

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Sledování vlivu průtočného průřezu kolem palivového proutku na
vzniku krize přestupu tepla**

Autor: Tomáš Kadavý
Vedoucí práce: Ing. Jan Zdebor CSc.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš KADAVÝ**
Osobní číslo: **S19B0324P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Stavba energetických strojů a zařízení**
Téma práce: **Sledování vlivu průtočného průřezu kolem palivového proutku na vzniku krize přestupu tepla**
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je v první části tvorba návrhu měřicího kanálu experimentálního zařízení a měřicí sondy pro detekci krize přestupu tepla na topeném palivovém proutku. V druhé části práce bude následné měření tohoto jevu a sledování vlivu průhybu v navrženém kanálu.

1. Zpracování rešerše na téma krize přestupu tepla, konstrukce palivových článků v jaderném reaktoru a měření teploty pomocí termočlánků.
2. Návrh konstrukce kanálu a mechanismu pro vychýlení proutku.
3. Návrh umístění a měření teploty pomocí termočlánků.
4. Vlastní měření na experimentálním zařízení.
5. Vyhodnocení naměřených dat.
6. Závěrečné zhodnocení.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Lamarsh, A., Baratta, A.: Introduction to nuclear engineering. Prentice Hall, NJ, 2001
- Heřmanský B.: Termomechanika jaderných reaktorů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986, 434 s.
- HEZOUČKÝ, F. a S. ŠTECH. Základy teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, ISBN 978-80-261-0548-0, 2015
- TONG, L.S., Boiling Critical Heat Flux/ AEC Critical Review-Series, TID-25887, USAEC 1972
- Nuclear instrumentation and measurement: a review based on the ANIMMA conferences EPJ Nuclear Sci. Technol. 3, 33 (2017) © M. Giot et al., published by EDP Sciences, 2017, DOI: 10.1051/epjn/2017023
- Makai, M., Véghe, J.: Reactor Core Monitoring. Springer International Publishing AG, Cham, 2017
- Review on Critical Heat Flux in Water Cooled Reactors; <https://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/fzk/6825/6825.pdf>
- MOLCHANOV, V. L. A. V. UGRYUMOV a O. B. SAMOILOV. TVSA-T fuel assembly for „Temelin“ NPP. [presentace]. Praha: OKBM, 2010; <https://www.slideshare.net/myatom/tvsat-fuel-assembly-for-temelin-npp-main-results-of-design-and-safety-analyses-trends-of-development>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Zdebor, CSc.**
Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Petr Klavík**
ŠKODA JS a.s.

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Václav Dostál, Sc.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Zdeborovi CSc. a konzultantovi panu Ing. Klavíkovi za cenné rady, zkušenosti a vědomosti. Velmi si vážím času, který mi během psaní této práce věnovali. Velké poděkování patří též mé rodině, která mě při studiu vždy velmi podporovala.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kadavý	Jméno Tomáš	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zdebor, CSc.	Jméno Jan	
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Sledování vlivu průtočného průřezu kolem palivového proutku na vzniku krize přestupu tepla		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	50	TEXTOVÁ ČÁST	48	GRAFICKÁ ČÁST	2
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce pojednává o krizi přestupu tepla v jaderném reaktoru. Popisuje konstrukci palivových článků v jaderném reaktoru, přestup tepla v AZ jaderného reaktoru a jev krize přestupu tepla. Je popsáno měření teploty pomocí termočlánků. V praktické části je představeno experimentální zařízení ZČU pro zaznamenání krize přestupu tepla a je proveden návrh nového průtočného kanálu včetně nového imitátoru palivového proutku. Následně je ověřena jeho funkčnost a je porovnán s původním imitátorem palivového proutku.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	krize přestupu tepla, kritický tepelný tok, jaderný reaktor, malý jaderný reaktor, termočlánek, palivový článek

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Kadavý	Name Tomáš	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zdebor, CSc.	Name Jan	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Evaluation of the influence of the cross-section area around the fuel rod on the critical heat flux		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKE	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	50	TEXT PART	48	GRAPHICAL PART	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor thesis describes the critical heat flux in a nuclear reactor. It describes the design of fuel elements in a nuclear reactor, heat transfer in a nuclear reactor and the phenomenon of the critical heat flux. Furthermore it describes temperature measurement using thermocouples. In the practical part, the experimental equipment of the ZČU for recording the critical heat flux is presented and the design of a new flow channel including a new fuel rod imitator is carried out. Subsequently, its functionality is verified and compared with the original fuel rod imitator.
KEY WORDS	departure from nucleate boiling, critical heat flux, nuclear reactor, small nuclear reactor, thermocouple, nuclear fuel element

Obsah

Přehled použitých zkratk	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	13
1 Úvod	14
1.1.1 Úvodní slovo	14
1.1.2 Historie jaderné energetiky	14
1.1.3 Jaderná energie dnes	15
2 Popis jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem	16
2.1.1 Primární okruh JE s PWR	16
2.1.2 Sekundární okruh	16
2.1.3 Terciární okruh	17
3 Jaderné reaktory	18
3.1.1 Tlakovodní jaderné reaktory	18
3.1.2 Štěpná reakce	19
3.1.3 Regulace	21
3.1.4 Konstrukce palivových souborů	22
4 Malé modulární reaktory	24
5 Odvod tepla z AZ reaktoru	27
5.1 Způsoby přestupu tepla v reaktoru	27
5.2 Var	28
5.3 Krize přestupu tepla	29
5.3.1 Predikce krize přestupu tepla	31
5.3.2 Limitní podmínky provozních režimů reaktoru	32
6 Měření teploty pomocí termočlánků	32
7 Praktická část	34
7.1 Návrh a popis experimentálního zařízení	34
7.2 Imitátory palivových prouků	37
7.2.1 Imitátor palivového prouku verze 1.0	37
7.2.2 Imitátor palivového prouku verze 2.0	38
7.2.3 Tabulka porovnání IPP	39
7.3 Návrh umístění termočlánků	39
7.4 Postup měření	40
7.5 Popis průběhu měření	41
7.6 Ukázka naměřených hodnot	42

7.7	Výsledky porovnání měření CHF na IPP 1.0 a 2.0	43
8	Závěr.....	44
	Seznam použité literatury.....	45
	Přílohy	i
1.	Ukázka výstupu z měření ve formě textového souboru s popisem veličin z počátku měření č. 1	i
2.	Ukázka výstupu z měření ve formě textového souboru s popisem veličin při dosažení CHF z měření č. 1	ii

Přehled použitých zkratk

Označení	Jednotka	Název
AZ	[-]	aktivní zóna
BWR	[-]	varný reaktor
CANDU	[-]	Canada Deuterium Uranium (<i>typ reaktoru</i>)
ČR	[-]	Česká republika
DHRS	[-]	decay heat removal system
DNB	[-]	departure from nucleate boiling
DNBR	[-]	departure from nucleate boiling ratio
ECCS	[-]	emergency core cooling system
EDU	[-]	elektrárna Dukovany
ETE	[-]	elektrárna Temelín
CHF	[-]	critical heat flux
IAEA	[-]	International atomic energy agency
IPP	[-]	imitátor palivového proutku
JE	[-]	jaderná elektrárna
K	[-]	multiplikační koeficient
LOCA	[-]	loss of coolant accident
MAAE	[-]	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
NRC	[-]	Nuclear regulatory commission
NT	[-]	nízkotlaký
PWR	[-]	pressurized water reactor
SMR	[-]	small nuclear reactor
SÚJB	[-]	státní úřad pro jadernou bezpečnost
TČ	[-]	termočlánek
VT	[-]	vysokotlaký
ZČU	[-]	Západočeská univerzita v Plzni
q _{cr}	[W]	kritický tepelný tok

Seznam obrázků

Obr. 1 Jaderná elektrárna Olkiluoto 3 [46]	15
Obr. 2 Schéma primárního okruhu jaderné elektrárny [38]	16
Obr. 3 Pohled na VT a NT díly parní turbíny na ETE [47].....	17
Obr. 4 Chladicí věže ETE [48].....	17
Obr. 5 Schéma reaktoru VVER1000 [39]	18
Obr. 6 Obohacování uranu – centrifugace [41].....	19
Obr. 7 Palivová peletka [40]	19
Obr. 8 Štěpná reakce 235U [42].....	20
Obr. 9 Schéma uložení paliva v reaktoru [43]	22
Obr. 10 Schéma PS typu TVSA-T [44].....	23
Obr. 11 Technická specifikace reaktoru NuSCALE VOYGR [18]	25
Obr. 12 Kontejnment reaktoru NuSCALE VOYGR [19]	26
Obr. 13 Schéma reaktoru NuSCALE VOYGR [18]	26
Obr. 14 Konstrukce reaktoru NuSCALE VOYGR [18]	27
Obr. 15 Přestup tepla z jaderného paliva [45]	28
Obr. 16 Tepelný tok během krize přestupu tepla [22].....	30
Obr. 17 Krize přestupu tepla 1. druhu [30]	30
Obr. 18 Krize přestupu tepla 2. druhu [30]	31
Obr. 19 Schéma zapojení termočládku [34].....	32
Obr. 20 Přehled typů termočládků a jejich vlastností [33].....	33
Obr. 21 Experimentální zařízení přední ISO pohled.....	34
Obr. 22 Experimentální zařízení zadní ISO pohled	34
Obr. 24 Experimentální zařízení náhled.....	35
Obr. 23 Experimentální zařízení boční pohled.....	35
Obr. 25 Experimentální zařízení – detailní pohled na uchycení vstupní hlavice.....	36
Obr. 26 Experimentální zařízení – detailní pohled na potrubí a armatury.....	36
Obr. 27 Schéma IPP 1.0	37
Obr. 28 Realistické zobrazení IPP 1.0.....	37
Obr. 29 Schéma IPP 2.0	38
Obr. 30 Realistické zobrazení IPP 2.0.....	38
Obr. 31 Návrh umístění termočládků do IPP 2.0	39
Obr. 32 Průběh 1. měření na IPP 2.0.....	40
Obr. 33 Průběh 2. měření, teplota na TČ 2 a 3.....	41
Obr. 34 Ukázka průběhu teplot v čase během měření na IPP 2.0	42

Obr. 35 Ukázka průběhu výkonů v čase během měření na IPP 2.0 42

Seznam tabulek

Tab. 1 Komponenty experimentálního zařízení ZČU [37]	36
Tab. 2 Porovnání konstrukce IPP 1.0 a IPP 2.0	39
Tab. 3 Porovnání naměřených hodnot.....	43

1 Úvod

1.1.1 Úvodní slovo

Stabilní dodávky elektrické a tepelné energie považujeme v dnešním vyspělém světě za samozřejmost. Celá naše infrastruktura, od domácností přes podniky a nemocnice, až po správu našeho státu, by bez nich nemohla fungovat.

V současné době dochází v Evropě k odklonu od fosilních zdrojů v rámci snahy k přechodu na tzv. „zelenou energii“. Jednotlivé státy projevují snahu stát se co nejvíce energeticky nezávislé. To vše s sebou nese jistá specifika, kterým se obor energetiky bude muset přizpůsobit.

Česká republika je dlouhodobým zastáncem jaderné energie, která je i přes všechny její zápory stabilním, bezpečným a relativně bezemisním zdrojem energie. I díky tomuto přístupu máme dnes dostatek elektřiny na pokrytí vlastní spotřeby.

V tomto kontextu se v současné době jako budoucnost jeví využití malých modulárních reaktorů (SMR), které by nám v kombinaci s velkými jadernými elektrárnami, doplňovanými obnovitelnými zdroji energie a zdroji špičkového výkonu měly pomoci s odklonem od elektráren spalující fosilní paliva.

Nasvědčuje tomu i rozhodnutí z března roku 2022 vyhradit pro první modulární reaktor v ČR místo v areálu Jaderné elektrárny Temelín. [1]

Rešeršní část této bakalářské práce je z velké části zaměřena právě na malé modulární reaktory. Jejich využití v areálech odstavených zdrojů na fosilní paliva je jedna z možných cest za splněním všech ekologických cílů a zároveň stabilním uspokojením poptávky po elektrické a tepelné energii.

V úvodu této práce bude stručně představen vývoj jaderné energetiky od počátků až po současnost, poté budou vysvětleny základní principy jaderné energie a funkce tlakovodních reaktorů. Následně se práce blíže zaměří na SMR. Práce shrnuje poznatky potřebné pro praktickou část, tedy konstrukci palivových článků, problematiku krize přestupu tepla a odvod tepla z aktivní zóny reaktoru.

Praktická část této práce se věnuje zkoumání vlivu průtočného průřezu kolem palivového proutku na vznik krize přestupu tepla. Bude proveden návrh průtočné části experimentálního zařízení. Budou představeny imitátory palivových proutků a navrženo umístění termočlánků v novém imitátoru. Dále budou naměřeny kritické tepelné toky a ověřena funkčnost nového imitátoru. V závěrečné části práce budou porovnány naměřené výsledky pro oba imitátory.

1.1.2 Historie jaderné energetiky

Jaderná energetika je průmyslové odvětví zabývající se především výrobou elektrické energie. Využívá k tomu energii uvolněnou při štěpení jader radioaktivních prvků.

Jako první tento fenomén objevili v roce 1938 němečtí chemici Strassmann a Hahn. Jejich výzkumem bylo zjištěno, že při ostřelování atomu uranu neutronem se atom rozštěpí na dva jiné atomy za současného uvolnění energie. Následující rok bylo Francouzem Joliot-Curirem objeveno, že při tomto štěpení se uvolní také dva nebo tři další neutrony, které mohou štěpit další jádra uranu a spustit tak řetězovou reakci. [13]

První řízenou řetězovou štěpnou reakci provedl v roce 1942 italský fyzik Enrico Fermi na reaktoru Chicago Pile-1. V té době byla naprostá většina výzkumu směřována směrem k vojenskému využití. První reaktory byly využívány k získávání materiálu pro jaderné zbraně, na základě Fermiho výzkumu získala tedy americká armáda dostatek plutonia na výrobu bomby Fat Man. [2] [13]

Po druhé světové válce se výzkum více zaměřil na mírové využití jaderné energie. V roce 1954 byl spuštěn první významný jaderný reaktor určený k výrobě elektrické energie s výkonem 5MW. Stalo se tomu tak na jaderné elektrárně Obnisk v tehdejší Sovětské svazu. [2]

První jaderné reaktory měly malé výkony a byly poměrně neekonomické. S postupem času se toto průmyslové odvětví začalo prudce rozvíjet a dnes ve světě funguje 422 jaderných reaktorů, přičemž 303 z nich jsou reaktory tlakovodní. [3]

1.1.3 Jaderná energie dnes

Ve dnešním světě jsou jaderné elektrárny obecně považovány za téměř bezemisní, stabilní a bezpečný zdroj energie, který je důležitý k uspokojení stále se zvyšujících nároků na množství vyrobené energie a udržení všech ekologických cílů. Toho nyní využívají hlavně asijské státy, především Rusko a Čína, kde probíhá masivní výstavba jaderných elektráren. Velkou výstavbu nových reaktorů plánují také některé státy severní Afriky. [4]

V Evropě plánuje výstavbu dalších bloků především Francie, která bude usilovat o nahrazení stávajících dosluhujících jaderných elektráren, ale také Velká Británie, Česká republika, Polsko, nebo Nizozemsko. [4] Dostavba nových bloků právě probíhá na Slovensku – Mochovce 3 jsou nyní ve stádiu spouštění a již překročily přes 50 % výkonu bloku. Čtvrtý blok je ve výstavbě. Olkiluoto 3 ve Finsku byl spuštěn začátkem roku 2023. Spousta zemí do budoucna také spoléhá na malé modulární reaktory, které by měly postrádat jednu z největších nevýhod velkých jaderných bloků – nutnost velké počáteční investice a výkonem by mohly nahradit dosluhující kotle na spalování fosilních zdrojů.

V Evropě je činných 132 reaktorů, které produkují 26 % z celkově vyrobené elektřiny, což je 50% veškeré nízkoemisní elektřiny. [5]

Naprostá většina v Evropě fungujících reaktorů je typu PWR, dále BWR, výjimkou je jen Rumunsko se dvěma reaktory CANDU a plynem chlazené reaktory ve Velké Británii.



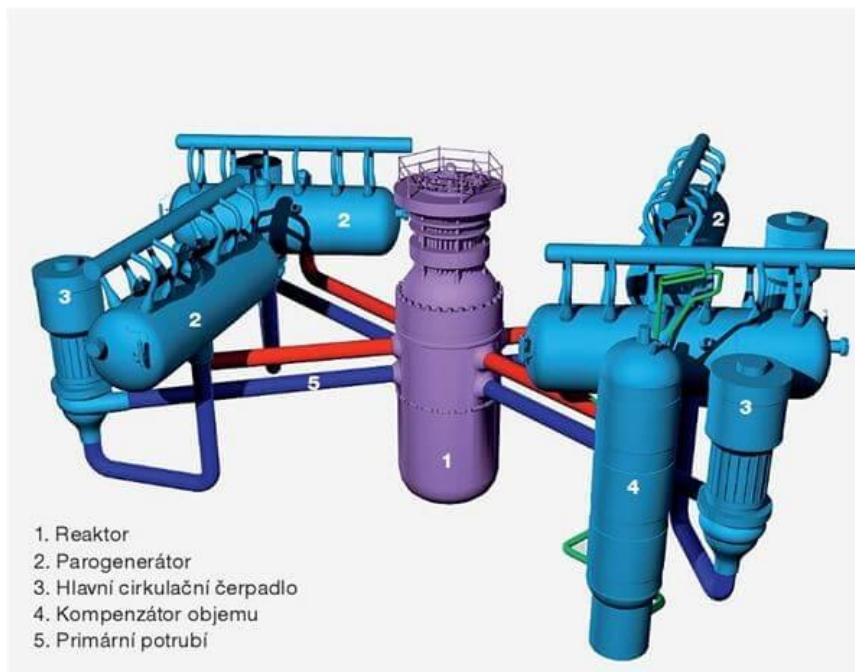
Obr. 1 Jaderná elektrárna Olkiluoto 3 [46]

2 Popis jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem

Jaderná elektrárna s tlakovodním reaktorem se skládá ze tří základních okruhů. Primární, kde se nachází reaktor, sekundární, jehož dominantou je turbína a terciární, který zajišťuje chlazení.

2.1.1 Primární okruh JE s PWR

Primární okruh se skládá z tlakové nádoby reaktoru, parogenerátorů, hlavních cirkulačních čerpadel, kompenzátoru objemu a ostatní technologie. Celý tento systém je umístěn v kontejnmentu, tedy v ochranné obálce vyrobené z oceli a betonu.



