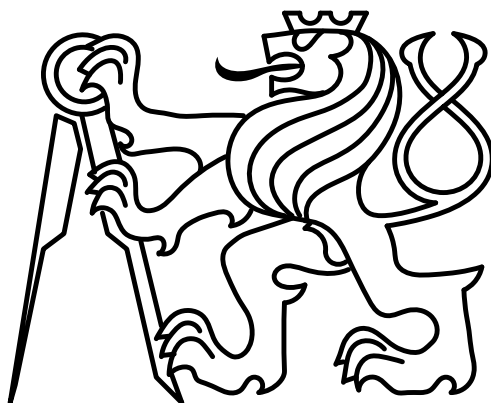


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav energetiky

Jaderná energetická zařízení



**Návrh experimentu pro stanovení
zbytkového tepelného výkonu pro palivo
IRT-4M na reaktoru LVR-15**

**Experimental design for assessment of
residual heat generation of IRT-4M fuel
assemblies on LVR-15 reactor**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. Tomáš Krupička

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.

Rok: 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krupička** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **409081**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Jaderná energetická zařízení**
Studijní obor: **Jaderná energetická zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh experimentu pro stanovení zbytkového tepelného výkonu pro palivo IRT-4M na reaktoru LVR-15

Název diplomové práce anglicky:

Design of Experiment for Assessment of Decay Heat of IRT-4M Fuel Assemblies of LVR-15 Reactor

Pokyny pro vypracování:

Cílem diplomové práce je navrhnout experiment, kterým by se dal změřit zbytkový tepelný výkon v mokřém zásobníku na reaktoru LVR-15.

Práce bude obsahovat:

- 1) Rešerši na téma měření zbytkového tepelného výkonu a příslušné bezpečnostní předpisy reaktoru LVR-15
- 2) Návrh technického řešení kalorimetrické metody pro měření zbytkového tepelného výkonu paliva IRT-4M
- 3) Tepelný model s ohledem na bezpečnostní předpisy, přesnost měření a ekonomickou analýzu navrženého řešení
- 4) Zhodnocení výsledků

Seznam doporučené literatury:

SARGE, Stefan M., Günther W. H. HÖHNE a Wolfgang HEMMINGER. Calorimetry: Fundamentals, Instrumentation and Applications [online]. Weinheim: John Wiley & Sons, Incorporated, 2014. ISBN 3527327614; 9783527327614.
TODREAS, Neil E. Thermal analysis of pressurized water reactors: L.S. tong and J. weisman, 3rd edn. Elsevier Ltd, 1996. 749 s. ISBN 0-89448-038-3.
HEŘMANSKÝ, Bedřich. Termomechanika jaderných reaktorů. Vyd. 1. Praha: Academia, 1986. 436 s.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

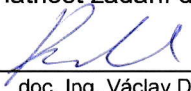
doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D., ústav energetiky FS

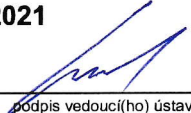
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

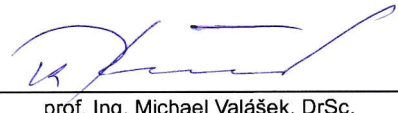
Datum zadání diplomové práce: **21.10.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **23.12.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2021**


doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

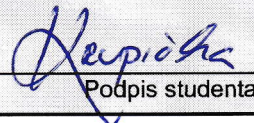

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

26. 11. 2020

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, že jsem řádně citoval všechny použité prameny a literaturu, a že práce nebyla využita v rámci jiného vysokoškolského studia či k získání jiného nebo stejného titulu.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této práce, je legální.

V Praze dne 22. prosince 2020

.....

Bc. Tomáš Krupička

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Václavu Dostálovi, Ph.D. za jeho trpělivost při odevzdávání této diplomové práce a že se nade mnou nezlomil hůl. Velké díky patří Ing. Pavlovi Dostálovi, který mě navedl správným směrem, když bylo potřeba. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem pracovníkům společnosti CVŘ, kteří mi věnovali chvíli svého času, vyslechli mě a poskytli mi cenné rady, bez kterých by tato práce nevznikla.

Název práce: Návrh experimentu pro stanovení zbytkového tepelného výkonu pro palivo IRT-4M na reaktoru LVR-15

Autor: Bc. Tomáš Krupička

Ústav/Obor: Ústav energetiky/Jaderná energetická zařízení

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.
Ústav energetiky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

Bibliografické údaje Počet stran: 99
Počet obrázků: 16
Počet tabulek: 16
Počet příloh: 16

Abstrakt:

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem experimentu pro stanovení zbytkového tepelného výkonu pro palivo IRT-4M na reaktoru LVR-15. V práci jsou podrobně popsány zdroje zbytkového tepelného výkonu z ozářených palivových souborů a popis kalorimetrických metod. Dále je popsáno pracoviště reaktoru LVR-15, na kterém lze provést experiment a popis limitů a podmínek, které představují omezení pro návrh experimentu. Poslední část je věnována návrhu experimentální kalorimetrické metody, konstrukčnímu řešení kalorimetru, použitým materiálům, tepelným výpočtům, přístrojovému vybavení, stanovení nejistot a ekonomickému hodnocení navrženého kalorimetru.

Klíčová slova: Zbytkový tepelný výkon, kalorimetrie, LVR-15, IRT-4M, adiabatický kalorimetr, izoperibolický kalorimetr

Title: Design of Experiment for Assessment of Decay Heat of IRT-4M Fuel Assemblies of LVR-15 Reactor

Autor: Bc. Tomáš Krupička

Department: Department of Energy Engineering

Study program: Nuclear Power Engineering Equipment

Type: Master's thesis

Supervisor: doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.
Department of Energy Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Czech technical university in Prague

Bibliographic data
Number of pages: 99
Number of images: 16
Number of tables: 16
Number of attachments: 16

Abstract:

The present Master's thesis deals the design of experiment for assesment of decay heat of IRT-4M fuel assemblies of LVR-15 reactor. The thesis contains a detailed description sources of decay heat from irradiate fuel assemblies and description of the calorimetric methods. Futhermore, LVR-15 reactor workplace is described, on which the experiment can be performed and description of the operational limits and conditions that represent limitations for the experiment design. The final section is devoted to the design of the experimental calorimetric method, the design of the calorimeter, the material used, thermal calculations, instrumentation, determination of uncertainties and economic evaluation of the proposed calorimeter.

