



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV ENERGETIKY

BAKALŘSKÁ PRÁCE

NÁZEV:

Technologie indukčního ohřevu ve studeném kelímku a
určení chemických vlastností roztaveného koria

Induction heating technology in the cold crucible and
chemical properties of molten corium determination

Autor:

Matej Leško

Studijní program:

Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Prehradný, Ph.D.

PRAHA 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Leško** Jméno: **Matej** Osobní číslo: **492643**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technologie indukčního ohřevu ve studeném kelímku a určení chemických vlastností roztaveného koria

Název bakalářské práce anglicky:

Induction heating technology in the cold crucible and chemical properties of molten corium determination

Pokyny pro vypracování:

1. Popište technologii studeného kelímku a specifikujte, k čemu slouží
2. Popište klíčové vlastnosti roztaveného koria
3. Zaměřte se konkrétně na fyzikální vlastnost - viskozitu
4. Popište princip měření viskozity
5. Popište využití přístroje a principy měření viskozity na nich
6. Navrhněte experimentální plán validace vyvíjeného prototypu viskozimetru
7. Proveďte sérii měření dle experimentálního plánu
8. Vyhodnoťte naměřená data
9. Vše přehledně shrňte v bakalářské práci

Seznam doporučené literatury:

- [1] Didier Jacquemain, Ahmed Bentaïb, Hervé Bonneville, Gérard Cénérino, Bernard Clément, François Corenwinder a kol., Nuclear Power Reactor Core Melt Accidents - Current State of Knowledge, Francie: IRSN 2015, 2015.
[2] J. G. J.M. Seiler, „Viscosities of corium–concrete mixtures,“ Nuclear Engineering and Design, vyd.178, pp. 259-268, 1997.
[3] G. C. F. Sudreau, „Corium viscosity modelling above liquidus temperature,“ Nuclear Engineering and Design, vyd.178, p. 269–277, 1997.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Prehradný, Ph.D. ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Jan Štěpánek, Ph.D. ústav energetiky FS

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Jan Prehradný, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma: „Technologie indukčního ohřevu ve studeném kelímku a určení chemických vlastností roztaveného koria“ vypracoval samostatně a jako podklady mi sloužila literatura uvedená v seznamu na konci bakalářské práce a moje vlastní měření.

V Praze dne

.....

Matej Leško

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé práce, Ing. Janu Prehradnému, Ph.D. za jeho rady, čas a přístup při tvoření této práce. Děkuji také Ing. Janu Štěpánkovi Ph.D. za pomoc při měření a zpracování dat. Děkuji také Ústavu Energetiky za poskytnutý prostor pro moje měření. Poděkovat bych chtěl také mé rodině za neustálou podporu ve všech směrech. Ještě jednou Vám všem děkuji, bez Vás by tato práce nemohla vzniknout.

Anotační list

Jméno autora:	Matej Leško
Název BP:	Technologie indukčního ohřevu ve studeném kelímku určení chemických vlastností roztaveného koria
Rok:	2022
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav Energetiky
Vedoucí práce:	Ing. Jan Prehradný, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 63 Počet obrázků: 20 Počet grafů: 18 Počet tabulek: 11 Počet příloh: 1

Anotace

Úlohou této bakalářské práce je experimentálně ověřit princip měření viskozity za použití míchadla s 2 excentricky uloženými čepy. Práce vzniká jako pomocný materiál pro pracovníky výzkumného ústavu CVŘ Řež, kteří tímto způsobem plánují měřit viskozitu tekutého koria. Práce obsahuje teoretickou část, kde jsou vysvětleny základní pojmy, které s problematikou souvisejí a praktickou část ve které se vyhodnocují naměřená data pomocí prototypu viskozimetru.

Klíčová slova: Korium, studený kelímek, viskozimetr

Annotation list

Name of the author:	Matej Leško
Bachelor thesis:	Induction heating technology in the cold crucible and chemical properties of molten corium determination
Year:	2022
Study program:	B2342 Theoretical Fundamentals of Mechanical Engineering
Specialization:	2301R000 without specialization
Department:	Department Energy engineering
Thesis supervisor:	Ing. Jan Prehradný, Ph.D.
Consultant:	Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.
Bibliographic data:	Number of pages: 63 Number of pictures: 20 Number of graphs: 18 Number of tables: 11 Number of attachments: 1

Annotation

The aim of this bachelor thesis is experimental verification of viscosity measurement using a stirrer with 2 eccentrically mounted pins. The work is created as an auxiliary material for the staff of the research institute CVŘ Řež. They plan to use this system for viscosity measurement of liquid corium. The thesis contains a theoretical part, which explains the basic concepts that are related to the issue and a practical part in which the measured data obtained from the viscometer prototype are evaluated.

Keywords: Corium, cold crucible, viscometer

Obsah

Úvod	10
1. Kapitola: Vysvětlení základních pojmů	12
1.1. Studený kelímek	12
1.1.1. Použití technologie studeného kelímku	14
1.1.2. Matematické modelování studeného kelímku	16
1.1.3. Výhody a nevýhody studeného kelímku	17
1.2. Korium	18
1.2.1. Těžké jaderní havárie a vznik koria	19
1.2.2. Únik koria z tlakové nádoby	20
1.2.3. Lapač koria	21
1.2.4. Vlastnosti roztaveného koria	21
1.3. Dynamická viskozita	22
1.3.1. Rozdělení kapalin	24
2. Kapitola: Měření viskozity	25
2.1. Druhy viskozimetrů	25
2.2. Referenční viskozimetr	30
2.2.1. Základní údaje viskozimetru	30
2.3. Prototyp viskozimetru	31
2.3.1. Stavba viskozimetru	32
2.3.2. Popis ohřívací sestavy	33
2.3.3. Popis sestavy viskozimetru	34
2.3.4. Popis sestavy měřící úhel zkrutu	35
3. Kapitola: Experimentální měření	37
3.1. Použité roztoky	37
3.1.1. Vlastnosti kapalin	37
3.2. Metodika měření	38
3.2.1. Příprava roztoků	38
3.2.2. Měření na referenčním viskozimetru	39
3.2.3. Měření na prototypu viskozimetru	40
3.2.4. Chyby ovlivňující měření	42
4. Kapitola: Zpracování dat	43
4.1. Matematický model prototypu	43
4.2. Vyjádření konstant E a B	46
4.3. Výsledky měření	46

5. Závěr.....	48
Bibliografie	50
Příloha	52

Seznam obrázků

obr. 1 Schéma studeného kelímku	13
obr. 2 Reální model studeného kelímku	13
obr. 3 Korium ve studeném kelímku	14
obr. 4 Schéma tlakovodního reaktoru PWR	19
obr. 5 Graf závislosti kinematické viskozity na dynamické	22
obr. 6 Tečné napětí v newtonovské kapalině	23
obr. 7 Grafy závislosti smykového napětí a dynamické viskozity na smykové rychlosti	24
obr. 8 Englerův viskozimetr	26
obr. 9 Kapilární viskozimetr	26
obr. 10 Kuličkový viskozimetr	28
obr. 11 Rotační viskozimetry	29
obr. 12 Měřicí sestava Viscotester 3	31
obr. 13 Celá měřicí sestava	32
obr. 14 Ohřívací sestava	33
obr. 15 Sestava viskozimetru	34
obr. 16 Sestava měřicí úhel zkrutu	35
obr. 17 Odměrný válec s namíchaným 40 % roztokem glycerinu s vodou	39
obr. 18 Odlévání roztoku do skladovací láhve	39
obr. 19 Data měřená prototypem	41
obr. 20 Fotka při měření vodního roztoku glycerinu	41

Seznam rovnic

Rovnice 1 Reakce zirkonu s vodou, jednotkou je MJ na kg Zirkonu	20
Rovnice 2 Tečné napětí mezi paralelními deskami	23
Rovnice 3 Odporová síla kapaliny	23
Rovnice 4 kinematická viskozita	23
Rovnice 5 Vztah pro výpočet dynamické viskozity v kapilárním viskozimetru	26
Rovnice 6 Stokesův vztah pro padající kuličku v tělískovém viskozimetru	27
Rovnice 7 Zkrut na torzním senzoru	29
Rovnice 8 Odporová síla kapaliny	43
Rovnice 9 Plocha čelního průmětu čepu	43
Rovnice 10 Tečná rychlost	44
Rovnice 11 Odporový moment působící na pružinu	44
Rovnice 12 Úhel zkrutu	44
Rovnice 13 Zavedení odhadu vztahu mezi Re a odporovým koeficientem	44
Rovnice 14 Reynoldsovo číslo	45
Rovnice 15 Zavedení konstanty G	45
Rovnice 16 Vyjádření dynamické viskozity	45
Rovnice 17 Korekce konstanty E	46

Seznam grafů

graf 1 Měření viskozity slunečnicového oleje, n=102 ot/min	52
graf 2 Relativní odchylky při měření viskozity slunečnicového oleje, n=102 ot/min	52
graf 3 Měření 80 % vodního roztoku glycerínu, n=102 ot/min	53
graf 4 Relativní odchylky při měření 80 % vodního roztoku glycerínu, n=102 ot/min	53
graf 5 Měření 50 % vodního roztoku glycerínu, n=100 ot/min	54
graf 6 Relativní odchylky při měření 50 % vodního roztoku glycerínu, n=100 ot/min	54
graf 7 Měření 40 % vodního roztok glycerínu, n=102 ot/min	55
graf 8 Relativní odchylky při měření 40 % vodního roztok glycerínu, n=102 ot/min	55
graf 9 Měření 40 % vodního roztoku glycerínu, n=122 ot/min	56
graf 10 Relativní odchylky měření 40 % vodního roztoku glycerínu, n=122 ot/min	56
graf 11 Měření 40 % vodního roztoku glycerinu, n=131 ot/min	57
graf 12 Relativní odchylky měření 40 % vodního roztoku glycerinu, n=131 ot/min	57
graf 13 Měření 40 % vodního roztoku glycerínu, n=138 ot/min	58
graf 14 Relativní odchylka měření 40 % vodního roztoku glycerínu, n=138 ot/min.....	58
graf 15 Měření 40 % vodního roztok glycerínu, n=147 ot/min	59
graf 16 Relativní odchylka měření 40 % vodního roztok glycerínu, n=147 ot/min.....	59
graf 17 Konstanta F [m/s] v závislosti na celkové relativní odchylce [%].....	60
graf 18 Konstanta E [rad/N] v závislosti na celkové relativní odchylce [%]	61

Seznam tabulek

Tabulka 1 Základní údaje referenčního viskozimetru.....	30
Tabulka 2 Měření viskozity slunečnicového oleje, n=102 ot/min	52
Tabulka 3 Měření 80 % vodního roztoku glycerínu, n=102 ot/min.....	53
Tabulka 4 Měření 50 % vodního roztoku glycerínu, n=100 ot/min.....	54
Tabulka 5 Měření 40 % vodního roztok glycerínu, n=102 ot/min.....	55
Tabulka 6 Měření 40 % vodního roztoku glycerínu, n=122 ot/min.....	56
Tabulka 7 Měření 40 % vodního roztoku glycerinu, n=131 ot/min.....	57
Tabulka 8 Měření 40 % vodního roztoku glycerínu, n=138 ot/min.....	58
Tabulka 9 Měření 40 % vodního roztok glycerínu, n=147 ot/min.....	59
Tabulka 10 Iterace konstanty B.....	60
Tabulka 11 Iterace konstanty E	61

Úvod

Experimentální množivý reaktor EBR-1 byl jaderní reaktor, ze kterého se dne 20. prosince 1951, poprvé podařilo odebrat elektrickou energii, která napájela 4 sériově zapojené 400 wattové žárovky. Další den už stabilně vytvořil 100 kilowattů el. energie, čím dokázal sám napájet celou budovu, ve které byl postaven. Toto však nebylo jediné prvenství, kterého ve svém relativně krátkém životě dosáhnul. Mezi jedno z nejdůležitějších patří také incident z 29. listopadu 1955, kdy se během nedorozumění mezi vědci a techniky urychlilo zasouvání palivových tyčí do reaktoru a za 2 vteřiny se částečně roztavily. Tento incident nám ukázal míru nestability reaktoru a také rychlost a nebezpečí reakcí, které jej pohání. [1], [2]

Bohužel tato nehoda nebyla poslední a postupně ji následovalo několik dalších, z kterých nejznámější a nejničivější byly: Three Mile Island, Černobyl a Fukušima. Tyto havárie mimo jiné způsobily mnoho ztrát na lidských životech, znečištění přírody, přesídlení obyvatel a mnoho dalších problémů. Z každé z nich jsme se však poučili, a postupem času byl kladen stále větší důraz na bezpečnost jaderných elektráren. Žádné technologické řešení však není bezchybné a lidský faktor nebude možné v dohledné době zcela vyloučit, takže při platnosti Murphyho zákona: „Všechno, co se může pokazit, se pokazí“, je nutno s jistotou konstatovat jediné, že v budoucnu dojde k dalším jaderným haváriím. [3]

S postupným růstem a bohatnutím populace a ekonomiky rostou také požadavky na výrobu elektřiny a její cenu. Toto pořád větší množství energie je potřebné přepravovat v rozvodné síti, a tím se zvyšují technologické nároky na její stabilitu a udržitelnost. Kvůli globálnímu oteplování se v posledních letech kladou výrazné nároky na dekarbonizaci celého energetického sektoru. Pro uspokojení těchto požadavků je nutné zajistit stabilní zdroj velkého množství elektrické energie, který bude produkovat malé množství emisí. Jaderné elektrárny jsou skvělým řešením pro všechny tyto problémy, a proto je obtížné, představit si jakýkoliv budoucí energetický mix bez nich.

Z předešlých dvou odstavců tak vyplývá, že jaderné elektrárny budou i nadále potřebné k výrobě dostatečného množství elektrické energie, která bude splňovat náročná kritéria, a že při jejich provozu bude nadále docházet k jaderným haváriím. Jediným východiskem je tedy zvyšování bezpečnosti, získávání poznatků a zkušeností o jejich provozu a chybách, které se při něm vyskytují.

To je také náplní této práce, která vznikla jako pomocné dílo při výzkumné práci pracovníků CVŘ Řež v oblasti jaderní bezpečnosti.

V práci je vysvětleno, proč není možné použít volně dostupné komerční viskozimetry a proč je nutné vyvíjet nový princip měření viskozity korium.

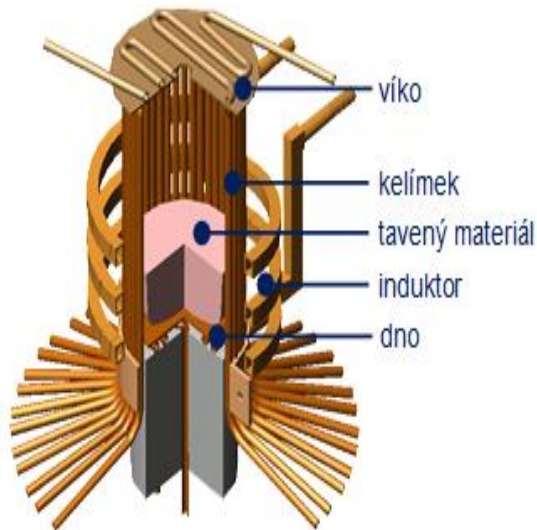
Struktura práce je organizována do 5 kapitol. Její součástí je objasnění základních pojmů na pochopení dějů probíhajících při těžkých jaderných haváriích. Popisuje korium, jeho základní vlastnosti, problematiku jejich měření a také mechanismus jeho vzniku. V experimentální části byli naměřené a zpracovaná data pomocí referenčního viskozimetru a prototypu viskozimetru, který byl sestrojen Ing. Janem Štěpánkem Ph.D. V závěru jsou shrnuty výsledky měření a je popsána funkčnost a přesnost prototypu viskozimetru.

1. Kapitola: Vysvětlení základních pojmů

Tato experimentální bakalářská práce má pomoci s velmi komplexní problematikou zjišťování vlastností koria. Ta úzce souvisí s jadernou bezpečností. Při opise takto složitých dějů je důležité definovat a popsat základní pojmy, jevy, technologie a vlastnosti.

