

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Akademický rok 2012 / 2013

Vít PELC

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2341 Strojírenství
Studijní zaměření: Energetické zdroje a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Experimentální vyšetření závislosti povrchového napětí podchlazené vody měřeného elevační metodou na průměru kapiláry

Autor: **Vít PELC**

Vedoucí práce: **Prof. Ing. Radim MAREŠ, CSc.**

Akademický rok 2012 / 2013

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

**.....
podpis autora**

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Pelc	Jméno Vít	
STUDIJNÍ OBOR	B 2341 „Energetické zdroje a zařízení“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Mareš, CSc.	Jméno Radim	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Experimentální vyšetření závislosti povrchového napětí podchlazené vody měřeného elevační metodou na průměru kapiláry		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	53	TEXTOVÁ ČÁST	35	GRAFICKÁ ČÁST	18
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>V první části bakalářské práce je zpracovaná teorie povrchového napětí a rešerše publikovaných prací. Stručně popisuje metodiku různých měření povrchového napětí kapalin, které se prováděly v minulosti. Ve druhé části bakalářské práce je popis, jak vypadá přístroj pro naše měření a jak funguje elevační metoda v praxi. Dále je zde popsán postup a problémy, které se vyskytly během měření. V závěru jsou zaznamenány výsledné hodnoty povrchového napětí, které byly porovnány s ostatními výsledky zmíněnými v první části bakalářské práce a použít v praxi.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">Povrchové napětí, podchlazená destilovaná voda, kapilára, komůrka, meniskus, termostat, výměník, vychlazený vzduch, katetometr, ústředna, regulátor, termočlánek.</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Pelc	Name Vít	
FIELD OF STUDY	B 2341 “Energy Resources and Devices“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Mareš, CSc.	Name Radim	
INSTITUTION	ZČU - FST – KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Experimental investigation of the Surface Tension for Super Cooling Water by Capillary-Rise Method		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Department of Power System Engineering	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	--	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	53	TEXT PART	35	GRAPHICAL PART	18
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	In the first part of the bachelor work, there is processed research. It describes briefly the methodology of different measure of the surface tension liquids, which are performed in the past. In the second part of bachelor work, there is a description how the capillary-rise method works in practice and how the device looks like. Next is the issue of process and measurements. In conclusion the final values of the surface tension were recorded and they were compared with other results, that they were mentioned in the first part of the bachelor work and use in practice
KEY WORDS	Surface tension, supercooled distilled water, capillary, closet, meniscus, thermostat, exchanger, cooled air, cathetometer, regulator, multimeter, thermosensor.

Důležité fyzikální veličiny a jejich jednotky

- výběr z ČSN ISO 31-0 01 1300 až ČSN ISO 31-4 01 1300 [Veličiny 1994]
- výběr z dalších zdrojů a konvencí

NÁZEV VELIČINY	Obecně		Doporučeno pro FST	
	ZNAČKA VELIČINY	MEZIN. ZNAČKA JEDNOTKY SI vč. jejich dekadických násobků/dílů a uznané CIPM	ZNAČKA VELIČINY	MEZIN. ZNAČKA JEDNOTKY SI, dekadické nás./díly SI a uznané CIPM
Část 1: Prostor a čas				
ČSN ISO 31-1 01 1300 (výběr)				
úhel, (rovinný úhel)	α, β, γ ϑ, φ	rad ^o , ['] , ^{''}	α, β, γ $\vartheta, \varphi, \dots$	rad ^o (na desetinná místa)
délka	l, L	m	$l, L,$ $a, b, c, d \dots$	mm, m, μm , km
šířka	b		b, B, \dots	
výška	h		h, H, \dots	
tloušťka	d, δ		t, \dots	
poloměr	r, R		r, R	
průměr	d, D		d, D	
délka dráhy	s		s, \dots	
vzdálenost	d, r		$l, L,$ $a, b, c, d \dots$	
kartézské souřadnice	x, y, z		x, y, z	
poloměr křivosti	ρ		ρ	
plocha	$A, (S)$	m^2	S	mm^2, m^2
objem	V	m^3	V	mm^3, m^3
čas, čas. interval, trvání	t	s, min, h, d	t	s, min, h, d, rok
úhlová rychlost	ω	rad/s	ω	rad/s
úhlové zrychlení	α	rad/s^2	α	rad/s^2
rychlost, složky rychlosti	$v, c,$ u, v, w	m/s	v	m/s, m/min, mm/min, km/h
zrychlení	a	m/s^2	a	m/s^2
(zrychlení volného pádu), gravitační zrychlení	g	m/s^2	g	m/s^2
Část 2: Periodické a příbuzné jevy				
ČSN ISO 31-2 01 1300 (výběr)				
perioda, doba kmitu	T	s	T	s
kmitočet, frekvence	f	Hz	f	Hz
(frekvence otáčení), otáčky za min., ot.za sek.	n	$\text{s}^{-1},$ r/min, r/s	n	$\text{s}^{-1},$ ot/min, ot/s (konvence)
úhlový kmitočet	ω	rad/s, s^{-1}	ω	rad/s, s^{-1}

NÁZEV VELIČINY	Obecně		Doporučeno pro FST	
	ZNAČKA VELIČINY	MEZIN. ZNAČKA JEDNOTKY SI vč. jejich dekadických násobků/dílů a uznané CIPM	ZNAČKA VELIČINY	MEZIN. ZNAČKA JEDNOTKY SI, dekadické nás./díly SI a uznané CIPM
Část 3: Mechanika				
ČSN ISO 31-3 01 1300 (výběr)				
hmotnost	m	kg	m	kg
(objemová hmotnost), hustota (hmotnosti)	ρ	kg/m ³	ρ	kg/m ³
moment setrvačnosti	I, J	kg · m ²	J	kg · m ²
síla	F	N	F	N
tíha, tíhová síla	$F_g, (G),$ $(P), (W)$		F_g	
moment síly	M	N · m	M	N · m, N · mm
moment dvojice	M		\mathbf{M}	
točivý moment	M, T		M_t	
tlak	p	Pa	p	MPa
normálové napětí	σ		σ	
(smykové napětí), tečné napětí (<i>konvence</i>)	τ		τ	
poměrné prodloužení	ε, e	1	ε	1
zkos	γ		γ	
(Poissonův poměr), Poissonovo číslo	μ, ν	1	μ	1
modul pružnosti v tahu	E	Pa	E	MPa
modul pružn. ve smyku	G		G	
(osový) kvadratický moment průřezu	I_o, \mathbf{I}	m ⁴	\mathbf{I}	mm ⁴
polární (kvadratický) moment průřezu	I_p	m ⁴	I_p	mm ⁴
průřezový modul	Z, W	m ³	W	mm ³
dynam. součinitel tření	$\mu, (\mathbf{f})$	1	\mathbf{f}	1
statický součinitel tření	$\mu_s, (\mathbf{f}_s)$		\mathbf{f}_s	
(dynamická) viskozita	η	Pa · s	η	Pa · s
kinematická viskozita	ν	m ² /s	ν	m ² /s
energie	E	J	E	J
práce	$W, (A)$		A	
potenciální energie	E_p, V, Φ		E_p	
kinetická energie	E_k, T		E_k	
výkon	P	W	P	W, kW, MW
účinnost	η	1	η	1

NÁZEV VELIČINY	Obecně		Doporučeno pro FST	
	ZNAČKA VELIČINY	MEZIN. ZNAČKA JEDNOTKY SI vč. jejich dekadických násobků/dílů a uznané CIPM	ZNAČKA VELIČINY	MEZIN. ZNAČKA JEDNOTKY SI, dekadické nás./díly SI a uznané CIPM
Část 4: Teplo				
ČSN ISO 31-4 01 1300 (výběr)				
termodynamická teplota	$T, (Θ)$	K	T	K
Celsiova teplota	$t, θ$	°C	t	°C
teplotní součinitel délkové roztažnosti	$α_l$	K ⁻¹	$α_l$	K ⁻¹
teplo, množství tepla	Q	J	Q	J
součinitel tepelné vodivosti	$λ, (χ)$	W/(m · K)	$λ$	W/(m · K)
součinitel prostupu tepla	$K, (k)$	W/(m ² · K)	k	W/(m ² · K)
součinitel přestupu tepla	$h, (α)$		$α$	

NÁZEV VELIČINY	Obecně		Doporučeno pro FST	
	ZNAČKA VELIČINY	MEZIN. ZNAČKA JEDNOTKY SI vč. jejich dekadických násobků/dílů a uznané CIPM	ZNAČKA VELIČINY	MEZIN. ZNAČKA JEDNOTKY SI, dekadické nás./díly SI a uznané CIPM
Část 5: Různé (a) Další zdroje a konvence (výběr)				
posunutí od deformace	u	m	u	mm
natočení od deformace	φ	rad	φ	rad
tuhost	k	N/m	k	N/mm, N/m, N/ μ m
podajnost	p	m/N	p	mm/N, m/N, μ m/N
viskozní tlumení	b	N · s/m	b	N · s/m
torzní tuhost	k_φ	N · m/rad	k_φ	N · mm/rad, N · m/rad
torzní poddajnost	p_φ	rad/(N · m)	p_φ	rad/(N · mm), rad/(N · m)
torzní viskozní tlumení	b_φ	N · m · s/rad	b_φ	N · m · s/rad
dovolená hodnota pro tlak	p_D	Pa	p_D	MPa
mez pevnosti pro normálová napětí	σ_p		σ_p	
- mez pevnosti v tahu	R_m, σ_{pt}		σ_{pt}, R_m	
mez kluzu pro normálová napětí	σ_k		σ_k	
- mez kluzu v tahu	R_e, σ_{kt}		σ_{kt}, R_e	
mez úměrnosti pro normálová napětí	σ_u		σ_u	
dovolená hodnota pro stat. normál. napětí	σ_D		σ_D	
(základní) mez únavy pro normálová napětí	σ_C		σ_C	
mez únavy pro vrub pro normálová napětí	σ_C^*		σ_C^*	
mez pevnosti pro tečná napětí	τ_p		τ_p	
mez kluzu pro tečná napětí	τ_k		τ_k	
dovolená hodnota pro stat. tečná napětí	τ_D		τ_D	
(základní) mez únavy pro tečná napětí	τ_C		τ_C	
mez únavy pro vrub pro tečná napětí	τ_C^*		τ_C^*	

NÁZEV VELIČINY	Obecně		Doporučeno pro FST	
	ZNAČKA VELIČINY	MEZIN. ZNAČKA JEDNOTKY SI vč. jejich dekadických násobků/dílů a uznané CIPM	ZNAČKA VELIČINY	MEZIN. ZNAČKA JEDNOTKY SI, dekadické nás./díly SI a uznané CIPM
Část 5: Různé (b)		Další zdroje a konvence (výběr)		
bezpečnost	s, k	1	s	1
bezp. vůči mezi pevnosti	s_p, k_p		s_p	
bezp. vůči mezi kluzu	s_k, k_k		s_k	
bezp. vůči mezi únavy	s_C, k_C		s_C	
bezpečnost výsledná	s_v, k_v		s_v	
bezpečnost val. ložisek vůči trvanlivosti	s_d		s_d	
bezpečnost val. ložisek vůči statické únosnosti	s_o		s_o	
bezpečnost val. ložisek vůči mezním otáčkám	s_n		s_n	

NÁZEV VELIČINY	Obecně		Doporučeno pro FST	
	ZNAČKA VELIČINY	MEZIN. ZNAČKA JEDNOTKY SI vč. jejich dekadických násobků/dílů a uznané CIPM	ZNAČKA VELIČINY	MEZIN. ZNAČKA JEDNOTKY SI, dekadické nás./díly SI a uznané CIPM
Část 5: Různé (c) Další zdroje a konvence (výběr)				
index značek veličin pro směr souřadnice x	x	-	x	-
index značek veličin pro směr souřadnice y	y		y	
index značek veličin pro směr souřadnice z	z		z	
index značek veličin pro obvodový směr	o	-	o	-
index značek veličin pro radiální směr	r		r	
index značek veličin pro axiální směr	a		a	
index značek veličin pro tečný směr (obecně)	t	-	t	-
index značek veličin pro normálový směr (ob.)	n		n	
index značek veličin pro osový směr (obecně)	x, o		x	
index značek veličin pro otáč. pohyb (obecně)	φ	-	φ	-
index značek veličin při tření	f	-	f	-
index značek veličin pro tah	t	-	t	-
index značek veličin pro tlak	d		d	
index značek veličin pro ohyb	o		o	
index značek veličin pro smyk	s		s	
index značek veličin pro krut	k		k	
index značek veličin pro dolní hodnotu kmitu	d, D	-	d, D	-
index značek veličin pro horní hodnotu kmitu	h, H		h, H	
index značek veličin pro střední složku kmitu	m, M		m, M	
index značek veličin pro amplit. složku kmitu	a, A		a, A	

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Teorie povrchového napětí	1
3. Metody měření povrchového napětí	3
3.1 Měření povrchového napětí R290, R600 a směsi R290/R600a (propan, isobutan).....	5
3.2 Experimentální hodnoty povrchového napětí podchlazené vody (dle Hackera).....	7
3.2.1 Přístroj a postup.....	8
3.2.2 Výsledky měření	12
3.3 Povrchové napětí podchlazené vody do $-27,2^{\circ}\text{C}$ (dle Floriana, Angella)	14
3.4 Měření povrchového napětí kapalin – experimentální zařízení (dle Richtra)	17
3.5 Měření povrchového napětí podchlazené vody (dle Mareše)	19
3.5.1 Prvky měřicího zařízení	19
3.5.2 Postup měření	27
3.5.3 Problémy v měření	29
3.5.4 Výsledky měření	36
3.5.5 Výsledky měření v porovnání s publikovanými	47
4. Závěr	51
5. Literatura.....	52
6. Přílohy.....	52

1. Úvod

Tato práce navazuje na práci Ing. Karla Richtra, který sestavil experimentální zařízení pro měření povrchového napětí kapalin. Z jeho zařízení byl použit stojan, kapilára, komůrka, měřicí ústředna a katetometr. Návrh zařízení předložil Ing. Richtrovi jeho školitel specialista Ing. Hrubý, CSc. z Ústavu termomechaniky AV ČR.

Ve své práci se zaměřím na zjištění povrchového napětí kapaliny ve třech kapilárách. Naměřené a vyhodnocené hodnoty porovnám s hodnotami naměřenými Florianem, Angellem a Hackerem. Výsledek práce by pak měl zodpovědět otázku, zda se výsledky naměřené uvedenými shodují s výsledky naměřenými v rámci této práce. Pokud se budou naměřené hodnoty shodovat, mohli bychom prohlásit hodnoty naměřené uvedenými za pravdivé.

Úvod je věnován teoretickému pojmu povrchového napětí vody z oblasti mechaniky tekutin. Dále se hodlám zaměřit na problematiku jednotlivých měření povrchového napětí ve světě, které by mohly být přínosem pro projekt na KKE ZČU pod vedením prof. Mareše. Celá práce je koncipována jako spojení části teoretické a praktického výzkumu.

2. Teorie povrchového napětí

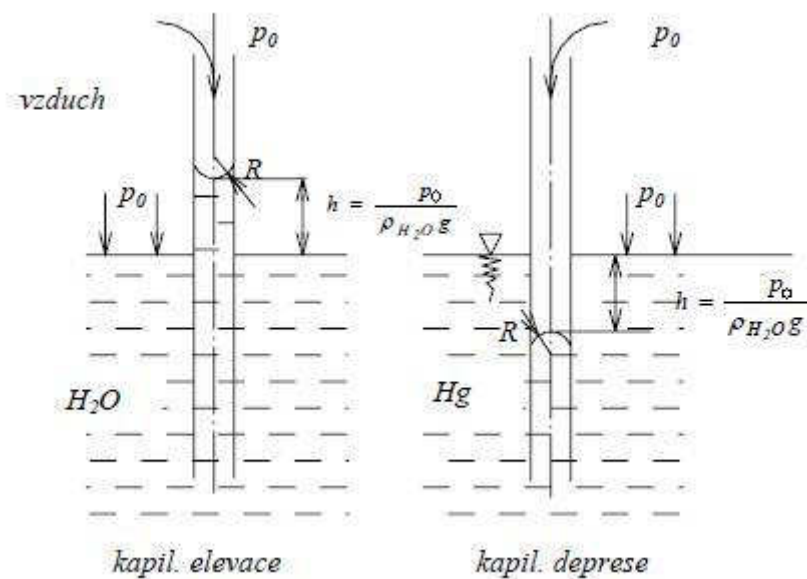
Povrchové napětí kapalin je projevem mezimolekulárních sil molekul na fázovém rozhraní kapaliny. Na povrchové napětí má vliv teplota kapaliny, tlak nad fázovým rozhraním a chemické složení měřeného vzorku. Vzniká na rozhraní dvou různých látek, nebo ve styčné ploše dvou fází téže látky. Mezi molekulami působí přitažlivé síly (kohezní), při velkém stlačení odpudivé (adhezní).

Povrchové napětí podchlazené vody patří mezi jednu z mála dostatečně probádaných fyzikálních vlastností vody. Je to významný parametr používaný v matematických modelech kondenzace.

V minulém století bylo provedeno několik nezávislých měření povrchového napětí podchlazené vody i jiných látek, např. butanu. Porovnáním výsledků měření je zřejmé, že data se úplně neshodují. Cílem experimentu je naměřit nová přesná data. Výsledky experimentu budou porovnány s ostatními výsledky z minulosti.

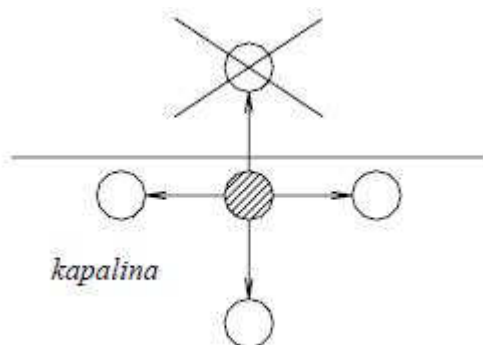
Povrchové napětí způsobuje v tenkých trubiciích kapilární elevaci, tj. vyšší sloupec kapaliny u kapalin s vydutým meniskem, nebo kapilární deprese, tj. nižší sloupec kapaliny u kapalin s vypuklým meniskem.¹

¹ LINHART, Jiří. Mechanika tekutin I. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009.



Obrázek 1²

R – poloměr menisku, p_0 - tlak atmosférický, h – výška menisku od hladiny

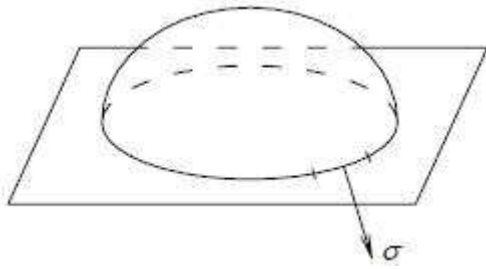


Zvažujme případ, kdy se molekula uvnitř látky, kohezní síly od okolních molekul působí ze všech stran, vzájemně ruší a molekula je v rovnováze. Jestliže molekula kapalné fáze je při rozhraní s jinou látkou, např. s plynem majícím řídké pole molekul, přitažlivá, síla z této strany chybí a molekula je vtahována do vnitřku kapaliny. Výsledný efekt vtahování povrchových molekul se jeví tak, jako by na povrchu kapaliny byla blána, za

niž je taháno povrchovým napětím σ tak, aby kapalina vytvořila kouli. Ta se vyznačuje nejmenším poměrem povrchu ku objemu. Kulový tvar mají kapky vody tvořící mlhu, kapičky rozlité rtuti aj.³

² LINHART, Jiří. Mechanika tekutin I. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009, s. 9

³ LINHART, Jiří. Mechanika tekutin I. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009, s. 9



Představme si, že povrchovou blánu protneme rovinou a spodní část pod rovinou odstraníme. Aby se napjatost zbylého vrchlíku nezměnila, musíme vliv odstraněné části nahradit napětím σ , které působí tečně k bláně a kolmo k průsečnici.

Povrchové napětí σ je tabulková hodnota daná dvojicí látek, které jsou v kontaktu a jsou naměřeny při teplotě 20°C.

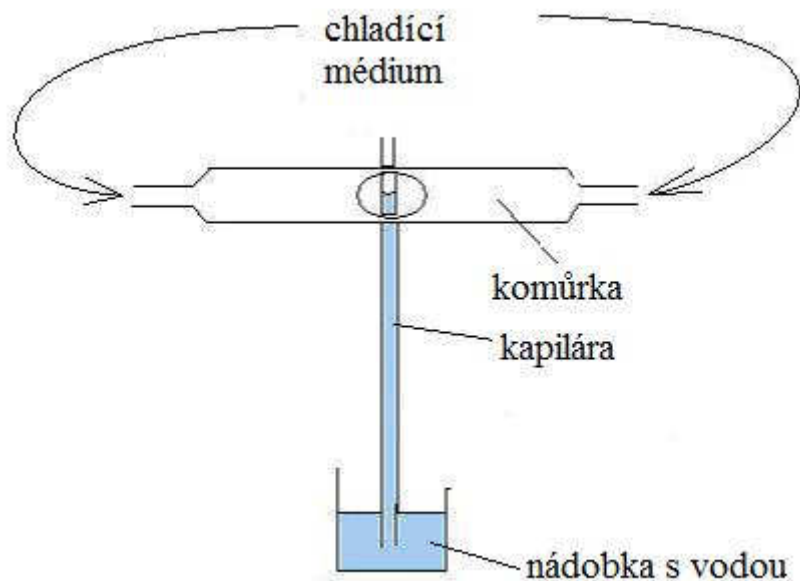
rtuť – vzduch:	$\sigma = 0,461 \text{ N/m}$
voda – vzduch:	$\sigma = 0,073 \text{ N/m}^4$

3. Metody měření povrchového napětí

Existuje řada metod pro stanovení povrchového napětí kapaliny, např. pokles hmotnosti. Jsou však nevyhovující pro stanovení povrchového napětí podchlazené vody. Důvodem je objem kapaliny potřebný pro většinu metod, který je však neznámý. Je tak velký, že vysoký stupeň podchlazení vody je nepravděpodobný.

Je známo několik metod měření povrchového napětí podchlazené vody. Obecně se dá říci, že většina metod pracuje na podobném principu - elevačním. Elevační metoda spočívá v použití nádoby s kapalinou, tenké kapiláry a komůrky s otvorem (viz Obrázek 2). Do nádoby se ponoří kapilára, do které se kapalina nasaje vlivem svého povrchového napětí. Je důležité, aby meniskus vystoupal do komůrky a ustálil se v určité výšce. Komůrkou prostupuje chladicí médium, které ochlazuje pouze určitou část kapiláry s kapalinou. Postupným ochlazováním kapaliny se zvyšuje její povrchové napětí a meniskus stoupá. Měří se rozdíl výšek, které se v závěru přepočítají na povrchové napětí.

⁴ LINHART, Jiří. Mechanika tekutin I. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009, s. 9



Obrázek 2: Schéma elevační metody

V této práci jsou zmíněny tyto metody a experimenty:

- a) Autoři K. Tanaka a Y. Higashi⁵. Věnovali se měření povrchového napětí propanu a isobutanu (R290, R600) upravenou elevační metodou.
- b) Autor P. T. Hacker⁶. Naměřil experimentální hodnoty povrchového napětí podchlazené destilované vody v rozmezí teplot od 27°C do -22,2°C. Byla použita kapilára ve vodorovné poloze. Byl zde aplikován tlak do kapaliny pro vyrovnání polohy menisku. Metoda je založena na stejném fyzikálním jevu, který způsobuje vzestup v kapiláře malého průměru.
- c) Autoři M. A. Floriano a C. A. Angell⁷. Věnovali se měření povrchového napětí podchlazené kapaliny elevační metodou v rozmezí teplot od 60°C do -27,2°C. Kapalina vzroste v kapiláře o výšku h , která je přímo úměrná povrchovému napětí a nepřímo úměrná hustotě a poloměru kapiláry. Změřené výšky a přepočtené povrchová napětí byly zaznamenány v tabulce.
- d) Autor K. Richtr⁸. Věnoval se sestavení zařízení pro měření povrchového napětí vody elevační metodou v tenké kapiláře, kde rozdíl výšek byl nahrazen rozdílem tlaků. s poklesem teploty meniskus stoupl a přidavným tlakem plynu dovnitř kapiláry byl

⁵ TANAKA, Katsuyuki , HIGASHI, Yukihiro. Measurements of the surface tension for R290, R290/R600a mixture, International Journal of Refrigeration 30 (2007) 1368-1369

⁶ Paul T. HACKER, Paul T. Experimental Values of the Surface Tension of Supercooled Water. Cleveland, Ohio: Lewis Flight Propulsion Laboratory, 1951
<http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=19810068863&q=Ns%3DLoadedDate%7C1%26N%3D4294896258>

⁷ FLORIANO, M. A., ANGELL, C. A. The Journal of Physical Chemistry. West Lafayette, Indiana 47907: University Purdue, 1989, roč.94, č. 10

⁸ RICHTR, Karel. Experimentální zařízení pro měření povrchového napětí kapalin. Projekt GA ČR 101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň, 2007/101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň 2007

meniskus stlačen do výchozí polohy. Rozdíl tlaků byl použit na přepočítání povrchového napětí.