Obr. 2 Schéma primárního okruhu jaderné elektrárny [38]

Kontejnment má veliký význam z bezpečnostního hlediska. Odolá hrozbám zvenčí, ale zároveň je hermeticky uzavřený a uvnitř se udržuje mírný podtlak, což zabraňuje případnému úniku nebezpečných látek do okolí.

Srdce primárního okruhu je reaktor. V tom je v palivových článcích v aktivní zóně uloženo palivo. V palivu dochází k řetězové štěpné reakci a vzniku tepelné energie. Vznikající teplo je odváděno chladivem ve formě vody, která zároveň plní funkci moderátoru. Voda je v reaktoru pod značným tlakem, aby nedošlo k varu a vypaření. K regulaci tlaku a objemu slouží kompenzátor objemu.

Cirkulační čerpadla zajišťují cirkulaci vody primárního okruhu.

Parogenerátor je tepelný výměník s velkou teplosměnnou plochou, do kterého proudí ohřátá voda z reaktoru. V trubkách procházejících parogenerátorem proudí médium primárního okruhu, které předává tepelnou energii médiu v sekundárním okruhu. Médium v sekundárním okruhu je rovněž voda. V sekundární části parogenerátoru dochází ke změně skupenství, vzniká vodní pára o vysokém tlaku a teplotě.

2.1.2 Sekundární okruh

Pára z parogenerátoru proudí potrubím do hlavní části sekundárního okruhu – parní turbíny. Turbína je zařízení, kde se tepelná energie páry mění na mechanickou energii rotoru. Pára zpravidla neúplně expanduje ve vysokotlaké části, poté je vedena do přihříváku, kde se zvýší její parametry a následně expanduje v nízkotlaké části turbíny.



Obr. 3 Pohled na VT a NT díly parní turbíny na ETE [47]

Tento proces zvyšuje účinnost celého oběhu. K turbíně je připojen generátor, kde dochází k přeměně mechanické energie na energii elektrickou – generuje se střídavý elektrický proud.

Na výstupu z turbíny je médium ve stavu mokré páry. Ta je vedena do kondenzátoru, kde úplně zkondenzuje. Pro vyšší účinnost je ideální expanzi prodloužit na co nejnižší parametry, v kondenzátoru se tedy udržuje hluboké vakuum. Veškeré kondenzační teplo je odvedeno chladícím – terciárním okruhem. Zkondenzované médium je poté čerpadly poháněno zpět do parogenerátoru.

2.1.3 Terciární okruh

Chladicí okruh může být realizován více způsoby. Pokud se elektrárna nachází v blízkosti velkého zdroje vody, sladké či slané, může se voda v jedné části toku odebrat, zavést do kondenzátoru, kde odebere teplo pracovnímu médiu a poté se zavede zpět do toku. Voda bude o několik stupňů Kelvina teplejší, což zapříčiní mírné ohřátí toku a odpaření části vody.

Druhá varianta chladicího okruhu je použití chladících věží. Ohřátá voda je čerpadly poháněna do chladících věží, kde je z výšky rozstříkována. Proti rozstříkované vodě proudí studenější vzduch a kapičky ochlazuje. Ochlazená voda padá dolů, kde se hromadí v bazénu pod věží a je čerpána zpět do kondenzátoru.



Obr. 4 Chladící věže ETE [48]

3 Jaderné reaktory

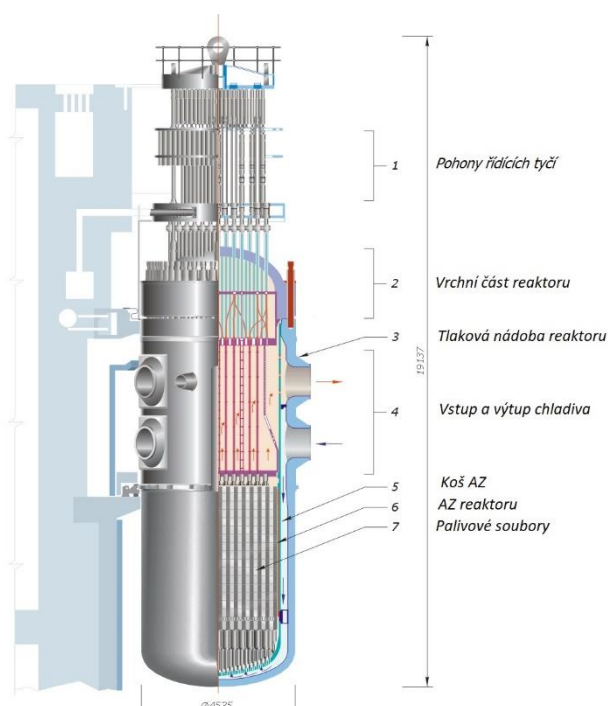
Jaderné reaktory jsou zařízení, ve kterých dochází ke štěpné reakci, tedy ke štěpení jader radioaktivních prvků. Využívají se nejčastěji pro výrobu elektrické energie, pro vojenské či výzkumné účely, nebo pro pohon různých zařízení.

Jak již bylo zmíněno výše, většina reaktorů provozovaných dnes jsou reaktory tlakovodní, včetně reaktorů v ČR, tudíž jim bude věnována následující kapitola.

3.1.1 Tlakovodní jaderné reaktory

V České republice se k výrobě elektrické energie provozuje celkem 6 jaderných reaktorů VVER (vodo-vodní energetický reaktor), které spadají do skupiny PWR čili tlakovodní jaderné reaktory. Čtyři reaktory VVER440 se nacházejí na Jaderné elektrárně Dukovany, dva reaktory VVER1000 na Jaderné elektrárně Temelín. Z tohoto důvodu se v této části mé práce zaměřím právě na reaktory typu PWR.

Tlakovodní jaderné reaktory jsou v současnosti nejvyužívanější energetické jaderné reaktory na světě. Je tomu tak převážně díky jejich bezpečnosti a ekonomičnosti. Jako moderátor je zde používána demineralizovaná voda pod vysokým tlakem 13,7-15,7MPa (podle typu reaktoru). Při vysokých teplotách, které dosahují až 320°C je vždy zaručena dostatečná rezerva do teploty sytosti.



Obr. 5 Schéma reaktoru VVER1000 [39]

Nejvýraznější část reaktoru je jeho tlaková nádoba. Tlakové nádoby reaktorů VVER 440 a VVER1000, které můžeme najít na Jaderné elektrárně Temelín (ETE) a Jaderné elektrárně Dukovany (EDU), jsou válcové nádoby vyrobené z kvalitní nízkolegované oceli Cr-Ni-Mo-V, která dobře odolává radiaci. Ve spodní části tlakové nádoby se nachází aktivní zóna, ve vrchní části jsou uchyceny pohony regulačních tyčí. Aktivní zóna reaktoru, v níž dochází k štěpné reakci, je obklopena vnitřními částmi reaktoru (šachta a koš AZ), které snižují působení neutronového toku na tlakovou nádobu. AZ je tvořena palivovými soubory – kazetami. Kazeta obsahuje svazek palivových proutků. Palivový proutek se skládá z trubky, ve které je vloženo palivo – tabletky z obohaceného oxidu uraničitého UO_2 .

Aktivní zóny reaktorů VVER440 a VVER1000 jsou značně odlišné, a to převážně ve způsobu regulace štěpné reakce.

Reaktory VVER440 využívají celkem 349 palivových souborů, z nichž 37 jsou tzv. Soubory “HRK” - havarijní, kompenzační a regulační. [6] Jejich spodní část obsahuje palivo, horní část absorpční soubor. Ten obsahuje bór, který pohlcuje neutrony. Při pohybu dolů se z aktivní zóny vysunuje palivo a zároveň zasunuje absorpční soubor, lze tak velmi efektivně regulovat štěpnou reakci – je potřeba méně regulačních prvků. Nevýhoda je potřeba větší výšky tlakové nádoby. V aktivní zóně reaktoru VVER1000 je umístěno 163 palivových souborů, z nichž každý je tvořen 312 palivovými proutky v nosném skeletu šestiúhelníkového průřezu. V každém

souboru je 18 pozic vyhrazeno pro absorpční proutky, které jsou nahoře upevněny ke společné hlavici. Absorbátor neutronů je zde převážně karbid boru. Tyto tzv. klastry jsou poháněny elektromagnetickým pohonem. Jejich pohyb do a z aktivní zóny reguluje štěpnou reakci. Na rozdíl od reaktorů VVER440 zde tedy nedochází k pohybu části paliva z aktivní zóny reaktoru. Díky tomuto řešení je ušetřeno místo pro dolní konce regulačních orgánů ve spodní části aktivní zóny, reaktory VVER1000 jsou tedy kratší než reaktory typu VVER440 (VVER440 13,8m, VVER1000 13,5m). [7, s.323]

3.1.2 Štěpná reakce

Štěpná reakce je děj, při kterém se jádro nestabilního atomu rozštěpí na dvě přibližně stejně těžká jádra jiných prvků při současném uvolnění neutronů a energie, která je dána rozdílem sumy hmotností soustavy před a po štěpení.

Pokud neutrony uvolněné při štěpné reakci způsobí štěpení dalších jader, nazýváme reakci řetězovou. Právě takovou reakci potřebujeme pro průmyslové získávání energie.

Neutrony uvolněné štěpením ale do dalších jader narazit nemusí a zaniknou. Pokud neutrony zanikají rychlejším tempem, než jakým jsou produkovány nové, reakce nebude samoudržitelná a zanikne. Cílem při provozu jaderného reaktoru je udržovat reakci v kritickém stavu, tedy ve stavu, kdy jsou produkovány neutrony schopné udržet štěpnou reakci tak, aby počet štěpených jader neklesal, ale ani nerostl.

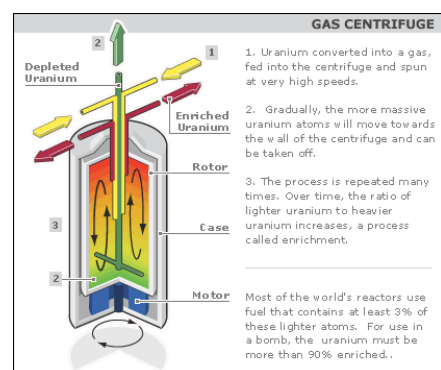
3.1.2.1 Palivo

V jaderných elektrárnách je jakožto palivo nejvíce využíván oxid uraničitý (UO_2) ve formě peletek. Ty mají průměr od 8–15 mm a jsou 10-15 mm vysoké. [7, s.246-272]

V přírodě se uran vyskytuje jako směs izotopů ^{238}U (99,27 %) a ^{235}U (0,72 %). To není pro použití ve velkém PWR reaktoru ideální, jelikož ^{238}U se nedá štěpit pomalými (tepelnými) neutrony a dobře štěpitelný ^{235}U je zastoupen jen málo. Oxid uraničitý je z tohoto důvodu „obohacován“ – zastoupení ^{235}U je uměle zvyšováno, nejčastěji pomocí centrifugální separace, která funguje na základě rozdílných fyzikálních vlastností těchto dvou izotopů. Vzniká tak palivo s obsahem 3-5 % ^{235}U . [8, s. 371] [14]



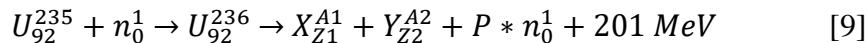
Obr. 7 Palivová peletka [40]



Obr. 6 Obohacování uranu – centrifugace [41]

3.1.2.2 Štěpení

Níže uvedená rovnice popisuje samotné štěpení jader ^{235}U .

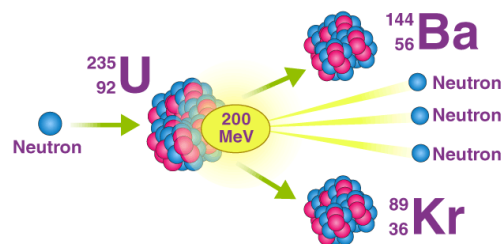
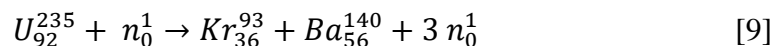


Koeficient P znázorňuje počet uvolněných neutronů, nabývá hodnot 2-3.

X a Y znázorňují produkty štěpné reakce.

Jedno z vzniklých jader je typicky zástupcem skupiny lehkých prvků (Br-Rh) a druhé těžkých prvků (Sb-Sm).

Níže je uveden typický příklad konkrétní reakce, která v reaktoru může nastat:



Obr. 8 Štěpná reakce ^{235}U [42]

Při štěpení platí následující pravidla:

Hmotnost štěpeného jádra musí být větší než hmotnost odštěpků, jelikož se mimo odštěpků navíc uvolní i značné množství energie.

Excitační energie neutronu vyvolávající štěpnou reakci musí být vyšší než aktivační energie potřebná ke štěpení daného jádra.

Součet protonových čísel produktů musí být stejný jako protonové číslo uranu. ($A_1 + A_2 = 235$)

Součet nukleonových čísel vzniklých produktů a uvolněných neutronů se musí rovnat součtu nukleonových čísel uranu a štěpícího neutronu. [8]

Uvolněný neutron má energii 2 MeV. Aby došlo k rozštěpení jádra ^{235}U , potřebujeme letící neutron zpomalit, jelikož při takto velké energii je pravděpodobnost střetu s jádrem velmi malá. Ke zpomalení letících neutronů je používán moderátor, nejčastěji voda. Neutrony spolu s dalšími fragmenty reakce letí aktivní zónou reaktoru vysokou rychlostí. Aby předaly svou energii okolí, nemusí narážet do okolních atomů, to je ostatně při jejich rychlosti málo pravděpodobné. S okolní hmotou interagují pomocí Coulombových sil a ionizují své okolí. Tím ztrácejí svou kinetickou energii a zpomalují. Kladně nabití ionty prostředí vzniklé průletem nabitého produktu štěpení se poté sjednocují s volnými elektrony, což způsobí uvolnění energie ve formě tepla. [9][10]

Neutron tak zmenší svou energii až na 0,025 eV a zvýší se tak pravděpodobnost srážky. [10]

Pro rozštěpení atomu ^{235}U je potřeba excitační energie 5,8 MeV. Pokud dojde k záchytu neutronu v jádře ^{235}U , přinese záchyt energii 6,4 MeV. Neutron tudíž nepotřebuje ke způsobení štěpení velkou kinetickou energii. Postačují i zpomalené neutrony s energií 0,025 eV, které nazýváme tepelnými neutrony. [7]

U cca 15 % případů zachycení neutronu v jádře uranu nedojde k rozštěpení, ale jen k zachytu neutronu. To je popsáno rovnicí níže:



Uran poté vyzařuje nabytou energii ve formě gama záření až do doby, než se dostane do původního stavu.

V reaktoru dochází k mnoha dalším interakcím, těm se však blíže věnovat nebudeme.

3.1.2.3 Provozní stavy reaktoru

Při štěpení jednoho jádra ^{235}U vzniká průměrně 2,5 nových neutronů, které mohou způsobovat další štěpení. Pro udržení řetězové reakce v bezpečných mezích je našim cílem, aby právě jeden z těchto neutronů způsobil další štěpnou reakci jádra ^{235}U . Zbylé neutrony buďto uniknou z aktivní zóny, nebo jsou absorbovány, tedy nezpůsobí štěpení.

K vyjádření udržitelnosti reakce využíváme multiplikační koeficient, který definujeme jakožto poměr počtu neutronů jedné generace ku počtu neutronů generace předcházející. Označujeme ho jako k .

$$K = \frac{N_i}{N_{i-1}} \quad [6]$$

V návaznosti na to rozlišujeme 3 stavy:

$K < 1$ Podkritický – počet štěpení exponenciálně klesá

$K = 1$ Kritický – počet štěpení je v ustáleném stavu

$K > 1$ Nadkritický - počet štěpení exponenciálně narůstá

Pro bezpečné udržení reaktoru v kritickém stavu je klíčová existence tzv. zpožděných neutronů. To jsou neutrony, které jsou vyzářeny se zpožděním od několika milisekund až několika minut po proběhnutí štěpení jedním z produktů štěpné reakce. Spousta produktů štěpné reakce je nestabilní a snaží se dosáhnout stabilnějšího stavu pomocí beta rozpadů. V některých případech dochází k tomuto rozpadu za současné emise neutronu. V reaktoru tvoří podíl zpožděných neutronů cca 1 %. Tyto neutrony je snadnější regulovat právě díky tomu, že jsou zpožděné. Reaktor je tedy udržován v lehce podkritickém stavu na okamžitých neutronech a pomocí zpožděných neutronů je dosahován celkový kritický stav soustavy.[6][9]

3.1.3 Regulace

Regulací jaderné reakce míníme cílené ovlivňování počtu tepelných neutronů v AZ jaderného reaktoru. Na reaktivitu v reaktoru má vliv více proměnných. Jsou to například změny teplot, tlaků, ale i přítomnost produktů štěpení v reaktoru, například „Xenonová jáma“. Všechny tyto vlivy musíme kompenzovat, abychom reaktor udržovali v kritickém stavu.

V této kapitole se budeme věnovat těm nejběžnějším způsobům regulace, především PWR reaktorů. Některé principy se ale uplatňují i u jiných typů reaktorů.

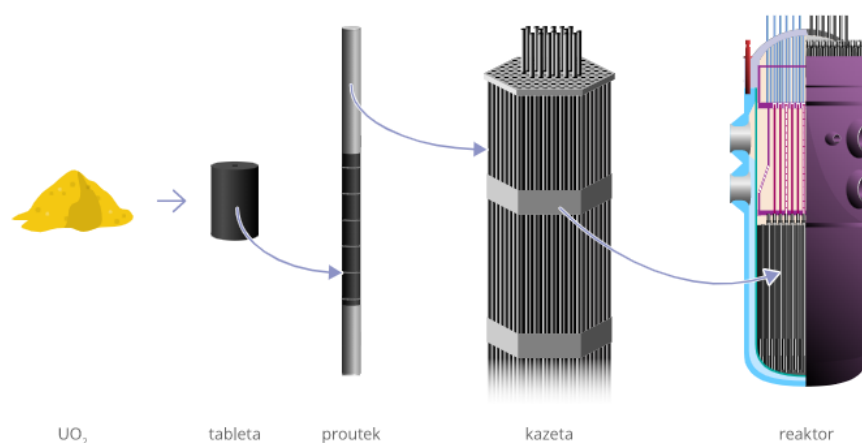
V PWR reaktorech se reaktivita nejčastěji reguluje změnou koncentrace kyseliny borité v chladivu AZ. Přírodní bór obsahuje cca 20 % izotopu B_5^{10} , který je schopný dobře zachytit tepelné neutrony. Zachycením je zlikvidován jejich potenciál způsobit rozštěpení jádra ^{235}U . [27]

V praxi tedy odebereme vodu z primárního okruhu, změníme v ní obsah kyseliny borité a poté jí zavedeme zpět.