Key words: Decay heat, calorimetry, LVR-15, IRT-4M, adiabatic calorimeter, isoperibol calorimeter

Obsah

Seznam veličin a jednotek	3
Seznam zkratk	6
Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	9
Seznam příloh	11
Úvod	12
1 Měření zbytkového tepelného výkonu	14
1.1 Zbytkový tepelný výkon	14
1.1.1 Dohasínající štěpná reakce	15
1.1.2 Radioaktivní rozpad štěpných produktů	16
1.1.3 Radioaktivní přeměny izotopů vzniklých radiačním záchytem neutronů	18
1.1.4 Radioaktivní rozpad aktivovaných materiálů	19
1.2 Kalorimetrie	20
1.2.1 Izotermické kalorimetry	20
1.2.2 Adiabatické kalorimetry	23
1.2.3 Kalorimetry založené na tepelné výměně	26
2 Bezpečnostní limity a předpisy na LVR-15	32
2.1 Popis reaktoru LVR-15	32
2.1.1 Aktivní zóna	33
2.1.2 Palivo IRT-4M	34
2.2 Skladování ozářeného paliva	37
2.2.1 Mokrý zásobník	37
2.2.2 Odložiště vyhořelého paliva	37
2.2.3 Sklad vysoce aktivních odpadů	38
2.3 Bezpečnostní limity pro zacházení s palivem	39
2.3.1 Limitní provozní podmínky mokrého zásobníku	39
2.3.2 Limitní provozní podmínky odložiště VP	39
2.3.3 Limitní provozní podmínky paliva IRT-4M	40
2.4 Zbytkový tepelný výkon reaktoru LVR-15	41
3 Zhodnocení přijatelných variant	44
3.1 Výběr lokality experimentu	44

3.2	Výběr použitelných konstrukčních řešení kalorimetru	45
3.2.1	Izotermické kalorimetry	45
3.2.2	Adiabatické kalorimetry	45
4	Návrh konstrukčního řešení kalorimetru pro reaktor LVR-15	49
4.1	Popis kalorimetrické metody	49
4.2	Popis technického řešení kalorimetru	49
4.3	Použité materiály a jejich kompatibilita s prostředím bazénu pro skladování ozářeného paliva	51
4.4	Kalibrační měření	52
4.4.1	Postup kalibračního měření	52
4.4.2	Stanovení kalibračních křivek	53
4.5	Metoda stanovení zbytkového tepelného výkonu	53
4.5.1	Postup měření	53
4.5.2	Stanovení tepelného výkonu	54
4.6	Posouzení fyzikálních podmínek	54
4.6.1	Energetická bilance	54
4.6.2	Teplotní profil a charakteristické teploty	57
4.7	Přístrojové vybavení	64
4.8	Stanovení nejistot	65
4.9	Ekonomické hodnocení	68
5	Zhodnocení navrženého řešení	70
	Závěr	71
	Seznam literatury	77
	Příloha A Osmi trubkový palivový soubor IRT-4M	78
	Příloha B Šesti trubkový palivový soubor IRT-4M	79
	Příloha C Mokrý zásobník	80
	Příloha D Odložiště vyhořelého paliva	81
	Příloha E Výkresy kalorimetru	82
	Příloha F Výpočet energetické bilance a tepelného schématu	91

Seznam veličin a jednotek

β	celkový podíl zpožděných neutronů	–
β	rychlost ohřevu	K/s
β_i	podíl i -té skupiny zpožděných neutronů	–
χ_p	konverzní faktor	–
Δm	rozdíl hmotností	kg
ΔT	rozdíl teplot	$^{\circ}C$
δx	vzdálenost mezi jednotlivými uzlovými body	m
δ	tloušťka stěny	m
Δt	velikost časového kroku	s
\dot{Q}	tepelný tok	W
γ	součinitel teplotní roztažnosti	$1/K$
Λ	střední doba vzniku okamžitých neutronů	s^{-1}
λ	rozpadová konstanta	–
λ	součinitel tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_i	rozpadová konstanta i -té skupiny zpožděných neutronů	s^{-1}
μ	rychlost produkce nuklidu	s^{-1}
ν	kinematická viskozita	m^2/s
ω	úhlová frekvence	$rad \cdot s^{-1}$
$\bar{\alpha}$	střední hodnota součinitele přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
\overline{Nu}	střední hodnota Nusseltova číslo	–
\bar{T}	střední teplota	$^{\circ}C$
ϕ	neutronový tok	$m^{-2} \cdot s^{-1}$
Π	Peltiérův koeficient	J/A
ρ	hustota	kg/m^3

ρ_k	kladná skoková reaktivita	—
σ_a	mikroskopický účinný průřez pro absorpci	m^2
σ_f	mikroskopický účinný průřez pro štěpení	m^2
σ_i	směrodatná odchylka	—
τ	střední doba života zpožděných neutronů	s^{-1}
C	tepelná kapacita měřícího systému	J/K
c	měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
C_{cal}	zdánlivá tepelná kapacita kalorimetru	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_{liq}	měrná tepelná kapacita kapaliny	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
D	průměr válce	m
F	reakční rychlost	$m^{-3} \cdot s^{-1}$
f	váhový faktor	—
g	gravitační zrychlení	m/s^2
$g(t)$	křivka základní linie	—
Gr	Grasshofovo číslo	—
I	elektrický proud	A
K	kalibrační faktor	—
l	délka	m
m_s	hmotnost vzorku	kg
m_{liq}	hmotnost kapaliny	kg
N_i	počet jader	—
P	výkon	J/s
$P(t)$	zbytkový tepelný výkon v čase t	W
P_0	tepelný výkon při odstavení reaktoru	W
P_S	tepelný výkon dodaný do vzorku	J/s
$P_\beta(t)$	Tepelný výkon β rozpadu	W
$P_\gamma(t)$	Tepelný výkon γ rozpadu	W
p_{lok}	lokální tlak	bar
Pr	Prandtlovo číslo	—

Q	celkové teplo	J
q''	plošná hustota tepelného toku	W/m^2
q'''	objemový tepelný tok	W/m^3
q_{trs}	skupenské teplo	J/kg
R	elektrický odpor	Ω
R_{th}	tepelný odpor	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
Ra	Rayleghovo číslo	—
s_i^2	reziduální rozptyl	—
T	teplota	$^{\circ}C$
t	čas	s
T_F	teplota okolí, resp. pece	$^{\circ}C$
T_M	teplota měřícího systému	$^{\circ}C$
T_{∞}	Teplota okolí	$^{\circ}C$
t_{ash}	doba po odstavení reaktoru	W
t_{bsh}	doba provozu reaktoru před jeho odstavením	W
t_{fin}	čas ukončení	s
t_{ini}	iniciační čas	s
T_{max}	maximální teplota	$^{\circ}C$
T_{ps}	teplota povrchu palivového článku	$^{\circ}C$
T_{pv}	teplota povrchového varu	$^{\circ}C$
T_S	teplota sytosti	$^{\circ}C$
T_{vst}	vstupní teplota chladiva	$^{\circ}C$
U	elektrické napětí	V
x	charakteristický rozměr	—

Seznam zkratek

ANS	American Nuclear Society
ANSI	American National Standards Institute
AZ	Aktivní Zóna
DOE	United States Department of Energy
DSC	Differential Scanning Calorimetr
EO	Elektrický Ohřívač
HCČ	Hlavní Cirkulační Čerpadlo
LaP	Limity a podmínky
LF	Lower Flange
LVR-15	lehkovodní reaktor
MW	megawatt
MW_t	megawatt tepelný
MZ	Mokrý Zásobník
ORIGEN	Oak Ridge Isotope Generation
PS	Palivový Soubor
RAO	Radioaktivní Odpad
RELAP	Reactor Excursion and Leak Analysis Program
RERTR	Reduced Enrichment for Reasearch and Test Reactors
SCALE	Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation
UF	Upper Flange
VAO	Vysoce Aktivní Odpady
VP	Vyhořelé palivo
VVR-S	vodou chlazený a vodou moderovaný reaktor
ČSAV	Československá Akademie Věd

