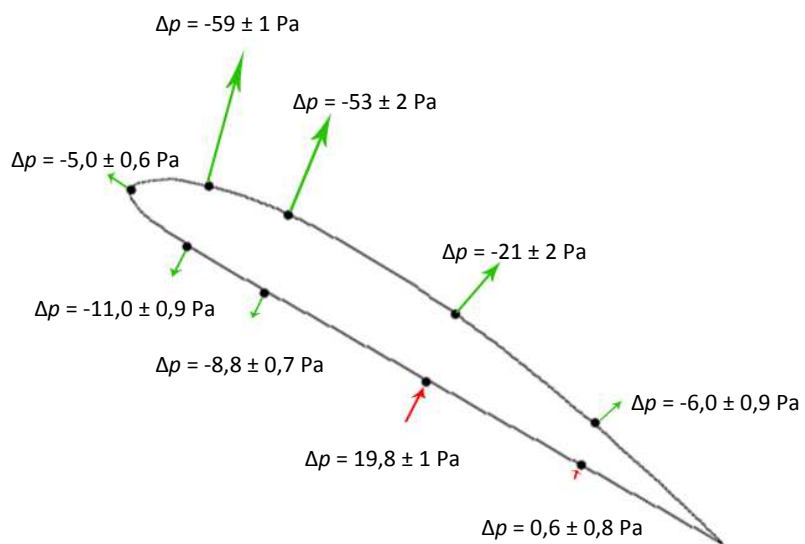
Obr. č 22 Grafické znázornění výsledku pro $\alpha = 30^\circ$ a $v = 11,56 \pm 0,05$ m/s



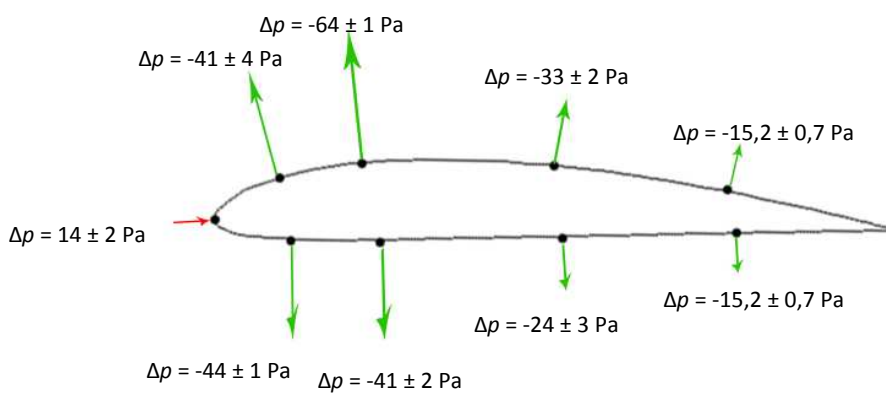
Obr. č 23 Grafické znázornění výsledku pro $\alpha = 0^\circ$ a $v = 11,58 \pm 0,05$ m/s



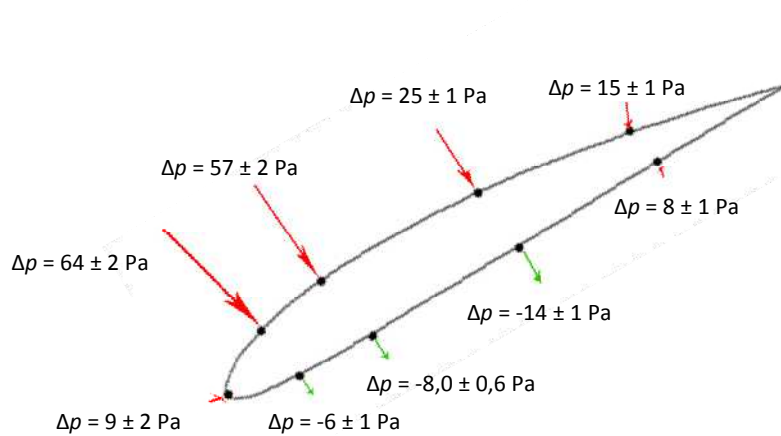
Obr. č 24 Grafické znázornění výsledku pro $\alpha = -30^\circ$ a $v = 12,05 \pm 0,05$ m/s