Další běžný způsob regulace je manipulace řídicími tyčemi obsahujícími bór, nebo také kadmium. Tyto tyče jsou zasouvány, případně vysouvány z AZ, čímž ovlivňují reaktivitu. Tyče jsou používány převážně ke kompenzaci „otravy“ reaktoru, vyhoření části paliva, při spuštění nebo odstavení reaktoru (zejména havarijním) a při změně výkonu reaktoru.

Jedna z dalších možností, jak regulovat reaktivitu, je přivření ventilů vedoucích páru z parogenerátorů do turbíny. To způsobí nárůst teploty v AZ, vlivem čehož klesá hustota chladicího média. Tím je snížena jeho schopnost zpomalovat neutrony, což ústí v menší počet štěpících srážek. Po nějaké době se stav opět ustálí.[6]

3.1.4 Konstrukce palivových souborů



Obr. 9 Schéma uložení paliva v reaktoru [43]

Konstrukční celek, který představuje jaderné palivo v reaktoru, se nazývá palivový soubor. Palivový soubor, někdy také nazýván jako palivový článek, je tvořen palivovými elementy, jinak nazývanými jako palivové proutky. Palivové články pracují ve velmi těžkých podmínkách, jsou vystaveny mimo jiné radiačnímu působení, vysokým teplotám, dynamickému namáhání a chemickému působení okolí. Palivový článek je tedy kritický element jaderného reaktoru a jeho spolehlivost je pro správnou funkci a bezpečnost nezbytná. Jeho vlastnosti určují a limitují provozní i ekonomické parametry elektrárny a Bečvář [7, s. 241] palivové články považuje za technicky nejvýznamnější část jaderného reaktoru.

Požadavky na palivové soubory

Palivové soubory musí zajistit dosažení požadovaného tepelného výkonu a vyhoření paliva. Celá konstrukce musí být odolná vůči objemovým změnám (radiační růst, creep) a vysokým teplotám. Neméně důležitá je zde odolnost vůči erozi a korozi. Palivové soubory by měly zajistit dostatečně tuhé uchycení palivových proutků tak, aby nedocházelo k velkým ohybům a kmitání, a aby byl kolem nich zajištěn dostatečný průtok chladiva.

Složení a konstrukce

Konstrukce palivových článků se liší v závislosti na typu reaktoru. Mezi základní konstrukční části patří hlavice a patice, vodící trubky, centrální tyč a distanční mřížky.

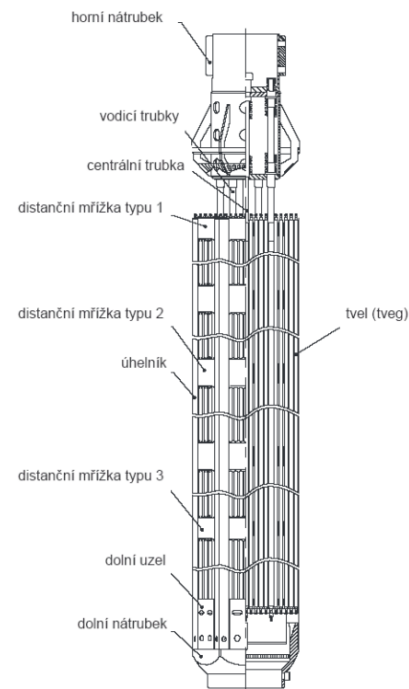
Palivové články používané v České republice – na EDU a ETE budou popsány níže.

Palivový soubor pro reaktory VVER-440 [6]

- Šestihřanný svazek 126 palivových tyčí
- 10 voštinových distančních mřížek
- Válcová koncová část pro ustavení v AZ
- Hlavice – pro manipulaci při zavážení a vyjímání paliva
- Ze slitiny Zr a Nb
- V rozích přitlačován pružinkami do svého uložení
- Zirkoniová centrální trubka jako spojovací člen dist. mřížek
- Celkem 349 palivových souborů v reaktoru

Palivový soubor pro reaktory VVER-1000 [6]

- Šestihřanný svazek 312 palivových tyčí
- 12 distančních mřížek
- 12 trubek pro vedení svazkové řídicí tyče
- Válcová hlavice pro manipulaci
- Patice s filtrem pevných částic
- 18 vodících trubek a centrální trubka
- celkem 162 palivových souborů v reaktoru



Obr. 10 Schéma PS typu TVSA-T [44]

Distanční mřížky mimo upevnění a stabilizace palivových proutků zároveň zvyšují přestup tepla z paliva do vody, ale způsobují tlakovou ztrátu.

Palivový element – proutek

Palivový proutek je trubka, ve které jsou uloženy palivové peletky. Je uzavřená přivařenými koncovkami a vyplněná heliem. V horní části je uložena distanční pružina s přitlačnou destičkou, která kompenzuje tepelnou roztažnost a fixuje peletky proti pohybu. Trubka je vyrobena ze slitiny Zr a Nb. Palivové proutky jsou na svém místě drženy pomocí distančních mřížek a uchyceny zpravidla v patici kazety.

Velmi důležité je pokrytí, které slouží jako bariéra mezi proutkem a palivem, mezi nimiž bývá malá vůle. Pokrytí zabraňuje uvolňování štěpných produktů do vody, musí tedy splňovat především tyto vlastnosti: vysoká odolnost, malá absorpce tepelných neutronů a dobrá tepelná vodivost. Z těchto důvodů se používají slitiny zirkonia. [11]

Palivová peletka

Palivová peletka je sintrovaný váleček vyrobený z obohaceného UO_2 , 10-15 mm vysoká s průměrem 8–15 mm, viz. kapitola 3.1.2.1 „Palivo“. Doposud dodávaly palivo pro české jaderné elektrárny dvě společnosti: Westinghouse a Tvel.

Peletky od společnosti Tvel, používané dříve, měli uprostřed otvor průměru 1,2mm, pro snížení teplotní špičky ve středu peletky. Palivo od společnosti Westinghouse je uprostřed jen mírně vyhloubeno, stejné řešení má i současné palivo od společnosti Tvel. [12]

Je nutno podotknout, že palivo je klíčovou součástí jaderné elektrárny a jeho optimalizace je důležitá z hlediska bezpečnosti i výkonu. Jako příklad lze uvést reaktor VVER440 na EDU, který z počátku operoval na výkonu 440MW, ale postupnou modernizací celého zařízení i vývojem paliva došlo k nárůstu výkonu na současných 510MW.

4 Malé modulární reaktory

4.1.1.1 Úvod

Malé modulární reaktory, dále jen „SMR“, mají být inovativním řešením otázky budoucnosti jaderné energie. Tradiční, velké jaderné bloky vyžadují velké počáteční investice a výstavba trvá dlouho. Koncept SMR by měl tyto nedostatky řešit.

Podle definice MAAE jsou SMR reaktory menších výkonů, zpravidla do 300MWe. Dosahují menších rozměrů a jednotlivé bloky lze spojovat do větších celků. Cílem je vyrábět SMR sériově, což má přispět ke snížení celkové ceny elektrárny. Velká poptávka po SMR je v odlehlých částech světa, které nejsou připojeny k elektrické síti. SMR pro ně představují spolehlivý off-grid zdroj energie a tepla.

V současné době operují ve světě dvě elektrárny disponující SMR. Za vůbec první fungující SMR je považován ruský reaktor KLT-40S, dva reaktory tohoto typu jsou umístěny na plující jaderné elektrárně Akademik Lomonosov. Ta dnes zásobuje město Pevek elektřinou i teplem. Jedná se o dva tlakovodní reaktory výkonu 38MW, původně určené pro využití na ledoborcích a pro výrobu elektřiny v odlehlých krajinách. [15]

Druhý operující SMR je čínský HTR-PM o výkonu 210MW, který je k síti připojený od konce roku 2021. Je to vysokoteplotní, plynem chlazený reaktor 4. generace navržený pro fungování v bloku po dvou, kde jsou dva reaktory připojeny na jednu turbínu. [16][26]

4.1.1.2 Výhody SMR

Elektrárna či teplárna disponující SMR by měla být po materiálové a logistické stránce výrazně menší projekt oproti klasickým velkým blokům, i díky velkému použití moderních pasivních bezpečnostních systémů. Jedna z nevýhod velkých jaderných bloků je velikost počáteční investice, doba výstavby a velikost projektu. I přes to, že finální cena za MW vyrobené energie může být od elektráren disponujících SMR vyšší než z klasických velkých bloků, můžou investory zaujmout právě nižší počáteční náklady a kratší doba výstavby.

SMR jsou navrženy jako kompaktní reaktory, kompletně vyráběné v továrnách, kde by mělo dojít i k montáži většiny komponent. Cílem je dosáhnout snížení počtu úkonů a operací v místě stavby. Z důvodů menších rozměrů by měla být značně usnadněna doprava a manipulace. K již existujícím modulům SMR mají jít přistavovat a připojovat další moduly, hlavně v případech, kdy dojde k velkému nárůstu spotřeby energie v dané lokalitě. Celkově by tedy měly být projekty SMR flexibilnější, hlavně co se týče financování.[28]

Další z možných výhod aplikace SMR je decentralizace energetiky. Cílem decentralizace je přejít z několika vysokovýkonových zdrojů energie centralizovaných v určitých místech na více menších zdrojů, nacházejících se v různých lokalitách. Díky decentralizaci jsou zmenšeny nároky na přenosovou soustavu a je zlepšena její bezpečnost a stabilita.

4.1.1.3 Využití SMR

Jedna z možných aplikací SMR v České republice je jejich využití v odstavených elektrárnách či teplárnách, spalující fosilní palivo. Jelikož ČR v rámci dlouhodobého energetického plánu plánuje postupně tyto zařízení odstavovat [17, s.304], mohly by se díky aplikaci SMR části

původní technologie dále využívat. V tomto případě by dozajista byly nutné další úpravy, nejednalo by se jen o jednoduché nahrazení “SMR za kotel”, už jen kvůli parametrům páry, ale určitě i kvůli zvýšeným nárokům na bezpečnost.

Z těchto lokalit připadají v ČR v úvahu například Tušimice, Prunéřov, Ledvice nebo Dětmárovice. [49] Tyto lokality jsou již považovány za průmyslové oblasti a jejich velkou výhodou je již připravená a fungující infrastruktura. Je zavedená rozvodná síť, napojení na dodávky vody, parovodní síť.

Další možné použití SMR, především ve světě, je jejich provoz na velmi odlehlých místech, které nejsou připojené k rozvodné síti. V tomto směru projevila zájem o využití SMR například Kanada a jednu elektrárnu se dvěma reaktory takto již používá Rusko. Výhoda jsou malé rozměry, které usnadní dopravu, ale i nižší výkon, rychlost sestavení a cena. Samozřejmostí je i využívání SMR jako zdroje tepla.

4.1.1.4 Představení možných SMR pro aplikaci v ČR

Skupina ČEZ bude v oblasti SMR spolupracovat se společnostmi NuScale, GE Hitachi, Rolls Royce, EDF, Westinghouse, KHNP a Holtec.

Pro podrobnější popis byl zvolen reaktor od společnosti NuScale, jelikož mu již byla udělena certifikace od Nuclear Regulatory Commission (NRC) pro výstavbu v USA.

NuSCALE VOYGR [18]

NuScale VOYGR je malý modulární reaktor typu PWR s výkonem 77MWe na jeden modul. Využívá hlavně pasivní bezpečnostní systémy, přirozenou cirkulaci v aktivní zóně. Může být spojen do bloku čtyř, šesti nebo dvanácti modulů.

NuScale Small Modular Reactor: Technical Specifications			
VOYGR Plant Design Objective (Plant Operation)	60 years	Moderator	Light water
Thermal Power (per module)	250 MWt	Steam Generators Number	2 independent tube bundles integrated into reactor vessel
		Configuration	Once through helical
Electrical Power (per module)	77 MWe (gross)	Operating Cycle Length	18 months
Thermal Efficiency	>30%	Outage Duration	10 days
Reactor Type	Integral Pressurized Water Reactor	Containment Parameters:	
		Design Temperature	316°C (600°F)
		Design Pressure	83 bar (1200 psia)
		Nominal Operating Pressure	<0.07 bar (<1 psia)
		Vessel Diameter	4.6 m
Vessel Height	23.3 m		
Core	UO ₂	Primary System Parameters:	
		Design Temperature	343°C (650°F)
		Design Pressure	152 bar (2200 psia)
		Nominal Operating Pressure	138 bar (2000 psia)
Fuel Enrichment	<4.95%		
No. of Fuel Elements	37 (17 x 17 pin array)		
Core Height	2.0 m		
Coolant	Light water	Secondary System Parameters:	
		Design Temperature	343°C (650°F)
		Feedwater Temperature	93°C (200°F)
		Turbine Inlet Pressure	35 bar (500 psia)

Obr. 11 Technická specifikace reaktoru NuSCALE VOYGR [18]

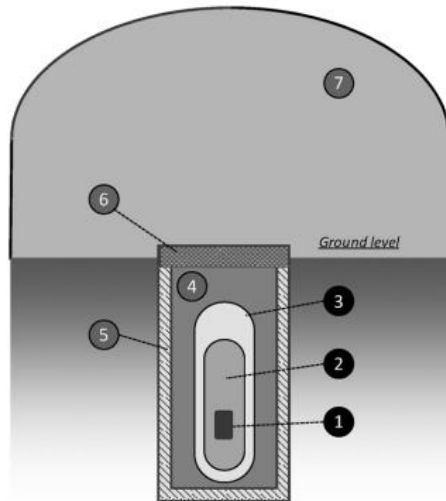
Reaktor

Reaktor disponuje celou řadou pasivních bezpečnostních systémů. Jsou to systémy, které zajišťují chlazení a odstavení reaktoru v případě havárie bez potřeby zásahu člověka. Fungují převážně na principu základních fyzikálních zákonů – gravitaci, přirozené konvekci, rozdílu tlaků.

Přirozená cirkulace chladiva během normálního stavu reaktoru eliminuje potřebu složitých a velkých armatur a čerpadel v primárním okruhu.

Reaktor dle výrobce používá 5% množství paliva, které potřebují tradiční 1000MW PWR reaktory.

Každý jeden modul NuScale je uložen v kontejnmentu. Kontejnment se nachází v reaktorovém bazénu, obklopuje ho voda. Reaktorový bazén je tvořen železobetonem a je uzavřen biologickým štítem. Celá sestava je zapuštěna pod zemí v reaktorové budově. Reaktorový bazén obsahuje zásobu chladicí vody na 30 dní, a umístění reaktoru pod zemí zajišťuje ochranu před zemětřesením, povodněmi, tornády nebo nárazem letadla. [18]



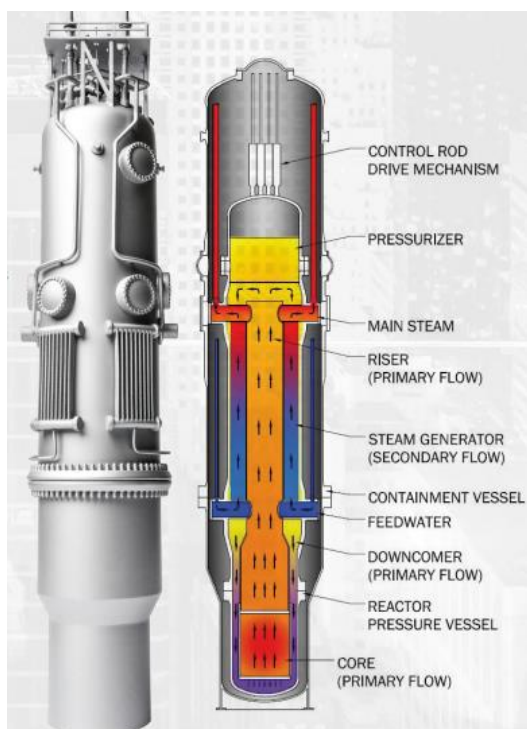
- 1 Palivo
- 2 Tlaková nádoba reaktoru
- 3 Kontejnment
- 4 Voda v reaktorovém bazénu
- 5 Železobetonový reaktorový bazén
- 6 Biologický štít
- 7 Reaktorová budova

Obr. 12 Kontejnment reaktoru NuSCALE VOYGR [19]

Modul je vysoký 13,7m a má průměr 2,7m. Hlavní části reaktoru jsou aktivní zóna, spirálové parogenerátory a kompenzátor objemu.

Ve spodní části reaktoru se nachází aktivní zóna s palivem ve formě peletek UO_2 obohacených na 5%. Výkon reaktoru je řízen pomocí řídicích tyčí. Voda v aktivní zóně, sloužící jako chladič a moderátor, je pod tlakem 12,8MPa. Princip funkce reaktoru je založen na přirozené cirkulaci. Voda v AZ má po zahřátí menší hustotu, stoupá tedy nahoru hlavním průtočným kanálem. Kolem něj je cívkovitě ovinut parogenerátor, kterým protéká chladicí médium – voda. Voda primárního okruhu je v parogenerátoru ochlazená, což zmenší její hustotu. Mezi horní a spodní částí reaktoru vznikne rozdíl hustot. Výsledná vztlaková síla pohání chladivo primárního okruhu, a to cirkuluje potrubím dolů zpět do AZ. Jedná se tedy o přirozenou cirkulaci. Chladivo je vedeno v trubkách malých průměrů, což eliminuje potenciální velké ztráty chladiva (LOCA) v případě poškození jedné z trubek.

Reaktor disponuje dvěma hlavními pasivními systémy pro odvod tepla: decay heat removal system, DHRS (systém odvodu zbytkového, rozpadového tepla) a emergency core cooling system, ECCS (nouzový systém chlazení aktivní zóny).[19]



Obr. 14 Konstrukce reaktoru NuSCALE
VOYGR [18]

Systém DHRS je schopen odvádět páru z parogenerátorů do dvou kondenzátorů ponořených v reaktorovém bazénku. Takto je odváděno zbytkové teplo z aktivní zóny po odstavení reaktoru, systém je schopen AZ tímto způsobem chladit až 3 dny bez nutnosti zapojení čerpadel.

Systém ECCS se skládá ze dvou sad ventilů, umístěných v horní části a po obvodu reaktoru. Tento systém chladí reaktor, pokud není možné odvádět teplo běžným způsobem, ani systémem DHRS. V případě nutnosti jsou otevřeny ventily v horní části reaktoru a vzniklá pára uniká do kontejnmentu. Na vnitřním povrchu kontejnmentu kondenzuje a stéká do bazénku. Když hladina vody v bazénku dosáhne výšky druhé sady ventilů, jsou otevřeny a voda proudí zpět do reaktoru, kde odebere teplo, vypaří se a vzniká tak okruh, ve kterém chladivo cirkuluje, dokud není reaktor dostatečně ochlazen.