Seznam obrázků

1.1	Jednotlivé skupiny zbytkového tepelného výkonu po odstavení reaktoru. (1) Celkový tepelný výkon; (2) Výkon dohasínající štěpné reakce; (3) Radioaktivní rozpad štěpných produktů; (4) radioaktivní rozpad izotopů vzniklých radiacním záchytem neutronů. [3]	15
1.2	(a) Ledový kalorimetr; (b) Kalorimetr využívající přechod kapalina-plyn. [14]	21
1.3	Schéma titračního kalorimetru. [16]	22
1.4	Časová závislost při tepelné výměně u exotermní reakce, kde E je energie kalorimetrického systému (bez vzorku) a T je celková teplota systému. [14]	23
1.5	Teplotní závislost neideálního adiabatického kalorimetru po krátkém exotermickém tepelném impulzu. [14]	24
1.6	Schéma adiabatického skenovacího kalorimetru, kde (1) jsou teplotní senzory; (2) pec (okolí); (3) měřicí systém se vzorkem; (4) konečně veliký tepelný odpor; (5) elektrické ohříváče. [14]	25
1.7	Schéma isoperbolického kalorimetru: (1) termostat (okolí); (2) měřicí systém se vzorkem; (3) tepelný odpor. [14]	26
1.8	Časová závislost produkce konstantního tepelného toku \dot{Q}_0 pro isoperibolický kalorimetr začínající v čase t_0 . [14]	27
1.9	Časová závislost produkce konstantního tepelného toku \dot{Q}_0 konečného trvání pro isoperibolický kalorimetr s dobou trvání $t_1 - t_0$. [14]	27
1.10	Schéma směšovacího kalorimetru, kde (1) je měřený vzorek; (2) míchadlo; (3) teplotní senzor; (4) kalorimetrická tekutina. [14]	29
1.11	(a) Diferenciální skenovací kalorimetr s tepelným tokem; (b) Diferenciální skenovací kalorimetr s kompenzací příkonu. [14]	30
2.1	Mapa reaktoru LVR-15. [24]	33
2.2	Zbytkový tepelný výkon palivového souboru IRT-4M v čase stanovený pomocí různých výpočetních programů.	43
3.1	Doba za kterou překročí palivový soubor IRT-4M přípustnou teplotu stanovenou bezpečnostními limity při různých výkonech palivového souboru v adiabatickém kalorimetru.	48
4.1	Schéma kalorimetru pro měření zbytkového tepelného výkonu palivových souboru IRT-4M.	50
4.2	3D zobrazení kalorimetru pro měření zbytkového tepelného výkonu palivových souboru IRT-4M.	51

4.3	Zjednodušené zobrazení celkového tepelného toku \dot{Q}_{out} vystupující z kalorimetru, který je roven součtu tepelného toku z horní příruby Q_{UF} , dolní příruby Q_{LF} a stěny kalorimetru Q_W	55
4.4	Zjednodušené zobrazení geometrie stěny kalorimetru s hraničními teplotami.	57
4.5	Teplotní profil stěny kalorimetru, při použití helia jako izolační vrstvy v závislosti na výkonu PS.	60
4.6	Teplotní profil stěny kalorimetru, při použití mixu 70% He a 30% N ₂ jako izolační vrstvy v závislosti na výkonu PS.	61
4.7	Teplotní profil stěny kalorimetru, při použití kyslíku jako izolační vrstvy v závislosti na výkonu PS.	62
4.8	Teplotní profil stěny kalorimetru, při použití oxidu uhličitého jako izolační vrstvy v závislosti na výkonu PS.	63

Seznam tabulek

1.1	Koeficienty pro křivku Glasstone.	17
2.1	Složení palivových souborů IRT-4M. [25]	35
2.2	Uspořádání palivového souboru IRT-4M. [25]	35
2.3	Vnější rozměry trubek a poloměr zakřivení rohů [mm] palivových souborů IRT-4M. [25]	36
2.4	Základní vlastnosti hliníkové slitiny SAV1 pro rozmezí teplot 20–100 °C. [25]	36
2.5	Limitní provozní podmínky pro palivo IRT-4M. [27]	41
2.6	Zbytkový výkon palivového souboru IRT-4M na reaktoru LVR-15 po odstavení z 10 MW v procentech nominálního výkonu. [9] [29] [33]	42
2.7	Zbytkový výkon palivového souboru IRT-4M na reaktoru LVR-15 po odstavení z 10 MW v kW. [9] [29] [33]	42
3.1	Střední hodnoty zbytkového výkonu palivového souboru IRT-4M na reaktoru LVR-15 v čase a doba za kterou bude v adiabatickém kalorimetru překročena teplota palivového souboru stanovenou bezpečnostními limity.	48
4.1	Geometrie kalorimetru, kde δ_{UF} resp. δ_{LF} je tloušťka přírub, l je délka kalorimetru, r_i jsou poloměry stěny kalorimetru a uvažovaná teplota bazénu T_∞	56
4.2	Tepelná vodivost materiálů použitých v kalorimetru. [36] [37] [38] [39] [40]	56
4.3	Vypočítané tepelné toky pro geometrii kalorimetru pro dosažení teplotní diference $\Delta T = 10$ K v závislosti na použitém mediu v izolační vrstvě stěny.	56
4.4	Vztahy pro střední Nusseltovo číslo pro přirozenou konvekci na vertikální stěně.	58
4.5	Vypočítané hraniční teploty stěny kalorimetru v závislosti na výkonu PS při použití helia jako izolační vrstvy.	60
4.6	Vypočítané hraniční teploty stěny kalorimetru v závislosti na výkonu PS při použití mixu 70% He a 30% N jako izolační vrstvy.	61
4.7	Vypočítané hraniční teploty stěny kalorimetru v závislosti na výkonu PS při použití dusíku jako izolační vrstvy.	62
4.8	Napočítané hraniční teploty stěny kalorimetru v závislosti na výkonu PS při použití oxidu uhličitého jako izolační vrstvy.	63
4.9	Přípustné odchylky teploměrů Pt-100 třídy A dle DIN EN 60751.	66
4.10	Hmotnosti, měrné tepelné kapacity a celkový jejich příspěvek ke stanovení Q^{PS}	67

4.11	Seznam všech důležitých částí pro výrobu kalorimetru, včetně množství a jejich ceny.[46] [47][48][49][50]	69
4.12	Seznam potřebných zařízení potřebné pro měření zbytkového tepelného výkonu. [51] [52] [53]	69

Seznam příloh

Příloha A	Osmi trubkový palivový soubor IRT-4M	78
Příloha B	Šesti trubkový palivový soubor IRT-4M	79
Příloha C	Mokrý zásobník	80
Příloha D	Odložiště vyhořelého paliva	81
Příloha E	Výkresy kalorimetru	82
Příloha F	Výpočet energetické bilance a tepelného schématu	91

Úvod

Cílem této práce je navrhnout experiment, kterým by bylo možné měřit zbytkový tepelný výkon palivových souborů IRT-4M na reaktoru LVR-15. Návrh technického řešení kalorimetrické metody pro měření zbytkového tepelného výkonu byl navržen tak, aby bral v potaz parametry lokalit tak, aby zde bylo možné manipulovat s ozářeným palivem na pracovišti reaktoru LVR-15, tak i na bezpečnostní limity a podmínky, které jsou stanovené bezpečnostními předpisy. Kromě základních tepelných výpočtů se návrh experimentu bude dále zabývat případnými nejistotami a ekonomickým hodnocení ceny materiálu potřebného pro výrobu navrženého zařízení.

Problematika zbytkového tepelného výkonu, uvolňujícího se po odstavení reaktoru z jaderného paliva má zásadní význam v jaderné energetice a při posuzování jejich bezpečnostních aspektů. Na rozdíl od klasických energetických zdrojů jaderné palivo uvolňuje značné zbytkové teplo i po odstavení reaktoru. Ačkoliv je velikost zbytkového tepla mnohem menší než byl původní výkon reaktoru a postupem času exponenciálně klesá, stále se jeho nezanedbatelný podíl uvolňuje i po vyvezení paliva z reaktoru a i v letech jeho dalšího skladování.