- e) Probíhá v současnosti na ZČU. Tato práce vychází z práce Ing. Karla Richtra. Primárně se odlišuje v tom, že z jeho zařízení je použit pouze stojan, kapilára a komůrka. Z rozdílů tlaků, které Richtr používal, se přešlo zpět na rozdíly výšek, protože práce s tlakem byla obtížná a dusík, který jen prošel okruhem a utíkal do atmosféry, byl finančně nákladný.

3.1 Měření povrchového napětí R290, R600 a směsi R290/R600a (propan, isobutan)

Mezinárodní deník o chlazení vydal článek o projektu Katsuyukiho Tanaky a Yukihiro Higashiho z Vědeckého oddělení mechanických systémů a konstrukčních návrhů na univerzitě Iwaki Meisei ve Fukushima v Japonsku v roce 2007. Byla měřena povrchová napětí propanu, isobutanu a jejich binární směsi speciální upravenou elevační metodou v úzké kapiláře a bylo naměřeno 22 hodnot pro R290 a 21 hodnot pro R600a v rozsahu teplot od 273K do 354K. U směsi R290/R600a bylo zjištěno, že lze jednoduše mísit obě činné složky pravidlem molární korelace⁹.

V tomto článku je ještě zmínka o čtyřech osobách, které naměřily tyto hodnoty v širším rozsahu teplot. Hodnoty povrchového napětí měřili Baidakov a Sulla pro R290 v rozsahu teplot od 273K do 365K a pro R600a v rozsahu teplot od 273K do 404K. Bohužel jejich práce není zapsána v žádné rubrice. Hodnoty povrchového napětí také naměřili Lin a Duan, kteří měřili v rozsahu teplot od 253K do 334K pro obě dvě látky. Jejich práce je zaznamenána zřídka.¹⁰

Přístroj, kterým bylo měřeno povrchové napětí, byl speciálně upraven pro měření halogenových chladiv obsahující dvě skleněné kapiláry umístěné vertikálně v tlakových nádobách. Dno menisku hlídá posuvný mikroskop. Naměřené hodnoty výšky menisku poté byly opraveny přepočtem Rayleighovy rovnice:

$$h = h_m + \frac{r}{3} - 0,1288 \frac{r^2}{h_m} + 0,1312 \frac{r^3}{h_m^2}$$

kde r je poloměr kapiláry, h je naměřená výška a h_m je počáteční výška.

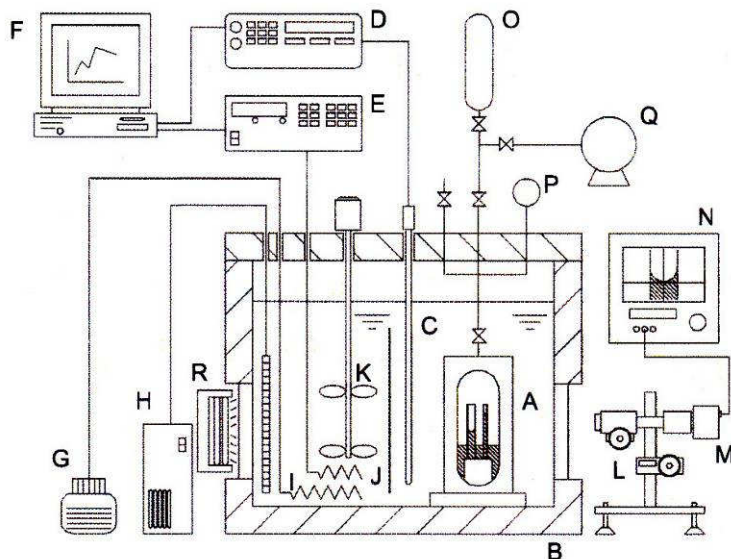
Opravené hodnoty pak posloužily pro určení povrchového napětí následujícím vztahem:

$$\sigma = \frac{g(\rho' - \rho'')(h_1 - h_2)}{2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \cos \Theta}$$

⁹ Korelace - vzájemný vztah mezi dvěma procesy nebo veličinami. Pokud se jedna z nich mění, mění se korelativně i druhá a naopak. Dva procesy jsou na sobě závislé.

¹⁰ TANAKA, Katsuyuki, HIGASHI, Yukihiro. Measurements of the surface tension for R290, R290/R600a mixture, International Journal of Refrigeration 30 (2007) 1368-1369

kde úhel θ předpokládáme nulový, pokud stěny byly umyty ultrazvukovým čističem, g je gravitační zrychlení, $(\rho'-\rho'')$ je rozdíl hustot, (h_1-h_2) je rozdíl výšek a r_1, r_2 jsou poloměry kapilár.¹¹



Obrázek 3: Schéma přístroje¹²

A-tlaková nádoba; B-termostat; C-platinový odporový teploměr; D-přesný tepelný most; E-napájení; F-PC; G-transformátor; H-chladič; I-hlavní ohřívač; J-topení; K-míchadlo; L-posuvný mikroskop; M-CCD kamera; N-monitor; O-Láhev se vzorkem; P-manometr; Q-vakuová pumpa; R-osvětlení

Výška menisku byla naměřena pod ustupujícím kontaktním úhlem. Do tlakové nádoby byl instalován termostat, který zde udržuje teplotu na konstantní úrovni s odchylkou ± 5 mK. Jako teplotonosná látka v termostatu je použita voda. Tlak směsi je měřen digitálním tlakoměrem, který určuje rovnovážné složení páry a kapaliny ve vzorku. První složka směsi byla naplněna do tlakové nádoby. Druhá složka směsi se přidávala do tlakové nádoby pro změnu složení vzorku.

Naměřené výsledky byly zaznamenány do dvou tabulek. Představují závislost teploty a rozdílu výšek na povrchovém napětí. Z rozdílu výšek budeme vycházet i v našem experimentu.¹³

¹¹ TANAKA, Katsuyuki , HIGASHI, Yukihiro. Measurements of the surface tension for R290, R290/R600a mixture, International Journal of Refrigeration 30 (2007) 1369

¹² TANAKA, Katsuyuki , HIGASHI, Yukihiro. Measurements of the surface tension for R290, R290/R600a mixture, International Journal of Refrigeration 30 (2007) 1369

¹³ TANAKA, Katsuyuki , HIGASHI, Yukihiro. Measurements of the surface tension for R290, R290/R600a mixture, International Journal of Refrigeration 30 (2007) 1370-1371

Hodnoty od Baidakova, Sulla, Lina a Duana nejsou sice řádně zaznamenány, ale lze je pomocí korelace zjistit za použití van der Waalsova výrazu:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^n,$$

kde T_c je kritická teplota, σ je povrchové napětí při teplotě T , σ_0 je počáteční povrchové napětí a exponent n je tabulková hodnota. Díky tomuto vztahu lze zjistit jakoukoliv hodnotu, která nás zajímá.¹⁴

3.2 Experimentální hodnoty povrchového napětí podchlazené vody (dle Hackera)

Národní úřad pro letectví a kosmonautiku (NASA) zveřejnila protokol s výsledky povrchového napětí podchlazené kapaliny, jehož autorem je Paul T. Hacker z Lewis Flight Propulsion Laboratory Cleveland, Ohio z roku 1951 v odvětví meteorologie a klimatologie v oblastech vzdušné vlhkosti, kapilárního průtoku, podchlazení a námraz. Bylo naměřeno celkem 702 hodnot povrchového napětí 3x destilované vody v rozmezí teplot od +27°C do -22,2°C, z toho 404 hodnot je při teplotách pod 0°C. Bylo použito sedm různých vzorků 3x destilované vody. Díky výsledku tohoto výzkumu lépe chápeme fyzikální vlastnosti podchlazené vody, protože tyto vlastnosti byly zkoušeny při teplotách hluboko pod 0°C. Zkoumání povrchového napětí podchlazené vody je velmi obtížné, ovšem je to možné.¹⁵

Metoda pro toto šetření byla navržena Fergusonem a později upravena Fergusonem a Kennedym. Byla použita kapilára, která byla uložena ve vodorovné poloze, kde na jednom konci byl aplikován tlak do kapaliny, který jí nutí do takové polohy, aby byl meniskus na druhém (otevřeném) konci zakřivený. Tlak potřebný k síle zakřivení menisku je přímo úměrný povrchovému napětí. Metoda je založena na stejném fyzikálním jevu, který způsobuje vzestup v kapiláře malého průměru. Zakřivená plocha je dána tlakovým rozdílem Δp , který je dána vztahem:

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

kde σ je povrchové napětí a r_1, r_2 jsou hlavní poloměry v bodě na povrchu kapaliny. Pro kapaliny v kapilárách s kruhovým průřezem, kde dva hlavní poloměry jsou shodné, může být rovnice zjednodušena na:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}$$

Na obrázku 2 je takový tlak P na levé straně, aby byl meniskus v rovině. Když je meniskus rovina, poloměr r je nekonečný a Δp je nulový. Pokud je tlak v bodě 1 atmosférický, tlak

¹⁴ TANAKA, Katsuyuki, HIGASHI, Yukihiko. Measurements of the surface tension for R290, R290/R600a mixture, International Journal of Refrigeration 30 (2007) 1371

¹⁵ Paul T. HACKER, Paul T. Experimental Values of the Surface Tension of Supercooled Water. Cleveland, Ohio: Lewis Flight Propulsion Laboratory, 1951

<http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=19810068863&q=Ns%3DLoadedDate%7C1%26N%3D4294896258>

v bodě 2 je také atmosférický. Vzhledem k tomu, že meniskus B je zakřivený, musí být tlakový rozdíl na rozhraní plyn-kapalina v rovnováze. Tato změna tlaku je dána vztahem

$$p = P + \Delta p$$

nebo

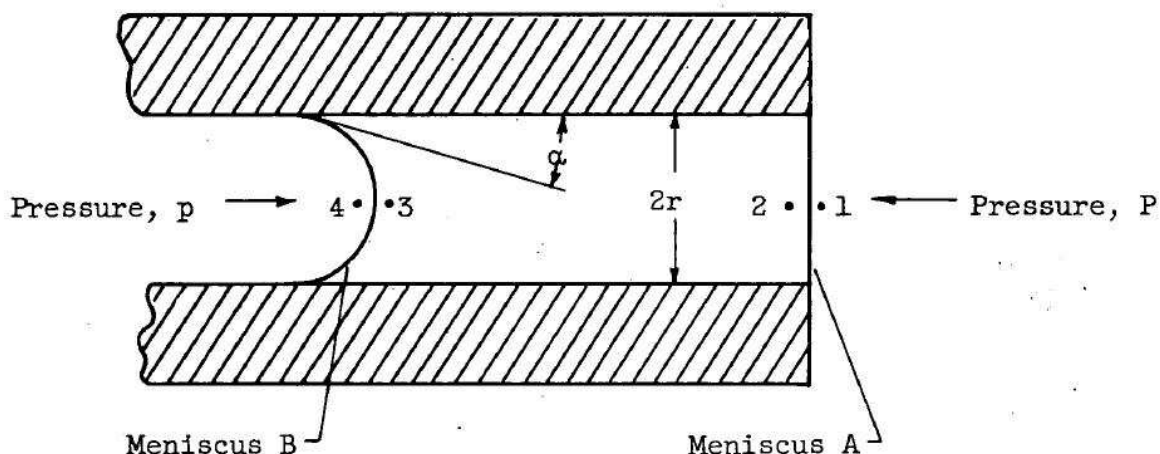
$$\Delta p = p - P$$

Zkombinujeme-li tyto dvě rovnice, dostaneme

$$\Delta p = p - P = \frac{2\sigma}{r}$$

a povrchové napětí je

$$\sigma = \frac{r}{2} \Delta p$$



Obrázek 4: Příklad kapiláry¹⁶

3.2.1 Přístroj a postup

Přístroj používaný v tomto šetření se skládá z těchto složek: kapiláry pro držení vody, studená lázeň pro chlazení kapiláry a vody, kovové měchy a zařízení obsahující kompresor pro změnu tlaku na vzorku, mikromanometr k měření použitého tlaku, zdroj světla a mikroskop, kterým se sleduje rovný meniskus na konci kapiláry, termočlánek a potenciometr pro měření a záznam teploty vody.

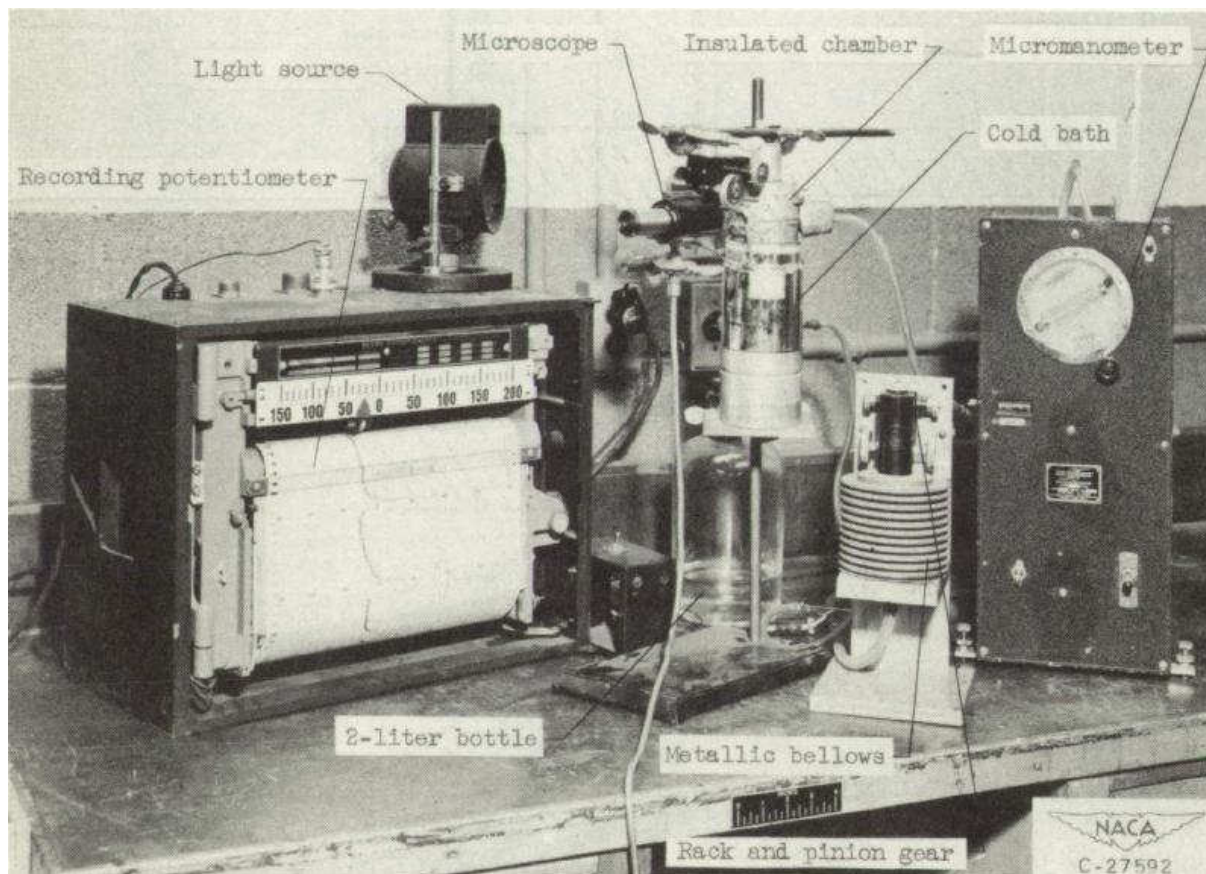
¹⁶ Paul T. HACKER, Paul T. Experimental Values of the Surface Tension of Supercooled Water.

Cleveland, Ohio: Lewis Flight Propulsion Laboratory, 1951

<http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=19810068863&qS=Ns%3DLoadedDate%7C1%26N%3D4294896258>

Kapilára se vzorkem vody byla chlazená ve vodorovné poloze v malé tepelně izolované mosazné komoře, která byla chlazená pomocí měděných tyčí, které byly připojeny ke korkové izolované komoře do nádoby se suchým ledem a organickým rozpouštědlem. Komora byla vybavena dvěma plastovými okny, která byla osvětlena a pozorována mikroskopem. Kondenzaci se zabránilo proudem teplého vzduchu proudícího na okno. Tlakový rozdíl Δp byl měřen ve vodě mikromanometrem.

Metoda pro šetření povrchového napětí podchlazené vody slouží k určení roviny menisku, která byla stanovena zkoumáním obrazu vytvořeného menisku pod mikroskopem. Světelný zdroj byl umístěn přibližně 30 cm od konce kapiláry. Když meniskus je konkávní, zdroj světla se jeví jako jasná skvrna v centru, ale tlak je větší v místě rozšíření, až pokryje celý povrch kapaliny, kdy je z menisku rovina. Pokud se tlak dále zvyšuje, meniskus začíná být konvexní a skvrna se zmenšuje s rostoucím tlakem. Teplota vody je stejná jako teplota kapiláry. Pokud voda zamrzla, pomalu byla zvyšována teplota v komoře, dokud led nezačal tát. Teplota se snižovala přidáním malého množství suchého ledu a rozpouštědla ve studené lázni. Počet měření byl cca jedno za minutu. Přístroj je vyobrazen na Obrázku 5 a schéma zapojení na Obrázku 6. Na Obrázku 7 je vzhled osvětleného menisku pro různé aplikované tlaky.¹⁷



Obrázek 5: Měřicí přístroj¹⁸

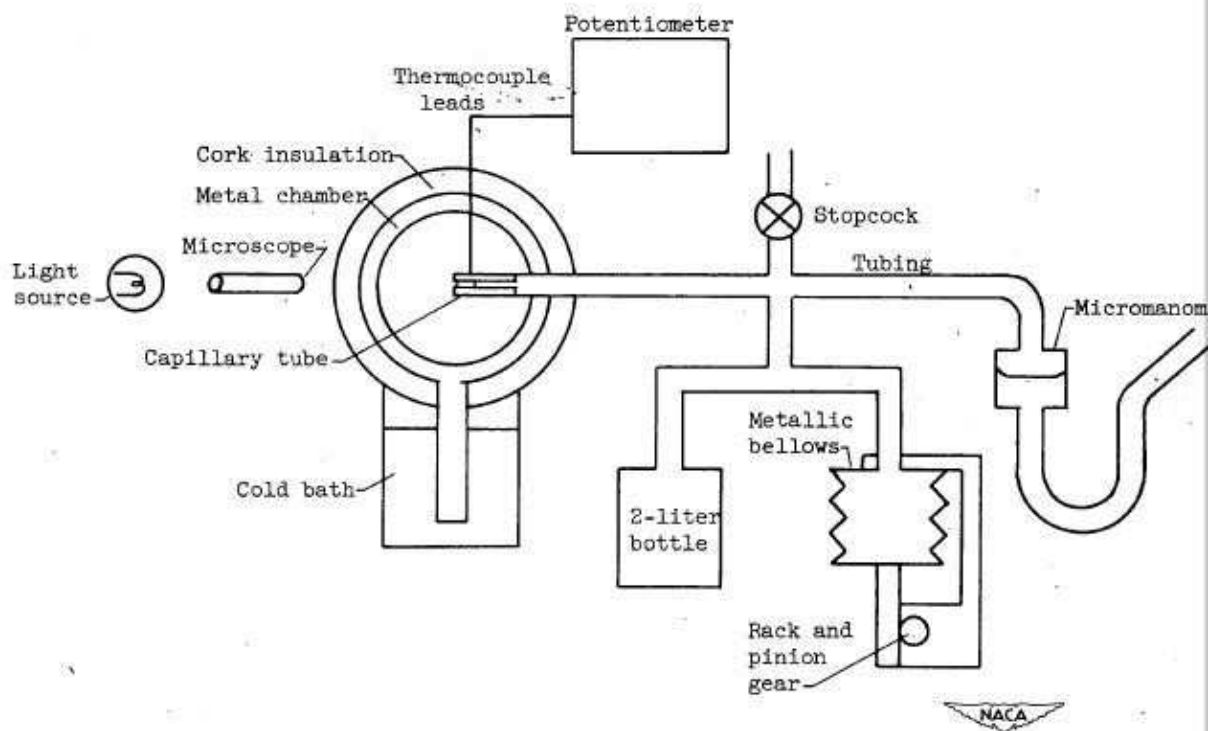
¹⁷ Paul T. HACKER, Paul T. Experimental Values of the Surface Tension of Supercooled Water. Cleveland, Ohio: Lewis Flight Propulsion Laboratory, 1951

<http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=19810068863&q=Ns%3DLoadedDate%7C1%26N%3D4294896258>

¹⁸ Paul T. HACKER, Paul T. Experimental Values of the Surface Tension of Supercooled Water.

Cleveland, Ohio: Lewis Flight Propulsion Laboratory, 1951

<http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=19810068863&q=Ns%3DLoadedDate%7C1%26N%3D4294896258>

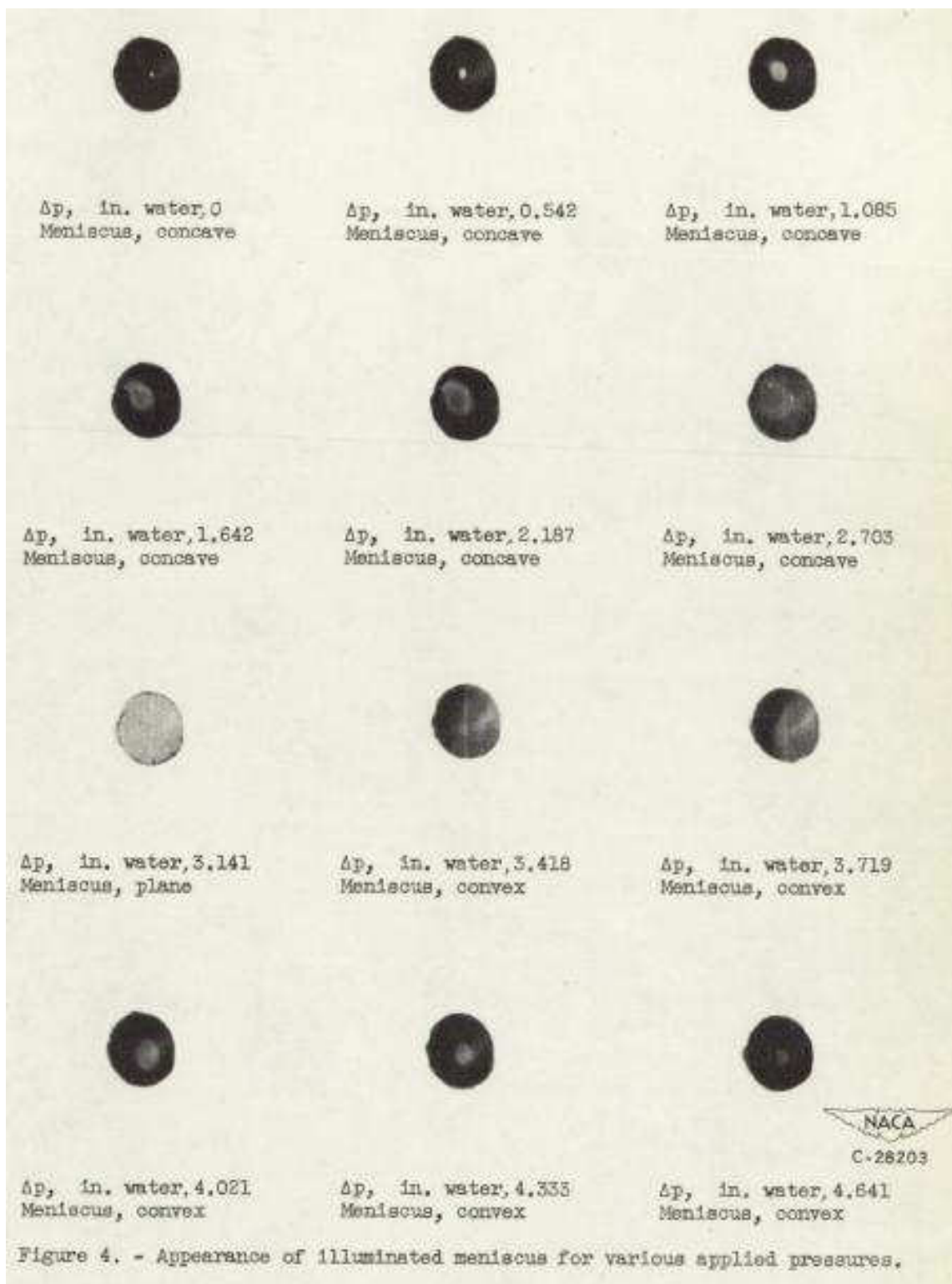


(a) General view of apparatus.