5 Odvod tepla z AZ reaktoru

Reaktor typu VVER1000 dokáže generovat až 3120 MWt. [20] Dostatečný odvod tepla z AZ reaktoru je kritický jak pro správnou funkci jaderné elektrárny, tak pro její bezpečnost. Pokud by byl odvod tepla jakýmkoliv způsobem narušen, hrozí rychlý přechod do havarijního stavu. Cílem operátorů, řídicích systémů a konstrukce samotných součástí elektrárny je zajistit spolehlivý a účinný odvod tepla z aktivní zóny. Teplo je odváděno z uranových peletků přes heliovou mezeru a palivový proutek do chladicí kapaliny a ta poté předává tepelnou energii v parogenerátorech médiu sekundárního okruhu.

Palivové proutky jsou těsně uspořádány v palivových kazetách a zajištěny distančními mřížkami. Konstrukce palivových kazet má za úkol umožnit co největší odvod tepla z palivových proutků do chladicí vody a zároveň proutky pevně stabilizovat na místě.

Extrémní případ narušení odvodu tepla je tzv. „krize odvodu tepla“, která vede ke skokovému nárůstu teploty a může způsobit natavení palivových proutků. Krize odvodu tepla je nebezpečný jev, který v reaktoru nesmí nastat, je tedy důležité pochopit, jak vzniká a probíhá, čemuž se bude věnovat následující část mé práce, včetně měření.

5.1 Způsoby přestupu tepla v reaktoru

Sdílení tepla probíhá třemi způsoby: kondukcí, konvencí a radiací, a to vždy z látky vyšší teploty do látky nižší teploty.

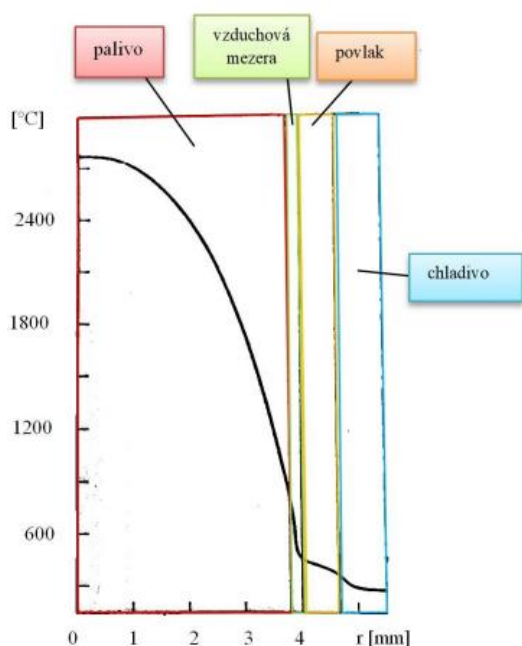
Sdílení tepla kondukcí, tedy vedením, probíhá v tuhých tělesech a tekutinách, které se nepohybují.

Sdílení tepla konvekcí, tedy prouděním, probíhá buď přirozeným nebo vyvolaným pohybem. Příklad přirozené konvekce může být proudění vlivem změny hustoty, nucený pohyb vyvolává například čerpadlo.

Sdílení tepla radiací neboli sáláním, je sdílení tepla pomocí elektromagnetického vlnění, dokáže se tedy šířit i vakuem, v závislosti na vlnové délce ho rozlišujeme na tepelné, viditelné a infračervené záření. [21]

Teoreticky lze říct, že dochází k přestupu tepla jen jedním z výše zmíněných způsobů, ale je to značná idealizace, v realitě vždy působí všechny tři způsoby společně.

I v jaderném reaktoru tedy dochází ke sdílení tepla všemi způsoby. V obrázku níže je znázorněn odvod tepla z paliva do chladiva.



Červenou barvou je znázorněna palivová peletka. Největší teplota je u osy peletky, směrem k okraji exponenciálně klesá. [36] Zeleně je znázorněno helium, které vyplňuje vůli mezi peletkou a palivovým proutkem. Žlutě je znázorněn povlak a mezera mezi povlakem a chladivem představuje stěnu proutku.

Odvod tepla tedy probíhá mezi několika fázemi, z palivové peletky do stacionárního hélia, přes stěnu zirkoniového pokrytí proutku do proudícího chladiva. Pokud situaci zjednodušíme a palivový proutek budeme považovat za jedno těleso, můžeme říct, že hlavní způsob přenosu tepla v AZ tlakovodního reaktoru je nucenou konvekcí, a to mezi stěnou palivového proutku a proudícím chladivem, tedy zpravidla vodou.

Obr. 15 Přestup tepla z jaderného paliva [45]

5.2 Var

Var je fázový přechod z kapalné fáze do fáze plynné, v našem případě tedy z vody do vodní páry. K varu dochází, pokud voda dosáhne teploty sytosti T_s , která závisí na okolním tlaku. Tuto teplotu má jak vypařující se kapalina, tak vznikající sytá pára. Teplota sytosti je závislá na tlaku prostředí. Velikost teploty varu pro tlak udržovaný v AZ reaktoru VVER1000 (15,7 MPa) je 345,7 °C. [23]

Při dosažení T_s začínají v kapalině vznikat a růst parní bubliny. Ty vznikají v jednotlivých bodech vyhřívané plochy na parních jádrech. Parní jádra jsou místa daná malými nerovnostmi, usazeninami, hrbolky v povrchu.

Ve skutečnosti bylo změřeno, že kapalina má v blízkosti výhřevné plochy daleko větší teplotu, než je teplota sytosti. Tento rozdíl označíme jako delta T. Delta T s rostoucí vzdáleností od výhřevné plochy klesá, od 5 mm dosahuje 0,4-0,8°C.

Čím je delta T větší, tím menší nerovnosti začínají fungovat jako parní jádra, tedy tím více nových bublinek vzniká. Delta T je nejvyšší u výhřevné plochy, bublinky tedy prakticky vznikají jen tam. Tato oblast se nazývá „oblast izolovaných bublin“. [24]

Bubliny dále rostou a při určité velikosti se odtrhnou a začnou stoupat. Odtržení bubliny způsobí v místě parního jádra náhlý pokles teploty, takže nějakou dobu trvá, než na stejném místě začne vznikat další bublina. Odtržením přechází bublina do oblasti „rozvinutého bublinkového varu“. Během stoupaní bubliny dále rychle rostou a promíchávají okolní přehřátou kapalinu, čímž zvyšují koeficient přestupu tepla. Pokud je nadále zvyšován tepelný tok, urychluje se vznik a růst bublinek a po nějaké době bude dosažen kritický tepelný tok. Sousední bublinky se začnou spojovat a postupně vytvoří podél výhřevné plochy spojitou parní blánu. Tímto způsobem vzniká tzv. „blánový var“. [25]

V AZ jaderného reaktoru se var vyvíjí stejným způsobem.

Pokud je teplota palivových proutků nižší než teplota varu vody při daném tlaku, tedy než 345,7 °C, nedochází k tvorbě bublinek, chladiivo proudí jednofázově a odvod tepla je tedy převážně konvektivní.

Pokud teplota chladiwa přesáhne teplotu varu, vzniká povrchový var. Var je bublinkový, bublinky se odtrhávají a promíchávají se v proudu paliva. Pokud se dostanou do míst, kde je palivo o menší teplotě než teplota varu, kondenzují. Bublinky způsobují turbulence a tím zvyšují koeficient přestupu tepla. [29]

Pokud se tepelný tok dále zvyšuje, roste i počet bublinek a po dosažení teploty varu v celém proudu chladiwa přechází var bublinkový do varu objemového.

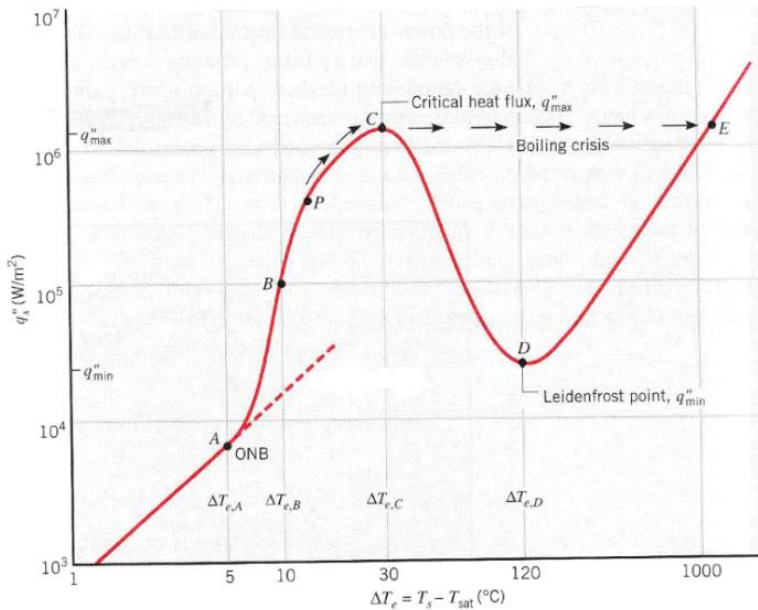
„Při určité kombinaci hodnot tepelného toku, průtoku chladiwa a hmotového obsahu páry přechází bublinkový var ve var blánový.“ [6, s. 76] Plynná fáze vytvoří kolem palivového proutku blánu, která se chová jako izolant, koeficient přestupu tepla tedy skokově klesá a v místě, kde k tomuto jevu dojde, hrozí vlivem prudkého zvýšení teploty oxidace zirkoniového pokrytí, natavení proutku nebo paliva a poškození. Tento úkaz se nazývá 1. krizí odvodu tepla a nesmí vzniknout v žádném provozu na žádném místě AZ. [6]

5.3 Krize přestupu tepla

Krize přestupu tepla neboli krize varu, je jev, který se za určitých podmínek objevuje během procesu sdílení tepla. Za daných podmínek nastává, pokud tepelný tok dosáhne hodnoty, kterou nazýváme kritický tepelný tok. Projevuje se skokovým zmenšením koeficientu přestupu tepla a prudkým nárůstem teploty na topném elementu. Znalost hodnoty kritického tepelného toku nám pomůže správně navrhnout parametry chlazení dané součásti, jelikož dále zvyšovat hodnotu tepelného toku nad kritický je kontraproduktivní. V anglické literatuře je kritický tepelný tok označován jako „critical heat flux“ (CHF).

Pojem krize přestupu tepla je velmi široký a v odborné literatuře se podrobněji rozděluje do dvou druhů, v závislosti na kvalitě páry. První je označován jako „departure from nucleate boiling“, zkráceně DNB. Vyskytuje se při nízké suchosti páry, občas je tedy nazývaný jako „low quality CHF“. V češtině se tento druh krize přestupu tepla nejčastěji označuje jako krize přestupu tepla 1. druhu.

Druhou kategorií krize přestupu tepla je „dryout“. Nastává při vysoké suchosti páry, někdy je tedy nazýván jako „high quality CHF“. V češtině se pro něj používá termín krize přestupu tepla 2. druhu.[29][37]



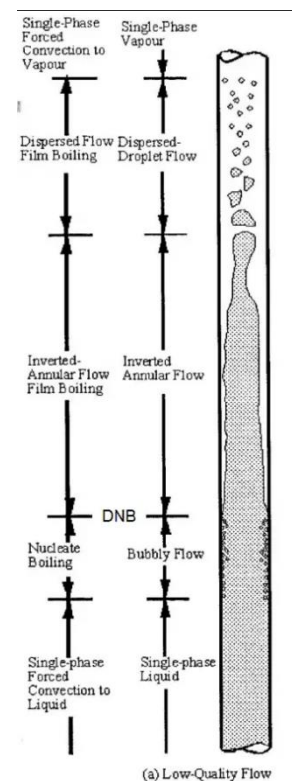
Obr. 16 Tepelný tok během krize přestupu tepla [22]

Na obr.16 je graficky znázorněn tepelný tok v závislosti na rozdílu teplot stěny a sytosti vody při atmosférickém tlaku během krize přestupu tepla.

Krize přestupu tepla 1. druhu (DNB)

Krize přestupu tepla 1. druhu je stav, ke kterému dojde při přechodu z bublinkového varu na var blánový. Sousední bubliny se začnou spojovat, čímž je kolem výhřevné plochy vytvořena parní blána, která ovlivňuje sdílení tepla. Parní blána má nižší koeficient přestupu tepla α , takže aby byl zachován stejný tepelný tok, dojde k lokálnímu zvýšení teploty na topném elementu, což je v našem případě palivový proutek. Chování a vznik krize varu závisí na více proměnných, například tlaku, hmotnostním průtoku a teplotě, ale také na povrchu materiálu.[29][31]

Na obr. 17 lze vidět typický průběh DNB pro proudění v trubici. Jednofázové proudění postupně přechází do oblasti, kde začíná bublinkový var. Následně nastane DNB a po obvodu trubice se tvoří parní blána. Voda se dále vypařuje a v následující oblasti již převažuje parní fáze, ve které proudí rozptýlené vodní kapky. Po odpaření veškeré vody nastává jednofázové proudění vodní páry.

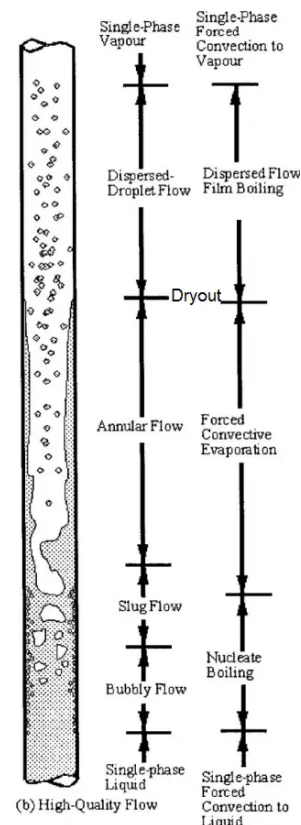


Obr. 17 Krize přestupu tepla 1. druhu [30]

Krise přestupu tepla 2. druhu (dryout)

Dryout vzniká například při proudění v kanále při nižších tepelných tocích, než je DNB. Typický průběh dryoutu při proudění v trubici je zobrazen na obr.18. Vzniká bublinkový var, který přechází do dvoufázového proudění prstencového typu, kdy středem trubky proudí pára a po obvodu trubky se vyskytuje kapalný film, který vytváří příznivé podmínky pro odvod tepla. Vzhledem k velkému podílu parní fáze je pro tento jev charakteristický menší hmotností průtok v porovnání s krizí 1. druhu. [29]

Problém nastává, když vlivem změny charakteristik proudění dojde k odtržení kapalného filmu parní fází a nastane lokální vysušení. V tento moment dojde ke snížení koeficientu přestupu tepla, lokálnímu růstu tepla a hrozí poškození. Rychlost proudění páry uvnitř prstence je vysoká, přenos tepla po dosažení CHF je vyšší než při DNB. Nárůst teploty stěny nižší a probíhá pomaleji, dryout je tedy méně nebezpečný než DNB. [29]



Obr. 18 Krize přestupu tepla 2. druhu [30]

5.3.1 Predikce krize přestupu tepla

K predikci krize přestupu tepla se v praxi používají různé metody. Jako příklad je uvedena metoda korelace $W-3$ vyvinuta společností Westinghouse, která byla v minulosti hojně využívána. Tato metoda udává kritický tepelný tok jakožto funkci entalpie, tlaku, suchosti a hmotnostního toku chladiva. Dnes již těchto korelací pro predikci CHF existuje více, zpravidla si vlastní korelaci sestavuje každý výrobce jaderného paliva na základě vlastního experimentálního výzkumu.

Pro lepší popsání stavu systému z hlediska hrozby krize přestupu tepla se zavádí hodnota “DNBR”, tedy “departure from nucleate boiling ratio”. DNBR stanovuje rezervu vůči kritickému tepelnému toku, je definován jako kritický tepelný tok v určitém místě na určitých parametrech chladiva dělený lokálním tepelným tokem za normálního provozu ve stejném místě. [30]

$$DNBR = \frac{q_{cr}(z)}{q_{local}(z)} \quad [30]$$

Je nutné udržovat hodnotu DNBR na vyšších hodnotách, než je minimální povolená hodnota vzešlá z tohoto vzorce. Tu označíme jako DNBR_min a udává stav, kdy tepelný tok dosáhl hodnoty kritického tepelného toku. Hodnotu kritického tepelného toku q_{cr} lze určit například korelací $W-3$. [30]

Pokud by všechny korelace byly naprosto přesné, vyšel by v momentě počátku krize varu $DNBR_{min}$ roven jedné. Odchyly ve výpočtu mohou ale dosáhnout až 20 %. Je nutno stanovit maximální možnou odchylku a vzít jí v potaz. Pokud by byla 20 %, $DNBR_{min}$ by byl roven 1,2. Podmínka pro bezpečnost vůči krizi varu by tedy vypadala následovně: $DNBR > DNBR_{min} = 1,2$. [30]

S rostoucí entalpií chladiva klesá hodnoty kritického tepelného toku. Nejnížší hodnoty $DNBR$ se vyskytují převážně v horní části aktivní zóny. Na vstupu do kanálu je teplota chladiva nízká, takže tepelný tok, který by dokázal způsobit krizi varu, by musel být extrémně vysoký. Na výstupu z kanálu, kde má chladivo nejvyšší entalpii, by měl být kritický tepelný tok nejnížší. [30]

5.3.2 Limitní podmínky provozních režimů reaktoru

Z výše popsaných skutečností vyplývá, že pro bezpečný odvod tepla je pro správnou funkci reaktoru klíčový. Proto mezinárodní agentura pro atomovou energii IAEA a státní úřad pro jadernou bezpečnost SÚJB stanovily soubor „kritérií přijatelnosti“ především pro přechodové a havarijní podmínky.[6]

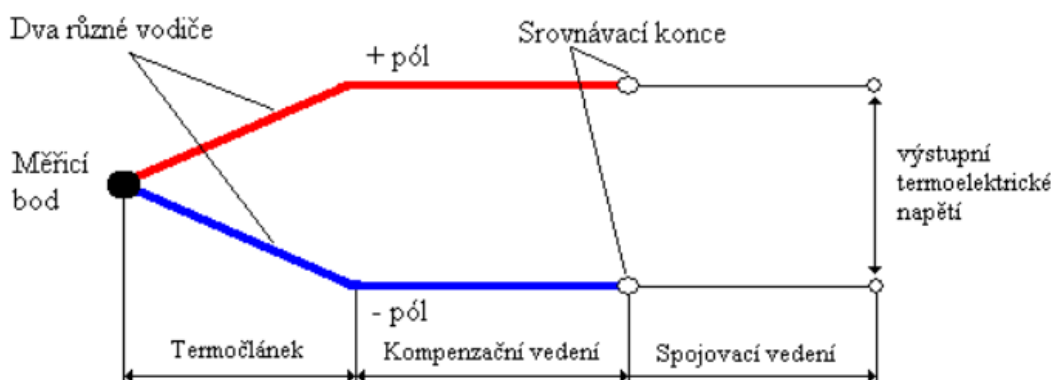
Některé z podmínek jsou podmínka netavení uranového jádra v palivovém proutku, podmínka nepřekročení mezní teploty Zr povlaku, podmínka nepřekročení váhového množství páry na výstupu z palivového souboru a podmínka nepřípustnosti krize varu.[6]

Dodržení těchto podmínek je kritické pro bezpečný provoz reaktoru, přičemž je dobré zmínit, že každá z těchto podmínek je jinak „přísná“ - teplota tavení nevyhořelého UO_2 je přibližně 2805 °C, ale k degradaci Zr povlaku dochází už od teploty 352°C. V normálním provozu reaktoru kontrolovat, zda nedochází ke zvýšení váhového množství páry nad přípustnou hranici a zda na palivových proutcích nevznikají podmínky, za kterých by mohla nastat krize přestupu tepla. [6]

Reaktory jsou konstruovány tak, aby se zajistilo, že provozní podmínky mají dostatečnou rezervu vůči podmínkám, za kterých krize přestupu tepla vzniká. Vznik blánového varu je tedy při normálním provozním režimu reaktoru velmi nepravděpodobný. Při analýze havarijních situacích, zejména LOCA, je ale třeba vzít možnost nastání této situace v úvahu. [29]

6 Měření teploty pomocí termočlánků

Termočlánky jsou zařízení, které měří teplotu na základě termoelektrického jevu. Termoelektrický jev je vznik elektrického napětí mezi dvěma spojenými vodiči z odlišných materiálů, pokud mezi nimi existuje nenulový teplotní gradient.



