



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MAKETA PALIVOVÉHO PROUTKU PRO EXPERIMENTY KRITICKÝCH TEPELNÝCH TOKŮ

SCALE MODEL OF FUEL ROD FOR EXPERIMENTS CRITICAL HEAT FLUX

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Kropáč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Suk

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Ondřej Kropáč**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ladislav Suk**
Akademický rok: 2015/16

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

Maketa palivového proutku pro experimenty kritických tepelných toků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování rešerše o maketách palivového elementu tlakovodních reaktorů pro experimenty kritického tepelného toku (KTT). Vytvoření matematického modelu teplotního pole makety jaderného paliva. Měření teplotního pole na maketě palivového elementu použitého ve smyčce (KTT).

Cíle bakalářské práce:

- 1.Zpracovat rešerši o maketách palivového elementu tlakovodních reaktorů pro experimenty KTT.
- 2.Vytvoření matematického modelu teplotního pole makety jaderného paliva.
- 3.Měření teplotního pole na maketě palivového elementu.

Seznam literatury:

Heřmanský B.: Termomechanika jaderných reaktorů, SNTL Praha:1986

Chun S.Y a kol.: Effect of pressure on critical heat flux in uniformly heated vertical annulus under low flow conditions. Nuclear Engineering and Design. roč. 203, č. 2-3, 2001

HAAS Ch.: Critical Heat Flux for Flow Boiling of Water at Low Pressure on Smooth and MicroStructured Zircaloy Tube Surfaces. KIT Scientific Publishing, 2012

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
ředitel ústavu děkan fakult

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá maketami pro výzkum kritického tepelného toku. Teoretická, rešeršní část, se soustředí na materiál maket, jejich rozměry, způsob ohřívání a měření teplot z již provedených experimentů. Praktická část zahrnuje matematický model makety užitý v zařízení sestaveném na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Poslední oddíl se zabývá měřením teplot na povrchu makety pomocí termočlánků a vizualizace za využití termovize.

Abstract

Bachelor thesis deals with scale models for research of critical heat flux. Theoretical research part focusses on material of models their geometry heating methods and measurement of heat of already passed experiments. Practical part includes mathematical model of scale model used in device assembled at Faculty of Mechanical engineering BUT. Last section deals with surface temperature measurement and visualisation using thermography.

Klíčová slova

Kritický tepelný tok, maketa jaderného paliva, přestup tepla

Key Words

Critical heat flux, mock nuclear fuel, heat transfer

Bibliografická citace

KROPÁČ, O. Maketa palivového proutku pro experimenty kritických tepelných toků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 65 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Suk.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Makety pro výzkum kritického tepelného toku.“, vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne:

.....

Ondřej Kropáč

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomáhali s mojí bakalářskou prací. Zejména bych chtěl poděkovat Ing. Ladislavu Sukovi za cenné rady, vedení této práce a poskytnutí veškerých prostředků potřebných k provedení experimentu. Ing. Petru Kracíkovi za půjčení termokamery a nafocení průběhu celého experimentu. Dále pak Tomáši Fordeyovi za pomoc s některými fyzikálními a matematickými problémy. Anně Königové za pomoc s finální grafickou úpravou mé práce. Svě rodině, která mi byla velkou psychickou oporou. A nakonec všem mým známým, kteří se nějakým způsobem podíleli na finální podobě mé bakalářské práce.

OBSAH

Úvod.....	15
1 Základní teoretické vztahy a poznatky	17
1.1 Geometrie a vztahy	17
1.1.1 Hydraulický a ekvivalentní tepelný průměr	17
1.1.2 Hmotnostní a měrný tepelný tok	18
1.2 Přenos tepla v dvoufázovém systému.....	19
1.3 Tlaková diference v dvoufázovém systému	21
1.4 Nestabilita dvoufázového proudění	22
1.4.1 Statická nestabilita.....	23
1.4.2 Dynamická nestabilita	23
2 Experimenty na mezikružích.....	25
2.1 Experimentální testovací zařízení.....	26
3 měření teploty v průběhu experimentu KTT	29
3.1 Izolace makety od testovací sekce.....	31
3.2 Vytápění testovací sekce	33
4 Experimenty na svazku trubek	35
5 Matematický model teplotního pole makety	37
5.1 Výpočet tepelné kapacity dílku	39
5.1.1 Výpočet objemu dílku	39
5.1.2 Určení hustoty oceli a mědi	39
5.1.3 Měrná tepelná kapacita oceli a mědi	39
5.2 Tepelný přírůstek dílku.....	40
5.2.1 Generace Jouleova tepla	40
5.2.2 Přenos tepla vedením.....	42
5.2.3 Přenos tepla konvekcí.....	44
5.2.4 Přenos tepla zářením.....	46
5.3 Celkový přírůstek tepla v radiálním a axiálním směru.....	46
5.4 Výsledek výpočtu matematického modelu.....	47
6 Experimentální měření teplot makety	49
6.1 Výroba makety	49
6.2 Připevnění termočlánků a zdroje elektrické energie.....	49
6.2.1 Připevnění termočlánků.....	50
6.2.2 Přivedení elektrické energie na maketu.....	50

6.3	Sběr dat z naměřených teplot	51
6.3.1	Měření termokamerou	51
6.4	Výsledky měření.....	52
6.5	Porovnání výsledků matematického modelu a experimentu	54
7	Závěr.....	55
8	Použitá literatura.....	56
9	Seznam použitých symbolů a zkratk	59
10	Seznam příloh.....	62

ÚVOD

Var vody je využíván v mnoha technických aplikacích, ať už k produkci páry nebo k chlazení. Jako příklad lze uvést tepelné elektrárny. Zde dochází k ohřívání kapaliny do bodu varu, médium ochlazuje zařízení s generací tepla a pára, která varem vzniká, dále roztáčí turbínu napojenou s generátorem, který generuje elektrický proud.

Pokud se blíže zaměříme na jaderné elektrárny, dochází zde v primárním okruhu k intenzivnímu přenosu tepla z palivových tyčí do chladicí kapaliny v tomto okruhu. Přenos tepla je omezen kritickým tepelným tokem. Jedná se o největší tepelný tok, který může být přenesen během varu, než dojde k varu blánovému v místě nejvyššího přenosu tepla, tedy nejintenzivnějšímu vzniku bublin páry. Tento jev může vést až k poškození palivové kazety v místě výskytu, což by znamenalo kontaminaci primárního okruhu radioaktivním materiálem. Znalost kritického tepelného toku je tedy velmi důležitá pro bezpečnost všech činností, při kterých je využíváno varu kapaliny.

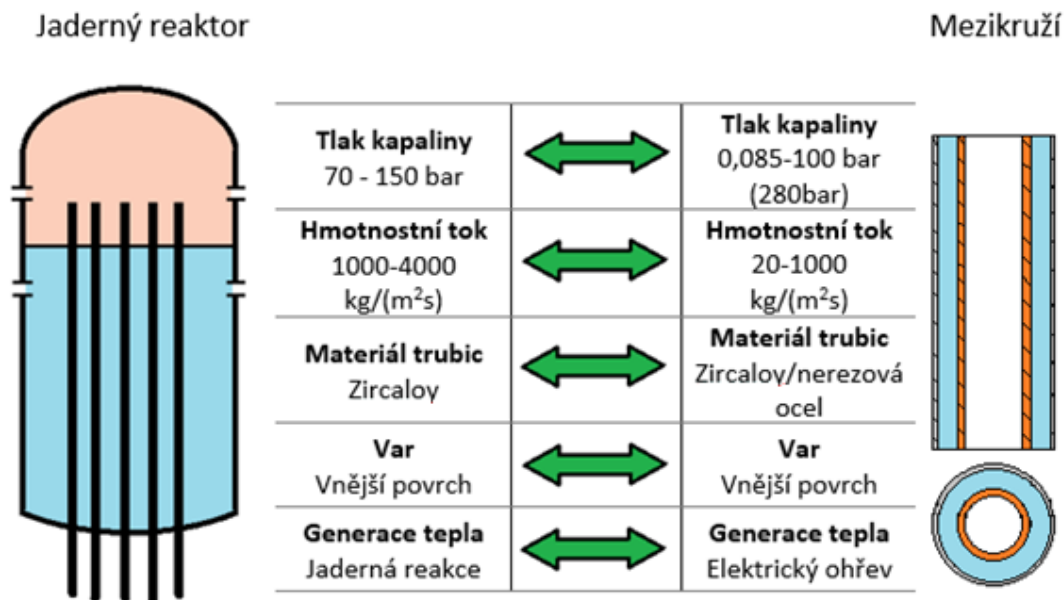
Experimenty s kritickým tepelným tokem se snaží simulovat podmínky v jaderném reaktoru. V tlakovodních jaderných reaktorech jako palivo slouží pelety oxidu uraničitého, které jsou vloženy do trubíček vyrobených ze slitiny označované jako zircaloy, což je materiál složený zejména ze zirkonia, které má vynikající odolnost vůči korozi s příměsí cínu, železa a malého procenta chromu. [1]

Palivové proutky jsou poté složeny do palivových kazet, které jsou uloženy v tlakové nádobě jaderného reaktoru. Kapalina o nižší teplotě, než je teplota sytosti, je hnaná pod vysokým tlakem z dolní části reaktoru směrem k horní a přebírá energii, která vzniká jaderným štěpením paliva. Kapalina je na povrchu proutků zahřívána až na teplotu nasycení a dochází k jejímu varu. Voda v těchto typech reaktorů má tedy tři důležité úkoly. Chlazení palivových kazet, přenos energie a moderaci neutronů.

Testovací zařízení bývá tedy většinou postavené s ohledem na skutečný jaderný reaktor. Jedná se tedy o mezikruží. Vnitřní trubice je vyrobena z materiálu zircaloy využívaného v jaderných reaktorech nebo nerezové oceli a vnější trubice z křemenného skla nebo borosilikátového skla tzv. Pyrexu. To umožňuje vizualizaci chování kapaliny mezi trubicemi. Chladicí kapalina je vedena stejným směrem jako v reaktoru tedy zdola nahoru.

Maketa palivového proutku je zahřívána elektrickým proudem a její teplota je měřena pomocí termočlánků umístěných na vnitřním povrchu. Smyčka, ve které pak proudí chladicí kapalina, je vybavena systémem, který zaznamenává veškeré důležité veličiny.

Pro lepší představu a porování podmínek při experimentech shrnutých v tabulce 2 a v jaderném reaktoru slouží následující obrázek.



Obr. 1 Porovnání Jaderného reaktoru a mezikruží

Cílem této práce je předat informace o kritickém tepelném toku, základní teoretické poznatky a shrnout experimenty provedené na mezikruží jednotlivými experimentátory, jejich výsledky, závěry a podmínky, při kterých byly experimenty provedeny. Dále pak porovnání matematického modelu teplotního pole makety palivového proutku a skutečného teplotního pole měřeného termokamerou a termočlánky.

1 ZÁKLADNÍ TEORETICKÉ VZTAHY A POZNATKY

Tato kapitola shrnuje důležité rovnice a definice týkající se dvoufázového proudění ve vytápěném kanále. Je zde také popsáno chování přenosu tepla a poklesu tlaku v těchto systémech. Jako poslední jsou zde zmíněny procesy, které mohou ovlivnit dvoufázové proudění. O dvoufázovém proudění je detailněji pojednáno v dokumentu [2].

1.1 Geometrie a vztahy

Jelikož se tato práce zabývá experimenty na mezikruží s vnitřním ohřevem, je důležité zde shrnout rovnice a definice, které popisují dvoufázové proudění právě v takovémto systému. Jedná se zejména o geometrické rozměry a definice měrného tepelného a hmotnostního toku.

1.1.1 Hydraulický a ekvivalentní tepelný průměr

Hydraulický průměr je dán poměrem čtyřnásobku obsahu průtočného průřezu daného profilu S_p a jeho omočeného obvodu O_o .

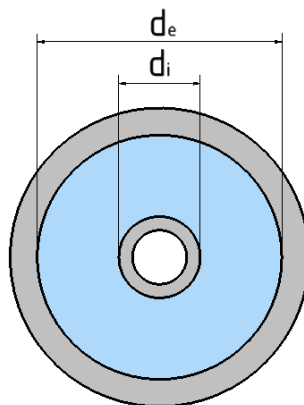
$$d_h = 4 \frac{S_p}{O_o} \quad (1)$$

Pro mezikruží tedy platí

$$d_{h,m} = 4 \frac{\frac{\pi(d_e^2 - d_i^2)}{4}}{\pi(d_e + d_i)} = d_e - d_i \quad (2)$$

d_e – vnitřní průměr vnější trubice

d_i – vnější průměr vnitřní trubice



Obr. 2 Průřez mezikružím

Ekvivalentní tepelný průměr je vztah mezi průtočným průřezem daného profilu S_p a obvodem zahříváné stěny O_z .

$$d_t = 4 \frac{S_p}{O_z} \quad (3)$$

Pro mezikruží zahříváné zevnitř pak.

$$d_{t,a-vnitřní} = 4 \frac{\frac{\pi(d_e^2 - d_i^2)}{4}}{\pi d_i} = \frac{(d_e^2 - d_i^2)}{d_i} \quad (4)$$

Pokud by bylo mezikruží zahříváno z obou stran, potom by se hydraulický a ekvivalentní tepelný průměr rovnaly. Pro případy experimentů na mezikruží s vnitřním ohřevem je tedy důležitý ekvivalentní tepelný průměr.

Nyní je možné definovat charakteristické bezrozměrné veličiny porovnáním například délky testovací sekce a charakteristického průměru. Pro vztah mezi tepelným tokem a kvalitou par v kanále je důležitý poměr L/d_i a pro pokles tlaku je důležitým poměrem L/d_h . [3]

1.1.2 Hmotnostní a měrný tepelný tok

Aby bylo možné porovnávat jednotlivé experimenty kritických tepelných toků v mezikruží, je třeba stanovit veličiny, které toto porovnání umožňují. Těmito veličinami jsou hmotnostní tok G a měrný tepelný tok q .