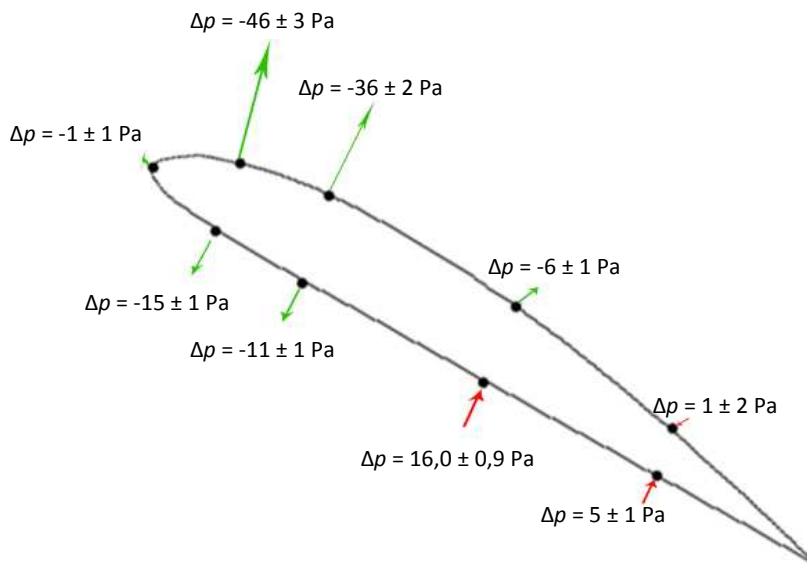
Obr. č 25 Grafické znázornění výsledku pro $\alpha = 30^\circ$ a $v = 5,45 \pm 0,06 \text{ m/s}$



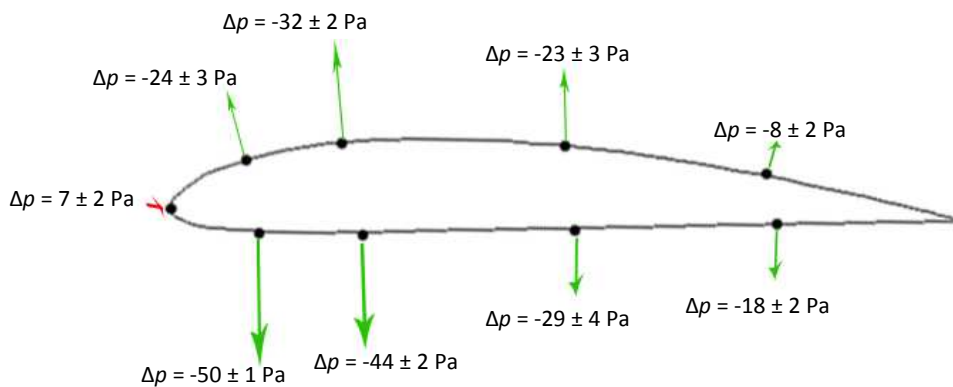
Obr. č 26 Grafické znázornění výsledku pro $\alpha = 0^\circ$ a $v = 5,40 \pm 0,04 \text{ m/s}$



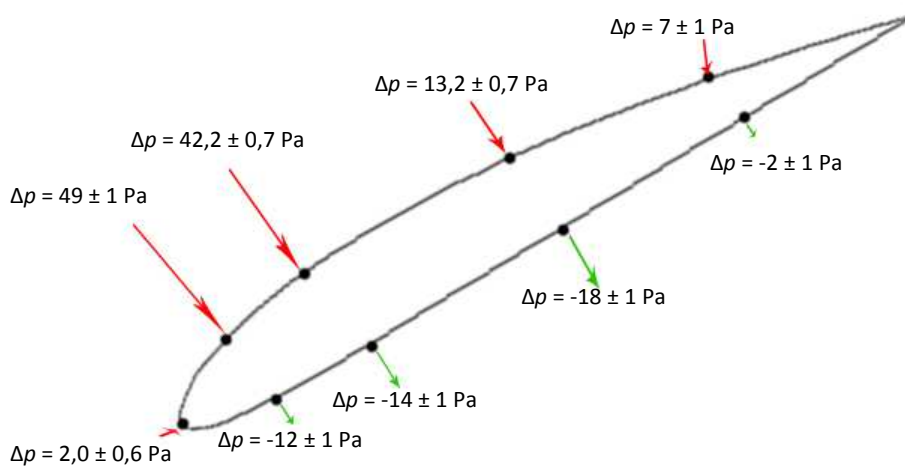
Obr. č 27 Grafické znázornění výsledku pro $\alpha = -30^\circ$ a $v = 5,63 \pm 0,06 \text{ m/s}$