Figure 3. - Schematic diagrams of apparatus.

Obrázek 6: Schéma zapojení přístroje¹⁹

¹⁹ Paul T. HACKER, Paul T. Experimental Values of the Surface Tension of Supercooled Water. Cleveland, Ohio: Lewis Flight Propulsion Laboratory, 1951
<http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=19810068863&q=Ns%3DLoadedDate%7C1%26N%3D4294896258>



Obrázek 7: Vzhled osvětleného menisku pro různé aplikované tlaky²⁰

²⁰ Paul T. HACKER, Paul T. Experimental Values of the Surface Tension of Supercooled Water.
Cleveland, Ohio: Lewis Flight Propulsion Laboratory, 1951

<http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=19810068863&q=Ns%3DLoadedDate%7C1%26N%3D4294896258>

3.2.2 Výsledky měření

Jednotlivé hodnoty povrchového napětí na teplotě byly seskupeny a průměrná hodnota byla vypočtena. Výsledky těchto výpočtů jsou v tabulce. Teploty spojené s každou průměrnou hodnotou je střed intervalu teplot, ve kterých byly jednotlivé hodnoty sečteny.

Tabulka 1

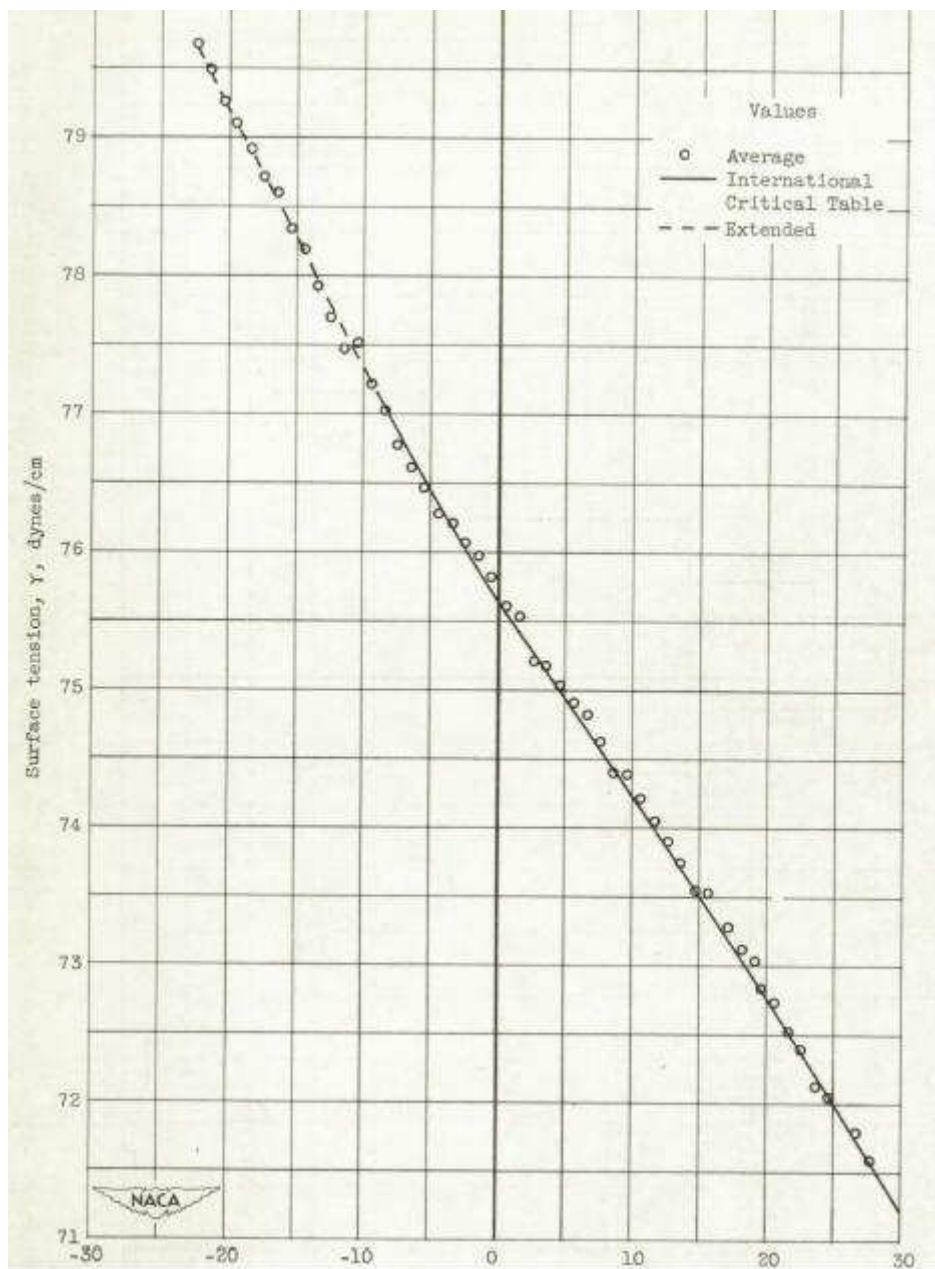
Hodnoty povrchového napětí vody v rozmezí teplot 27,5 °C do - 22,5 °C²¹

Teplota t [°C]	Hodnoty [mN/m]
27,5	71,58
26,5	71,78
25,5	-
24,5	72,03
23,5	72,12
22,5	72,40
21,5	72,52
20,5	72,73
19,5	72,83
18,5	73,03
17,5	73,12
16,5	73,27
15,5	73,52
14,5	73,54
13,5	73,74
12,5	73,89
11,5	74,05
10,5	74,21
9,5	74,38
8,5	74,39
7,5	74,63
6,5	74,81
5,5	74,89
4,5	75,03
3,5	75,17
2,5	75,20

Teplota t [°C]	Hodnoty [mN/m]
1,5	75,53
0,5	75,60
-0,5	75,81
-1,5	75,97
-2,5	76,05
-3,5	76,20
-4,5	76,27
-5,5	76,47
-6,5	76,60
-7,5	76,77
-8,5	77,02
-9,5	77,21
-10,5	77,51
-11,5	77,46
-12,5	77,69
-13,5	77,92
-14,5	78,18
-15,5	78,34
-16,5	78,58
-17,5	78,70
-18,5	78,90
-19,5	79,09
-20,5	79,25
-21,5	79,48
-22,5	79,67
-	-

Podrobnější průzkum ukazuje, že tempo růstu povrchového napětí s klesající teplotou v intervalu od 27°C do 0°C roste pomaleji, rychleji roste při nižších teplotách.

²¹ HACKER, Paul T. Experimental Values of the Surface Tension of Supercooled Water. Cleveland, Ohio: Lewis Flight Propulsion Laboratory, 1951
<http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=19810068863&qs=Ns%3DLoadedDate%7C1%26N%3D4294896258>



Obrázek 8: Graf závislosti povrchového napětí na teplotě²²

Obrázek s grafem, Obrázek 8, znázorňuje závislost povrchového napětí na teplotě, ze kterého je zřejmé tempo růstu povrchového napětí pomalejší s klesající teplotou až na bod 0°C. Pod tímto bodem se růst povrchového napětí zrychluje.

²² HACKER, Paul T. Experimental Values of the Surface Tension of Supercooled Water. Cleveland, Ohio: Lewis Flight Propulsion Laboratory, 1951
<http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=19810068863&q=Ns%3DLoadedDate%7C1%26N%3D4294896258>

3.3 Povrchové napětí podchlazené vody do $-27,2^{\circ}\text{C}$ (dle Floriana, Angella)

Autoři tohoto výzkumu jsou M. A. Floriano a C. A. Angell z Oddělení chemie z University Purdue. Pro měření povrchového napětí podchlazené vody byla použita elevační metoda s úzkou kapilárou a bylo měřeno do teploty $-27,2^{\circ}\text{C}$. Data sice nejsou přesná a poměrně kolísají, je však možné z nich vyčíst nárůst povrchového napětí se snižující se teplotou. Hodnoty jsou znázorněny v Tabulce č. 2 a v následném grafu.²³

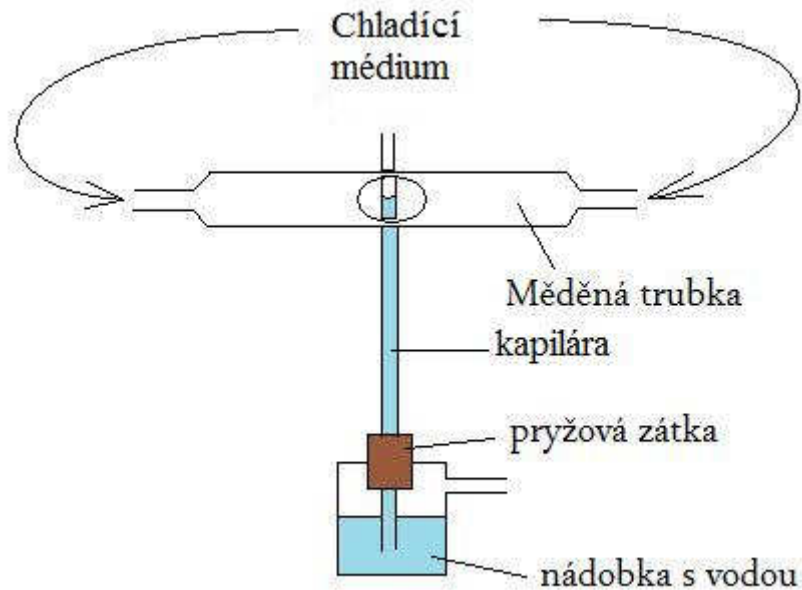
Kapilára je z borosilikátového skla s nominálním vnitřním průměrem 100, 200 a 300 μm . Menší průměry byly získány tím, že se ohřála část kapiláry stejné tloušťky doměčka, a pak se tahem na obou koncích získal požadovaný průměr. Kalibrace proběhla na teplotě 25°C a napětí $72 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$. Před použitím byly kapiláry čištěny horkou kyselinou dusičnou, následně kyselinou sírovou a poté byly propláchnuty destilovanou vodou. v destilované vodě se držely mezi jednotlivými měřeními. Voda používaná při pokusech se natřikrát destilovala a filtrovala $0,45 \mu\text{m}$ pórovým filtrem nebo $0,23 \mu\text{m}$ pórovým filtrem. Komůrka byla sestavena z měděných trubek s otvorem pro pozorování kapiláry. Na obou koncích měděných trubek se přivádí vychlazený suchý dusík. Teplota se sleduje pomocí termočlánků, které jsou přilepené uvnitř měděné trubky v okolí kapiláry. Další termočlánek byl umístěný uvnitř kapiláry a odvodil se rozdíl vnitřní a vnější teploty. Ukázalo se, že vnitřní teplota byla o 2°C nižší než venku při teplotě -30°C .²⁴

Do nádobky s vodou se ponoří kapilára, do které se voda nasaje vlivem svého povrchového napětí. Je důležité, aby meniskus vystoupal do komůrky a ustálil se ve výšce. Komůrkou prostupuje chladicí médium, které ochlazuje pouze určitou část kapiláry s vodou. Postupným ochlazováním vody se zvyšuje její povrchové napětí a meniskus stoupá. Měří se rozdíl výšek, které se v závěru přepočítají na povrchové napětí. Voda vzroste v kapiláře o výšku h , jež je přímo úměrná povrchovému napětí vody a nepřímo úměrná hustotě a poloměru kapiláry podle rovnice:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{r \cdot g \cdot \rho}$$

²³ FLORIANO, M. A., ANGELL, C. A. The Journal of Physical Chemistry. West Lafayette, Indiana 47907: University Purdue, 1989, roč.94, č. 10

²⁴ FLORIANO, M. A., ANGELL, C. A. The Journal of Physical Chemistry. West Lafayette, Indiana 47907: University Purdue, 1989, roč.94, č. 10



Obrázek 9: Schéma elevační metody²⁵

Poslední zmíněná metoda se stala inspirací pro náš pokus přiblížit se co nejvíce tomuto experimentu. V závěru pak budou výsledky porovnány právě s výsledky tohoto experimentu.

Tabulka č. 2

Hodnoty povrchového napětí vody v rozmezí od -27,2 °C do 24,9 °C²⁶

T [°C]	ρ [gcm ⁻³]	kapi-lára	h [cm]	σ [mN.m ⁻¹]
-27,2	0,9968	1	42,425	79,86
-25,4	68	1	41,867	78,81
-23,6	65	3	15,886	77,57
-22,1	67	5	15,784	79,00
-20,1	68	1	41,548	78,21
-20,0	67	6	10,796	78,82
-18,8	65	7	10,737	78,64
-18,5	69	5	15,645	78,32
-17,5	69	6	10,718	78,27
-15,8	67	7	10,671	78,17
-15,3	68	7	10,656	78,07
-14,1	71	4	15,508	77,59
-13,5	71	5	15,540	77,81
-12,5	71	6	40,614	77,52
-11,1	69	3	15,736	76,87
-10,6	68	1	41,315	77,77

T [°C]	ρ [g cm ⁻³]	kapi-lára	h [cm]	σ [mN.m ⁻¹]
-10,6	68	2	42,872	76,51
-10,5	69	7	10,549	77,29
-9,8	69	7	10,560	77,37
-9,1	72	4	15,386	76,99
-8,0	73	6	10,574	77,24
-7,6	70	7	10,492	76,88
-5,7	70	3	15,635	76,39
-5,3	75	6	10,543	77,04
-5,0	68	1	40,884	76,96
-5,0	68	2	42,592	76,01
-3,6	73	4	15,150	75,82
-3,4	70	7	10,433	76,45
-3,2	71	7	10,387	76,12
-1,8	73	5	15,150	75,87
-1,0	70	3	15,453	75,50
0,3	71	5	10,352	75,86

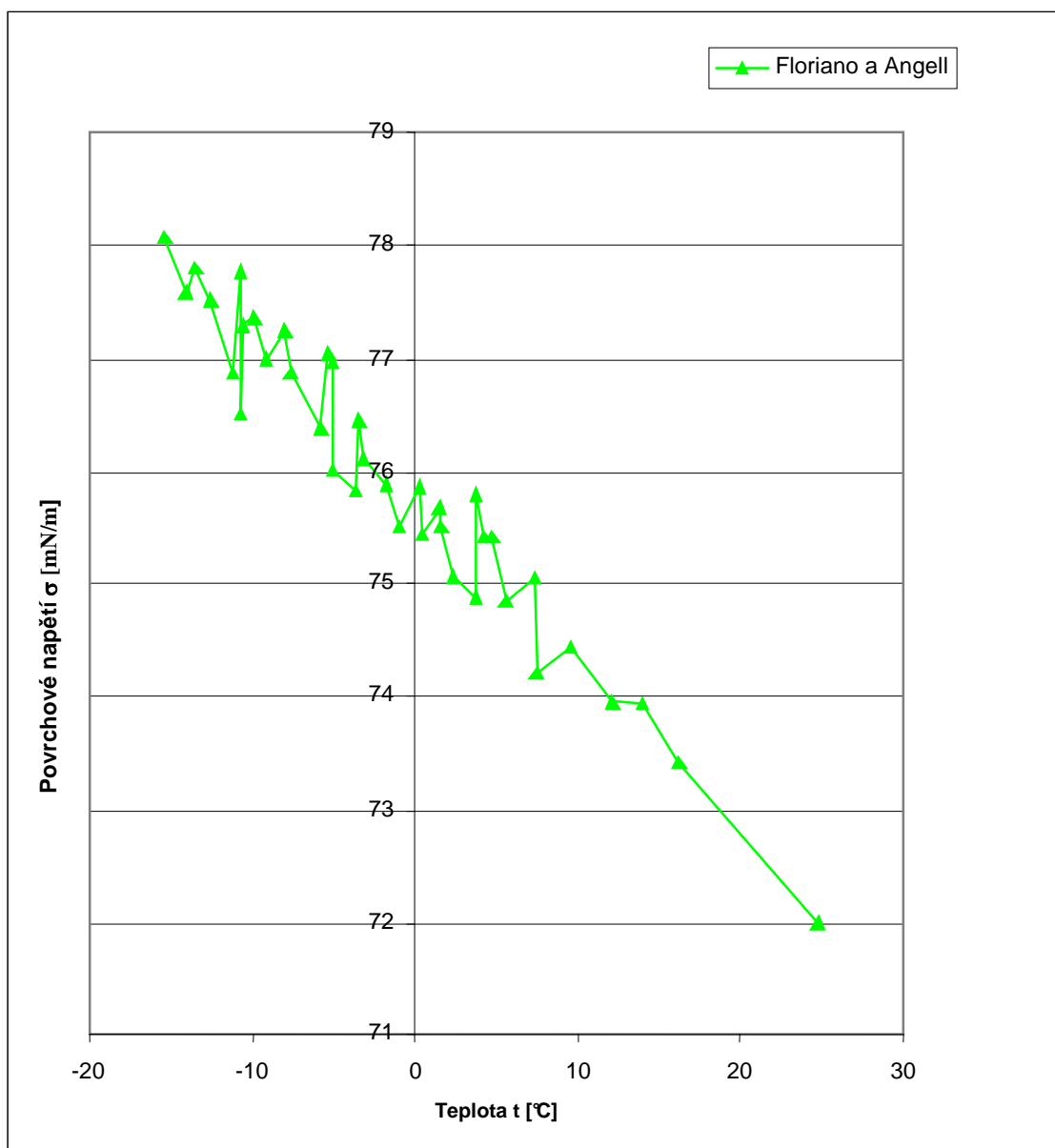
²⁵ FLORIANO, M. A., ANGELL, C. A. The Journal of Physical Chemistry. West Lafayette, Indiana 47907: University Purdue, 1989, roč.94, č. 10

²⁶ FLORIANO, M. A., ANGELL, C. A. The Journal of Physical Chemistry. West Lafayette, Indiana 47907: University Purdue, 1989, roč.94, č. 10

0,5	73	4	15,064	75,44
1,5	74	6	10,358	75,67
1,6	70	3	15,453	75,50
2,3	73	4	15,001	75,07
3,7	68	1	39,785	74,89
3,7	68	2	42,475	75,80
4,3	74	6	10,324	75,43
4,8	71	7	10,291	75,42
5,6	73	5	14,946	74,85

7,3	73	6	10,273	75,05
7,4	73	4	14,827	74,20
9,6	71	7	10,159	74,45
12,1	73	5	14,768	73,96
14,0	71	7	10,090	73,94
16,2	70	7	10,018	73,41
24,8	71	5	14,380	72,00
24,9	71	6	9,858	72,00
24,9	71	4	14,390	72,00

Graf 1: Hodnoty povrchového napětí vody v rozmezí od -27,2 °C do 24,9 °C



Data sice nejsou přesná a poměrně kolísají, je však možné z nich vyčíst nárůst povrchového napětí se snižující se teplotou.

3.4 Měření povrchového napětí kapalin – experimentální zařízení (dle Richtra)

Autorem tohoto zařízení je K. Richtr, který působil zde, na Katedře energetických strojů a zařízení Západočeské univerzity v Plzni, v roce 2007.

Richtrovo měření je založeno na podobném principu jako měření předchozí, tj. měření Floriana a Angella. Jedinou změnou oproti předchozímu měření je to, že rozdíl výšek (Angell) byl nahrazen rozdílem tlaků (Richtr).

S poklesem teploty meniskus stoupl a přidavným tlakem plynu dovnitř kapiláry byl meniskus stlačen do výchozí polohy. Cílem měření je změřit tlak nad povrchem menisku, při němž bude meniskus zpět ve výchozí poloze. Změna hodnoty povrchového napětí vůči hodnotě při teplotě 20°C se dopočítá z rozdílu atmosférického tlaku a tlaku nad povrchem menisku z rovnice:

$$\Delta p = \frac{2 \cdot \Delta \cdot \sigma}{r}$$

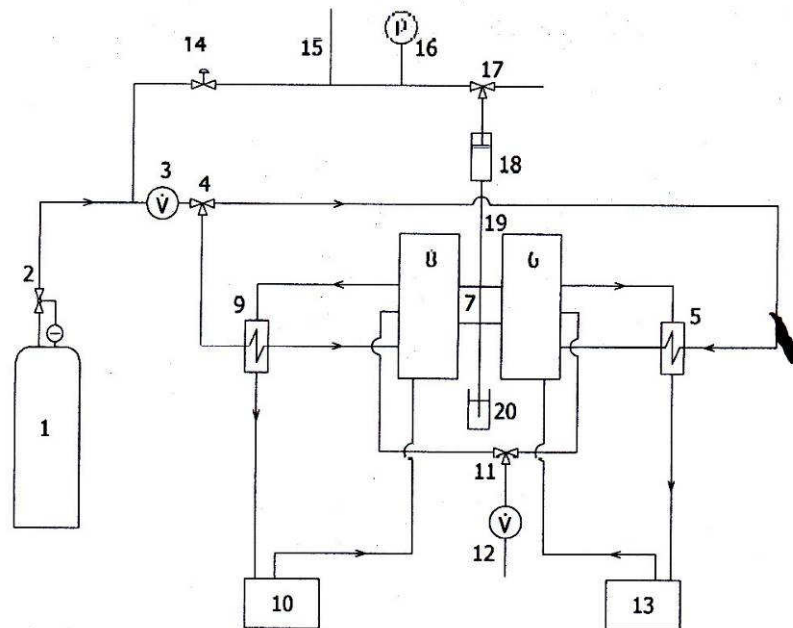
kde Δp je rozdíl tlaků, r je poloměr kapiláry a $\Delta \sigma$ je změna povrchového napětí.

Skleněná kapilára o vnitřním průměru 364 μm byla před měřením na 24 hodin ponořena do chromsírové směsi. Poté byla propláchnuta a opláchnuta čistou vodou určenou k měření a byla umístěna do skleněné komůrky. Kapilára se ponořila do nádoby s vodou, která byla opatřena šroubovacím víčkem, aby se na hladinu vody nedostaly nečistoty. Čištění kapiláry probíhalo odsáním plynu ze skleněného válce, v němž je kapilára vlepena. K odsátí plynu sloužila plastová injekční stříkačka.