Hmotnostní tok je definován jako podíl hmotnostního průtoku M a průřezu oblasti průtoku S_p .

$$G = \frac{M}{S_p} = \frac{v * \rho_l * S_p}{S_p} = v * \rho_l \quad (5)$$

v - rychlost proudění

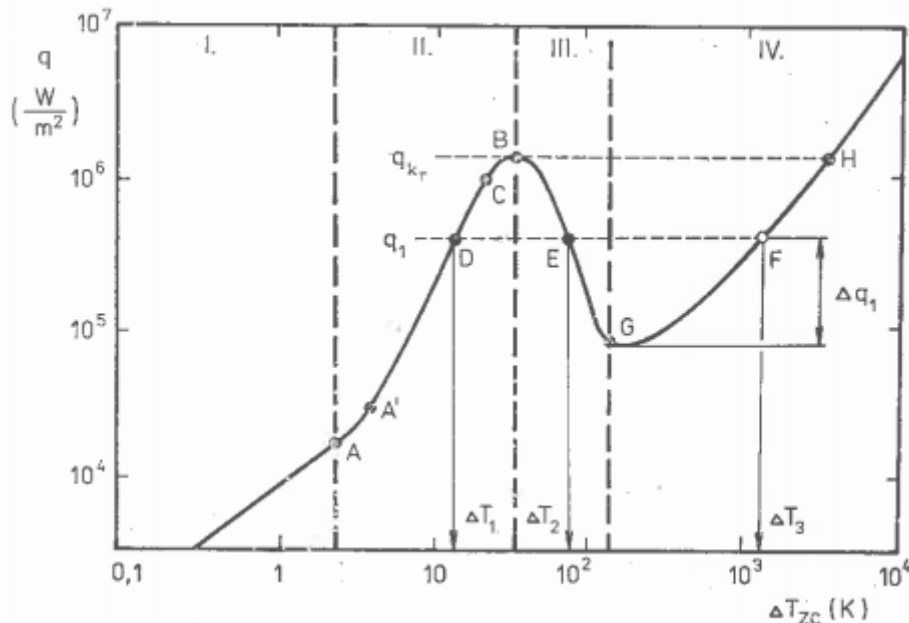
ρ_l - hustota kapaliny

Měrný tepelný tok q je definován jako celkový tepelný tok Q vztažený na jednotku plochy S . [4]

$$q = \frac{Q}{S} \quad (6)$$

1.2 Přenos tepla v dvoufázovém systému

Dvoufázový přenos tepla pro var ve velkém objemu charakterizuje Nukiyamova křivka. Jedná se o závislost hustoty tepelného toku q a teplotního rozdílu mezi stěnou a chladicí kapalinou ΔT_{zc} . Tato závislost umožňuje objasnit některé zákonitosti. [2]



Obr. 3 Graf závislosti q na ΔT_{zc} [2]

V oblasti I nedochází k varu a jedná se tedy o jednofázové proudění z důvodu malé hustoty tepelného toku q . Závislost hustoty tepelného toku a ΔT_{zc} zde vyjadřuje Newtonův zákon.

$$q = \alpha(T_z - T_c) = \alpha\Delta T_{zc} \quad (7)$$

α – součinitel přestupu tepla

T_z – teplota obtékaného povrchu

T_c – teplota chladiva

Mezi body A a A' dochází ke vzniku bublinek, začíná zde bublinkový var s nízkou intenzitou. S postupem směrem k bodu B se zvyšuje výskyt parních bublinek, díky kterým chladivo lépe cirkuluje a tak umožňuje lepší přestup tepla z horkého povrchu do kapaliny. V bodě B je pak maximální tepelný tok z povrchu do chladiva, bublinky zde mají velkou rychlost a chladivo se zpětným proudem dostává k povrchu.

V oblasti III se z důvodu vysoké intenzity vzniku bublinek tyto bublinky spojují a začínají vytvářet na zahříváném povrchu parní blánu. Dochází ke krizi varu prvního druhu. Přenos tepelného výkonu z povrchu se snižuje, jelikož se k němu kapalina nedostane a teplota povrchu se prudce zvyšuje. Právě v této oblasti je velká pravděpodobnost, že dojde k poškození zahřátého povrchu.

V poslední oblasti se nejvíce uplatňuje přenos tepla zářením, se zvyšující se teplotou je přenos tepla umocněn, z důvodu T^4 ve Stefan-Boltzmannově zákoně. [3]

$$E_0 = \sigma T^4 \quad (8)$$

E_0 – zářivost černého tělesa

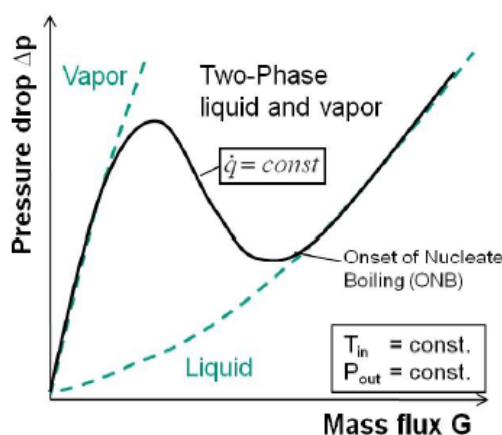
T – termodynamická teplota

σ – Stefan – Boltzmannova konstanta

Na přenos tepla zářením mají vliv také poměrná zářivost a úhlový faktor. Poměrná zářivost (emisivita) udává poměr záření vydávaného povrchem a záření vydávaného stejným povrchem, kdyby se jednalo o dokonale černé těleso o stejné teplotě. Úhlový faktor pak definuje, na které povrchy v okolí tělesa vydávajícího záření toto záření dopadne. [4]

1.3 Tlaková diference v dvoufázovém systému

Obrázek 4 popisuje vztah mezi tlakovou diferencí a hmotnostním tokem ve dvoufázovém systému s přívodem tepla. V případě jednofázového proudění kapaliny křivka tlakového rozdílu nepřetržitě klesá. Pokud je však do systému neustále přiváděno teplo, křivka mění svůj tvar. Dokud nedochází k varu, křivka kopíruje jednofázovou linii. V bodě zvaném: *Nástup jádra varu* kapalina začíná vařit a křivka přestává kopírovat linii jednofázového proudění. Je to z důvodu zvyšující se tlakové diference v závislosti na zvyšujícím se procentu páry v systému. [3]



Obr. 4 Diagram závislosti tlakové diference a hmotnostního toku pro jedno a dvoufázové soustavy [3]

Tlaková diference dvoufázové soustavy projde lokálním minimem a s následným snižováním hmotnostního toku dochází k zvýšení intenzity varu, tedy ke zvýšení tlakové diference, dokud není dosaženo lokálního maxima. V tomto bodě již téměř celá oblast obsahuje páru z důvodu zvýšené rychlosti parních molekul a křivka dále kopíruje linii jednofázové soustavy s párou. [3]

Z rovnice kinetické energie lze vyjádřit tlak dvoufázového systému pomocí tří komponent, kterými jsou tlaková diference tření, gravitace a zrychlení. Za předpokladu ustáleného, homogenního a jednorozměrného proudění jsou komponenty tlakové diference dány následujícími rovnicemi. [3][5]

Tlaková diference tření

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{třecí}} = \tau_s \frac{O_o}{S_p} \quad (9)$$

τ_s – smykové napětí

Tlaková diference gravitace

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{gravitační}} = [\varepsilon_p \rho_v + (1 - \varepsilon_p) \rho_l] g \sin \gamma \quad (10)$$

ε_p – objemový poměr

ρ_v – hustota páry

ρ_l – hustota kapaliny

γ – úhel sklonu povrchu

g – tíhové zrychlení v gravitačním poli Země

Tlaková diference zrychlení

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{zrychlení}} = G^2 \frac{d}{dz} \left[\frac{x^2}{\varepsilon_p \rho_v} + \frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon_p) \rho_l} \right] \quad (11)$$

G – hmotnostní tok

d – průměr

x – suchost mokré páry

Za zvyšující se dvoufázovou tlakovou diferencí při snižujícím se hmotnostním toku může zvyšující se obsah páry. Jelikož je hustota páry menší než kapaliny, je celková hustota dvoufázového proudění také menší. Další tlakový gradient je důsledkem zrychlení a ještě více zvyšuje tlakovou diferencí tření za konstantního hmotnostního toku. [3][5]

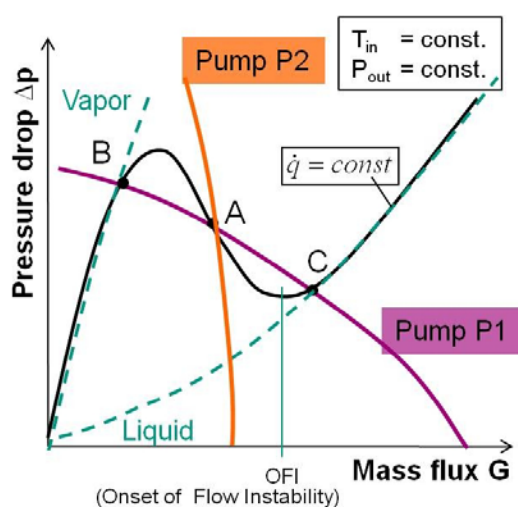
1.4 Nestabilita dvoufázového proudění

Ve dvoufázových systémech jsou nestability proudění nežádoucí z několika důvodů. Trvalé oscilace proudění mohou mít za následek mechanické vibrace některých komponent, nebo problémy s kontrolou celého systému. Také mohou ovlivnit lokální přenos tepla a způsobit krizi varu. Nestability mohou být statického nebo dynamického původu, mohou být hlavním nebo sekundárním jevem některého z procesů probíhajících uvnitř systému a mohou vznikat v zahřívaném kanále nebo v jiném místě dvoufázového proudění. [6]

1.4.1 Statická nestabilita

V oblasti negativního sklonu křivky v diagramu na obr. 5 může docházet k statickým nestabilitám, nejvýznamější z nich je Ledineggova nestabilita. K statické nestabilitě dochází, pokud je náklon křivky menší, než náklon charakteristické křivky čerpadla. Kritérium pro možný vznik této nestability je dáno rovnicí (12). [3]

$$\left(\frac{\delta\Delta p}{\delta G}\right)_{test.sekce} < \left(\frac{\delta\Delta p}{\delta G}\right)_{\text{čerpadlo}} \quad (12)$$



Obr. 5 Diagram dvoufázové tlakové difference a charakteristiky čerpadla [3]

Křivka čerpadla P1 má nestabilní chování v bodě A jelikož je sklon křivky tlakové difference strmější, než sklon křivky čerpadla. Může zde dojít k okamžitému přechodu ze stavu v bodě A do stavu v bodě B což může vyústit v krizi varu z důvodu náhlého vysokého podílu páry v systému. [3]

Naproti tomu je charakteristika čerpadla P2 velmi strmá a protíná se s křivkou testovací sekce pouze v jednom bodě. Je tedy nepravděpodobné, že dojde k podobnému chování jako v případě čerpadla P1. [3]

1.4.2 Dynamická nestabilita

K dynamické nestabilitě dochází v případě setrvačných sil a zpětných účinků uvnitř smyčky. Pokud například vznikne rázová vlna na vstupu do testovací sekce, určitou dobu trvá, než tuto sekci opustí. To může mít za následek její částečné odražení a vytvoření oscilace uvnitř

testovací sekce. Obvyklé dynamické nestability v dvoufázových systémech jsou akustické vlny, další jsou pak uvedeny v následující tabulce 1. [3]

Tab. 1 Rozdělení dynamických nestabilit [3]

Druh	Typ	Mechanismus
Základní dynamické nestability	Akustické oscilace	Rezonance tlakových vln
	Oscilace hustotních vln	Prodleva a zpětné účinky mezi velikostí průtoku, hustotou a tlakovou diferencí
Smíšené dynamické nestability	Tepelné oscilace	Interakce kolísání přenosu tepla s dynamikou proudění
	Nestabilita rovnoběžného kanálu	Interakce mezi rovnoběžnými kanály
Smíšená dynamická nestabilita jako druhotný jev	Oscilace tlakové difference	Interakce kanálu a stlačitelného objemu

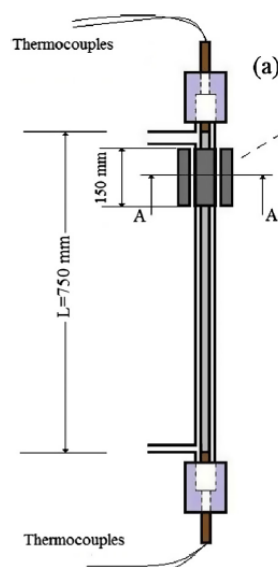
2 EXPERIMENTY NA MEZIKRUŽÍ

Tato kapitola se soustředí na experimenty kritického tepelného toku na mezikruží. Testovací sekci (mezikruží) tvoří vnitřní kovová trubice, která slouží jako maketa palivového proutku a vnější trubice, která vytváří prostor pro proudící chladicí kapalinu. Vnější trubice může být vyrobena z nerezové oceli pro experimenty s vysokým tlakem [7][9][10][12][13] nebo z křemenného/borosilikátového skla pro experimenty při nízkém tlaku [11][14][15][16]. Druhý případ umožňuje vizuální kontakt s povrchem makety a chováním chladicího média.

Tento způsob testování simuluje podmínky v tlakovodním jaderném reaktoru, jelikož mezera mezi vnější a vnitřní trubicí napodobuje mezeru mezi jednotlivými palivovými proutky v palivové kazetě. Pro lepší simulace je nutné použít svazek maket za provozního tlaku a teploty v reaktoru, o kterém je pojednáno v kapitole 4.