Obr. 19 Schéma zapojení termočlánku [34]

Měření teploty pomocí termočlánku je kontaktní způsob měření teploty. V praxi se jedná o dva vodiče různých materiálů, které jsou spolu spojeny v měřicím bodě, někdy také označovaném jako „teplý konec“. Tento konec se poté umístí do místa, jehož teplotu chceme změřit. Jelikož termoelektrický jev funguje na základě tepelného gradientu, je potřeba znát teplotu volných konců vodičů (někdy označovaných jako “studené konce”). Studené konce vodičů jsou následně připojeny na voltmetr a je mezi nimi změřeno vzniklé napětí. Na základě změřeného termoelektrického napětí a teploty volných konců lze určit teplotu v měřeném místě. [32]

Při měření bývá často problematická právě nutnost znalosti teploty studených konců termočlánku. Pokud je teplotní gradient velmi velký (blíží se 1000°C), postačí teplotu studených konců jen odhadnout, v rozmezí přibližně $\pm 5^\circ\text{C}$. Dosažená přesnost bude díky velkému rozdílu teplot uspokojivá. Pokud je rozdíl teplot menší, je potřeba přesně určit teplotu studených konců. K tomu se v minulosti využívalo ponoření studených konců do prostředí s konstantní teplotou, například do roztoku vody s kostkami ledu, který zajišťuje udržení teploty 0°C. Tento způsob je ale nepraktický. [34]

Je tedy výhodnější použít tzv. “zapojení pro kompenzaci vlivu změny teploty”. Ani toto řešení však není precizně přesné, jelikož termoelektrické napětí mezi vodiči studeného konce se s měnícím se rozdílem teplot teplého a studeného konce nemění lineárně. Pro zjednodušení dělají kompenzační zapojení lineární korekci, a pokud teplota prostředí kolísá jen o několik stupňů C, dá se předpokládat, že chyba měření je zanedbatelná. [34] Tento způsob je použit na experimentálním zařízení ZČU.

Pro přesnější způsob měření je možno použít regulátor, který bude udržovat studený konec na konstantní teplotě (termostat).

Vlastnosti termočlánku záleží na zvolené kombinaci materiálů použitých vodičů. Termočlánky se dělí do typů J, K, T, E a N. [35] Tyto typy a jejich vlastnosti jsou shrnuty v tabulce níže.

Typ	Kladná větev	Záporná větev	Teplotní rozsah [°C]	Citlivost [mV/100°C]
J	železo (Fe)	konstantan (Cu-Ni)	0-760	5,27
K	chromel (Ni-Cr)	alumel (Ni-Al)	-200 až 1200	4,10
T	měď (Cu)	konstantan (Cu-Ni)	-200 až 370	4,17
E	chromel (Ni-Cr)	konstantan (Cu-Ni)	-200 až 900	6,32
N	nicrosil (Ni-Cr-Si)	nisil (Ni-Si-Mg)	-200 až 1200	2,77

Obr. 20 Přehled typů termočlánků a jejich vlastností [33]

Pro měření praktické části této práce byly použity termočlánky typu K.

Termočlánky typu K jsou jedny z nejčastěji využívaných termočlánků, díky možnosti jejich využití napříč širokým spektrem teplot, dlouhé životnosti, příznivé ceně, rychlé odezvě a celkové spolehlivosti. [35]

Umístění termočlánků v našem experimentálním zařízení bude blíže popsáno v praktické části této práce.

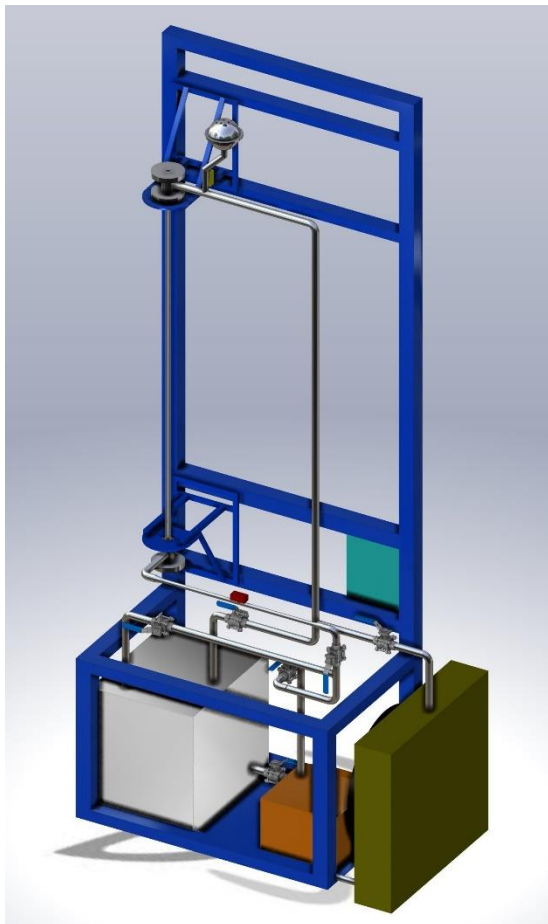
7 Praktická část

Kritický tepelný tok, při kterém nastává krize přestupu tepla, nelze jednoduše změřit pomocí jednoho měřicího přístroje, jako např. teplotu. Pro zkoumání vzniku a průběhu krize přestupu tepla je potřeba snímat více veličin charakterizujících podmínky v průtočném kanále a jejich vývoj v čase. Proto je potřeba disponovat zařízením, které dostatečně napodobuje proudění chladicí vody kolem palivového proutku v reaktoru a lze na něm krizi přestupu tepla vyvolat a rozpoznat. To je možné pomocí měření teploty na vnitřní stěně topeného imitátoru. Následně lze analyzovat, za jakých podmínek tento jev nastává.

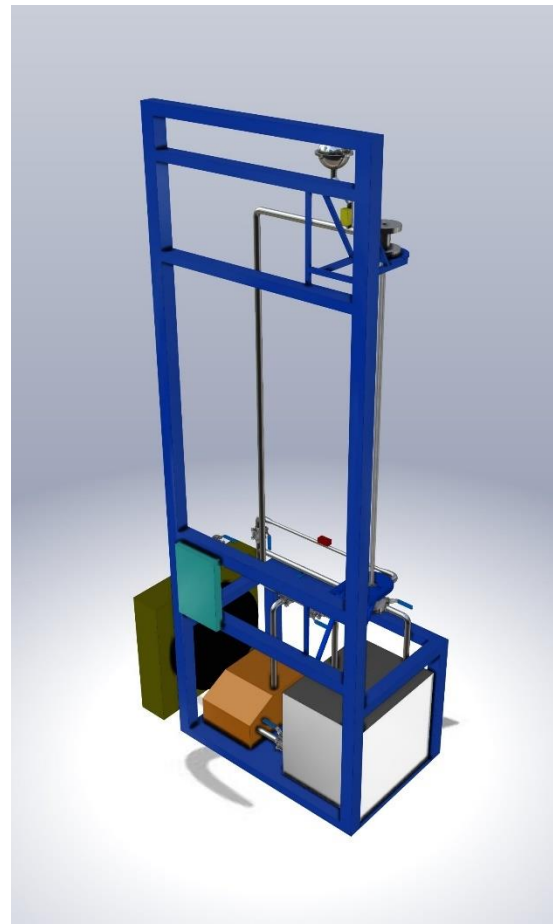
Zařízení, určené na sledování kritických tepelných toků, které je umístěné na velké experimentální hale KKE, bylo pro potřeby této BP upraveno. Byl nainstalován nový průtočný kanál s novým IPP, který umožňuje měření provést s větší přesností.

V praktické části této práce bude navrženo nové uspořádání zařízení pro měření kritických tepelných toků. Nový průtočný kanál s novým IPP bude porovnán se starým uspořádáním. Bude provedeno několik měření na obou uspořádáních a výsledky interpretovány a porovnány.

7.1 Návrh a popis experimentálního zařízení



Obr. 22 Experimentální zařízení zadní ISO pohled



Obr. 21 Experimentální zařízení přední ISO pohled

Na obr. 21 a 22 je zobrazen návrh experimentálního zařízení.

Zařízení představuje zjednodušený model palivového článku pro měření CHF při malých průtocích vody o tlaku blízkém atmosférickému.

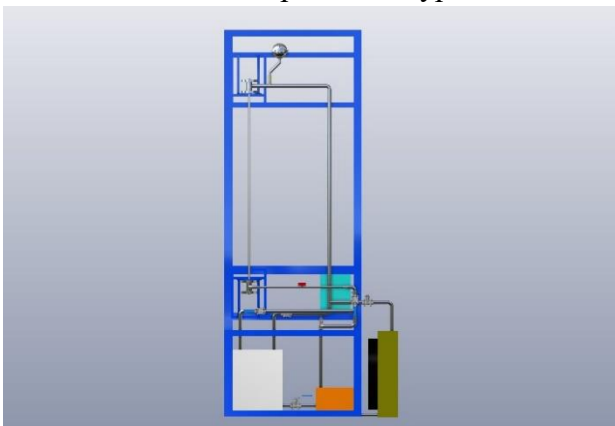
Jako zásobník chladicího média je ve spodní části zařízení umístěna nádrž, svařenec z ocelových plechů o objemu cca 200 l. Chladicí médium je destilovaná voda. Nádrž je spojena s peristaltickým čerpadlem WATSON-MARLOW spojovací hadicí. Čerpadlo je systémem trubek a armatur napojeno na vstupní hlavici zařízení. Před vstupem je umístěn ultrazvukový průtokoměr KOBOLD DUK a také zpětná trubice ústící do nádrže s vodou, pro vypuštění zbytkové vody v zařízení po ukončení měření.

Hlavní částí zařízení je skleněná trubice, sevřená mezi vstupní a výstupní hlavici. V ní je uchycen imitátor palivového proutku. IPP je zevnitř osazen termočládky typu K pro měření teploty v určených bodech, na koncích je proutek spojen s měděným vodičem. Ten je pomocí elektrod připojen na zdroj elektrického napětí – svářecí zdroj SELCO ETG 602. Odporové teplo, vznikající při průtoku el. proudu vodičem, nahrazuje teplo, vznikající při štěpné reakci. Palivový proutek je uvnitř trubky vycentrován pomocí distančních mřížek.

Na výstupní hlavici je napojena trubka vedoucí zpět do nádrže. K ní je ze shora napojen vývod do nádoby, určené pro částečný záchyt unikající páry a její kondenzaci a systém je spojen s atmosférou pomocí ventilu. Ve spodní části zařízení je na zpětnou trubku napojen by-pass do chladiče, pro případ, že by teplota vody v nádrži přesáhla 40°C, což je maximální povolená teplota média pro provoz čerpadla. Každá z těchto trubek je opatřena kulovým ventilem, dle potřeby lze tedy médium vést buďto přímo do nádrže, nebo přes chladič.

Chladič je jednoduchý hliníkový tepelný výměník typu „air to water“, proudění vzduchu je zajištěno připojeným ventilátorem.

Na nosném rámu svařenému z ocelových jelek profilů je umístěn elektrický rozvaděč, obsahující řízení a tlačítka na spuštění a vypnutí zařízení.

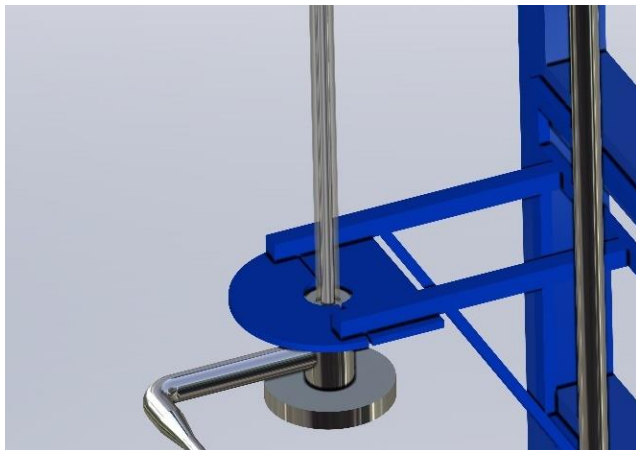


Obr. 23 Experimentální zařízení náhled

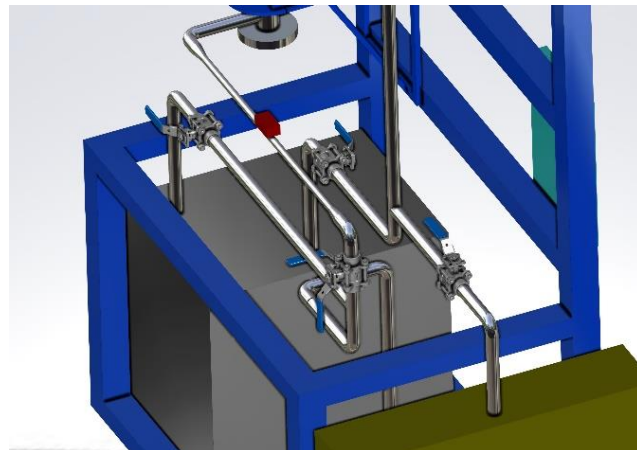


Obr. 24 Experimentální zařízení boční pohled

Pro zaznamenání dat je používáno osmi slotové chassis National Instruments cDAQ – 9172 s měřicími moduly, umístěné vedle řídicího počítače. Osazené moduly jsou NI-9211 pro měření teploty pomocí termočládků, NI-9205, NI-9234 a NI-9253 pro měření signálů z tlakových převodníků, průtokoměru a proudových kleští. Dále je použit modul NI 9263 s analogovým napětěovým výstupem ± 10 V pro ovládání relé, které vypíná příkon ze svářečky, jako signál pro vypnutí je nastaveno dosažení teploty 180°C na jakémkoliv z termočládků v imitátoru palivového proutku. Tato hodnota byla shledána jako dostačující pro proběhnutí krize varu v podmínkách zařízení. Poslední používaný modul je NI 9221 s analogovým napětěovým vstupem ± 60 V pro měření napětí (V) ze svářecího zdroje.[37]



Obr. 25 Experimentální zařízení – detailní pohled na uchycení vstupní hlavice



Obr. 26 Experimentální zařízení – detailní pohled na potrubí a armatury

Tab. 1 Komponenty experimentálního zařízení ZČU [37]

Měřicí ústředna	National Instruments typu cDAQ – 9172
Měřicí moduly	1 x NI-9205, 32 analog input, ± 200 mV to ± 10 V, 16 bit 2 x NI-9211, 4 thermocouple input, ± 80 mV, 24 bit 1 x NI-9221, 8 analog input, ± 60 V, 12 bit 1 x NI-9234, 4 analog input, ± 5 V, 24 bit 2 x NI-9253, 8 analog Input Module, ± 20 mA, 24-Bit 1 x NI-9263, 4 analog output, ± 10 V, 16 bit
Tlakověry	1 x SIEMENS SITRANS, diferenční, 0-60 kPa, 4-20 mA, HART 1 x SIEMENS SITRANS, diferenční, 0-25 kPa, 4-20 mA, HART 1 x JSP D2620, relativní, 0-600 kPa, 4-20 mA, G160, HART
Průtokoměr	1 x KOBOLD DUK 1xx4, ultrazvukový
Čerpadlo	1 x WATSON-MARLOW, 530U/REM, peristaltické
Snímače teploty	7 x termočlánky typu K
Proudové kleště	1 x FLUKE i30
Laboratorní zdroj	1 x SIGLENT SPD3303C, lineární programovatelný
Svářecí zdroj	1 x SELCO ETG 602
PC	1 x Laptop HP ELITEBOOK 840 G6

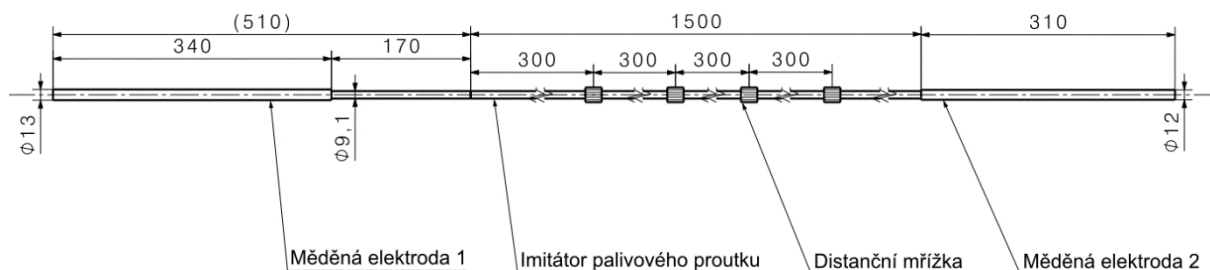
7.2 Imitátory palivových proučků

Byl navrhnout nový IPP 2.0, který představuje vylepšenou verzi oproti IPP 1.0. Nový IPP 2.0 usnadňuje manipulaci, je lépe vycentrován vůči průtočnému kanálu a umožňuje snímat teplotu ve více výškových hladinách zároveň. Níže budou oba imitátory podrobně popsány a porovnány.