Obr. č 28 Grafické znázornění výsledku pro $\alpha = 30^\circ$ a $v = 3,30 \pm 0,07$ m/s



Obr. č 29 Grafické znázornění výsledku pro $\alpha = 0^\circ$ a $v = 3,06 \pm 0,03$ m/s



Obr. č 30 Grafické znázornění výsledku pro $\alpha = -30^\circ$ a $v = 3,30 \pm 0,03$ m/s

6.2.5 Diskuse

Při měření bylo největším problémem samotné sestavení měřicí soustavy. Největší zádrhel byl s upevněním spodní strany tunelu a dále se objevil problém u vertikálního siloměru, do kterého bylo obtížné upevnit profil křídla.

Měření této úlohy je zatíženo několika chybami, které nelze odstranit. Při odčítání tlakové síly F_x je problém s odečtením přesné hodnoty ze siloměru, který nemá tak podrobnou stupnici, aby nám dovolil odčítat přesnou hodnotu síly. Stejný problém nastává také u měření síly F_{vz} , kde také nelze přesně odečíst hodnotu, ale pouze přibližně. Problém nastává také při nastavení přesného úhlu náběhu, kdy není jednouché se přesně trefit na námi zvolený úhel.

Kromě již zmíněného problému s odčítáním hodnot, nenastává při měření žádný další výrazný problém. Pro měření nepotřebujeme měřit rychlost vzduchu ani tlak, nemusíme tak připojovat manometr. Je potřeba si však hlídat, abychom měli rychlost vzduchu konstantní a nedocházelo k ovlivnění výsledné závislosti i na změně této rychlosti, ale pouze na změně velikosti náběhového úhlu.

Při měření druhé části této úlohy může vznikat chyba při odečítání rozdílu tlaků a rychlostí. Protože s rychlostí nemusíme v této úloze počítat, nezatěžuje nám tato chyba výsledek. Důležité je si vždy pohlídat jestli n nastavitelném profilu máme nastaven námi požadovaný úhel náběhu.

Musíme si nastavit počáteční bod na 150 Pa a musíme opatrně postupovat při volbě rychlosti, aby přetlak či podtlak nebyli větší než 150 Pa. Maximální rychlosti tekutiny, pro kterou lze úlohu změřit bez problémů se stupnicí je 12 m/s.

Při grafickém znázornění výsledků druhého úkolu nastal problém s nastavením a dodržením poměru velikostí šipek, které znázorňují velikost rozdílu tlaků. Vektor rozdílu je vždy kolmí na tečnu v daném místě profilu a kvůli velkému rozsahu těchto rozdílů¹⁴, nebylo možné nastavit jednotné měřítko pro všechny obrázky. Došlo by k situaci, kdy by se na stránku vešel pouze jeden profil, nebo situace, kdy nebudou nejkratší šipky vůbec vidět.

¹⁴ Velikost rozdílů tlaků je na intervalu (0,7; 144)

6.2.6 Závěr studie sil působících na profil křídla

Podle naměřených hodnot můžeme určit, že největší je poměr vztlakové síly a odporové síly pro náklon křídla pod úhlem 0° . Důležitý údaj, který vidíme, je že i při úhlech -2° a -4° je stále vztlaková síla kladná, což znamená, že i při minimálním záporném náklonu křídla, stále vztlak způsobuje pohyb křídla vzhůru. Toto měření lze využívat na všech technicky zaměřených středních a vysokých školách, kde je možno měřit vlastní profil křídla.

V grafickém znázornění výsledku druhého úkolu můžeme vidět proč letadlo při náklonu křídla 30° stoupá vzhůru a naopak při záporném náklonu křídla klesá. Tato úloha nabízí několik variant, kdy můžeme například na profil umístit překážku, která nám bude simulovat klapky na křídle a můžeme porovnávat, jak se nám při stejném náklonu a rychlosti proudící kapaliny budou měnit hodnoty rozdílu tlaků.

7 Závěr

V mé práci jsem představil čtyry základní úlohy, které lze provádět se základní soupravou společnosti LD Didactic určenou pro měření aerodynamiky. Jednotlivé úlohy lze po přizpůsobení složitosti a pomoci od vyučujícího využít na všech typech škol. Můžeme je použít jako frontální pokus na základní škole, kde hlavně využijeme měření součinitele odporu a měření profilu křídla, které žáky určitě zaujme a můžeme to spojit se zajímavou samostatnou prací spojenou s hledáním, kde a proč se jaký tvar využívá.