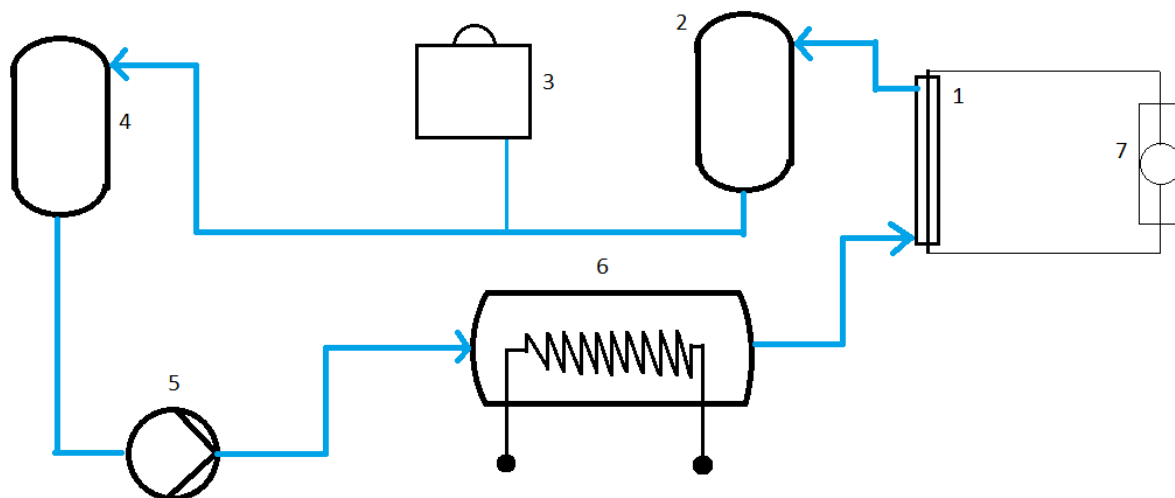
V tomto uspořádání je však nutno vyřešit některé problémy, které kvůli volbě geometrie nastávají. Jedním z nich je izolování zahříváné části od zbytku testovací sekce, dalším je měření teploty povrchu zahříváče a stanovení jejího prudkého vzrůstu, což značí kritický tepelný tok. Další problém, který nesmíme opominout je ten, že skleněná trubice není schopna vydržet tak vysoké tlaky jako jsou v PWR reaktorech, je tedy nutno používat pouze tlaky nižší což je zhruba do 2 MPa. Tento kompromis nám umožňuje sledovat chování chladicí kapaliny, jak je uvedeno výše.

Na následujícím obrázku je možné vidět uspořádání testovací sekce experimentu. Detailnější nákresy jsou obsaženy v přílohách.



Obr. 6 Schéma testovací sekce [8]

2.1 Experimentální testovací zařízení



Obr. 7 Schéma smyčky pro experimenty KTT

Testovací zařízení se sestává z několika důležitých prvků. Jedná se o kondenzátor (2), kompenzátor tlaku (3), chladič (4), čerpadlo (5), předehřívák (6), testovací sekci (1) a transformátor (7).

V kondenzátoru (2) dochází ke kondenzaci páry vzniklé v testovací sekci, z tohoto důvodu je umístěn za testovací sekci. Následuje tlakový kompenzátor (3), který má za úkol udržovat stabilní tlak v celém systému. Právě tento prvek udržuje stabilní hladinu tlaku kapaliny v celé experimentální smyčce. V chladiči (4) dochází ke zchlazení kapaliny, aby byla její teplota nižší, než teplota kapaliny na vstupu do testovací sekce. Čerpadlo (5) zajišťuje cirkulaci kapaliny smyčkou. V předehříváku (6) dochází k ohřátí zchlazené kapaliny přesně na teplotu potřebnou k provedení experimentu. Teplota kapaliny na vstupu do testovací sekce je určena právě tímto prvkem.

V testovací sekci (1) dochází k ohřívání makety Jouleovým teplem pomocí transformátoru (7). V mezikruží mezi vnější trubicí a nerezovou maketou protéká chladicí kapalina. Zde dochází ke kritickým tepelným tokům, které jsou důvodem stavby celého zařízení.

Tab. 2 Přehled experimentů na mezikruží

Experiment	Materiál makety/vnější trubice	Malý/velký smáčený průměr [mm]	Vytápěná délka [mm]	Podmínky	Chladicí médium
Abassi [7]	Nerez/Nerez	33/55	1000	p = 25 bar	Voda
Aminfar [8]	Nerez/Pyrex	12/19	750	p = 0,85 bar G = 0-150 kgm ⁻² s ⁻¹ h _{in} = 106 kJ/Kg	Voda
Gang [9]	Nerez/Nerez	8/16	1400	p = 230-280 bar G = 350-1000 kgm ⁻² s ⁻¹	Voda
Gang [9]	Nerez/Nerez	8/20	1400	p = 230-280 bar G = 350-1000 kgm ⁻² s ⁻¹	Voda
Gang [10]	Nerez/Nerez	7/10	850	p = 20-40 bar G = 26-69 kgm ⁻² s ⁻¹ x = 0,52-1,08	Voda
Gang [10]	Nerez/Nerez	8/10	850	p = 20-40 bar G = 26-69 kgm ⁻² s ⁻¹ x = 0,52-1,08	Voda
Haas [11]	Zircaloy-4 Křemenné sklo	9,5/13	326	p = 1,15-3 bar G = 250-1000 kgm ⁻² s ⁻¹ h _{in} = 100-250 kJ/Kg	Voda
Haas [11]	Zircaloy-4 Křemenné sklo	9,5/18	326	p = 1,2-3 bar G = 250-400 kgm ⁻² s ⁻¹ h _{in} = 104-250 kJ/Kg	Voda
Changhong [12]	Nerez/Nerez	7/10	710	p = 15-60 bar G = 39-163 kgm ⁻² s ⁻¹ x = 0,02-0,88	Voda
Changhong [12]	Nerez/nerez	7,8/10	710	p = 15-60 bar G = 39-163 kgm ⁻² s ⁻¹ x = 0,02-0,88	Voda

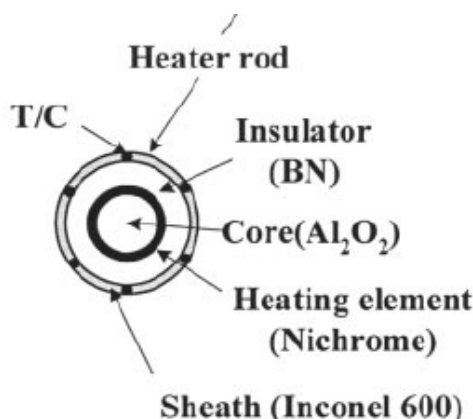
Experiment	Materiál makety/vnější trubice	Malý/velký smáčený průměr [mm]	Vytápěná délka [mm]	Podmínky	Chladicí médium
Chun [13]	Inconel 600 Nerez	9,54/19,4	1842	p = 5,7-150 bar G = 198-645 kgm ⁻² s ⁻¹ x = 0,106-0,536	Voda
El-Genk [14]	Nerez/Pyrex	12,7 20-25,4	500	p = 1,18 bar G = 0-260 kgm ⁻² s ⁻¹ x = 0,01-0,28	Voda
Shoesse [15]	Nerez/Pyrex	10/22	1000	p = 1,28 bar G = 20-280 kgm ⁻² s ⁻¹ h _{in} = 30-218 kJ/Kg	Voda
Park [16]	Nerez/Pyrex	19/29	600	p = 1,1 bar G = 0-198,8 kgm ⁻² s ⁻¹ x = (-)0,119-0,029	Voda
Geping [17]	Nerez/Nerez	7,8/10	850	p = 20-40 bar G = 26-69 kgm ⁻² s ⁻¹ x = 0,52-1,08	Voda

3 MĚŘENÍ TEPLoty V PRŮBĚHU EXPERIMENTU KTT

Při zjišťování kritického tepelného toku, je klíčové snímání teploty povrchu zahřívané trubice. Je tak možné předejít zničení makety palivového elementu a také stanovit, kdy k tomuto jevu došlo. Jelikož kolem makety proudí chladicí kapalina, je měření teploty na jejím povrchu velmi složité. Jedna z možností je provrtání přírub, přivaření termočlánků k povrchu makety a vyvedení jejich vývodů otvory v přírubách. Tento způsob má ale několik úskalí. Vzhledem k tlaku uvnitř testovací sekce je obtížné zajistit izolaci otvorů pro vývody termočlánků. Další problém je vytvoření překážek v proudě chladiva a nemožnost přesně naměřit kritický tepelný tok z důvodu neuniformního rozložení tepla na maketě.

Proto se většina vědců zkoumající tento fenomén rozhodla pro měření teploty makety zevnitř a s výhodou tak využít její geometrie. Tímto odpadnou problémy s těsněním a také překážkami v kapalině a vývody termočlánků se umístí do vnitřního prostoru v trubici. Existuje více způsobů jak zde termočlánky uchytit. Je možné je přivařit přímo na vnitřní povrch makety. Je nutné ovšem zvolit médium, kterým termočlánky budou připevněny s ohledem na to, že většina testovacích sekcí je vytápěna elektrickým proudem a tak je důležité zajistit dobře tepelně vodivé spojení mezi termočlánkem a maketou. Problémy ovšem nastanou ve chvíli, kdy dojde k poškození makety nebo je potřeba pro jiný experiment použít například maketu s jiným průměrem. Termočlánky je nutné odpájet a použít znovu, nebo koupit nové. Obojí je finančně náročné a tak se využívá poslední způsob umístění termočlánků.

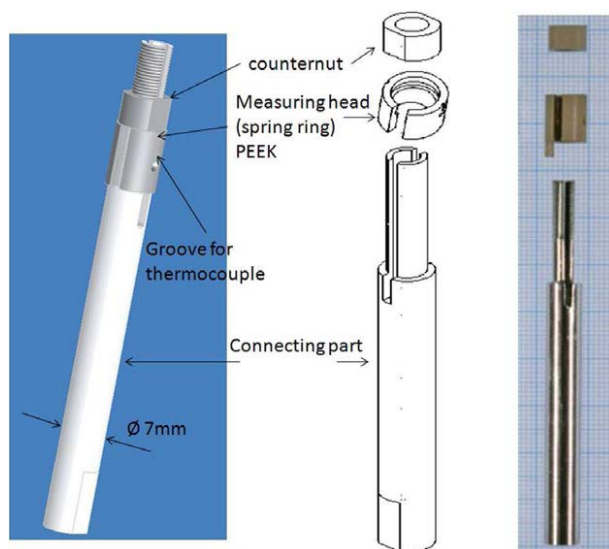
Následující obrázek ukazuje způsob umístění termočlánků v maketě složené z více vrstev. Jádro makety je tvořeno oxidem hlinatým, kolem kterého je trubička vyrobená z nikl-chromu. Vnější povrch makety tvoří plášť z materiálu Inconel 600, na který jsou přivařeny termočlánky a jako oddělovač mezi zahřívacím elementem a pláštěm je použit izolační BN prášek. Nevýhoda tohoto uspořádání je ta, že při záměně makety za jinou, nebo při jejím poškození, je nutné použít zcela nové termočlánky, což vede k navýšení nákladů na výrobu makety.



Obr. 8 Průřez maketou [13]

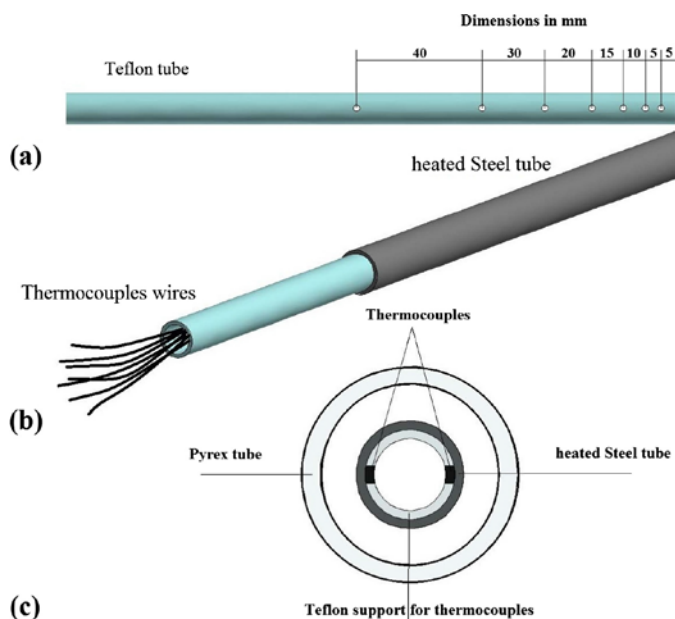
V posledním způsobu měření teploty se jedná o speciální měřicí trubici osazenou termočládky, která se zasouvá přímo do vnitřního prostoru makety.

V experimentu *Haas* [11] bylo zkonstruováno několik hlav osazených termočládky, které se postupně vkládaly dle potřeby do zahříváné trubice, bylo tak možné měnit vzdálenost měřených úseků. Tento způsob zajišťuje vysokou variabilitu měření teplot. [11]



Obr. 9 Schéma hlavice termočládku [11]

Jiný způsob výroby sondy byl zvolen v experimentu *Aminfar* [8]. Zde byl použit support, do kterého byly vyvrtány otvory pro termočládky. Z důvodu vysoké teploty vnitřní stěny makety bylo nutné zvolit materiál s vysokou odolností vůči teplotě. Jako materiál byl zvolen teflon. Termočládky do něj potom byly připevněny silikonovou pastou. Autoři však zdůrazňují, že tento způsob nesloužil k měření teploty kritického tepelného toku, ale pouze k prevenci zničení makety (odpojení elektrického proudu po překročení dané teploty zahříváče) a to hlavně z důvodu oscilací měřených teplot. Tento způsob také neumožňuje měnit polohu termočládků, jelikož otvory v teflonu jsou fixní. [8]

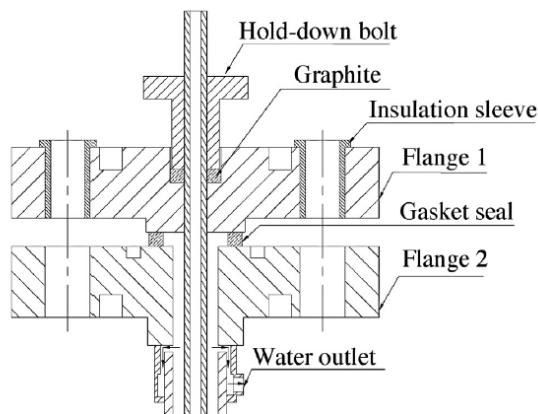


Obr. 10 Schéma zařízení pro měření teploty [8]

3.1 Izolace makety od testovací sekce.

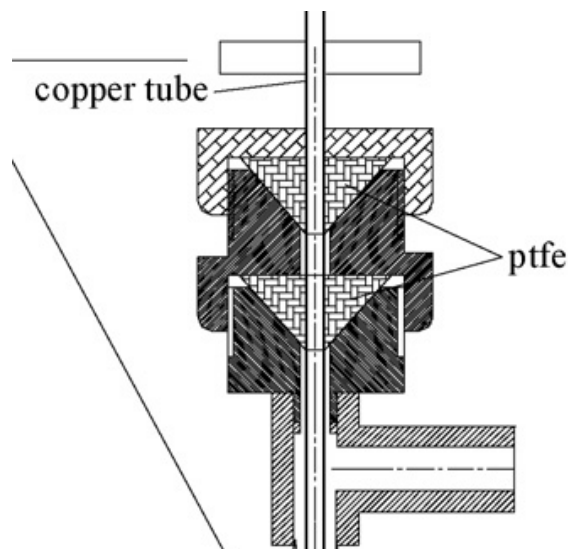
Izolace zahříváné trubice od zbytku testovací sekce je velmi důležitá a to hlavně z důvodu bezpečnosti práce. Přenosem elektrického potenciálu na nosnou konstrukci experimentální smyčky by mohlo dojít ke zranění operátorů při kontaktu s kostrou zařízení. Je mnoho různých způsobů izolace testovací sekce, některé z nich jsou uvedeny v následujícím textu.