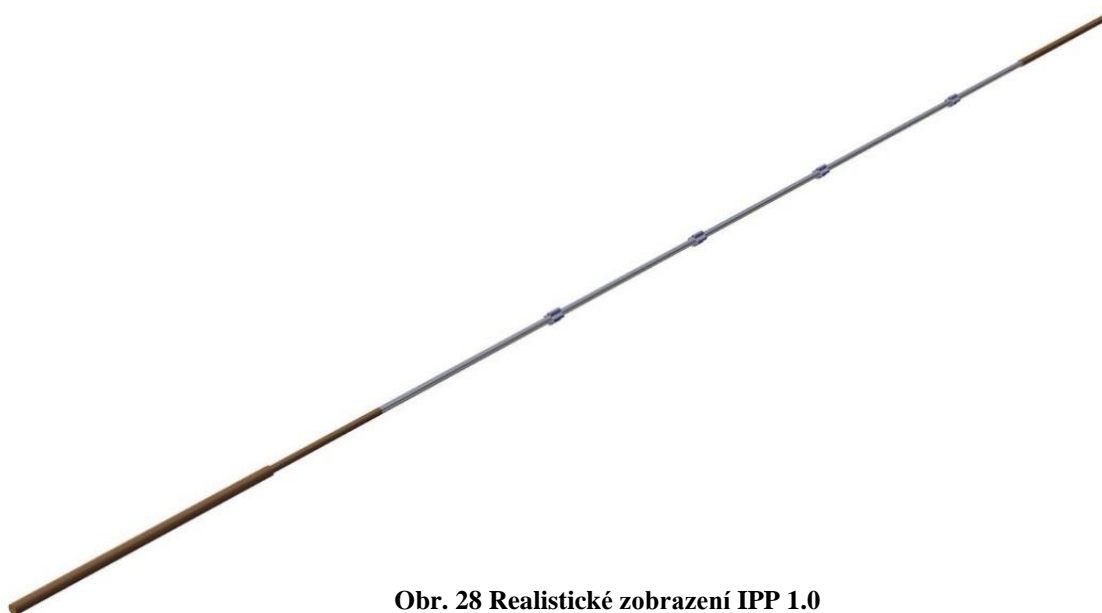
7.2.1 Imitátor palivového proučku verze 1.0

Vyhřívaná část imitátoru palivového proučku je dutá trubka z nerezové oceli 9,1x1,2 mm o celkové délce 1500 mm. Ze spodní části je s ocelovou trubkou spojena měděná elektroda, a to pomocí osazení, které je do ocelové trubky zasunuto do délky 12,5 mm a zapájeno. Tato část slouží pro připojení na zdroj elektrického napětí a má vnější průměr 13 mm. Ze shora je na ocelovou trubku pro připojení druhé větve zdroje elektrického napětí napájena měděná trubka o vnějším průměru 12 mm. Horní měděná část má délku 350 mm, dolní 515 mm. Celková délka imitátoru je 2330 mm.

Po délce imitátoru jsou rozmístěny celkem 4 distanční mřížky, první ve výšce 300 mm od spoje ocel – měď. Zbývající 3 mřížky jsou vždy umístěny se stejným výškovým rozdílem 300 mm. Udávané rozměry se počítají vždy do poloviny výšky distanční mřížky. Jedna distanční mřížka má výšku 10 mm. Všechny distanční mřížky jsou proti sobě stejně orientované. Pro měření teploty na stěně IPP jsou použity 4 termočlánky, která jsou osazena v jedné rovině na posuvných rozpěrných pružinkách. Pozice termočlánků je nutné před každým měřením nastavit dle požadavků.



Obr. 27 Schéma IPP 1.0



Obr. 28 Realistické zobrazení IPP 1.0

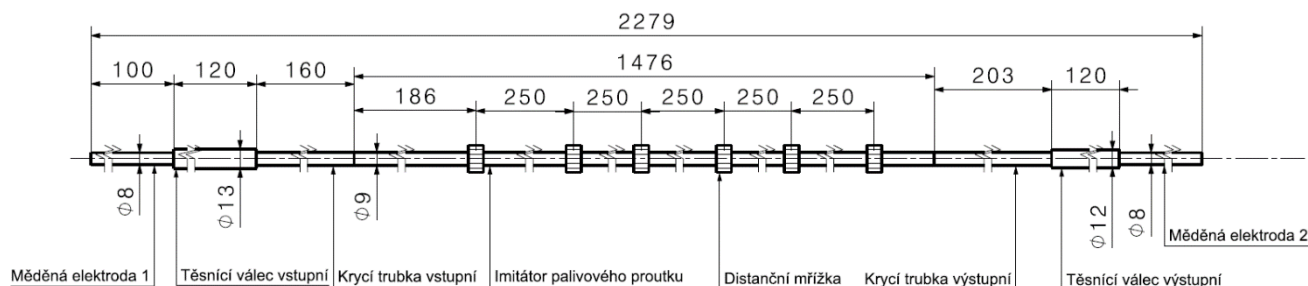
7.2.2 Imitátor palivového proutku verze 2.0

Imitátor palivového proutku 2.0 je vylepšená verze předchozí varianty. Vyhřívaná část IPP je dutá trubka z nerezové oceli 9x1mm o celkové délce 1476 mm. Ze spodní části je s ocelovou trubicou spojena měděná elektroda průměru 8 mm, a to pomocí osazení, které je do ocelové trubky zasunuto do délky 15 mm a zapájeno. Přes měděnou elektrodu je přetažena trubka z nerez oceli o průměru 9x0,5 mm. Trubka je s vyhřívanou částí IPP spojena svarem. Slouží k oddělení měděné elektrody od proudící vody. Měděná elektroda ve spodní části z krycí trubky vystupuje a je odkrytá – tato část slouží k připojení jedné větve zdroje elektrického napětí. Horní část IPP je řešena obdobně – do vyhřívané části IPP je zapuštěno osazení měděné elektrody o průměru 8 mm. Přes elektrodu je přetažena krycí trubka z nerez oceli průměru 9x0,5 mm. Na konci z přetažené trubky elektroda vystupuje a tato odkrytá část umožňuje připojení druhé větve zdroje elektrického napětí.

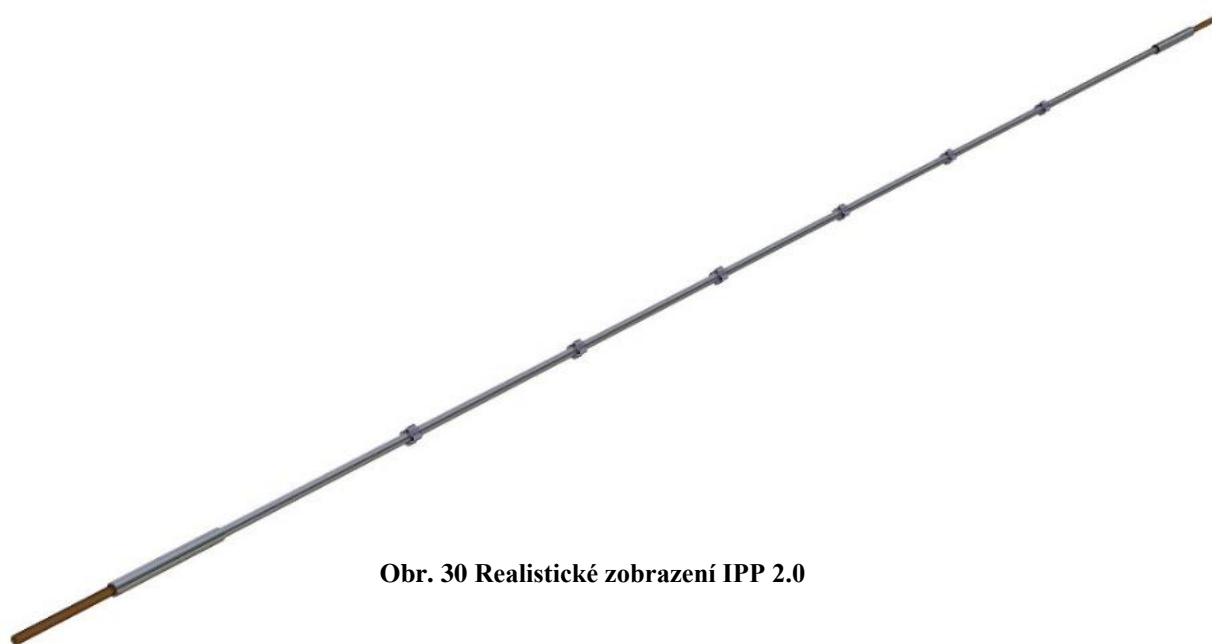
Na dolním i horním konci jsou navařeny těsnící válečky o průměrech 13 a 12 mm. Ty zajišťují těsné usazení ve vstupní a výstupní hlavici zařízení.

Celková délka IPP 2.0 je 2279 mm.

Po délce imitátoru je rozmístěno celkem 6 distančních mřížek, první ve výšce 186 mm od dolního spoje ocel – měď. Zbývající mřížky jsou vždy umístěny se stejným výškovým rozdílem 250 mm. Jedna distanční mřížka má výšku 10 mm. Všechny distanční mřížky jsou vůči sobě pootočené o 60°.



Obr. 29 Schéma IPP 2.0



Obr. 30 Realistické zobrazení IPP 2.0

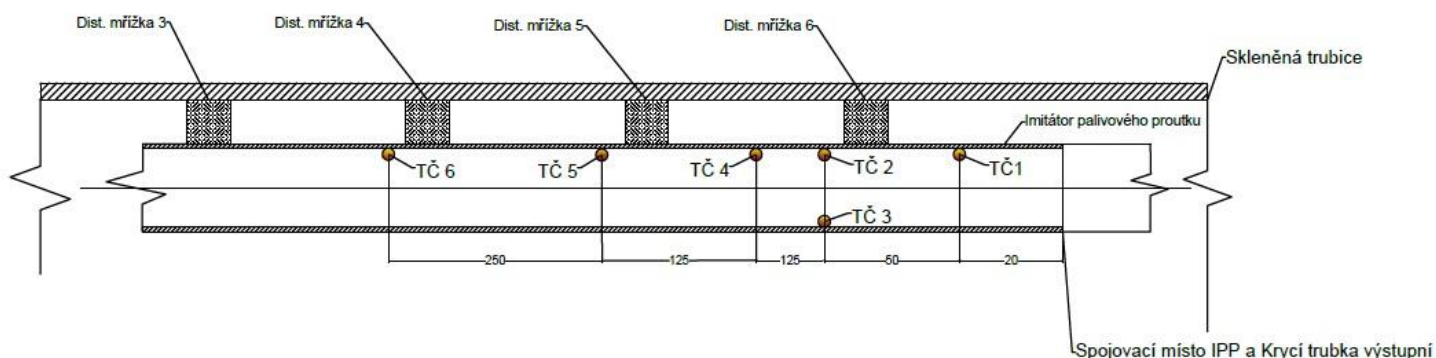
7.2.3 Tabulka porovnání IPP

Tab. 2 Porovnání konstrukce IPP 1.0 a IPP 2.0

	IPP 1.0	IPP 2.0
Topná délka [mm]	1500	1476
Počet dist. mřížek	4	6
Úhel natočení dist. mřížek	0°	60°
Vnější průměr [mm]	9,1	9
Tloušťka stěny [mm]	1,2	1
Počet termočlánků	4	6
Uchytení termočlánků	posuvné, v jedné rovině	pevně, v různých rovinách
Vzdálenost místa měření CHF od vstupu chladiva [mm]	1200	1411

7.3 Návrh umístění termočlánků

Při úvodních měřeních na zařízení osazené IPP 1.0, který disponoval posuvnými termočlánky usazenými ve vnitřní dutině, byly opakovaným měřením teplot během krize přestupu tepla na různých místech v IPP zjištěna ideální místa pro trvalé umístění termočlánků. IPP 2.0 byl osazen celkem šesti termočlánky typu K. Návrh jejich umístění je zobrazeno na obrázku níže.



Obr. 31 Návrh umístění termočlánků do IPP 2.0

Nejvýraznější změna z pohledu očekávaných naměřených hodnot CHF byla změna vzdálenosti uložení termočlánků pro zaznamenání CHF od vstupu chladiva. Na IPP1.0 proběhlo měření CHF nejčastěji v oblasti poslední distanční mřížky – cca 1200 mm od vstupu chladiva. Vznik krize přestupu tepla v tomto místě vyžadoval vysoké tepelné toky – velký výkon připojeného zdroje. Nechlazené konce imitátoru se v místě uložení značně zahřívali. U IPP 2.0 došlo k posunutí termočlánků pro zaznamenání CHF (TČ2, TČ3) do vzdálenosti 1411 mm od vstupu chladiva, což by mělo umožnit přesněji změřit CHF. Zároveň jsou přidány další termočlánky, které umožňují měřit teploty vyhřívaného povrchu IPP v místech před a za krizí přestupu tepla.

7.4 Postup měření

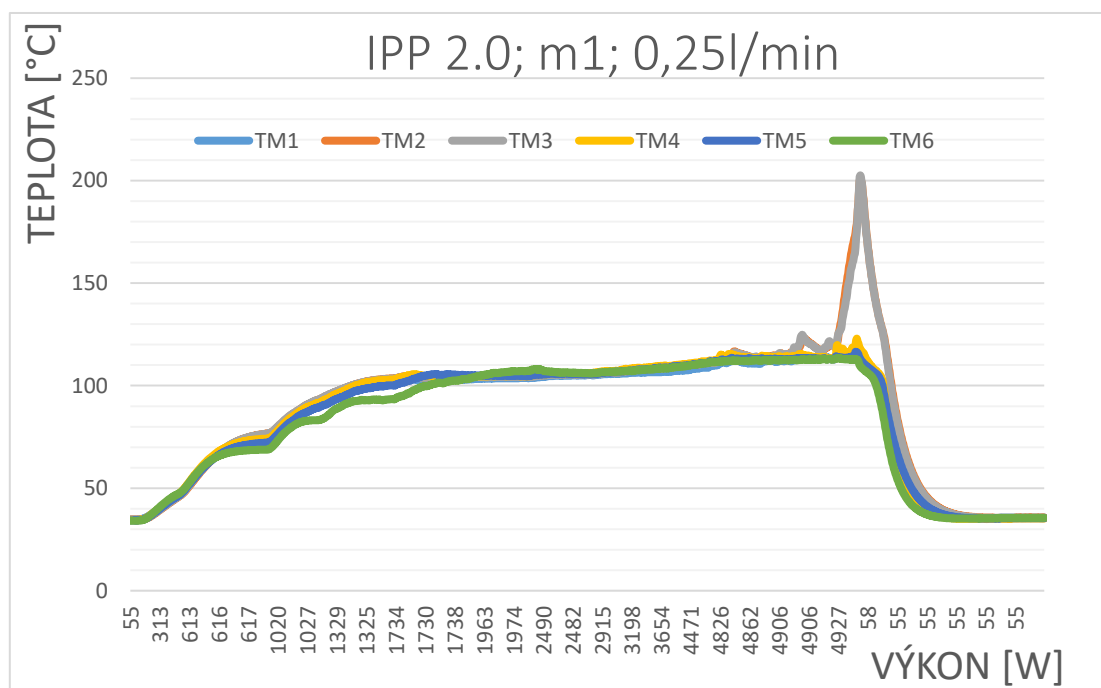
Měření lze rozdělit do tří hlavních kroků:

- spuštění, a test funkčnosti systému
- hrubé měření
- opakovaná jemná měření

Nejdříve je celý systém spuštěn a uveden do provozního stavu. Celá soustava je zaplněna vodou z nádrže a v měřicím kanále přestávají vznikat vzduchové bublinky. Je provedena kontrola funkčnosti dálkového ovládní svářečního stroje a zapnuto uživatelské rozhraní na měřicím počítači.

První provedené měření je „hrubé“ – představuje základní identifikaci chování systému, kdy je výkon zdroje zvyšován skokově (cca po 300-400 W), dokud nenastane krize přestupu tepla. S tolerancí velikosti kroku zvyšování výkonu tedy víme, kdy můžeme krizi přestupu tepla očekávat.

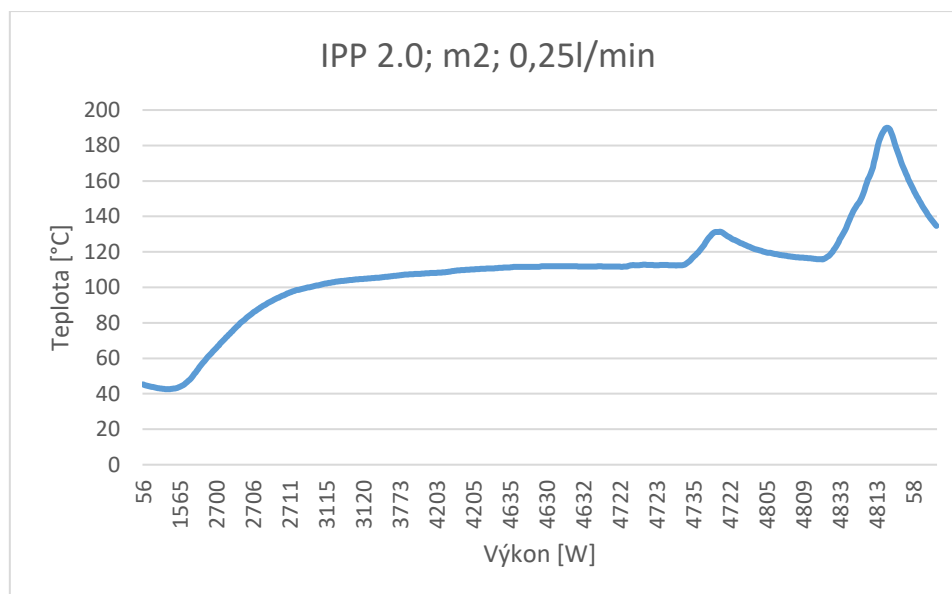
Další provedená měření jsou „jemná“ – systém se uvede do stavu pod kritickým tepelným tokem a následně se pomocí malých přírůstků výkonu zdroje (20 W) přibližujeme ke kritickému tepelnému toku. [37]



Obr. 32 Průběh 1. měření na IPP 2.0

Na obr. 32 je vidět typický průběh měření. Jsou zobrazeny teploty naměřené na všech termočláncích. Lze pozorovat, že krize přestupu tepla je zachycena termočlánci 2 a 3 (ty jsou umístěny ve vzdálenosti 1411 mm od vstupu chladiva). Na IPP 2.0 nastává krize přestupu tepla v tomto místě při výkonu zdroje kolem 4,9 kW. Při dosažení teploty 180 °C na některém z termočlánců se zdroj automaticky vypíná a dochází k ochlazení celé soustavy.

7.5 Popis průběhu měření



Obr. 33 Průběh 2. měření, teplota na TČ 2 a 3

Na obr. 33 lze vidět průběh teploty v závislosti na výkonu připojeného zdroje během druhého měření na IPP 2.0. Zobrazená teplota je průměrná hodnota změřená termočlánky 2 a 3.