Po ustálení teplot v komůrce začal protékat komůrkou studený plyn. Poloha menisku se sledovala pohledem přes okulár katetometru. Podle polohy menisku se ručně reguloval tlak nad meniskem. Při ustálení teplot v komůrce byla snaha dostat meniskus jemným otevíráním a zavíráním ventilu do polohy, v níž byl v předešlém ustáleném stavu. Dosažením původní polohy bylo měření dokončeno a uloženo na disk počítače. Další měření bylo provedeno za jiných teplot.²⁷

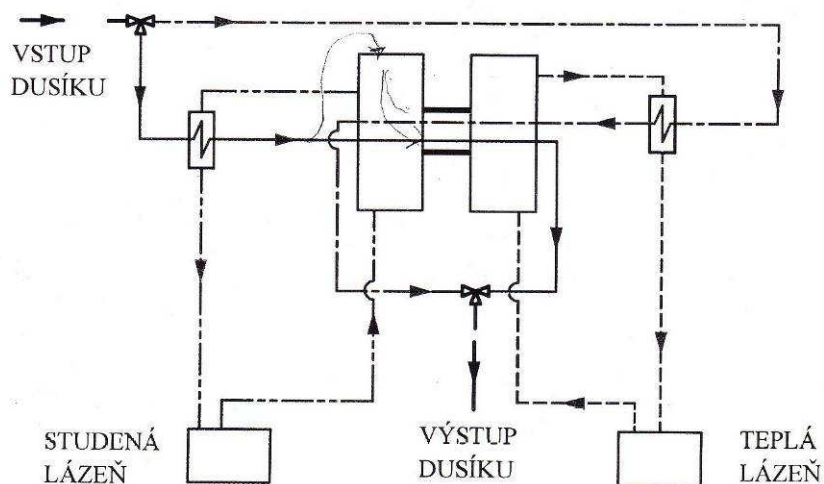
Uvedeným postupem měření se zabýval K. Richtr na Katedře energetických strojů ZČU a jeho zařízení jsme převzali. Komponenty tohoto zařízení - komůrka, měřicí ústředna, katetometr, stojan a kapilára - zůstaly zachovány. Původně čtyři čidla ústředny byla zredukována na dvě. Richtrovo zařízení fungovalo na bázi rozdílu tlaku, bylo však přebudováno na rozdíl výšek. Z toho vyplývá, že tlakové láhve a příslušenství byly odstraněny. Ačkoliv jsme částečně převzali zařízení od Richtra, princip měření jsme převzali od Angella a Floriana.

²⁷ RICHTR, Karel. Experimentální zařízení pro měření povrchového napětí kapalin. Projekt GA ČR 101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň, 2007
101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň 2007



Obrázek 10: Schéma zapojení²⁸

1-láhev s dusíkem; 2-redukční ventil; 3, 12-průtokoměr; 4, 11, 17-třícestný ventil;
 5, 9-výměník tepla; 6, 8-měděný kvádr; 7-skleněná komůrka; 10 teplá lázeň; 13-studená
 lázeň; 14-ventil; 15-hydrodynamický odpor; 16-diferenciální tlakoměr; 18-píst; 19-kapilára;
 20-nádobka s vodním vzorkem



Obrázek 11: Schéma zapojení²⁹

²⁸ RICHTR, Karel. Experimentální zařízení pro měření povrchového napětí kapalin. Projekt GA ČR 101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň, 2007

101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň 2007

²⁹ RICHTR, Karel. Experimentální zařízení pro měření povrchového napětí kapalin. Projekt GA ČR 101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň, 2007

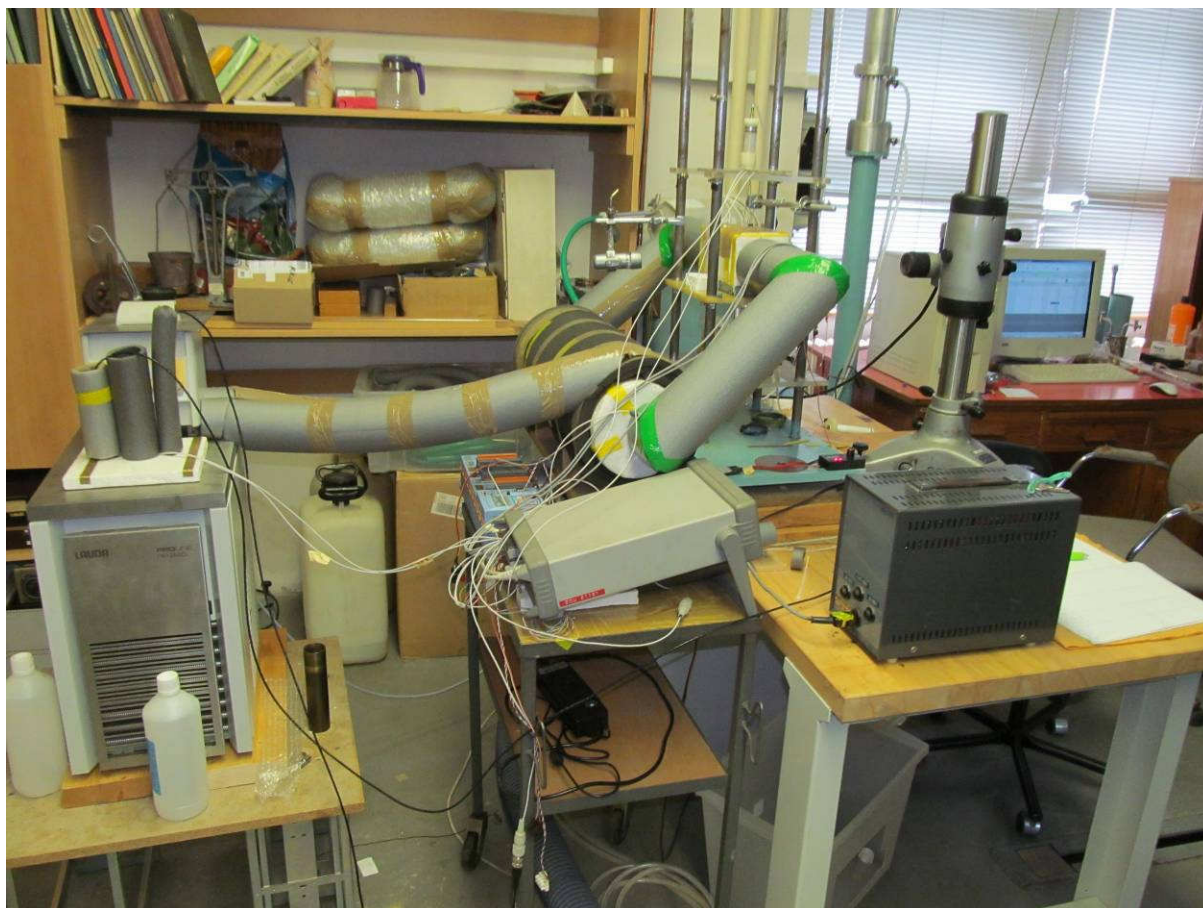
3.5 Měření povrchového napětí podchlazené vody (dle Mareše)

Následující měření odkazuje na projekt prof. Mareše, který vychází z měření Richtra. Prof. Mareš upravil zařízení Richtra a metodu měření.

3.5.1 Prvky měřicího zařízení



Obrázek 12: Zařízení z roku 2012 pro měření povrchového napětí vody



Obrázek 13: Zařízení z roku 2013 pro měření povrchového napětí vody

Měřicí ústředna

Ke sbírání dat byla při měření použita měřicí ústředna HEWLETT PACKARD 34970A (viz Obrázek 14, 15, 16). Ústředna, z níž jsou vyvedena dvě čidla, která jsou zavedena do komůrky s kapilárou uprostřed, byla připojena k PC sériovým kabelem. Na PC byl nainstalován software ke sbírání dat – naměřených teplot. Výhodou použití ústředny zapojené k PC bylo přímé ukládání dat na disk. Při ukládání dat se zároveň na monitoru počítače zobrazovaly hodnoty všech měřených veličin a zobrazovaly se v grafech.³⁰



Obrázek 14: Měřicí ústředna

³⁰ RICHTR, Karel. Experimentální zařízení pro měření povrchového napětí kapalin. Projekt GA ČR 101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň, 2007



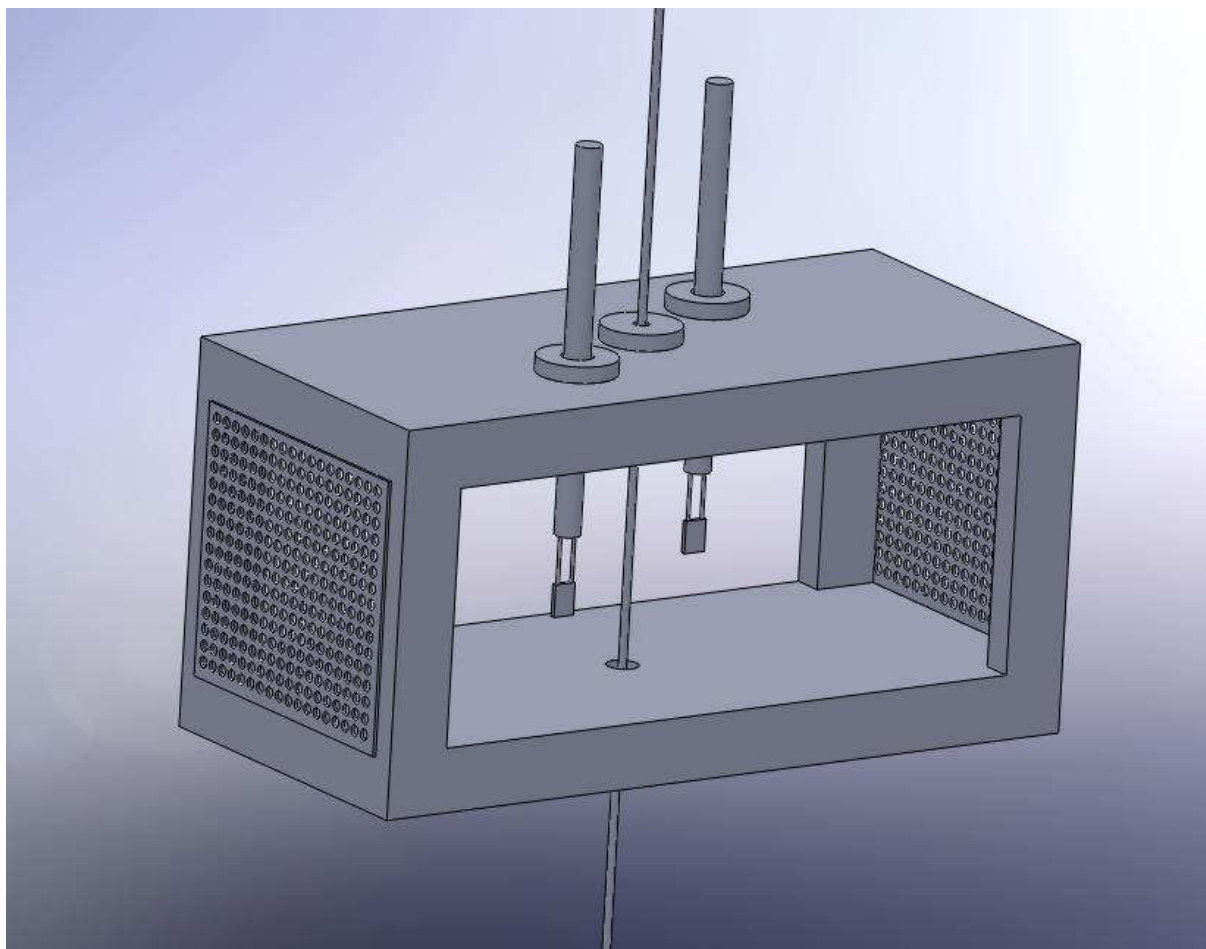
Obrázek 15: Měřicí ústředna – pohled zředu



Obrázek 16: Měřicí ústředna – pohled zezadu

Komůrka

Komůrka je nejdůležitějším prvkem zařízení, je totiž z přední a zadní části průhledná, abychom mohli pozorovat kapiláru zabudovanou uvnitř. Na Obrázku 17 je zobrazena komůrka, kterou prochází skleněná kapilára a dvě čidla teploty. Bude zde docházet k výměně tepla mezi kapilárou a vzduchem.



Obrázek 17: Model komůrky

Skleněné kapiláry

Vnitřní průměr kapiláry má toleranci $\pm 1 \mu\text{m}$ na 1 kilometr délky kapiláry. Při měření jsme používali kapiláry s vnitřním průměrem 363, 320 a 290 μm . Kapilára byla před vlastním měřením vyčištěna ponořením do chromsírové směsi. Tato směs se používá na vyčištění laboratorního skla.³¹

Katetometr KM 6

Při měření jsme užívali Katetometr KM 6 s čočkou pro vzdálenost od 340 – 380 mm. Maximální chyba, kterou lze dosáhnout při odečítání je $\pm 0,010 \text{ mm}$.³²

³¹ RICHTR, Karel. Experimentální zařízení pro měření povrchového napětí kapalin. Projekt GA ČR 101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň, 2007
101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň 2007

³² RICHTR, Karel. Experimentální zařízení pro měření povrchového napětí kapalin. Projekt GA ČR 101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň, 2007
101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň 2007



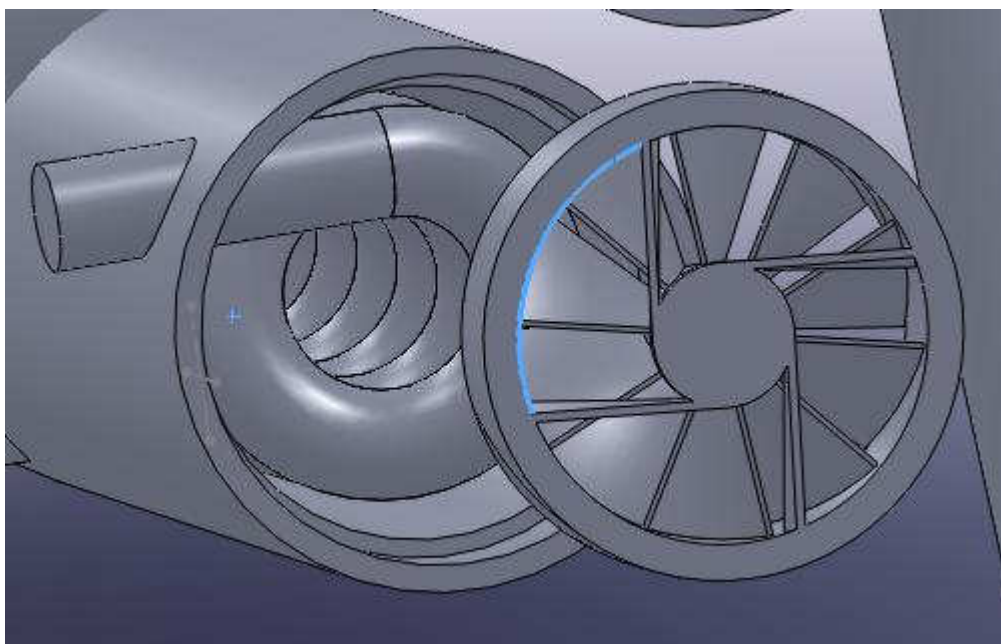
Obrázek 18: Katetometr



Obrázek 19: Katetometr

Ostatní části

Výměník - souproudý, v němž dochází k výměně tepla mezi vychlazeným lihem a vzduchem z okolí, je zaizolovaný. Dále pak **termostat**, ve kterém se vychladí lih a udržuje jej v konstantní teplotě. Ke zbývajícím částem bychom mohli zařadit: **stojan**, **ventilátor** s volitelnou regulací otáček, zaizolované **potrubí**, plastovou injekční **stříkačku** k odsání plynu.



Obrázek 20: Výměník s ventilátorem

Termostat

V přední části měřicího zařízení je připojen termostat, který pracuje v rozsahu teplot od -45°C až do 200°C s regulací teploty plus mínus $0,01^{\circ}\text{C}$.

Nevýhodou našeho termostatu byla skutečnost, že jeho umístění bylo příliš vzdálené od místa, které je vyhrazeno ke sledování měření. Kvůli této nevýhodě bylo obtížné zvládnout více úkonů najednou – sledování teplot, sledování menisku, měření výšky, regulace otáček ventilátoru, a navíc ještě regulovat termostat. Z tohoto důvodu jsem ho v loňském roce zkusmo nastavili konstantně na -40°C . Takto nastavený termostat sice vychlazoval celý okruh, avšak příliš rychle. V letošním roce jsme jej přenastavovali hned několikrát. Lépe se daly odměřit hodnoty výšek menisku, neboť se ustálila teplota v komůrce, a tudíž i hladina menisku. Zpočátku přenastavování probíhalo po 10°C , později po 5°C , až nakonec jsme vysledovali po odměření dvou hodnot optimální přenastavování o $1 - 2^{\circ}\text{C}$.

Z výše uvedených důvodů prof. Mareš zkontaktoval studenty Katedry kybernetiky ZČU s požadavkem úpravy termostatu na plnou automatizaci regulace.

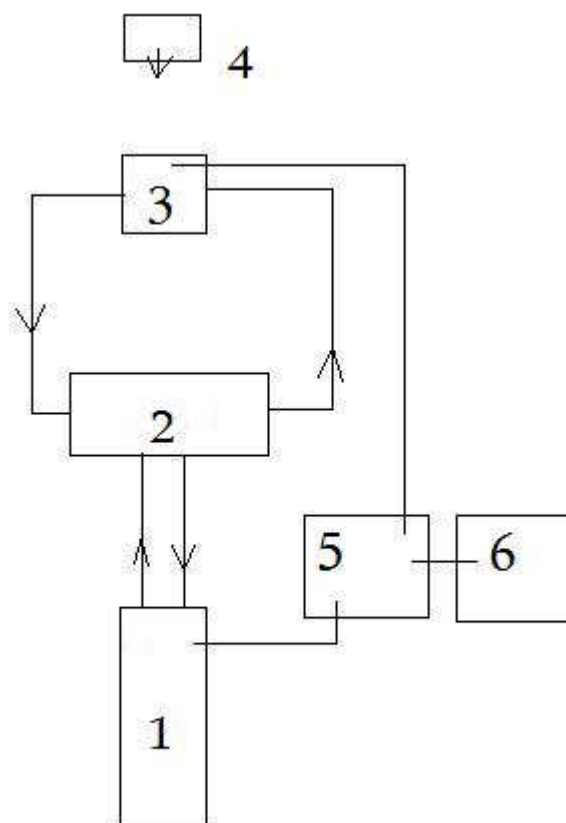


Obrázek 21: Termostat – pohled zepředu



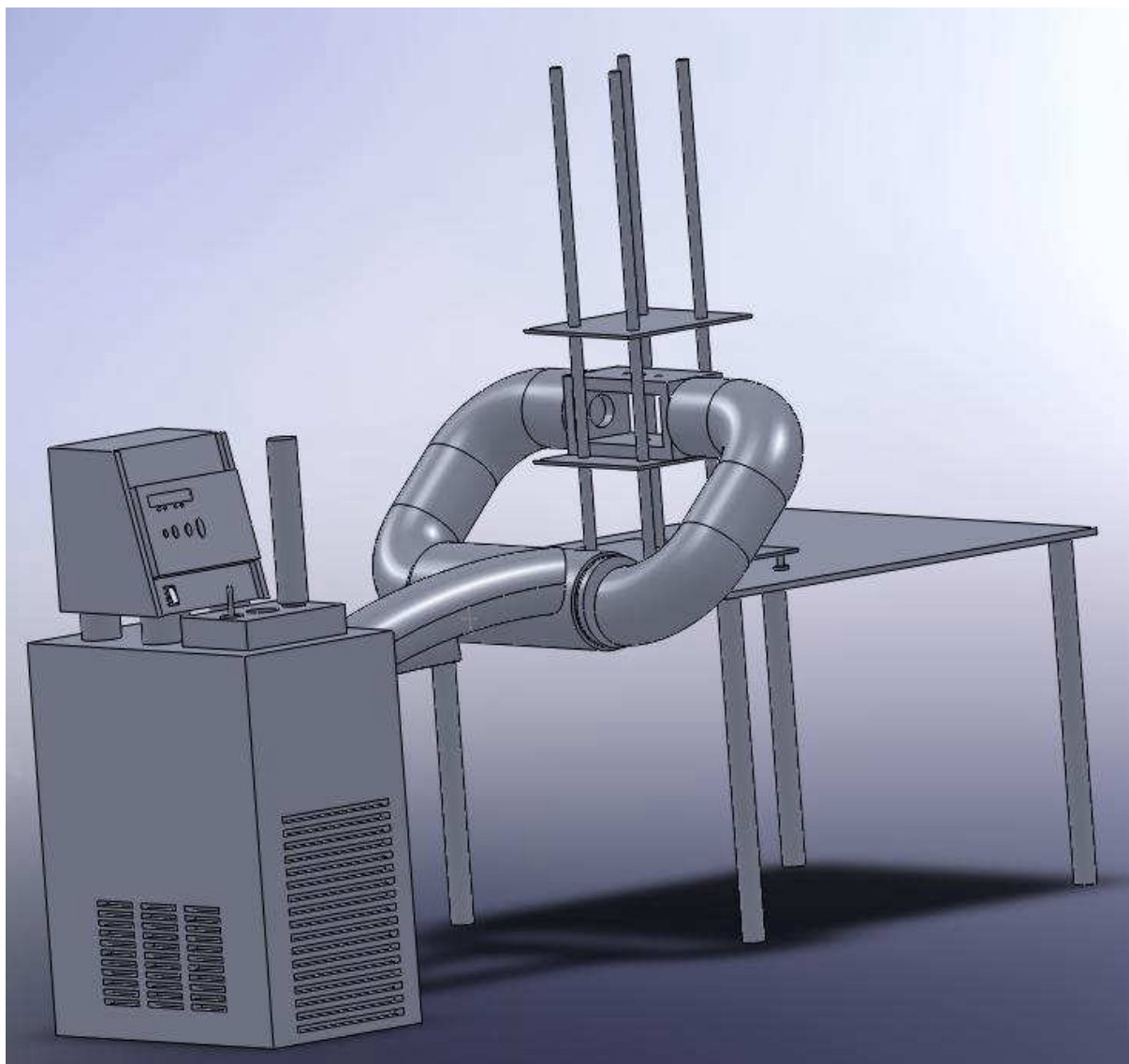
Obrázek 22: Termostat – hlavní panel

Na Obrázku 23 uvádíme schéma, které znázorňuje spojení a koloběh média. Pokud zařízení funguje správně, můžeme se přesunout do oblasti měření.