V experimentu *Gang* [10] byla testovací sekce oddělena dvojitou izolací. Ta se sestávala z plochého těsnění mezi přírubou 1 a přírubou 2 a z kruhového těsnění mezi přírubou 2 a vnější trubicí. Mezi přírubu 1 a vnitřní trubicí byla instalována ucpávka, vytvořená z těsnění vtlačeného do grafitové výplně za využití přitlačného šroubu. V přírubě 1 bylo navíc použito izolační pouzdro vložené do díry pro šroub. [10]



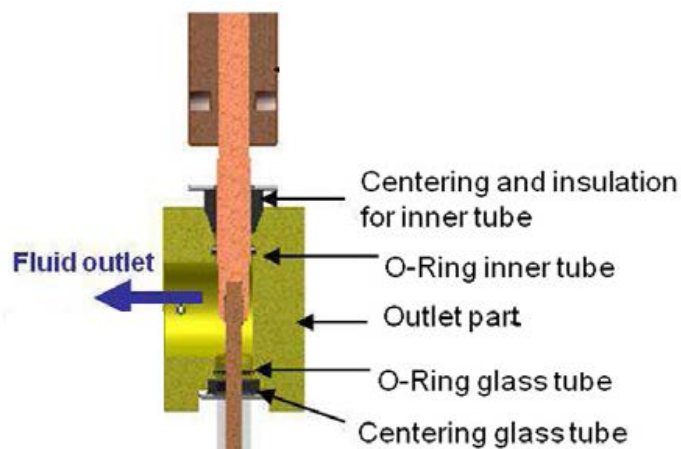
Obr. 11 Detailní průřez částí testovací sekce [10]

V experimentu *Geping* [17] byly mezi příruby vloženy teflonové komolé kužely, které je od sebe oddělovaly. Tyto kužely také zčásti slouží ke středění vnitřní zahřívané trubice. Vzhledem k použití vnější trubice z nerezové oceli, byla trubice (ke snížení tepelných ztrát) omotána izolací z tkaniny vyrobené ze silikonu, hliníku a skleněných vláken. Tato izolace snižuje tepelné ztráty na méně než 5%. [17]



Obr. 12 Průřez částí testovací sekce [17]

V experimentu *Haas* [11] byla využita izolace, která také přímo středila maketu. V horní části byl využit materiál, který bohužel nebyl popsán ve zprávě z experimentu. V dolní části bylo využito hlavně sklo, jehož izolační vlastnosti jsou dostačující. [11]



Obr. 13 Detail izolace testovací sekce [11]

3.2 Vytápění testovací sekce

Velmi důležitou částí celého experimentu je vytápění zahříváné trubice. Vzhledem k tomu, že se zahřívá většinou elektrickým proudem, je nutné vyřešit problém dopravení elektrického proudu přímo na maketu, která je uzavřena ve skleněné / nerezové trubici a obtékána vodou. Tento problém se většinou řeší připevněním nejčastěji měděné (vysoká vodivost) nebo mosazné trubice [14] na jejím začátku a konci. Tyto trubice se poté osadí elektrodami spojenými přímo se zdrojem elektrické energie.

Je nutné se zaměřit především na způsob spojení obou těchto trubic, jelikož musí dojít k dokonalému spojení zabraňujícímu prosakování kapaliny, spoj musí být dostatečně pevný, aby odolal tlakům, které se mohou blížit i 30 MPa a také musí být schopen dobře vést elektrický proud.

Jistě je na místě zmínit svařování, které s sebou bohužel nese některé problémy. Jedná se především o problém špatné svařitelnosti nerezové oceli a také nutnost používat svařovací médium s vysokou vodivostí, odolností vůči vysokým teplotám a tlakům a antikorozními vlastnostmi, vzhledem k tomu, že je spoj ponořen v chladicí kapalině.

Další možností je tvrdé pájení a to zejména pájení ve vakuu. Tento způsob pájení je také výhodný u nerezových ocelí, jelikož ve vakuu pájka velmi dobře smáčí jejich povrch a po ztuhnutí je velmi tvrdá. Roztavená pájka v případě tohoto spojování zatéká do mezery mezi součástmi a tvoří tak dokonale těsný a mechanicky odolný spoj.

Poslední možnost je spojit trubice lisováním. Vnější trubice je zahřáta a tím se roztáhne a vnitřní ochlazená, čímž se mrští. Trubice se poté vloží do sebe, a jakmile obě dosáhnou normální (pokojové) teploty je již spoj nerozebratelný. Spojení zaručuje výborné mechanické vlastnosti, dobrou vodivost mezi povrchy, těsnost a odolnost vůči vysokým teplotám.

Jako zdroje elektrické energie mohou být použity buď zdroje stejnosměrného (DC) nebo střídavého (AC) proudu široké škály hodnot výkonů.

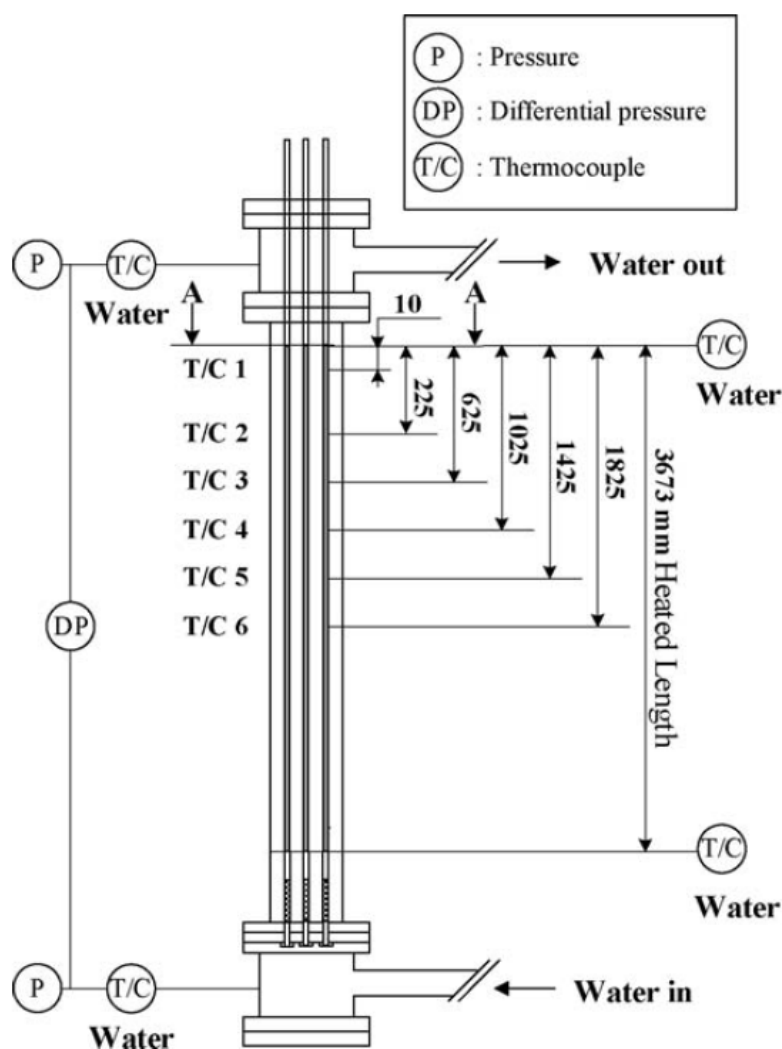
Tab. 3 Zdroje použité v některých experimentech

Typ zdroje	Výkon	Experiment
Stejnoseměrný	24kW (30V 800A)	<i>Aminfar</i> [8]
Stejnoseměrný		<i>Gang</i> [9]
Střídavý		<i>Haas</i> [11]
Střídavý	80 kW	<i>Changhong</i> [12]
Střídavý	500 kW	<i>Chun</i> [13]
Střídavý	970 kW	Moon [18]
Stejnoseměrný	40 kW (200V 200A)	<i>Shoesse</i> [15]
Stejnoseměrný	64 kW (32V 2000A)	<i>Park</i> [16]

Zdroj a elektrodami osazená maketa palivového elementu tvoří uzavřený obvod. Maketa zde působí jako velký odpor (spotřebič) a díky tomuto faktu se zahřívá. V trubici vzniká tzv. Jouleovo teplo, což je teplo, které je generováno ve vodiči při průchodu elektrického proudu. Toto zahřívání je způsobeno předáváním kinetické energie mezi pohybujícími se elektrony a ionty v pevných pozicích. Jouleův zákon říká, že teplo ve vodiči je přímo úměrné odporu vodiče a druhé mocnině proudu protékající vodičem za určitý časový interval.

4 EXPERIMENTY NA SVAZKU TRUBEK

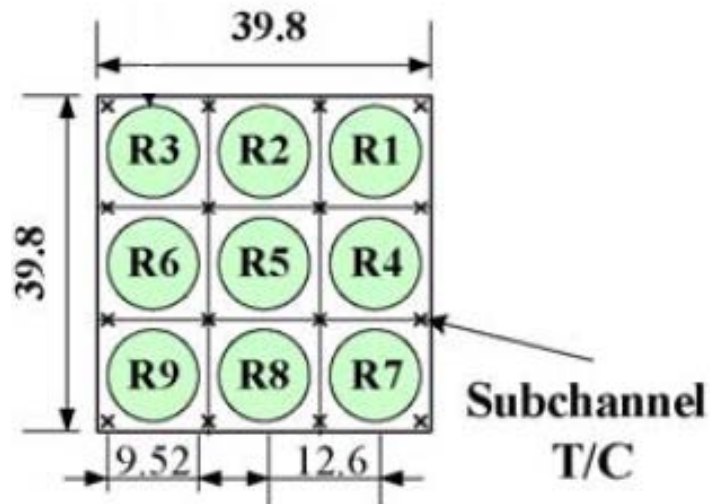
Stejně jako jsou prováděny experimenty na jedné trubici, dělají se i pokusy na svazku. Lze se tak ještě o něco lépe přiblížit podmínkám uvnitř jaderného reaktoru. Výhodou je také, že trubice, která je umístěna uprostřed svazku, je chráněna okolními trubicemi vůči vlivům vnějšího prostředí, jako je například ochlazování. Existuje samozřejmě více možností jak tento experiment provést, jelikož trubice mohou být uspořádány v odlišných geometriích, například ve čtverci nebo šestiúhelníku. Celé zařízení je pak o to složitější, čím větší svazek je testován, protože je nutné trubice držet v určené poloze a toho lze docílit pouze pomocí speciálních distančních mřížek.



Obr. 14 Rozložení termočlánků po délce testovací sekce [18]

Na obrázku lze vidět, že testovací sekce musí mít větší rozměry, je nutné použít příruby s větším počtem otvorů, složitější je také ohřívání jednotlivých maket. Měření teploty ve více trubicovém modelu je také o mnoho náročnější, než je tomu u jednoho elementu. Je nutné totiž měřit i teplotu chladiva mezi jednotlivými topnými tělesy a tak nastávají problémy jak termočlánky k tomu určené umístit dovnitř, do proudu chladiva.

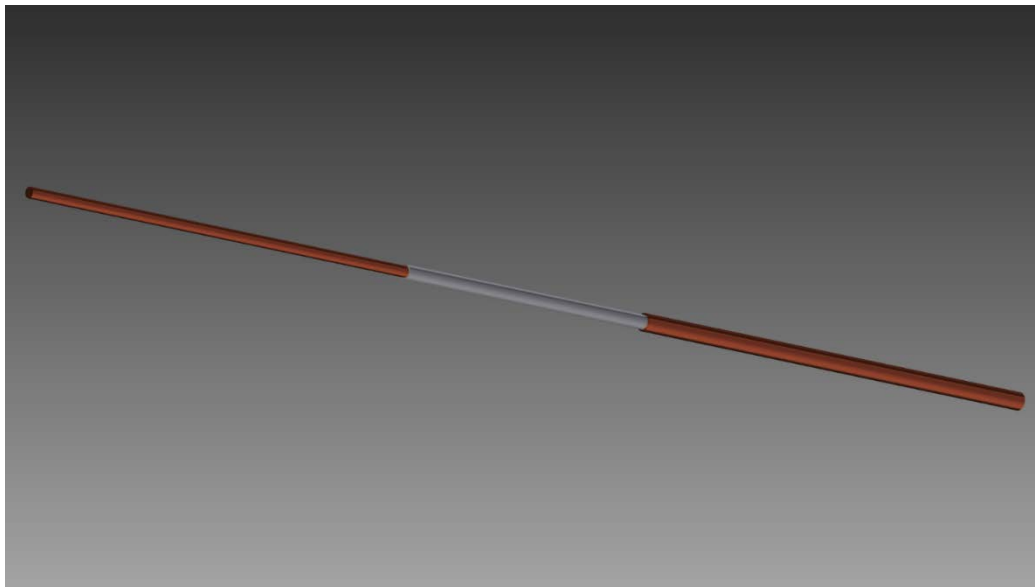
Na následujícím obrázku si lze povšimnout termočlánků umístěných uvnitř kanálu mezi jednotlivými maketami.



Obr. 15 Geometrie kanálu experimentu s více maketami [18]

5 MATEMATICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO POLE MAKETY

Matematický model byl vytvořen za účelem zjištění generace a šíření tepla v maketě. Veškeré výpočty byly provedeny v programu Microsoft Excel. Model je založen na možnosti změny geometrických rozměrů makety, avšak materiál byl zvolen s ohledem na skutečnou maketu, tedy nerezová část a dvě měděné části zajišťující přívod elektrické energie. Jelikož není možné měřit termokamerou teplotu skrz vodu, je nutné maketu ohřívat na vzduchu. Tomuto faktu byl tedy přizpůsoben matematický model a maketa je chlazená vzduchem.