1.1. Studený kelímek

Studený kelímek je moderní zařízení, které používá princip magnetické indukce na ohřev nebo tavení různých materiálů. Typicky je tvořen ze 2 základních částí, a to ze sestavy dutých trubek a induktoru. Přes trubky kontinuálně protéká chladící médium, kterým je ve většině případů studená voda, a jsou uspořádané tak, aby tvořili plášť válcové nádoby. Dno a víko této nádoby jsou typicky samostatné součásti, přes které přecházejí samostatní chladící kanálky. V některých případech jsou trubky uspořádány do tvaru válce s podstavou, no vršek je i v této konstelaci tvořen samostatní částí. Tento plášť slouží na ohraničení prostoru, ve kterém se nachází tavený materiál. Okolo tohoto systému se navíjí cívka induktoru, která vytváří proměnlivé vířivé magnetické pole. Pomocí tohoto pole se v materiálu indukuje teplo, které ho ohřívá. Mezi cívkou a trubkami je vzduchová mezera. [4], [5]

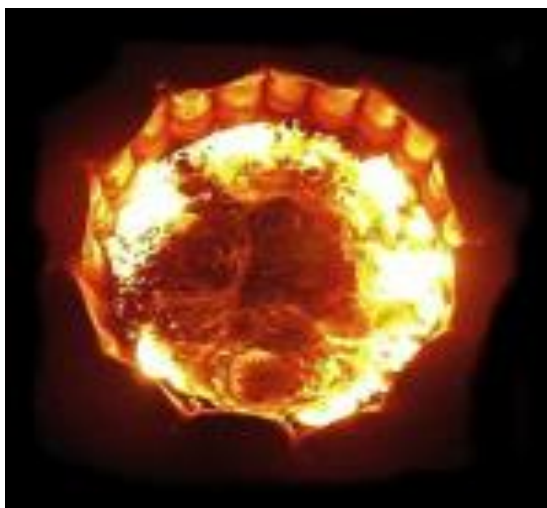


obr. 1 Schéma studeného kelímku [25]



obr. 2 Reální model studeného kelímku [8]

Hlavní výhoda tohoto zařízení spočívá v tom, že se ohřev odehrává přímo v taveném materiálu. Ten je umístěn v kelímku a magnetická indukce jej zahřívá od jeho jádra směrem k jeho povrchu. Tento proces probíhá tak, že se celá centrální oblast roztaví a okolo něj se vytvoří tenká vrstva tuhé fáze, která se dotýká nádoby studeného kelímku. Trubky jsou intenzivně vnitřně chlazené, a proto mají na povrchu poměrně nízkou teplotu. Roztavená část látky, která se dotkne vnitřní strany nádoby, je trubkami chlazená tak intenzivně, až začne opět tuhnout. Tímto principem vzniká na povrchu taveniny tuhá křusta, která se mezi roztaveným materiálem a stěnami kelímku chová jako tenká izolační vrstva. Tato křusta také vytváří nádobu, ze které nemůže tavenina vytéct. To je důvod, proč mohou být mezi jednotlivými chladícími trubkami vzduchové mezery. Pevná vrstva nabývá obvykle tloušťku v řádu desetin až jednotek milimetrů. Díky ní je možné dosahovat vysokých teplotních gradientů, kdy teplota taveniny může narůstat až na hodnoty blížící se 3000 °C, přičemž si vnitřní strana kelímku udržuje konstantní teplotu kolem 50 °C. [5]



obr. 3 Korium ve studeném kelímku [25]

1.1.1. Použití technologie studeného kelímku

Tato technologie se v dnešní době využívá spíše v menších měřících a kapacitách. Je určena hlavně pro speciální aplikace, jakými může být výzkumná a experimentální činnost. Důvodem je technologická složitost výroby takového zařízení a jeho vysoká pořizovací cena. [4]

Mimo vědy se využívá hlavně na:

1. Zpracování radioaktivních látek
2. Zpracování vysoce čistých a reaktivních kovů a slitin
3. Tavení skla a oxidů

1. Zpracování radioaktivních látek:

Jak bylo uvedeno v úvodu, jaderné elektrárny budou v blízké budoucnosti nenahraditelné, a proto je potřeba řešit problematiku radioaktivního odpadu, který svou činností produkuje. Je potřebné jej recyklovat, nebo zpracovat do méně nebezpečné formy. Následně je nutné odpad převést a uskladnit v místech, které jsou na to určené. Jedním ze způsobů takového zpracování je vitrifikace. Tento proces z něj dokáže oddělit nejnebezpečnější složky s dlouhým poločasem rozpadu. Jaderný odpad se smíchá se sklotvořící chemikálií a následně se v studeném kelímku zahřeje na požadovanou teplotu. Výsledným produktem je odpadové sklo. To se už dá skladovat, přenášet a až na tento účel vznikne vhodné zařízení, také likvidovat. [6], [7]

2. Zpracování vysoce čistých a reaktivních kovů a slitin:

Studený kelímek se vyznačuje vysokou korozní odolností. Je také možné ho vložit do uzavřeného prostoru. Tento prostor se pak naplní ochrannou atmosférou, nebo se z něj vysaje vzduch, čímž vznikne vakuum. To umožňuje řešení problémů jako jsou: vysoká reaktivita zpracovaného materiálu, náchylnost tohoto materiálu na vznik koroze, nebo požadavek na chemickou čistotu výsledného produktu. Tato metoda je proto velmi dobře použitelná při zpracování vysoce čistých kovů a slitin jako jsou: titan, tantal, niob a molybden. V této spojitosti se používá také při výrobě velkých krystalů čistého křemíku a multikrystalických křemíkových ingotů, které jsou základním materiálem pro stavbu solárních článků. [7]

3. Tavení skla a oxidů

Typické vlastnosti oxidů a křemičitých skel jsou vysoké teploty tavení a nízká schopnost vedení elektrického proudu při nízkých teplotách. Tyto izolanty se musí nejprve přehřát na takovou teplotu, při které je možné dosáhnout přenos energie z indukční cívky přímo na materiál. Pak se však využívá vysoká ochrana vůči korozi, kterou studený kelímek poskytuje, a tím se dosahují větší čistoty výsledných produktů. Toto řešení se používá také při zpracování fosfátových skel, protože jsou při vysokých teplotách ve vztahu s kovy náchylné na korozi. [7]

1.1.2. Matematické modelování studeného kelímku

V průmyslu existují značné požadavky na implementaci technologie studeného kelímku pro různé specifické použití, zpravidla jsou hodně obtížně splnitelné, protože se mnohdy jedná o aplikace při vysokých teplotách. Při těchto aplikacích vznikají složité turbulentní magnetické a tekutinové víry. Z důvodu nedostatku experimentálních dat, je matematické modelování dobrý způsob, jak získat poznatky o těchto dějích. [5]

Tento model musí záviset na mnoha procesech, které se vzájemně ovlivňují a probíhají ve stejném čase. Při ohřeve vsázky je nutné uvažovat o konduktivní distribuci tepla v jejím vnitru, a také o změně její fáze. Dále je zapotřebí v modelu zahrnout silné elektromagnetické děje, které se odehrávají mezi tavenou látkou, kelímkem a cívkou. Ty pak v tavenině vyvolávají turbulentní proudy. V důsledku intenzivního ohřevu dochází k velkému teplotnímu gradientu, který vzniká mezi taveninou, krustou a stěnami kelímku. Toto teplo, které se dostane k trubkám je pak odvedeno chladícím médiem. [5], [8]

Dalším velkým problémem je nastavení sítě, která popisuje časově proměnnou geometrii tavené látky. Její okamžitý tvar je rovnováhou gravitačních, elektromagnetických a setrvačných sil, které vznikají v roztavené části vsázky. Dále je závislá na fázi látky a jejích vlastnostech. Zejména se jedná o její viskozitu a povrchové napětí. [5], [8]

Když se vytvoří dobrá síť, do které se zahrnou všechny výše uvedené děje, je možné celý proces optimalizovat. Takto je možné zlepšit kvalitu výrobků, volit vhodnou frekvenci, kterou je buzeno proměnlivé magnetické pole, snížit trvání celého děje a cenu konečného výrobku. Tímto se dosahuje větší využitelnosti a dostupnosti tohoto způsobu zpracování materiálů. [8]

1.1.3. Výhody a nevýhody studeného kelímku

Studený kelímek je poměrně nové zařízení, které je dobře použitelné ve specifických odvětvích. Pro lepší opis vlastností a důvodů využívání této technologie je nutné znát její výhody a nevýhody.

Výhody:

- Dosahování teplot až okolo 3000 °C. To umožňuje tavit látky s vysokým bodem tání. [5]
- Je zajištěná vysoká čistota procesu, tavená látka se nemísí s materiálem kelímku. Kelímek je intenzivně vnitřně chlazen, a proto se netaví. Často se také z důvodu zajištění nereaktivního prostředí nasytí atmosféra inertním plynem nebo se odsaje vzduch, což zapříčiní vznik vakua. [4]
- Celý proces dosahuje vysoké účinnosti, protože se vytváří izolační vrstva, která redukuje tepelné ztráty. V principu také platí, že čím má tavená látka větší měrný elektrický odpor, tím se zvyšuje efektivita. [4]
- V důsledku proměnlivého magnetického pole vzniká v celé tavenině turbulentní proudění, čím se promíchává, a tím se dosahuje lepší homogenity výrobku. [8]
- Široké nasazení. Tato technologie se dá využít ve vědě. Díky bezdotykovému ohřívání je možné cenově výhodně tavit také materiály jako je kovový šrot. Tato metoda se využívá také na tvorbu skla, růst krystalů a zpracování jaderného odpadu. [4]
- Při vitrifikaci se jaderní odpad nemísí s materiálem kelímku, a proto v konečném důsledku vzniká méně odpadu. Při použití kontaktních elektrod dochází ku znehodnocení jejich materiálu, a proto je jich po opotřebení nutné zařadit do radioaktivního odpadu. [6]
- Je možné odlévat kvalitní odlitky bez bublin.
- Je možné zkoumat vlastnosti koria a jiných radioaktivních látek.
- Je to relativně tichý proces. [4]

Nevýhody:

- Při tavení materiálů s nižším měrným odporem klesá účinnost.
- Při tavení elektricky nevodivých materiálů je nutno použít startovací metodu jako je například přímý přehřev. [7]
- Kvůli časové a výpočetní náročnosti modelování matematického modelu, je obtížné tento proces optimalizovat. [5]
- Vysoké pořizovací náklady, složitá výroba a poměrně náročná údržba. [4]
- Vysoká spotřeba chladicího média z důvodu intenzivního chlazení trubek kelímku. [4]
- Nebezpečí exploze nebo vylití taveniny. Při nekontrolovaném přívodu výkonu je možné že se krusta naruší a tavenina se vyleje ven z oblasti kelímku. [4]

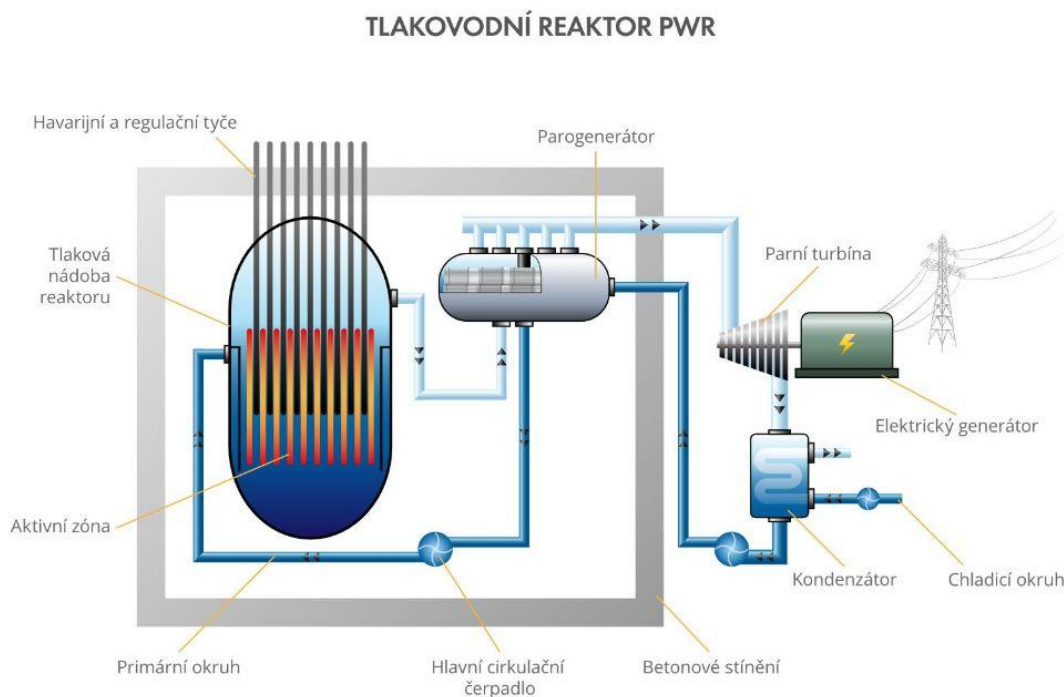
1.2. Korium

Korium je směs, která vzniká při těžkých jaderných haváriích roztavením palivových tyčí v reaktoru. Zpravidla je nemožné, aby bylo chemicky čistou látkou. Ve dvoufázovém stavu (kapalná – tuhá fáze) má vysokou teplotu v rozmezí 1400-3000 °C, a proto je mimořádně reaktivní. Velkou část jeho složení tvoří palivové tyče reaktoru a jejich oxidy UO_2 a ZrO_2 . Typicky se v něm nachází také železo, zirkon a štěpné produkty. Svou vysokou teplotou taví většinu materiálů, se kterými přijde do kontaktu a následně se s nimi mísí. Definovat jeho přesné složení je obtížné, protože se mění podle látek, se kterými se dostává do styku. [9], [10], [11]

Experimentální ověření jeho viskozity je velmi důležité z několika důvodů. Viskozita je fyzikální vlastnost, která se často používá při simulování výtoku korium z nádoby reaktoru při těžkých haváriích, kdy dochází k uvolnění velkého množství radiace. Pro řešení těchto případů je nutné vědět, jak se bude korium chovat. Zejména jak bude disipovat teplo, jak rychle se na jeho povrchu vytvoří pevná fáze, která mu zabrání tavit všechno ve svém okolí a dále se rozlékat. Proto je výhodné změřit přesné hodnoty viskozity a nespolehat se jenom na hodnoty získané ze simulací. [11], [12]

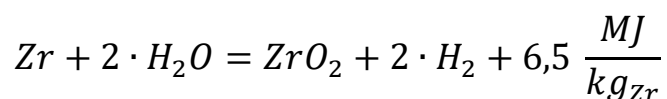
1.2.1. Těžké jaderní havárie a vznik korozie

V reaktoru tlakovodní jaderné elektrárny se štěpením jader těžkých prvků získává energie. Palivové tyče zde těmito reakcemi generují tepelný výkon, čímž se zahřívají a emitují teplo. Při běžném provozu jsou zcela ponořené v kapalině, která je pod vysokým tlakem. Tato kapalina neustále cirkuluje v primárním okruhu, čímž odebírá tepelný výkon z palivových tyčí a následně jej odevzdává v tepelném výměníku (parogenerátoru) médiu, které cirkuluje v sekundárním okruhu. To se mění na páru a je vedeno na turbínu, kterou roztáčí. Tento rotační pohyb se dále přes hřídel vede na generátor, který se točí a vyrábí elektrickou energii. [13]



obr. 4 Schéma tlakovodního reaktoru PWR [13]

Při těžké jaderné havárii dochází k výraznému poškození aktivní zóny jaderného reaktoru, což se projevuje v částečném nebo úplném roztavení palivových tyčí. Tyto situace nastávají v případech, kdy dochází k chybě v cirkulaci chladicího média v primárním okruhu. Po ní se sníží úroveň chladicího média, a tím se částečně, nebo úplně odhalí palivové tyče. Následně se začnou přehřívat. Při provozních podmínkách dosahuje zirkonový obal maximální teploty kolem 350 °C. Při 700-900 °C dochází ke ztrátě jeho mechanických vlastností a následně k jeho prasknutí, přičemž z paliva unikají štěpné produkty o teplotě okolo 1200 °C. Zirkonový plášť dále při kontaktu s horkou parou, která vznikla vypařováním chladicího média, oxiduje za vzniku oxidu zirkoničitého a vodíku. Řídí se podle rovnice:



Rovnice 1 Reakce zirkonu s vodou, jednotkou je MJ na kg Zirkonu

Tato chemická reakce je výrazně exotermická. Uvolňuje se při ní velké množství tepla a vzniká vysoce vznětlivý vodík, který může při určitých okolnostech vybuchnout. Tyče při roztavení zirkonového obalu ztrácí svoji pevnost a hrouť se. Když teplota v nádobě dosáhne 2800 °C, začne se tavit oxid uraničitý a vzniká korium. [14]

1.2.2. Únik koria z tlakové nádoby

Směs tuhých částí palivových tyčí s postupně se tavícím koriem, se vlivem gravitace pomalu přibližuje ke dnu reaktoru. Když jej dosáhne, tak je jeho protržení otázkou desítek minut až několika hodin. Tento čas závisí na množství koria, vlastnostech nádoby, funkčnosti chladicího systému a množství vody, která v reaktoru zůstala. [14]

Po protavení nádoby uniká do prostředí velké množství radiace, korium se přitom nezastavuje a dále reaguje s betonem, který se nachází pod reaktorem a postupně se přes něj prožírá. Toto představuje velký problém, protože se takto může dostat až do zeminy, kde může otrávit spodní vodu a způsobí ekologickou katastrofu. Proto se tomuto procesu snažíme zabránit. [14]

1.2.3. Lapač koria

Jeden ze způsobů, jakým se dá zabránit situaci uvedené výše je takzvaný lapač koria. Toto zařízení se umísťuje do spodní části tlakové nádoby nebo přímo pod ní. Jeho úlohou je zachytit a zchladit korium tak, aby se na jeho povrchu vytvořila pevná vrstva, která zastaví jeho pohyb a bude také působit jako izolant mezi okolním prostředím a teplou taveninou. Tímto se omezí intenzivní přestup tepla mezi korie a prostředím. Omezí se také únik radioaktivity, a tím se předejde větším škodám. Tento lapač funguje jako velký bazén, ve kterém se korium zalije vodou, rozprostře se a zvětší svůj povrch. Tímto se urychlí ochlazování povrchové vrstvy a vytváření krusty. [11] , [15]

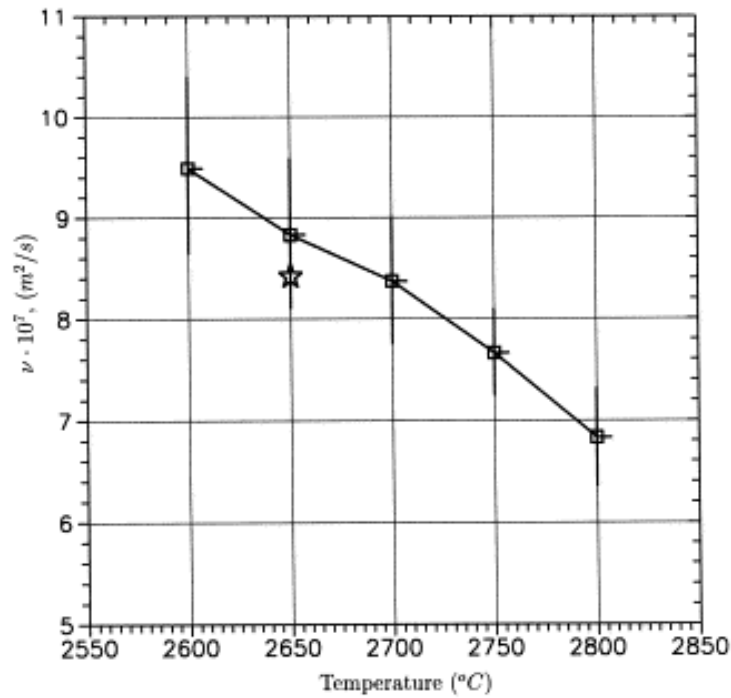
Pro modelování lapače je zásadní znát přesnou hodnotu viskozity, protože ovlivňuje rychlost vytvoření pevné fáze na povrchu tekutého koria. Na viskozitě také závisí uvolňování tepla z taveniny, a především rychlost jakou dokáže téct. [11], [12]

1.2.4. Vlastnosti roztaveného koria

Korium je radioaktivní látka, která má v kapalně fázi vysokou teplotu. To dělá jeho experimentální měření mimořádně náročné a vyžaduje použití žáruvzdorných materiálů s vysokou teplotou tavení. Často se pro tyto účely používá wolfram.

