



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

HYDRAULICKÉ ZTRÁTY LODÍ V ZÁVISLOSTI NA SMÁČIVOSTI POVRCHU

HYDRAULIC LOSSES OF SHIPS DEPENDING ON SURFACE WETTABILITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Markéta Novotná

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. František Pochylý, CSc.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Markéta Novotná**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. František Pochylý, CSc.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hydraulické ztráty lodí v závislosti na smáčivosti povrchu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Určení hydraulických ztrát lodě v závislosti na smáčivosti (hydrofobii) povrchu. Základem bude teoretická analýza při laminárním a turbulentním proudění. Předpokládá se návrh experimentu, jeho provedení a vyhodnocení. V úvahu se vezme vliv volné hladiny.

Cíle bakalářské práce:

Odvození základních vztahů pro hydraulické ztráty, jak při laminárním, tak turbulentním proudění. Určení stupně hydrofobie povrchu. Návrh experimentu, provedení a vyhodnocení experimentu v závislosti na stupni hydrofobie povrchu

Seznam doporučené literatury:

BRDIČKA, Miroslav. Mechanika kontinua. Vyd. 1., Praha: ČSAV, 1959. ISBN 8020007725.

ÇENGEL, Yunus A. a John M. CIMBALA. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, Ed. 2, McGraw-Hill, New York, Copyright 2010, ISBN: 978-0-07-352926-4 or 0-07-352926-5.

ŠOB, František. Hydromechanika. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-214-3578-0.

POCHYLÝ, František, Simona FIALOVÁ a Michal HAVLÁSEK. New Boundary Conditions for Fluid Interaction with Hydrophobic Surface. In EPJ Web of Conferences, EDP Sciences, 2018. ISSN 2100-014X.

FIALOVÁ, Simona, František POCHYLÝ, Michal KOTEK a Darina JAŠÍKOVÁ. A Study of the Impact of Surface Hydrophobia on Hydraulic Losses and Velocity Profiles. 19th International Seminar on Hydropower PLants. Wien, Austria: Institute for Energy Systems and Thermodynamics, 2016. ISBN 978-3-9504338-0-7.

FIALOVÁ, Simona, František POCHYLÝ. Identificattion and Experimental Verification of the Adhesive Coefficient of Hydrophobic Materials. Wasserwirtschaft. roč. 1/2015, (Extra). ISSN 0043-0978.


MALÍK, Jiří. Tvorba matematického modelu interakce tekutiny s hydrofobním povrchem. VUT v Brně, FSI, 2016. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Odbor fluidního inženýrství V. Kaplana. Vedoucí práce František Pochylý.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21.

V Brně, dne 22. 10. 2020




doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu


doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá hydraulickými ztrátami lodí. Zaměřuje se především na třecí ztráty, ale dotýká se i témat tlakového odporu, vlnového odporu nebo Kármánovy vírové stezky. Je zde popsána problematika obtékání těles a smáčivosti povrchu. Experimentálně byly změřeny a porovnávány odpory lodiček s různou geometrií a povrchy a kontaktní úhly kapek na těchto površích.

Klíčová slova

Třecí odpor, smáčivost, hydrofobie, kontaktní úhel

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is to investigate hydraulic losses of ships. It mainly focuses on friction losses, but also pressure drag, wave drag and Kármán vortex street. By experiments drag of ships with different geometry and surfaces and contact angles of water drops on them were measured and compared.

Key words

Friction drag, wettability, hydrophobia, contact angle

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVOTNÁ, Markéta. *Hydraulické ztráty lodí v závislosti na smáčivosti povrchu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132425>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce František Pochylý.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *bakalářskou* práci na téma **Hydraulické ztráty lodí v závislosti na smáčivosti povrchu** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20.5.2021

Datum

Markéta Novotná

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě děkuji panu prof. Ing. Františku Pochylému, CSc. za vedení mojí bakalářské práce a zprostředkování experimentů. Dále děkuji Ing. Pavlu Jandourkovi, Ph.D. za pomoc s přípravou a provedením experimentů, Bronislavu Kusému, Karlovi Večeřovi a Ing. Martinu Hudcovi za pomoc při měření v laboratořích a doc. Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D. a Ing. Pavlu Ramíkovi za pomoc a realizaci 3D tisku. Děkuji také doc. Ing. Pavlovi Rudolfovi, Ph.D. za rady a podněty týkající se vlnového odporu. Moje poděkování patří i mým rodičům, prarodičům a sourozencům za podporu po celou dobu studia.

OBSAH

ÚVOD	10
1 OBTEKÁNÍ TĚLES	11
1.1 LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ	11
1.2 TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ	11
1.3 REYNOLDSOVO ČÍSLO	12
1.4 MEZNÍ VRSTVA	12
1.5 ODTRŽENÍ MEZNÍ VRSTVY A ÚPLAV	13
1.6 ODPOR TĚLES	14
1.6.1 TŘECÍ ODPOR	14
1.6.2 TLAKOVÝ ODPOR	14
1.6.3 VLNOVÝ ODPOR	16
1.7 KARMÁNOVA VÍROVÁ STEZKA	17
2 SMÁČIVOST POVRCHU	18
2.1 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ KAPALIN	18
2.2 POVRCHOVÁ ENERGIE PEVNÝCH LÁTEK	19
2.3 HYDROFOBIE	19
2.4 KONTAKTNÍ ÚHEL A YOUNGOVA ROVNICE	21
2.5 MĚŘENÍ KONTAKTNÍCH ÚHLŮ	21
2.5.1 SEE SYSTEM	21
2.5.2 POSTUP MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU	22
2.5.3 NEJISTOTY MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU	22
2.5.4 MĚŘENÉ POVRCHY	22
2.5.5 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU	23
2.5.6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU	24
3 MĚŘENÍ ODPORU LODIČEK	25
3.1 PODMÍNKY MĚŘENÍ	25
3.2 MĚŘENÉ VELIČINY	25
3.3 POUŽITÁ MĚŘICÍ TECHNIKA	25
3.4 PŘÍPRAVA EXPERIMENTŮ A POSTUP MĚŘENÍ	26
3.4.1 POSTUP MĚŘENÍ MODELÁŘSKÉ LODIČKY	27
3.4.2 POSTUP VÝROBY A MĚŘENÍ LODIČKY NACA 0025	30
3.5 NEJISTOTY MĚŘENÍ ODPORU LODIČEK	33
3.6 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY ODPORU LODIČEK	33
3.6.1 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY MODELÁŘSKÉ LODIČKY	33
3.6.2 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY LODIČKY NACA 0025	35
3.7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ ODPORU	37
3.7.1 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MODELÁŘSKÉ LODIČKY	37
3.7.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ LODIČKY NACA 0025	38
DISKUSE	39
ZÁVĚR	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	41
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	42

SEZNAM OBRÁZKŮ	44
SEZNAM TABULEK	46
SEZNAM PŘÍLOH	47

ÚVOD

Lodní doprava zajišťuje přepravu většiny světového zboží. Snížení třecích ztrát lodí by vedlo ke snížení spotřeby paliva, tedy k ekonomickým úsporám. Zároveň by bylo sníženo množství vypouštěných emisí. Vzhledem k nízké kvalitě paliva se vedle oxidu uhličitého jedná zejména o oxidy síry, dusíku a prachové částice.

Smáčivost povrchu je důležitý jev v mnoha odvětvích průmyslu. Ve strojírenství hraje důležitou roli v technologických postupech jako lepení, pájení, barvení nebo slévání. Pokud kapka povrch smáčí, rozprostře se po něm a přilne k němu, naopak na nesmáčivém povrchu má kapka tendenci balit se do kuličky. Takové povrchy označujeme jako hydrofobní. Kromě lodní dopravy by mohly hydrofobní povrchy najít využití i v mnoha dalších odvětvích. Mohly by snížit ztráty čerpadel, turbín, potrubí a dalších hydraulických strojů a prvků. Uplatnění najdou také v ochraně proti korozi, při ochraně stavebních materiálů proti povětrnostním vlivům apod. V běžném životě se používají pro lepší odtok vody z čelního skla aut, k ochraně různých ploch před znečištěním nebo zasycháním vodních kapek, k impregnaci oděvů, obuvi atd.

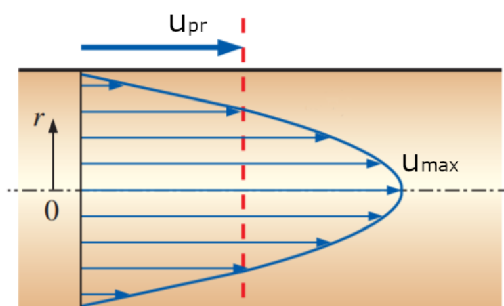
V současné době existuje široká řada méně či více funkčních hydrofobních prostředků. Kvalitnější z nich dosahují výborných hydrofobních vlastností. Problémem ale zůstává nízká odolnost těchto přípravků vůči opotřebení.

1 OBTÉKÁNÍ TĚLES

Je-li těleso obtékáno skutečnou kapalinou, tj. kapalinou o nenulové viskozitě, působí na něj vlivem proudění tekutiny síly ve třech směrech. Ve svislém směru působí vztlačová síla F_{vz} , proti směru pohybu odporová síla F a z boku boční síla F_b , která je pro symetrická tělesa nulová. Velikost jednotlivých sil závisí na typu a rychlosti proudění, viskozitě a hustotě kapaliny, na natočení tělesa vůči směru proudění, jeho geometrii a smáčivosti jeho povrchu.

1.1 LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ

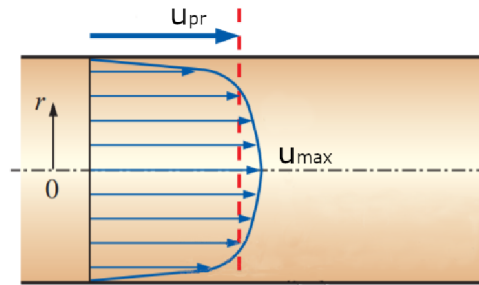
Laminární proudění je uspořádané proudění kapaliny ve vrstvách, které se mezi sebou nemísí. Proudnice jsou rovnoběžné a částice se pohybují pouze ve směru celkové rychlosti kapaliny. Jednotlivé vrstvy kapaliny mají různou rychlost, proto mezi nimi v důsledku viskozity vzniká tečné tření. Při laminárním proudění v potrubí kruhového profilu se kapalina pohybuje nulovou rychlostí u stěn potrubí, maximální rychlostí u_{max} dosahuje v ose profilu a průměrná rychlost u_{pr} u plně vyvinutého laminárního proudění dosahuje poloviny u_{max} (obrázek 1.1). Z Reynoldsova čísla vyplývá, že s laminárním prouděním se můžeme setkat u kapalin s vysokou viskozitou (např. olej) proudících malou rychlostí průtočným profilem o malém charakteristickém rozměru.



Obrázek 1.1 – Laminární proudění potrubím s kruhovým profilem [2]

1.2 TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ

Turbulentní proudění je neuspořádané proudění kapaliny, při kterém se kapalina mísí. Částice mají kromě rychlostní složky ve směru celkového pohybu kapaliny i tzv. flukтуаční turbulentní složky [1]. U stěn jsou tyto složky utlumovány, proto se tam proudění podobá proudění laminárnímu. Rychlostní profil turbulentního proudění v potrubí kruhového průřezu je oproti laminárnímu proudění vyrovnanější, kromě míst blízkých stěnám potrubí, se rychlost kapaliny mění jen nepatrně (obrázek 1.2). S turbulentním prouděním se setkáváme mnohem častěji než s laminárním, dochází k němu při proudění kapalin o nízké viskozitě (např. voda) při vyšších rychlostech a větších charakteristických rozměrech průtočného profilu.



Obrázek 1.2 – Turbulentní proudění potrubím s kruhovým profilem [2]

1.3 REYNOLDSOVO ČÍSLO

Reynoldsovo číslo Re je podobnostní číslo vyjadřující vztah setrvačné síly a síly vnitřního tření. Je definováno vztahem:

$$Re = \frac{v_s \cdot D}{\nu} = \frac{v_s \cdot 4 \cdot S}{\nu \cdot O} \quad (1.1)$$

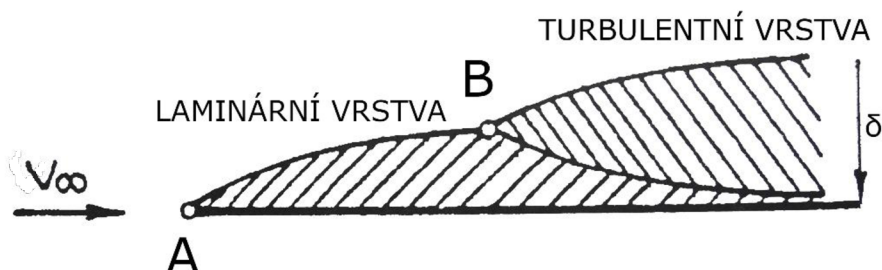
kde v_s je střední rychlost profilu, D charakteristický rozměr průřezného profilu (pro kruhové profily průměr), S vnitřní průřez profilu, O omočený obvod a ν kinematická viskozita.

Na základě Reynoldsova čísla můžeme rozhodnout, zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění. Pokud je Reynoldsovo číslo menší než kritická hodnota Reynoldsova čísla Re_k , jedná se o laminární proudění, pokud je vyšší, jedná se o turbulentní proudění. Kritická hodnota Reynoldsova čísla je pro každou kapalinu jiná. Pro vodu platí $Re_k = 2320$ [1]. Přechod z laminárního proudění na turbulentní není skokový, ale kolem kritické hodnoty Reynoldsova čísla se tvoří přechodová oblast. Typ proudění závisí i na dalších parametrech jako jsou drsnost povrchu, vibrace potrubí nebo poruchy proudění. Velikost Reynoldsova čísla však představuje hlavní určující parametr. Při speciálních laboratorních podmínkách ale můžeme pozorovat laminární proudění i při mnohem vyšších hodnotách Reynoldsova čísla.

1.4 MEZNÍ VRSTVA

Při obtékání těles kapalinou ulpívají částice kapaliny na povrchu obtékaného tělesa, proto je v těsné blízkosti jeho povrchu rychlost proudění nulová. Tyto částice zbrzdí vzdálenější částice. Dochází k disipaci jejich kinetické energie, která se třením částečně mění na teplo a způsobuje tlakové ztráty. Nejlépe lze tento jev pozorovat při obtékání nekonečně tenké rovinné desky obtékané rovnoběžným proudem (obrázek 1.3). Na náběžné hraně (bod A) se začne tvořit laminární mezní vrstva, která se postupně rozšiřuje, v určité vzdálenosti od náběžné hrany (bod B) může vzniknout turbulentní mezní vrstva, která se dále rozšiřuje směrem k tělesu i do okolní kapaliny. Vytváří se rychlostní profil s nenulovým gradientem. Oblast proudění mimo mezní vrstvu má téměř nulový gradient rychlosti. Tloušťku laminární vrstvy označujeme δ , je to vzdálenost od povrchu obtékaného tělesa k místu, kde je gradient rychlosti téměř nulový.