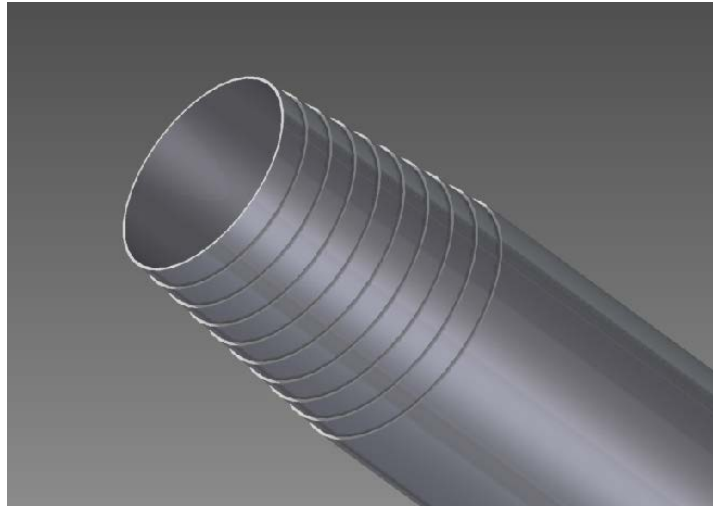


Obr. 16 Model makety palivového proutku

Maketa pro experiment ve smyčce VUT se sestává ze dvou měděných částí. Levá část je plná měděná tyč o průměru 9 mm a délce 300 mm, ta je zalisována do části z materiálu AISI 321, jejíž vnitřní průměr je 8,1 mm a vnější 9,1 mm, délka potom 340 mm. Nerezová část na konci přestupuje do pravé měděné trubky s vnitřním průměrem 8 mm a vnějším 10 mm, její délka je opět 300 mm.

Oba spoje jsou dlouhé 10 mm a jsou provedeny nasunutím vnější trubky na vnitřní. Část plné měděné tyče byla obrobena na vnitřní průměr nerezové trubice. Pravá část makety je dutá z důvodu zasunutí sondy s termočlánky pro měření teploty v průběhu experimentu ve smyčce.

V matematickém modelu byly obě měděné části rozděleny po délce na 31 dílků a nerezová část na 21 dílků. Nerezová část byla navíc rozdělena po průměru na 10 dílků, aby bylo možné přesněji vypočítat teploty.



Obr 17. Zobrazení myšlených vrstev makety

Základní myšlenkou pro výpočet teploty v maketě byla rovnice (14).

$$\delta Q = m \times c \times dT \quad (14)$$

c – měrná tepelná kapacita

m – hmotnost

δQ – přírůstek tepla

dT – přírůstek teploty

Po vyjádření změny teploty.

$$dT = \frac{\delta Q \times t}{C} \quad (15)$$

C – tepelná kapacita

t – časový krok

$$C = \rho \times V \times c \quad (16)$$

ρ – hustota materiálu

V – objem dílku

S využitím této rovnice bylo možné vypočítat přírůstek teploty a ten pak přičíst k původní teplotě. Nová teplota se poté přepíše místo staré a opět k ní je připočítán nový přírůstek teploty. Do rovnice byl také zahrnut časový krok, který umožňuje určit teplo přivedené za určitý čas. Pro výpočet přírůstku teploty je tedy nutné zjistit celkové množství přenesené energie a tepelnou kapacitu daného dílku.

5.1 Výpočet tepelné kapacity dílku

5.1.1 Výpočet objemu dílku

Objem dílku lze jednoduše vypočítat z jeho geometrických rozměrů

$$V = S_p \times l \quad (17)$$

S_p – plocha průřezu dílku

l – délka dílku

5.1.2 Určení hustoty oceli a mědi

K výpočtu hustoty v nerezové části makety (materiál AISI 321) byl využit následující vztah (18), který byl zjištěn experimentálně. [19]

$$\rho_{Fe} = (7,92 - 0,045 \times 10^{-2} \times T) \times 10^3 \quad (18)$$

T – termodynamická teplota

Hustota měděné části byla uvažována jako konstantní $\rho_{Cu} = 8960 \text{ kg/m}^3$.

5.1.3 Měrná tepelná kapacita oceli a mědi

Měrná tepelná kapacita nerezové oceli v závislosti na teplotě byla zjištěna experimentálně. [19]

$$c_{pFe} = 4,186 \times (117 + 5,8 \times 10^{-2} \times T - 0,21 \times 10^{-4} \times T^2) \quad (19)$$

Měrná tepelná kapacita mědi byla převzata z dokumentu, který shrnuje vlastnosti mědi, tato rovnice je využitelná pouze pro rozmezí teplot 293-1300K. [20]

$$c_{pCu} = 316,21 + 0,3177 \times T - 3,4936 \times 10^{-4} \times T^2 + 1,661 \times 10^{-7} \times T^3 \quad (20)$$

5.2 Tepelný přírůstek dílku

V každém dílku makety dochází z důvodu průchodu elektrického proudu ke generaci tepla. Dále je pak v závislosti na umístění dílku teplo přiváděno a odváděno vedením nebo konvekcí, případně zářením. Součet všech takto přivedených, odvedených a generovaných tepel je právě tepelný přírůstek δQ .

5.2.1 Generace Jouleova tepla

Jouleovo teplo Q_j je generováno podle vztahu (21).

$$Q_j = R \times U^2 \times t \quad (21)$$

R – elektrický odpor dílku

U – elektrický proud procházející dílkem

t – časový krok

Časový krok je definován na počátku modelu uživatelem. Elektrické napětí v jednotlivých dílcích je vypočítáno pomocí Ohmova zákona.

$$U = I \times R \quad (22)$$

I – proud procházející vodičem

U – napětí generované na svorkách zdroje

R – odpor vodiče

Ke zjištění celkového proudu procházejícího maketou bylo nutné nejdříve vypočítat celkový odpor. Odpor jednotlivých dílků R je vypočítán pomocí rovnice (23).

$$R = \frac{\rho_r \times l}{S_{\text{mezikruzi,kruh}}} \quad (23)$$

ρ_r – rezistivita materiálu

l – délka dílku

$S_{\text{mezikruzi,kruh}}$ – obsah mezikruží resp. kruhu

Plocha průřezu dílku je vypočítána pomocí následujícího vztahu.

Pro mezikruží:

$$S_{mezikruzi} = \pi \times r_n^2 - \pi \times r_{n-1}^2 \quad (24)$$

π – Ludolfovo číslo

r_n – poloměr vnější kružnice

r_{n-1} – poloměr vnitřní kružnice

Pro kruh

$$S_{kruh} = \pi \times r^2 \quad (25)$$

Rezistivita materiálu je závislá na teplotě. Následující vztahy byly převzaty z [19] pro ocel a [21] pro měď.

$$\rho_{rFe} = (69,41040575 + 0,08887133 \times T - 0,00003859 \times T^2) \times 10^4 \quad (26)$$

$$\rho_{rCu} = (21,01 + 0,009929 \times (T - 1357,6)) \times 10^{-8} \quad (27)$$

Jednotlivé odpory je nutné následně sečíst. Jelikož je nerezová část makety rozdělena na 10 pomyslných dílků po průměru, je zde nutné pro každý axiální dílek odpory sčítat jako paralelně zapojené tedy.

$$R_{celkový\ Fe\ dílku} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}}} \quad (28)$$

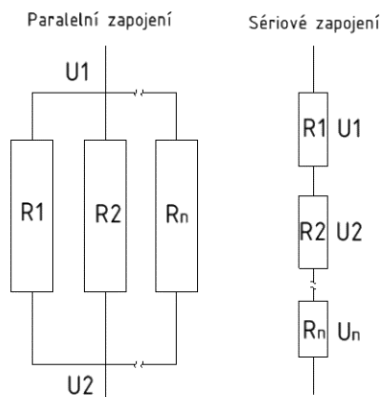
Navíc je u prvního a posledního dílku důležité sečíst odpor měděné a nerezové části také paralelně.

$$R_{FeCu} = \frac{1}{\frac{1}{R_{Cu}} + \frac{1}{R_{celkový\ Fe\ dílku}}} \quad (29)$$

Celkový elektrický odpor makety se pak počítá jako sériové zapojení jednotlivých odporů.

$$R_{makety} = R_1 + R_2 + \dots + R_{80} + R_{81} \quad (30)$$

Pomocí Ohmova zákona (22) je nyní možné vypočítat elektrické napětí na jednotlivých dílcích makety, které je na každém axiálním dílku různé. Na smyšlených paralelních dílcích nerezové části je však napětí stejné.



Obr. 18 Schéma sériového a paralelního zapojení odporů

5.2.2 Přenos tepla vedením

Vedení tepla je detailně popsáno v kapitole 16. [4]

Za nejteplejší místo celé makety je považován prostřední dílek nerezové části makety. V axiálním směru se tedy teplo šíří vedením směrem od tohoto dílku k okraji makety pomocí následující rovnice.

$$Q_{vedax,rad} = \frac{T_1 - T_2}{R_{tepvax,rad}} \quad (31)$$

T_1, T_2 – teploty středů dílků

$R_{tepvax,rad}$ – axiální resp. radiální tepelný odpor dílků při vedení

$$R_{tepvax} = \left(\frac{\frac{l}{2}}{\lambda_1 \times S_p} + \frac{\frac{l}{2}}{\lambda_2 \times S_p} \right) \quad (32)$$

λ_1 – tepelná vodivost prvního dílku

λ_2 – tepelná vodivost druhého dílku

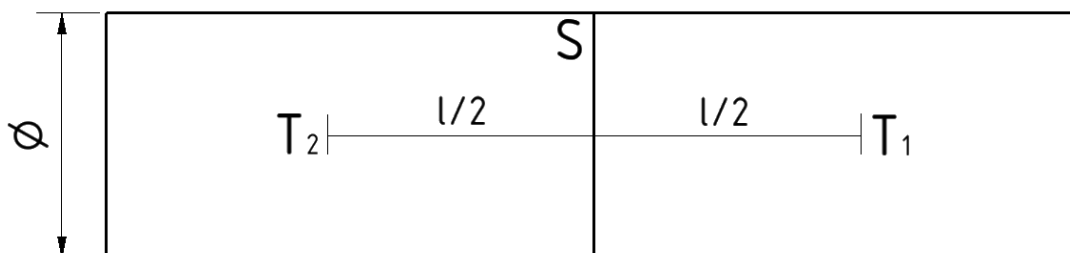
l – délka dílku

Tepelná vodivost mědi i nerezové oceli je závislá na teplotě. Pro výpočet byly použity následující vztahy, z nichž první byl převzat z [19] a druhý z [20].

$$\lambda_{Fe} = 1,163 \times (11,8 + 1,2725 \times 10^{-2} \times T) \quad (33)$$

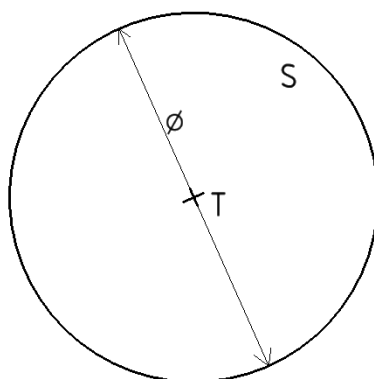
$$\lambda_{Cu} = 420,75 - 6,8493 \times 10^{-2} \times T \quad (34)$$

Následující obrázky lépe popisují rovnici (32). Boční pohled je stejný pro všechny dílky makety, pohled z průřezu se pro různé dílky makety liší.



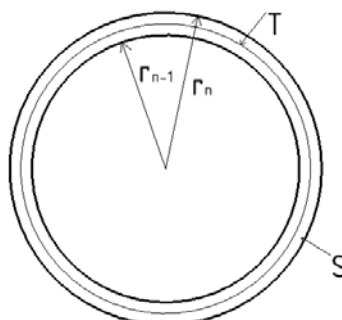
Obr. 19 Boční pohled na dílky makety

V levé části je teplota brána ve středu kolmého řezu maketou.



Obr. 20 Průřez levou měděnou částí

V nerezové pravé měděné části je teplota uvažována jako teplota na kružnici uprostřed kolmého průřezu dílkem.

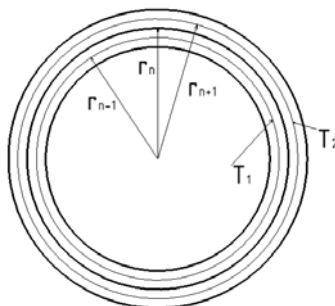


Obr. 21 Průřez nerezovou a pravou měděnou částí

Vedení tepla v radiálním směru v nerezové části makety je řešeno jako vedení tepla složenou válcovou stěnou. Rovnice vedení tepla je stejná jako v axiálním směru, ovšem výpočet tepelného odporu se liší.

$$R_{tepvedrad} = \frac{1}{2 \times \pi \times l} \times \left(\frac{1}{\lambda_1} \times \ln \frac{r_n}{r_{n-1}} + \frac{1}{\lambda_2} \times \ln \frac{r_{n+1}}{r_n} \right) \quad (35)$$

$R_{tepvedrad}$ – tepelný odpor při vedení v radiálním směru



Obr. 22 Vedení v radiálním směru

5.2.3 Přenos tepla konvekcí

Na vnějším povrchu makety dochází k přenosu tepla konvekcí. Pro výpočet byla uvažována přirozená konvekce, dostatečně velký prostor kolem makety, aby se nezvyšovala teplota okolního vzduchu a axiální konvekce z okrajových částí byla zanedbána.

Jelikož je teplota uvažována ve středu dílku, bylo potřeba pro konvekci vypočítat složený tepelný odpor.

$$R_{tepkonv} = \frac{1}{\alpha \times S_{povrch}} + \frac{1}{2 \times \pi \times l} \times \frac{1}{\lambda} \times \ln \frac{r_n}{r_{n-1}} \quad (36)$$

α – součinitel přestupu tepla

S_{povrch} – povrch dílku

$R_{tepkonv}$ – složený tepelný odpor při konvekci a vedení

$$S_{povrch} = 2 \times \pi \times r_n \times l \quad (37)$$

Součinitel přestupu tepla α lze vypočítat pomocí následující rovnice, jako charakteristický rozměr je zvolen vnější průměr dílku.

$$\alpha = \frac{Nu \times \lambda_v}{L} \quad (38)$$

Nu – Nusseltovo číslo

λ_v - tepelná vodivost vzduchu

L – charakteristický rozměr

Nusseltovo číslo bylo vypočteno pomocí vztahu uvedeného na straně 14 v [22].