Smysl znalosti přesných modelů zbytkového tepelného výkonu spočívá v posouzení bezpečnostních analýz provozů jaderných reaktorů. Například při zhodnocení bezpečnostních analýz možných jaderných nehod, které souvisejí s únikem chladicí kapaliny z aktivní zóny reaktoru nebo při ztrátě chlazení bazénů s vyhořelým palivem. Tyto dva možné incidenty se staly hlavními příčinami velkých jaderných havárií na elektrárnách Three Mile Island a Fukušima. Díky tomu je nutnost stálého chlazení jaderného paliva i po odstavení reaktoru základním problémem při řešení režimů abnormálního provozu i havarijních stavů a vývin zbytkového tepla je tak klíčovým problémem pro skladování vyhořelého jaderného paliva.

Z těchto důvodů je experimentální ověření výpočetních modelů zbytkového tepelného výkonu relevantní nejen z hlediska bezpečnosti, ale má také velké ekonomické a legislativní důsledky spočívající ve vyšších bezpečnostních rezervách, které se promítají do vyšších ekonomických nákladů.

V úvodní kapitole je popsáno měření zbytkového tepelného výkonu palivových souborů. Na začátku jsou detailně rozebrány všechny zdroje zbytkového tepla z ozářených palivových souborů v jaderném reaktoru a jejich analytický rozbor, na kterém stojí dnešní výpočetní modely. Druhá část této kapitoly se zabývá podrobným popisem obecných kalorimetrických metod, které jsou jednou ze dvou možností pro měření zbytkového tepelného výkonu palivových souborů.

Druhá kapitola je zaměřena na seznámení se s pracovištěm reaktoru LVR-15 a jeho součástmi, které mají význam pro samotný návrh experimentální metody. Podrobný popis aktivní zóny reaktoru LVR-15, paliva IRT-4M a možných úložišť ozářeného jaderného paliva je potřebný pro vymezení limitních podmínek, které hrají důležitou roli při návrhu samotného experimentu.

Třetí kapitola se zabývá zhodnocením všech přijatelných variant lokalit pro provedení experimentu na pracovišti reaktoru LVR-15 a konstrukčních řešení kalorimetru na základě rešeršní práce z předchozích kapitol.

Poslední kapitola této práce je zaměřena na samotné konstrukční řešení kalorimetru, který vychází ze závěrů předcházejících kapitol. Kromě popisu technického řešení kalorimetru a použitých materiálů je zde popsána jejich kompatibilita s prostředím. Dále se kapitola zabývá popisem kalibračního měření a metodě pro vypočítání zbytkového tepelného výkonu z naměřených hodnot. Pozornost je věnována výpočtům pro potvrzení možnosti, že lze navrženým kalorimetrem stanovit zbytkový tepelný výkon palivových souborů a stanovení stacionárního teplotního profilu kalorimetru pro různé výkony. Druhá část je zaměřena na popis nutného přístrojového vybavení potřebného pro provedení experimentu a stanovení nejistot, na které je nutné si dát pozor pro přesné měření. Konec kapitoly je věnován ekonomickému hodnocení celého kalorimetru.

Závěr této práce obsahuje vypracované technické výkresy navrhovaného kalorimetru, programy klíčové pro výpočty uvedené v této diplomové práci a další důležitá schémata.

Kapitola 1

Měření zbytkového tepelného výkonu

V jaderném reaktoru se průměrná energie na jedno štěpení těžkého jádra pohybuje okolo 200 MeV. Jelikož nelze využít energii neutronů, je konečná energie z jednoho štěpení odváděného chladičem reaktoru o něco menší. Přesná hodnota využitelné části energie závisí na konstrukci reaktoru a štěpném izotopu. Zhruba 7 % z těchto 200 MeV pochází z rozpadů štěpných produktů ve formě beta a gama záření. Tento zdroj energie, popsáný v první části této kapitoly, je hlavní příčinnou zbytkového tepelného výkonu reaktoru po jeho odstavení.

Měření zbytkového tepla z ozářených palivových souborů lze provést dvěma odlišnými metodami. První metoda vychází z detekce záření, které se snaží měřit energii beta a gama záření. Druhá metoda je založena na kalorimetrických experimentech spočívajících v měření tepla v látce, ve které se absorbovala energie z radioaktivních dějů probíhajících v ozářeném palivovém souboru. [1]

Jelikož cílem této diplomové práce je navrhnout experiment založený na kalorimetrických experimentech, jsou obecné kalorimetrické metody podrobněji popsány v druhé části této kapitoly.

1.1 Zbytkový tepelný výkon

V průběhu reaktorové kampaně se teplo v aktivní zóně jaderného reaktoru produkuje převážně díky štěpné řetězové reakci, která je úměrná neutronovému toku. Vztah mezi neutronovým tokem a tepelnou energií není lineární, takže při odstavení reaktoru velmi rychle klesá intenzita štěpné řetězové reakce, zatímco množství zbytkového tepla klesá pomaleji. V takovém případě není tepelný výkon úměrný neutronovému toku.

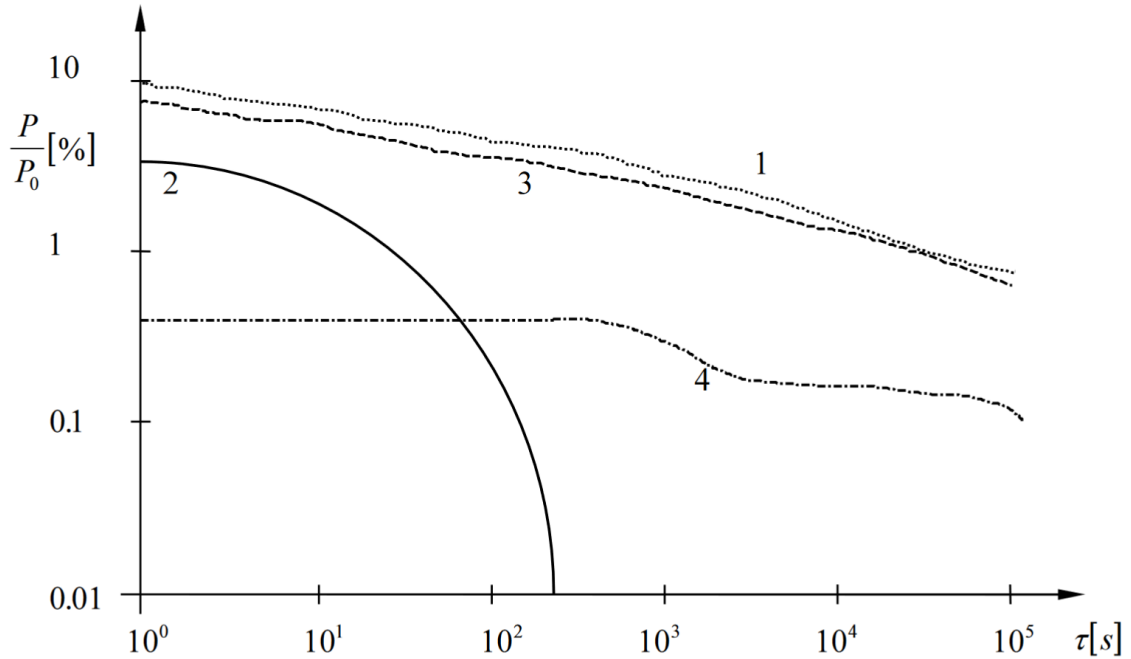
Zdroje těchto nelinearit přispívají k celkovému zbytkovému tepelnému výkonu a je lze klasifikovat do čtyř skupin: [2]

1. Dobíhající štěpná řetězová reakce;
2. radioaktivní rozpad štěpných produktů;
3. radioaktivní přeměny izotopů vzniklých radiačním záchytem neutronů;
4. radioaktivní rozpad aktivovaných materiálů.