Na počátku měření lze pozorovat prudký nárůst teploty, kdy je za krátký časový okamžik zvýšen výkon zdroje na cca 2700 W. Teplota měřená v místě termočlánků 2 a 3 přesahuje 100°C. V měřicí trubici lze pozorovat var chladící vody a vznikající parní bubliny.

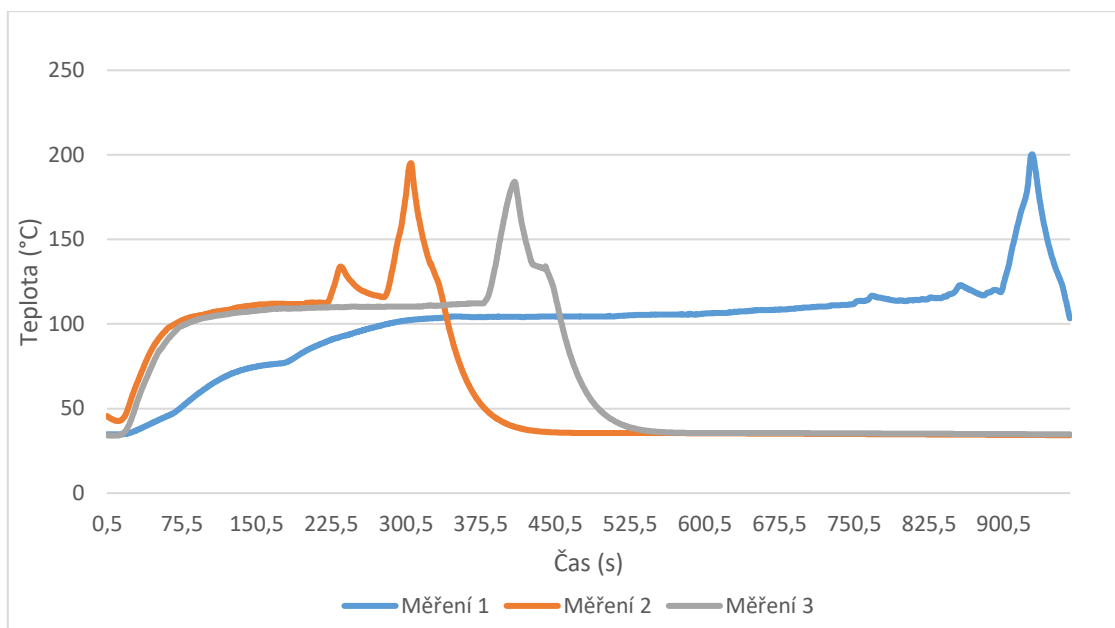
Výkon zdroje je dále zvyšován až na hodnotu cca 4700 W, kdy se povrchová teplota vyhřívaného proutku ustálí na 117°C. V trubici lze v tento moment pozorovat prudký var.

Teplota v měřeném místě začíná prudce růst, ale následně se začíná vracet k ustálené hodnotě 117°C. Tento jev lze při měření CHF pozorovat poměrně často. Částečné ochlazení je způsobeno náhlým zturbulizováním proudění náhodně vzniklou parní bublinou.

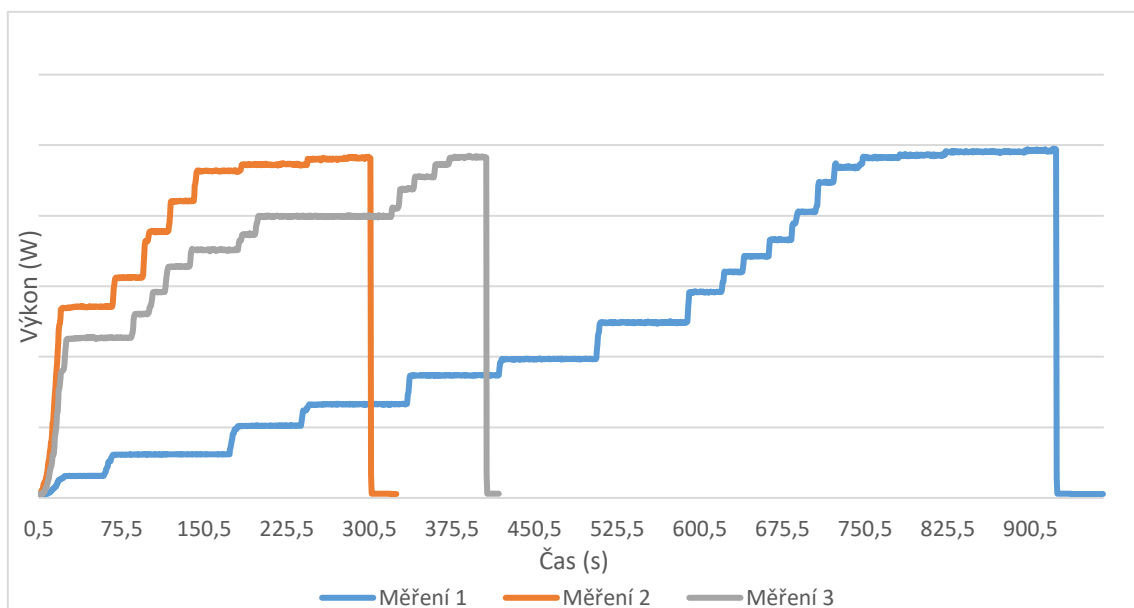
Další nárůst výkonu již má za následek vznik lokálního nárůstu teploty na IPP a dochází ke krizi přestupu tepla. Teplota exponenciálně stoupá a přesahuje hodnotu 180°C. Řídící systém v tento moment odpojuje IPP od zdroje a příslušný dodávaný výkon představuje kritický tepelný tok (CHF). Teplota stěny IPP ještě cca 3 s setrvačně roste. Poté dochází k ochlazení, teplota klesá. Průtok chladiva od čerpadla postupně ochlazuje celý IPP.

Po několika minutách jsou teploty zpátky na hodnotách jako před měřením a měření je možné opakovat.

7.6 Ukázka naměřených hodnot



Obr. 34 Ukázka průběhu teplot v čase během měření na IPP 2.0



Obr. 35 Ukázka průběhu výkonů v čase během měření na IPP 2.0

Na IPP 2.0 byly provedeny celkem tři měření pro daný průtok. Na obr. 34 a 35 jsou vidět průběhy všech provedených měření. Lze pozorovat, že při prvním měření byl výkon zvyšován po velmi malých krocích. Při druhém a třetím měření, kdy byla celá soustava plně prohřátá již od začátku, byl výkon zvyšován rychleji.

7.7 Výsledky porovnání měření CHF na IPP 1.0 a 2.0

Porovnávací měření shrnuje tabulka 3. Pro každý průtok byly pro daný průtok provedeny tři měření a zaznamenány jednotlivé CHF. Pro IPP 2.0 bylo pro porovnání navíc provedeno měření CHF při vyšším průtoku chladicí vody.

Tab. 3 Porovnání naměřených hodnot

IPP	l/min	CHF1 [kW]	CHF2 [kW]	CHF3 [kW]	Průměr [kW]
1.0	0,25	6,39	6,42	6,53	6,45
2.0	0,25	4,94	4,82	4,83	4,86
2.0	0,35	5,95	5,99	6,04	5,99

Z tabulky je zjevné, že pro vyvolání krize přestupu tepla pro měření na IPP1.0 bylo potřeba vyššího výkonu zdroje než u IPP2.0. Je tomu převážně z důvodu nového umístění termočlánků. Krize přestupu tepla u IPP1.0 byla měřena ve vzdálenosti 1200 mm od vstupu chladiva, u IPP2.0 to bylo 1411 mm. Tyto naměřené hodnoty korespondují s teorií shrnutou v kapitole 5.3.1 Predikce krize přestupu tepla – „Nejnižší hodnoty DNBR se vyskytují převážně ve vyšších částech AZ.“, kde hodnota DNBR vyjadřuje rezervu aktuálního tepelného toku vůči CHF.

Dále lze z naměřených dat pro různé průtoky u IPP2.0 vidět růst hodnoty CHF s vyšším průtokem chladicí vody. To je očekávaný výsledek, avšak pro vyšší výpovědní hodnotu a sestavení závislosti by byl potřeba větší vzorek dat, který nemohl být z časových důvodů naměřen. Další výzkum tohoto fyzikálního jevu je zamýšlen v navazujícím studiu v rámci diplomové práce.

8 Závěr

V současné době se v Evropě jaderná energetika těší velkému zájmu a mnoho států plánuje rozšiřovat řady svých stávajících jaderných zdrojů o nové bloky. Bezpečnost jaderné energie je často skloňované téma, jemuž je potřeba se neustále věnovat. Jednou ze základních podmínek bezpečného provozu jaderného reaktoru je dostatečný odvod tepla z aktivní zóny. Jednou z možných příčin narušení správného chlazení palivových článků je jev krize přestupu tepla, která nastává při dosažení kritického tepelného toku (CHF). Tato práce se na tento jev zaměřuje jak teoreticky v rešeršní části, tak experimentálně, měřením CHF na experimentálním zařízení ZČU.

V úvodní části byla popsána historie jaderné energetiky od jejího vzniku až do současnosti. Byl popsán současný stav jaderné energetiky ve světě a trendy do budoucna. Další kapitola se věnovala popisu jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem. Následně byly blíže popsány tlakovodní jaderné reaktory, jejich konstrukce a probíhající štěpná reakce. Dále se práce věnovala konceptu SMR, tedy malým modulárním reaktorům. Byl popsán současný stav jejich vývoje, možné aplikace v ČR i ve světě a jejich výhody. Na závěr této kapitoly byl zvolen a podrobně popsán konkrétní reaktor typu SMR. Poslední část rešerše se zabývala teorií nutnou pro absolvování praktické části této práce. Byl popsán odvod tepla z AZ jaderného reaktoru, jev krize přestupu tepla a jeho zaznamenání. Závěr rešeršní části tvoří kapitola o měření teploty pomocí termočlánků.

V praktické části této práce byl proveden návrh průtočného kanálu pro měření kritického tepelného toku na experimentálním zařízení ZČU. Byl zhotoven 3D model a celé zařízení a jeho funkce bylo popsáno. Následně byl proveden návrh umístění termočlánků do nového imitátoru palivového proutku, vyráběného ve spolupráci s firmou Škoda JS. Nový imitátor palivového proutku byl označen jako IPP2.0 a byl porovnán s původním IPP1.0. Provedeným měřením byla ověřena funkčnost nového IPP2.0 a schopnost termočlánků zaznamenat kritický tepelný tok v navrhnutém místě. Celý postup měření byl popsán a naměřené hodnoty jsou zobrazeny v grafech. Hodnoty CHF z měření na IPP1.0 a IPP2.0 jsou porovnány v tabulce 3. Je ukázáno, že na IPP2.0 lze CHF změřit při nižším dodávaném výkonu zdroje oproti IPP1.0.

Závěrem měření je, že IPP 2.0 představuje oproti starému imitátoru značené zlepšení. Imitátor je uprostřed průtočné trubice lépe vycentrován pomocí více vůči sobě pootočeným distančním mřížkám a umožňuje přesnější a lépe opakovatelné měření díky pevně usazeným termočlánkům. Krize přestupu tepla v měřeném místě nastává při nižším dodávaném výkonu zdroje, jelikož je měřené místo umístěno ve větší vzdálenosti od vstupu chladiva. To eliminuje přehřívání konců IPP v místě uchycení.

Seznam použité literatury

- [1] SVITÁK, Marek, 2022. *Kraj, ČEZ a ÚJV Řež zakládají Jihočeský jaderný park. Projekt má urychlit přípravu a zavádění malých modulárních reaktorů v České republice*. In: cez.cz [online]. 30.5. [cit. 11.04.2023]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/kraj-cez-a-ujv-rez-zakladaji-jihocesky-jaderny-park.-projekt-ma-urychlit-pripravu-a-zavadeni-malych-modularnich-reaktoru-v-ceske-republice-159169>.
- [2] ČEZ, *Z historie jaderné fyziky*. 4. kapitola. [online] [cit. 19.5.2023] Dostupné z: <https://www.cez.cz/eede/content/microsites/nuklearni/k41.htm>
- [3] IAEA. Power Reactor Information System. *In Operation and Suspended Operation* [online]. International Atomic Energy Agency: © 2023 Poslední změna 11.04.2023. [cit. 13.04.2023]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>
- [4] World Nuclear Association. *World Nuclear Performance Report 2021* [online]. London, 2021 [cit. 11.04. 2023]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/getmedia/264c91d4-d443-4edb-bc08-f5175c0ac6ba/performance-report-2021-cop26.pdf.aspx>
- [5] World Nuclear Association. *Nuclear Power in the European Union* [online] February 2023 [cit. 05.3.2023]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/european-union.aspx>
- [6] HEZOUČKÝ, František a Svatobor ŠTECH. *Základy teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními reaktory*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. ISBN 978-80-261-0548-0.
- [7] BEČVÁŘ, Josef. *Jaderné elektrárny*. 2. opravené vydání. Praha: SNTL, 1981.
- [8] SHULTIS Kenneth J.; FAW Richard E., *Fundamentals of nuclear science and engineering*. Second edition. 2008. ISBN 1-4200-5135-0.
- [9] Nuclear Power. *Nuclear fission*. [online]. 2023 [cit.19.05.2023]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/fission/>
- [10] Nuclear Power. *Interaction of Heavy Charged Particles with Matter* [online]. 2023 [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-heavy-charged-particles/>
- [11] EŠŠE, Michal, 2022. *Deformace palivových proutků*. Praha. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Vedoucí práce Dušan KOBYLKA.
- [12] ŠAJDLER, Miroslav, 2015. *Palivové vsázky na elektrárnách s reaktory VVER*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Karel KATOVSKÝ.
- [13] U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Science and Technology, 1994. *The History of Nuclear Energy* [online]. Washington, [cit. 11.04.2023]. Dostupné z: https://www.energy.gov/sites/prod/files/The%20History%20of%20Nuclear%20Energy_0.pdf
- [14] PUCHNAR, Jiří. *Těžba a zpracování uranu: část 1*. In: Oenergetice.cz [online]. 23.3.2017 [cit. 18.02.2023]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/tezba-zpracovani-uranu-cast-1>

- [15] IAEA. Power Reactor Information System. *AKADEMIK LOMONOSOV-1* [online]. International Atomic Energy Agency: © 2023 Poslední změna 11.04.2023. [cit. 15.04.2023]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=895>
- [16] World Nuclear Association. *World Nuclear Performance Report 2022* [online]. London, 2022 [cit. 19.05. 2023]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/getmedia/9dafaf70-20c2-4c3f-ab80-f5024883d9da/World-Nuclear-Performance-Report-2022.pdf.aspx>
- [17] Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu* [online]. 2019 [cit. 17.4.2023]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/vnitrostatni-plan-ceske-republiky-v-oblasti-energetiky-a-klimatu--252016/>
- [18] NUSCALE, *NuScale Small Modular Reactor* [online]. 2022 [cit. 15.11.2022]. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/fact-sheets/smr-fact-sheet.pdf>
- [19] REYES Jr., N. José. *NuSCALE PLANT SAFETY IN RESPONSE TO EXTREME EVENTS* [online]. Oregon, 13.10.2011 [cit. 15.11.2022]. NT-5 11-56. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/publications/plant-safety-in-response-to-extreme-events.pdf>
- [20] ÚJV Řež. *Zvýšení tepelného výkonu reaktoru VVER 1000 typ V320 JE Temelín, 1. a 2. blok, ČR.* [online][cit.19.05.2023] Dostupné z: <https://www.ujv.cz/en/reference-2/zvyseni-tepelneho-vykonu-reaktoru-vver-1000-typ-320-v-je-temelin-2-1-10626>
- [21] MAREŠ, Radim. *Kapitoly z termomechaniky*. Plzeň: Západočeská univerzita, c2008. ISBN 978-80-7043-706-3.
- [22] Sharar, Darin; Jankowski, Nicholas; Morgan, Brian. *Review of Two-phase Electronics Cooling for Army Vehicle Applications*.2010. [online] [cit. 20.05.2023] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235203410_Review_of_Two-phase_Electronics_Cooling_for_Army_Vehicle_Applications
- [23] MAREŠ, Radim. *Tabulky termodynamických vlastností vody a vodní páry: podle mezinárodní formulace pro průmyslové výpočty IAPWS-IF97*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN isbn978-80-7043-680-6.
- [24] BEDNÁŘ, Michal, 2019. *Krize varu v jaderných reaktorech*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Štěpán FORAL.
- [25] KALČÍK, Josef a SÝKORA, Karel. *Technická termomechanika*. 1. vyd. Praha: Academia, 1973.
- [26] ZUOYI, Zhang; YUJIE Dong; FU Li; ZHENGMING Zhang; HAITAO Wang; et al. *The Shandong Shidao Bay 200 MWe High-Temperature Gas-Cooled Reactor Pebble-Bed Module (HTR-PM) Demonstration Power Plant: An Engineering and Technological Innovation* [online] March, 2016 [cit. 02.04.2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809916301552?via%3Dihub>
- [27] IAEA. *Processing of nuclear power plant waste streams containing boric acid* [online]. 1996 [cit. 11.04.2023]. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/022/28022131.pdf
- [28] IAEA. *Benefits and Challenges of Small Modular Fast Reactors* [online]. Vienna, August 2021 [cit. 05.04.2023]. IAEA-TECDOC-1972. Dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1972web.pdf>