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 \times (Gr \times Pr)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + 0,721 \times \left(\frac{1}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right)^2 \quad (39)$$

Gr – Grashofovo číslo

Pr – Prandtlovo číslo

Pro vzduch platí.

$$Pr = 0,71 \quad (40)$$

Vzorec pro Grashofovo číslo je uveden na straně 43 v [22].

$$Gr = \frac{g \times \beta \times (T_t - T_\infty) \times L^3}{\nu^2} \quad (41)$$

g – tíhové zrychlení v gravitačním poli Země

β – teplotní součinitel objemové roztažnosti

T_t – teplota dílku makety

T_∞ - teplota okolního vzduchu

ν – kinematická viskozita vzduchu

Přenos tepla konvekcí je tedy řešen pomocí rovnice (42).

$$Q_{konv} = \frac{(T_t - T_\infty)}{R_{tepkonv}} \quad (42)$$

5.2.4 Přenos tepla zářením

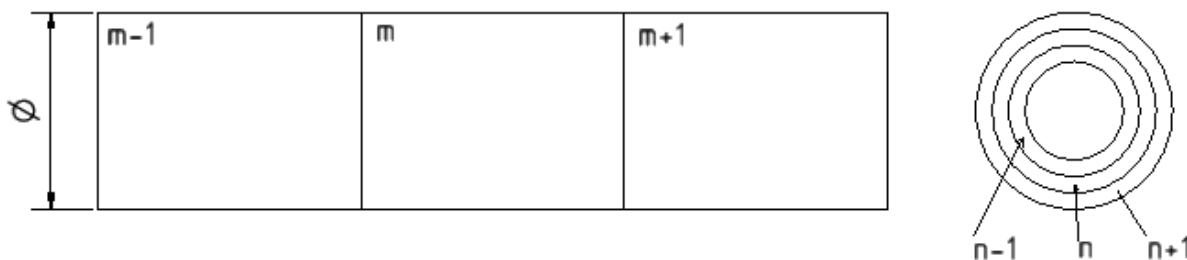
Teplu přenášené zářením z povrchu makety nelze zanedbat, jelikož se zvyšuje se čtvrtou mocninou termodynamické teploty. Čím je tedy povrch teplejší oproti okolnímu prostředí, tím více tepla je vyzářeno do okolí. Jak popisuje následující rovnice.

$$Q_z = \sigma \times \varepsilon \times S_{povrch} \times (T_t^4 - T_\infty^4) \quad (43)$$

ε – emisivita povrchu dílku

5.3 Celkový přírůstek tepla v radiálním a axiálním směru

K vysvětlení indexů slouží následující obrázek. V axiálním směru jsou veličiny značeny indexy m , v radiálním směru pak n . Tyto principy se vztahují na každý dílek makety.



Obr. 23 Zobrazení indexů v axiálním a radiálním směru

Pro šíření tepla uvnitř makety bylo předpokládáno, že se bude šířit od nejteplejšího dílku v jejím středu směrem k okrajům.

Nejteplejší dílek je tedy vnitřní centrální dílek nerezové části makety. Vnitřní stěna nerezové a duté měděné části byla považována za adiabatickou, tedy skrz ni nedocházelo k žádnému přenosu tepla. Obecná rovnice pro součet tepel je tedy následující.

$$\delta Q = Q_j + Q_{m+1} + Q_{m-1} + Q_{n+1} + Q_{n-1} + Q_z \quad (44)$$

Znaménka v rovnici jsou určena podle toho, zda je teplo přiváděno (+) nebo odváděno (-). Záleží tedy, na kterém místě se dílek nachází. Například pro vnější střední dílek nerezové části makety platí.

$$\delta Q = Q_j - Q_{vedaxL} - Q_{vedaxP} - Q_{konv} + Q_{vedrad} - Q_z \quad (45)$$

$$Q_{vedaxL} = \frac{T_m - T_{m-1}}{\frac{l}{2} + \frac{l}{2}} \quad (46)$$

$$\frac{1}{\lambda_m \times S} + \frac{1}{\lambda_{m-1} \times S}$$

$$Q_{vedaxP} = \frac{T_m - T_{m+1}}{\frac{l}{\lambda_m \times S} + \frac{l}{\lambda_{m+1} \times S}} \quad (47)$$

$$Q_{konv} = \frac{(T_n - T_{n+1})}{\frac{1}{\alpha \times S_{povrch}} + \frac{1}{2 \times \pi \times l} \times \frac{1}{\lambda_n} \times \ln \frac{r_n}{r_{n-1}}} \quad (48)$$

$$T_\infty = T_{n+1} \quad (49)$$

Poloměry v logaritmu jsou označeny dle obr. 21.

$$T_1 = T_n \quad (50)$$

$$T_2 = T_{n+1} \quad (51)$$

Pro výpočet radiálního vedení je opět využito pro poloměry obr. 21

$$Q_{vedrad} = \frac{T_{n-1} - T_n}{\frac{1}{2 \times \pi \times l} \times \left(\frac{1}{\lambda_{n-1}} \times \ln \frac{r_n}{r_{n-1}} + \frac{1}{\lambda_n} \times \ln \frac{r_{n+1}}{r_n} \right)} \quad (52)$$

$$T_1 = T_{n-1} \quad (53)$$

$$T_2 = T_n \quad (54)$$

Pro vnitřní radiální dílek na stejném místě pak platí.

$$\delta Q = Q_j - Q_{vedaxL} - Q_{vedaxP} - Q_{vedrad} + 0 - 0 \quad (55)$$

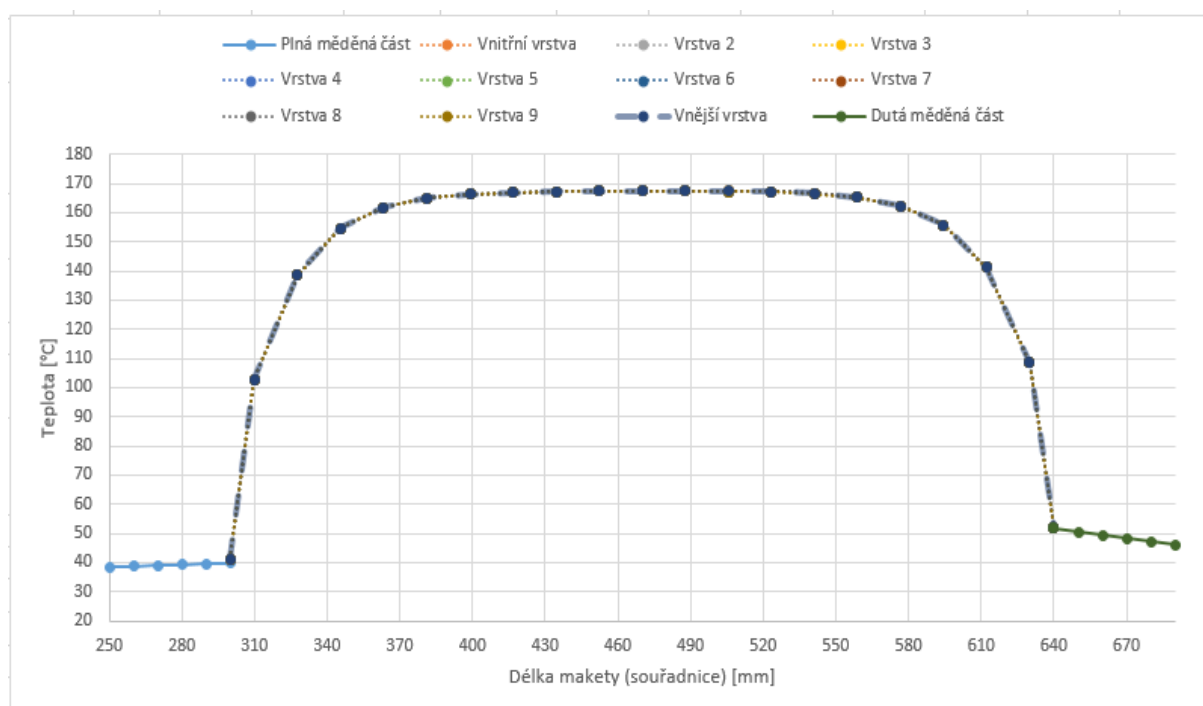
5.4 Výsledek výpočtu matematického modelu

Výpočet makety byl proveden pro následující parametry:

Tab. 4 parametry makety v matematickém modelu

Proud zdroje	30 A
Časový krok	0,0005 s
Délka plné měděné části	300 mm
Délka duté měděné části	300 mm
Délka nerezové části	340 mm
Vnější průměr nerezové části	9 mm

Na následujícím obrázku lze vidět průběh teplot po proběhnutí výpočtu při poudu 30 A. Z důvodu rozsáhlosti grafu bylo zobrazeno pouze 6 dílků měděných částí z každé strany. Je ovšem jednoznačně vidět, že z důvodu větší tepelné kapacity a sníženého tepelného odporu díky většímu průřezu, má levá měděná část nižší teplotu než pravá. Teploty jednotlivých měděných částí se směrem k okraji snižují. Pro nerezovou část makety (oblast mezi souřadnicemi 300 a 640) platí, že vzhledem k malému tepelnému toku je rozdíl v teplotě jednotlivých vrstev velmi malý. V případě chlazení vodou s velkým tepelným tokem by došlo k výraznějším rozdílům. Jedná se ovšem o proud 1000 A.



Obr. 24 Průběh teploty po ustálení pro 30 A

6 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ TEPLIT MAKETY

Jedním z bodů této práce bylo experimentálně změřit teplotní pole. Maketa byla měřena v těžké laboratoři budovy D5 v areálu Fakulty Strojního Inženýrství. K měření elektrického napětí makety byl použit multimetr.

6.1 Výroba makety

Na výrobu makety byla použita měděná tyč o průměru 9 mm a délce 600 mm, dále pak nerezová trubka s vnějším průměrem 9,1 mm a tloušťkou stěny 0,5 mm zkrácená na 340 mm a v poslední řadě měděná trubka s vnějším průměrem 10 mm, tloušťkou stěny 1 mm a délkou 600 mm. Měděná tyč byla obrobena na soustruhu tak, že z posledního centimetru byl odebrán 1 mm materiálu po průměru, aby se na ni mohla nasunout trubka z nerezové oceli. Spoj byl poté zpevněn tenkou vrstvou pájky. Napojení měděné trubky z pravé strany bylo provedeno nalisováním. Spoj byl poté ještě pojištěn tenkou vrstvou pájky.



Obr. 25 Maketa palivového proutku

6.2 Připevnění termočlánků a zdroje elektrické energie

Bylo třeba vyřešit několik důležitých věcí. Připevnění termočlánků pro měření teploty na povrchu makety, přivedení elektrické energie do makety a odizolování makety z důvodu proudových ztrát.

6.2.1 Připevnění termočlánků

Jelikož výstupem z experimentu měly být teploty povrchu makety, bylo nutné vyřešit jejich měření. K tomu byly zvoleny termočlánky typu K (*TJC-158-CA-SS-020U-28*), které jsou schopny měřit teploty v rozsahu -200°C až 1250°C s přesností lepší než $2,2^{\circ}\text{C}$. [23] K připevnění termočlánků na povrch makety byla využita lepicí hliníková páska. Termočlánky umístěné ve středu makety byly navíc připevněny teflonovým vláknem, jelikož lepidlo na pásce nebylo schopno vydržet teploty nad 140°C .



Obr. 26 Připevnění termočlánků k povrchu makety

6.2.2 Přivedení elektrické energie na maketu

Zdroj elektrické energie *Voltcraft HPS-11560*, který je schopen dodávat až 60 A, byl zapůjčen na Fakultě Elektrotechniky a Komunikačních technologií. Jeho spojení s maketou bylo provedeno dvěma silnými vodiči. U zdroje byly připevněny měděnými očky a k maketě stahovacími objímkami pro utěsnění hadic. Aby byly rozměry měděných částí makety shodné s matematickým modelem, byly přívodní kabely připevněny vždy 300 mm od spoje s ocelovou částí. Bylo nutné také vyřešit odizolování makety z důvodu svodu proudu. K tomuto účelu byla použita hadice nasunutá na oba konce makety. Z levé strany byla hadice uchycena ve svěráku a vpravo položena na skládacím žebříku.



Obr. 27 Připevnění kabelů k maketě



Obr. 28 Elektrická izolace makety

6.3 Sběr dat z naměřených teplot

K zaznamenávání údajů byly termočlánky připevněny do sběrnice a následně do modulu NI 9213 výrobce National Instruments, modul byl zapojen do systému pro sběr dat NI cDAQ-9188XT. [24][25] Z tohoto systému byly teploty přenášeny do počítače a zaznamenávány programem LabView. Výstupem byla tabulka naměřených teplot každou sekundu od zpuštění měření.