Na úrovni střední školy, můžeme v hodinách laboratorního cvičení, využít určitě ověření rovnice kontinuity a bernulliho zákona, které žáci zvládnou samostatně. Žáky určitě zaujme i měření odporu jednotlivých těles, kde již můžeme využít měření vlastních tvarů. Hlavně na středních školách technického a strojírenského typu lze využít soupravu pro ověření aerodynamiky vlastním tvarů, který žáci mohou během studia navrhnout. Na technických školách, kde nám jde o větší přesnost, je vhodné doplnit soupravu zařízením CASSY.

Souprava má využití také pro výuku fyziky, ale i technických odborných předmětů na vysokých školách. Kromě ověřování základních fyzikálních poznatků, můžeme na technických vysokých školách využít hlavně možnost měření součinitele odporu vlastního tvaru a také přizpůsobení soustavy, pro měření vlastního profilu křídla letadla. Tato měření mohou pomoci žákům k pochopení problematiky odporu těles a vývoji tvarů, kterým bude od okolí kladen velmi malý odpor. Stejně jako na technických středních školách, je vhodné doplnit soupravu systémem CASSY pro přesná měření.

8 Použitá literatura

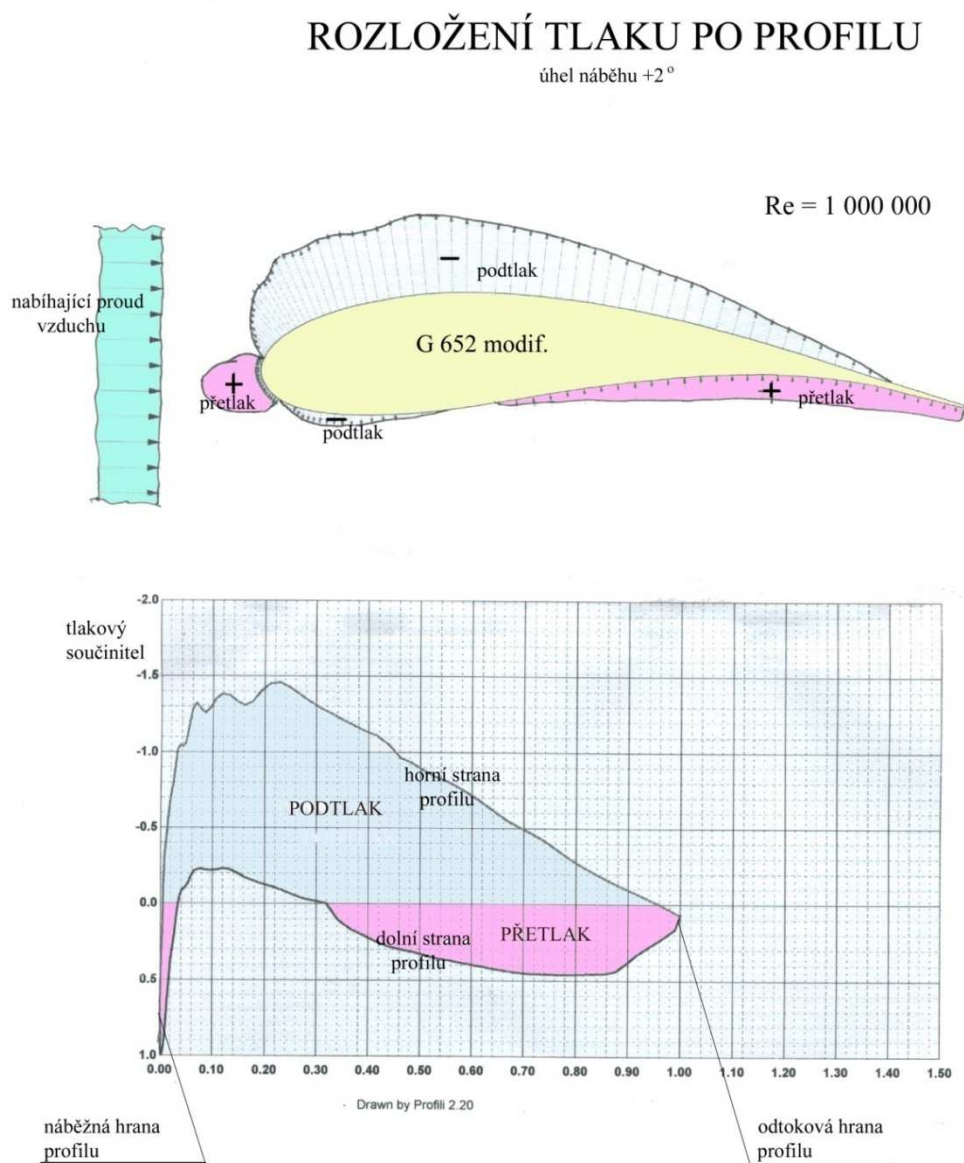
- [1] *FYZIKA 007* [online]. 2011 [cit. 2013-09-03]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz>
- [2] ČSVE. *Vznik vztlaku* [online]. 2013 [cit. 2013-10-22]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/vznik-vztlaku/307>
- [3] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 8021418680.
- [4] conVERTER. *Fyzikální a chemické vlastnosti vzduchu* [online]. 2000 [cit. 2013-04-02]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>
- [5] Sevcik.sf.cz. *4.5 Obtékání těles tekutinou* [online]. 2000 [cit. 2013-12-0]. Dostupné z: <http://mog.wz.cz/fyzika/1rocnik/kap405.htm>
- [6] *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2013-09-14]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [7] *LD Didactic* [online]. 1998 [cit. 2013-06-14]. Dostupné z: <http://www.ld-didactic.de>
- [8] SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 4., upr. vyd. Praha: Prometheus, 2005, 531 s., [12] obr. barev. příl. ISBN 8071963070.
- [9] POMYKALOVÁ, Eva. *Matematika pro gymnázia: planimetrie*. 4., upr. vyd. Praha: Prometheus, 2000, 206 s. ISBN 8071961744.