Jednotlivé zdroje zbytkového tepla jsou zobrazeny na obrázku 1.1, na kterém je prezentován časový průběh dílčích složek zbytkového výkonu $P(t)$ vyjádřené relativním podílem:

$$\frac{P(t)}{P_0} = \sum_{i=1}^4 \frac{P_i(t)}{P_0} \quad (1.1)$$

kde P_0 je tepelný výkon při odstavení reaktoru a i představuje index skupiny tepelného zdroje.



Obrázek 1.1: Jednotlivé skupiny zbytkového tepelného výkonu po odstavení reaktoru. (1) Celkový tepelný výkon; (2) Výkon dohasínající štěpné reakce; (3) Radioaktivní rozpad štěpných produktů; (4) radioaktivní rozpad izotopů vzniklých radiačním záchytem neutronů. [3]

Celkový zbytkový tepelný výkon jaderného paliva závisí na mnoha aspektech např. na typu a složení paliva, jeho původním obohacení, době provozu reaktoru, době po odstavení reaktoru a výkonu, na kterém byl reaktor provozován před odstavením. Stanovené hodnoty zbytkového výkonu se uvádějí v bezpečnostní a provozní dokumentaci každého jednotlivého reaktoru, kde se vychází ze zbytkových výkonů individuálních palivových souborů ve skupině skladovaného paliva, z nichž každý má jinou provozní historii, jiný stupeň vyhoření a dává tedy jiný zbytkový výkon.

1.1.1 Dohasínající štěpná reakce

Při odstavování reaktoru dochází téměř současně k zániku vývinu tepla díky štěpné řetězové reakci okamžitými neutrony. Z hlediska zbytkového tepelného výkonu je možné aproximovat zasunutí absorpčních tyčí velikou zápornou reaktivitou, která je v čase $t = 0$ zavedena do aktivní zóny. Pokles výkonu má exponenciální charakter, který lze odvodit z rovnic kinematiky ve tvaru: [4]

$$\frac{P(t)}{P_0} = \frac{\rho_k}{\rho_k - \beta} \cdot \exp\left(\frac{\rho_k - \beta}{\Lambda} \cdot t\right) + \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\beta - \rho_k} \cdot \exp\left(\frac{\lambda_i \cdot \rho_k}{\beta - \rho_k} \cdot t\right) \quad (1.2)$$

kde ρ_k je kladná skoková reaktivita, β je podíl zpožděných neutronů, β_i je podíl i -té skupiny zpožděných neutronů, Λ je střední doba vzniku okamžitých neutronů a λ_i je rozpadová konstanta i -té skupiny mateřských jader zpožděných neutronů.

První člen ve vztahu (1.2) představuje časovou změnu výkonu reaktoru při vnosu velké záporné reaktivity, kdy dochází k téměř skokovému poklesu výkonu. Výkon klesá téměř tak rychle, jako v soustavě bez zpožděných neutronů. Po určité době se začne uplatňovat vliv zpožděných neutronů, který představuje druhý člen vztahu (1.2) a výkon reaktoru se mění pomaleji. Vývin tepla zpožděnými neutrony klesá exponenciálně s periodou odpovídající střední době života poslední skupiny zpožděných neutronů, tj. $\tau \approx 80$ sekund.

Dle [5] lze u lehkovodního reaktoru zbytkový výkon dohasínající řetězové reakce po velkém poklesu reaktivity aproximovat rovnicí:

$$\frac{P(t)}{P_0} = 0,15 e^{-0,1 t} \quad (1.3)$$

Zbytkový tepelný výkon z dohasínající štěpné reakce lze v porovnání s ostatními zdroji tepla během několika desítek sekund po odstavení reaktoru zanedbat. V lehkovodních energetických reaktorech je navíc tato doba po odstavení reaktoru pokryta doběhem hlavních cirkulačních čerpadel odvádějící teplo. Z těchto důvodů není tento efekt pro provozní režim reaktoru významný. [6]

1.1.2 Radioaktivní rozpad štěpných produktů

Největším zdrojem zbytkového tepelného výkonu v jaderném palivu po odstavení reaktoru tvoří štěpné produkty naakumulované za celou dobu provozu reaktoru. Většina těchto štěpných produktů je díky vysokému počtu neutronů vysoce nestabilní a podléhá β rozpadům do doby, než je dosaženo stability jádra. Jelikož je β rozpad obvykle doprovázen γ zářením, pak jsou tyto dva rozpady hlavním zdrojem zbytkového tepelného výkonu, který v prvních sekundách po odstavení reaktoru může tvořit až 10 % zbytkového tepelného výkonu, na kterém byl reaktor provozován před odstavením. [6]

Existují dvě metody pro výpočet relativního tepelného výkonu vznikajícího radioaktivním rozpadem štěpných produktů. Historicky první používaná metoda je založena na statistických souborech, spoléhajících se na střední hodnoty jaderných vlastností, pro které byly odvozeny základní empirické vzorce pro tepelný výkon β a γ záření vztahy na jeden rozpad štěpného produktu jako: [7]

$$\begin{aligned} P_\beta(t) &= 1,40 \cdot t^{-1,2} \cdot (1,602 \cdot 10^{-13}) \\ P_\gamma(t) &= 1,26 \cdot t^{-1,2} \cdot (1,602 \cdot 10^{-13}) \end{aligned} \quad (1.4)$$

Tyto vztahy jsou považovány za platné po dobu t od výskytu štěpení v rozsahu 10 sekund do 100 dní. Integrací rovnic (1.4) přes provozní dobu reaktoru získáme velikost uvolněné energie z rozpadu štěpných produktů v čase t od spuštění reaktoru

ve tvaru: [7]

$$\begin{aligned}\frac{P_\beta(t)}{P_0} &= 0,035 [(t - t_{sh})^{-0,2} - t^{-0,2}] \\ \frac{P_\gamma(t)}{P_0} &= 0,031 [(t - t_{sh})^{-0,2} - t^{-0,2}]\end{aligned}\quad (1.5)$$

Ve výpočtu se předpokládá, že reaktor pracuje s konstantním výkonem po dobu t_{bsh} , než se reaktor odstaví. Rovnice (1.5) lze sečíst a dostat tak celkový tepelný výkon z rozpadu štěpných produktů, tzv. Wigner-Wayovu rovnici: [8]

$$\frac{P(t)}{P_0} = 0,066 [(t - t_{bsh})^{-0,2} - t^{-0,2}] \quad (1.6)$$

Rovnice (1.6) může být taky napsána ve tvaru:

$$\frac{P(t)}{P_0} = 0,066 [t_{ash}^{-0,2} - (t_{ash} + t_{bsh})^{-0,2}] \quad (1.7)$$

kde t_{ash} je uplynulá doba po odstavení reaktoru.