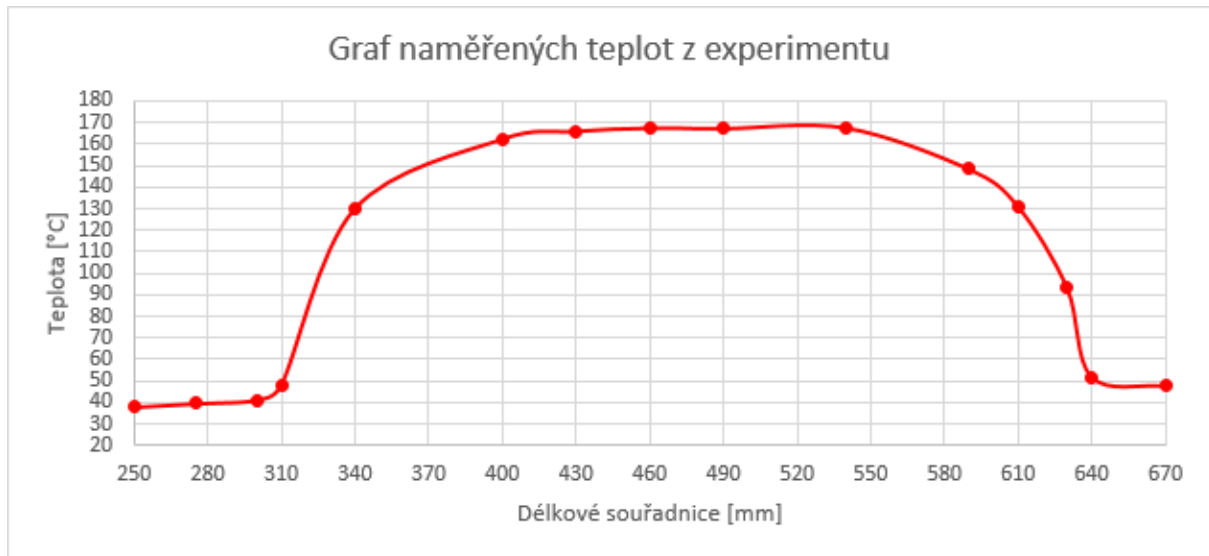
6.3.1 Měření termokamerou

Díky Ing. Kracíkovi jsme měli také možnost pořizovat snímky z termokamery. Termokamerou Flir FC 660 byly zaznamenávány infračervené snímky makety a to nám

umožnilo detailně zobrazit průběh teploty ve spojení mezi měděnou a ocelovou částí makety a také porovnat naměřené hodnoty z termočlánků s těmi z termokamery.

6.4 Výsledky měření

Níže je možné vidět graf teplot po ustálení. Do ustáleného stavu se maketa zahřívala po dobu přibližně 14 minut.



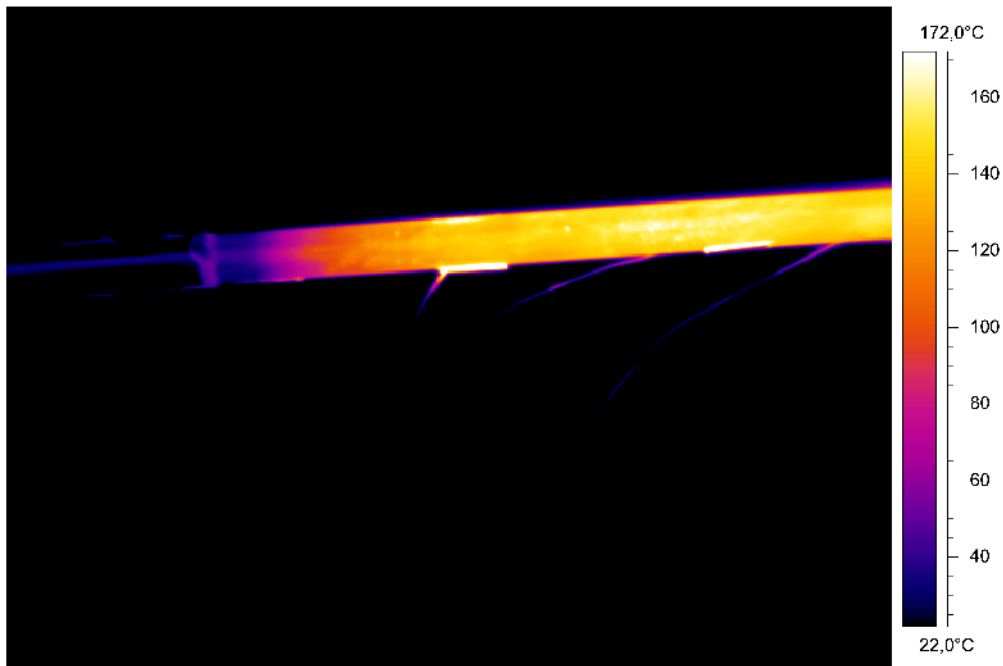
Obr. 29 Experimentálně naměřené teploty

Pro porovnání je přiložen také obrázek z termokamery.



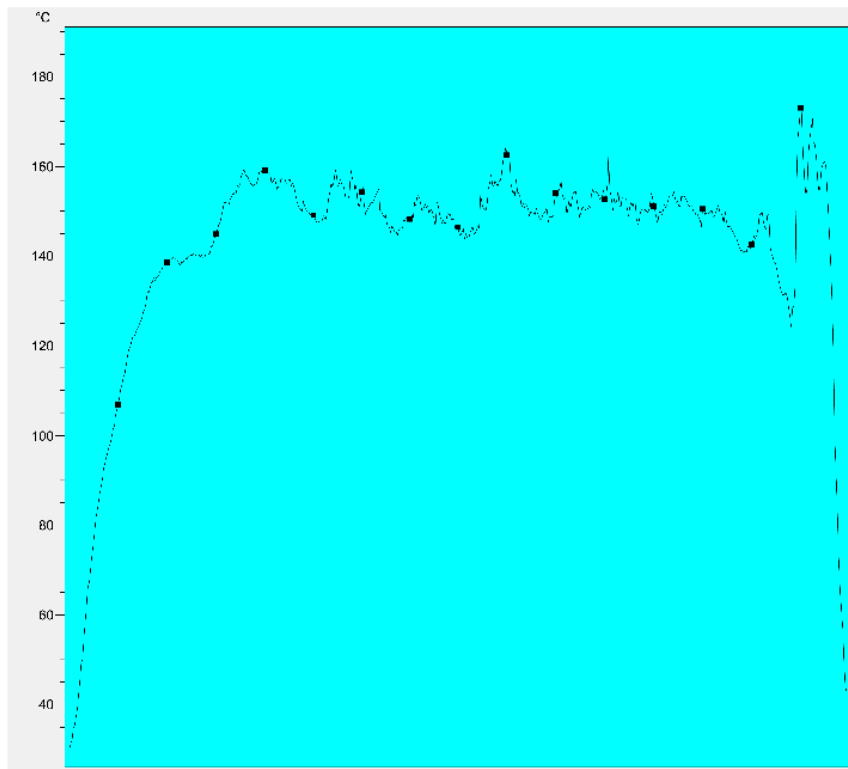
Obr. 30 Fotografie makety pomocí termovize

Dále pak fotografie spoje nerezové a měděné části makety, kde je dobře viditelný rozdíl teplot jednotlivých částí a vliv teploty měděné tyče na nerezovou trubku.



Obr. 31 Přechod měděné a nerezové části

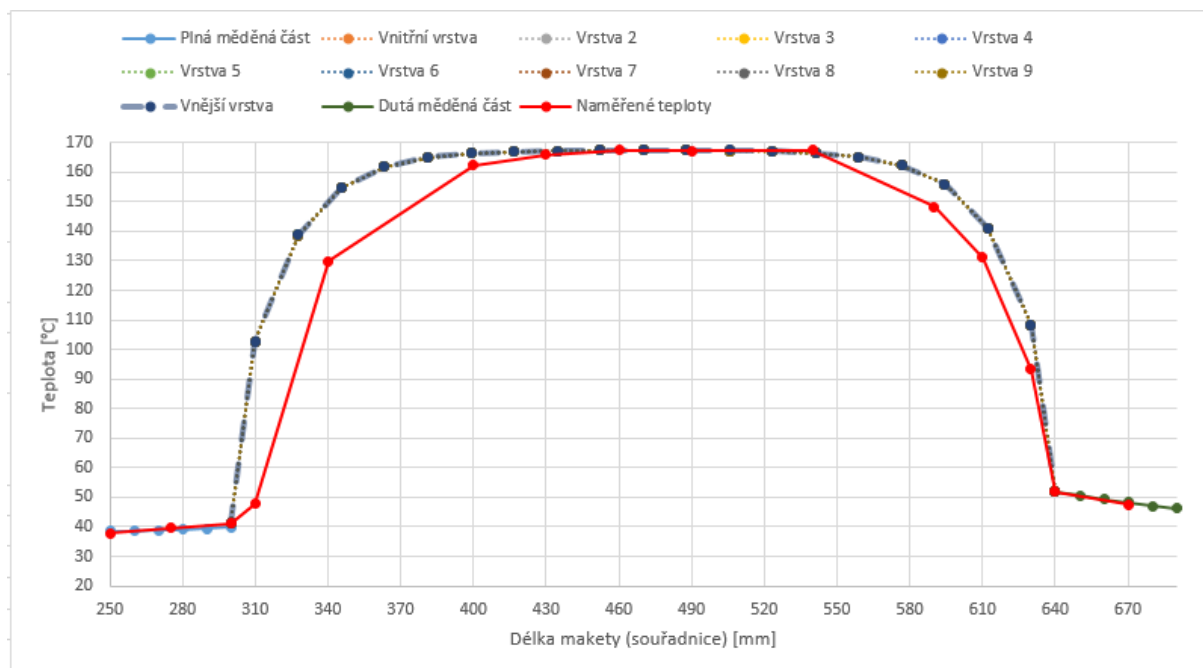
A jako poslední graf teplot zpracovaný z infračerveného snímku celé makety. Lze si na něm povšimnout skoku teploty vpravo, ten je způsoben vrstvou pájky na maketě, která měla jinou emisivitu.



Obr. 32 Graf teplot získaných pomocí termovize

6.5 Porovnání výsledků matematického modelu a experimentu

Pro porovnání výsledků experimentu s výsledky matematického modelu bylo třeba nechat matematický model běžet stejnou dobu, jako probíhal experiment. Matematický model tedy probíhal 13 minut a 45 sekund. Pro jednodušší srovnání byly hodnoty z experimentu zaneseny do stejného grafu jako vypočítané hodnoty.



Obr. 33 Naměřené a vypočítané hodnoty

7 ZÁVĚR

Krise tepelného toku je fenomén, kterému by z důvodu zvýšení jaderné bezpečnosti, měla být stále věnována pozornost. Kvůli nebezpečí úniku radioaktivních látek ovšem není možné provádět experimenty přímo v elektrárnách, ale je nutné stavět speciální zařízení napodobující podmínky v jaderném reaktoru. Jako náhrada palivového proutku zde slouží kovová maketa, která je namísto jaderné reakce zahřívána elektrickým proudem. Tyto makety se dle experimentátorů liší geometrickými rozměry, strukturou povrchu a také materiálem, z něhož jsou vyrobeny. To vše spolu s podmínkami v experimentální smyčce má na kritický tepelný tok vliv. Z průběhu experimentu lze poté sestavit rovnice pro danou geometrii testovací sekce a lépe tak předvídat chování palivových tyčí v jaderném reaktoru s podobnými rozměry.

Pro teplotní pole makety, která bude testována v experimentální smyčce VUT, jsem sestavil matematický model sestávající se ze základních rovnic šíření tepla. Ukázalo se, že tento model lze i přes zanedbání některých podmínek (zanedbání přestupu tepla na krajních průřezech makety) a určení jistých předpokladů (adiabatická stěna uvnitř makety, nejteplejší dílek v jejím středu) využít pro přibližné zobrazení průběhu teploty v maketě. Jediné, co lze tomuto modelu vytknout, je jeho pomalý běh. Z důvodu nízkých tepelných odporů bylo nutné zvolit krátký časový krok, který by dělení takto malými odpory kompenzoval a nedošlo tak k zacyklení výpočtu.

Experimentální měření teploty makety probíhalo v laboratoři FSI VUT. Bylo třeba si dávat zejména pozor na stejný způsob umístění jednotlivých termočlánků a jejich vhodné přichycení k povrchu makety. Výsledek měření teplot na povrchu makety jak termočlánky tak termovizí byl hodnotami velmi blízký matematickému modelu.

8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Zirkonium jako materiál nezbytný pro jadernou energetiku. *Česká nukleární společnost* [online]. V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8: ČNS, 2009 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://www.csvts.cz/cns/zprav/0901.htm>
- [2] HEŘMANSKÝ, Bedřich. Termomechanika jaderných reaktorů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986, 434 s
- [3] HAAS, Christoph. *Critical Heat Flux for Flow Boiling of Water at Low Pressure on Smooth and Micro-Structured Zircaloy Tube Surfaces KIT Scientific Reports ; 7627*. Karlsruhe, Baden: KIT Scientific Publishing, 2012. ISBN 9783866449237.
- [4] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [5] HANS D. BAEHR, KARL STEPHAN., Hans D. Baehr, Karl Stephan. *Heat and mass-transfer*. 2nd rev. ed. Berlin: Springer, 2006. ISBN 9783540295273.
- [6] BOURE, J.A., A.E. BERGLES a L.S. TONG. Review of two-phase flow instability. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 1973, 25(2), 165-192 [cit. 2016-04-09]. DOI: 10.1016/0029-5493(73)90043-5. ISSN 00295493. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0029549373900435>
- [7] ABBASSI, Yasser, Mansour TALEBI, Amir Saeed SHIRANI a Jamshid KHORSANDI. Experimental investigation of TiO₂/Water nanofluid effects on heat transfer characteristics of a vertical annulus with non-uniform heat flux in non-radiation environment. *Annals of Nuclear Energy* [online]. 2014, 69, 7-13 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.01.033. ISSN 03064549. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306454914000516>
- [8] AMINFAR, Habib, Mousa MOHAMMADPOURFARD a Rasool MAROOFIAZAR. Experimental study on the effect of magnetic field on critical heat flux of ferrofluid flow boiling in a vertical annulus. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2014, 58, 156-169 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.06.023. ISSN 08941777. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177714001642>
- [9] GANG, Wu, Qincheng BI, Zhendong YANG, Han WANG, Xiaojing ZHU, Hou HAO a L.K.H. LEUNG. Experimental investigation of heat transfer for supercritical pressure water flowing in vertical annular channels. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2011, 241(9), 4045-4054 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.07.007. ISSN 00295493. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549311005449>