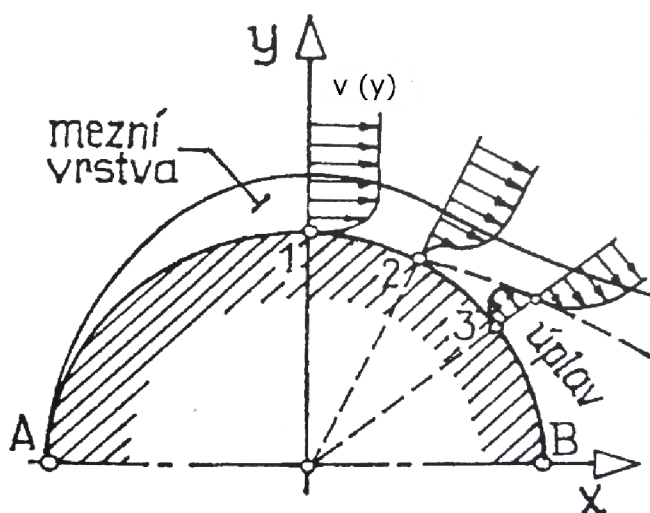
Při vysokých hodnotách Reynoldsova čísla můžeme mezní vrstvu zanedbat nebo o její tloušťku zvětšit obtékané těleso, při nižších hodnotách Reynoldsova čísla s ní musíme počítat a zít v potaz i větší úplav, který způsobuje.



Obrázek 1.3 – Laminární a turbulentní mezní vrstva [1]

1.5 ODTRŽENÍ MEZNÍ VRSTVY A ÚPLAV

Při obtékání zakřivených těles (např. křídlo letadla, zadní polovina koule, válce, lodí), se mění podél povrchu tělesa rychlost proudícího media. S rostoucí rychlostí klesá tlak a naopak. Podle geometrie tělesa tak vzniká záporný nebo kladný tlakový gradient, který ubrzdí proud. Kapaliny je navíc po celém povrchu tělesa brzděna svou vlastní viskozitou. Během obtékání tělesa (obrázek 1.4) dochází v bodu 2 k zastavení proudu ($v = 0$) a od tohoto místa dále dokonce ke zpětnému proudění (bod 3). Zpětný proud se odtrhává od povrchu tělesa a je unášen tokem kapaliny, tento odtržený proud nazýváme úplav. V úplavu se tvoří víry, které jsou unášeny proudem kapaliny pryč od tělesa. Úplav můžeme pozorovat např. jako „stopu“ za plovoucí lodí.



Obrázek 1.4 – Odtržení mezní vrstvy a úplav [1]

V technické praxi je úplav nežádoucí jev, protože zvyšuje energetické ztráty, dynamickou zátěž zařízení i jeho hlučnost. Úplavu se snažíme vyhnout ztenčením mezní vrstvy rotací kapaliny, přidáváním urychlující kapaliny nebo odsáváním mezní vrstvy [1].

Úplav zvyšuje odpor při obtékání těles, tedy i odpor vůči pohybu plovoucí lodí.

1.6 ODPOR TĚLES

Při obtékání tělesa skutečnou kapalinou vznikají silové účinky působící proti pohybu tělesa, které nazýváme odporová síla neboli odpor F . Rozlišujeme 3 složky odporu:

- třecí odpor F_t způsobený tečnými napětími v mezní vrstvě u povrchu tělesa,
- tlakový odpor F_p způsobený rozdílnými tlaky a úplavem,
- indukovaný odpor F_i způsobený rozběhovými víry na konci obtékaného tělesa konečné délky např. křídla
- vlnový odpor F_v vyskytující se na rozhraní dvou fází (nejčastěji voda a vzduch).

Většinou je celkový odpor F složen pouze z třecího odporu F_t a tlakového odporu F_p .

$$\vec{F} = \vec{F}_t + \vec{F}_p \quad (1.2)$$

U letadel hraje důležitou roli i indukovaný odpor F_i a u lodí vlnový odpor F_v .

Experimentálně nemůžeme měřit jednotlivé složky zvlášť, ale měříme pouze celkový odpor.

1.6.1 TŘECÍ ODPOR

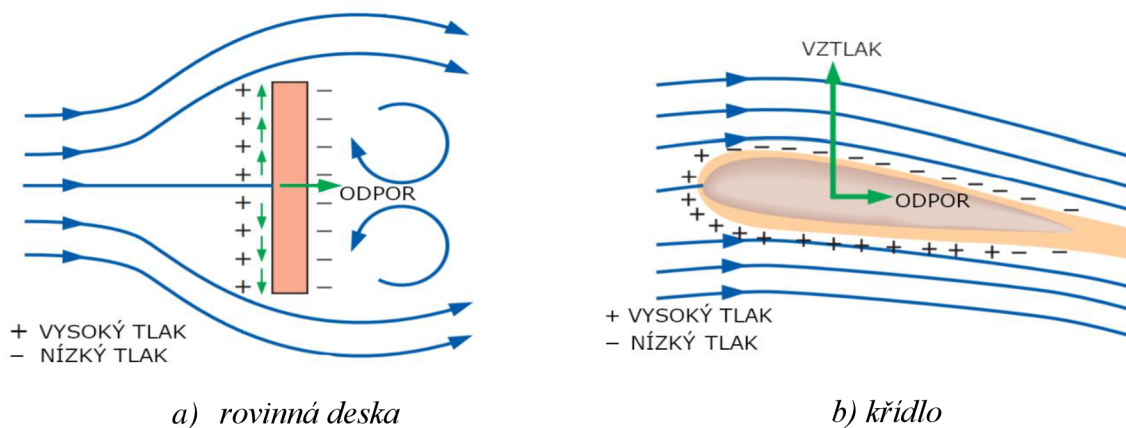
Třecí odpor F_t vzniká třením částic kapaliny v mezní vrstvě, jeho velikost můžeme určit ze vztahu:

$$F_t = \frac{\rho \cdot c_t \cdot S_t \cdot v_\infty^2}{2} \quad (1.3)$$

kde ρ je hustota proudící kapaliny, c_t součinitel třecího odporu závislý na Reynoldsově čísle a typu proudění (turbulentní, laminární, přechodové), S_t omočená plocha tělesa, na niž se kapalina stýká s tělesem, v_∞ rychlost proudící kapaliny před stykem s tělesem.

1.6.2 TLAKOVÝ ODPOR

Tlakový odpor F_p vzniká rozdílem tlaků v přední a zadní části tělesa. Nejvýrazněji se tlakový odpor projevuje při obtékání rovinné desky proudem kolmým k její rovině, jak je vidět na obrázku 1.5 a). Pokud proud kapaliny není rovnoběžný s osou symetrie obtékaného tělesa nebo je obtékáno nesymetrické těleso, způsobují tlakové rozdíly síly, které rozkládáme do 2 složek – odporu a vztlaku. Na obrázku 1.5 b) je znázorněno obtékání křídla, kde je snaha o minimální odpor při maximálním vztlaku.



Obrázek 1.5 – Odpor a vztlak při obtékání [2]

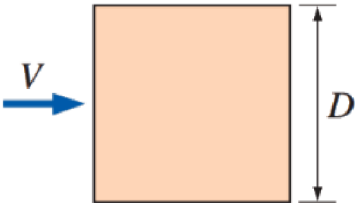
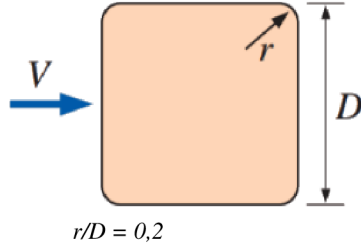
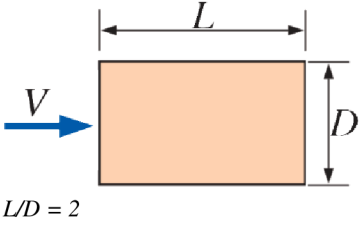
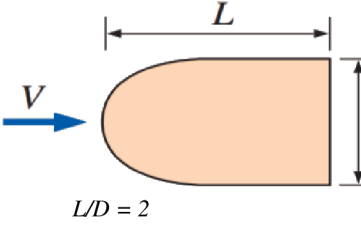
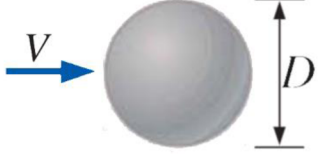
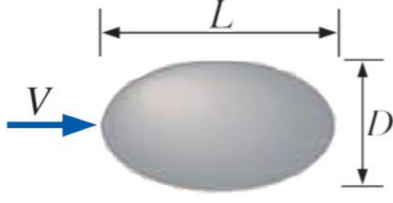
Održení úplavu od povrchu obtékaného tělesa také vytváří podtlak, který „nasává“ těleso zpět proti směru pohybu. Velikost tlakového odporu je dána vztahem:

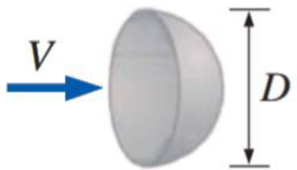
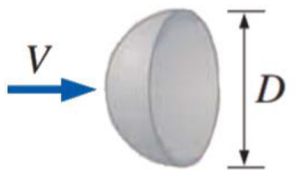
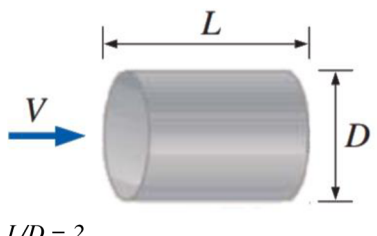
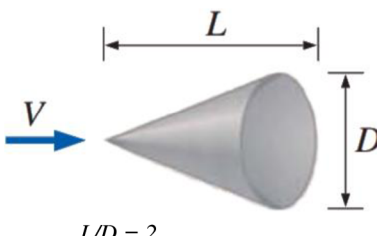

$$F_p = \frac{\rho \cdot c_p \cdot S_p \cdot v_\infty^2}{2} \quad (1.4)$$

kde c_p je součinitel tlakového odporu a S_p charakteristická plocha kolmá na rychlost v_∞ .

Součinitel tlakového odporu c_p závisí na tvaru obtékaného tělesa a jeho natočení vůči proudění. V tabulce 1.1 jsou uvedena vybrané objekty s příslušnými koeficienty tlakového odporu a znázorněny možnosti jeho snížení. Koeficient tlakového odporu významně snižuje zaoblení všech nebo alespoň náběžných hran, zploštění tělesa ve směru proud, správné natočení vůči proudu a snížením čelního odporu zmenšením náběžné plochy. V posledním řádku je těleso navrženo s minimálním tlakovým odporem.

Tabulka 1.1 Součinitel tlakového odporu pro vybrané objekty [2]

Obtékaný objekt	c_p	Obtékaný objekt se sníženým odporem	c_p
<i>Rovinné obrazce</i>			
	2,2		1,2
	1,7		0,7
<i>Prostorová tělesa</i>			
	0,2		0,1

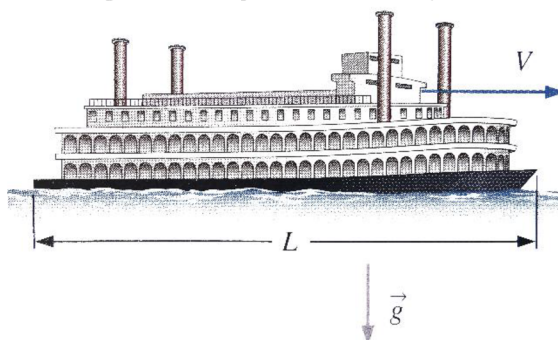
	1,2		0,4
 <i>L/D = 2</i>	0,9	 <i>L/D = 2</i>	0,5
<i>Optimalizované těleso</i>			
			0,04

1.6.3 VLNOVÝ ODPOR

Vlnový odpor je speciální druh odporu vyskytující se pouze u těles pohybujících se na rozhraní dvou fází – typicky loď rozrážející vodní hladinu. Při pohybu tělesa pouze v jednom médiu se tlakový nárůst v přední části kompenzuje tlakovým poklesem v zadní části, ale pokud se těleso pohybuje na rozhraní dvou fází, dochází k tvorbě vln, ty ke svému vzniku vyžadují energii, která je odebírána plovoucímu tělesu. Vlny tak působí proti pohybu tělesa a vzniká vlnový odpor. Vlnový odpor roste s tzv. Froudeho číslem, což je podobnostní číslo používané k testování modelů lodí. Froudeho číslo je určeno vztahem:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (1.5)$$

kde v je rychlost lodi, L její délka a g tíhové zrychlení Země (obrázek 1.6) [2].

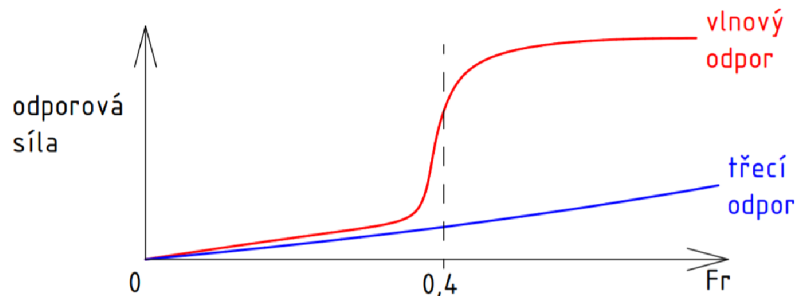


Obrázek 1.6 – Parametry Froudeho čísla [2]

Z obrázku 1.7 je patrné, že při rychlosti odpovídající hodnotě Froudeho čísla 0,4 začne výrazně růst vlnový odpor, který je významně větší než ostatní odpory působící proti pohybu lodi. Tento nárůst je způsoben tím, že délka vlny dosáhne délky lodi. Při vyšších rychlostech

lodi ($Fr > 0,4$) je především vlnový odpor tak velký, že je ekonomicky nevýhodné loď provozovat, proto teoretickou rychlost lodi určíme vztahem [3]:

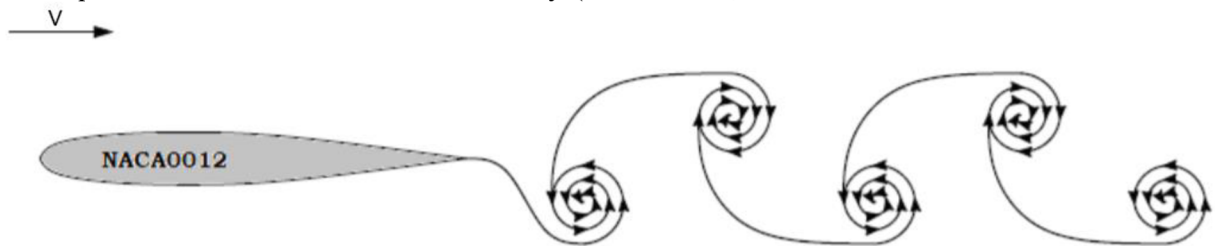
$$v_{teor} = 0,4\sqrt{gL} \quad (1.6)$$



Obrázek 1.7 – Graf závislosti vlnového a třecího odporu na Froudeho čísle [3]

1.7 KARMÁNOVA VÍROVÁ STEZKA

Při obtékání těles tekutinou, mohou vznikat vírové struktury, které zvětšují odpor obtékaného tělesa. Jednou z častých vírových struktur je Karmánova vírová stezka. Jedná se o periodickou vírovou strukturu vznikající za obtékanou překážkou. Rychlost tekutiny proudící kolem překážky nebývá zpravidla na obou stranách stejná, proto se za překážkou při mísení obou proudů tvoří střídavě orientované víry (obrázek 1.8).