Z těchto důvodů je dostupných poměrně málo dat o vlastnostech koria. Proto se často využívají výpočtové programy, kterými se simuluje chování jeho roztoků v rozdílných případech. [9]

Dalším problémem při zjišťování jeho vlastností je používání rozdílného jaderního paliva v různých elektrárnách, rozdílné koncentrace látek ve směsi koria, jeho míšení s okolními materiály a jeho proměnlivé vlastnosti, které často závisí na souřadnici, času a teplotě. Pro matematické modelování těžkých havárií je nutno znát některé vstupní hodnoty. Mezi nejdůležitější z nich patří kinematická a dynamická viskozita, koeficient objemové roztažnosti a koeficienty používané při výpočtech přestupu tepla.



obr. 5 Graf závislosti kinematické viskozity na dynamické [9]

Z grafu je možno vyčíst konkrétní hodnoty kinematické viskozity pro vzorek koria C-100 ($62\text{UO}_2+38\text{ZrO}_2$, %), a také, že se kinematická viskozita pohybuje kolem 7 až $9 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Pro porovnání, kinematická viskozita vody je $1,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ a glycerinu $1,314 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. [9]

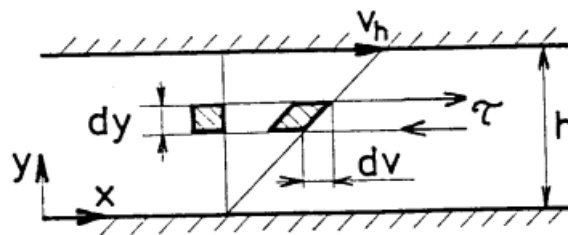
1.3. Dynamická viskozita

Kapalina je látka, která se účinkem vnějších sil nevratně deformuje. Nemá stálý tvar, a proto se přizpůsobuje tvaru nádoby, ve které se nachází. Struktura kapalin je tvořená z molekul, které jsou navzájem dostatečně vzdálené na to, aby se mohli volně pohybovat, ale zároveň se silově ovlivňují. Důsledkem jsou různé fyzikální vlastnosti kapalin, jako je například viskozita, hustota a těkavost.

Viskozita je schopnost tekutiny přenášet tečná napětí. Je projevem tření molekul. Tímto mechanismem klade kapalina při změně tvaru odpor. Zapříčiňuje také vznik tečného napětí τ [Pa] mezi jednotlivými proudnicemi a na rozhraní kapaliny s tuhou stěnou. Při laminárním proudění newtonovské tekutiny o rychlosti v [$m \cdot s^{-1}$] mezi dvěma paralelními deskami je možné ji popsat Newtonovým zákonem: [16]

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy}$$

Rovnice 2 Tečné napětí mezi paralelními deskami



obr. 6 Tečné napětí v newtonovské kapalině [16]

Vynásobením této rovnice plochou S [m^2], přes kterou kapalina protéká, získáváme celkovou odporovou sílu F [N], kterou se kapalina brání proti tomuto toku:

$$F = -\mu \cdot \frac{dv}{dy} \cdot S$$

Rovnice 3 Odporová síla kapaliny

Jednotkou dynamické viskozity je Pa·s. Podíl dynamické viskozity a hustoty ρ [$kg \cdot m^{-3}$] tekutiny je kinematická viskozita ν [$m^2 \cdot s^{-1}$] [16]

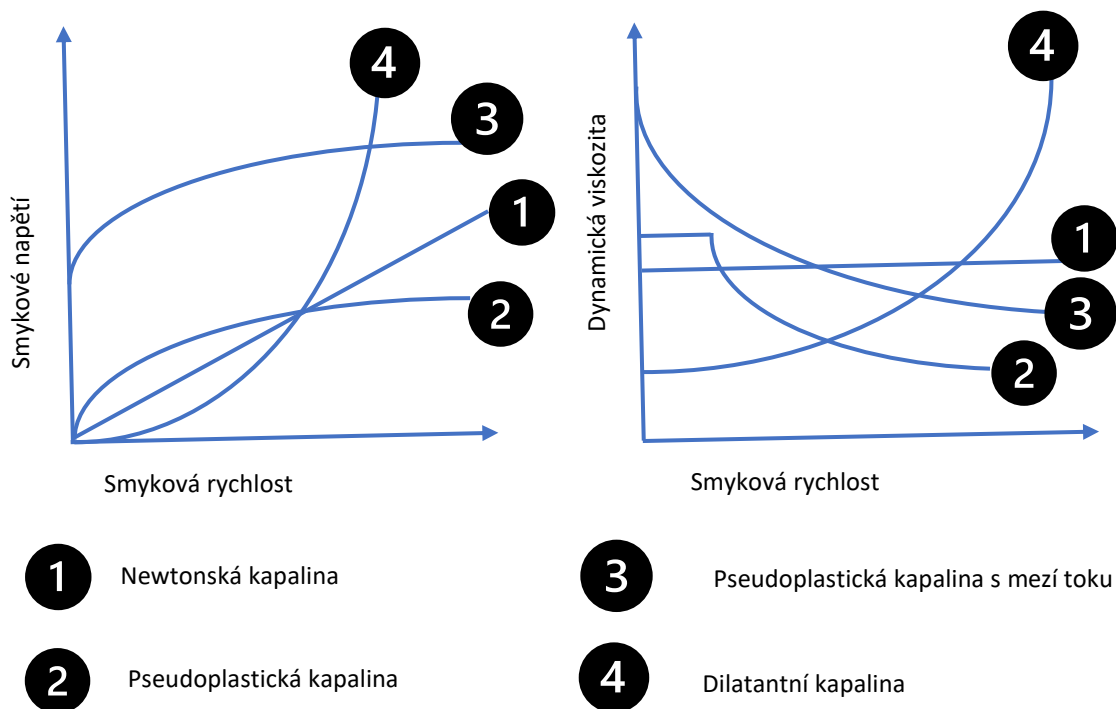
$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Rovnice 4 kinematická viskozita

1.3.1. Rozdělení kapalin

Kapaliny můžeme rozdělit na newtonské a ne-newtonské. Mezi newtonské se řadí homogenní kapaliny tvořené malými molekulami. Smykové napětí roste se zvyšující se rychlostí deformace lineárně, dle rovnice 2. Viskozita nezávisí na změně rychlosti deformace a zůstává konstantní.

Mezi ne-newtonské kapaliny se radí taveniny, disperze, polymery, emulze, pasty apod. Smykové napětí a viskozita jsou v tomto případě funkcí rychlosti smykové deformace. Smykové napětí se s měnící se smykovou deformací nemění lineárně. [17]



obr. 7 Grafy závislosti smykového napětí a dynamické viskozity na smykové rychlosti [17]

2. Kapitola: Měření viskozity

Viskozita byla měřena dvěma odlišnými viskozimetry, které však patří do stejné kategorie viskozimetrů. Pro lepší poznání funkce těchto strojů jsou v této kapitole popsány základní druhy viskozimetrů a jejich vlastnosti. Dále jsou popsány celé měřicí sestavy.

2.1. Druhy viskozimetrů

- Kapilární viskozimetr
- Výtokový viskozimetr
- Tělískový viskozimetr
- Rotační viskozimetr

Kapilární viskozimetr

Jedná se o druh viskozimetru, který se v praxi používá nejčastěji. Jeho použití je jednoduché, umožňuje snadnou tepelnou izolaci. Stačí, když se ponoří do větší nádoby, ve které je kapalina o požadované teplotě. Každé měření si vyžaduje malé množství měřené látky. Je velmi přesný, jeho relativní odchylka se pohybuje v rozmezí od 0,01 do 0,1 %, avšak nemůže být použit pro ne-newtonské kapaliny, neboť gradient rychlosti není konstantní, ale roste se vzdáleností od osy kapiláry. [18], [19]

Nejčastěji je tvořen z rezervoáru měřené kapaliny, systému na tvoření a měření tlaku, izolací, teploměrem a měřicí kapilárou známých rozměrů. Používá se například Ubbelohdeův nebo Oswaldův viskozimetr. [18], [19]

Měření probíhá typicky tak, že se zaznamenává čas, za který kapilárou proteče určitý objem kapaliny. Ten je vyznačen 2 čárkami na odměrné trubici, která se nachází nad kapilárou. Obvykle se nejprve provede měření kapaliny o známé hustotě a viskozitě. Následně se provede stejné měření s kapalinou o neznámé viskozitě. Ta se pak vypočte podle vztahu: [18], [19]

$$\frac{\mu}{\mu_{ref}} = \frac{\tau}{\tau_{ref}} \cdot \frac{\rho}{\rho_{ref}}$$

Rovnice 5 Vztah pro výpočet dynamické viskozity v kapilárním viskozimetru [18]

μ [$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$] je měřená viskozita vzorku

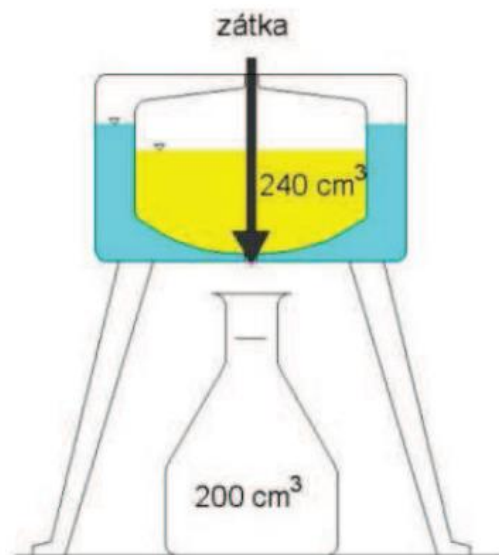
μ_{ref} [$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$] je viskozita referenční kapaliny

τ [Pa] je čas za který protekl vzorek přes kapiláru

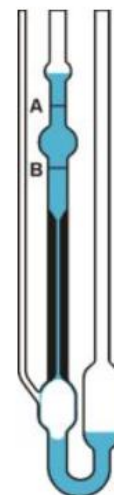
τ_{ref} [Pa] je čas za který protekla referenční kapalina přes kapiláru

ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota vzorku

ρ_{ref} [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota referenční kapaliny



obr. 9 Kapilární viskozimetr [19]



obr. 8 Englerův viskozimetr [20]

Výtokové viskozimetry

Tento typ viskozimetrů je velmi jednoduchý, ale méně přesný než kapilární. Měří na podobném principu, protože se na něm také porovnávají časy výtoku látky o neznáme viskozitě s látkou, která má hustotu a viskozitu známou. [18], [20]

Tento viskozimetr sestává ze zásobníku, plnicího otvoru a kapiláry, která je kratší, ale má větší průměr než ta na kapilárním viskozimetru. Délka této kapiláry je menší, než je pětinašobek jejího průměru. Tento viskozimetr se dá použít jen na stanovení viskozity newtonských kapalin. [18], [20]

Příklady tohoto typu viskozimetru jsou: Redwoodův, Sayboltův a Englerův viskozimetr. [18], [20]

Tělískový viskozimetr

Princip měření tělískovým viskozimetrem spočívá na měření rychlosti pádu tělíška v kapalině. Typicky se jako tělíško používá kulička a viskozita se pak dopočítá ze Stokesova vztahu: [18]

$$6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta_{kap} \cdot v_k = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot (\rho_k - \rho) \cdot g$$

Rovnice 6 Stokesův vztah pro padající kuličku v tělískovém viskozimetru

η_{kap} [Pa·s⁻¹] je viskozita kapaliny

ρ [kg·m⁻³] je hustota kapaliny

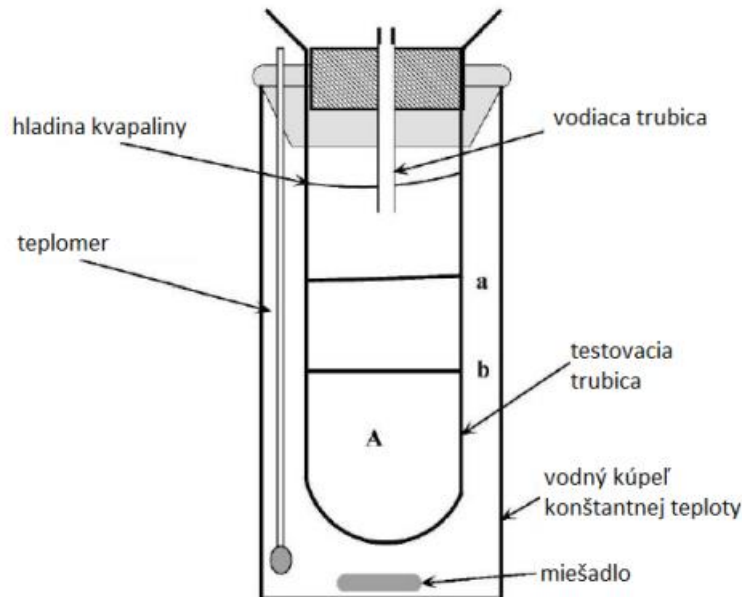
ρ_k [kg·m⁻³] je hustota kuličky

r [m] je poloměr kuličky

g [m·s⁻²] je gravitační zrychlení

v_k [m·s⁻²] je rychlost kuličky

Tato kulička padá v trubici napuštěné zkoumanou kapalinou. Díky tomu, že jsou gravitační, vztlakové a odporové síly v rovnováze je pohyb kuličky rovnoměrný. Teplota kapaliny je udržována konstantní pomocí termostatu. Mezi tento typ viskozimetrů patří Hopplerův viskozimetr. [18], [19]



obr. 10 Kuličkový viskozimetr [20]

Rotační viskozimetr

Rotační viskozimetr sestává z rotačního tělesa a nádoby, ve které je uloženo společně s měřenou kapalinou. Princip jeho funkce je založen na měření kroutícího momentu, který je vytvořen smykovým napětím vznikajícím v kapalině důsledkem rotačního pohybu vnitřního tělesa nebo nádoby. Existují 2 základní druhy rotačních viskozimetrů:

- Couett: otáčí se vnitřní těleso
- Searle: otáčí se vnější válcová nádoba

Dále se v práci pojednává jen o Couettovém typu rotačních viskozimetrů, protože oba viskozimetry použité v experimentální části paří do této kategorie. [18], [19]

Rotující těleso může mít prakticky jakýkoliv rotační tvar, ale nejčastěji se používají disky, válce, duté válce a kužele. Silový moment, který vzniká na hřídeli tělíska při konstantní úhlové rychlosti, způsobuje zkrut na torzním senzoru. Tento úhel se ve vyhodnocovací jednotce přepočítává na viskozitu. Využívá se přitom vztahu:

$$\varphi = K \cdot \mu \cdot \omega$$

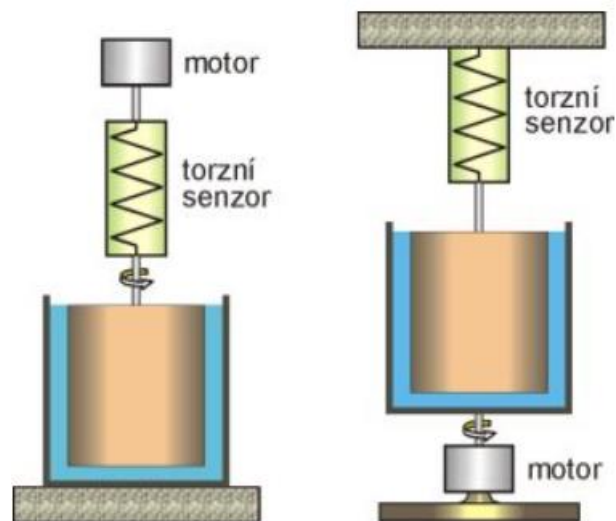
Rovnice 7 Zkrut na torzním senzoru [19]

φ [°] je úhel zkrutu torzního senzoru

K [-] je konstanta typická pro daný viskozimetr a rotační tělísco

Ω [rad·s⁻¹] je uhlová rychlost, kterou se tělísco otáčí

Rotační viskozimetr je propracovanější než jiné druhy viskozimetrů. Mezi jeho výhody patří možnost měření kapaliny při různých uhlových rychlostech a díky tomu je nimi možné měřit i ne-newtonské kapaliny. [18], [19]



obr. 11 Rotační viskozimetry [19]

2.2. Referenční viskozimetr

Kupovaný referenční viskozimetr HAAKE Viscostester 3 je jednoduše ovladatelný automatický přístroj na určování viskozit různých kapalin. Tento viskozimetr sloužil na určení referenčních hodnot viskozity. Tyto sloužily na lepší demonstraci přesnosti měření prototypu. Přesnosti měřených viskozit jednotlivými viskozimetry byly porovnány.