Další možností statistického výpočtu zbytkového tepelného výkonu je použití křivky Glasstone, která je ve tvaru: [9]

$$\frac{P(t)}{P_0} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot a \cdot (t_{ash}^{-b} - (t_{bsh} + t_{ash})^{-b}) \quad (1.8)$$

kde koeficienty a a b jsou zaneseny v tabulce 1.1. Tato křivka aproximuje normu ANS s přesností $\pm 6 \%$ a lze jí považovat za přesnou pro $t_{ash} > 1000 \text{ s}^1$.

t_{ash} [s]	a	b
0,1 - 10	12,05	0,0639
10 - 150	15,31	0,1807
150 - $8 \cdot 10^8$	27,43	0,2962

Tabulka 1.1: Koeficienty pro křivku Glasstone.

Druhá metoda výpočtu zbytkového tepelného výkonu je založena na jednoduchém principu součtu všech jader $N_i(t)$ vytvořených jak během štěpného procesu v reaktoru, tak i po odstavení reaktoru. Následně jsou všechna jádra tříděna podle jejich rozpadových konstant λ . Funkce tepelného výkonu štěpných produktů je pak ve tvaru: [1]

$$P(t) = \sum_i (\bar{E}_{\beta,i} + \bar{E}_{\gamma,i} + \bar{E}_{\alpha,i}) \cdot \lambda_i N_i(t) \quad (1.9)$$

kde \bar{E}_i jsou střední energie rozpadu pro i -tý nuklid. Počet nuklidů $N_i(t)$ v době t se získává řešením soustavy diferenciálních rovnic prvního řádu, které popisují tvorbu a rozklad produktů štěpení: [1]

$$\frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i + \sigma_{a,i}\phi)N_i + \sum_j f_{j \rightarrow i} \lambda_j N_j + \sum_k \mu_{k \rightarrow i} \sigma_k \phi N_k + y_i F \quad (1.10)$$

¹Pro $t_{ash} < 1000 \text{ s}$ může chybovost dosáhnout až 50 %

kde $\sigma_{a,i}$ je účinný průřez záchyty nuklidu i , ϕ je neutronový tok, $f_{j \rightarrow i}$ je poměr větvení nuklidu j na nuklid i , $\mu_{k \rightarrow i}$ je rychlost produkce nuklidu i na jeden neutronový záchyt nuklidu k , y_i je přímo produkováný počet nuklidu i a F je rychlost štěpení. Tyto výpočty jsou extrémně komplikované a vyžadují rozsáhlé knihovny účinných průřezů, výtěžků štěpení a nutnost sledovat produkci a rozpad každého štěpného produktu.

S obecnější metodou sumačních výpočtů pracuje Americká nukleární společnost (ANS), která sloučila data z několika experimentů k vytvoření metody pro výpočty výkonu z rozpadu štěpných produktů a v roce 1971 vydala normu ANSI/ANS-5.1. Od té doby byla tato norma mnohokrát korelována a zpřesňována.

Norma ANS-5.1-2014 počítá zbytkový tepelný výkon ze štěpných produktů pomocí příspěvků štěpení čtyř hlavních štěpných izotopů vyskytujících se v jaderném palivu, jenž společně mohou za víc než 99 % veškerého štěpení. Jedná se o izotopy ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu a ^{241}Pu . Závislost zbytkového tepelného výkonu na čase t po štěpení se následně aproximuje součtem 23 exponenciál jednoho nuklidu i ve formě: [10]

$$P_i(t) = \sum_{j=1}^{23} A_{ij} e^{-\lambda_{ij} t} \quad (1.11)$$

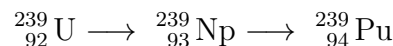
kde A_{ij} je j -tý koeficient pro nuklid i a λ_{ij} je střední rozpadová konstanta pro koeficient j a nuklid i . Obě dva veličiny A_{ij} a λ_{ij} se získávají z tabelovaných hodnot uvedených v normě ANSI/ANS-5.1-2014. V rovnici (1.11) je předpokládán nekonečně dlouhý provoz reaktoru na plném výkonu před odstavením. V takovém případě dosahuje koncentrace štěpných produktů, a tím i zbytkový tepelný výkon reaktoru, maximálních hodnot. Integrací rovnice (1.11) lze získat přepočtení na konečnou předchozí dobu provozu reaktoru t_{sh} : [10]

$$P(t, t_{sh}) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{23} \frac{A_{ij}}{\lambda_{ij}} (1 - e^{-\lambda_{ij} t_{sh}}) \cdot e^{-\lambda_{ij} t} \quad (1.12)$$

Jelikož tyto sumační metody výkonů jednotlivých izotopů do značné míry spoléhají na dostupnosti jaderných dat, tak práce s nimi je mnohem složitější než u metod založených na statistický modelech. Na druhou stranu je statistická metoda pro delší časové úseky méně přesná a v současné praxi by mohla vést ke značným nepřesnostem, jelikož různé vzorce od různých autorů byly odvozovány pro starší typy paliva a reaktorů. Z těchto důvodů jsou statistické metody s rostoucím množstvím jaderných dat postupně nahrazovány sumačními výpočty a v dnešní době slouží statistické metody spíše pro stanovení referenčních hodnot.

1.1.3 Radioaktivní přeměny izotopů vzniklých radiačním záchytem neutronů

Hlavní podíl zbytkového teplotního výkonu tvoří v tomto případě záření β a γ uvolněné při radioaktivním rozpadu uranu ^{239}U , který vzniká radiačním záchytem neutronu na izotopu ^{238}U . Samotné teplo vzniká při β^- přeměnách nestabilního uranu ^{239}U na další izotopy v řetězci



Příspěvek ke zbytkovému teplotnímu výkonu závisí na množství přítomného uranu ^{238}U . Ve vysoce obohaceném palivu lze dle [2] použít výraz:

$$\frac{P(t)}{P_0} = A_1 \cdot e^{-4,9 \cdot 10^{-4} \cdot t} + A_2 \cdot e^{-3,4 \cdot 10^{-6} \cdot t} \quad (1.13)$$

konstanty A_1, A_2 je možné vyjádřit v závislosti na veličině R závisící na konverzním faktoru χ_p a na efektivních mikroskopických účinných průřezech pro absorpci $\sigma_{a,5}$ a štěpení $\sigma_{f,5}$ uranu ^{238}U jako:

$$A_1 = 0,22648 \cdot R; \quad A_2 = 0,21852 \cdot R; \quad R = \chi_p \cdot \frac{\sigma_{a,5}}{\sigma_{f,5}}$$

V případě tlakovodního reaktoru lze dle [2] užít přibližných hodnot pro konstanty $A_1 = 0,4$ a $A_2 = 0,17$.

V prvních minutách po odstavení reaktoru tvoří tento zdroj tepla jen $\approx 5\%$ veškerého zbytkového tepla a proto není z hlediska provozních režimů reaktoru významný. Nezanedbatelnou roli má u vyhořelého jaderného paliva, jelikož při dlouhodobém porovnání tepelný výkon klesá pomaleji, než je tomu u hlavního zdroje tepla pocházejícího z radioaktivního rozpadu štěpných produktů.

1.1.4 Radioaktivní rozpad aktivovaných materiálů

Během provozu reaktoru jsou materiály palivového souboru a konstrukční materiály reaktoru vystaveny nepřežitelnému neutronovému toku. Neutron s materiály v aktivní zóně reaktoru může interagovat pomocí reakcí (n, α) , (n, p) , (n, γ) , nebo $(n, 2n)$ a vytvářet tak radioaktivní izotopy, které přispívají k produkci tepelné energie.