Obrázek 23: Schéma zařízení

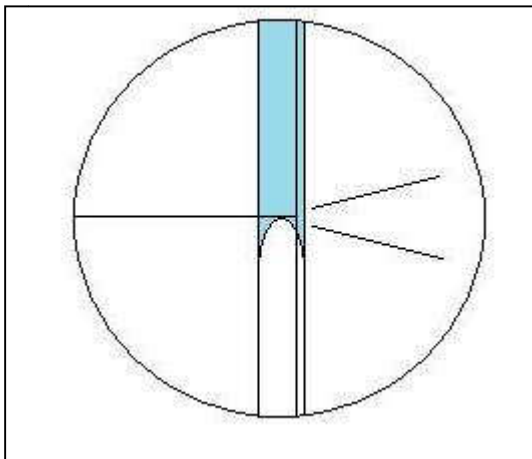
1-termostat, 2-výměník, 3-komůrka, 4-katetometr, 5-ústředna, 6-PC



Obrázek 24: Zařízení pro měření povrchového napětí podchlazené vody, vymodelované v programu SolidWorks

3.5.2 Postup měření

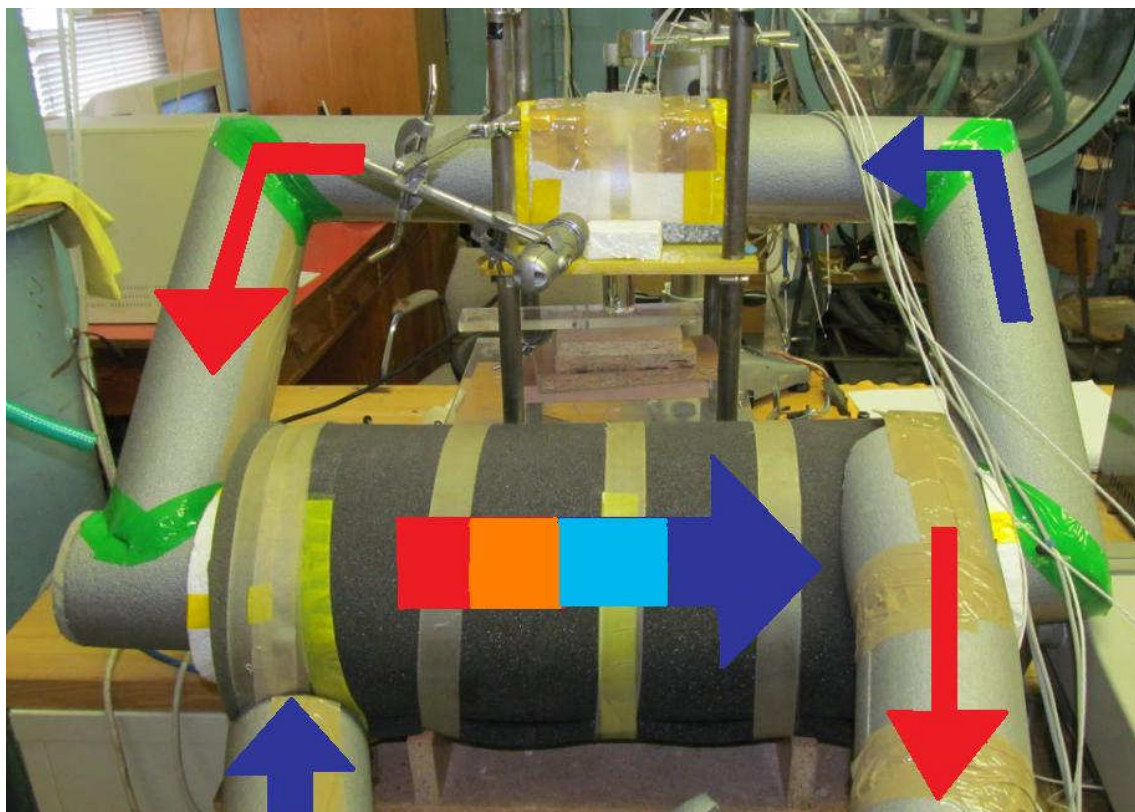
Na začátku každého měření jsme nejprve vyčistili kapiláru od usazených nečistot nasátím chromsírové směsi pro odstranění nečistot a následně jsme nasávali novou čistou vodu až po okraj, aby vytekly všechny kapičky kyseliny. K nasávání sloužila plastová injekční stříkačka. Ze zkušeností, kdy jsme kapiláru nečistili kyselinou a ponechali starou vodu v kapiláře, se začal meniskus během měření pohybovat skokově a drhnul. Byl to následek usazování mikroskopických bublinek na stěně kapiláry a nečistot, které během času do nádoby spadaly a ovlivňovaly vlastnosti vody (např. prach).



Obrázek 25: Pohled v katetometru

Dále je důležité seřízení katetometru tak, aby ostře ukazoval kapiláru s meniskem a dal se dobře zaměřit některý zřetelný bod, na který budeme mířit po celou dobu měření. V našem případě jsme si vybrali jeho dno. Musíme si dobře uvědomit, jak se nám obraz promítá. Ve skutečnosti je meniskus vydutý a stoupá vzhůru při poklesu teploty. V katetometru se však obraz jeví převráceně, čili meniskus vidíme jako vypuklý, a při poklesu teploty klesá.

Poté jsme zapnuli termostat a nastavili jej na požadovanou teplotu. Uvnitř termostatu se nachází líh, který vychlazuje výměník a je utěsněný v nádrži a zaizolovaný, brání tak případnému vypařování. Líh je dopraven pomocí čerpadla stálou rychlostí do výměníku zaizolovaným potrubím, aby nedocházelo k ohřátí lihu z okolí. Líh ve výměníku vychladí vzduch a ten je pomocí ventilátoru dopraven až do komůrky s kapilárou. Ventilátor je umístěn v přední části výměníku a má regulátor rychlosti. Sami můžeme nastavit jeho otáčky, a zvolit tedy rychlost ochlazování. Nakonec se ukázalo, že je vhodnější ponechat středně rychlé konstantní otáčky, nemění se totiž tolik rychlost a teplota ochlazování. Na níže uvedeném obrázku uvádíme pro názornost cirkulaci vzduchu.



Obrázek 26: Znázornění cirkulace

Nyní je zařízení připraveno a můžeme přejít k samotnému měření. Nejprve změříme aktuální teplotu v okolí a v komůrce s kapilárou pomocí čidel ústředny. Dvě čidla jsou umístěna diagonálně ve stejné vzdálenosti od kapiláry přibližně ve stejné výšce, jako je meniskus. Pustíme ventilátor na nízké otáčky a pozvolna vychlazujeme komůrku. Teplota v ní pomalu klesá a meniskus se pozvolna pohybuje směrem vzhůru. Zaměříme katetometrem na dno menisku, zapíšeme nové hodnoty teploty a opět změříme novou výšku v katetometru, do které nám meniskus vystoupal.³³

Takto pokračujeme tak dlouho, dokud nám teplota v komůrce stále klesá a dokud nám kapalina v kapiláře nezmrzne. Pokud kapalina zmrzne, pak ukončíme měření. Nejnižší dosavadní naměřená teplota v komůrce, kdy voda byla ještě v kapalném skupenství, byla -23°C . Z naměřených hodnot se pak vytvoří graf výšky stoupání v závislosti na teplotě. Pro přesnější měření je možné pomocným tlakem lehce nasát plyny plastovou injekční stříkačkou tak, aby voda vystoupala a smočila stěny kapiláry pro lepší pohyb a pak plynule klesla zpět do výšky při dané teplotě. Poslední částí měření je přepočítání výšky na konkrétní povrchové napětí vody.

Kapilára má poměrně malou tloušťku stěn, protože vzorek kapaliny v ní má malou tepelnou kapacitu, což vede ke snížení času na její ochlazení a ohřátí. Vzduch proudí otvory komůrky do výměníku, v němž se jeho teplota snižuje vychlazeným lihem z termostatu. Ze strany na výměníku je připevněn ventilátor, který dopravuje vychlazený vzduch zpět na původní místo do komůrky. Později bylo na vstup a výstup komůrky přidáno síto kvůli usměrnění vířivého proudu z důvodu rovnoměrnějšího ochlazování a pro vyrovnání teplot. Příloha č. 1 znázorňuje výkres komůrky.

³³RICHTER, Karel. Experimentální zařízení pro měření povrchového napětí kapalin. Projekt GA ČR 101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň 2007

3.5.3 Problémy v měření

„Pokud se něco povede hned napoprvé, je to podezřelé.“

Prof. Ing. Radim Mareš, CSc.

V průběhu měření jsme se setkávali s celou řadou problémů, které sice nevedly k novým objevům, ale jejich odstraňováním jsme se mohli posunout dál, a zdokonalovat tak i techniku měření, případně upozornit na obtíže při budoucích měřeních.

Níže uvedené problémy, v průběhu měření v loňském roce, demonstrují, jak měření může být zkresleno okolními faktory.

Problém 1

Obraťme pozornost ke chvíli, kdy jsme čistili kapiláru od nečistot nasáváním chromsírové kyseliny a opětovnému nasátí vody. Během opakovaného nasávání se v kapiláře tvořily bubliny velké, pravděpodobně způsobené roztrháním vody na několik úseků vlivem nuceného podtlaku, tak i malé, ty se usazovaly na stěnu kapiláry a na spodní část menisku (viz Obrázek 27). Bylo vytvořeno zdání, že toto bylo způsobeno určitým nasycením plynů ve vodě. Naše laboratoř však nedisponuje zařízením, které by vodu zbavilo plynů.

Konzultace s panem docentem Richtrem, vedoucím Katedry chemie Pedagogické fakulty Západočeské univerzity, nám otevřela několik možností řešení, vzhledem k jejich specializaci na tuto problematiku.

První možností bylo zbavení vody plynů ultrazvukem. Laboratoř Katedry chemie jím sice vybavena byla, ale budova, v níž sídlí Katedra, je od naší budovy vzdálena 5 km, což se ukázalo být podstatným negativním faktorem. Než by byla voda převezena k nám do laboratoře, byla by opět plná plynů. Druhou možností bylo použití destilované vody, která se jednak nejvíce blíží tabulkovým hodnotám, jednak obsahuje minimum plynů. Dále nám bylo doporučeno vodu před nasátím do kapiláry vychladit v chladničce, aby byla tvorba plynů potlačena ještě více. Toto řešení se ukázalo být vhodné, problém byl vyřešen. Pokud by však i toto řešení selhalo, byla připravena ještě poslední varianta, a sice použití destilované vody odplyněné ultrazvukem v laboratoři Katedry chemie. Takto upravená voda by byla na místě nasáta do kapiláry, která by byla následně zatavena a otevřena až po přemístění do naší laboratoře Katedry energetické stroje a zařízení.

Vzhledem k tomu, že byla zajištěna prof. Marešem speciálně upravená voda z Ústavu termomechaniky AV ČR v Praze, byl tento problém odstraněn.

Problém 2

Ve chvíli, kdy jsme prováděli jedno z prvních měření, a to opakovaně, voda nám pokaždé zamrzala při -12°C . Zamrzání při takové teplotě není neobvyklé, může k němu dojít i v úzkých kapilárách. Ve chvíli, kdy voda zmrzla, byli jsme nuceni měření přerušit a čekat, až voda povolí a celá rozmrzne. Ovšem jakmile se počala rozpadat pevná struktura, začaly se objevovat bublinky, které stoupaly k menisku a zachytily se na něm (viz Obrázek 28 a 29). Museli jsme nuceným tlakem snižovat a zvyšovat hladinu vody v kapiláře. Pohybováním s meniskem nahoru a dolů pak bublinka praskla, což umožnilo pokračovat v měření. Podle slov docenta Richtra toto souvisí se stoupající rozpustností plynů při snižující se teplotě vody. Jako účelné řešení se ukazuje varianta přivést destilovanou vodu v ampuli k varu, vyvařit plyny a zatavit (zahřáním vypudit z vody rozpuštěné plyny). Následně ochladit na teplotu, při

které plníme kapiláru, a otevřít těsně před plněním kapilár. Tím by se problém vyřešil a voda by vydržela v kapalném stavu i v nižších teplotách.

V průběhu procesu se vyskytl další problém, který je níže podrobněji rozepsán. Při řešení nového problému došlo k vyřešení problému 2, tudíž navržený postup řešení již nebyl potřebný.

Níže se nachází tabulka naměřených hodnot, během nichž se vyskytovaly problémy se zamrznutím a tvořením bublinek. Teplotu v komůrce měříme čidly označené 102 a 103. V této chvíli jsme zkusili naměřit hodnoty výšky při určité teplotě. Předpokládáme, že graf bude mít téměř lineární průběh. Z níže uvedeného grafu je patrné, že jsme lineárního průběhu nedocílili. Výsledky jsou tedy nepoužitelné a měření je nutno opakovat po odstranění chyb v zařízení. Tabulku s naměřenými hodnotami uvádíme pro názornost, přestože zaznamenané hodnoty jsou evidentně nesprávné.

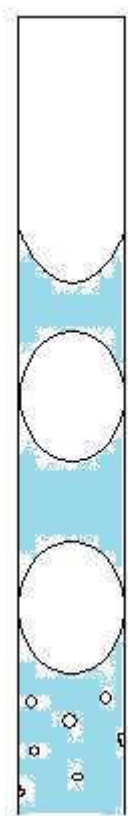
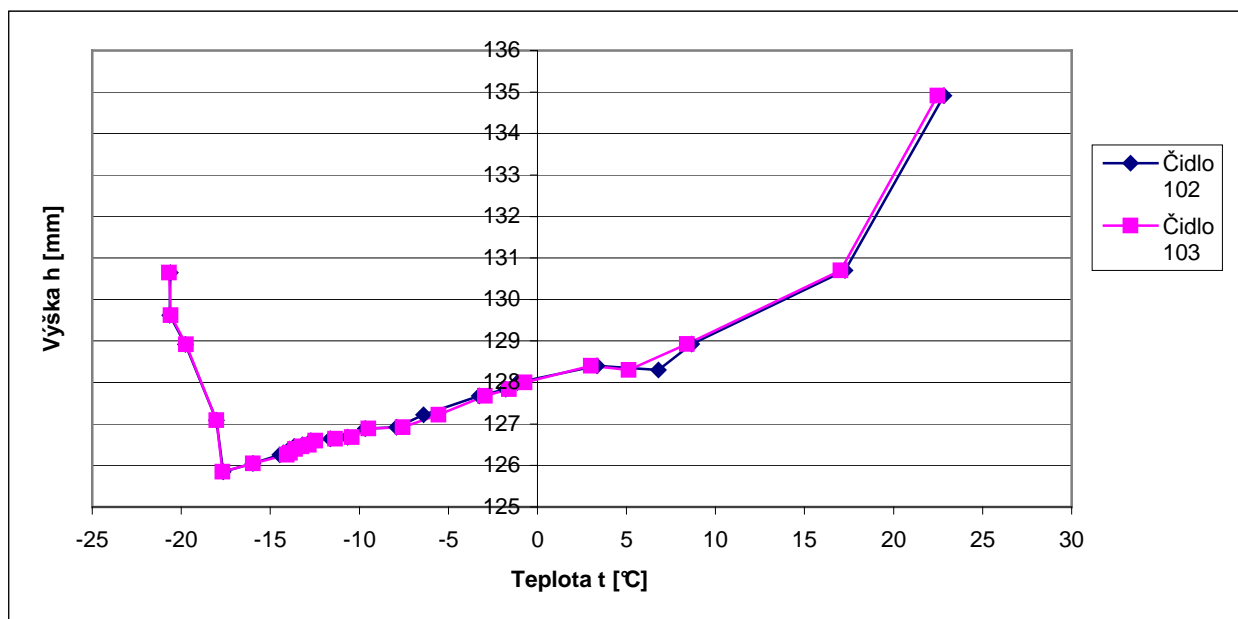
Tabulka 2

Naměřené hodnoty měřené čidly 102 a 103

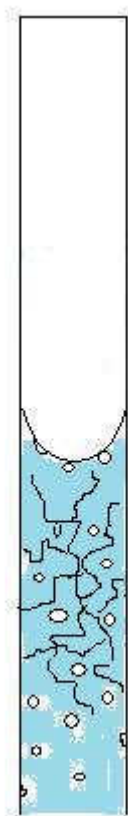
$t_{102} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{103} [^{\circ}\text{C}]$	$h \text{ [mm]}$
22,475	22,828	134,91
17,03	17,27	130,70
8,4	8,67	128,93
5,13	6,79	128,3
3	3,35	128,4
-0,71	-1,12	128
-1,6	-1,77	127,84
-2,95	3,276	127,68
-5,55	-6,39	127,22
-7,57	-7,9	126,92
-9,49	-9,66	126,89
-10,42	-10,66	126,68
-11,35	-11,63	126,64

$t_{102} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{103} [^{\circ}\text{C}]$	$h \text{ [mm]}$
-12,48	-12,73	126,60
-12,84	-13,20	126,50
-13,24	-13,65	126,46
-13,61	-13,93	126,40
-13,90	-14,25	126,30
-14,07	-14,46	126,26
-15,97	-15,98	126,05
-17,68	-17,65	125,85
-18,03	-18,03	127,09
-19,74	-19,77	128,92
-20,60	-20,65	129,62
-20,68	-20,61	130,65
-	-	-

Graf 2: Grafické znázornění naměřených hodnot



Obrázek 27:
Bubliny při nasávání



Obrázek 28:
Bubliny při rozmrazování



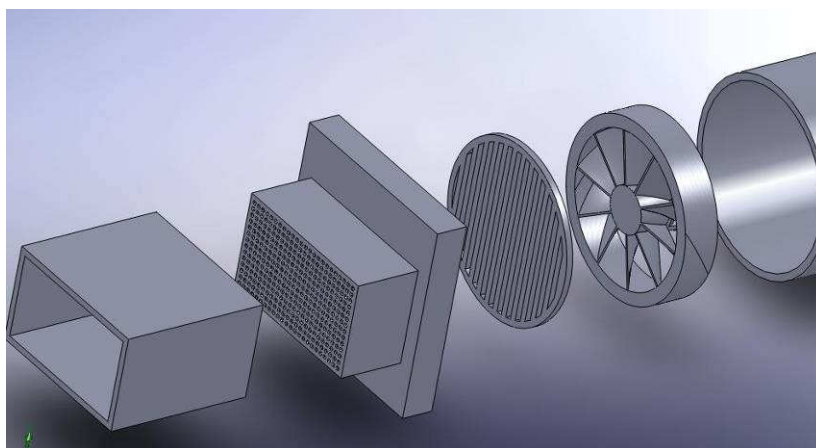
Obrázek 29:
Bubliny po rozmražení

Problém 3

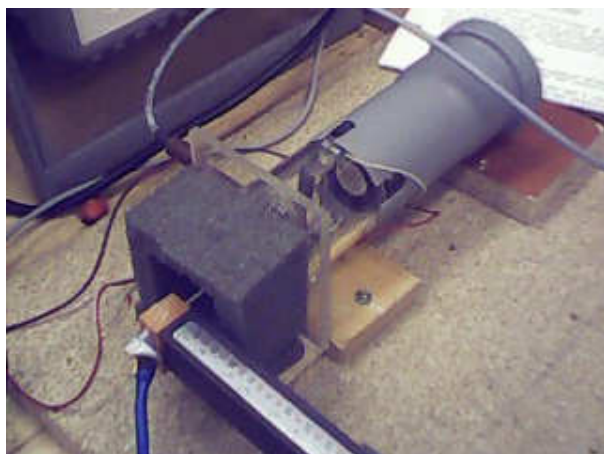
Dalším problémem, který se nedařilo jednoduše odstranit, se ukázala být nerovnoměrná teplota v komůrce. Během snižování teploty, resp. během vychlazování okruhu, se neshodovaly hodnoty obou čidel, tudíž jsme nebyli schopni přesně definovat teplotu uvnitř komůrky s kapilárou. Rozdíl teplot v loňském roce se pohyboval v rozmezí 1 až 5°C, v letošním roce již jen v rozmezí 0,2 – 1,5°C. Čidla pro měření teploty jsou dobře zaizolovaná, relativně malá (2x2mm) a po kalibraci i přesná. Vliv na naměřené hodnoty má hloubka zapuštění čidel do komůrky. Po zapuštění čidel do středu byly naměřeny hodnoty nejnižší, čím dál od středu se čidla nalézala, tím vyšší byla naměřena teplota. Je pravděpodobné, že se jednalo o oteplování čidel přísáváním okolního vzduchu netěsnostmi, nebo nerovnoměrností teploty v komůrce.

Nabízela se možnost zapuštění vícera čidel do komůrky, nebo možnost zapuštění s kapilárou těsně za sebou, případně do tvaru V, či ze stran. Možností, kam umístit čidla v komůrce je mnoho, ale ne vždy je možné dobré upevnění. Tento problém jsme hodlali odstranit pomocí jednoduchého regulátoru, který by fungoval na podobném principu, jako je fén na vlasy. Na naši žádost nám technik připravil krátké potrubí, do něhož by bylo možno nainstalovat vinutí, které by přehřívalo komůrku, a tím by napomáhalo k ustálení teploty v komůrce. Rovněž by však zahřátí napomáhalo k rozmražení zmražené vody. Toto řešení by se dalo využít i pro řešení problém 2. Tento regulátor jsme z časových důvodů nepoužili, avšak jsme stihli do našeho zařízení přidat ventilátor se stálými otáčkami pro ještě lepší usměrnění proudu vzduchu. I přestože jsme regulátor plně nevyužili, stihli jsme proměřit teploty, abychom ověřili, zda by byl regulátor funkční. I v tomto případě se znovu objevil problém s rozdílností teplot dle umístění čidla ve vztahu ke středu komůrky, ovšem ne tak znatelný jako v komůrce. Zde byla odchylka $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

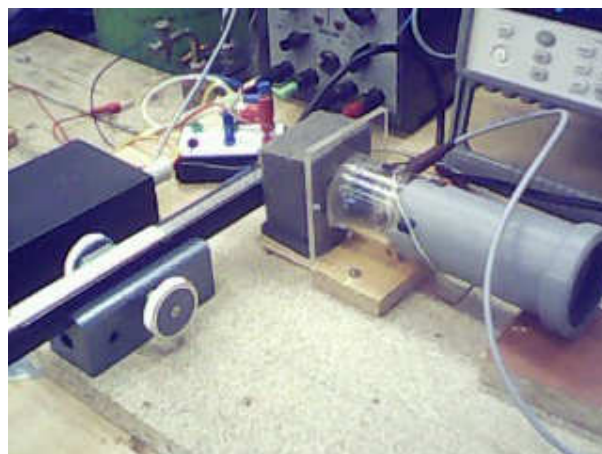
Nabízely se možnosti vylepšení regulátoru. Dále byla před výstup umístěna hliníková drátěnka, která vyrovnala přestup tepla díky vysokému koeficientu α , a zakončení bylo provedeno pomocí síta pro zrovnoměrnění proudění vzduchu. Tím jsme docílili odchylky až $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Nabízí se možnost věnovat se této problematice hlouběji.



Obrázek 30: Regulátor



Obrázek 31: Regulátor



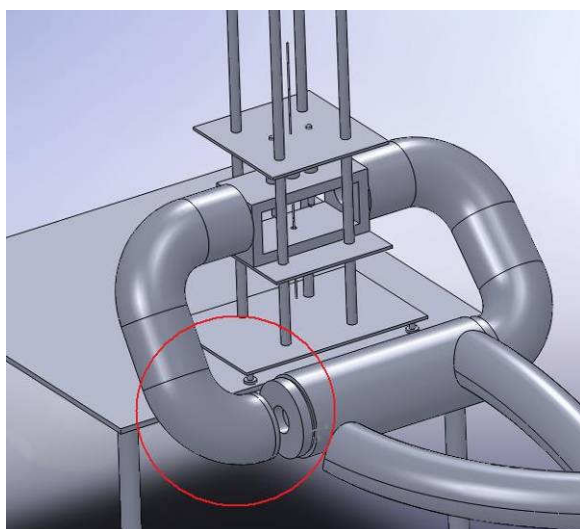
Obrázek 32: Regulátor

Takto připravené zařízení se posléze ukázalo být jako nepotřebné, neboť jsme v průběhu učinili objev. Postupovali jsme obvyklým způsobem, teploty se vyrovnaly až na odchylku $\pm 0,2^\circ\text{C}$, voda nezmrzla ani při teplotách -18°C a komůrka se nezamlžila, ani se neorosila.

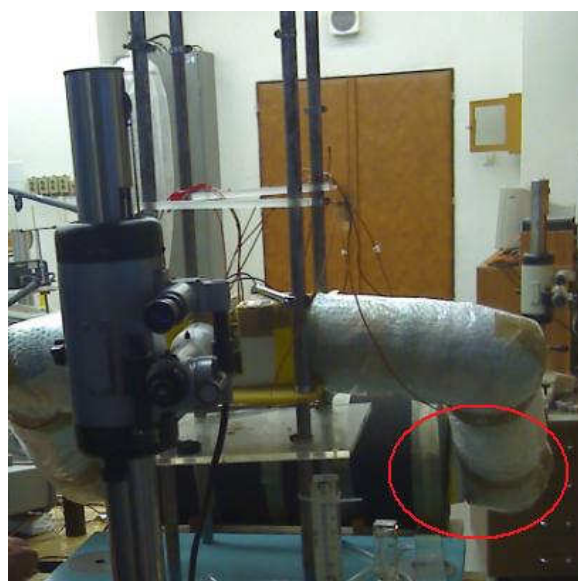
V závěru měření jsme kontrolovali zařízení a pátrali po příčině úspěchu. Bylo zjištěno, že vypadlo rameno na straně, kde se přisává vzduch do výměníku, tudíž se přisával vzduch z okolí. A na druhé straně odcházel studený vzduch zpět do okolí. Z toho vyvozujeme, že když byl vychlazen okruh s vnitřní cirkulací, cirkuloval stejný vzduch o stejné vlhkosti. Se snižující se teplotou klesala rozpustnost vody ve vzduchu, a to vedlo k vysrážení kapének.