Tento přístroj nemá možnost nastavování rychlosti otáček. Má paměť, která se využívá pro volbu referenční hodnoty viskozity. S touto hodnotou dokáže porovnávat aktuální měřenou viskozitu, a vyhodnocovat, jestli je jejich odchylka v intervalu 10 %. Je možné jej připojit k počítači a stahovat z něj data. Je schopen měřit viskozity v rozsahu $1,5 - 400\,000 \text{ mPa} \cdot \text{s}^{-1}$ s přesností $\pm 5-10 \%$. Pro měření v různých intervalech viskozity se používají různé vyměnitelné rotory. [21]

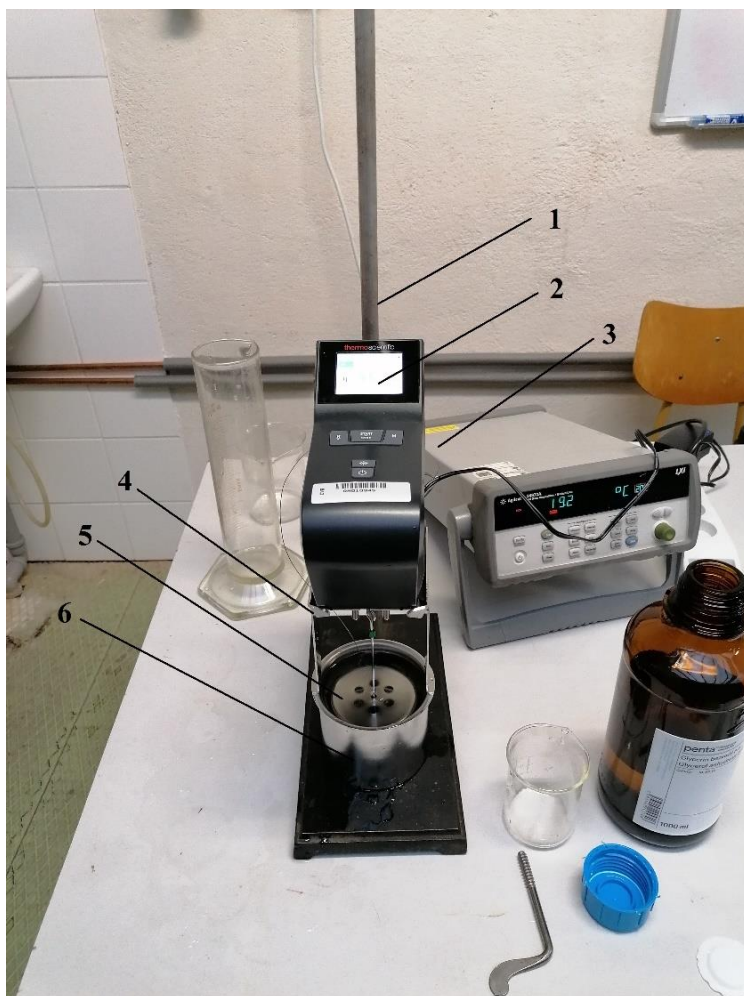
2.2.1. Základní údaje viskozimetru

Tabulka 1 Základní údaje referenčního viskozimetru

Rotor	Průměr [mm]	Výška [mm]	Měřicí rozsah [mPa/s]	Relativní chyba [%]
Rotor č. 3	45,1	47	30 - 1300	$\pm 5 \%$
Rotor č. 4	78	46	1,5 - 33	$\pm 10 \%$
Rotor č. 5	61,2	36	15-150	$\pm 7,5 \%$

Rychlost otáček rotoru je $62,5 \text{ ot/min}^{-1}$. Viskozimetr je možné napájet z elektrické sítě nebo pomocí baterek. Maximální provozní teplota viskozimetru je $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Použitý měřicí kelímek měl průměr 90 mm, výšku 75,5 mm a objem 40 mm. [21]



- 1: Laboratorní stojan
- 2: HAAKE Viscotester 3
- 3: Jednotka měřící teplotu pomocí termočlánku
- 4: Držadlo viskozimetru
- 5: Rotor
- 6: Měřící kelímek

obr. 12 Měřící sestava Viscotester 3

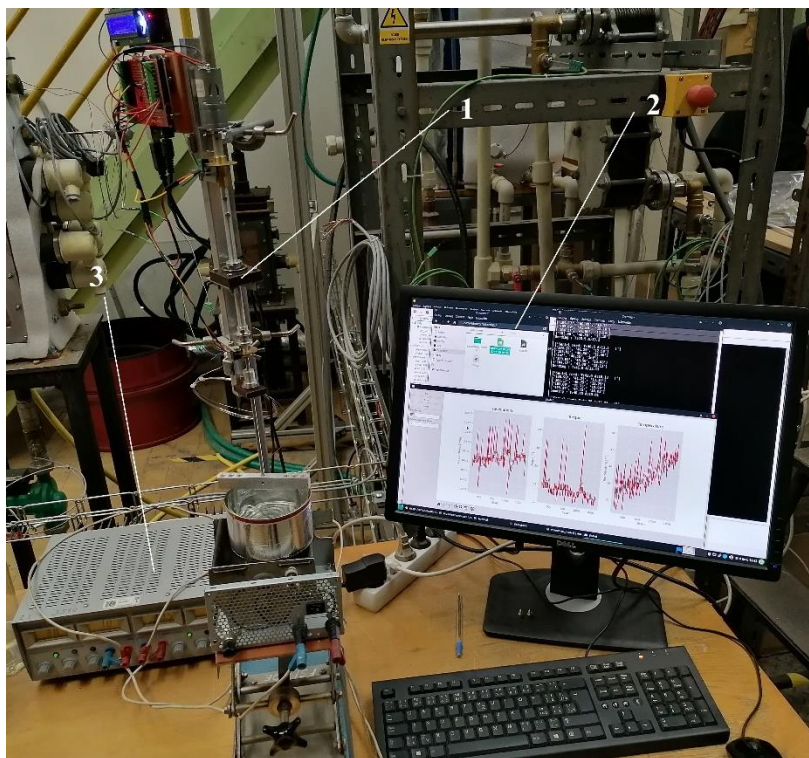
2.3. Prototyp viskozimetru

Princip měření viskozimetru byl zadán z CVŘ Řež. Následně byl viskozimetr navrhnout a zkonstruován Ing. Janem Štěpánkem Ph.D. Jeho úlohou je určit, jestli je možné použít na měření viskozity rotor sestávající ze dvou excentricky uložených čepů.

Tento princip měření viskozity byl navrhnout speciálně pro měření viskozity koria rozpuštěného ve studeném kelímku. Při tomto ději, vlivem silného časově proměnného magnetického pole, vznikají v tavenině turbulentní víry. Tím se tavenina mísí ve směru výšky studeného kelímku. Tyto víry vyrovnávají teplotu v celé tavenině, a proto je nemůžeme narušit. Prostor mezi rotorem a kelímkem by nebyl dostatečně ohříván a tavenina by tu výrazně tuhla. Teplota taveniny je velmi vysoká, a proto bude rotor vyráběn z wolframu. Wolfram je těžce obrobitelný materiál a není možné z něho vyrábět libovolný tvar rotoru. Proto není možné použití komerčních viskozimetrů.

2.3.1. Stavba viskozimetru

Viskozimetr je navrhnut tak, aby mohl v jednu chvíli měřit a zapisovat data do počítače. To umožňuje v průběhu měření sledovat vývoj grafů měřených hodnot a kontrolu správné funkce viskozimetru. Kontrolují se také zapisovaná data.

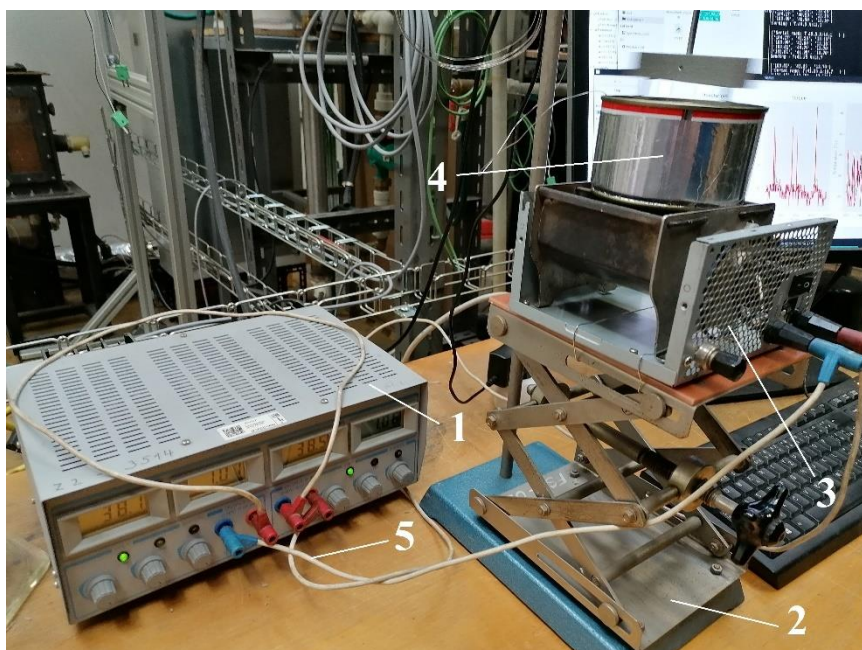


- 1: Sestava viskozimetru
- 2: Počítač
- 3: Ohřívací sestava

obr. 13 Celá měřící sestava

Celá sestava se skládá ze tří základních částí popsaných v legendě obrázku. Sestava viskozimetru měří a posílá údaje do počítače. Ohřívací sestava má za úlohu ohřívat zkoumané roztoky na požadovanou teplotu, měřit ji a posílat tato data po sériové lince USB do počítače pro vyhodnocení.

2.3.2. Popis ohřivací sestavy



- 1: Laboratorní zdroj DC proudu
- 2: Zdvihák
- 3: Topné těleso
- 4: Nádoba na roztoky
- 5: Vodiče

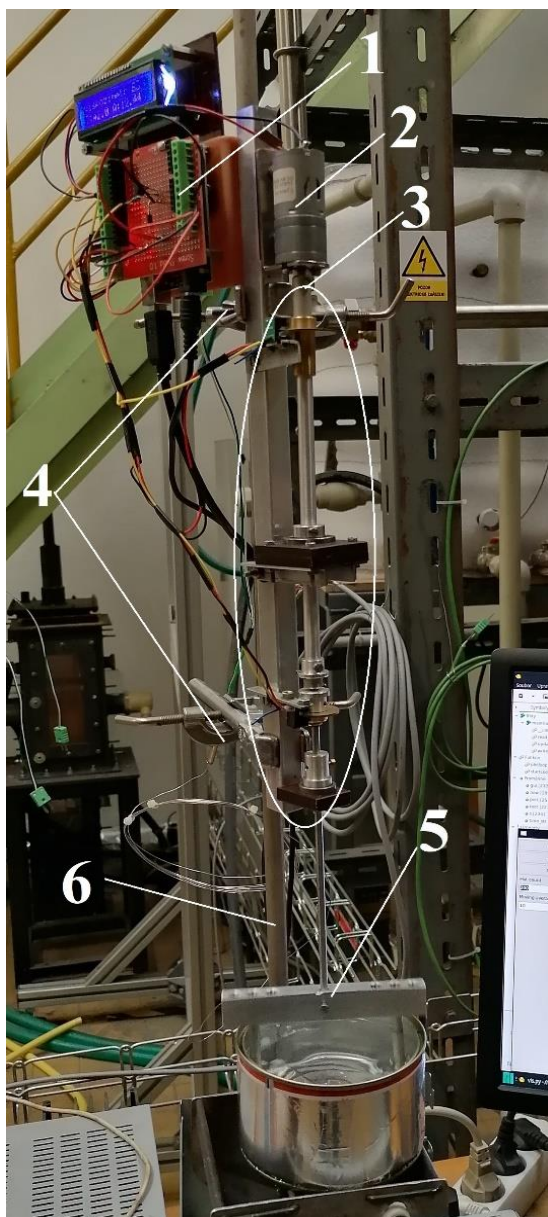
obr. 14 Ohřivací sestava

Laboratorní zdroj DC proudu mění střídavé napětí na stejnosměrné a umožňuje nastavovat velikost proudu, který teče do topného tělesa a tím regulovat zahřívání roztoku. Celá sestava je spojena vodiči, které jsou nositeli proudu.

Zdvihák slouží na přesné nastavení výšky nádoby a tím se reguluje hloubka ponoru rotoru v roztoku. Toto řešení je voleno, protože je rotor z důvodu složité stavby konstrukce, výškově nenastavitelný.

Teplota v nádobě je měřena termočlánkem, který je do ní zaveden po stěně nádoby a je přilepen na střed dna tak, aby netvořil v kapalině víry nebo překážku pro rotor.

2.3.3. Popis sestavy viskozimetru



- 1: Sestava Arduina
- 2: Elektromotor
- 3: Sestava měřící úhel zkrutu
- 4: Svorcky
- 5: Rotor
- 6: Laboratorní stojan

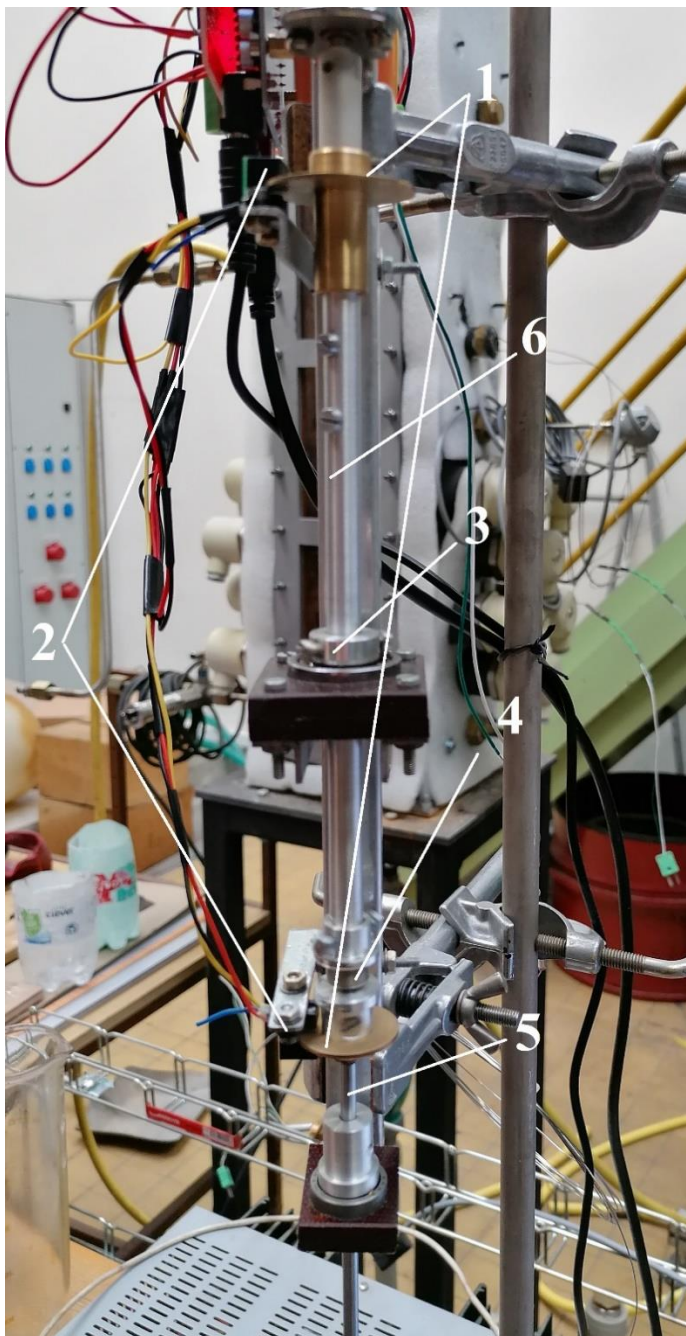
obr. 15 Sestava viskozimetru

Arduino zaznamenává data ze senzorů, komunikuje s počítačem a posílá mu údaje o měření. Napájí elektrické komponenty a řídí je.

Na elektromotor jsou kladeny vysoké nároky na udržování přesných konstantních otáček. Jejich náhlé změny se promítají do dynamických jevů na pružině, to způsobuje kmitání a tím se vnáší chyby do měření.