Obrázek 1.8 – Vznik Karmánovy vírové stezky za obtékaným profilem NACA 0012 [4]

Kromě zvětšeného čelního odporu představuje Karmánova vírová stezka také problém, pokud se její frekvence potká s vlastní frekvencí obtékaného tělesa a dojde k rezonanci. S Karmánovou vírovou stezkou se můžeme setkat např. při obtékání mostních konstrukcí, stožárů, komínů nebo na lopatách vodní turbíny.

Velikost odporu lze vypočítat pomocí Karmánova vzorce pro čelní odpor prostředí:

$$W = \rho a U^2 \left[0,7936 \frac{u}{U} - 0,3141 \left(\frac{u}{U} \right)^2 \right] \quad (1.7)$$

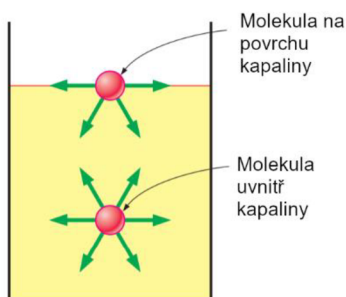
kde ρ je hustota kapaliny, a vzdálenost vírů, u rychlost pohybu vírů a U rychlost tělesa [5].

2 SMÁČIVOST POVRCHU

Smáčivost povrchu vyjadřuje chování na rozmezí kapaliny a pevné látky. Ovlivňují ji vlastnosti kapaliny i povrchu. Pokud kapalina povrch smáčí, kapička nanesená na povrch se po něm rozleje, pokud kapalina povrch nesmáčí, zabaluje se nanesená kapička do tvaru koule. Smáčivost závisí na kohezních a adhezních silách. Kohezní síly přitahují navzájem molekuly kapaliny (pevné látky) mezi sebou, adhezní síly působí na rozhraní dvou fází.

2.1 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ KAPALIN

Molekuly kapalin se mezi sebou navzájem přitahují silami. Uvnitř kapaliny jsou molekuly obklopeny ze všech stran a síly působící na molekuly jsou proto v rovnováze, ale na povrchu směřuje výslednice sil dovnitř kapaliny (obrázek 2.1). Na povrchu se vytváří tzv. povrchová vrstva, která se snaží stáhnout kapalinu, tak aby měla při daném objemu co nejmenší povrch. Povrchová vrstva se chová jako velmi tenká pružná blána, proto může udržet i předměty o vyšší hustotě než voda (hliníkové mince (obrázek 2.2), kancelářská sponka apod.).



Obrázek 2.1 – Síly působící na molekuly kapaliny [2]



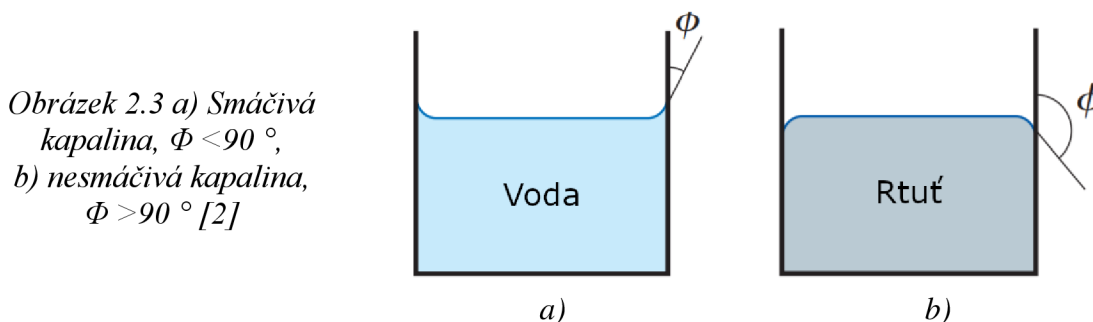
Obrázek 2.2 – Hliníkové mince na vodní hladině

Povrchové napětí je vyjádřeno vztahem:

$$\sigma_s = \frac{F_p}{2l} \quad (2.1)$$

kde F_p je povrchová síla a l délka myšleného řezu povrchové vrstvy.

Při kontaktu kapaliny s nádobou měříme tzv. stykový úhel. Pokud je stykový úhel ostrý, jsou adhezní síly mezi stěnou nádoby a kapalinou větší než kohezní síly uvnitř kapaliny a kapalina nádobu smáčí, pokud je stykový úhel tupý, jsou silové poměry opačné a kapalina nádobu nesmáčí. Příklad smáčivé a nesmáčivé kapaliny ve skleněné nádobě lze vidět na obrázku 2.3. S rostoucí teplotou klesá povrchové napětí kapaliny a kapalina se stává více smáčivou.



Obrázek 2.3 a) Smáčivá kapalina, $\Phi < 90^\circ$,
b) nesmáčivá kapalina, $\Phi > 90^\circ$ [2]

2.2 POVRCHOVÁ ENERGIE PEVNÝCH LÁTEK

V pevných látkách, na rozdíl od kapalin, mají molekuly své stále polohy, kolem kterých kmitají, nemůžou se přemísťovat v rámci objemu tělesa. Podobně jako molekuly na povrchu kapalin, jsou i molekuly na povrchu pevných látek přitahovány ostatními molekulami dovnitř tělesa. Molekuly na povrchu tělesa mají z vnější strany nenasycené vazby. Na povrchu pevných těles vzniká volná povrchová energie, která se zkráceně označuje jako povrchová energie. Povrchová energie lze chápat také jako energii potřebná k vytvoření nového povrchu pevné látky.

Neexistuje jednoduchá univerzální metoda měření povrchové energie. Přímé metody měření jsou velmi obtížné, nepřímé jsou založeny např. na vytváření nového povrchu. Velmi používanou a vyvinutou je metoda měření kontaktních úhlů na vodorovném nebo nakloněném povrchu.

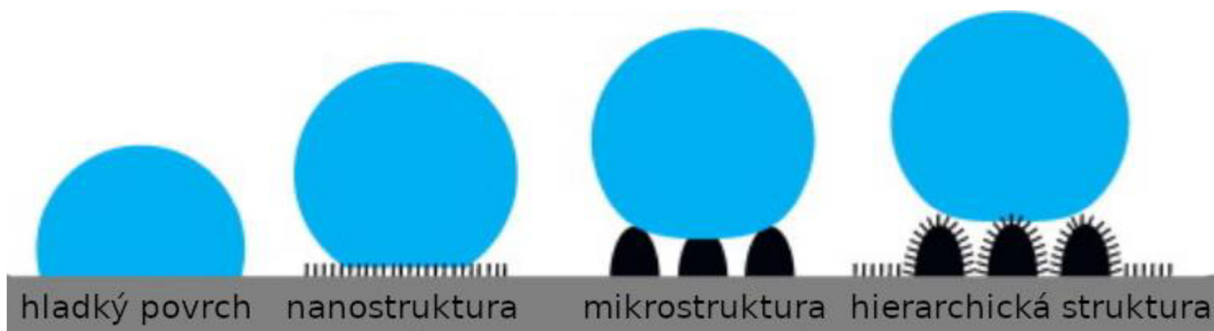
2.3 HYDROFOBIE

Povrchy tuhých těles lze podle jejich interakce s vodou dělit na hydrofilní (smáčivé) a hydrofobní (částečně smáčivé). Jako hydrofilní označujeme povrchy s kontaktním úhlem do 80° , hydrofobní od 80° , pokud je kontaktní úhel větší než 150° , jedná se o tzv. superhydrofobní povrch [6]. Míru hydrofobie určuje velikost povrchové energie tělesa a struktura jeho povrchu. V přírodě existuje velké množství různě tvarovaných a uspořádaných struktur na povrchu těl živočichů i rostlin (obrázek 2.4), které mají za úkol odpuzovat vodu.



Obrázek 2.4 – Kapky vody na letce holuba domácího (*Columba livia domestica*) a kontryhelu obecném (*Alchemilla vulgaris*)

Na obrázku 2.5 je znázorněna chování vodní kapky na hladkém povrchu, povrchu s nano- nebo mikrostrukturou a na povrchu s hierarchickou strukturou. Právě takové struktury se vyskytují v přírodě a jsou napodobovány různými technologickými postupy v technické praxi.

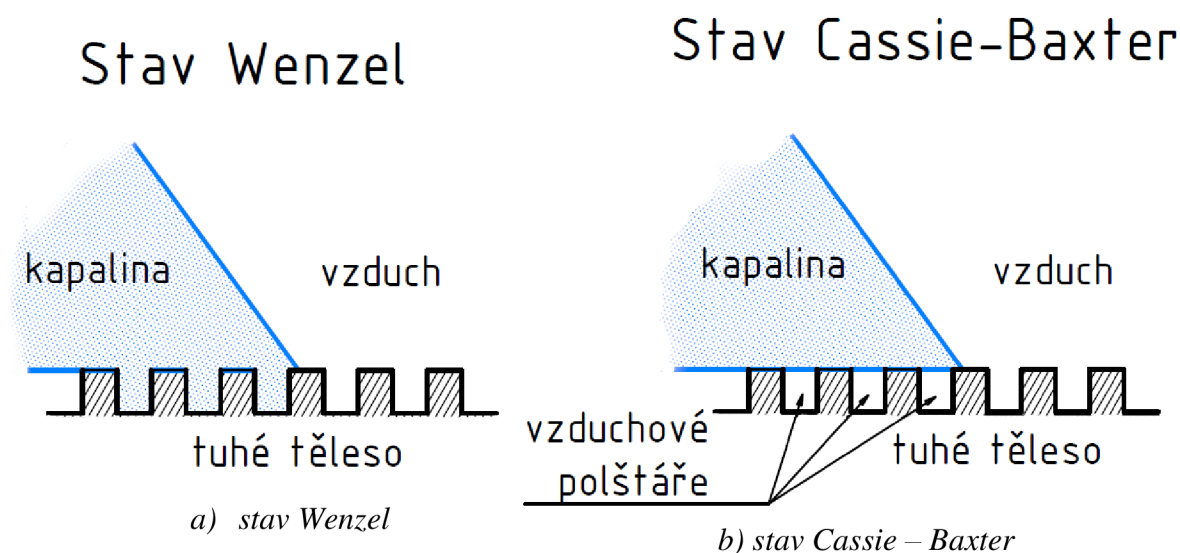


Obrázek 2.5 – Smáčivost čtyř různých povrchů [7]

Každý povrch tuhého tělesa má určitou drsnost Ra . Při kontaktu s vodou mohou nastat 2 základní stavy, stav Wenzel a stav Cassie-Baxter.

Při stavu Wenzel voda přilne k povrchu tělesa a vyplní všechny prohlubně (obrázek 2.6 a)). Pro hydrofobní povrchy platí, že se zvětšující se drsností Ra roste jejich hydrofobita, naopak hydrofilní povrchy se stávají více hydrofilní [7].

Při stavu Cassie-Baxtre se vytváří v prohlubních povrchu vzduchové polštáře (obrázek 2.6 b)). Zmenší se tak styková plocha kapaliny s tělesem, která je někde nahrazena kontaktem kapaliny s plynem. Velikost kontaktního úhlu ovlivňuje kromě drsnosti povrchu i velikost součinitele tření mezi kapalinou a plynem f_{lv} . V některých případech se může stát, že při vysokých hodnotách součinitele tření f_{lv} se změni hydrofilní povrch na hydrofobní [7]. Velikost tření mezi kapalinou a plynem je výrazně menší než mezi kapalinou a tuhým tělesem, proto při obtékání povrchu kapalinou za stavu Cassie-Baxter, klade těleso menší třecí odpor.



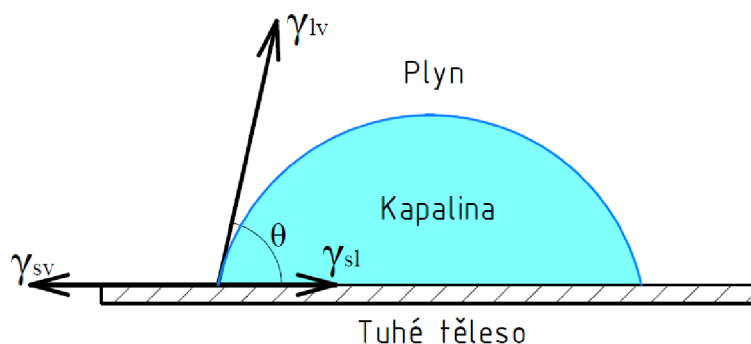
Obrázek 2.6 – Styk kapaliny s tuhým tělesem [7]

Pokud proudí kapalina po smáčivém povrchu, ulpívá na něm a rychlost c v těsné blízkosti povrchu je nulová, pokud však proudí po částečně smáčivém povrchu, je rychlost kapaliny c u povrchu nenulová, to má za následek např. změnu rychlostního profilu v potrubí. Při proudění po nakloněném částečně smáčivém povrchu, má kapalina tendenci tvořit „copánky“, aby byla

kontaktní plocha co nejmenší [8]. Obtékané těleso natřené hydrofobním povrchem má menší třecí odpor, protože na něm kapalina méně ulpívá.

2.4 KONTAKTNÍ ÚHEL A YOUNGOVA ROVNICE

Na obrázku 2.7 je kapka kapaliny umístěná na povrchu tuhého tělesa, v okolí kapičky je plyn. Velikost kontaktního úhlu θ závisí na napětích mezi plochami jednotlivých prostředí – tuhým tělesem (solid), kapalinou (liquid) a plynem (resp. párou – vapor). Kontaktní úhel je úhel, který svírá povrch tuhého tělesa s tečnou povrchu kapky procházející bodem, ve kterém



Obrázek 2.7 – Kapka kapaliny na povrchu tuhého tělesa [9]

se stýkají všechny tři fáze.