- [10] Wikipedie. *Dynamický vztlak* [online]. 2014 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Dynamick%C3%BD_vztlak
- [11] BUDWeb.cz. *Počasí* [online]. 2001 [cit. 2014-04-04]. Dostupné z:
<http://mesto.budweb.cz/pocasi.asp>
- [12] Akademie letectví. *Co je co, co je to a kdo je kdo?* [online]. 2008 [cit. 2014-01-28].
Dostupné z: <http://www.airspace.cz/akademie/rocnik/2008/02/cojeco.php>
- [13] BEDNAŘÍK, Milan a Miroslava ŠIROKÁ. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha:
Prometheus, 2009, 288 s. ISBN 9788071963820.
- [13] LNĚNIČKA, Jaroslav. *O modelech letadel 2. část*. Hradec Králové: Aeromodel Hradec Králové,
2005.

9 Přílohy

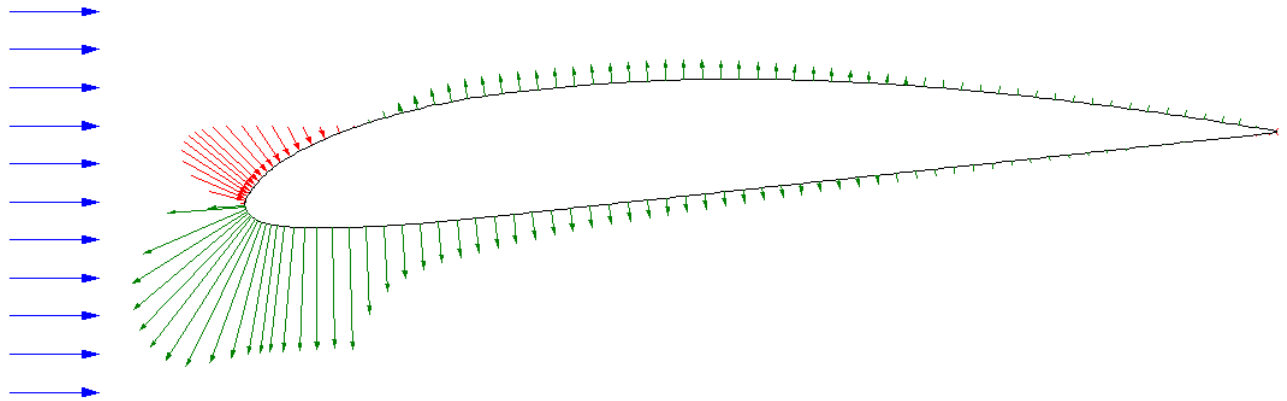
9.1 Grafický záznam průběhu přetlaku a podtlaku na profilu CLARK-Y