Rotor je vyroben ze 2 částí: držák na čepy a čepy. Držák má díry na různých průměrech, do kterých se uchycují čepy. Této funkce však nebylo využito z důvodu vysoké časové náročnosti jednotlivých měření, která by exponenciálně narůstala.

2.3.4. Popis sestavy měřící úhel zkrutu



- 1: Referenční disky
- 2: Optické senzory na měření zkrutu
- 3: Ložisko
- 4: Vratná pružina
- 5: Hřídel č. 1
- 6: Hřídel č. 2

obr. 16 Sestava měřící úhel zkrutu

Na obrázku je dobře viditelný princip měření na prototypu. Hřídel 1 má na jednom konci připevněný rotor, na který důsledkem viskozity působí odporové síly kapaliny. Tyto síly pak vyvolávají silový moment na hřídeli 1. Ta je spojená s hřídelí 2 pomocí pružiny, která jim umožňuje vzájemné natočení. Toto natočení pružinu deformuje, čímž v ní vyvolává silový moment, který se při zanedbání mechanických ztrát, vyrovná s odporovým silovým momentem. Tím pak dojde k ustálenému stavu a hřídel 1 bude vůči hřídeli 2 natočená o úhel α [rad], který se následně přepočte na viskozitu.

Úhel natočení se měří pomocí jednoho páru čidel a rotačních referenčních disků. Každý disk je pevně spojen s jednou hřídelí a má v sobě jednu štěrbinu, která slouží jako referenční místo. Optické senzory snímají tyto štěrbiny na jednotlivých discích a měří časovou diferenci, která vzniká vzájemným natočením hřídelí. Časová diference se pak přepočítává na úhel vzájemného natočení v závislosti na otáčkách motoru.

3. Kapitola: Experimentální měření

V této části jsou popsány měřené roztoky, jejich složky a vlastnosti těchto složek. Dále je popsána metodika experimentů a jejich průběh. Při měření vznikly různé okolnosti, které vnesly chyby do měření. Tyto chyby jsou popsány na konci kapitoly.

3.1. Použité roztoky

Pro měření viskozity byl použit slunečnicový olej a 3 vodné roztoky glycerolu o různých koncentracích a tím i viskozitách. Poměr složek v roztocích je udán v objemových koncentracích. Konkrétní roztoky:

- 40 % roztok glycerinu s vodou
- 50 % roztok glycerinu s vodou
- 80 % roztok glycerinu s vodou
- Slunečnicový olej

3.1.1. Vlastnosti kapalin

Glycerin

Systematickým názvem propan-1,2,3,-triol je bezbarvá, jedovatá kapalina sladké chuti a bez zápachu. Je to důležitá organická sloučenina, která tvoří mnoho esterů. Jeho viskozita je při pokojových podmínkách rovna $1,48 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, má hustotu 1260 kg/m^3 a vysokou teplotu varu: $290 \text{ }^\circ\text{C}$. Povrchové napětí má o trochu menší než voda. [22]

Voda

Chemický vzorec je H_2O , je to čirá kapalina bez chuti a zápachu. Její přítomnost v prostředí je nutná pro vznik života, jaký známe. Při pokojových podmínkách je její viskozita $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, hustota 997 kg/m^3 . Teplota varu je $100 \text{ }^\circ\text{C}$ a tuhnutí začíná při $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Největší hustotu má při teplotě $3,95 \text{ }^\circ\text{C}$ a má velmi vysokou tepelnou kapacitu, což z ní dělá dobrou nositelku tepla. [23]

Slunečnicový olej

Je to vazká kapalina žluté barvy. Získává se ze slunečnicových semen. Při pokojové teplotě má hustotu 917 kg/m^3 a viskozitu kolem $35 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Využívá se v potravinářství a při úpravě surovin. [24]

3.2. Metodika měření

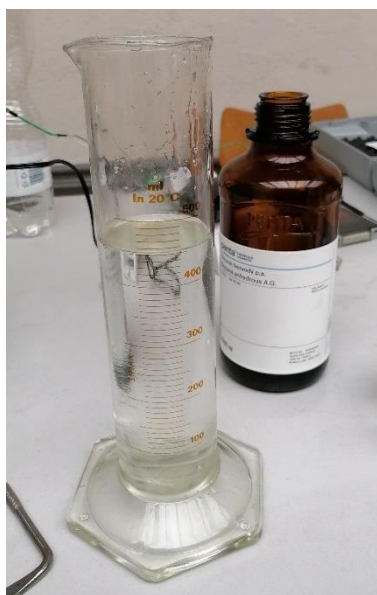
Byly připraveny roztoky, jejichž vlastnosti byly měřeny referenčním viskozimetrem a prototypem. Byla připravena aparatura a následně probíhalo měření roztoků. Průběh měření roztoků byl, až na jisté komplikace totožný, a proto bude popsáno jedno měření roztoku na každém viskozimetru.

3.2.1. Příprava roztoků

CVŘ Řež poskytla 1 litr dehydratovaného glycerinu, rostlinný olej byl zakoupen v potravinách a byla použita voda z vodovodu.

Postup přípravy roztoku:

- Zjistí se, kolik roztoku je potřebné vyrobit pro měření
- Vypočte se potřebné množství glycerinu pro dosažení požadované koncentrace roztoku
- Naměří se požadované množství glycerinu
- Glycerin a voda se naleje do jedné nádoby a roztok se důkladně promíchá
- Následně roztok odlejeme do plastové láhve, kterou uzavřeme, aby nedošlo vlivem odparu vody k zahuštění roztoku a budeme ho v ní skladovat.



obr. 17 Odměrný válec s namíchaným 40 % roztokem glycerinu s vodou



obr. 18 Odlévání roztoku do skladovací láhve

3.2.2. Měření na referenčním viskozimetru

V této kapitole je popsána příprava měřicí aparatury referenčního viskozimetru a následné měření viskozity 50 % vodního roztoku glycerinu.

Příprava měřicí aparatury:

- Termočlánek se nalepí na stěnu měřicí nádoby
- Termočlánek se zapojí do měřicí stanice
- Držákem se uchytí viskozimetr na laboratorní stojan
- Viskozimetr se vloží do držáku, celá aparatura se vyrovná a následně se nastaví její výška tak, aby nádoba dosedla na ohřívač
- Ohřívač se zapojí do laboratorního zdroje DC proudu
- Ze programu jsou zjištěny krajní hodnoty viskozity v měřeném rozsahu teplot a podle toho se zvolí vhodný rotor

Měření 50 % vodního roztoku glycerinu:

- Všechny přístroje se zapojí do elektrické sítě
- Předběžné množství roztoku se nalije do měřicí nádoby
- Měřicí nádoba se uchytí do viskozimetru
- Potřebné množství roztoku se dolije po rysku rotoru
- Viskozimetr se zapne a na měřicí stanici se nastaví mód měření teploty
- Zapne se ohřev
- Tekutina se ohřeje na teplotu, při které již viskozimetr neumí změřit viskozitu
- Vypne se ohřev
- Je zapsáno 5-7 hodnot viskozity v každém rozsahu poklesu teploty o 2,5 °C
- Viskozimetr a měřicí stanice se vypne
- Roztok se vyleje zpátky do skladovací láhve
- Měřicí nádoba se umyje
- Stejný postup je opakován pro měření ostatních vzorků

3.2.3. Měření na prototypu viskozimetru

Na prototypu bude také popsáno měření viskozity 50 % vodního roztoku glycerinu. Měření na prototypu je složitější, protože na rozdíl od referenčního viskozimetru není plně zautomatizovaný. Na začátku některých měření bylo nutné vícekrát restartovat Arduino, protože bylo měření nepřesné.

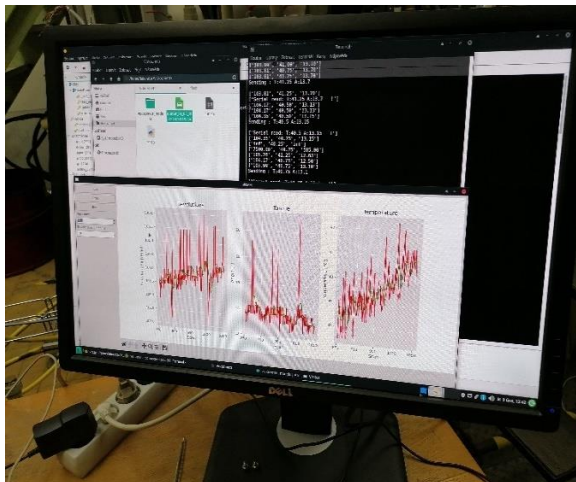
Na prototypu byly naměřené všechny výše zmíněné roztoky a 40 % vodní roztok glycerolu byl naměřen při různých otáčkách rotoru. Důvodem byly chyby v komunikaci přes USB linku, či nesprávné nastavení zkrutu naprázdno.

Seřízení aparatury:

- Ohříváč se z bezpečnostních důvodů připevní ke stojanu pomocí drátů.
- Sestava viskozimetru se připojí na laboratorní stojan do vhodné výšky
- Arduino se USB kabelem napojí do počítače
- Do měřicí nádoby se zavede termočlánek tak, jak to bylo opsáno v předešlé kapitole

Měření 50 % vodního roztoku glycerinu:

- Všechny přístroje se zapojí do elektrické sítě
- Všechny přístroje se zapnou
- Na počítači se spustí programy, které ovládají Arduino a to se nechá zkalibrovat
- Do měřicí nádoby se nalije potřebné množství roztoku
- Zdvihákem se pomocí zářezů na rotoru nastaví ponor 3 cm
- Ohřívač a měřicí nádoba se dodatečně seřídí tak, aby byl rotor v ose nádoby
- Zapne se měření
- Zapne se ohřev
- Po dosažení požadované maximální teploty se ohřev vypne
- Po dosažení požadované koncové teploty se měření vypne
- Roztok se z měřicí nádoby vylije zpátky do plastové láhve
- Nádoba se umyje
- Přístroje se vypnou a vypojí z elektrické sítě



obr. 19 Data měřená prototypem



obr. 20 Fotka při měření vodního roztoku glycerinu

3.2.4. Chyby ovlivňující měření

Pro měření na referenčním viskozimetru jsou v manuálu uvedeny chyby měření. Tyto údaje však nejsou pro prototyp známe, a proto táto kapitola pojednává o chybách, které se při měření vyskytly a byly řešeny.

Nedokonalá kolmost rotoru na vodní hladinu způsobuje, že jsou čepy v některých částech opisované kružnice ponořené více než v jiných. To způsobuje rozdíl v odporových silách, které v čase působí na rotor a tím se v některých bodech zrychluje a v jiných zpomaluje. Toto pak vytváří vibrace na senzorech a kmity v pružině.

Nesouosost a zahnutí hřídelů vytváří házivý pohyb, kvůli kterému se čepy nepohybují po kružnici. Tato nesouměrnost vnáší časově proměnlivý moment na hřídel.

Nedokonalá linearita pružiny způsobuje, že s rostoucím zkrutem nebude dokonale lineárně růst odporový moment. Tím může docházet ke změně natočení disků.

Otáčky elektromotoru nejsou dokonale konstantní. Jeho pohyb je nekonstantní, a proto zkrut pružiny neustále osciluje. Někdy otáčky motoru skokově klesnou o několik desítek otáček za minutu a zkrut se změní.

Příčinou mohou být i chyby ve spojích v řídicím Arduinu.

Toto jsou problémy, které vnesly do měření největší chyby. Ostatní problémy byly zanedbány. Tyto chyby vytvářeli fluktuaci dat, která byla vyřešena datovým filtrem. Hodnoty, které se v daném čase příliš lišily od průměrné hodnoty byly odstraněny. Takto vyfiltrovaná data pak byla dále upravována. Toto zpracování je popsáno v další kapitole.

4. Kapitola: Zpracování dat

Výstupem z měření prováděném na prototypu byly hodnoty otáček, teploty a úhlu zkrutu pružiny. Při měření bylo mnoho dat znehodnoceno různými chybami, a proto byla odfiltrována. Následně byla tato data přepočtena na viskozitu, tak aby se dala porovnat s hodnotami viskozity získanými z výpočtového programu a referenčního viskozimetru.

4.1. Matematický model prototypu

Přepočet úhlu zkrutu na viskozitu byl realizován matematickými rovnicemi, které vycházejí z mechaniky tekutin a mechaniky pružiny.

Na úvod byla vyjádřena odporová síla kapaliny F [N], která působí na čepy.

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

Rovnice 8 Odporová síla kapaliny

kde C_x [-] je odporový součinitel tvaru

ρ [$kg \cdot m^{-3}$] je hustota kapaliny

v [$m \cdot s^{-1}$] je obvodová rychlost

S [m^2] je obsah průmětu čepu

Obsah průmětu obou čepů vypočteme jako:

$$S = 2 \cdot d \cdot L$$

Rovnice 9 Plocha čelního průmětu čepu

kde d [m] je průměr čepu

L [m] je délka čepu

Obvodová rychlost se vypočte z otáček:

$$v = \omega \cdot r = \frac{r \cdot n \cdot \pi \cdot 2}{60}$$

Rovnice 10 Tečná rychlost

kde n [ot/min] jsou otáčky hřídele

ω [rad/s] je uhlová rychlost hřídele

r [m] je vzdálenost čepu od hřídele

Tato síla vytváří na rameni o velikosti vzdálenosti čepu od hřídele 1 moment M [N·m], který způsobuje zkrut pružiny o úhel α [°]. Vztah mezi momentem a úhlem zkrutu je předpokládán lineární, protože jsou úhly zkrutu malé a pružina je namáhána elasticky.

$$M = k \cdot \alpha = r \cdot F = r \cdot C_x \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot 2 \cdot S$$

Rovnice 11 Odporový moment působící na pružinu

Kde k [$\frac{Nm}{rad}$] je materiálová konstanta pružiny

Po dosazení výše zmíněné veličiny a vydělení rovnice konstantou k je možné úhel zkrutu vyjádřit pomocí vztahu:

$$\alpha = \frac{r \cdot C_x \cdot \rho \cdot (\pi \cdot n \cdot r)^2}{900 \cdot k} \cdot L \cdot d$$

Rovnice 12 Úhel zkrutu

Odporový součinitel tvaru a materiálové konstanty pružiny je vyjádřený jako E -tý násobek F -té mocniny Reynoldsova čísla:

$$\frac{C_x}{k} = E \cdot Re^B$$

Rovnice 13 Zavedení odhadu vztahu mezi Re a odporovým koeficientem

Kde Re [-] je Reynoldsovo číslo

E a B jsou zatím neznámé, volené konstanty viskozimetru a míchadla, které budou dopočteny.

Reynoldsovo číslo vyjádříme pomocí rovnice:

$$Re = \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\mu} = \frac{d \cdot \pi \cdot n \cdot \rho}{30 \cdot \mu}$$

Rovnice 14 Reynoldsovo číslo

Z rovnice 12 jsou vyjádřeny všechny konstanty a jsou zahrnuty do konstanty G tak, aby se s nimi počítalo lépe:

$$G = \frac{\rho \cdot (\pi \cdot n)^2 \cdot r^3 \cdot L \cdot d}{900}$$

Rovnice 15 Zavedení konstanty G

Zde se předpokládá, že se hustota při rostoucí teplotě mění zanedbatelně, a proto se s ní počítá jako s konstantou. Poloměr, otáčky a ani plocha průmětu čepu nebyly v průběhu experimentu měněny, a proto jsou konstantní.

Po dosazení rovnic do rovnice 12 a vyjádření dynamické viskozity je získán výsledný vztah:

$$\mu = \sqrt[B]{\frac{E \cdot G}{\alpha}} \cdot d \cdot \rho \cdot v$$

Rovnice 16 Vyjádření dynamické viskozity

E a B jsou neznámé konstanty. Jsou získány postupným iterováním této funkce tak, aby se vypočtená dynamická viskozita co nejvíc přiblížila hodnotám dynamické viskozity získané výpočetním programem. Zjišťuje se, při jakých hodnotách E a B je průměr relativních odchylek všech měření nejmenší. Tabulky a grafy těchto iterací jsou na konci přílohy.

Po vyjádření E a B je možné u úhlu zkrutu pružiny vypočítat viskozity ostatních roztoků. Tyto hodnoty viskozity se pak porovnávají s hodnotami vypočtenými programem, a tím se zjišťuje, jestli prototyp viskozimetru měřil správně. Tyto hodnoty se pak porovnávají také s hodnotami naměřenými na referenčním viskozimetru. To se dělá, aby bylo možné získat lepší představu o přesnosti měření prototypu.

Z tohoto postupu byli vyloučeny data naměřená na 40 % vodním roztoku glycerínu při otáčkách $n=122$ ot/min, protože byla vlivem neznámé chyby příliš nepřesná

a znehodnocovala hodnotu průměrné relativní odchylky a tím i celkovou přesnost přepočítávaných dat viskozity z úhlu zkrutu pružiny.

4.2. Vyjádření konstant E a B

Výše zmíněným postupem byly získány konstanty $E = 7,2 [\frac{rad}{N}]$ a $B = -0,35[\frac{m}{s}]$.

Tabulky a grafy iterací jsou na konci přílohy. Záporná hodnota exponentu B dává Reynoldsovo číslo do nepřímé úměry, což lze očekávat.