Pro velikost kontaktního úhlu θ stanovil Thomas Young vztah:

$$\gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cdot \cos \theta \quad (2.2)$$

kde γ je meziflošné napětí mezi jednotlivými prostředími, které jsou určeny indexy sv (solid/vapor), sl (solid/liquid) a lv (liquid/vapor).

2.5 MĚŘENÍ KONTAKTNÍCH ÚHLŮ

2.5.1 SEE SYSTEM

SEE System (Surface Energy Evaluation System) je systém, který je schopen určit volnou povrchovou energii na základě změření kontaktního úhlu kapaliny (obrázek 2.8). Na testovaný povrch je nanášena kapka kapaliny o známých vlastnostech, obraz je nasnímán pomocí CCD kamery a přenesen přes USB port do počítače (obrázek 2.9). Speciální software určí kontaktní úhel a spočítá volnou povrchovou energii. Výpočet je založen na modelech vycházejících z Youngovy rovnice (Neumann, Wu, Owens-Wend-Rable-Kaeble, Lifshitz-van der Waals/acidbase, atd.) a používá data z databáze vlastností kapalin, která může být dle potřeby upravována a doplňována. Kapaliny použité pro měření SEE systémem by neměly reagovat s povrchem, jejich volná povrchová energie musí být dobře definovaná a stabilní, neměly by být toxické, jejich volná povrchová energie musí být větší než ta testovaného povrchu a měly by vykazovat vysokou čistotu [10].

SEE System byl zakoupen od Masarykovy univerzity [8].



Obrázek 2.8 SEE System



Obrázek 2.9 Snímaná kapka na testovaném vzorku

2.5.2 POSTUP MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU

Plastové destičky byly ošetřeny jednotlivými povrchy, které byly použity i dále při měření odporu lodíček. Jako testovací kapalina byla použita destilovaná voda. Na každý vzorek bylo postupně nanášeno a změřeno 5 kapek o objemu 3 μl . Pomocí SSE Systemu byly vypočítány jejich kontaktní úhly. Výsledný úhel je spočítán aritmetickým průměrem. Měření probíhalo za normálních podmínek.

2.5.3 NEJISTOTY MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU

- nepřesná aproximace profilu kapky
- nestejnorodost nanášeného povrchu
- změna objemu kapky vypařováním
- velikost kapky
- reakce testovací kapaliny s testovaným povrchem
- zploštění kapky působením gravitace

2.5.4 MĚŘENÉ POVRCHY

Kontaktní úhly byly měřeny na 6 nástřících snižujících nebo zvyšujících hydrofobii. Dále byl měřen kontaktní úhel samotného plastu použitého jako podklad pro vzorky.

Nástřiky odpuzující vodu

- CarPro HydrO2 – keramická ochrana laku, přípravek zvyšující hydrofobii, určený pro ošetření laku aut (obrázek 2.10 a)). Výrobce CARPRO.
- Tekuté stěrače – přípravek zvyšující hydrofobii, určený pro ošetření čelního skla automobilů (obrázek 2.10 b)).
- Ultra ever dry – dvousložkový superhydrofobní nástřík pro všestranné využití, odpuzuje téměř všechny kapaliny, vytváří nanotexturovaný povrch (obrázek 2.10 c)). Výrobce UltraTech.

Nástřík přitahující vodu

- Tekuté řetězy ve spreji – přípravek zvyšující přilnavost pneumatik (obrázek 2.10 d)). Výrobce Den Braven.



a) HydroO2



b) tekuté stěrače



c) Ultra ever dry



d) tekuté řetězy

Obrázek 1.10 – Použité přípravky

2.5.5 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU

Tabulka 2.1 – Hodnoty kontaktních úhlů pro jednotlivé povrchy

Povrch	θ_1 [°]	θ_2 [°]	θ_3 [°]	θ_4 [°]	θ_5 [°]	θ [°]
HydroO2	35,1	40,4	24,8	44,3	26,9	34,3
Tekuté stěrače	87,0	91,9	88,0	90,0	94,3	90,2
Ultra ever dry	142,4	143,5	146,3	141,0	142,7	143,2
Tekuté řetězy	93,3	95,7	88,7	91,4	90,9	92,0
Plast	84,6	83,4	84,9	90,0	78,3	84,3

Fotografie kapek na jednotlivých površích

Obrázek 2.11 – Kapka na povrchu



a) HydroO2



b) tekuté stěrače



c) *ultra ever dry*

d) *tekuté řetězy*

e) *plast*

2.5.6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU

Z výsledků vyplývá, že již samotný plast, na který byly nanášeny různé povrchy se chová mírně hydrofobně. Tekuté stěrače podle očekávání hydrofobii zvýšili, naopak vodoodpudivý prostředek. HydrO2 se jeví jako nefunkční, protože kontaktní úhel výrazně snižuje. Důvodem nefunkčnosti může být špatná přilnavost k podkladovému materiálu nebo nehomogenita nástřiku. Pro posouzení funkčnosti tohoto nástřiku by bylo nutné porovnat jeho kontaktní úhel s kontaktním úhlem povrchu, pro který je určený.

Tekuté řetězy překvapivě zvýšili kontaktní úhel kapky. Jejich povrch je na dotyk lepivý a kapička je k němu „přilepena“ a pohybuje se po něm výrazně pomaleji než po samotném plastu. Zdá se tedy, že fungují na jiném principu než snižování kontaktního úhlu.

Výrazně nejlepších hydrofobních vlastností dosáhl dvousložkový přípravek *ultra ever dry*. Jeho kontaktní úhel se blíží 150° , což je hranice superhydrofobie.

3 MĚŘENÍ ODPORU LODIČEK

3.1 PODMÍNKY MĚŘENÍ

Měření se uskutečnila v laboratoři Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana VUT FSI v Brně, Technická 2 na upravené Zkušební stanici mikroturbín (SMT) nacházející se v těžké hydraulické laboratoři (THL).

3.2 MĚŘENÉ VELIČINY

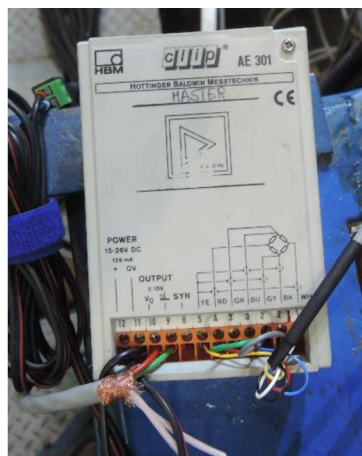
Q	průtok	l/s
F	odporová síla	N
h	výška hladiny v kanálu	mm

3.3 POUŽITÁ MĚŘÍCÍ TECHNIKA

1. Snímač síly PW4M, výrobce HBP měřící technika s. r. o., měřící rozsah 0 – 0,3 kg, přesnosti C3 dle OIML R60 (obrázek 3.1)
2. Tenzometrický měřící zesilovač CLIP AE101, výrobce HBP měřící technika s. r. o., napěťový výstup ± 10 V (obrázek 3.2)
3. Měřicí karta USB – 6009, výrobce National Instruments, pracovní napětí ± 10 V, maximální vzorkovací frekvence 48 kS/s (obrázek 3.3)
4. Indukční průtokoměr MQI 99 – START DN 100, výrobce ELA, přesnost $\pm 0,3$ % z měřené hodnoty v rozsahu $10 \div 100$ % Q_{\max} , výstup (0-20) mA



Obrázek 3.1 – Sílový snímač



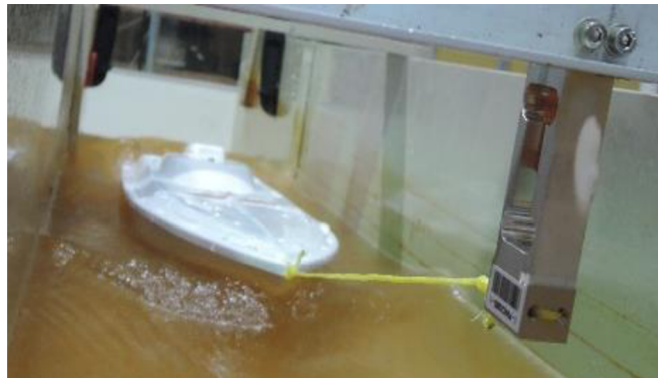
Obrázek 3.2 – Tenzometrický měřící zesilovač



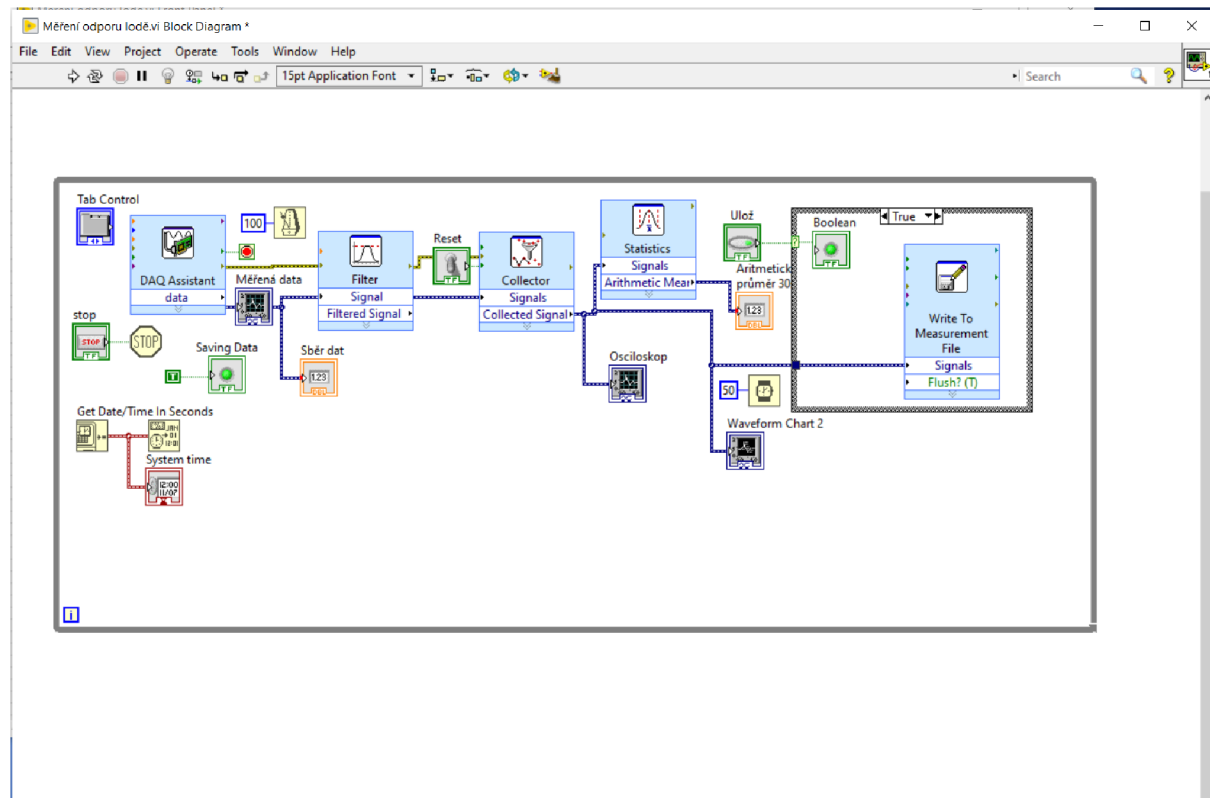
Obrázek 3.3 – Měřicí karta

3.4 PŘÍPRAVA EXPERIMENTŮ A POSTUP MĚŘENÍ

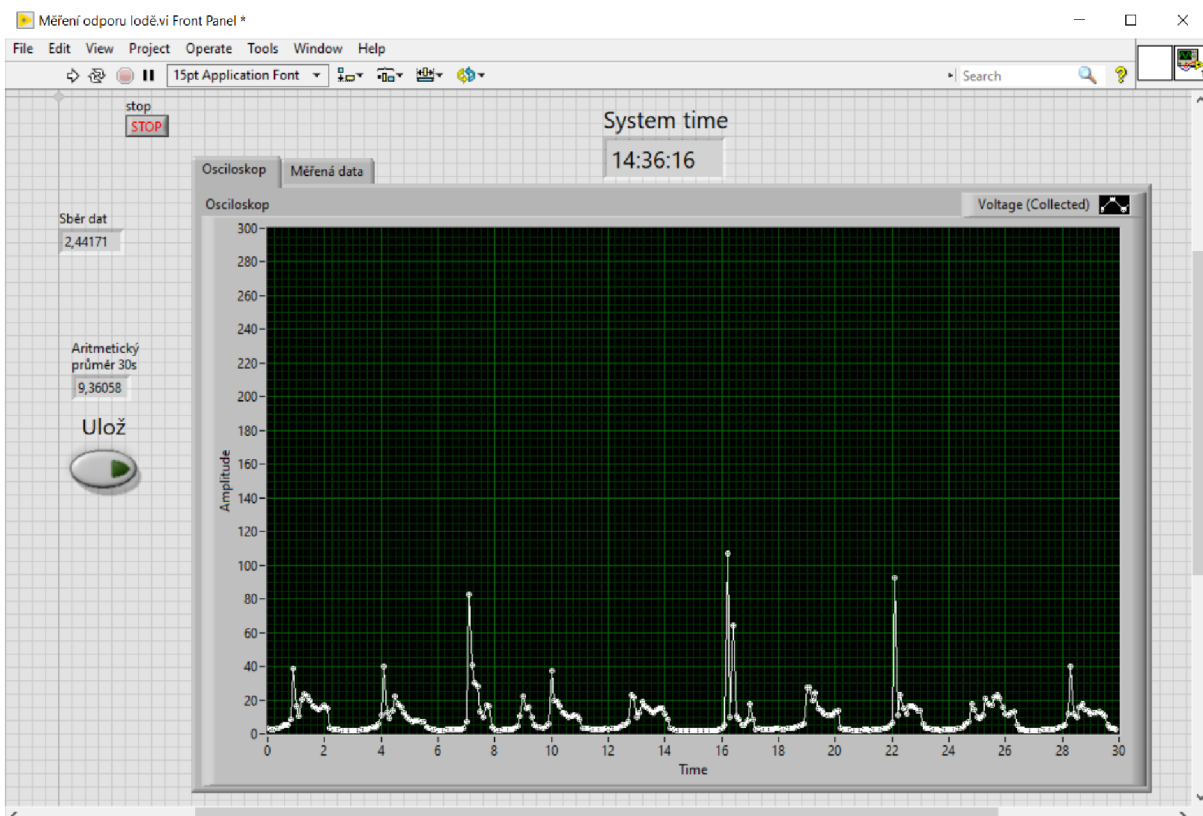
Lodičky s jednotlivými druhy povrchu byly umístěny do kanálu o šířce b 260 mm a pomocí provázku připevněny k tenzometru (obrázek 3.4). Pomocí tenzometrického měřicího zesilovače a měřicí karty byl signál převeden do počítače, kde byl zpracován v programu labVIEW. Na obrázku 3.5 je blokové schéma programu a na obrázku 3.6 je příklad průběhu odporové síly F v čase (velké výkyvy síly jsou v tomto případě způsobeny periodickým rozkmitáním lodičky zapříčiněným Karmánovou vírovou stezkou). Odpor byl snímán po dobu 30 s. Vzorkovací frekvence f byla 10 Hz.