Jakmile však přisáváme vzduch z okolí, je sice dostatečně vychlazený, ale kapénky se už nestihnou vysrážet, na druhé straně rozpojeného okruhu unikne vzduch zpět do okolí a celý proces se cyklicky opakuje. Proto jsme zařízení drobně poupravili a rameno jsme úplně nepřipojili. Následkem úprav přisáváme část vzduchu z okolí, ale část vychlazeného vzduchu vracíme zpět do okruhu, aby nedocházelo k tepelným ztrátám. Později je možné spojit rameno třicestným ventilem, který by uzavřel okruh a zároveň by byl přisáván vzduch z okolí.

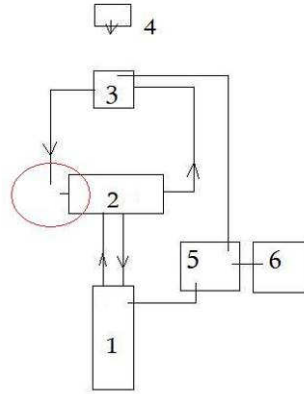
V kolenech, spojích a v oblasti komůrky dochází i přesto k únikům vzduchu z okruhu a přisáváním nového vzduchu z okolí. Důležité je, že po mnoha úpravách jsou výsledky důvěryhodné.



Obrázek 33: Vypojení ramene



Obrázek 34: Vypojení ramene



Obrázek 35: Schéma vypojení ramene

Problém 4

Posledním faktorem, který je nutné vzít v úvahu, je tlak v okolí. Na měření mají vliv podmínky, v nichž se nacházíme a které máme během měření v laboratoři. Zásadní vliv na měření mají tyto faktory:

Prvním faktorem je počasí. Během měření jsme se setkali s vlivy bouřky a silného deště. Při poklesu tlaku během bouřky začal na meniskus působit tlak nižší než na začátku, ten pak začal stoupat do jiné výšky, které by odpovídal tlak nový. Měření tedy muselo být přerušeno.

Druhý faktor, který ovlivňuje měření a je také spojený s počasím, je vítr. Meniskus není schopný ustálit se při konkrétní teplotě. Neustále komíhal, vzlínal a klesal v rozmezí 1 cm. Nebyli jsme tedy schopni přesně definovat jeho výšku. Dále měření ovlivňuje i otevřené okno, či dveře, které způsobují průvan. Tlak začne kolísat, meniskus se rozpohybuje a měření je nepřesné. Laboratoř musí být zcela uzavřená, aby nedocházelo ke změnám tlaku. Meniskus se snaží podle tlaku vyrovnat, a jakmile se tlak průvanem rychle změní, meniskus putuje opět do jiné výšky. V takových to případech nelze měření provádět.

V neposlední řadě je měření ovlivněno vlivem jiného měření v laboratoři, např. měření rychlosti proudění vzduchu. Pokud k takovému měření dochází, výfukové proudy vzduchu ovlivňují tlak a zvyšují teplotu v celé laboratoři. Za těchto okolností je měření zkreslené, tudíž zbytečné.

Níže uvedený graf a tabulka představuje hodnoty našeho měření, během kterého začalo mohutně pršet a v laboratoři probíhalo jiné měření. Je vidět, že okolo teploty 0°C je patrná rapidní změna výšky. To je způsobeno změnou tlaku v laboratoři. Je nutno provádět měření v klidovém stavu.

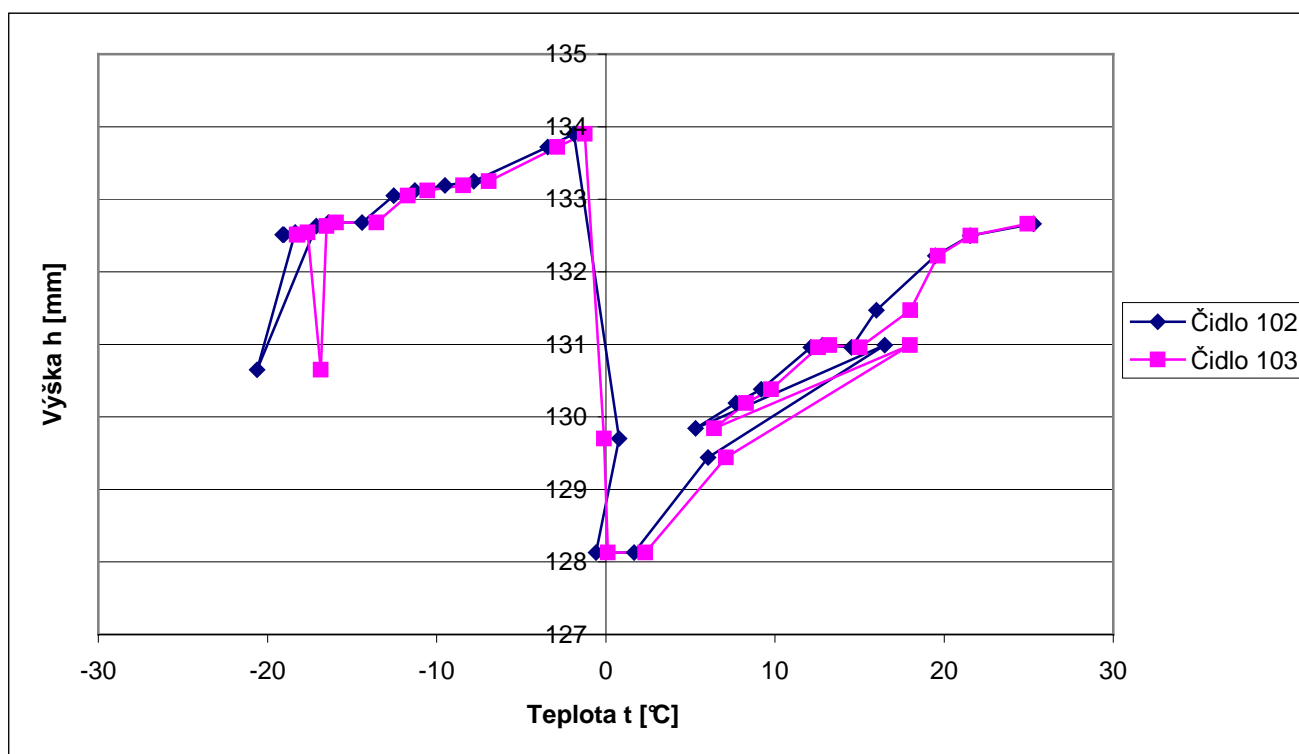
Tabulka 3

Naměřené hodnoty ovlivněné okolními vlivy

t ₁₀₂ [°C]	t ₁₀₃ [°C]	h [mm]	Pozn.
24,92	25,29	132,66	vytopená lab., vliv jiného měření, tuhne
21,554	21,551	132,50	
19,63	19,48	132,22	
18	16	131,47	
15,022	14,523	130,96	tuhne
13,208	12,818	130,99	rozhýbán
12,55	12,11	130,96	hýbe se
9,766	9,177	130,38	zadrhne
8,30	7,69	130,19	zadrhne
6,40	5,30	129,84	přerušeno, nalezena bublina
17,98	16,49	130,99	vypnutý ventilátor
7,108	6,049	129,44	hýbal se
2,331	1,669	128,13	zadrhl
0,120	-0,569	128,13	stále klesá

t ₁₀₂ [°C]	t ₁₀₃ [°C]	h [mm]	Pozn.
-0,107	0,781	129,7	znovu klesá
-1,234	-1,8777	133,9	o 10 min později prší
-2,868	-3,436	133,72	
-6,91	-7,81	133,25	
-8,425	-9,508	133,19	
-10,554	-11,281	133,12	
-11,7	-12,54	133,05	
-13,56	-14,41	132,95	
-15,95	-16,39	132,68	
-16,50	-17,119	132,63	
-16,859	-17,598	132,60	
-17,619	-18,358	132,54	
-18,215	-19,033	132,51	
-18,260	-19,108	132,51	

Graf 3: Grafické znázornění naměřených hodnot



3.5.4 Výsledky měření

Cílem našeho měření je změřit výšku menisku v intervalu teplot od 20°C do -18°C, kde 20°C je výchozí poloha menisku, a jeho výšku zaznamenat jako první a postupně měřit až do konečné hodnoty dle postupu výše. Změna hodnoty povrchového napětí se dopočítá z rozdílu výšek z Laplaceovy rovnice:

$$p = \frac{2\sigma}{r},$$

kde σ je povrchové napětí vody, r je poloměr kapiláry.

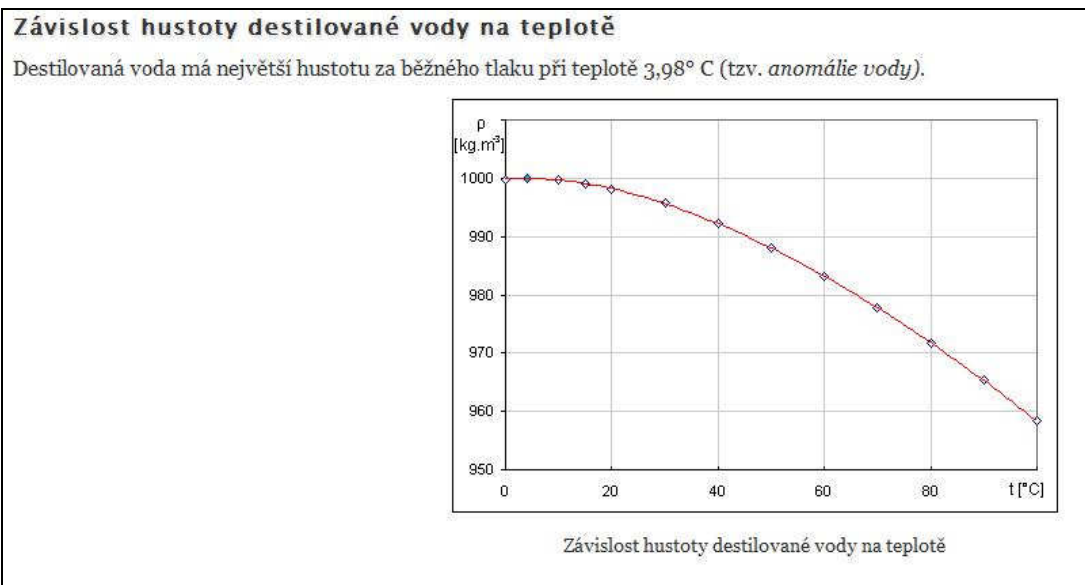
Při měření byly použity kapiláry s vnitřním průměrem 363, 320, 290 μm . p je hydrostatický tlak, za který dosadíme:

$$\rho \cdot g \cdot h = \frac{2 \cdot \sigma}{r}$$

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{r \cdot g \cdot \rho}$$

$$\sigma = \frac{h \cdot r \cdot g \cdot \rho}{2}$$

kde h je tedy konkrétní změřená výška, g je gravitační zrychlení, které by mělo odpovídat hodnotě $g = 9,80970879 \text{ m.s}^{-2}$ pro Plzeň u bazénu na Slovanech (zeměpisná šířka: 49° 44' 16", zeměpisná délka: 13° 23' 55"). Pro naše výpočty bude bohatě stačit hodnota $g=9,81 \text{ m.s}^{-2}$. Dopusíme se odchylky 0,5%. ρ je hustota vody, která se mění se změnou teploty a následující tabulka představuje závislost hustoty destilované vody na teplotě. Pro naše výpočty zvolíme jednotnou hodnotu, konkrétně hustotu pro 0°C. Tím se dopustíme odchylky 1 %.



Obrázek 36: Závislost hustoty destilované vody na teplotě³⁴

Tabulka 4

Hustota destilované vody při teplotách

Teplota t [°C]	Hustota [kg/m ³]	Teplota t [°C]	Hustota [kg/m ³]
0	999,941	40	992,220
4	999,973	50	988,040
10	999,701	60	983,200
15	999,099	70	977,760
20	998,205	80	971,790
30	995,651	90	965,300

Z níže uvedené tabulky použitelných dat vyvodíme závěry a dosadíme do výše uvedeného vzorce.

³⁴ BUREŠ, Jiří. conVERTER. <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-vody.htm>

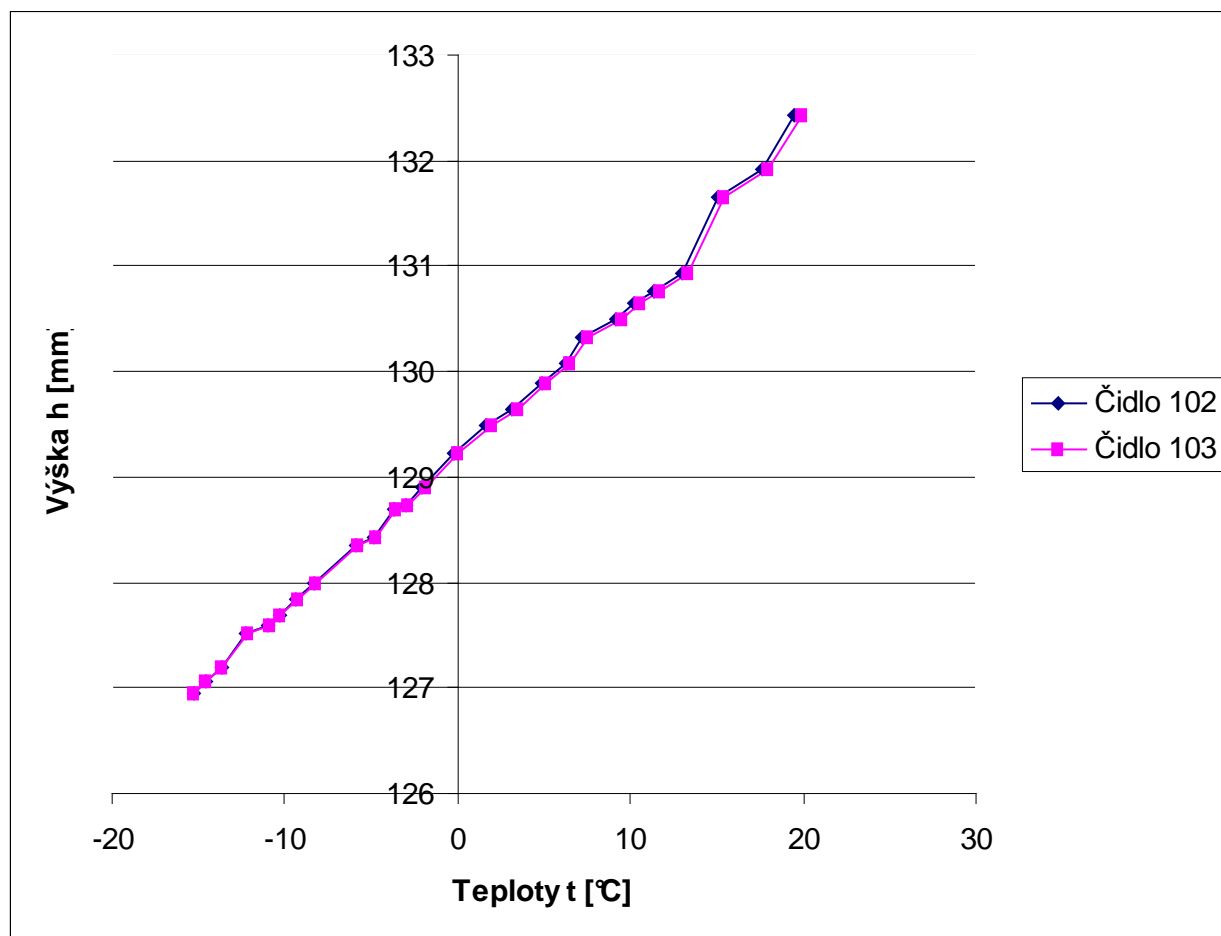
Tabulka 5

Naměřené hodnoty čidlem 102, 103 a výšky pro kapiláru 363 μm

$t_{102} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{103} [^{\circ}\text{C}]$	$h [\text{mm}]$
19,49	19,91	132,44
17,58	18	131,92
15,08	15,47	131,66
12,97	13,35	130,93
11,37	11,73	130,77
10,22	10,57	130,64
9,19	9,55	130,49
7,17	7,49	130,33
6,22	6,51	130,08
4,83	5,1	129,88
3,18	3,46	129,65
1,7	1,94	129,5
-0,213	-0,03	129,22

$t_{102} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{103} [^{\circ}\text{C}]$	$h [\text{mm}]$
-2,02	-1,86	128,9
-3,01	-2,86	128,74
-3,7	-3,55	128,69
-4,88	-4,75	128,42
-5,93	-5,81	128,36
-8,35	-8,22	127,99
-9,32	-9,2	127,84
-10,31	-10,22	127,68
-10,97	-10,87	127,59
-12,24	-12,18	127,52
-13,68	-13,69	127,19
-14,52	-14,54	127,07
-15,2	-15,22	126,94

Graf 4: Grafické znázornění naměřených hodnot - závislost výšky na teplotě pro kapiláru 363 μm



Hodnoty výšky přepočítáme na povrchové napětí destilované vody dle postupu uvedeného níže a vytvoříme graf. Počáteční výšku zvolíme 132,44 a povrchové napětí pro počáteční výšku je 72 mN/m při teplotě 20°C.

Příklad výpočtu povrchového napětí jednoho bodu, a sice pro teplotu 17,8°C:
Nejprve je nutné spočítat rozdíl výšek Δh :

$$\Delta h = (h' - h'') = 132,44 - 131,92 = 0,52 \text{ mm}$$

kde h' je počáteční výška zvolená při teplotě 19,7°C, čemuž odpovídá i počáteční hodnota povrchového napětí σ' , která je 72,85 mN/m, vyčtená z tabulky od Hackera. h'' je výška při určité teplotě, v našem případě je to při teplotě 17,8°C.

Z rozdílu výšek vypočítáme rozdíl povrchových napětí.

$$\Delta \sigma = \frac{\Delta h \cdot r \cdot \rho \cdot g}{2} = \left(\frac{0,00052 \cdot 0,0001815 \cdot 999,941 \cdot 9,81}{2} \right) \cdot 1000 = 0,46291 \text{ mN/m}$$

Výslednou hodnotu přičteme k počáteční hodnotě povrchového napětí a máme výsledek povrchového napětí při teplotě 17,8°C.

Tímto způsobem, tzn. následující výsledné hodnoty přičítáme vždy k počáteční hodnotě, a tak pokračujeme až do poslední naměřené hodnoty. Výsledky jsou uvedeny v tabulce.

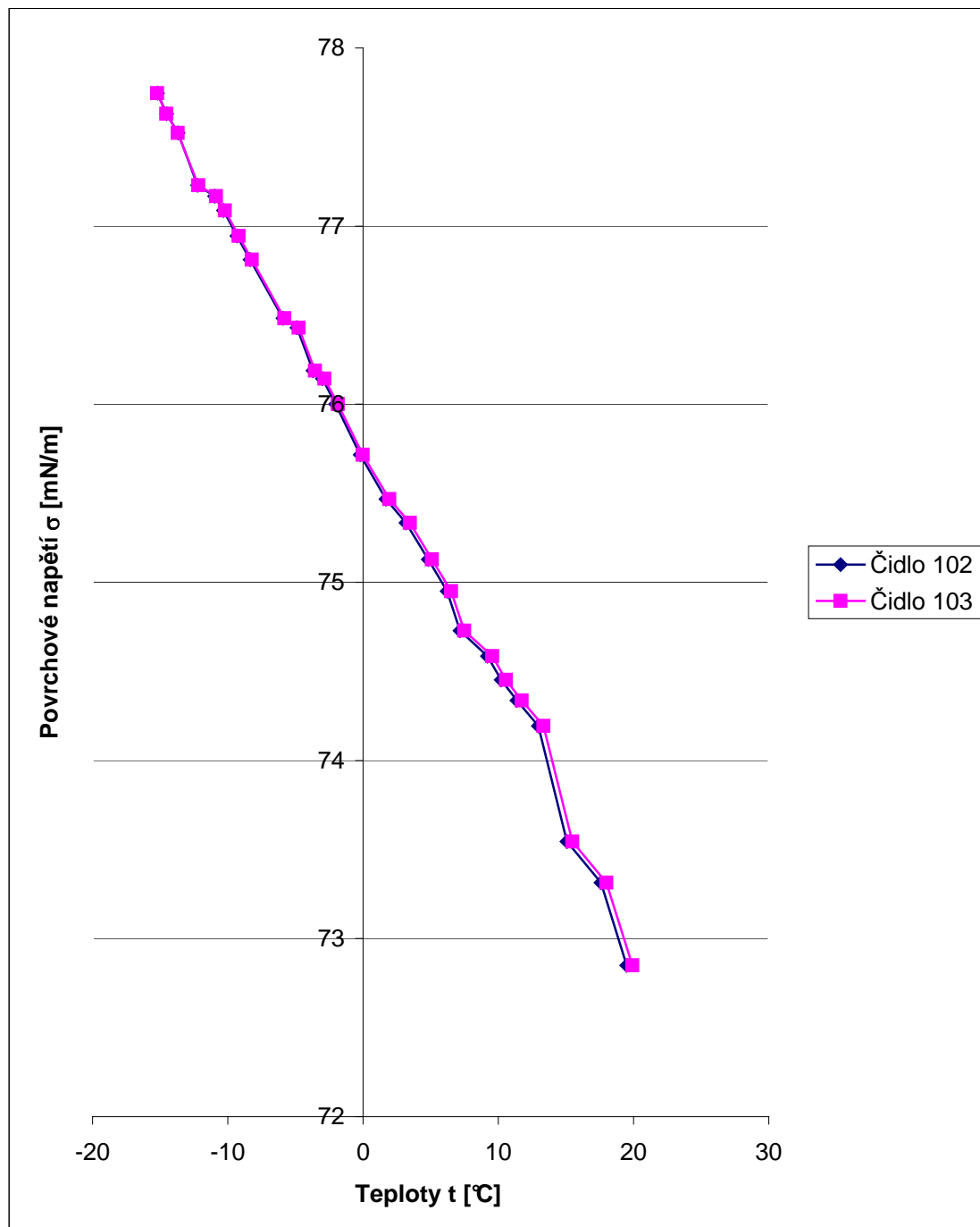
Tabulka 6

Hodnoty rozdílů a výsledných povrchových napětí pro kapiláru 363 μm

$\varnothing t$ [°C]	$(h' - h'')$ [mm]	$\sigma' + \sigma''$ [mN/m]	σ [mN/m]
19,7	0	0	72,85
17,8	0,52	0,46291	73,31291
15,3	0,78	0,69436	73,54436
12,2	1,51	1,34421	74,19421
11,5	1,67	1,48664	74,33664
10,4	1,8	1,60237	74,45237
9,4	1,95	1,7359	74,5859
7,3	2,11	1,87833	74,72833
6,4	2,36	2,10088	74,95088
4,9	2,56	2,27892	75,12892
3,3	2,79	2,48367	75,33367
1,8	2,94	2,6172	75,4672
-0,1	3,22	2,86646	75,71646

$\varnothing t$ [°C]	$(h - h')$ [mm]	$\sigma' + \sigma''$ [mN/m]	σ [mN/m]
-1,9	3,54	3,15133	76,00133
-2,9	3,7	3,29376	76,14376
-3,6	3,75	3,33827	76,18827
-4,7	4,02	3,57862	76,42862
-5,9	4,08	3,63204	76,48204
-8,3	4,45	3,96141	76,81141
-9,3	4,6	4,09494	76,94494
-10,3	4,76	4,23738	77,08738
-10,9	4,85	4,31749	77,16749
-12,2	4,92	4,37981	77,22981
-13,7	5,25	4,67358	77,52358
-14,5	5,37	4,7804	77,6304
-15,2	5,5	4,89613	77,74613

Graf 5: Grafické znázornění naměřených hodnot - závislost povrchového napětí na teplotě pro kapiláru 363 μm



Výsledky porovnáme s ostatními.