Pomocí modelářského softwaru Profili 2.16 můžeme nechat vykreslit velikost přetlaku a podtlaku v jednotlivých místech profilu pro různé úhly náběhu. Zelené šipky značí vektor podtlaku a červené šipky značí přetlak. Pro ilustraci co který údaj v následujících grafech znamená, můžeme využít obrázek 29. Bohužel software nám neumožňuje náklon křídla v jiném intervalu než $(-6,5^\circ; 10^\circ)$.



Obr. č 31 Ukázka záznamu hodnot podtlaku a přetlaku, převzato z [12]

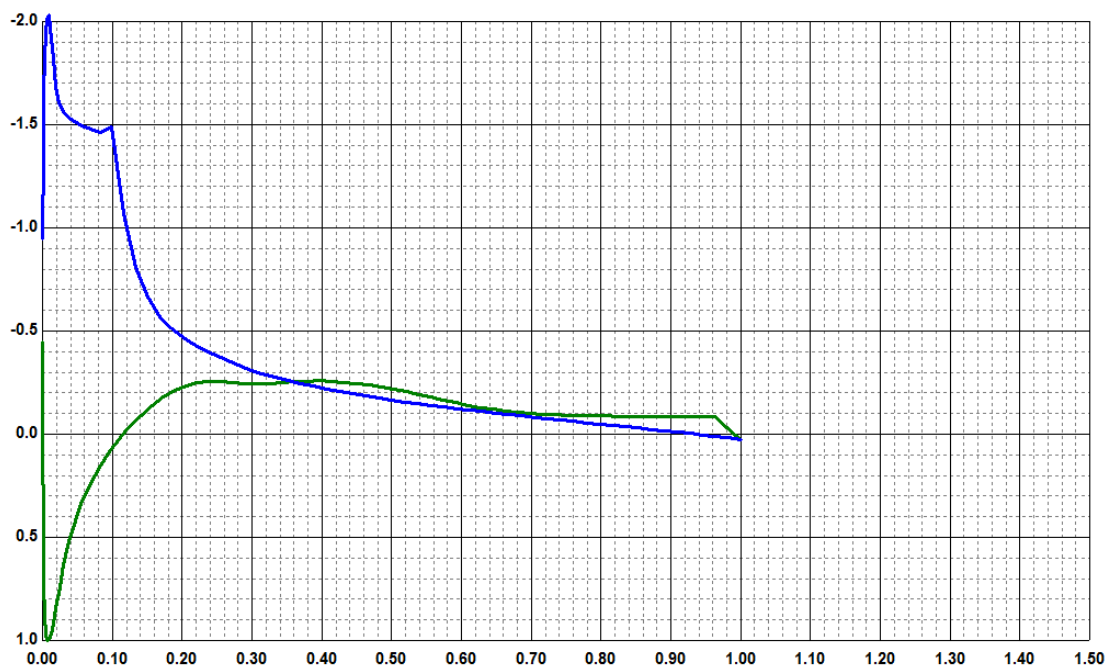
CLARK Y
 Re = 100000
 Mach=0.0000 - NCrit=9.00
 Cp distribution for Alpha = -4.0 degrees



Obr. č 32 Rozložení přetlaku a podtlaku na profilu křídla při $\alpha = -4^\circ$

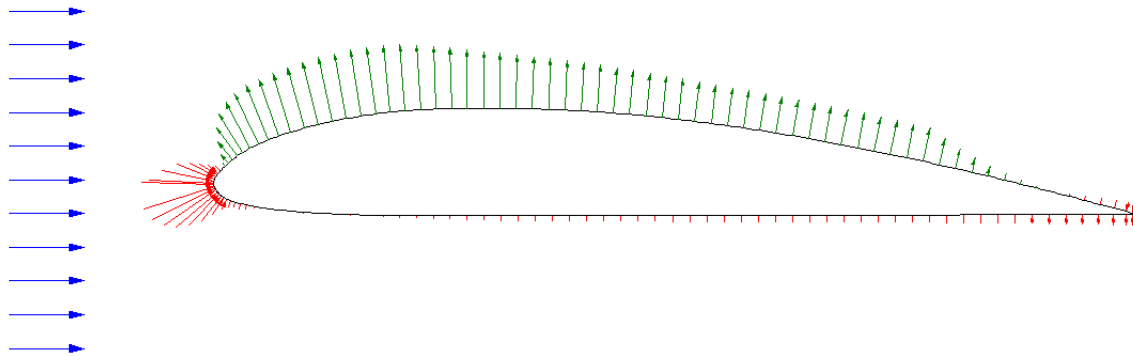
CLARK Y
 Re = 100000
 Mach=0.0000 - NCrit=9.00
 Cp Vs X (pressure coefficient) for Alpha = -4.0 degrees