Obrázek 3.4 – Lodička připevněná k tenzometru



Obrázek 3.5 – Blokové schéma v programu labVIEW



Obrázek 3.6 – Příklad průběhu síly v prostředí labVIEW

Vedle odporové síly byl měřen průtok, který byl regulován nastavováním otáček čerpadla, a výška hladiny v kanálu. Díky těmto parametrům mohla být spočítána střední rychlost proudící vody, Froudeho číslo (rov. 1.5) a Reynoldsovo číslo (rov. 1.1), kde průtočná plocha $S = h \cdot b$ a omočený obvod $O = 2h + b$. Kinematická viskozita vody ν je při teplotě 20 °C $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [1]. Re bylo pro všechny varianty větší než Re_k , proto se jedná vždy o turbulentní proudění.

Střední rychlost v kanálu je dána vztahem:

$$v_s = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{b \cdot h} \quad (3.1)$$

kde Q je průtok, b šířka kanálu a h výška hladiny.

Pro experimenty byly použity 2 druhy lodiček. První sada pokusů byla provedena na lodičkách zakoupených v modelářství, druhá na lodičce vytisknuté na 3D tiskárně.

3.4.1 POSTUP MĚŘENÍ MODELÁŘSKÉ LODIČKY

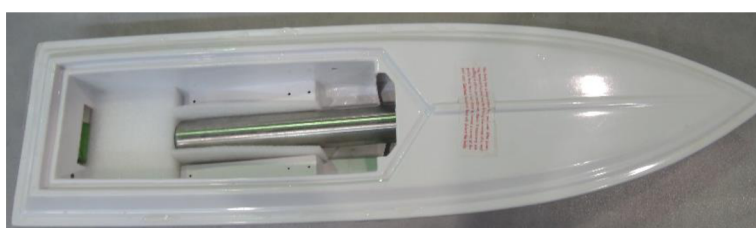
Na obrázku 3.7 je lodička použita pro první sadu měření. Samotná lodička váží 326 g, pro větší ponor do ní bylo umístěno ocelové závaží o hmotnosti 1166 g (obrázek 3.8). Odpor lodičky byl pro každý povrch měřen při třech variantách průtoku, výšky hladiny v korytu a způsobu regulace průtoku (obrázky 3.9 – 3.11).



Obrázek 3.7 – Modelářská lodička

Hlavní rozměry lodičky:

max. délka	540 mm
max. výška	80 mm
šířka zádi	140 mm
délka ponoru	520 mm
hloubka ponoru	50 mm



Obrázek 3.8 – Lodička se závažím

Na lodičku byly naneseny povrchy popsané v kapitole 2.5.4, kromě toho byla lodička polepena suchým zipem (obrázek 3.9 a)) a následně nastříkána dvousložkovým hydrofobním sprejem ultra ever dry (obrázek 3.9 b)). Pro dosažení většího odporu byl na lodičku nalepen a zalakovaný písek o středním průměru zrna 0,27 mm (obrázek 3.9 c)). Odpor byl změřen také pro samotnou lodičku pokrytou pouze ochrannou fólií z výroby.



a) suchý zip



b) suchý zip + nástřik ultra ever dry

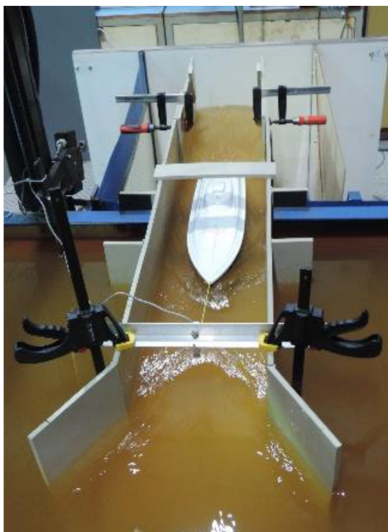


c) zalakovaný křemičitý písek

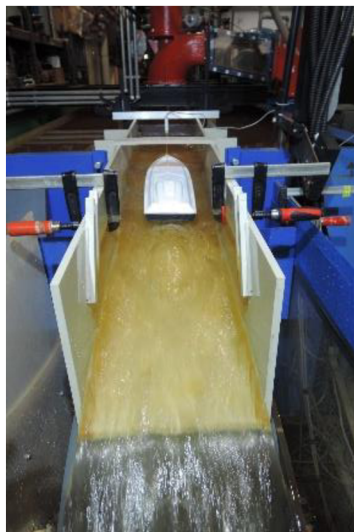
Obrázek 3.9 – Lodička s úpravami povrchu

Varianta 1

V první variantě vytékala voda z kanálu volně ven (obrázek 3.10).



a) pohled zepředu



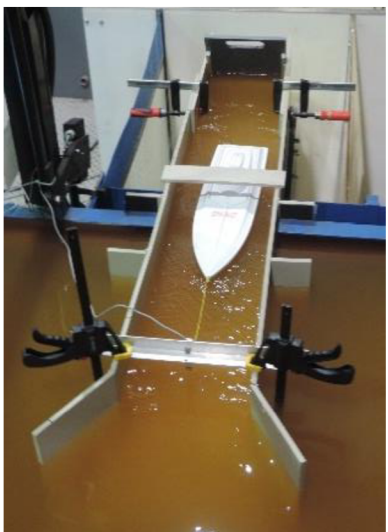
b) pohled zezadu

Obrázek 3.10 – Varianta 1

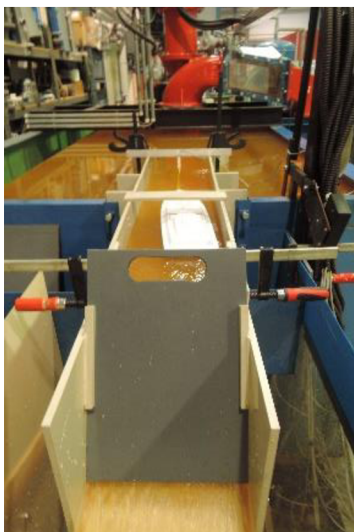
Q	18,5 l/s
h	100 mm
v_s	0,71 m/s
Re	159 277
Fr	0,315

Varianta 2

Ve druhé variantě byl kanál přehrazen shora žebrem omezujícím průtok (obrázek 3.11).



a) pohled zepředu



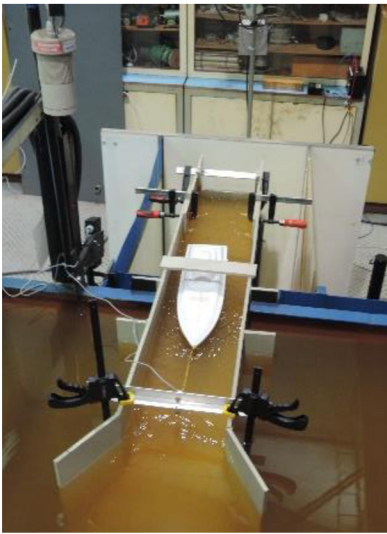
b) pohled zezadu

Obrázek 3.11 – Varianta 2

Q	12,5 l/s
h	160 mm
v_s	0,30 m/s
Re	85 353
Fr	0,133

Varianta 3

Ve třetí variantě byl kanál přehrazen zespodu žebrem omezujícím průtok (obrázek 3.12).



a) pohled zepředu



b) pohled zezadu

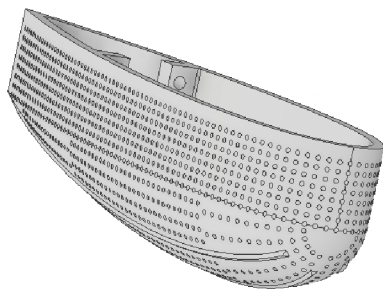
Obrázek 3.12 – Varianta 3

Q	12,5 l/s
h	160 mm
v_s	0,30 m/s
Re	85 353
Fr	0,133

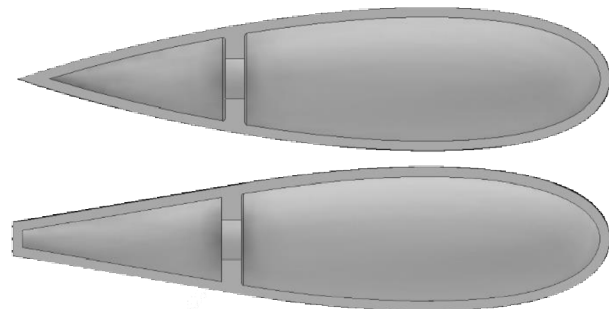
3.4.2 POSTUP VÝROBY A MĚŘENÍ LODIČKY NACA 0025

Výroba lodičky

Lodička byla navržena v programu Inventor podle symetrického profilu NACA 0025, což je jeden z řady profilů vyvinutých Federálním úřadem Spojených států založeným na podporu leteckého průzkumu – NACA (předchůdce NASA). Na lodičce byly vytvořeny podlouhlé výstupky pro lepší držení směru ve vodě. Po celém povrchu byla vytvořena struktura podobná golfovému míčku (obrázek 3.13). Následně byla lodička vytisknuta na 3D tiskárně na Ústavu strojírenské technologie VUT FSI v Brně a zbavena strukturálních podpor (obrázek 3.15). Z důvodů omezených možností rozměrů tisku byla lodička rozdělena na 2 díly, což zároveň umožnilo vytisknout dva zadní díly se špičatou odtokovou hranou a zkosenou a sledovat vliv této změny na celkový odpor lodičky (obrázek 3.14). Poté byla lodička napuštěna lakem, aby do ní neprosakovala voda. Pro větší ponor byla vybavena kovovým závažím (obrázek 3.16). Přední a zadní díl byl spojen pomocí šroubů, mezi díly byla do drážky vložena těsnící guma.



Obrázek 3.13 – Návrh lodičky v Inventoru



Obrázek 3.14 – Dvě varianty zakončení lodičky



a) 3D tisk



b) odstranění podpor

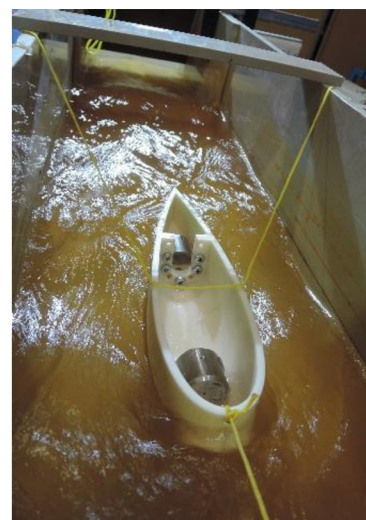
Obrázek 3.15 – Výroba lodičky

Hlavní rozměry lodičky:

délka	300 mm
max. šířka	66 mm
max. výška	72 mm
hloubka ponoru	58 mm
tloušťka stěny	5 mm

Postup měření odporu lodičky NACA

Lodička NACA 0025 byla stejně jako modelářská lodička připevněna provázkem k tenzometru. Při experimentu se lodička chovala nestabilně a periodicky se pohybovala z jedné strany kanálu na druhou, což znemožňovalo měření odporové síly, proto byla lodička připevněna provázky i z boku, aby se zabránilo pohybům lodičky napříč kanálu (obrázek 3.16). Stabilizační provázky mohou ale ovlivňovat celkovou odporovou sílu, proto se měřila odporová síla vždy při stejné výšce hladiny h 100 mm, aby byly výsledky porovnatelné. Průtok a způsob regulace se ale měnil, měření byla provedena ve 3 režimech.



Obrázek 3.16 – Uchycení lodičky

Varianta A

V první variantě byl kanál přehrazen shora žebrem omezujícím průtok.

Q	9,7 l/s
h	100 mm
v_s	0,37 m/s
Re	83 513
Fr	0,165

Varianta B

Ve druhé variantě byl kanál přehrazen také žebrem shora omezujícím průtok.

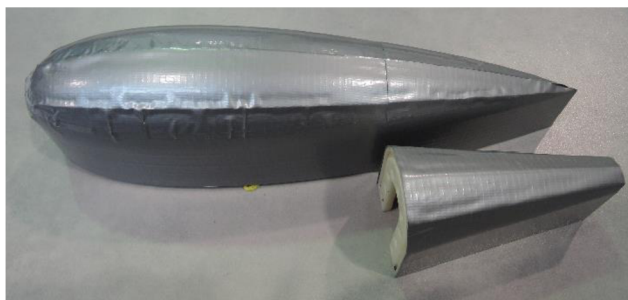
Q	12,0 l/s
h	100 mm
v_s	0,46 m/s
Re	103 315
Fr	0,204

Varianta C

Ve třetí variantě vytékala voda z kanálu volně ven.

Q	14,4 l/s
h	100 mm
v_s	0,55 m/s
Re	123 978
Fr	0,245

Porovnána byla odporová síla pro obě geometrie zadního dílu, odpor lodičky s vytisknutou strukturou a lodičky přelepenou páskou pro zakrytí struktury (obrázek 3.17). Na lodičku byl nanesen přípravek ultra ever dry a pozorováno, zda dojde k zachycení bublinek v prohlubních na povrchu.



Obrázek 3.17 – Lodička polepená páskou

Postup měření vlnového odporu

Kromě experimentů za konstantní rychlosti byl proveden experiment zaměřený na změnu vlnového odporu při rostoucím Froudeho čísle. V kapitole 1.6.3 je uvedeno, že při hodnotě Froudeho čísla 0,4 začne prudce narůstat hodnota vlnového odporu. Protože je rychlost proudění v kanálu omezena technickými možnostmi stanice, musela být lodička zkrácena, abychom této hodnoty dosáhli. Proto byla použita pouze přední část vytisknuté lodičky zakrytá zezadu plastovým krytem a vybavena kormidlem pro lepší držení směru (obrázek 3.18). Lodička měla po této úpravě délku 195 mm. Rychlost vody v kanále byla změněna rychlým vysunutím zadního žebra. Experiment začínal při hodnotě střední rychlosti v kanále 0,477 m/s, to odpovídá dle rov. 1.5 Froudeho číslu 0,344. Po vysunutí žebra se střední rychlost zvýšila na 0,596 m/s a Froudeho číslo na 0,431.