Nyní představíme hodnoty proměřené kapiláry o průměru 320 μm , nejprve naměřené teploty a výšky, poté přepočítané na povrchové napětí a jejich grafy.

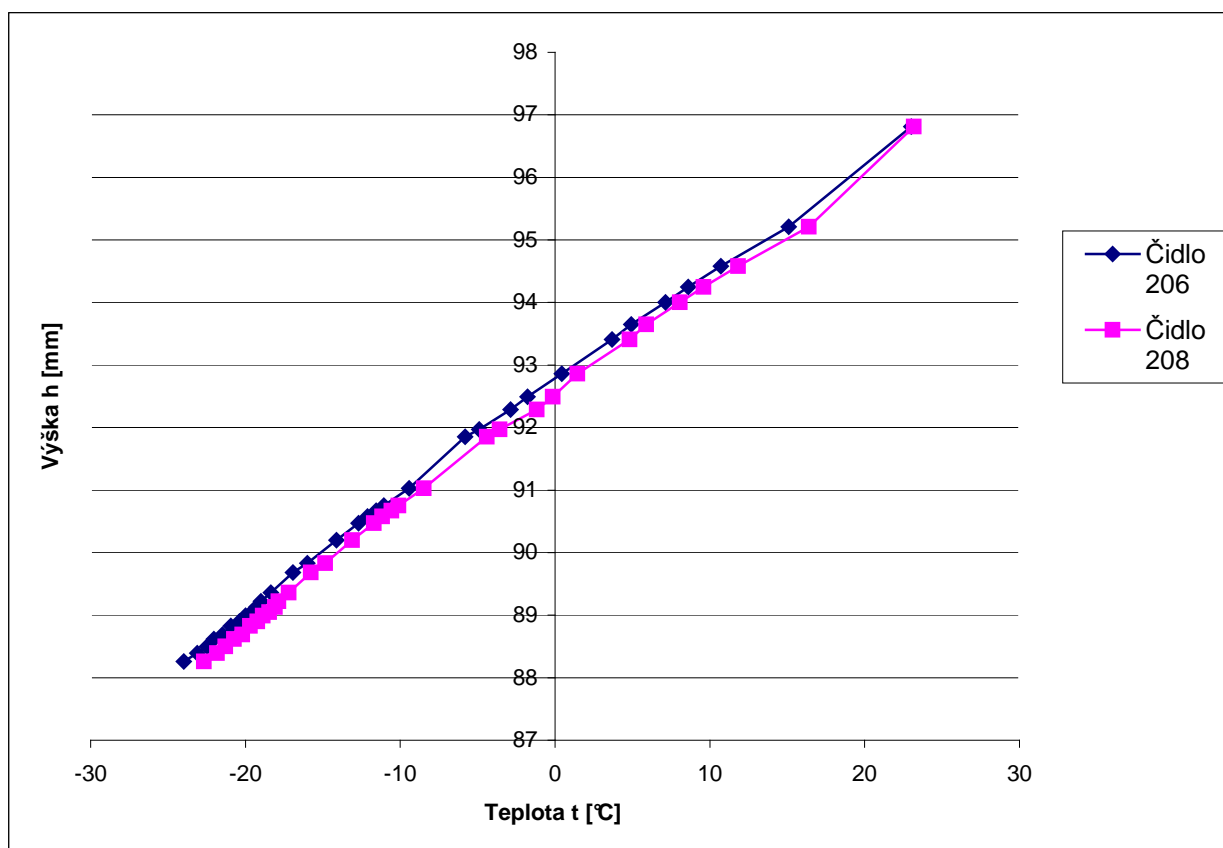
Tabulka 7

Hodnoty - závislost výšky na teplotě pro kapiláru 320 μm

t_{206} [°C]	t_{208} [°C]	h [mm]
23,015	23,168	96,81
15,1	16,4	95,21
10,7	11,82	94,58
8,6	9,6	94,25
7,14	8,06	94
4,92	5,89	93,65
3,69	4,826	93,41
0,431	1,44	92,86
-1,78	-0,15	92,49
-2,88	-1,18	92,29
-4,9	-3,568	91,97
-5,8	-4,41	91,85
-9,43	-8,48	91,03
-11,07	-10,111	90,75
-11,56	-10,57	90,67
-12,12	-11,17	90,58
-12,7	-11,7	90,47

t_{206} [°C]	t_{208} [°C]	h [mm]
-14,13	-13,099	90,2
-16	-14,85	89,83
-16,94	-15,78	89,68
-18,36	-17,21	89,36
-19	-17,86	89,22
-19,28	-18,1	89,13
-19,61	-18,46	89,05
-20	-18,87	88,99
-20,38	-19,22	88,9
-20,95	-19,7	88,825
-21,48	-20,21	88,69
-22,03	-20,74	88,62
-22,479	-21,286	88,5
-23,12	-21,84	88,39
-23,98	-22,69	88,26
-24	-24	Zamrzlo
-	-	-

Graf 5: Hodnoty - závislost výšek na teplotě pro kapiláru pro kapiláru 320 μm



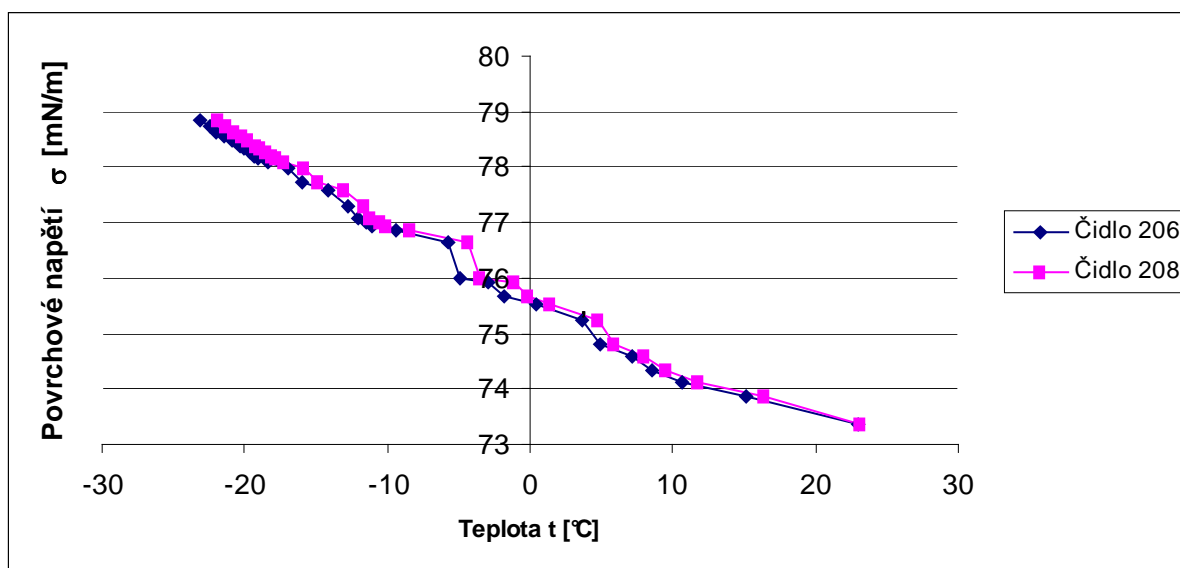
Tabulka 8

Hodnoty rozdílů a výsledných povrchových napětí pro kapiláru 320 μm

$\varnothing t$ [°C]	$(h'-h'')$ [mm]	$\sigma'+\sigma''$ [mN/m]	σ [mN/m]
23,0915	0	0	72,12
15,75	1,6	1,25561	73,3756
11,26	2,23	1,75	73,87
9,1	2,56	2,00897	74,129
7,6	2,81	2,20516	74,3252
5,405	3,16	2,47982	74,5998
4,258	3,4	2,66816	74,7882
0,9355	3,95	3,09978	75,2198
-0,965	4,32	3,39014	75,5101
-2,03	4,52	3,54709	75,6671
-4,234	4,84	3,79821	75,9182
-5,105	4,96	3,89238	76,0124
-8,955	5,78	4,53588	76,6559
-10,591	6,06	4,75561	76,8756
-11,065	6,14	4,81839	76,9384
-11,645	6,23	4,88902	77,009

$\varnothing t$ [°C]	$(h'-h'')$ [mm]	$\sigma'+\sigma''$ [mN/m]	σ [mN/m]
-12,2	6,34	4,97534	77,0953
-13,615	6,61	5,18722	77,3072
-15,425	6,98	5,47758	77,5976
-16,36	7,13	5,59529	77,7153
-17,785	7,45	5,84642	77,9664
-18,43	7,59	5,95628	78,0763
-18,69	7,68	6,02691	78,1469
-19,035	7,76	6,08969	78,2097
-19,435	7,82	6,13677	78,2568
-19,8	7,91	6,2074	78,3274
-20,325	7,985	6,26626	78,3863
-20,845	8,12	6,3722	78,4922
-21,385	8,19	6,42713	78,5471
-21,883	8,31	6,5213	78,6413
-22,48	8,42	6,60763	78,7276
-23,335	8,55	6,70964	78,8296

Graf 6: Grafické znázornění naměřených hodnot - závislost povrchového napětí na teplotě pro kapiláru 320 μm



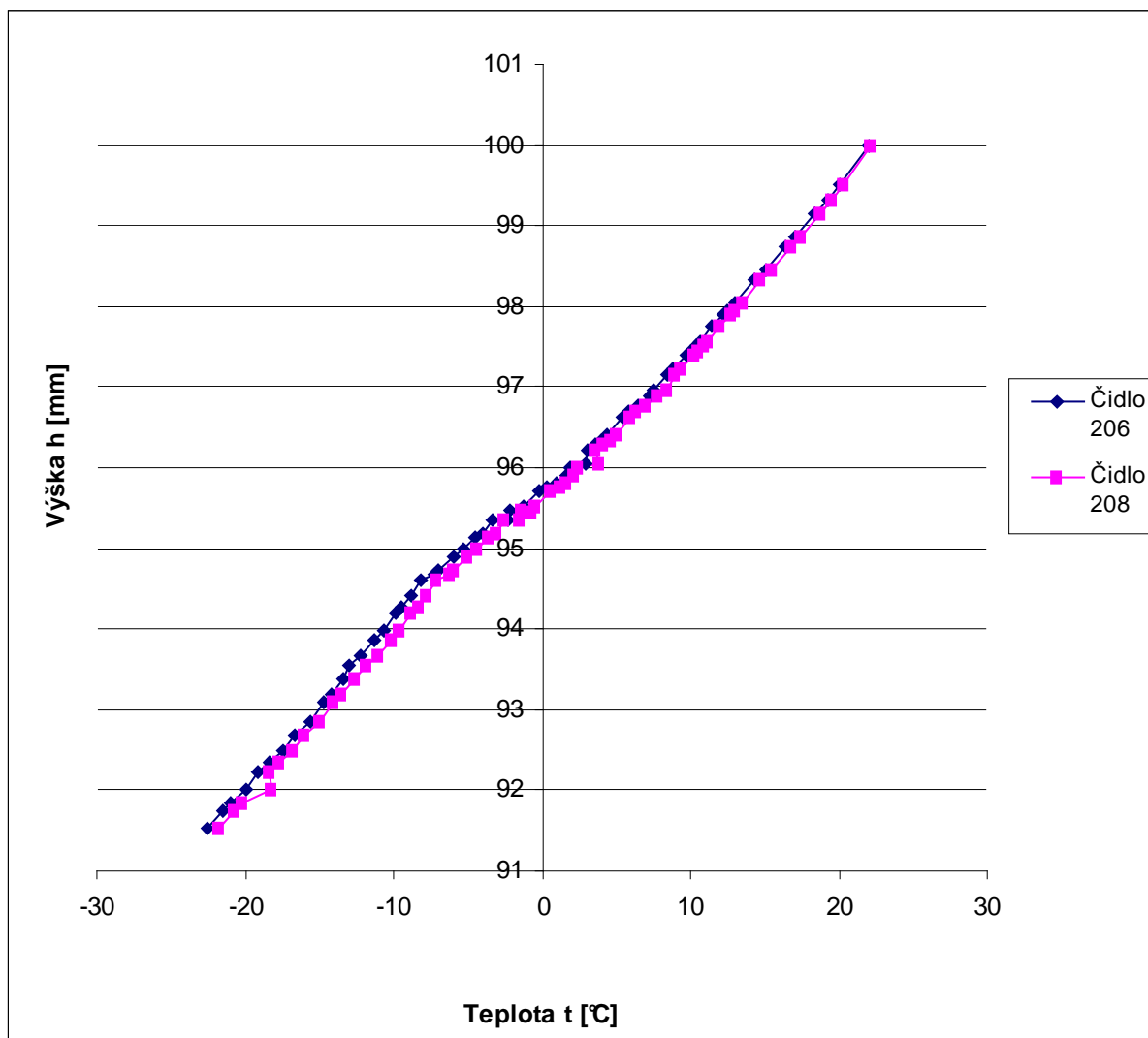
Nyní představíme hodnoty proměřené kapiláry o průměru 290 μm , nejprve naměřené teploty a výšky, poté přepočítané na povrchové napětí a jejich grafy.

Tabulka 9

Hodnoty – závislost výšky na teplotě pro kapiláru 290 μm

t_{206} [°C]	t_{208} [°C]	h [mm]	t_{206} [°C]	t_{208} [°C]	h [mm]
22,04	22,22	99,98	-0,216	0,585	95,71
20,05	20,37	99,52	-1,238	-0,396	95,52
19,26	19,6	99,32	-1,575	-0,767	95,44
18,43	18,79	99,15	-2,22	-1,39	95,48
17,07	17,47	98,87	-2,34	-1,52	95,35
16,42	16,8	98,74	-3,326	-2,5	95,35
15,04	15,54	98,46	-3,99	-3,08	95,18
14,32	14,76	98,33	-4,464	-3,636	95,13
13,05	13,53	98,04	-5,3	-4,427	95
12,52	13	97,95	-6,01	-5,08	94,89
12,28	12,73	97,905	-6,96	-5,926	94,73
11,4	11,94	97,76	-7,225	-6,23	94,68
10,65	11,18	97,57	-8,128	-7,064	94,61
10,33	10,89	97,51	-8,777	-7,72	94,41
9,95	10,5	97,445	-9,436	-8,336	94,26
9,68	10,25	97,4	-9,838	-8,772	94,19
8,78	9,38	97,22	-10,68	-9,555	93,98
8,425	8,99	97,15	-11,3	-10,16	93,87
7,46	8,4	96,96	-12,17	-11,04	93,66
7,23	7,75	96,9	-13,03	-11,78	93,56
6,47	7,05	96,77	-13,38	-12,67	93,39
5,83	6,4	96,69	-14,14	-13,47	93,18
5,45	6,01	96,62	-14,76	-14,04	93,08
4,39	5	96,4	-15,65	-14,92	92,86
4	4,61	96,34	-16,668	-15,999	92,68
3,6	4,17	96,29	-17,51	-16,82	92,5
3,08	3,59	96,205	-18,38	-17,67	92,34
2,999	3,85	96,04	-19,16	-18,41	92,23
1,945	2,461	95,99	-19,96	-18,27	92,02
1,57	2,11	95,9	-20,94	-20,15	91,84
1,03	1,59	95,81	-21,51	-20,74	91,74
0,339	1,186	95,76	-22,54	-21,7	91,53

Graf 7: Grafické znázornění naměřených hodnot - závislost výšky na teplotě pro kapiláru 290 μm



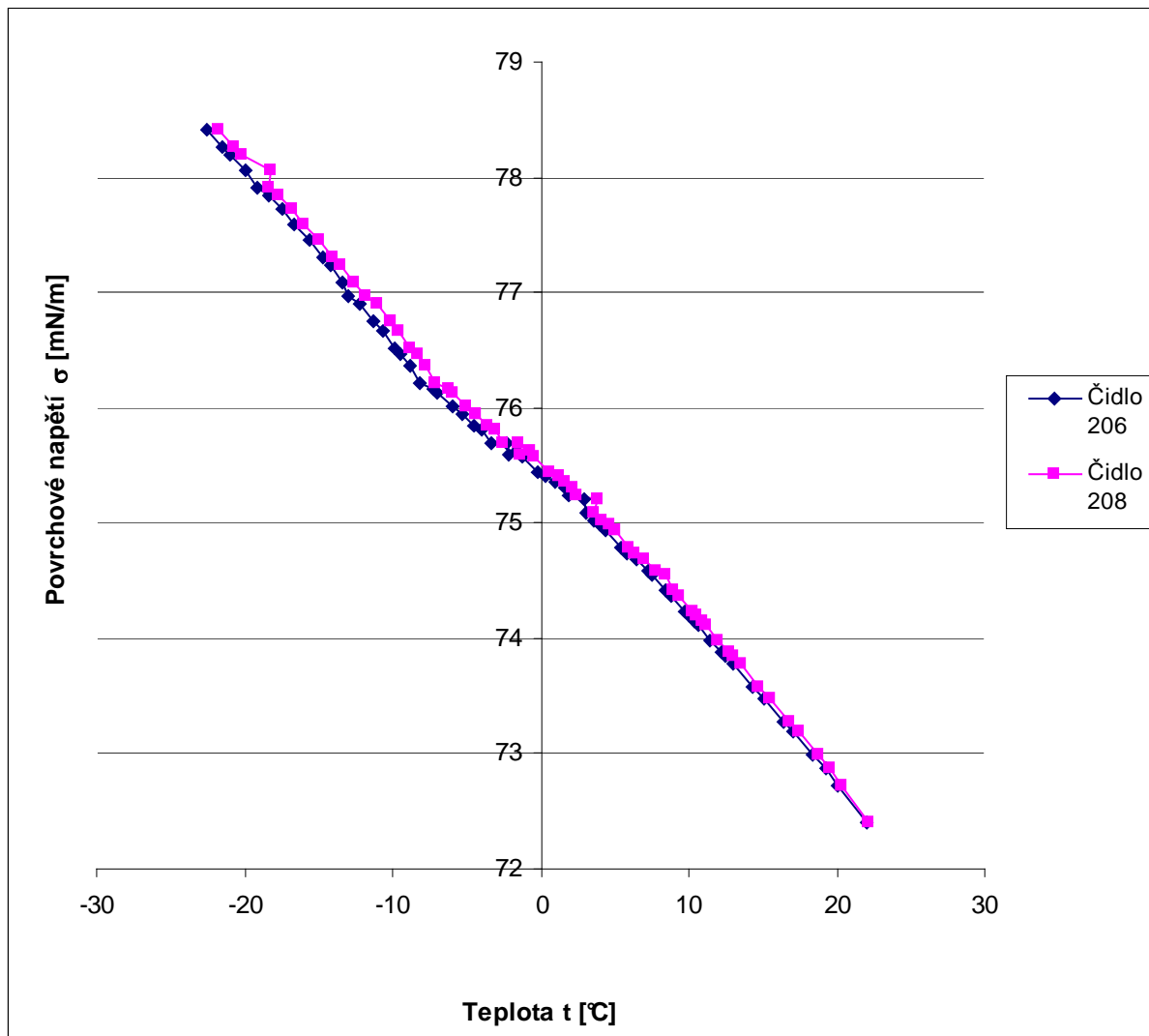
Tabulka 10

Hodnoty - závislost povrchového napětí na teplotě pro kapiláru 290 μm

$\varnothing t$ [°C]	(h'-h'') [mm]	$\sigma'+\sigma''$ [mN/m]	σ [mN/m]
22,13	0	0	72,4
20,21	0,46	0,327144	72,72714
19,43	0,66	0,469381	72,86938
18,61	0,83	0,590282	72,99028
17,27	1,11	0,789413	73,18941
16,61	1,24	0,881867	73,28187
15,29	1,52	1,080998	73,481
14,54	1,65	1,173452	73,57345
13,29	1,94	1,379695	73,7797
12,76	2,03	1,443702	73,8437
12,505	2,075	1,475705	73,8757
11,67	2,22	1,578826	73,97883
10,915	2,41	1,713951	74,11395
10,61	2,47	1,756622	74,15662
10,225	2,535	1,802849	74,20285
9,965	2,58	1,834852	74,23485
9,08	2,76	1,962865	74,36287
8,7075	2,83	2,012648	74,41265
7,93	3,02	2,147773	74,54777
7,49	3,08	2,190444	74,59044
6,76	3,21	2,282898	74,6829
6,115	3,29	2,339792	74,73979
5,73	3,36	2,389575	74,78958
4,695	3,58	2,546035	74,94604
4,305	3,64	2,588706	74,98871
3,885	3,69	2,624265	75,02427
3,335	3,775	2,684716	75,08472
3,4245	3,94	2,802061	75,20206
2,203	3,99	2,83762	75,23762
1,84	4,08	2,901627	75,30163
1,31	4,17	2,965633	75,36563
---	---	---	---

$\varnothing t$ [°C]	(h'-h'') [mm]	$\sigma'+\sigma''$ [mN/m]	σ [mN/m]
0,1845	4,27	3,036752	75,43675
-0,817	4,46	3,171876	75,57188
-1,171	4,54	3,228771	75,62877
-1,805	4,5	3,200324	75,60032
-1,93	4,63	3,292777	75,69278
-2,913	4,63	3,292777	75,69278
-3,535	4,8	3,413679	75,81368
-4,05	4,85	3,449238	75,84924
-4,8635	4,98	3,541692	75,94169
-5,545	5,09	3,619922	76,01992
-6,443	5,25	3,733711	76,13371
-6,7275	5,3	3,76927	76,16927
-7,596	5,37	3,819053	76,21905
-8,2485	5,57	3,96129	76,36129
-8,886	5,72	4,067967	76,46797
-9,305	5,79	4,11775	76,51775
-10,1175	6	4,267098	76,6671
-10,73	6,11	4,345328	76,74533
-11,605	6,32	4,494677	76,89468
-12,405	6,42	4,565795	76,9658
-13,025	6,59	4,686696	77,0867
-13,805	6,8	4,836045	77,23604
-14,4	6,9	4,907163	77,30716
-15,285	7,12	5,063623	77,46362
-16,3335	7,3	5,191636	77,59164
-17,165	7,48	5,319649	77,71965
-18,025	7,64	5,433438	77,83344
-18,785	7,75	5,511669	77,91167
-19,115	7,96	5,661017	78,06102
-20,545	8,14	5,78903	78,18903
-21,125	8,24	5,860148	78,26015
-22,12	8,45	6,009497	78,4095

Graf 8: Grafické znázornění naměřených hodnot - závislost povrchového napětí na teplotě pro kapiláru 290 μm

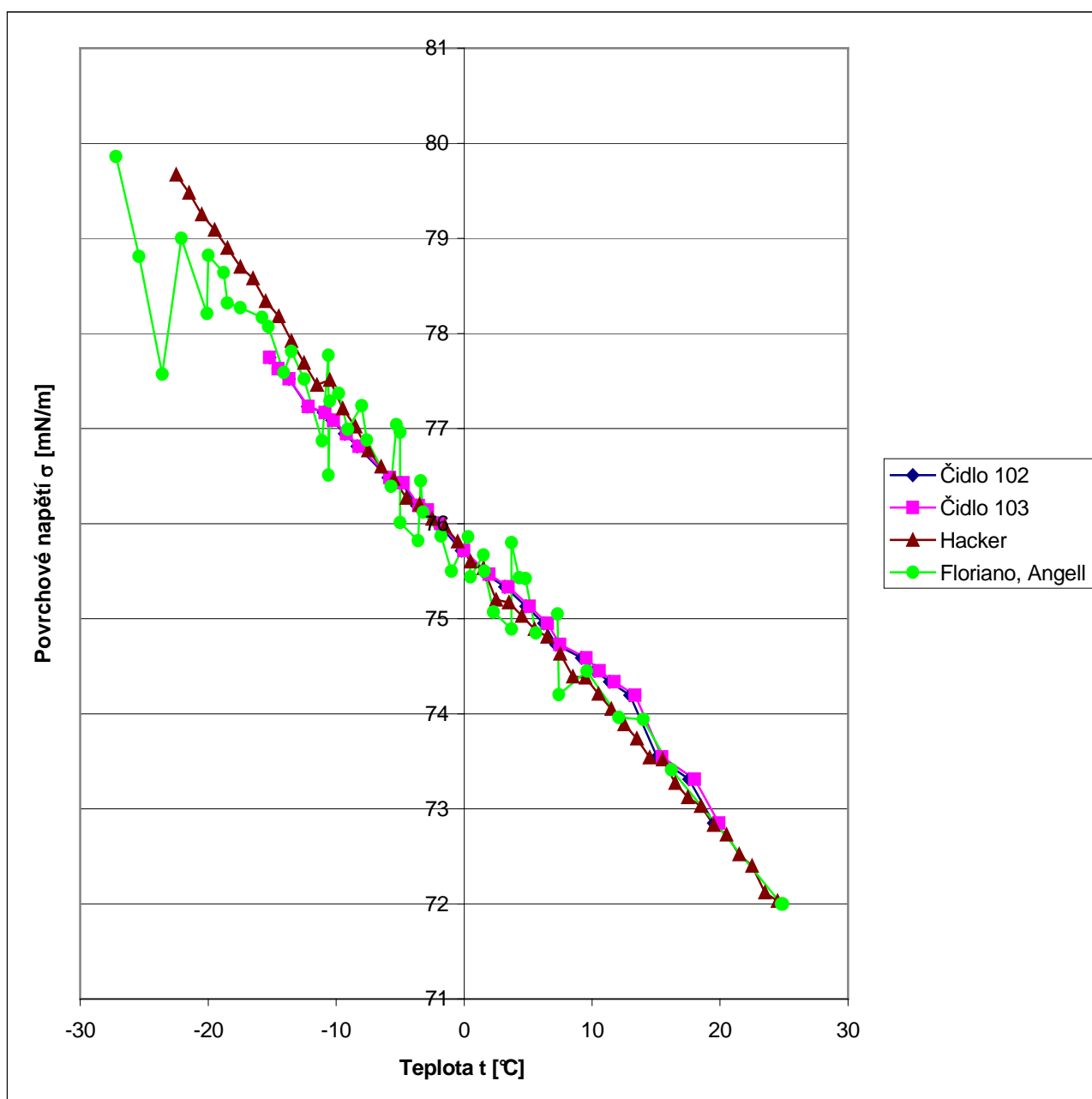


3.5.5 Výsledky měření v porovnání s publikovanými

Cílem mé práce bylo porovnat naměřené výsledky měření povrchového napětí podchlazené vody s hodnotami měření autorů, o nichž se zmiňuji v této práci.