Měřením na roztoku při různých otáčkách vznikla velká chyba, a proto byla zavedena korekce konstanty E:

$$E'_n = E \cdot \frac{n}{n_{zakl}}$$

Rovnice 17 Korekce konstanty E

Kde $E'_n [\frac{rad}{N}]$ je modifikovaná konstanta E měřeného vzorku

n_{zakl} [ot/min] jsou základní otáčky při kterých byly měřeny vzorky, $n_{zakl} = 100$ ot/min

n [ot/min] jsou otáčky rotoru při měření vzorku

Konstanta E'_n nabývá pro jednotlivá měření různé hodnoty.

4.3. Výsledky měření

Všechny dále zmiňované grafy a tabulky se nacházejí v příloze na konci práce. Výsledné vypočtené viskozity z úhlů zkrutu pružiny prototypu viskozimetru byly společně s hodnotami získanými z výpočtového programu a hodnotami naměřenými na referenčním viskozimetru vyneseny do grafů v závislosti na teplotě roztoků. Pak byly proloženy trendovými spojnicemi, aby byla získána spojitá funkce. Na těchto grafech je možno pozorovat, jak velmi se shodují viskozity naměřené pomocí prototypu a viskozity získané ze programu. Viskozity naměřené na referenčním viskozimetru slouží jak měřítko pro porovnání přesnosti.

Pro lepší určení přesnosti, jsou také vyneseny grafy relativních odchylek měřených hodnot na prototypu a referenčním viskozimetru v závislosti na teoreticky správných hodnotách získaných z výpočetního programu.

Ve všeobecnosti je na základě naměřených dat možné prohlásit, že jsou relativní odchylky viskozity měřené pomocí prototypu viskozimetru řádově porovnatelné s těmi, které byly naměřené na referenčním viskozimetru. Funkce viskozity získané pomocí prototypu sledují funkce získané z výpočetního programu. V případě měření 50 % vodního roztoku glycerínu byla prototypem naměřena přesnější viskozita než referenčním viskozimetrem.

Se zvyšujícími se otáčkami klesala přesnost. Toto je pravděpodobně způsobeno vznikem turbulentních proudění v roztoku z důvodu větší obvodové rychlosti čepů, která zapříčiní růst Reynoldsova čísla. To pak následně způsobovalo větší odchylky a nepřesnější měření.

Dá se konstatovat, že s výjimkou měření 40 % vodního roztoku glycerínu při otáčkách 122 ot/min, byly úspěšně zjištěny viskozity roztoků, a byla tak dokázána funkčnost tohoto principu měření viskozity.

5. Závěr

V první kapitole práce byly popsány základní pojmy související s problematikou vzniku korie a měření jeho vlastností. Dále byla popsána technologie indukčního ohřevu studeného kelímku, uvedlo se několik příkladů jeho využití v praxi a popsali se jeho výhody a nevýhody. Bylo popsáno korium, jeho základní vlastnosti, mechanika vzniku a viskozita, jako fyzikální vlastnost.

Ve druhé kapitole byly uvedeny druhy viskozimetrů, jejich popis a použití. Dále byly detailněji popsány vlastnosti a konstrukce viskozimetrů použitých v experimentálním měření.

V třetí kapitole byly popsány měřené roztoky. Dále byly bodově chronologicky vypsány všechny kroky při měření 50 % vodního roztoku glycerínu na referenčním viskozimetru a na prototypu. Popsaly se nejzávažnější chyby měření a načrtl se způsob jakým se řešili.

Ve čtvrté kapitole byl popsán matematický model, na základě kterého byla vyhodnocena data z měření na prototypu. Vypočetly se konstanty a shrnuly se výsledky měření.

Z této práce plyne, že je možné měřit viskozitu pomocí rotoru tvořeného z dvou excentricky uložených čepů. Viskozity vypočtené pomocí naměřených úhlů zkrutu pružiny kopírovaly teoreticky přesné viskozity roztoků s dostatečnou přesností. Viskozimetr byl konstruován jednoduchým způsobem s omezeným rozpočtem, a proto se dá předpokládat, že profesionálně zkonstruovaný viskozimetr by měřil přesněji. Je nutno přizpůsobit rychlost otáčení rotoru tak, aby nevznikaly turbulentní víry, nebo při vyšších otáčkách volit menší rameno, na které jsou čepy umístěny, aby zůstávalo Reynoldsovo číslo malé.

Měření 40 % vodního roztoku glycerínu při otáčkách $n=122$ ot/min bylo při hodnocení dat vynecháno, protože bylo příliš nepřesné. Sklon naměřené funkce byl správný, ale celá funkce byla přibližně posunuta o konstantu. Toto mohlo být způsobeno špatným kalibrováním prototypu na začátku měření. Ostatní měření byla vyhovující. V některých měřeních byli hodnoty naměřené viskozimetrem přesnější než ty z referenčního viskozimetru.

Pro měření při jiných otáčkách jako referenčních, bylo zapotřebí zavést korekci konstanty E . Tento koeficient byl pojmenován E'_n . Tímto se značně zpřesnily výsledky. Sklon funkcí se velmi nezměnil ale data se posunuli blíže k teoreticky přesným hodnotám.

V navazujících měřeních by se mohla najít látka, které hustota by se při změně teploty výrazně měnila. Provedlo by se měření, které by mělo za úlohu zjistit, jak se mění funkce přepočtu úhlu na viskozitu, v závislosti na proměnné hustotě. Dále by mohla být provedena měření při různých otáčkách dalších roztoků, aby se zjistilo, jestli zavedený přepočet konstanty E'_n funguje obecně v širším rozsahu otáček. Bylo by vhodné zjistit, jak se bude měnit přesnost viskozimetru při změně poloměru, na kterém jsou uloženy čepy na rotoru, to však exponenciálně navyšuje počet potřebných měření.

Bibliografie

- [1] W. Searight, „Nuclear Newswire,“ 20 12 2019. [Online]. Available: <https://www.ans.org/news/article-2172/experimental-breeder-reactor-i-a-retrospective/>. [Přístup získán 20 12 2019].
- [2] G. T. Mazuzan, „Atomic Power Safety: The Case of the Power Reactor Development Company Fast,“ *Technology and Culture*, sv. 23, č. 3, pp. 341-371, 1982.
- [3] Z. Gu, „History review of nuclear reactor safety,“ *Annals of Nuclear Energy*, sv. 120, pp. 682-690, 2018.
- [4] N. Zajacová, „Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku,“ Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2012.
- [5] V. B. G. D. a. k. K. Pericleous, „Experimental and numerical study of the cold crucible melting process,“ *Applied Mathematical Modelling*, sv. 30, č. 11, pp. 1262-1280, 2006.
- [6] J. D. Vienna, „Nuclear Waste Vitrification in the United States: Recent Developments and Future Options,“ *International Journal of Applied Glass Science*, sv. 1, č. 3, pp. 309-321, 2010.
- [7] K. Grayson, „Mo-Sci,“ Mo-Sci corporation, 17 2 2021. [Online]. Available: <https://mo-sci.com/cold-crucible-induction-melting/>. [Přístup získán 17 2 2021].
- [8] B. J. a. k. J.H.Song, „An electromagnetic and thermal analysis of a cold crucible melting,“ *International Communications in Heat and Mass Transfer*, sv. 32, č. 10, pp. 1325-1336, 2005.
- [9] V. A. V. a. k. S.S.Abalin, „Corium kinematic viscosity measurement,“ *Nuclear Engineering and Design*, sv. 200, č. 1-2, pp. 107-115, 2000.
- [10] J. G. J.M. Seiler, „Viscosities of corium–concrete mixtures,“ *Nuclear Engineering and Design*, sv. 178, pp. 259-268, 1997.
- [11] G. C. F. Sudreau, „Corium viscosity modelling above liquidus temperature,“ *Nuclear Engineering and Design*, sv. 178, č. 1, pp. 269-277, 1997.
- [12] W. Z. N. C.-L. a. k. Pei Shen, „Corium behavior and steam explosion risks: A review of experiments,“ *Annals of Nuclear Energy*, sv. 121, pp. 126-176, 2018.
- [13] ČEZ, „ZÁKLADNÍ TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ,“ ČEZ, a. s. [Online]. Available: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru/index.shtml>.

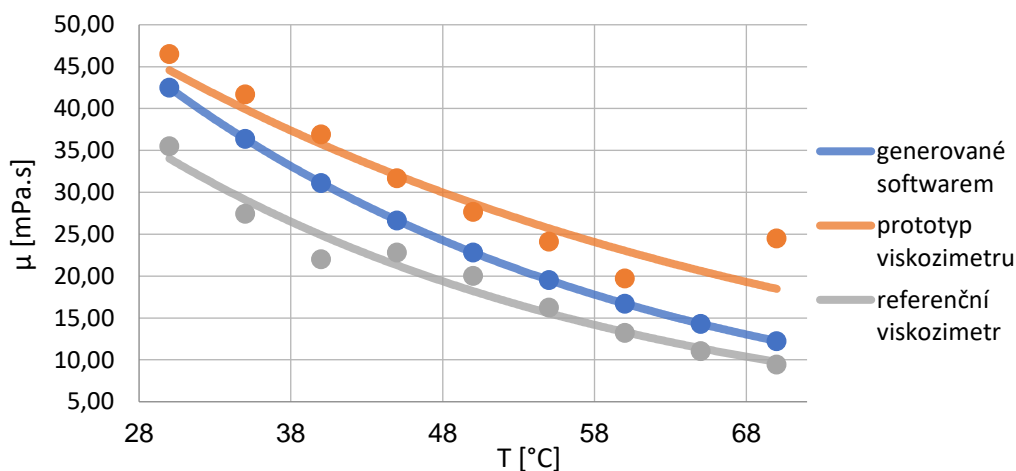
- [14] A. B. H. B. a. k. Didier Jacquemain, Nuclear Power Reactor, France: IRSN, 2015.
- [15] V. N. A. S. a. k. Leonid A. Dombrovskii, „In-vessel corium catcher of a nuclear reactor,“ *Nuclear Engineering and Design*, sv. 237, č. 15-17, pp. 1745-1751, 2007.
- [16] B. V. a. J. A. Jan Ježek, Mechanika Tekutin, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000.
- [17] V. Mejzlíková, „Reologické vlastnosti kečupu,“ MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ, Brno, 2016.
- [18] S. Botlová, „STUDIUM REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ ALTERNATIVNÍCH ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN,“ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Brno, 2016.
- [19] M. Š. J. Z. a. k. Lidmila Bartovská, „měření viskozity,“ Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005. [Online]. Available: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/mereni_viskozity.html.
- [20] D. L., Vlastnosti tekutin, VŠB-TU Ostrava.
- [21] T. F. Scientific, HAAKE Viscotester 3 Instruction manual, Thermo Fisher Scientific, 2000.
- [22] H. F. N. R. M. Koichi Takamura, „Physical properties of aqueous glycerol solutions,“ *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Sv. 91 z 298-99, pp. 50-60, 2012.
- [23] A. EQUEN, „Vlastnosti vody,“ AV EQUEN, [Online]. Available: <https://www.av-equen.cz/znalosti/vlastnosti-vody/>.
- [24] P. Totzauer, „Vlastnosti perspektivních elektroizolačních kapalin,“ ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, 2015, 2015.
- [25] C. v. Řež, „SUSEN,“ Centrum výzkumu Řež s.r.o., 2015. [Online]. Available: <http://susen2020.cz/projekty/infrastruktura/vyhled-2015-infrastruktura-projektu-susen/laborator-studenych-kelimku/>.

Příloha

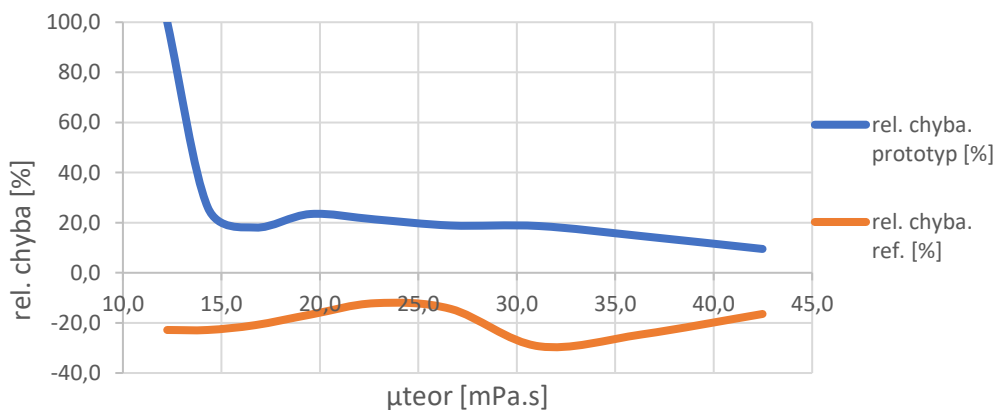
Měření slunečnicového oleje

Tabulka 2 Měření viskozity slunečnicového oleje, $n=102$ ot/min

Teplota [°C]	α [°]	μ_{prot} [mPa.s]	μ_{teor} [mPa.s]	μ_{ref} [mPa.s]	$\Delta \mu_{\text{prot}}$ [mPa.s]	rel. chyba prototyp [%]	rel. chyba. ref. [%]
30,0	33,1	46,5	42,5	35,5	4,04	9,5	-16,4
35,0	31,9	41,7	36,4	27,4	5,32	14,6	-24,6
40,0	30,6	36,9	31,1	22,0	5,81	18,7	-29,3
45,0	29,0	31,7	26,7	22,8	5,03	18,9	-14,4
50,0	27,6	27,7	22,8	20,0	4,86	21,3	-12,1
55,0	26,3	24,1	19,5	16,3	4,58	23,5	-16,7
60,0	24,5	19,7	16,7	13,2	3,02	18,1	-20,9
65,0	23,8	18,0	14,3	11,0	3,73	26,1	-22,8
70,0	26,5	24,5	12,3	9,5	12,25	100,1	-22,8
průměrná rel. chyba prototyp [%]			27,8	průměrná rel. chyba ref. [%]			20,0



graf 1 Měření viskozity slunečnicového oleje, $n=102$ ot/min

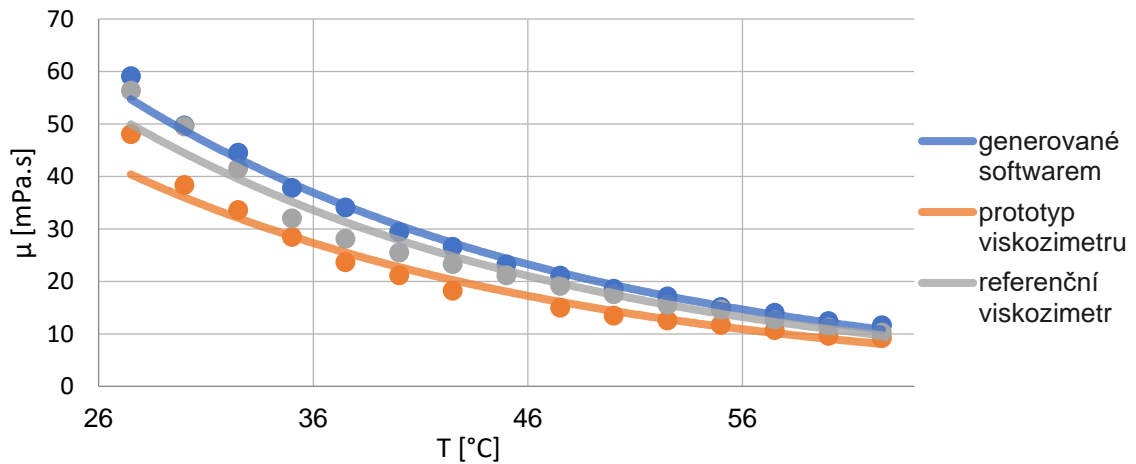


graf 2 Relativní odchylky při měření viskozity slunečnicového oleje, $n=102$ ot/min