Obr. 3.18 – Lodička upravená pro zkoušku vlnového odporu

3.5 NEJISTOTY MĚŘENÍ ODPORU LODIČEK

- nepřesnost měření průtoku
- nepřesnost měření výšky hladiny
- nehomogenní nanesení povrchu a jeho opotřebení vlivem proudící kapaliny
- nestacionarita proudění
- vychylování lodičky ze stabilní polohy
- vliv stabilizačních provázků na odporovou sílu u NACA lodičky

3.6 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY ODPORU LODIČEK

3.6.1 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY MODELÁŘSKÉ LODIČKY

V tabulce 3.1 jsou uvedeny hodnoty odporové síly modelářské lodičky s různými povrchy.

Tabulka 3.1 – Hodnoty odporů modelářské lodičky pro různé povrchy

Povrch	Odpor modelářské lodičky [mN]			Kontaktní úhel [°]
	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	
	$v_s = 0,71 \text{ m/s}$	$v_s = 0,30 \text{ m/s}$	$v_s = 0,30 \text{ m/s}$	
Folie	1 075	86	125	84,3*
HydrO2	1 230	110	129	34,3
Tekuté stěrače	1 020	84	112	90,2
Ultra ever dry	1 108	94	128	143,2
Tekuté řetězy	1 134	96	144	92,0
Křemičitý písek	1 698	136	157	-
Suchý zip	2 179	183	229	-
Suchý zip + ultra ever dry	1 784	145	174	-

* Aby nemusela být poškozena modelářská lodička, byl vzorek folie nahrazen plastem vykazujícím podobné hydrofobní vlastnosti.

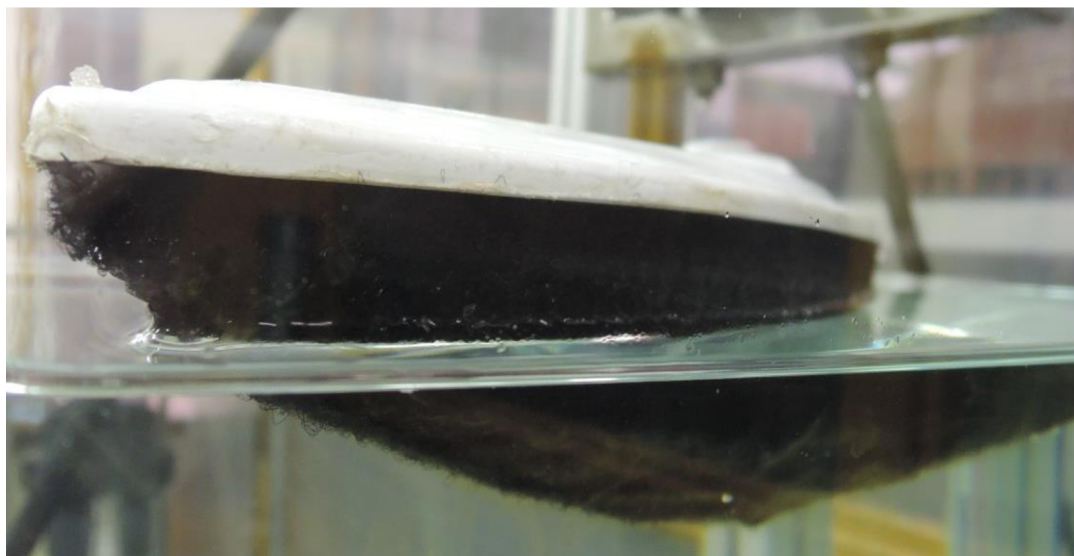
Fotografie modelářské lodičky s vybranými povrchy



Obrázek 3.19 – Lodička s tekutými řetězy



Obrázek 3.20 – Lodička s pískem



Obrázek 3.21 – Lodička se suchým zipem




Obrázek 3.22 – Lodička se suchým zipem a nástřikem ultra ever dry


3.6.2 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY LODIČKY NACA 0025

V tabulkách 3.2 a 3.3 jsou uvedeny hodnoty odporů pro různé úpravy povrchu.

Tabulka 3.2 – Hodnoty odporů NACA lodičky se špičatým zakončením

Povrch 	Odpor NACA lodičky [mN]		
	Varianta A	Varianta B	Varianta C
	$v_s = 0,37$ m/s	$v_s = 0,46$ m/s	$v_s = 0,55$ m/s
Bez úprav	389	835	1 647
Páska	412	817	1 562
Ultra ever dry	321	667	1 327

Tabulka 3.3 – Hodnoty odporů NACA lodičky se zkoseným zakončením

Povrch 	Odpor NACA lodičky [mN]		
	Varianta A	Varianta B	Varianta C
	$v_s = 0,37$ m/s	$v_s = 0,46$ m/s	$v_s = 0,55$ m/s
Bez úprav	244	575	934
Páska	295	593	899
Ultra ever dry	215	521	910

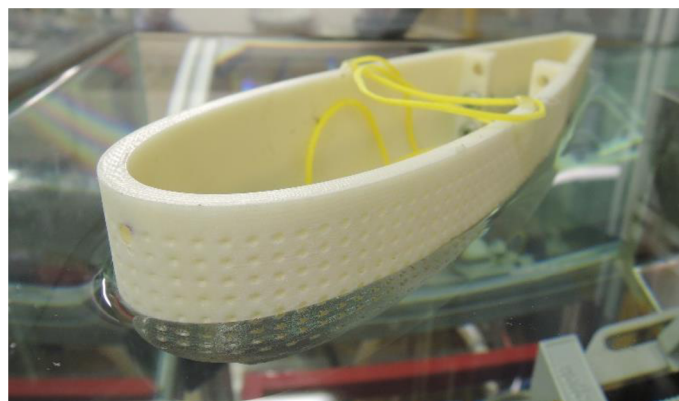


a) pohled shora



b) pohled zespodu

Obrázek 3.23 – NACA lodička bez úprav



a) pohled shora



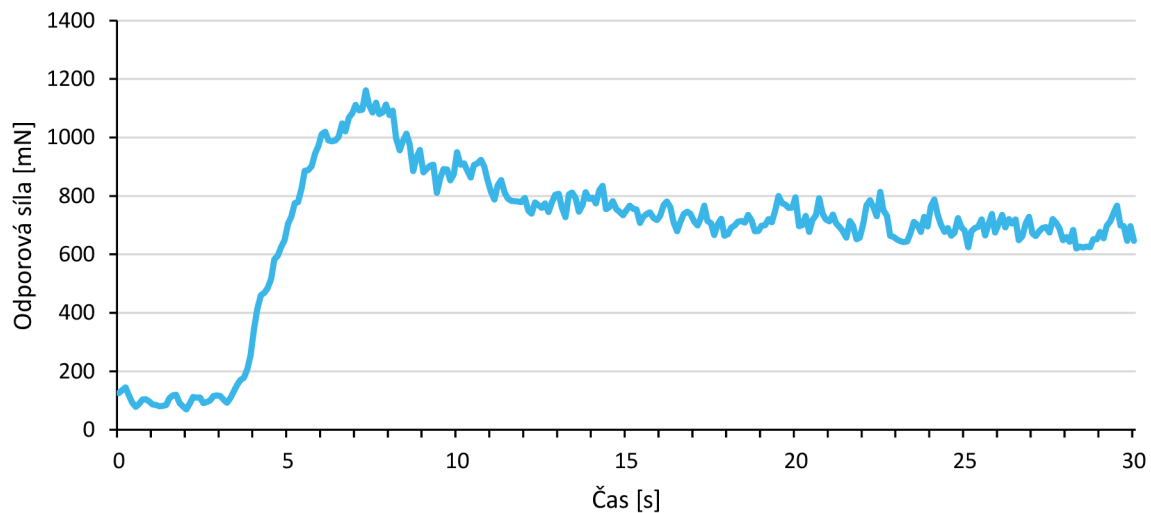
b) pohled zespodu

Obrázek 3.24 – NACA lodička ošetřená nástřikem ultra ever dry

Vlnový odpor

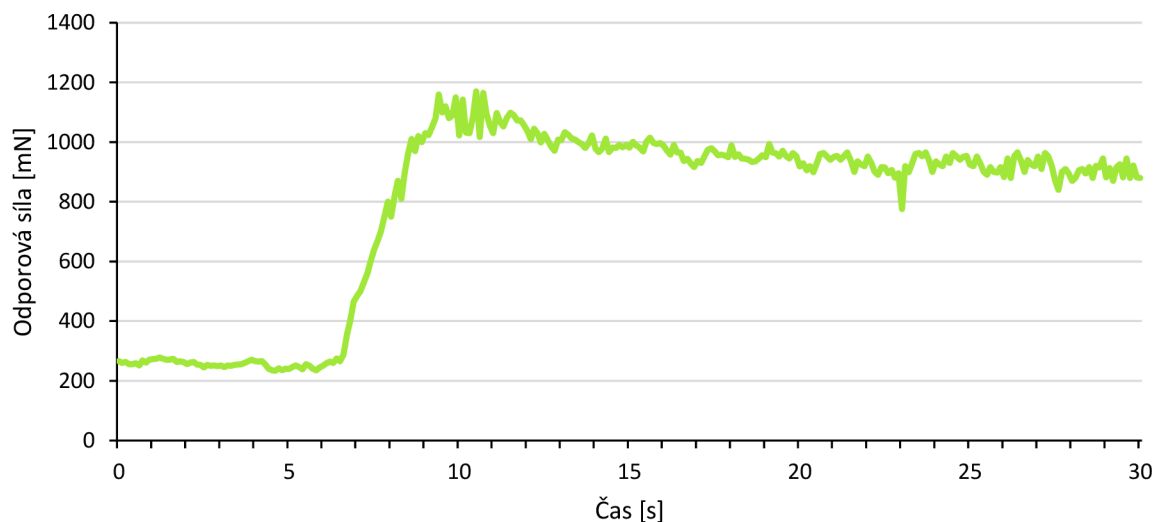
Na obrázku 3.25 je graf průběhu odporové síly lodičky speciálně upravené pro tento experiment, na obrázku 3.26 je graf průběhu pro případ, kdy nedosáhneme Froudeho čísla 0,4. Pro tento graf byla použita NACA lodička se zkoseným koncem. Vysunutím žebra na konci kanálu se dostala z výše popsané varianty A na variantu C. V tabulce 3.4 jsou počáteční a koncové hodnoty odporu, rychlosti a Froudeho čísla pro oba experimenty, v posledním řádku je jejich procentuální nárůst. Fotografie ukazují vznik a postupný vývoj odporové vlny u zkrácené lodičky (obrázek 3.27).

Průběh odporové síly – zkrácená NACA lodička



Obrázek 3.25 – Průběh odporové síly při změně rychlosti proudění – zkrácená NACA lodička

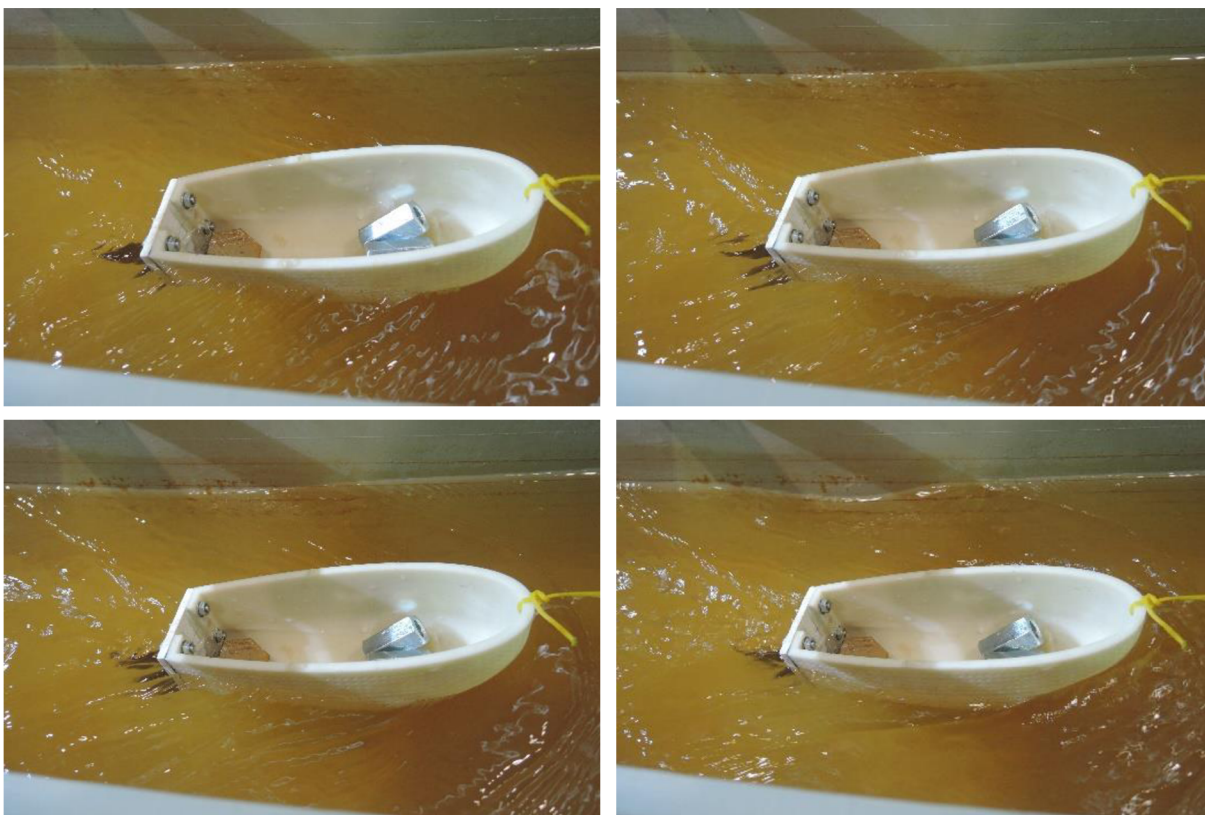
Průběh odporové síly – lodička NACA zkosená



Obrázek 2.26 Průběh odporové síly při změně rychlosti proudění – NACA lodička zkosená

Tabulka 3.4 – Hodnoty odporu, rychlosti a Froudeho čísla na počátku a konci experimentu

	Lodička NACA zkrácená			NACA lodička zkosená		
	F [mN]	v_s [m/s]	Fr	F [mN]	v_s [m/s]	Fr
Počáteční stav	102	0,48	0,344	244	0,37	0,165
Koncový stav	674	0,60	0,431	934	0,55	0,245
Nárůst	561 %	25 %	25 %	283 %	48 %	48 %



Obrázek 3.27 – Vývoj odporové vlny při změně rychlosti proudění

3.7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ ODPORU

3.7.1 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MODELÁŘSKÉ LODIČKY

Z naměřených výsledků v tabulce 3.1 je patrné, že odpor při variantě 2 (žebro shora) je menší než odpor při variantě 3 (žebro zespodu), ačkoliv střední rychlost vody je stejná. Důvod rozdílných odporů je nerovnoměrné rozložení rychlosti po výšce kanálu. Pokud je kanál uzavřen shora (varianta 2), proudí kapalina nejrychleji u dna, pokud zespodu (varianta 3), tak u hladiny. Proto klade lodička při variantě 3 větší odpor než při variantě 2.