Upper part ——— green line
 Lower part ——— blue line



Obr. č 33 Rozložení přetlaku a podtlaku na profilu křídla při $\alpha = -4^\circ$

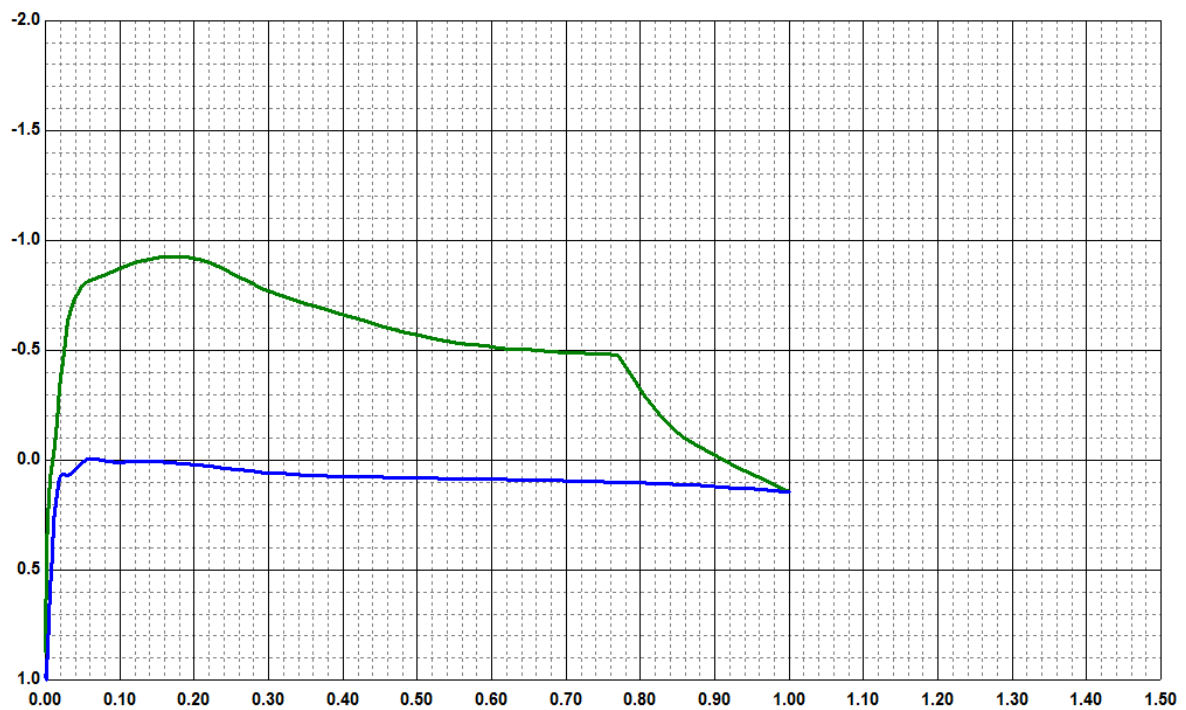
CLARK Y
 Re = 100000
 Mach=0.0000 - NCrit=9.00
 Cp distribution for Alpha = 2.0 degrees



Obr. č 34 Rozložení přetlaku a podtlaku při na profilu křídla $\alpha = -2^\circ$