- [29] TONG L. S.; WEISMAN Joel, *Thermal analysis of pressurized water reactors*. Third edition. La Grange Park:1996. ISBN 0-89448-038-3.
- [30] NUCLEAR-POWER, *DNB – Departure from Nucleate Boiling* In: Nuclear-power.com. [online]. [cit. 13.04.2023] Dostupné z: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/boiling-and-condensation/dnb-departure-from-nucleate-boiling/>
- [31] DHILLON, N.; BUONGIORNO, J.; VARANASI, K. *Critical heat flux maxima during boiling crisis on textured surfaces*. [online] 08.09.2015 [cit. 05.01.2023] *Nat Commun* **6**, 8247. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/ncomms9247>
- [32] GUENTHER. 2. *Termočlánky podle DIN EN 60584*. In: Guenther.eu [online] 2019 [cit. 22.3.2023]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu/77cf12c1-d174-207b-1d81-57864b5d063b?Edition=cz>
- [33] HÁJEK Ondřej. 2017. *Přesný termočlánkový teploměr bakalářská práce*. Jihlava. Bakalářská práce. Vysoká škola polytechnická Jihlava. Katedra technických studií. Vedoucí práce: Ivan KREJČÍ.
- [34] KADA, Jiří. 2010. *Návrh obvodu pro simulaci termočlánků řízenou PC*. Ostrava. Bakalářská práce. Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Zdeněk SLANINA.
- [35] TEMPSSENS. *K Type Thermocouple*. In: Tempsens.com [online] 2021 [cit. 10.3.2023] Dostupné z: <https://tempsens.com/blog/k-type-thermocouple>
- [36] BAYSAL, Esref. *Investigation of the temperature distribution in fuel rod in a fusion-fission reactor* [online] Batman University, 03.11.2011 [cit. 13.04.2023]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/287689659_Investigation_of_the_temperature_distribution_in_fuel_rod_in_a_fusion-fission_reactor
- [37] ERET Petr, 2022. *Měření kritického tepelného toku na modelech beztlakového palivového proutku*. Plzeň. Technická zpráva. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojí. KKE-13-22.
- [38] HROZEK Dian. *Jaderná elektrárna Temelín – technický skvost z jižních Čech*. In: oenergetice.cz [online] 15.02.2016 [cit. 20.05.2023] Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/jaderna-elektrarna-temelin-technicky-skvost-z-jiznich-zech>
- [39] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *VVER – schéma* [online]. c2023 [cit. 20. 05. 2023]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=VVER&oldid=22763123>
- [40] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Fuel Pellet* [online.]c2023 [cit. 20.05.2023]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fuel_Pellet.jpg
- [41] BBC News. *Iran given Pakistan centrifuges* [online] 2015 [cit. 20.05.2023]. Dostupné z: http://news.bbc.co.uk/2/hi/south_asia/4336559.stm
- [42] Byjus. *What is nuclear fission* . [online] [cit. 20.05.2023]. Dostupné z: <https://cdn1.byjus.com/wp-content/uploads/2022/11/Nuclear-Fission-Updated.png>
- [43] Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ. *Jaderné palivo – váleček, proutek, kazeta*. [online] [cit. 20.05.2023] Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jadernoelektrarny-pro-deti/co-vsechno-v-jadernoelektrarne-najdeme/reaktor/jak-to-funguje>

- [44] SEDLÁK, Martin. 2016. *Citlivostní analýza vlivu výrobních nepřesností na reaktivitu jaderného paliva*. Brno. Bakalářská práce. VUT v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Filip Novotný.
- [45] OZOM, Bořek, 2020. *Imitátory palivových proutků s vestavbami pro numerické a experimentální modelování proudění a přestupu tepla*. Plzeň. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Katedra energetických strojů a zařízení. Vedoucí práce Richard MATAS.
- [46] MOLEK, Tomáš. *Finská JE Olkiluoto 3 o krok blíže spuštění*. In: oenergetice.cz [online] 31.05.2018 [cit. 20.05.2023] Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/finska-olkiluoto-3-krok-blize-spusteni-horke-funkcni-testy-uspesne-ukonceny>
- [47] Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ. *Jaderná elektrárna Temelín*. [online] [cit. 20.05.2023] Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderne-elektrarny-cez/jaderna-elektrarna-temelin>
- [48] Tábořský Deník.cz. *Zajímavosti z Temelína, který slaví dvacetiny: Svatby i med*. [online] [cit. 22.05.2023] Dostupné z: https://taborsky.denik.cz/zpravy_region/zajimavosti-z-temelina-ktery-slavi-dvacetiny-svatby-i-med-20201009.html
- [49] KŘÍŽ, Ladislav. *ČEZ po předběžném posouzení vytipoval další dvě preferované lokality pro malé modulární reaktory, vedle pilotního Temelína by mohly vzniknout v Dětmarovicích a Tušimicích*. In: Cez.cz [online]. 27.02.2023 [cit. 05.03.2023]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/cez-po-predbeznem-posouzeni-vytipoval-dalsi-dve-preferovane-lokality-pro-male-modularni-reaktory-vedle-pilotniho-temelina-by-mohly-vzniknout-v-detmarovicich-a-t-173388>
- [50] KLAVÍK Petr, 2022. *Časoprostorová analýza nestacionárních polí*. Plzeň. Teze disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní.

Přílohy

1. Ukázka výstupu z měření ve formě textového souboru s popisem veličin z počátku měření č. 1

Atmosferický tlak (kPa): 101,600														
T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_1	T_nadrz	Flow_meter	Dif_tlak	IN	OUT	Napětí_svar	Proud_svar	Rej_tlak	Vykon
Deg C	Deg C	Deg C	Deg C	Deg C	Deg C	Deg C	l/min	kPa			V	A	kPa	W
34,7281	34,6025	34,4507	34,3243	34,1299	34,7693	33,1762	0,248064	0,230313			1,59863	34,4388	16,2553	55,055
34,7168	34,6109	34,4554	34,3024	34,1463	34,759	33,1837	0,247852	0,2334			1,6011	34,515	16,3129	55,262
34,7218	34,6127	34,4517	34,3274	34,1295	34,7681	33,1794	0,251215	0,261092			1,59597	34,5099	16,2828	55,077
34,7208	34,6052	34,4365	34,3258	34,1378	34,7659	33,1841	0,260888	0,23094			1,59988	34,4933	16,2877	55,185
34,729	34,61	34,4506	34,3201	34,152	34,76	33,1682	0,263698	0,233555			1,59905	34,5314	16,3622	55,217
34,7297	34,5943	34,4569	34,3346	34,1638	34,761	33,1787	0,262071	0,260046			1,59684	34,4914	16,3034	55,077
34,7321	34,6158	34,4562	34,3276	34,1563	34,7774	33,1802	0,265988	0,232701			1,59794	34,4373	16,3562	55,029
34,7181	34,6124	34,4607	34,3338	34,1439	34,7781	33,1849	0,263946	0,234072			1,60039	34,4734	16,393	55,171
34,7136	34,5959	34,4556	34,3367	34,154	34,7827	33,1887	0,261749	0,260385			1,59401	34,4244	16,1559	54,873
34,7367	34,63	34,4549	34,3364	34,1614	34,7788	33,1775	0,258914	0,232444			1,59806	34,4916	16,2828	55,120
34,7516	34,6334	34,4643	34,3366	34,1786	34,7816	33,1825	0,274629	0,233572			1,59893	34,5096	16,3069	55,178
34,7515	34,609	34,4787	34,3429	34,1592	34,783	33,1758	0,253196	0,259564			1,59675	34,4751	16,1815	55,048
34,7347	34,6155	34,4653	34,3518	34,1593	34,7901	33,1867	0,260772	0,23259			1,59603	34,429	16,276	54,950
34,7475	34,625	34,4699	34,3315	34,1569	34,7782	33,1848	0,264082	0,23394			1,5989	34,4391	16,249	55,065
34,7383	34,6244	34,4753	34,3438	34,1688	34,7811	33,1798	0,248033	0,260491			1,59511	34,4418	16,1704	54,939
34,7263	34,6176	34,4755	34,3508	34,1621	34,7873	33,2019	0,248001	0,232475			1,59794	34,4862	16,3092	55,107
34,7401	34,6175	34,4727	34,347	34,1661	34,7993	33,1712	0,264015	0,23258			1,63504	35,2099	16,2004	57,570
34,7396	34,6369	34,4878	34,3441	34,1632	34,7913	33,1837	0,248065	0,260767			1,7224	37,099	16,2652	63,899
34,7569	34,6358	34,4872	34,3488	34,1798	34,8083	33,1903	0,247804	0,233273			1,771	38,2421	16,3013	67,727
34,7515	34,6238	34,4789	34,3427	34,1875	34,7922	33,1745	0,248247	0,233613			1,80234	38,7709	16,2668	69,879
34,7622	34,6238	34,4872	34,3481	34,189	34,7993	33,1879	0,248141	0,260999			1,85706	39,8619	16,2613	74,026
34,7507	34,6218	34,5005	34,3839	34,1843	34,8096	33,1784	0,247917	0,233591			1,89466	40,7538	16,2988	77,214
34,7432	34,6344	34,5191	34,3853	34,1999	34,8321	33,1833	0,247958	0,232983			1,97242	42,3902	16,2264	83,611
34,7467	34,6524	34,5253	34,3913	34,1995	34,8408	33,1988	0,24802	0,260515			2,08507	44,8223	16,1882	93,458
34,7537	34,6519	34,5253	34,3996	34,2257	34,8438	33,1847	0,248014	0,232853			2,21743	47,7855	16,2181	105,961
34,7755	34,6588	34,5537	34,4165	34,2501	34,8607	33,177	0,261608	0,233014			2,28867	49,3357	16,113	112,913
34,7813	34,6672	34,5701	34,4499	34,2818	34,8762	33,1868	0,258805	0,261441			2,2963	49,4486	16,2289	113,549
34,7848	34,6879	34,5924	34,4793	34,3005	34,9062	33,189	0,255642	0,233346			2,43624	52,1745	16,2388	127,109
34,8074	34,712	34,6259	34,4945	34,3439	34,9423	33,1841	0,247858	0,232298			2,58765	55,6625	16,253	144,035
34,8122	34,745	34,6639	34,5293	34,374	34,9784	33,1869	0,251395	0,25985			2,57859	55,4503	16,2754	142,983
34,8341	34,76	34,6879	34,5615	34,4203	35,0162	33,2051	0,266333	0,233696			2,68963	57,7501	16,2672	155,326
34,8475	34,7781	34,7392	34,5994	34,4606	35,0541	33,1865	0,263782	0,23225			2,74258	58,9732	16,2808	161,739
34,8701	34,8027	34,7914	34,6358	34,4972	35,1125	33,1952	0,26176	0,26128			2,73951	58,9485	16,2679	161,490
34,9163	34,8524	34,8398	34,7036	34,5582	35,1552	33,1873	0,250363	0,234775			3,03453	64,8773	16,2679	196,872
34,9356	34,8863	34,8775	34,7569	34,6297	35,2002	33,1952	0,248261	0,232762			3,12929	67,2774	16,2815	210,531
34,9738	34,9416	34,9635	34,8122	34,7015	35,2688	33,1925	0,256316	0,259992			3,13341	67,4137	16,299	211,234
34,996	34,9919	35,032	34,8869	34,7833	35,342	33,1877	0,260865	0,234265			3,38098	72,3209	16,3306	244,515
35,0641	35,0467	35,1174	34,9685	34,8879	35,4202	33,1864	0,264144	0,2323			3,4368	73,9131	16,3672	254,025
35,1075	35,0985	35,2181	35,0488	34,979	35,5073	33,1851	0,267103	0,259274			3,42201	73,4736	16,2381	251,428
35,1607	35,1636	35,3064	35,1418	35,0748	35,6123	33,1941	0,250385	0,23341			3,45067	74,0774	16,3338	255,616
35,2111	35,2485	35,4262	35,2429	35,2194	35,6996	33,1857	0,264314	0,230241			3,55053	76,1489	16,356	270,369
35,2725	35,3072	35,5318	35,3244	35,3186	35,7905	33,1832	0,261982	0,259286			3,54796	76,0847	16,3053	269,946
35,3363	35,3858	35,6432	35,4507	35,4512	35,9103	33,1988	0,255754	0,233081			3,54194	75,9246	16,3133	268,920
35,4248	35,489	35,7607	35,5204	35,5664	35,9927	33,1938	0,247978	0,229317			3,6194	77,6107	16,2976	280,904
35,4877	35,58	35,885	35,6432	35,6995	36,1213	33,1783	0,248286	0,2584			3,64186	78,0232	16,1453	284,149
35,5828	35,6769	36,0272	35,7678	35,8273	36,2464	33,1826	0,247881	0,231928			3,62236	77,6083	16,269	281,125
35,6685	35,7647	36,177	35,868	35,9747	36,3563	33,1982	0,248183	0,228611			3,69723	79,0451	16,2196	292,248

2. Ukázka výstupu z měření ve formě textového souboru s popisem veličin při dosažení CHF z měření č. 1

Atmosferický tlak (kPa): 101,600													
T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_1	T_nadrz	Flow_meter	Dif_tlak_IN_OUT	Napětí_svar	Proud_svar	Rel_tlak_IN	Wykon	
Deg C	Deg C	Deg C	Deg C	Deg C	Deg C	Deg C	l/min	kPa	V	A	kPa	W	
153,23	146,975	116,265	113,704	112,982	115,152	35,311	0,24598	-0,426714	15,675	313,811	7,19258	4918,980	
154,432	148,491	116,294	113,788	113,024	115,053	35,3109	0,260045	-0,42643	15,6571	313,94	7,46069	4915,410	
155,927	149,589	116,195	113,792	113,003	114,9	35,3107	0,278156	-0,427125	15,6662	313,921	7,46283	4917,950	
157,236	150,263	116,088	113,71	112,893	114,824	35,3102	0,277339	-0,426929	15,693	313,894	7,12711	4925,930	
158,356	150,966	116,271	113,685	112,746	114,852	35,31	0,289028	-0,427605	15,7258	314,126	6,88565	4939,890	
159,446	152,176	116,686	113,725	112,655	115,034	35,3173	0,254938	-0,426297	15,6787	313,69	6,81746	4918,250	
160,422	153,64	116,735	113,863	112,697	115,047	35,302	0,234374	-0,427855	15,6727	313,498	7,16741	4913,360	
161,745	155,32	116,583	113,798	112,831	114,911	35,3034	0,248292	-0,427204	15,6541	313,914	7,3728	4914,030	
162,89	156,148	116,416	113,847	112,733	114,827	35,3098	0,261307	-0,427971	15,6851	313,653	7,28556	4919,680	
164,189	156,919	116,454	114,066	112,684	114,856	35,3133	0,266227	-0,427236	15,645	313,587	7,11162	4906,080	
165,346	157,744	116,909	113,948	112,753	114,879	35,3112	0,283829	-0,426973	15,6618	313,404	6,83271	4908,470	
166,313	158,541	117,743	113,945	112,671	114,981	35,3093	0,259103	-0,427219	15,6865	313,76	6,73612	4921,790	
167,325	159,404	118,649	114,351	112,638	115,114	35,329	0,24519	-0,428275	15,6867	313,8	6,62163	4922,480	
168,294	160,11	118,509	114,302	112,753	115,098	35,3376	0,276579	-0,42797	15,65	313,919	7,42555	4912,840	
169,288	160,931	118,065	114,14	112,682	115,065	35,3206	0,251534	-0,427858	15,6631	313,414	7,47512	4909,030	
170,041	161,778	117,97	114,078	112,62	114,975	35,3433	0,221536	-0,426936	15,6586	313,73	6,75921	4912,570	
170,899	162,76	117,723	113,987	112,504	114,879	35,3536	0,260699	-0,427314	15,6665	313,366	7,03273	4909,350	
171,759	163,486	117,412	114,066	112,761	114,934	35,3429	0,264163	-0,426438	15,7311	313,625	7,04064	4933,660	
172,574	164,374	117,586	114,661	112,921	115,242	35,3542	0,248504	-0,428495	15,757	313,842	6,31512	4945,220	
173,532	165,864	118,517	115,723	112,811	115,692	35,3537	0,262292	-0,42752	15,7647	313,727	6,57898	4945,810	
174,472	167,566	119,727	116,584	112,758	115,978	35,359	0,234556	-0,428396	15,7609	314,111	6,81533	4950,680	
175,823	170,052	121,102	116,452	112,761	116,077	35,3503	0,2503	-0,427669	15,7569	313,549	6,97142	4940,580	
177,113	172,366	122,197	116,391	112,797	116,115	35,3677	0,2628	-0,427146	15,7636	313,854	6,70013	4947,460	
178,815	175,254	122,902	116,366	112,718	116,235	35,3626	0,246961	-0,427367	15,7569	313,735	6,71185	4943,490	
180,777	178,248	122,457	116,221	112,741	116,239	35,3491	0,276594	-0,426497	15,7481	313,498	7,07551	4937,000	
182,985	181,394	121,897	116,099	112,799	116,284	35,3716	0,28759	-0,427154	3,39774	78,7108	7,16909	267,439	
185,898	185,296	121,248	115,807	112,501	116,391	35,3559	0,3103	-0,426271	1,72637	34,7538	6,92168	59,998	
189,074	188,997	120,608	115,32	112,012	116,432	35,3507	0,289054	-0,426942	1,72565	34,7866	6,59401	60,030	
192,495	193,095	119,894	114,694	111,351	116,233	35,3641	0,283399	-0,426964	1,72103	34,7974	5,68575	59,887	
195,125	196,397	119,342	114,221	110,786	115,769	35,3649	0,27502	-0,426654	1,71471	34,7239	5,55235	59,541	
197,933	199,696	118,754	113,797	110,261	115,198	35,3646	0,27471	-0,426266	1,71444	34,7022	5,89085	59,495	
199,836	201,938	118,273	113,455	109,886	114,774	35,3768	0,26251	-0,427433	1,71149	34,6805	6,03337	59,355	
200,271	202,634	117,882	113,123	109,568	114,381	35,3728	0,248541	-0,428199	1,71217	34,7271	6,25303	59,459	
200,353	202,274	117,52	112,782	109,281	113,95	35,3697	0,235788	-0,426991	1,70958	34,7193	6,9213	59,355	
200,137	201,563	117,251	112,497	109,048	113,585	35,3809	0,221908	-0,42715	1,70699	34,724	7,39986	59,273	
199,435	200,323	116,935	112,158	108,809	113,146	35,3979	0,221811	-0,427326	1,70597	34,6402	8,17016	59,095	
198,479	198,888	116,712	111,898	108,646	112,827	35,3975	0,221961	-0,426618	1,70385	34,6604	8,68207	59,056	
196,94	196,856	116,499	111,646	108,441	112,445	35,3946	0,221786	-0,426564	1,69956	34,6568	9,57584	58,901	
195,167	194,712	116,302	111,417	108,26	112,098	35,3975	0,221424	-0,427536	1,7004	34,6986	9,66221	59,001	
193,245	192,541	116,128	111,198	108,092	111,771	35,3964	0,205584	-0,427788	1,69673	34,6708	10,1414	58,827	
191,007	190,132	115,946	111,002	107,905	111,423	35,3878	0,222298	-0,424302	1,69199	34,6248	10,5606	58,585	
189,059	188,087	115,769	110,831	107,736	111,155	35,3936	0,221926	-0,425947	1,68871	34,628	11,2346	58,477	
186,618	185,587	115,275	110,604	107,574	110,793	35,3688	0,221552	-0,427249	1,68623	34,6056	11,5158	58,353	
184,608	183,542	114,759	110,441	107,427	110,513	35,3703	0,214443	-0,429386	1,6919	34,682	12,0063	58,678	
182,38	181,338	114,277	110,263	107,247	110,211	35,3941	0,195094	-0,427328	1,69139	34,6675	12,6337	58,636	
180,27	179,258	113,846	110,096	107,092	109,909	35,37	0,19499	-0,427856	1,68659	34,6488	13,569	58,438	
178,283	177,311	113,462	109,933	106,957	109,651	35,3736	0,212836	-0,428028	1,68409	34,6117	14,4503	58,289	