Tabulka 3.1 potvrzuje, stejně jako měření kontaktních úhlů, že přípravek HydrO2 je nefunkční a odpor lodičky ještě zvětšuje, a že tekuté stěrače odpor mírně snižují.

Přípravek ultra ever dry navzdory očekáváním vycházejících z naměřeného kontaktního o něco zvětšil odpor lodičky. Sprej vytváří na povrchu nanostrukturu s velkým množstvím mezer, ve kterých se zachytává vzduch, který brání kapičkám vody přilnout k povrchu. Zdá se, že přípravek funguje pouze na rozhraní voda/vzduch, ale při ponoření celého tělesa do vody se efekt ztrácí, a naopak drsnější povrch přípravku mírně zvyšuje třecí odpor.

Jak již bylo zmíněno v kap. 2.6, tekuté řetězy kontaktní úhel zvětšují, ale vodu k sobě „lepí“ a lodička tak klade větší odpor (obrázek 3.19). Písek nanesený na povrch lodičky dle očekávání výrazně zvyšuje třecí odpor (obrázek 3.20).

Největšího nárůstu odporu se dosáhlo nalepením suchého zipu na povrch lodičky (obrázek 3.21). Vlivem velkého nárůstu třecího odporu se celkový odpor lodičky zvýšil více než dvojnásobně. Po následném ošetření přípravkem ultra ever dry se vytvořili při ponoření na povrch lodičky vzduchové bubliny (obrázek 3.22), které snížily odpor o více než pětinu. Lodička byla po vytáhnutí z vody na dotyk suchá.

3.7.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ LODIČKY NACA 0025

NACA lodička se ve vodě chovala nestabilně a musela být připevněna dalšími provázky, což přispělo k větším ne jistotám měření a výsledky mohou být mírně zkreslené, ale i přesto lze porovnáním naměřených odporů vyvodit některé závěry.

Z porovnání tabulek 3.2 a 3.3 vyplývá, že zkosení odtokové hrany výrazně snížilo vliv Karmánovy vírové stezky, a tedy i celkový odpor lodičky.

Z obrázku 3.23 je patrné, že na NACA lodičce bez povrchových úprav se bublinky vzduchu neudrží. To potvrzuje i experiment s páskou o podobných vlastnostech jako podkladový plast, která měla za úkol prohlubně zakrýt. Naměřené síly s páskou a bez ní se příliš nelišily. Při nižších rychlostech se síla zvýšila, při vyšších naopak snížila, ale rozdíly nejsou příliš velké a mohou být způsobeny pouze nepřesnostmi měření nebo rozdílnými vlastnostmi materiálů. Při měření lodičky se zkosenou hranou byl poměrný nárůst odporové síly větší, to může být způsobeno postupným odchlípnutím pásky, protože toto měření probíhalo jako druhé.

Po ošetření povrchu NACA lodičky přípravkem ultra ever dry se podařilo docílit efektu ulpívání bublinek v záměrně vyrobených prohlubních i v nerovnostech způsobených technologií 3D tisku (obrázek 3.24). Při měření odporové síly byl zaznamenán její pokles.

Experiment s vlnovým odporem potvrdil teoretické poznatky popsané v kapitole 1.6.3. Při změně rychlosti, resp. Froudeho čísla z 0,344 na 0,431 došlo k výraznému nárůstu odporu (obr. 3.25). Pro porovnání je uveden i graf, ve kterém nebyla dosažena prahová hodnota Fr 0,4. Na první pohled se zdá, že ve druhém grafu došlo ke stejnému nárůstu, ale je třeba vzít v potaz, že třecí i tlakový odpor roste s druhou mocninou rychlosti a vlnový odpor se s rostoucí rychlostí rovněž značně zvyšuje. Z tabulky 3.4 plyne, že v prvním případě se odpor zkrácené lodičky po překročení prahové hodnoty Fr zvýšil o 561 % při nárůstu rychlosti 25 %. ve druhém případě byl nárůst odporu poloviční při dvojnásobném nárůstu rychlosti. V průběhu experimentu nebylo možné měřit změny průtoku a výšky v hladiny v čase, proto není známa přesná hodnota Froudeho čísla, při které k nejvýraznější změně došlo.

DISKUSE

Do práce by mohlo být zahrnuto více různě strukturovaných povrchů, na které by se nanášel hydrofobní nátěr a zkoumala se jejich schopnost zadržet bublinky v závislosti na jejich velikosti, geometrii, hustotě apod. Předmětem zkoumání by mohlo být, zda a při jakých rychlostech proudění dochází k odtrhávání a vyplavování těchto bublinek. Stejně tak by mohla být zkoumána i odolnost samotného nátěru. Zajímavé by bylo pozorovat hydrofobní povrchy pod mikroskopem a sledovat souvislosti mezi mikrostrukturou povrchu a makroskopickým chováním při styku s vodou.

Ke zpřesnění měřených odporů by pomohlo více stabilizovat NACA lodičku pomocí kýlu, kormidla nebo větších vodících prvků na trupu lodičky. Lodička by tak držela sama směr a byla by připevněna pouze jedním provázkem k tenzometru. Ke stabilizaci by rovněž pomohla optimalizace tvaru zádi pro snížení vlivu Karmánovy vírové stezky. Výsledky by byly lépe porovnatelné, kdyby byl vodní kanál delší a rychlostní profil protékající vody vyrovnanější.

ZÁVĚR

Práce popisuje vliv různých povrchů na velikost odporové síly lodičky. K experimentům byly využity 2 druhy lodiček – modelářská lodička s hladkým povrchem a speciálně navrhnutá a vytisknutá lodička podle profilu NACA 0025 se strukturou povrchu podobnou golfovému míčku. Testované povrchy byly tvořeny několika komerčními spreji, suchým zipem a pískem. Na jednotlivých površích byl měřen kontaktní úhel, ten vyšel výrazně největší pro přípravek ultra ever dry s hodnotou $143,2^\circ$.

Modelářská lodička kladla nejmenší odpor po ošetření povrchu tekutými stěrači, naopak největší při polepení suchým zipem. Po nastříkání suchého zipu hydrofobním sprejem ultra ever dry se podařilo zadržet bublinky na povrchu lodičky a snížit tak její odpor oproti samotnému suchému zipu, avšak i tento odpor byl stále značně vyšší než odpor hladké lodičky bez povrchových úprav. Navzdory očekáváním lodička ošetřená pouze hydrofobním přípravkem ultra ever dry měla větší odpor než bez lodička tohoto povrchu. Zdá se, že tento povrch, fungující na principu nanostruktury, funguje pouze při kontaktu se vzduchem, ale když je ponořen do vody, jeho drsnější struktura naopak odpor zvyšuje. Stejně jako u suchého zipu, tak i u NACA lodičky se ukázalo, že vzduch nutný pro funkci tohoto prostředku může být zadržován v prohlubních a nerovnostech na povrchu, proto u lodičky NACA vedlo ošetření tímto přípravkem ke snížení odporu. Vliv struktury povrchu by mohl být lépe popsán pomocí mikroskopického pozorování.

Protože nelze při experimentech oddělit jednotlivé složky odporu, vyskytuje se v práci problematika tlakového a vlnového odporu a Karmánovy vírové stezky. Po zkosení odtokové hrany vytisknuté NACA lodičky se ukázalo, že se výrazně snižuje celkový odpor vlivem menšího působení Karmánovy vírové stezky. Pro vlnový odpor byl proveden speciální experiment se zkrácenou lodičkou, který ukazoval prudký nárůst odporu při překročení Froudeho čísla 0,4.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŠOB, František. *Hydromechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o, 2002, 238 s. : il. ISBN 80-214-2037-5.
- [2] ÇENGEL, Yunus A a John M. CIMBALA. *Fluid mechanics: fundamentals and applications*. 3rd ed. New York: c2014: McGraw-Hill, 2014, xxii, 1000 s. : il. ISBN 978-0-07-338032-2.
- [3] RUDOLF, Pavel. *Viscous fluids + similarity*. [přednáška]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT. 4.5.2021. In: *youtube.com* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/362337/mod_resource/content/1/prednaska_viscous_fluids_eng.pdf
- [4] RODRIGUES, Diana Carvalho. *Effect of Reynolds Number on a Plunging Airfoil*. [online] 2020 [cit.2021-5-9]. Dostupné z: <https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/7090/12764>
- [5] BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. *Mechanika kontinua*. Vyd. 3., rev. Praha: Academia, 2005. Česká matice technická. ISBN 80-200-1344-X.
- [6] POCHYLÝ, František a Simona FIALOVÁ. *Experimental results as a basis for mathematical solutions*. [prezentace]. [cit. 2021-03-20]
- [7] BHUSHAN, Bharat, Yong JUNG a Bharat BHUSHAN. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. *Progress in Materials Science* [online]. 2011, **56**(1), 1-108 [cit. 2021-04-17]. ISSN 0079-6425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2010.04.003
- [8] POCHYLÝ, František a Lukáš RINKA. *Analýza adhesních sil na rozhraní tekutiny a tuhého povrchu*. 2008, 65 s. : VUT-EU13303-QR-21-08
- [9] BARTOVSKÁ, Lída a Marie ŠIŠKOVÁ. *Co je co v povrchové a koloidní chemii* [online] 2005 [cit.2021-4-17]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/uhel_smaceni.html
- [10] BURŠÍKOVÁ, V., et al. *Surface Energy Evaluation of Plasma Treated Materials by Contact Angle Measurement*. Brno: Vydavatelství MU, 2004. 70 s. ISBN 80-210-3563-3

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
u_{pr}	Průměrná rychlost tekutiny v potrubí	$m \cdot s^{-1}$
u_{max}	Maximální rychlost tekutiny v potrubí	$m \cdot s^{-1}$
v	Rychlost tekutiny	$m \cdot s^{-1}$
v_s	Střední rychlost tekutiny	$m \cdot s^{-1}$
v_{∞}	Rychlost tekutiny v neovlivněné oblasti	$m \cdot s^{-1}$
Re	Reynoldsovo číslo	-
Fr	Froudeho číslo	-
r	Poloměr potrubí	m
D	Charakteristický rozměr průtočného profilu	m
S	Vnitřní průřez protékaného profilu	m^2
O	Omočený obvod protékaného profilu	m
g	Tíhové zrychlení Země	$m \cdot s^{-2}$
v_{teor}	Teoretická rychlosti lodí	$m \cdot s^{-1}$
L	Délka lodí	m
ρ	Hustota	$kg \cdot m^{-3}$
ν	Kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
δ	Tloušťka mezní vrstvy	m
F_{vz}	Vztlková síla	N
F_b	Boční síla	N
F	Odporová síla	N
F_t	Odporová třecí síla	N
F_p	Odporová tlaková síla	N
F_i	Odporová indukovaná síla	N
F_v	Odporová vlnová síla	N
c_t	Součinitel třecího odporu	-
c_p	Součinitel tlakového odporu	-
S_t	Omočená plocha tělesa	m^2
S_p	Charakteristická plocha kolmá na rychlost	m^2
W	Čelní Karmánův odpor prostředí	$kg \cdot s^{-2}$
a	Vzdálenost vírů	m
u	Rychlost pohybu vírů	$m \cdot s^{-1}$
U	Rychlost pohybu obtékaného tělesa	$m \cdot s^{-1}$
σ_s	Povrchové napětí	$N \cdot m^{-1}$
F_p	Povrchová síla	N

l	Délka myšleného řezu	m
Φ	Úhel smáčení	°
θ	Kontaktní úhel	°
γ_{sv}	Napětí mezi tuhým tělesem a plynem	J·m ⁻²
γ_{sl}	Napětí mezi tuhým tělesem a kapalinou	J·m ⁻²
γ_{lv}	Napětí plynem a kapalinou	J·m ⁻²
Q	Průtok	l·s ⁻¹
h	Výška hladiny	mm
b	Šířka kanálu	mm
f	Vzorkovací frekvence	Hz

Zkratka	Význam
SEE System	Surface Energy Evaluation System (Systém vyhodnocení povrchové energie)
VUT	Vysoké učení technické
FSI	Fakulta strojního inženýrství
SMT	Zkušební stanice mikroturbín
THL	Těžká hydraulická laboratoř
OIML	Internacional Organization of Legal Metrology (Mezinárodní organizace legální metrologie)
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics (Federální úřad Spojených států založený na podporu leteckého výzkumu)

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1.1 Laminární proudění potrubím s kruhovým profilem [2]
Obr. 1.2 Turbulentní proudění potrubím s kruhovým profilem [2]
Obr. 1.3 Laminární a turbulentní mezní vrstva [1]
Obr. 1.4 Odtržení mezní vrstvy a úplav [1]
Obr. 1.5 Odpor a vztlak při obtékání a) rovinné desky b) křídla [2]
Obr. 1.6 Parametry Froudeho čísla [2]
Obr. 1.7 Graf závislosti vlnového a třecího odporu na Froudeho čísle [3]
Obr. 1.8 Vznik Karmánovy vírové stezky za obtékaným profilem NACA 0012 [4]
Obr. 2.1 Síly působící na molekulu kapaliny [2]
Obr. 2.2 Hliníkové mince na vodní hladině
Obr. 2.3 a) Smáčivá kapalina b) nesmáčivá kapalina [2]
Obr. 2.4 Kapky vody na letce holuba domácího (*Columba livia domestica*) a kontryhelu obecném (*Alchemilla vulgaris*)
Obr. 2.5 Smáčivost 4 různých povrchů [7]
Obr. 2.6 Styk kapaliny s tuhým tělesem a) stav Wenzel b) stav Cassie – Baxter [7]
Obr. 2.7 Kapka kapaliny na povrchu tuhého tělesa [9]
Obr. 2.8 SEE Systém
Obr. 2.9 Snímaná kapka na testovaném vzoru
Obr. 2.10 Použité přípravky a) HydrO2 b) tekuté stěrače c) ultra ever dry d) tekuté řetězy
Obr. 2.11 Kapka vody na povrchu a) HydrO2 b) Tekuté stěrače c) ultra ever dry d) tekuté řetězy e) plast
Obr. 3.1 Silový snímač
Obr. 3.2 Tenzometrický měřicí zesilovač
Obr. 3.3 Měřicí karta
Obr. 3.4 Lodička připevněná k tenzometru
Obr. 3.5 Blokové schéma v programu labVIEW
Obr. 3.6 Příklad průběhu síly v prostředí labVIEW
Obr. 3.7 Modelářská lodička
Obr. 3.8 Lodička se závažím
Obr. 3.9 Lodička s úpravami povrchu a) suchý zip b) suchý zip + nástřík ultra ever dry c) zalakovaný křemičitý písek
Obr. 3.10 Varianta 1 a) pohled zepředu b) pohled zezadu
Obr. 3.11 Varianta 2 a) pohled zepředu b) pohled zezadu
Obr. 3.12 Varianta 3 a) pohled zepředu b) pohled zezadu
Obr. 3.13 Návrh lodičky v Inventoru
Obr. 3.14 Dvě varianty zakončení lodičky
Obr. 3.15 Výroba lodičky a) 3D tisk b) odstranění podpor
Obr. 3.16 Uchycení lodičky
Obr. 3.17 Lodička polepená páskou
Obr. 3.18 Lodička upravená pro zkoušku vlnového odporu
Obr. 3.19 Lodička s tekutými řetězy