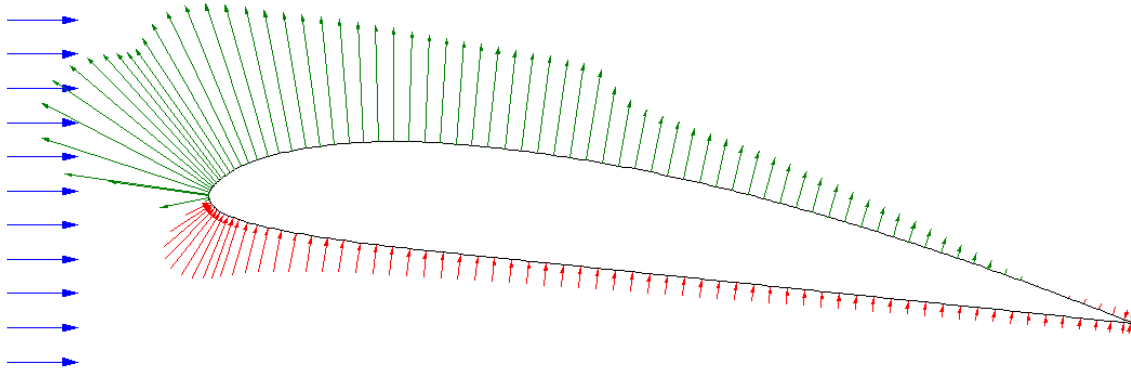
CLARK Y
 Re = 100000
 Mach=0.0000 - NCrit=9.00
 Cp Vs X (pressure coefficient) for Alpha = 2.0 degrees

Upper part ——— green line
 Lower part ——— blue line

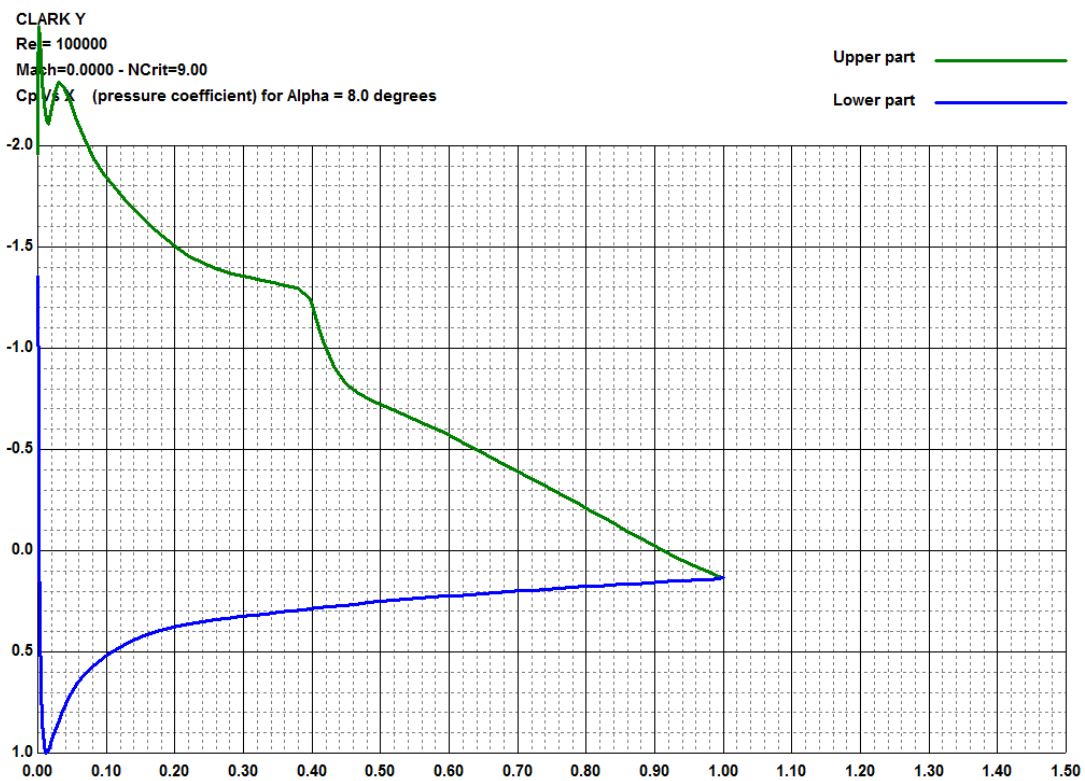


Obr. č 35 Rozložení přetlaku a podtlaku na profilu křídla při $\alpha = 2^\circ$

CLARK Y
 Re = 100000
 Mach=0.0000 - NCrit=9.00
 Cp distribution for Alpha = 8.0 degrees



Obr. č 36 Rozložení přetlaku a podtlaku na profilu křídla při $\alpha = 8^\circ$



Obr. č 37 Rozložení přetlaku a podtlaku na profilu křídla při $\alpha = 8^\circ$