- [10] GANG, Wu, Jie PAN, Qincheng BI, Zhendong YANG a Han WANG. Heat transfer characteristics of supercritical pressure water in vertical upward annuli. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2014, 273, 449-458 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2014.03.038. ISSN 00295493.
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002954931400199X>
- [11] HAAS, C., T. SCHULENBERG a T. WETZEL. Critical heat flux for flow boiling of water at low pressure in vertical internally heated annuli. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2013, 60, 380-391 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.12.038. ISSN 00179310.
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931012009945>
- [12] CHANGHONG, Peng, Guo YUN, Qiu SUIZHENG, Jia DOUNAN a Nie CHANGHUA. Two-phase flow and boiling heat transfer in two vertical narrow annuli. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2005, 235(16), 1737-1747 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2005.03.002. ISSN 00295493.
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549305001044>
- [13] CHUN, Se-Young, Heung-June CHUNG, Sang-Ki MOON, Sun-Kyu YANG, Moon-Ki CHUNG, Thomas SCHOESSE a Masanori ARITOMI. Effect of pressure on critical heat flux in uniformly heated vertical annulus under low flow conditions. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2001, 203(2-3), 159-174 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/S0029-5493(00)00307-1. ISSN 00295493.
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549300003071>
- [14] EL-GENK, Mohamed S., Stanley J. HAYNES a Kim SUNG-HO. Experimental studies of critical heat flux for low flow of water in vertical annuli at near atmospheric pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 1988, 31(11), 2291-2304 [cit. 2016-04-09]. DOI: 10.1016/0017-9310(88)90161-5. ISSN 00179310.
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0017931088901615>
- [15] SCHOESSE, Thomas, Masanori ARITOMI, Yoshiaki KATAOKA, Sang-Ryoul LEE, Yuzuru YOSHIOKA a Moon KI CHUNG. Critical Heat Flux in a Vertical Annulus under Low Upward Flow and near Atmospheric Pressure. *Journal of Nuclear Science and Technology* [online]. 1997, 34(6), 559-570 [cit. 2016-04-09]. DOI: 10.1080/18811248.1997.9733709. ISSN 0022-3131.
Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/18811248.1997.9733709>.
- [16] PARK, Jae-Wook, Won-Pil BAEK a Soon Heung CHANG. Critical heat flux and flow pattern for water flow in annular geometry. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 1997, 172(1-2), 137-155 [cit. 2016-04-09]. DOI: 10.1016/S0029-5493(97)00032-0. ISSN 00295493.
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549397000320>
- [17] GEPING, Wu, Qiu SUIZHENG, Su GUANGHUI, Tian WENXI a Jia DOUNAN. CHF and dryout point in vertical narrow annuli. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2007, 237(22), 2175-2182 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.03.043. ISSN 00295493.
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549307002567>

- [18] MOON, Sang-Ki, Se-Young CHUN, Seok CHO a Won-Pil BAEK. An experimental study on the critical heat flux for low flow of water in a non-uniformly heated vertical rod bundle over a wide range of pressure conditions. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2005,235(21), 2295-2309 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2005.04.004. ISSN 00295493.
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549305001147>
- [19] Ing. Ladislav Suk – ústní sdělení (FSI / Technická 2896/2, 616 69 Brno) dne 4. května 2016
- [20] KARDITSAS, Panayiotis J., Marc-Jean Baptiste. PURE COPPER. *Advanced Energy Technology Group: Thermal and Structural Properties of Fusion related Materials*. [online]. 6.1995 [cit. 2016-05-16].
Dostupné z: <http://www-ferp.ucsd.edu/LIB/PROPS/PANOS/cu.html>
- [21] Matula, R. A. 1979. Electrical resistivity of copper, gold, palladium, and silver. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. Říjen, 1979, Sv. 8, 4. ISSN 0047-2689
- [22] TUČEK, J. Výpočet tepelných ztrát a izolace potrubí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 68 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Bohuslav Kilkovský, Ph.D..
- [23] Termočlánky - snímače pro měření teploty: Úvod do termočláneků. *OMEGA Engineering* [online]. Karvinná: Jakar Electronics, c1995-2016 [cit. 2016-05-22].
Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>
- [24] National Instruments: NI 9213. *National Instruments* [online]. Praha 8: National Instruments Corporation, c2016 [cit. 2016-05-22].
Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/208788>
- [25] National Instruments: NI cDAQ-9188XT. *National Instruments* [online]. Praha 8: National Instruments Corporation, c2016 [cit. 2016-05-27].
Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/211734>

9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Jednotka	Popis
c	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita
$c_{p\text{Cu}}$	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita mědi
$c_{p\text{Fe}}$	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita oceli
C	J K^{-1}	tepelná kapacita
d	m	průměr
d_e	m	vnitřní průměr vnější trubice
d_h	m	hydraulický průměr
$d_{h,m}$	m	hydraulický průměr mezikruží
d_i	m	vnější průměr vnitřní trubice
d_t	m	ekvivalentní tepelný průměr
$d_{t,a\text{-vnitřní}}$	m	ekvivalentní tepelný průměr pro mezikruží zahřívání zevnitř
E_0	W m^{-2}	zářivost černého tělesa
g	m s^{-2}	tíhové zrychlení v gravitačním poli Země
G	$\text{kg m}^{-2}\text{s}$	hmotnostní tok
Gr	-	Grashofovo číslo
h_{in}	kJ kg^{-1}	vstupní podchlazení
I	A	elektrický proud
l	m	délka
L	m	charakteristický rozměr
m	kg	hmotnost
M	kg s^{-1}	hmotnostní průtok
Nu	-	Nusseltovo číslo
O_o	m	omocný obvod
O_z	m	obvod zahřívání stěny
p	Pa	tlak
Pr	-	Prandtlovo číslo
q	W m^{-2}	měrný tepelný tok
Q	W	tepelný tok
Q_j	W	Jouleovo teplo
Q_{konv}	W	tepelný tok při konvekci

Q_{m+1}	W	tepelný tok z m+1 tého dílku
Q_{m-1}	W	tepelný tok z m-1 tého dílku
Q_{n+1}	W	tepelný tok z n+1 tého dílku
Q_{n-1}	W	tepelný tok z n-1 tého dílku
Q_{vedaxL}	W	axiální tepelný tok z levé strany
Q_{vedaxP}	W	axiální tepelný tok z pravé strany
Q_{vedrad}	W	tepelný tok radiálním vedením
r_n	m	poloměr vnější kružnice
r_{n-1}	m	poloměr vnitřní kružnice
R	Ω	elektrický odpor
$R_{celkový\ Fe\ dílku}$	Ω	celkový odpor dílku ocelové části makety
R_{FeCu}	Ω	celkový odpor měděné a nerezové části
R_{makety}	Ω	celkový elektrický odpor makety
$R_{tepkonv}$	$m^2\ K\ W^{-1}$	složený tepelný odpor konvekce a vedení
R_{tepvax}	$m^2\ K\ W^{-1}$	axiální tepelný odpor při vedení
$R_{tepvrad}$	$m^2\ K\ W^{-1}$	radiální tepelný odpor při vedení
$R_{tepvax,rad}$	$m^2\ K\ W^{-1}$	axiální resp. radiální tepelný odpor dílků při vedení
S	m^2	obsah
S_{kruh}	m^2	obsah kruhu
$S_{mezikruzi}$	m^2	obsah mezikruží
$S_{mezikruzi,kruh}$	m^2	obsah mezikruží resp. kruhu
S_p	m^2	obsah průřezu profilu
S_{povrch}	m^2	povrch dílku
t	s	časový krok
T	K	termodynamická teplota
T_c	K	teplota chladiwa
T_m	K	teplota m-tého dílku
T_{m+1}	K	teplota m+1-tého dílku
T_n	K	teplota n-tého dílku
T_{n+1}	K	teplota n+1-tého dílku
T_{n-1}	K	teplota n-1-tého dílku
T_t	K	teplota dílku makety
T_z	K	teplota obtékaného povrchu

T_1	K	teplota dílku 1
T_2	K	teplota dílku 2
T_∞	K	teplota okolního vzduchu
v	m s^{-1}	rychlost
V	m^3	objem
x	-	suchost mokré páry
α	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla
β	-	teplotní součinitel objemové roztažnosti
γ	$^\circ$	úhel sklonu povrchu
ε	-	emisivita
ε_p	m^3/m^3	objemový poměr
λ_{Cu}	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	tepelná vodivost mědi
λ_{Fe}	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	tepelná vodivost oceli
λ_m	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	tepelná vodivost m-tého dílku
λ_{m-1}	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	tepelná vodivost m-1-tého dílku
λ_n	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	tepelná vodivost n-tého dílku
λ_v	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	tepelná vodivost vzduchu
λ_1	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	tepelná vodivost dílku 1
λ_2	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	tepelná vodivost dílku 2
ν	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	kinematická viskozita
π	-	Ludolfovo číslo
ρ	kg m^{-3}	hustota
ρ_{Cu}	kg m^{-3}	hustota mědi
ρ_{Fe}	kg m^{-3}	hustota oceli
ρ_l	kg m^{-3}	hustota kapaliny
ρ_r	$\Omega \text{ m}$	rezistivita
$\rho_{r\text{Cu}}$	$\Omega \text{ m}$	rezistivita mědi
$\rho_{r\text{Fe}}$	$\Omega \text{ m}$	rezistivita oceli
ρ_v	kg m^{-3}	hustota vzduchu
σ	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$	Stefan-Bolzmannova konstanta
T_s	N m^{-2}	smykové napětí

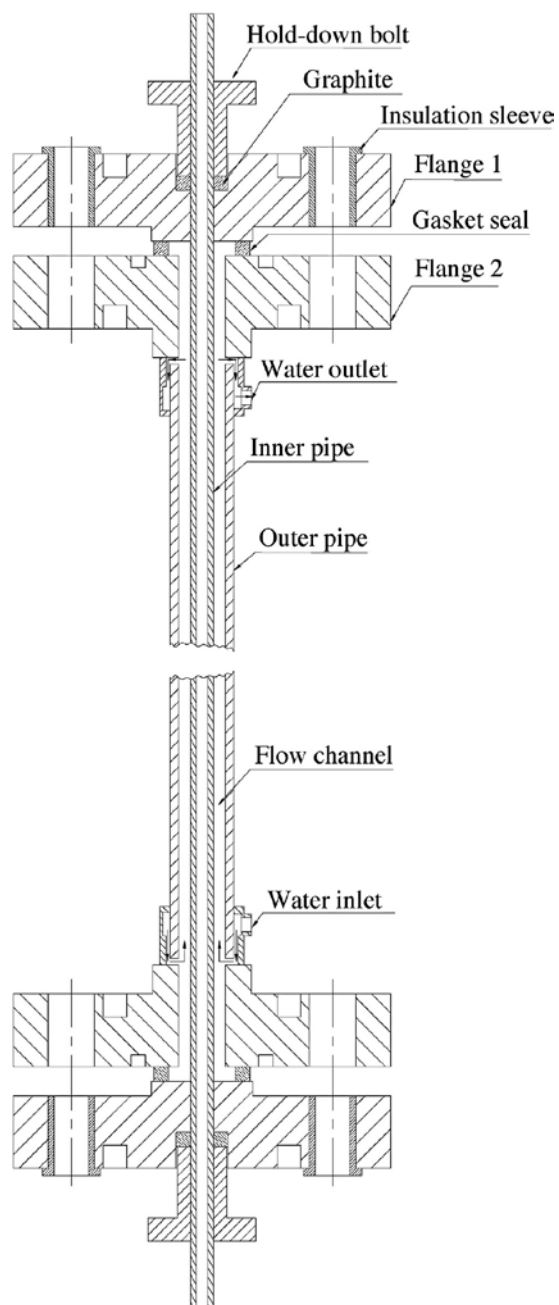
10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Průřez testovací sekcí experimentů Gang [9][10]

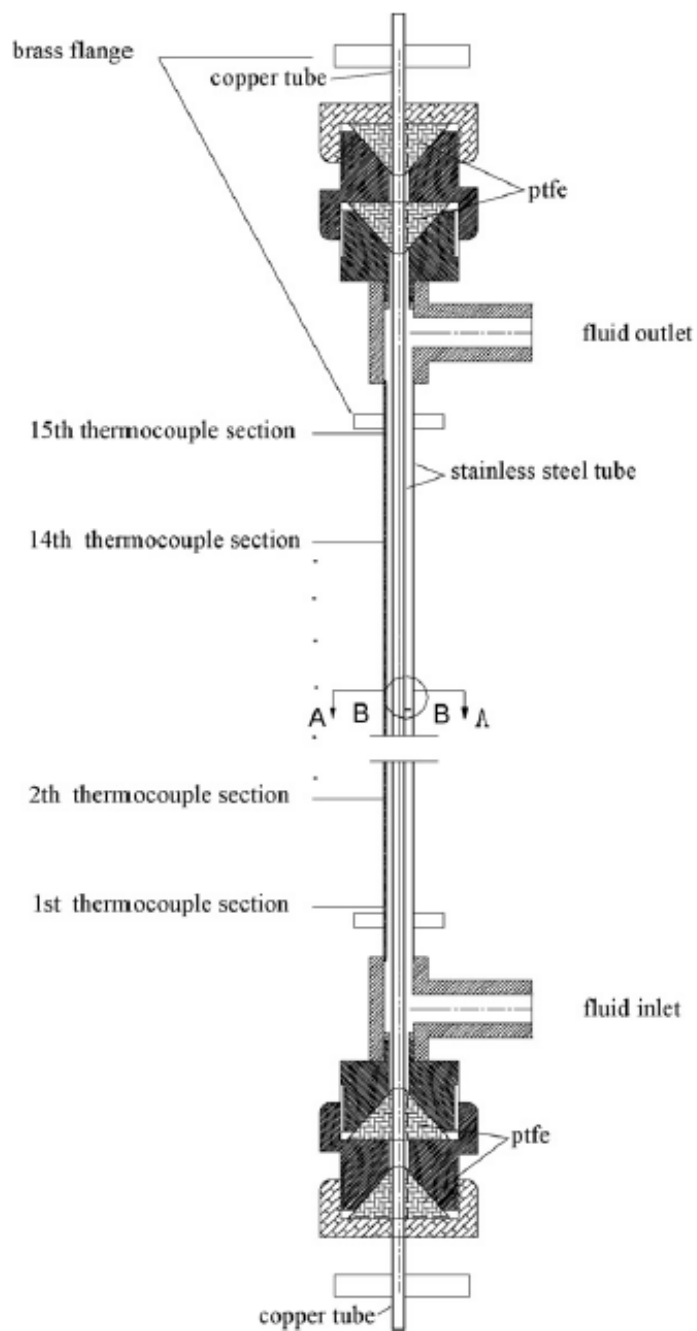
Příloha 2 - Průřez testovací sekcí experimentu Geping [17]

Příloha 3 - Schéma testovací sekce experimentu Haas [11]

1. Průřez testovací sekci experimentů Gang [9][10]



2. Průřez testovací sekci experimentu Geping [17]



3. Schéma testovací sekce experimentu Haas [11]