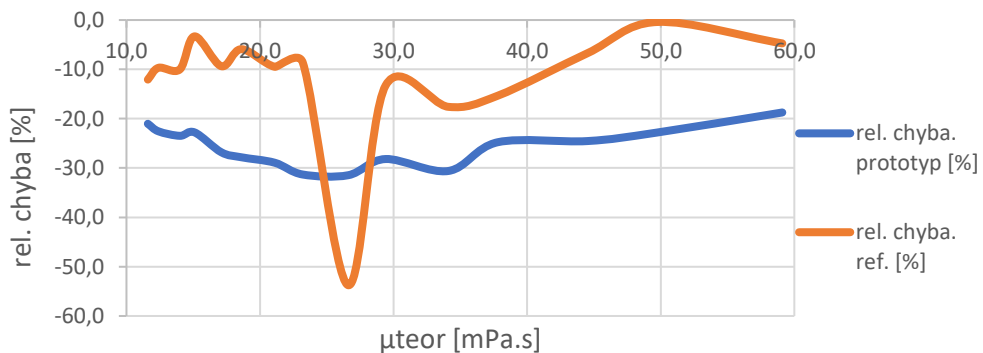
Měření 80 % vodního roztoku glycerínu

Tabulka 3 Měření 80 % vodního roztoku glycerínu, $n=102$ ot/min

Teplota [°C]	α [°]	μ_{prot} [mPa.s]	μ_{teor} [mPa.s]	μ_{ref} [mPa.s]	$\Delta \mu_{\text{prot}}$ [mPa.s]	rel. chyba prototyp [%]	rel. chyba. ref. [%]
27,5	39,9	48,0	59,1	56,3	-11,08	-18,7	-4,7
30,0	36,9	38,4	49,7	49,5	-11,34	-22,8	-0,4
32,5	35,2	33,6	44,5	41,5	-10,92	-24,5	-6,7
35,0	33,2	28,4	37,8	32,0	-9,36	-24,8	-15,3
37,5	31,2	23,7	34,1	28,1	-10,43	-30,6	-17,6
40,0	30,0	21,1	29,4	25,5	-8,29	-28,2	-13,3
42,5	28,5	18,2	26,6	12,3	-8,37	-31,5	-53,8
45,0	27,1	15,9	23,2	21,2	-7,27	-31,3	-8,6
47,5	26,6	15,0	21,1	19,1	-6,10	-28,9	-9,5
50,0	25,6	13,4	18,6	17,5	-5,18	-27,8	-5,9
52,5	24,9	12,5	17,1	15,5	-4,58	-26,8	-9,4
55,0	24,3	11,7	15,1	14,6	-3,44	-22,8	-3,3
57,5	23,6	10,7	14,0	12,6	-3,29	-23,5	-10,0
60,0	22,7	9,6	12,4	11,2	-2,80	-22,6	-9,7
62,5	22,4	9,2	11,6	10,2	-2,44	-21,0	-12,1
průměrná rel. chyba prototyp [%]			25,7	průměrná rel. chyba ref. [%]		12,0	



graf 3 Měření 80 % vodního roztoku glycerínu, $n=102$ ot/min

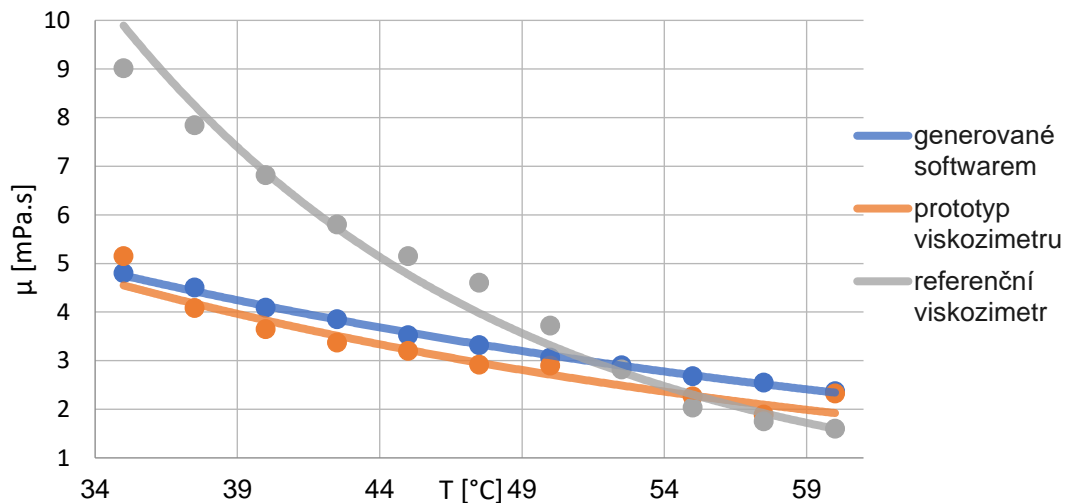


graf 4 Relativní odchylky při měření 80 % vodního roztoku glycerínu, $n=102$ ot/min

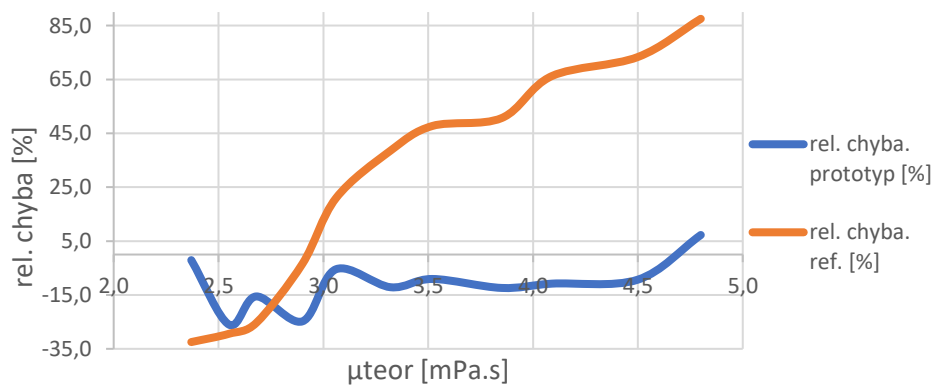
Měření 50 % vodního roztoku glycerínu

Tabulka 4 Měření 50 % vodního roztoku glycerínu, $n=100$ ot/min

Teplota [°C]	α [°]	μ_{prot} [mPa.s]	μ_{teor} [mPa.s]	μ_{ref} [mPa.s]	$\Delta \mu_{\text{prot}}$ [mPa.s]	rel. chyba prototyp [%]	rel. chyba. ref. [%]
35,0	16,6	5,2	4,8	9,0	0,35	7,3	87,5
37,5	15,3	4,1	4,5	7,8	-0,42	-9,3	73,3
40,0	14,8	3,7	4,1	6,8	-0,44	-10,8	66,3
42,5	14,4	3,4	3,9	5,8	-0,48	-12,4	50,7
45,0	14,1	3,2	3,5	5,2	-0,32	-9,1	47,7
47,5	13,6	2,9	3,3	4,6	-0,40	-12,1	38,6
50,0	13,6	2,9	3,1	3,7	-0,17	-5,5	20,9
52,5	12,3	2,2	2,9	2,8	-0,72	-24,8	-3,5
55,0	12,5	2,3	2,7	2,0	-0,42	-15,6	-25,4
57,5	11,7	1,9	2,6	1,8	-0,66	-26,0	-29,4
60,0	12,6	2,3	2,4	1,6	-0,05	-2,1	-32,5
průměrná rel. chyba prototyp [%]			12,3	průměrná rel. chyba ref. [%]			43,2



graf 5 Měření 50 % vodního roztoku glycerínu, $n=100$ ot/min

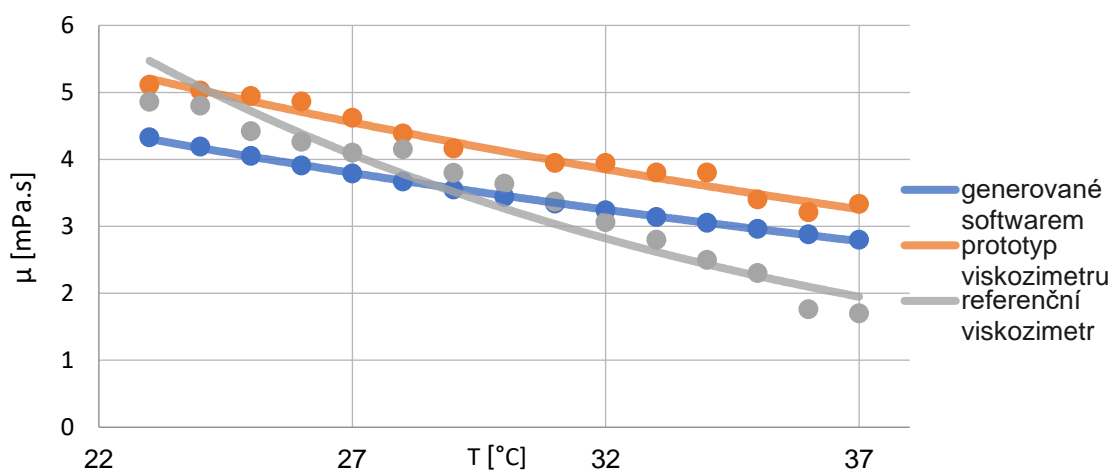


graf 6 Relativní odchylky při měření 50 % vodního roztoku glycerínu, $n=100$ ot/min

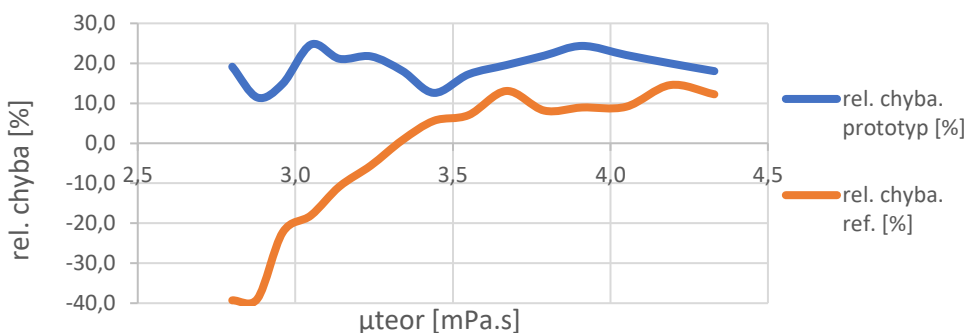
Měření 40 % vodního roztoku glycerínu při různých otáčkách rotoru

Tabulka 5 Měření 40 % vodního roztok glycerínu, $n=102$ ot/min

Teplota [°C]	α [°]	μ_{prot} [mPa.s]	μ_{teor} [mPa.s]	μ_{ref} [mPa.s]	$\Delta \mu_{\text{prot}}$ [mPa.s]	rel. chyba prototyp [%]	rel. chyba. ref. [%]
23	17,3	5,1	4,3	4,9	0,78	18,0	12,2
24	17,2	5,0	4,2	4,8	0,84	20,0	14,6
25	17,1	4,9	4,1	4,4	0,89	22,1	9,1
26	17,0	4,9	3,9	4,3	0,95	24,4	9,0
27	16,7	4,6	3,8	4,1	0,83	21,9	8,2
28	16,4	4,4	3,7	4,2	0,72	19,6	13,1
29	16,1	4,2	3,6	3,8	0,61	17,3	7,0
30	15,7	3,9	3,4	3,6	0,43	12,6	5,6
31	15,8	3,9	3,3	3,4	0,60	18,1	0,8
32	15,8	3,9	3,2	3,1	0,70	21,7	-5,6
33	15,6	3,8	3,1	2,8	0,66	21,1	-10,8
34	15,6	3,8	3,1	2,5	0,75	24,7	-18,0
35	15,0	3,4	3,0	2,3	0,44	14,9	-22,3
36	14,7	3,2	2,9	1,8	0,33	11,4	-38,9
37	14,9	3,3	2,8	1,7	0,54	19,1	-39,3
průměrná rel. chyba prototyp [%]			19,1	průměrná rel. chyba ref. [%]		14,3	



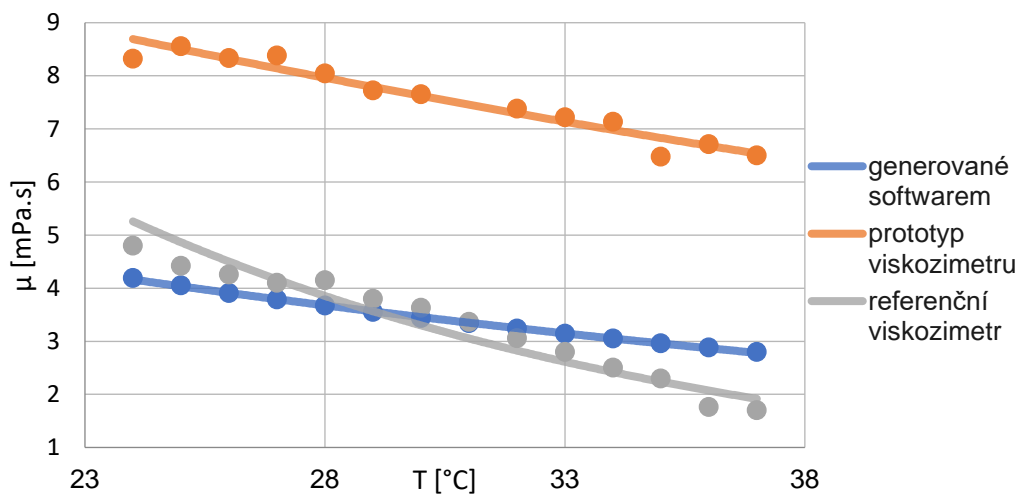
graf 7 Měření 40 % vodního roztok glycerínu, $n=102$ ot/min



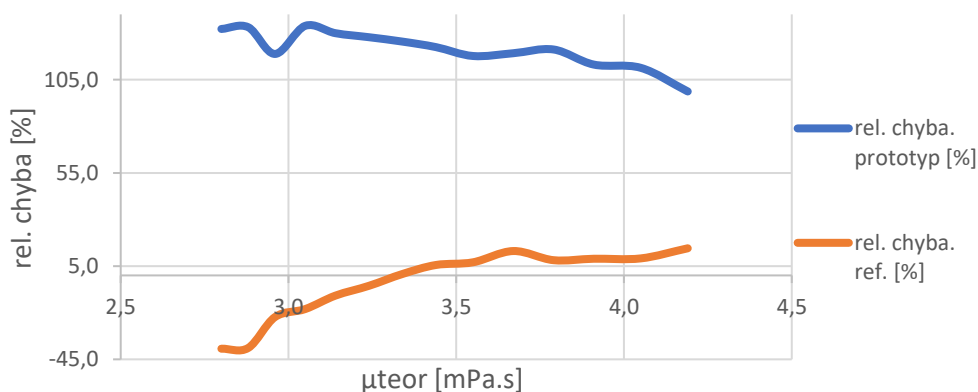
graf 8 Relativní odchylky při měření 40 % vodního roztok glycerínu, $n=102$ ot/min

Tabulka 6 Měření 40 % vodního roztoku glycerínu, $n=122$ ot/min

Teplota [°C]	α [°]	μ_{prot} [mPa.s]	μ_{teor} [mPa.s]	μ_{ref} [mPa.s]	$\Delta \mu_{\text{prot}}$ [mPa.s]	rel. chyba prototyp [%]	rel. chyba. ref. [%]
24	32,7	8,3	4,2	4,8	4,13	98,7	14,6
25	33,0	8,6	4,1	4,4	4,51	111,3	9,1
26	32,7	8,3	3,9	4,3	4,42	113,1	9,0
27	32,8	8,4	3,8	4,1	4,59	121,2	8,2
28	32,3	8,0	3,7	4,2	4,37	119,2	13,1
29	31,9	7,7	3,6	3,8	4,18	117,7	7,0
30	31,8	7,7	3,4	3,6	4,21	122,4	5,6
31	31,6	7,5	3,3	3,4	4,19	125,4	0,8
32	31,4	7,4	3,2	3,1	4,14	127,8	-5,6
33	31,1	7,2	3,1	2,8	4,08	129,9	-10,8
34	31,0	7,1	3,1	2,5	4,08	133,9	-18,0
35	30,0	6,5	3,0	2,3	3,52	118,8	-22,3
36	30,3	6,7	2,9	1,8	3,83	133,1	-38,9
37	30,0	6,5	2,8	1,7	3,70	132,2	-39,3
průměrná rel. chyba prototyp [%]			121,7	průměrná rel. chyba ref. [%]			14,4



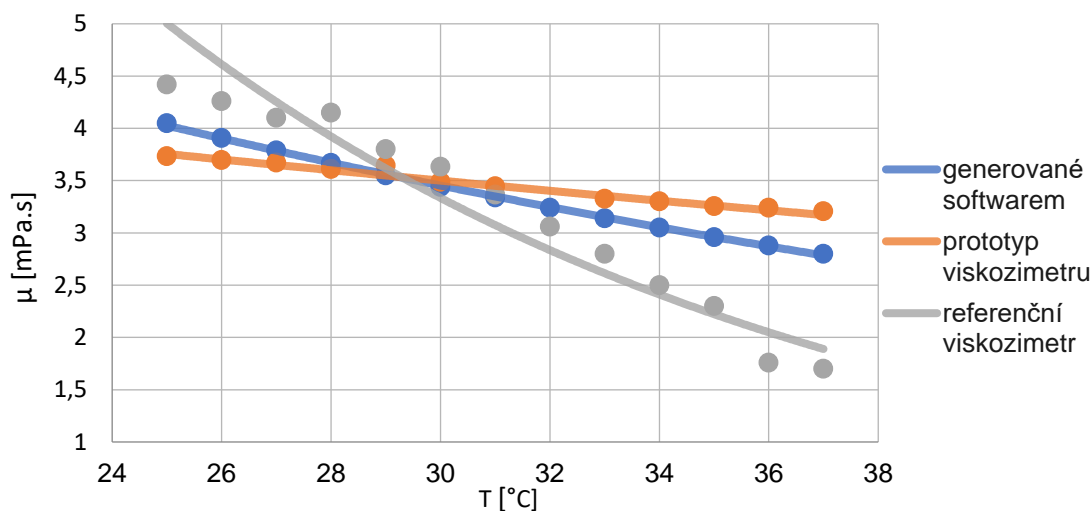
graf 9 Měření 40 % vodního roztoku glycerínu, $n=122$ ot/min



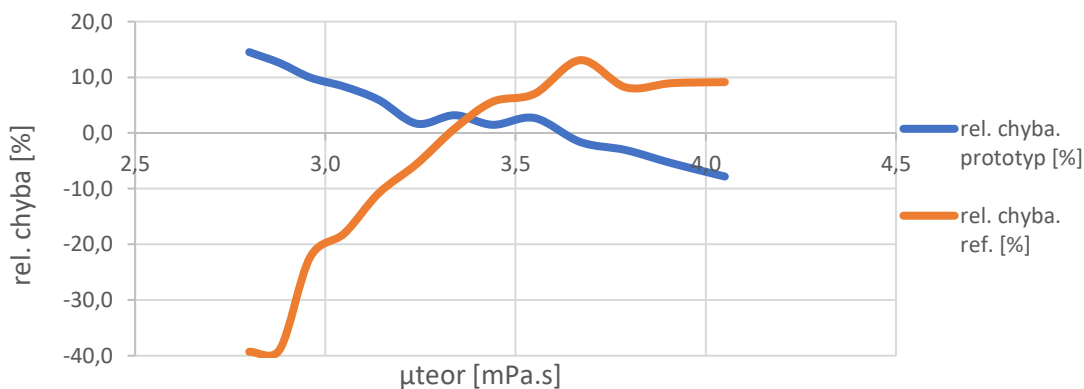
graf 10 Relativní odchylky měření 40 % vodního roztoku glycerínu, $n=122$ ot/min