Většina takto aktivovaných izotopů se na rozdíl od štěpných produktů přímo rozkládá na stabilní izotopy. Z těchto důvodů radioaktivní rozpad materiálů palivových souborů má relativně malý příspěvek k celkovému zbytkovému tepelnému výkonu a při výpočtu zbytkového tepelného výkonu se obvykle zanedbává.

Konstrukční materiály reaktoru zůstávají po celou dobu jeho životnosti v reaktoru a proto je jejich příspěvek k tepelnému výkonu vyřazován z analýz pro výpočet zbytkového tepelného výkonu palivových souborů. Aktivované izotopy konstrukčních materiálů jsou však velice důležité ve studiích zabývajících se vyřazováním reaktorů z provozu a likvidace radioaktivního odpadu. [11]

1.2 Kalorimetrie

Hlavní podstatou kalorimetrických metod je měření tepla, které se vymění mezi studovanými makroskopickými systémy při určitých chemických, fyzikálních nebo biologických procesech. Výsledkem měření jsou hodnoty termofyzikálních vlastností zkoumaného systému. Kalorimetry lze klasifikovat na základě řady kritérií. Lze je řadit podle charakteristických vlastností jako je účel použití, princip měření, konstrukčního principu, atd.

V této diplomové práci jsou kalorimetry klasifikovány podle termodynamického principu výměny tepla a dělí se na: [12]

- Izotermické kalorimetry
- Adiabatické kalorimetry
- Kalorimetry založené na tepelné výměně

1.2.1 Izotermické kalorimetry

Základní principem kalorimetrů pracujících na základě izotermického děje je udržování konstantní teploty. Teploty okolí T_F a teploty měřícího systému T_M se musejí v každé části a v každém okamžiku spolu rovnat, tzn. $T_F = T_M = konst.$ Izotermického stavu je dosaženo pokud se teplo skrz systém přenáší přes nekonečně nízký tepelný odpor R_{th} . V takovém případě by nedocházelo k žádnému přenosu tepla, jelikož teplo se může přenášet pouze tehdy, existuje-li teplotní rozdíl mezi dvěma místy. [13]

Za normálních okolností nelze tohoto stavu v kalorimetrii dosáhnout. Z těchto důvodů je nutné pro dosažení izotermického stavu kalorimetru kompenzovat tepelný tok uvolněný ze vzorku. Teplo uvolněné vzorkem lze kompenzovat dvěma způsoby *fázovým přechodem* nebo *termoelektrickým efektem*.

Izotermické kalorimetry kompenzované fázovým přechodem

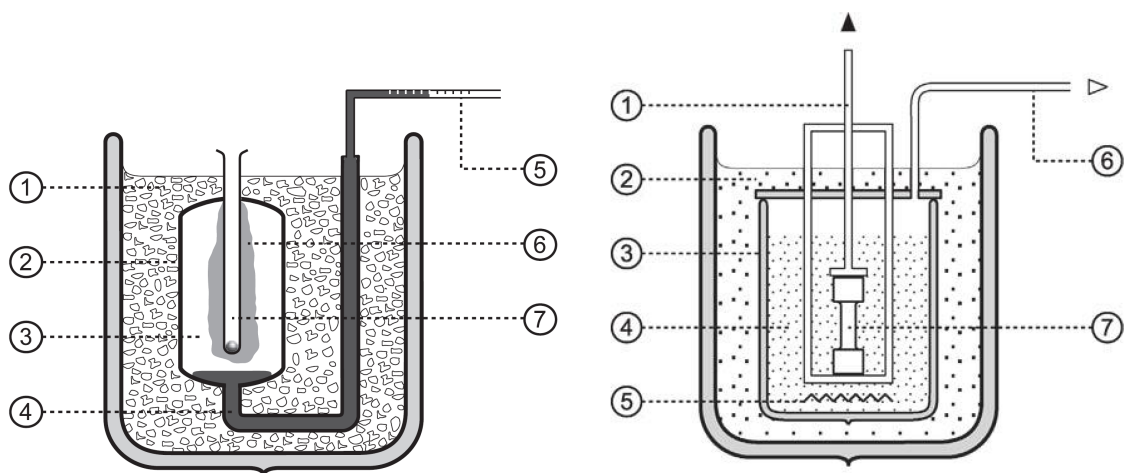
Princip metody kompenzace fázovým přechodem pro dosažení izotermického stavu spočívá v tom, že celkové teplo zavedené do kalorimetru ΔQ se neměří jako tepelný tok \dot{Q} vyměněný mezi kalorimetrem a měřeným vzorkem, ale jako příčina fázového přechodu ve vhodné látce. Velikost tohoto tepla je úměrná hmotnosti přeměněné látky Δm a skupenskému teple q_{trs} látky: [14]

$$\Delta Q = q_{trs} \cdot \Delta m \quad (1.14)$$

Hmotnost přeměněné látky Δm se stanoví buď přímou metodou, kdy se množství látky zvaží, nebo nepřímou metodou, která spočívá ve změření změny objemu v důsledku rozdílu hustot mezi fázemi.

Příklady dvou různých izotermických kalorimetrů kompenzovaných fázovým přechodem jsou vyobrazeny na obrázku 1.2 (a) a 1.2 (b). Všechny tyto kalorimetry fungují na podobném principu. Komora, ve které je umístěn měřený vzorek, je obklopena dvojitou stěnou obsahující médium, které bude měnit svou fázi. Celý systém je následně izolován druhým (*vnějším*) pláštěm obsahující další médium měnící svojí fázi. Změnou fáze ve vnějším plášti komory se kompenzují nepříznivé vlivy okolního tepla. Můžeme proto konstatovat, že pouze teplo uvolněné v komoře z měřeného

vzorku slouží ke změně fáze ve vnitřním plášti. Jelikož mezi vnitřním a vnějším pláštěm je nulový teplotní rozdíl, nedochází mezi nimi k žádné výměně tepla.



(a) (1) směs ledu a vody; (2) nádoba kalorimetru; (3) voda; (4) rtuť; (5) kapilára; (6) led; (7) kontejner se vzorkem

(b) (1) tahové zkušební zařízení; (2) kapalný dusík; (3) nádoba kalorimetru; (4) kapalný dusík; (5) topné těleso pro kalibraci kalorimetru; (6) výtoková trubice pro plynný dusík; (7) tahový vzorek

Obrázek 1.2: (a) Ledový kalorimetr; (b) Kalorimetr využívající přechod kapalina-plyn. [14]

Pro kompenzaci exotermických tak i endotermických reakcí lze použít fázových přechodů u velkého množství pracovních látek. Mezi látky, které se nejčastěji používají patří voda, dusík (přechod kapalina-plyn) a různé organické sloučeniny. Volba pracovní látky představuje základní omezení použití celého kalorimetru, jelikož její fázový přechod vymezuje pracovní teplotu experimentu.