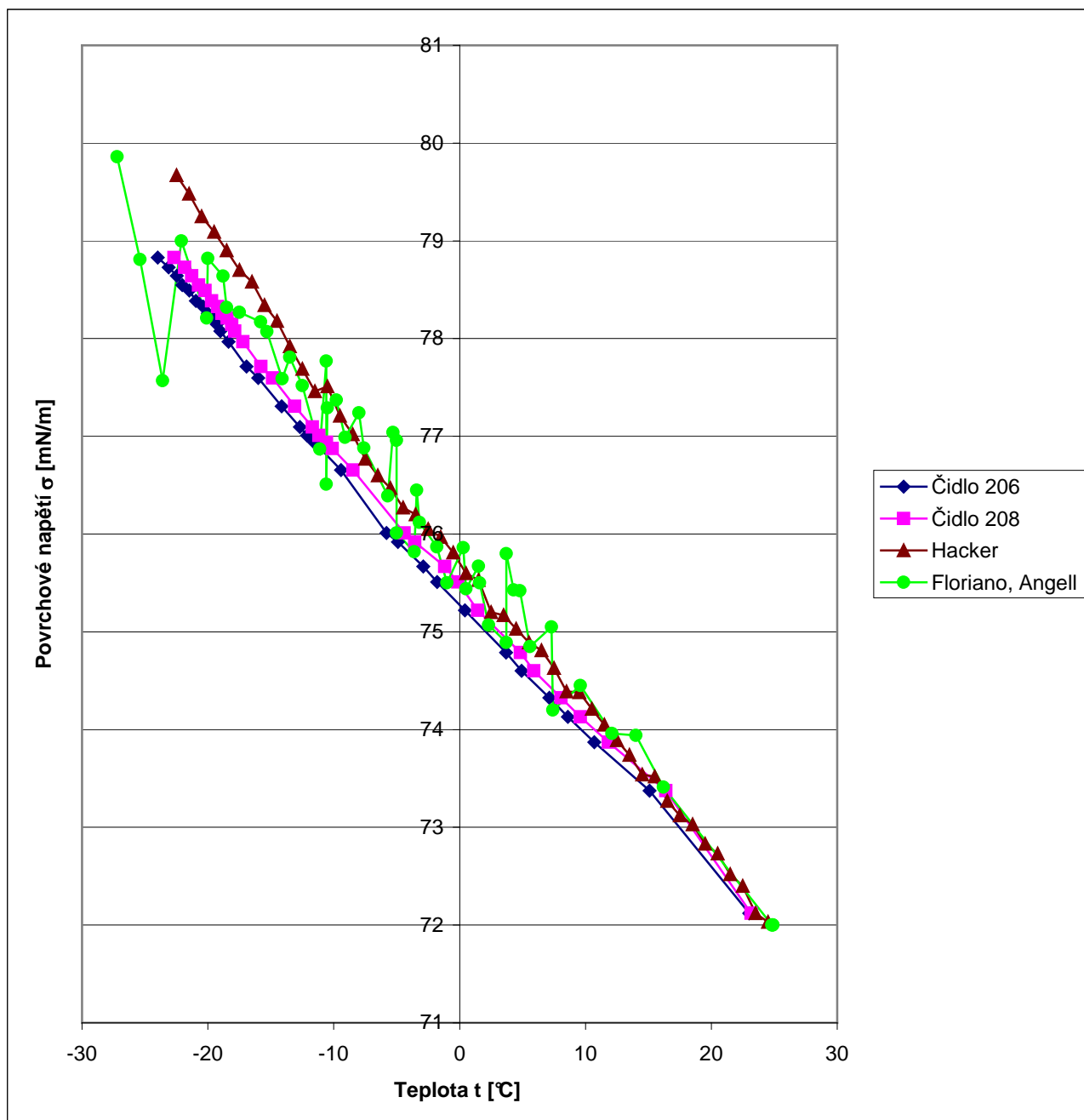
V Grafu 9 jsou souhrnně uvedené naměřené hodnoty dle měření Floriana, Angella, Hackera a námi naměřené hodnoty čidly 102 a 103. Jak z grafu vyplývá, hodnoty měření Floriana a Angella sice s klesající teplotou rostou, ale výrazně kolísají. Výsledky měření čidly se jeví být věrohodnější a přibližují se k Florianovým a Angellovým hodnotám, můžeme tedy říci, že tvoří zhruba průměr jejich hodnot. Hodnoty naměřené Hackerem jsou o něco strmější a shodují se s našimi výsledky v oblasti teplot od 0°C do -7°C.

Graf 9: Grafické znázornění naměřených hodnot kapiláry 363 μm - porovnání s publikovanými



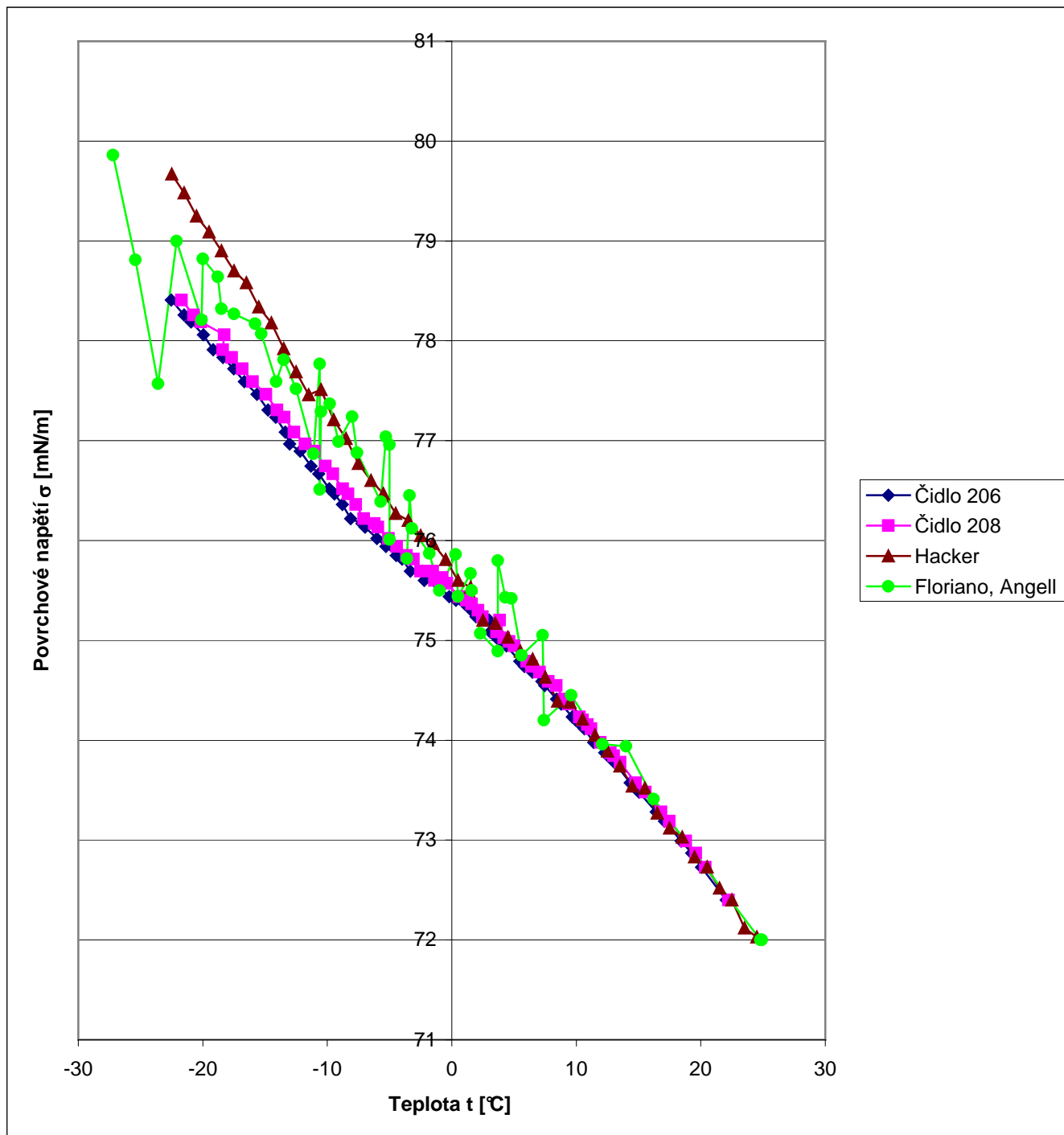
V Grafu 10 uvádíme naměřené hodnoty kapiláry 320 μm v porovnání s publikovanými. Jak z grafu vyplývá hodnoty naměřené Florianem a Angellem v porovnání s našimi hodnotami jsou kolísavé, přesto se pohybují v mezích tolerance. Měření Hackerem je sice v porovnání s měřením Floriana a Angella vyrovnanější, avšak se stoupajícím podchlazením vody se od našich výsledků měření mírně odlišuje.

Graf 10: Grafické znázornění naměřených hodnot kapiláry 320 μm - porovnání s publikovanými



V Grafu 11 uvádíme naměřené hodnoty kapiláry 290 μm v porovnání s publikovanými. Jak z grafu vyplývá hodnoty naměřené Florianem a Angellem jsou v porovnání s našimi hodnotami opět kolísavé, avšak v toleranci.

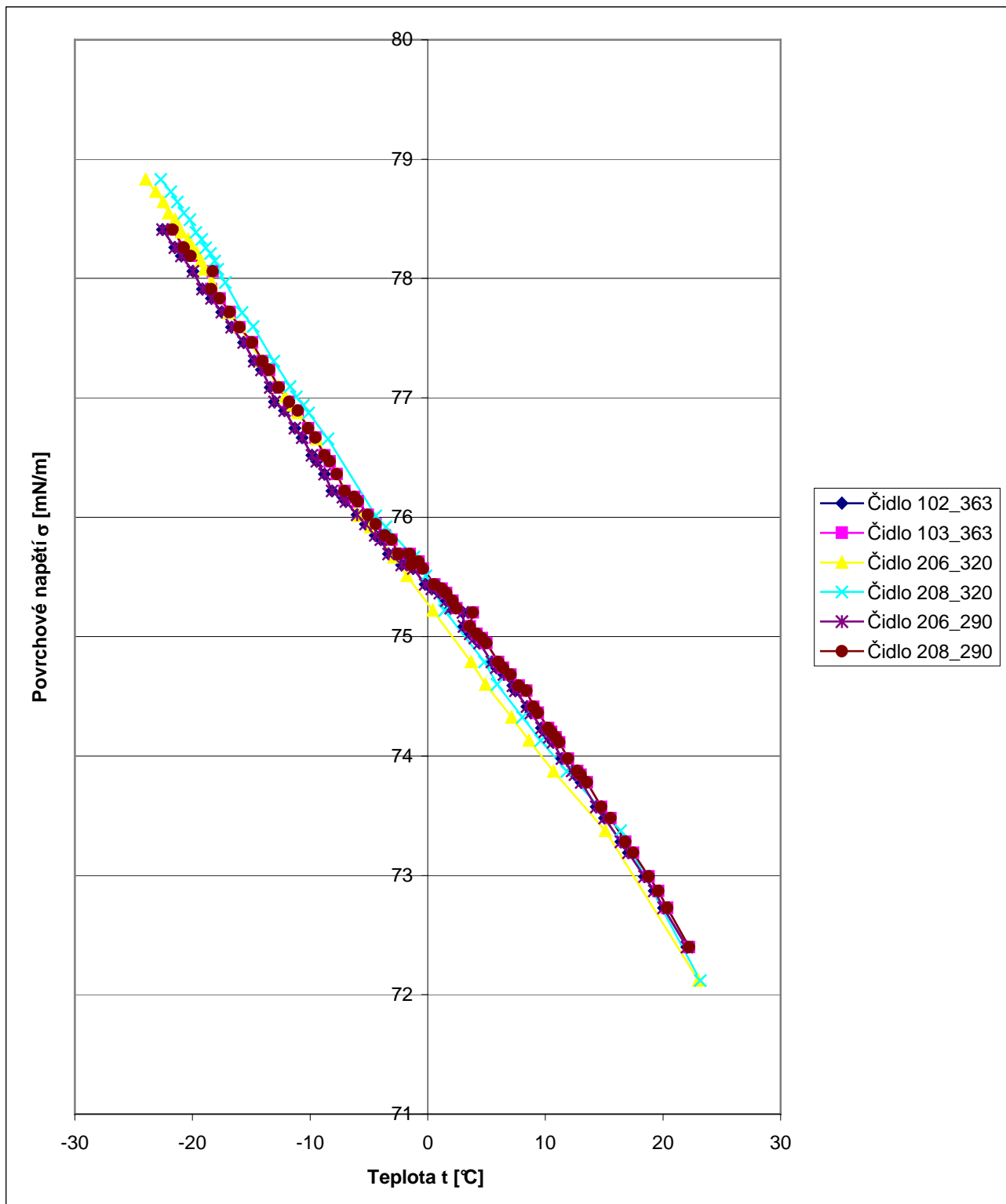
Graf 11: Grafické znázornění naměřených hodnot kapiláry 290 μm - porovnání s publikovanými



Nabízí se otázka, zda průměr kapilár ovlivňuje povrchové napětí podchlazené vody, případně je to příčina drobných odchylek, které se objevily v grafech, když jsme porovnávali naše hodnoty s publikovanými.

V Grafu 12 pak uvádíme naměřené hodnoty kapilár 363, 320 a 290 μm v porovnání mezi sebou. Jak z grafu vyplývá, námi naměřené hodnoty jsou téměř totožné, konstantní a bez výraznějších odchylek. Zmůžeme konstatovat, že změna průměru kapiláry nemá vliv na změnu povrchového napětí podchlazené vody.

Graf 12: Grafické znázornění naměřených hodnot kapilár 363, 320, 290 μm v porovnání mezi sebou



4. Závěr

I přes některé nedostatky a vyskytující se chyby a problémy se měření podařilo uskutečnit, tudíž ho lze považovat za úspěšné, přestože jsou i nadále možnosti zdokonalení měřicího zařízení a posunutí výsledků k ještě přesnějším hodnotám.

Nabízí se otázka, jaké jsou možnosti přenesení poznatků této práce do praxe. Jak bylo v práci již zmíněno, NASA si nechala v roce 1951 P. T. Hackerem z Lewis Flight Propulsion Laboratory Cleveland v Ohio, odvětvím meteorologie a klimatologie v oblastech vzdušné vlhkosti, kapilárního průtoku, podchlazení a námraz, prošetřit pro své raketoplány povrchové napětí podchlazené vody kvůli experimentálním hodnotám povrchového napětí podchlazené vody.

Jako značně problematické se jevil fakt, že pokud raketoplán či letadlo létá převážně v troposféře ve výšce 11 km nad mořem, teploty, hustota a tlak jsou 20procentní. Změna teploty a vzduchu s výškou je vyšší než v jiných vrstvách. Průměrný pokles teploty vzduchu s výškou činí 0,65°C na 100 m. Z toho vyplývá, že se zde nachází teploty hluboko pod nulou a pohybují se zde kapičky vody, které za absolutního klidu nemrzou. Letadlo, které kapičkami proletí, případně do kapiček narazí, jim dodá energii a vlivem této energie kapičky zmrznou. Což je stejné, jako kdyby bylo letadlo vystaveno dopadu kamínků v obrovské rychlosti. Tím může dojít k poškození, nebo dokonce i k destrukci letadla. Nejen zmrzlé kapičky vody, které mohou do letadla narazit, ale již usazení a následné zmrznutí kapiček na křídlech mohou být příčinou řady leteckých katastrof - ta poslední se odehrála v Americe poměrně nedávno, v únoru 2009, kdy byla prokázána jako příčina neštěstí námraza na křídle, které nezabránil ani hydrofobní (vodoodpudivý) povrch křídel, ani běžně v letectví používaný preventivní postřik rozmrazovací látkou, například propylenglykolem nebo etylenglykolem (Fridexem).

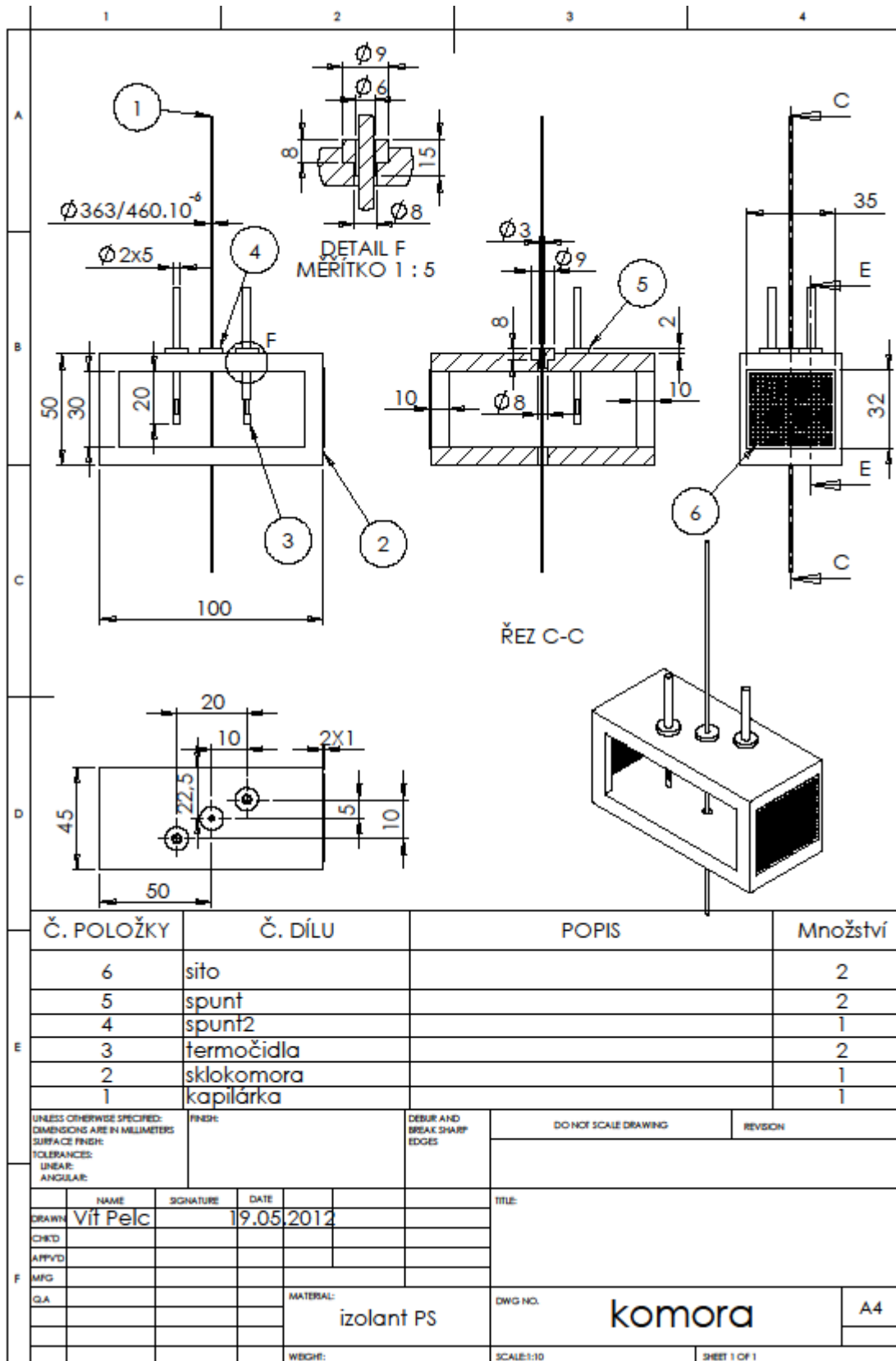
Výsledkem měření povrchového napětí podchlazené vody byl poznatek o povrchovém napětí vody při teplotách hluboko pod bodem mrazu, jejích vlastnostech a chování. Na základě těchto výsledků se podle vlastností vody upravují přední části letadel a raketoplánů, vyvíjí se jejich design a zdokonalují se použité materiály.

Až při sumarizaci poznatků týkajících se měření povrchového napětí vody jsem si plně uvědomil, jaké důsledky může mít opomenutí vlastností a chování podchlazené vody, byť v nepatrném množství.

5. Literatura

- [1] BUREŠ, Jiří. *conVERTER*.
<http://www.converter.cz/tabulky/hustota-vody.htm>
- [2] FLORIANO, M. A., ANGELL, C. A. *The Journal of Physical Chemistry*. West Lafayette, Indiana 47907: University Purdue, 1989, roč.94, č. 10
- [3] HACKER, Paul T. *Experimental Values of the Surface Tension of Supercooled Water*. Cleveland, Ohio: Lewis Flight Propulsion Laboratory, 1951
<http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=19810068863&q=Ns%3DLoadedDate%7C1%26N%3D4294896258>
- [4] LINHART, Jiří. *Mechanika tekutin I*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009
- [5] RICHTR, Karel. *Experimentální zařízení pro měření povrchového napětí kapalin*. Projekt GA ČR 101/05/2214, Zpráva KKE-06-07, Plzeň, 2007
- [6] TANAKA, Katsuyuki , HIGASHI, Yukihiro. *Measurements of the surface tension for R290, R600a and R290/R600a mixture.*, International Journal of Refrigeration 30, 2007, s. 1368-1373
www.elsevier.com/locate/ijrefrig
- [7] TŮMA, F. *Kybernetika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005
- [8] ČVUT Praha. *Jak psát rešerši*. Praha: Ústřední knihovna, 2010
<http://knihovny.cvut.cz/sluzby/reserse/jak-delat-resersi.html>

6. Přílohy



Příloha 1: Výkres komůrky