- Obr. 3.20 Lodička s pískem
- Obr. 3.21 Lodička se suchým zipem
- Obr. 3.22 Lodička se suchým zipem a nástřikem ultra ever dry
- Obr. 3.23 NACA lodička bez úprav
- Obr. 3.24 NACA lodička ošetřená nástřikem ultra ever dry a) pohled shora b) pohled zespodu
- Obr. 3.25 Průběh odporové síly při změně rychlosti proudění – zkrácená lodička NACA
- Obr. 3.26 Průběh odporové síly při změně rychlosti proudění – lodička NACA zkosená
- Obr. 3.27 Vývoj odporové vlny při změně rychlosti proudění
- Obr. P.1 Průběh odporu modelářské lodičky – varianta 1
- Obr. P.2 Průběh odporu modelářské lodičky – varianta 2
- Obr. P.3 Průběh odporu modelářské lodičky – varianta 3

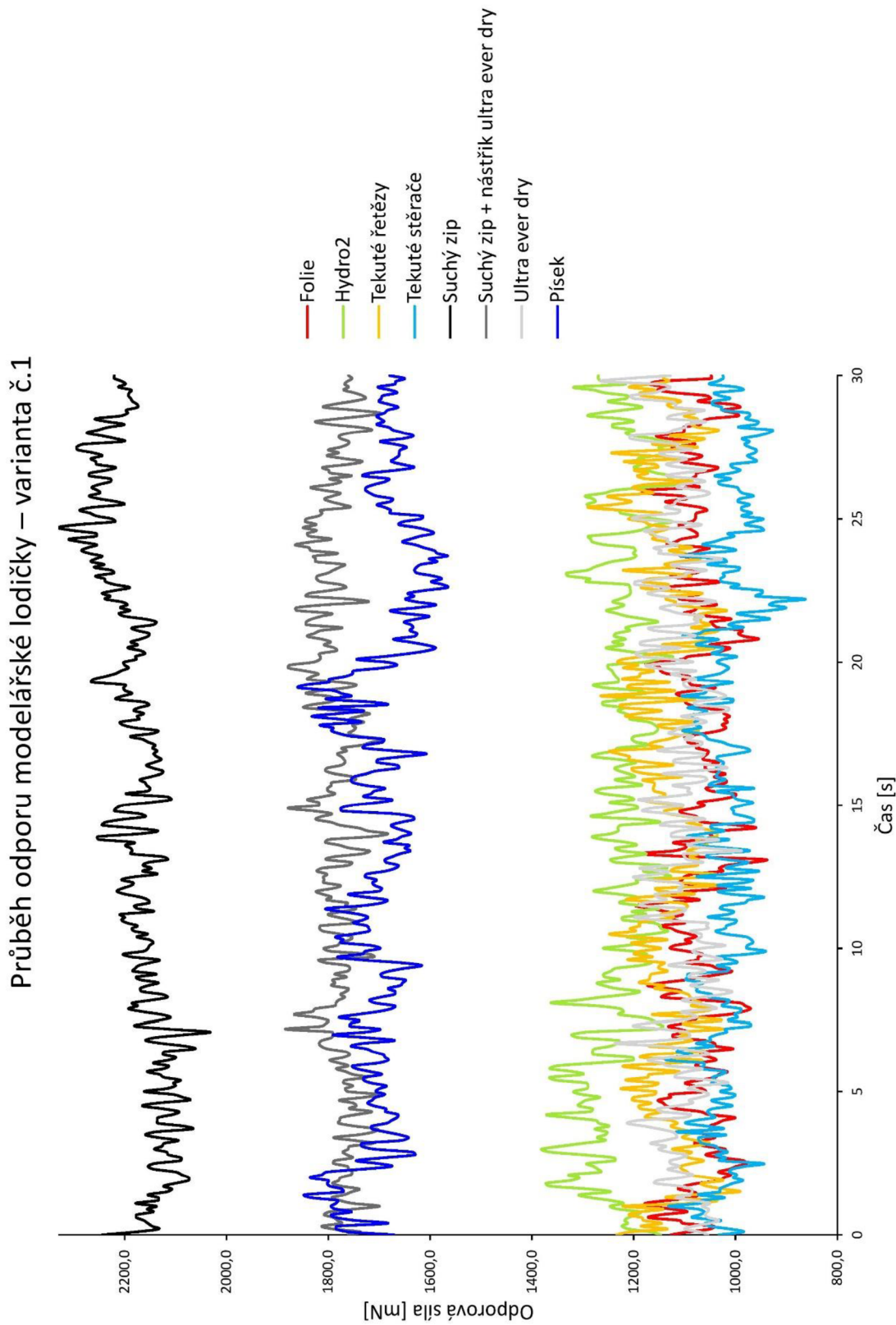
SEZNAM TABULEK

- Tab. 1.1 Součinitel tlakového odporu pro vybrané objekty [2]
Tab. 2.1 Hodnoty kontaktních úhlů pro jednotlivé povrchy
Tab. 3.1 Hodnoty odporů modelářské lodičky pro různé povrchy
Tab. 3.2 Hodnoty odporů NACA lodičky se špičatým zakončením
Tab. 3.3 Hodnoty odporů NACA lodičky se zkoseným zakončením
Tab. 3.4 Hodnoty odporu, rychlosti a Froudeho čísla na počátku a konci experimentu

SEZNAM PŘÍLOH

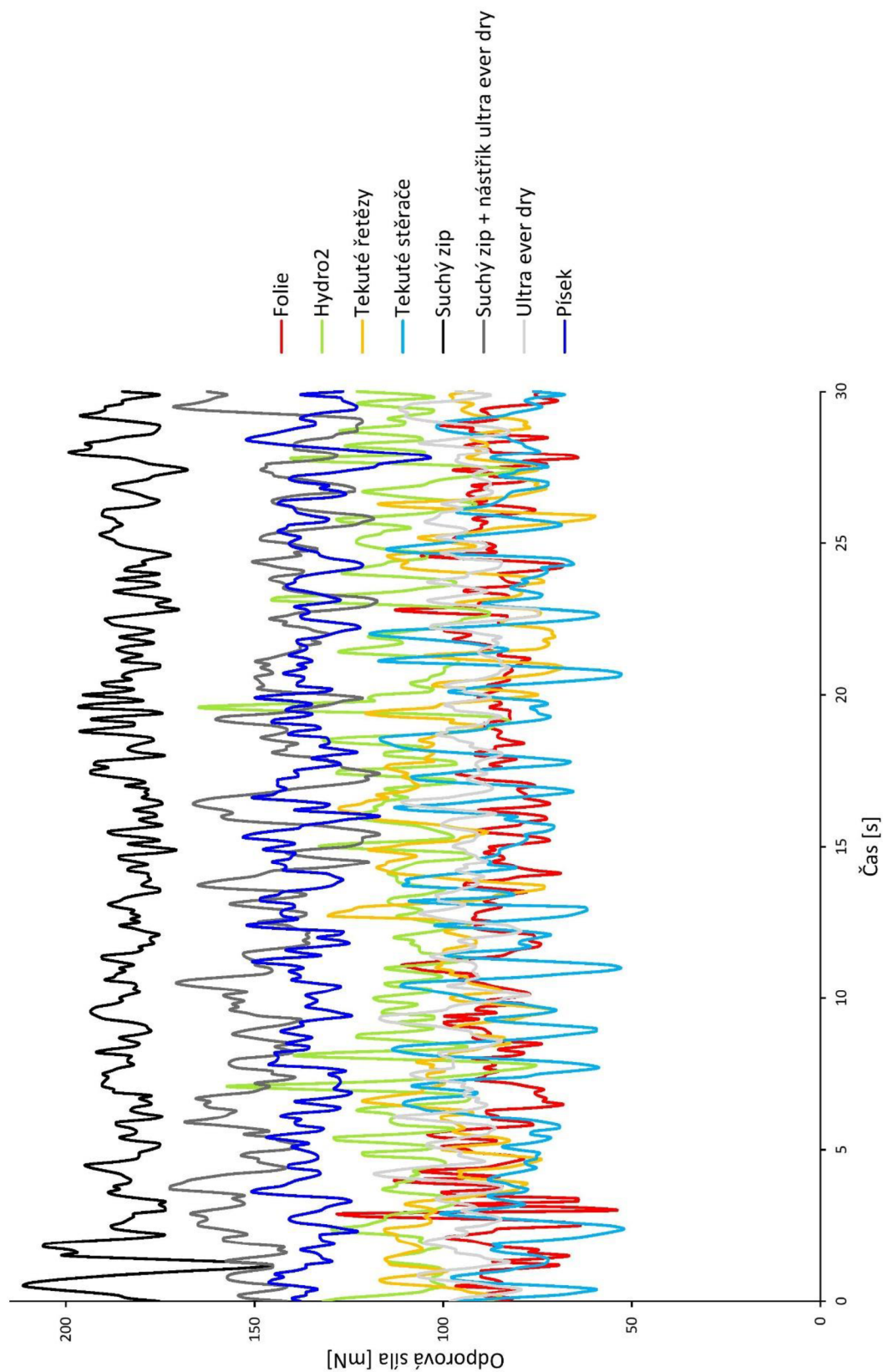
- 1 Průběhy odporů modelářské lodičky při jednotlivých variantách

Příloha 1: Průběhy odporů modelářské lodičky při jednotlivých variantách



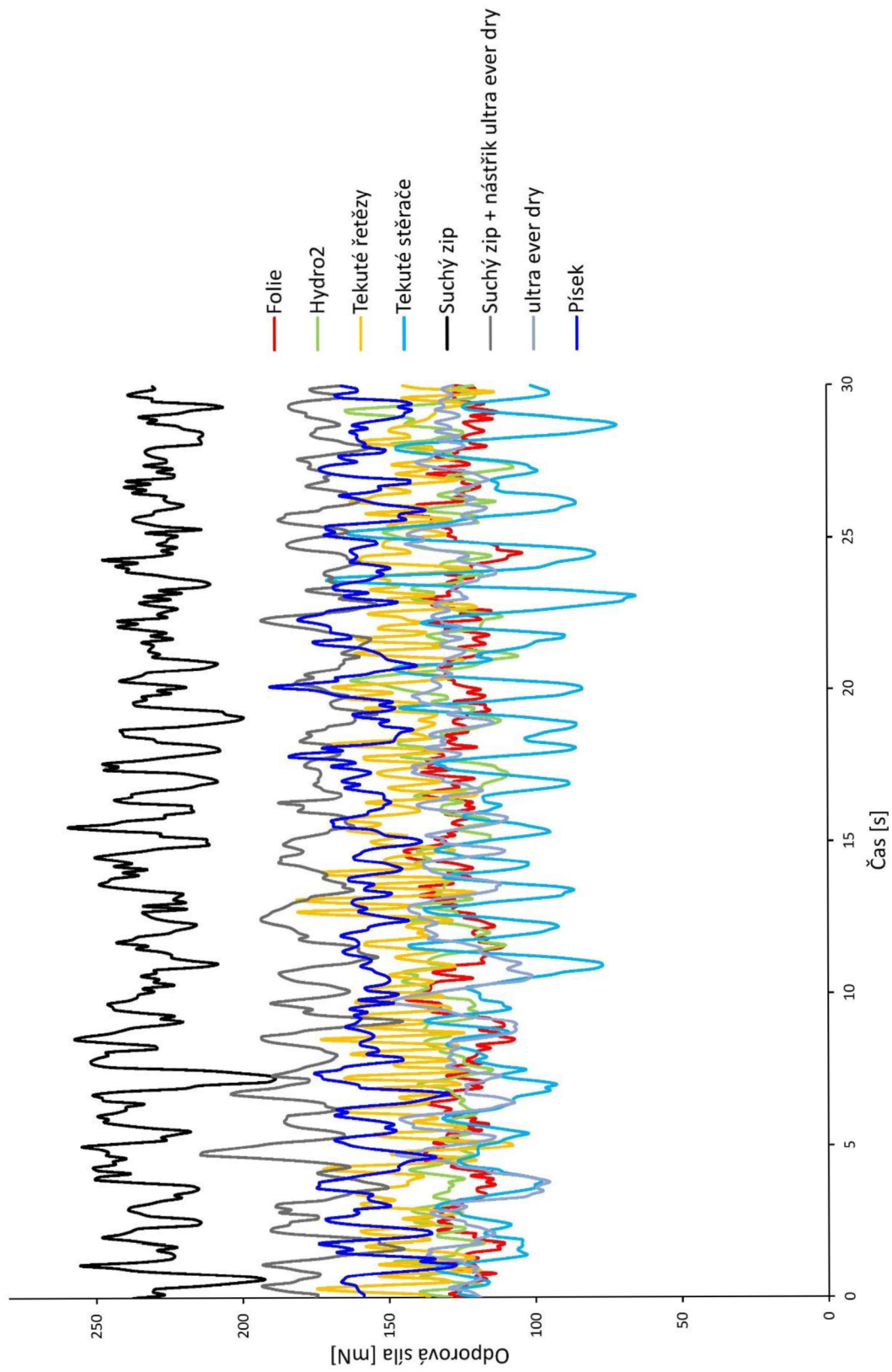
Obrázek P.1: Průběh odporu modelářské lodičky – varianta 1

Průběh odporu modelářské lodičky – varianta č.2



Obrázek P.2: Průběh odporu modelářské lodičky – varianta 2

Průběh odporu modelářské lodičky – varianta č.3



Obrázek P.3: Průběh odporu modelářské lodičky – varianta 3