Tabulka 7 Měření 40 % vodního roztoku glycerinu, n=131 ot/min

Teplota [°C]	α [°]	μ_{prot} [mPa.s]	μ_{teor} [mPa.s]	μ_{ref} [mPa.s]	$\Delta \mu_{\text{prot}}$ [mPa.s]	rel. chyba prototyp [%]	rel. chyba. ref. [%]
25	30,1	3,7	4,1	4,4	-0,32	-7,8	9,1
26	30,0	3,7	3,9	4,3	-0,21	-5,4	9,0
27	29,9	3,7	3,8	4,1	-0,12	-3,1	8,2
28	29,7	3,6	3,7	4,2	-0,06	-1,6	13,1
29	29,8	3,7	3,6	3,8	0,10	2,7	7,0
30	29,4	3,5	3,4	3,6	0,05	1,5	5,6
31	29,3	3,5	3,3	3,4	0,11	3,2	0,8
32	28,8	3,3	3,2	3,1	0,05	1,7	-5,6
33	28,9	3,3	3,1	2,8	0,19	6,0	-10,8
34	28,8	3,3	3,1	2,5	0,25	8,3	-18,0
35	28,7	3,3	3,0	2,3	0,29	10,0	-22,3
36	28,6	3,2	2,9	1,8	0,36	12,6	-38,9
37	28,5	3,2	2,8	1,7	0,41	14,5	-39,3
průměrná rel. chyba prototyp [%]			6,0	průměrná rel. chyba ref. [%]		14,4	



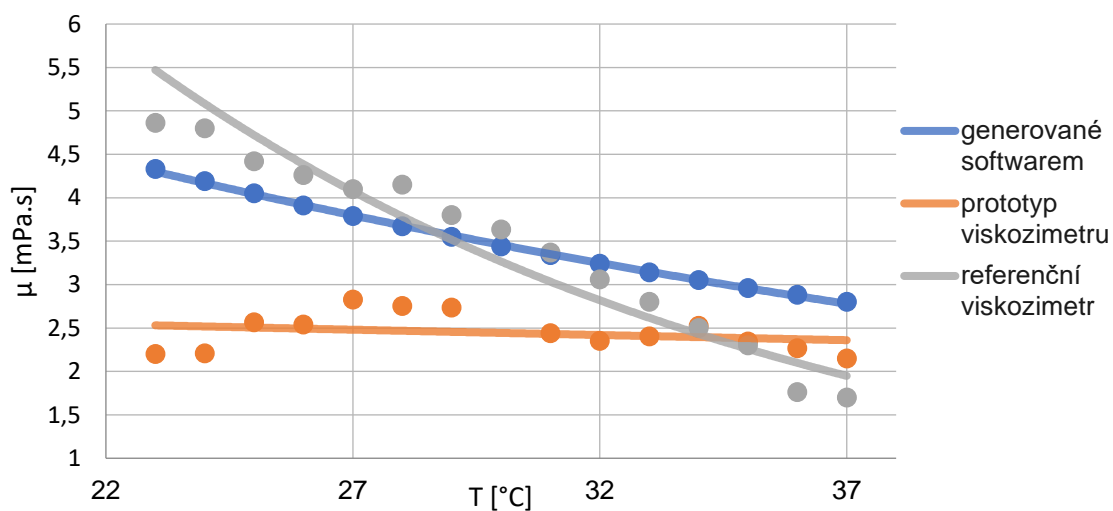
graf 11 Měření 40 % vodního roztoku glycerinu, n=131 ot/min



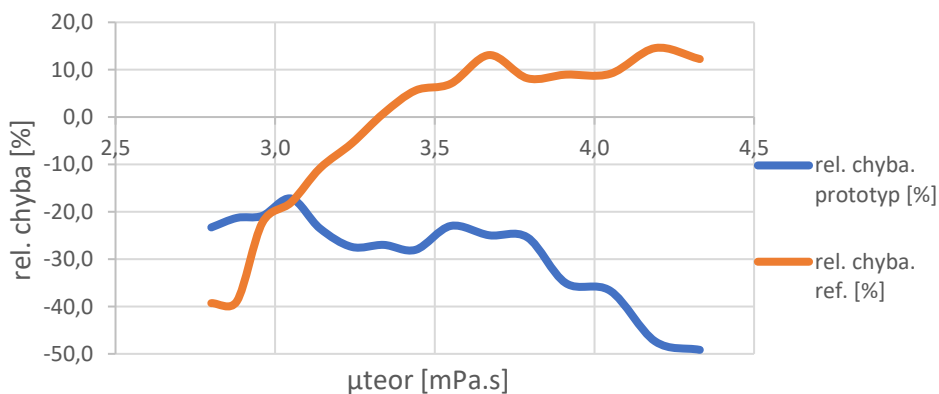
graf 12 Relativní odchylky měření 40 % vodního roztoku glycerinu, n=131 ot/min

Tabulka 8 Měření 40 % vodního roztoku glycerínu, $n=138$ ot/min

Teplota [°C]	α [°]	μ_{prot} [mPa.s]	μ_{teor} [mPa.s]	μ_{ref} [mPa.s]	$\Delta \mu_{\text{prot}}$ [mPa.s]	rel. chyba prototyp [%]	rel. chyba. ref. [%]
23	29,1	2,2	4,3	4,9	-2,13	-49,2	12,2
24	29,1	2,2	4,2	4,8	-1,98	-47,4	14,6
25	30,7	2,6	4,1	4,4	-1,49	-36,7	9,1
26	30,6	2,5	3,9	4,3	-1,37	-35,1	9,0
27	31,7	2,8	3,8	4,1	-0,96	-25,4	8,2
28	31,4	2,8	3,7	4,2	-0,92	-25,0	13,1
29	31,4	2,7	3,6	3,8	-0,82	-23,0	7,0
30	30,3	2,5	3,4	3,6	-0,96	-28,0	5,6
31	30,1	2,4	3,3	3,4	-0,90	-27,0	0,8
32	29,7	2,4	3,2	3,1	-0,89	-27,4	-5,6
33	30,0	2,4	3,1	2,8	-0,74	-23,5	-10,8
34	30,5	2,5	3,1	2,5	-0,52	-17,2	-18,0
35	29,7	2,3	3,0	2,3	-0,62	-20,9	-22,3
36	29,4	2,3	2,9	1,8	-0,61	-21,3	-38,9
37	28,8	2,2	2,8	1,7	-0,65	-23,3	-39,3
průměrná rel. chyba prototyp [%]			28,7	průměrná rel. chyba ref. [%]		14,3	



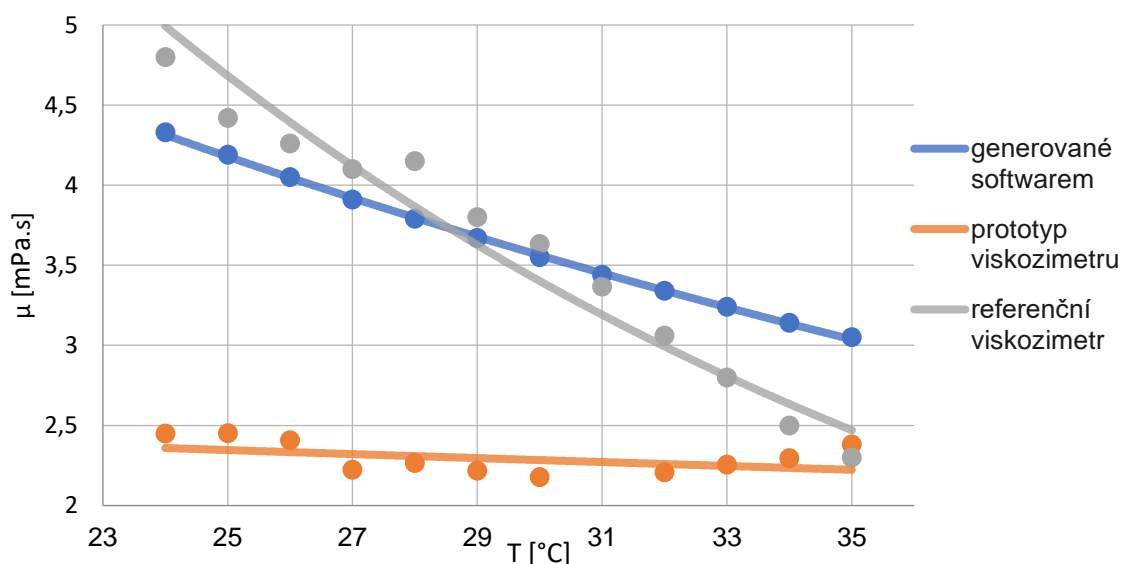
graf 13 Měření 40 % vodního roztoku glycerínu, $n=138$ ot/min



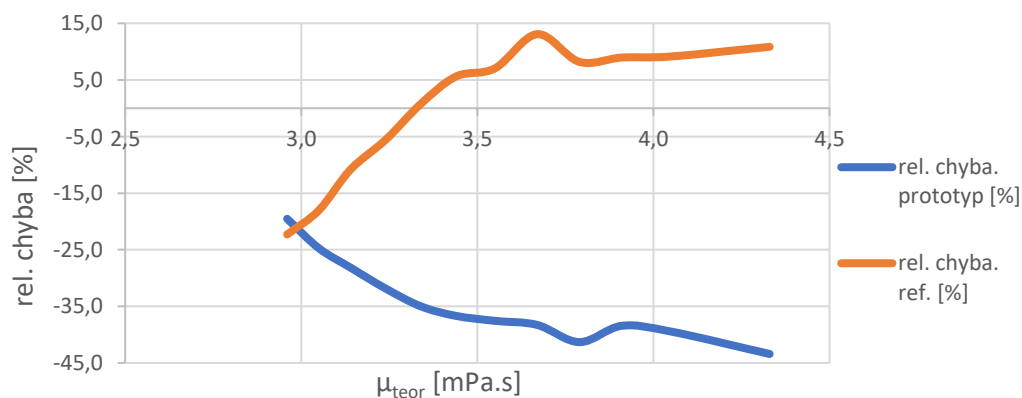
graf 14 Relativní odchylka měření 40 % vodního roztoku glycerínu, $n=138$ ot/min

Tabulka 9 Měření 40 % vodního roztok glycerínu, $n=147$ ot/min

Teplota [°C]	α [°]	μ_{prot} [mPa.s]	μ_{teor} [mPa.s]	μ_{ref} [mPa.s]	$\Delta \mu_{\text{prot}}$ [mPa.s]	rel. chyba prototyp [%]	rel. chyba. ref. [%]
24	35,4	2,5	4,3	4,8	-1,88	-43,4	10,9
25	35,4	2,5	4,1	4,4	-1,60	-39,5	9,1
26	35,2	2,4	3,9	4,3	-1,50	-38,4	9,0
27	34,2	2,2	3,8	4,1	-1,57	-41,3	8,2
28	34,4	2,3	3,7	4,2	-1,40	-38,3	13,1
29	34,2	2,2	3,6	3,8	-1,33	-37,6	7,0
30	34,0	2,2	3,4	3,6	-1,26	-36,7	5,6
31	33,9	2,2	3,3	3,4	-1,17	-35,0	0,8
32	34,1	2,2	3,2	3,1	-1,03	-31,9	-5,6
33	34,4	2,3	3,1	2,8	-0,88	-28,2	-10,8
34	34,6	2,3	3,1	2,5	-0,75	-24,7	-18,0
35	35,1	2,4	3,0	2,3	-0,58	-19,5	-22,3
průměrná rel. chyba prototyp [%]			34,5	průměrná rel. chyba ref. [%]			10,0



graf 15 Měření 40 % vodního roztok glycerínu, $n=147$ ot/min

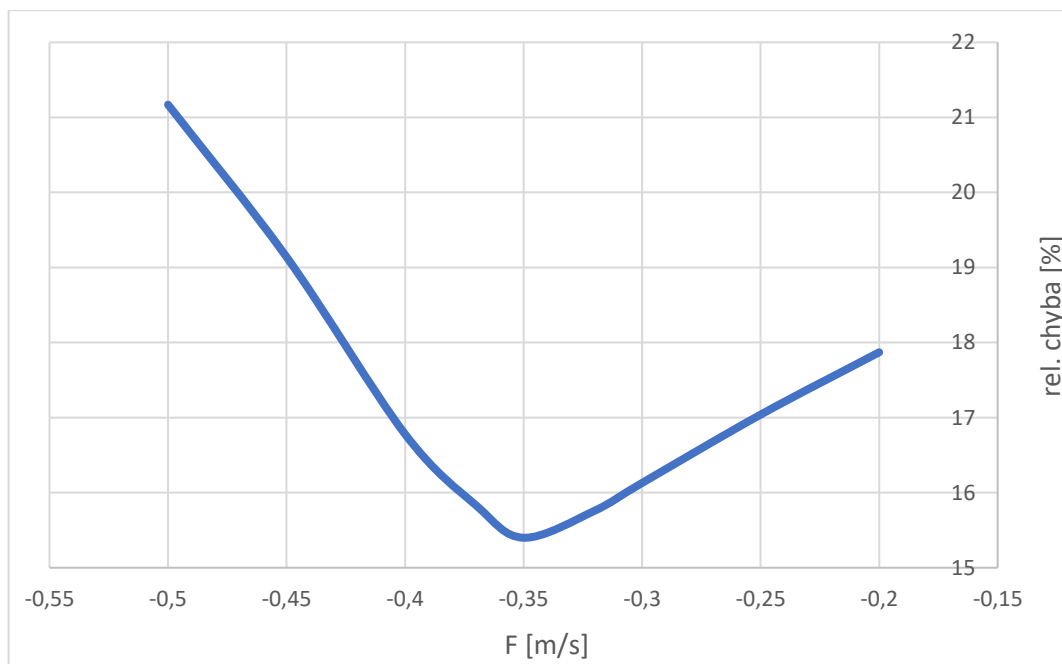


graf 16 Relativní odchylka měření 40 % vodního roztok glycerínu, $n=147$ ot/min

Iterace konstanty B

Tabulka 10 Iterace konstanty B

F [m/s]	Celková rel. Chyba [%]
-0,2	17,87
-0,25	17,04
-0,3	16,13
-0,32	15,76
-0,35	15,4
-0,37	15,83
-0,4	16,78
-0,45	19,14
-0,5	21,17

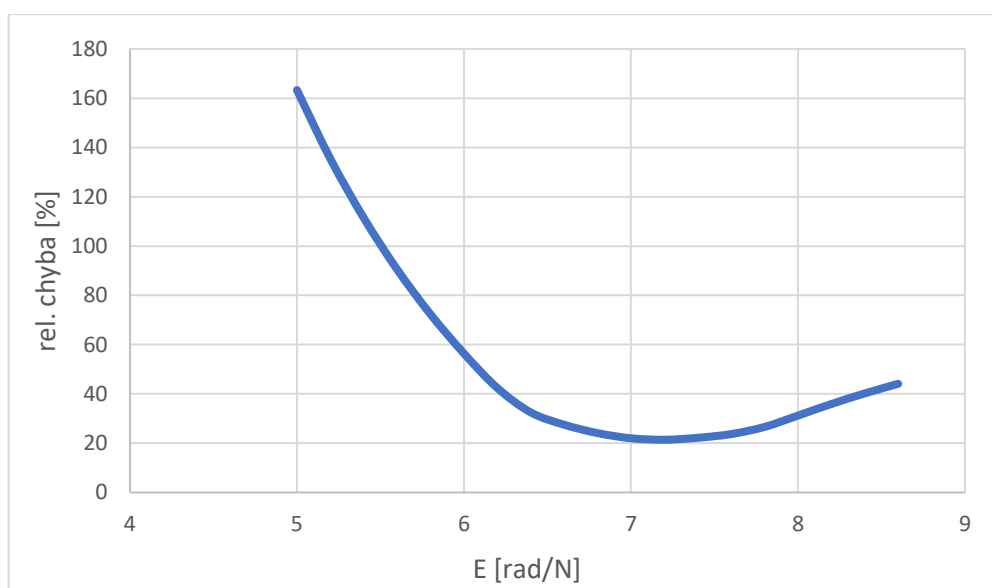


graf 17 Konstanta F [m/s] v závislosti na celkové relativní odchylce [%]

Iterace konstanty E

Tabulka 11 Iterace konstanty E

E [rad/N]	Celková rel. Chyba [%]
5	163,3
5,2	135,4
5,4	111,4
5,6	90,5
5,8	72,3
6	56,4
6,2	42,4
6,4	32,5
6,6	27,5
6,8	24,1
7	22
7,2	21,4
7,4	22,2
7,6	23,7
7,8	26,6
8	31,2
8,2	35,9
8,4	40,2
8,6	44,1



graf 18 Konstanta E [rad/N] v závislosti na celkové relativní odchylce [%]