Výhody kalorimetrů s fázovým přechodem spočívají v jejich relativně jednoduchém provedení a vysoké citlivosti u pomalých reakcí, které zahrnují malé výměny tepla za jednotku času. Vysoká přesnost těchto kalorimetrů je způsobena minimální tepelnou ztrátou do okolí, protože teplo z měřeného vzorku nemůže uniknout z kalorimetru bez toho, aniž by způsobil změnu fáze. Tepelné ztráty mezi kalorimetrem a okolím přes možné úchyty a různé přírůdky elektrického vedení, které mají ostatní typy kalorimetrů, jsou potlačeny v plášti, ve kterém dochází ke stejnému fázovému přechodu jako ve vlastním kalorimetru. Z těchto důvodů je přesnost měření izotermickým kalorimetr kompenzovaného fázovým přechodem závislá pouze na nejistotách, při stavování velikosti skupenského tepla q_{trs} . [14]

Izotermické kalorimetry s elektrickou kompenzací

Pro udržení izotermických podmínek v kalorimetru lze použít kompenzaci teploty pomocí elektrického výkonu. Nejčastější metodou zahřívání měřeného vzorku je využití Jouleova tepla. Průchodem elektrického proudu I o napětí U vodičem přes odpor R se elektrický výkon P přeměňuje na teplo: [15]

$$P = \dot{Q} = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t \quad (1.15)$$

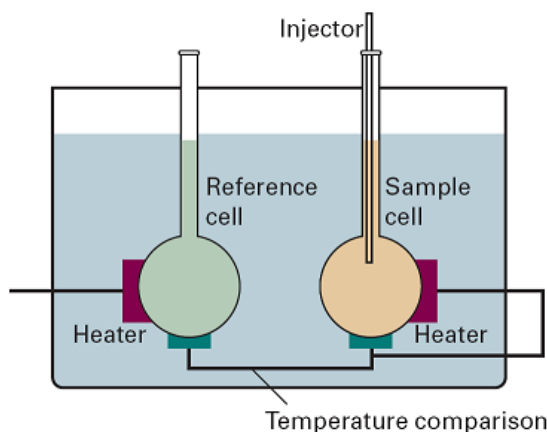
Tímto způsobem je možné kompenzovat endotermické reakce. Pro kompenzaci tepla uvolněného při exotermických reakcích je nutné využít chlazení pomocí Peltierova jevu. Pokud proud prochází obvodem, který obsahuje dva sériově zapojené vodiče, pak se jeden spoj zahřívá, zatímco druhý spoj se ochlazuje. Tento jev je reverzibilní, takže při obrácení směru proudu se dříve studený spoj začne ohřívat a teplý spoj ochlazuje.

Energie absorbovaná na studeném spoji je stejně veliká, jako je energie uvolněná na teplém spoji. Celkové množství tepla absorbovaného nebo uvolněného na jednotlivém spoji je roven: [14]

$$\Delta Q = \Pi \cdot \int_{t_{ini}}^{t_{fin}} I(t) dt \quad (1.16)$$

kde t_{ini} je čas, kdy byl proud přiveden do vodiče, t_{fin} je čas, kdy byl proud zdroj proudu vypnutý a Π je Peltierův koeficient. V praxi lze kompenzovat Peltierovým jevem pouze malé průtoky tepla, jelikož chladicí výkon je omezen díky tomu, že od určité velikosti proudu začne převládat Jouleův efekt a vodič začne generovat teplo.

Příkladem takového kalorimetru je titrační kalorimetr, který je zobrazen na obrázku 1.3. Kalorimetr, kromě komory s měřeným vzorkem, obsahuje i druhou komoru s referenční kapalinou (nejčastěji vodu). Zařízení na snímání teploty detekuje teplotní rozdíl mezi komorami a poskytuje zpětnou vazbu vodiči, jehož funkcí je kompenzovat tento teplotní rozdíl a tím udržovat obě komory na stejné teplotě. Během měření se zaznamenává velikost přivedeného elektrického výkonu do obvodu, který je potřebný pro udržení izotermických podmínek mezi komorami.



Obrázek 1.3: Schéma titračního kalorimetru. [16]

Hlavní výhodou těchto kalorimetrů je, že se během měření nemění podmínky přenosu tepla do okolí. Díky tomu není nutné kalibrovat kalorimetr, protože hledané teplo lze snadno a přesně určit přímo jako přivedený elektrický výkon, který lze stanovit s velkou přesností.

1.2.2 Adiabatické kalorimetry

V případě adiabatických kalorimetrů za ideálních okolností nedochází k žádné výměně tepla mezi měřicím systémem a jeho okolím. Jelikož nedochází k žádnému úniku tepla, tak veškeré teplo produkované vzorkem zůstává v systému a mění jeho teplotu. Adiabatického stavu je dosaženo pokud je tepelný odpor R_{th} mezi měřicím systémem a okolím nekonečně veliký.

Této podmínky lze dosáhnout třemi způsoby: [13]

- (i) Měřený vzorek je zcela izolovaný od okolí. To znamená, že tepelný odpor v ideálním případě je mezi vzorkem a okolím nekonečně veliký.
- (ii) Teplota okolí je v každém okamžiku udržována stejně veliká jako teplota měřeného vzorku, tzn. $T_F(t) = T_M(t)$.
- (iii) Produkce tepla v měřeném vzorku probíhá tak rychle, že během měřicího intervalu nedochází k žádné výměně tepla s okolím.

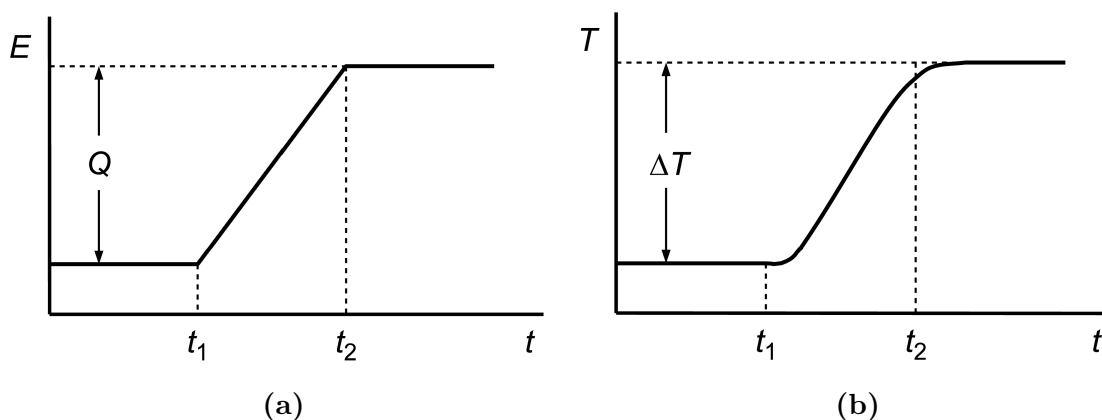
Je-li těchto podmínek dosaženo, pak průběh tepelné výměny mezi vzorkem a kalorimetrem zobrazený na obrázku 1.4 (a) a 1.4 (b) ukazuje vývin tepla v časovém intervalu mezi t_1 a t_2 . Naměřený teplotní rozdíl ΔT vzorku v tomto časovém intervalu je úměrný vyměněnému teplu Q dle rovnice: [17]

$$Q = C \cdot \Delta T \quad (1.17)$$

kde C je tepelná kapacita měřicího systému. Tato veličina v sobě zahrnuje, kromě tepelné kapacity vzorku i tepelnou kapacitu prostředí a měřicího zařízení. Její stanovení se provádí pomocí kalibračního měření za pomoci elektrického ohříváče o předem známém výkonu. Z těchto důvodů je přesné stanovení tepelné kapacity hlavním předmětem adiabatické kalorimetrie.

Při splnění ideálních adiabatických podmínek a znalosti tepelné kapacity C je tepelný tok $\dot{Q}(t)$ přímo úměrný křivkám na obrázku 1.4 a derivaci [18]

$$\dot{Q}(t) = \frac{dQ}{dt}(t) = C \cdot \frac{dT(t)}{dt} \quad (1.18)$$



Obrázek 1.4: Časová závislost při tepelné výměně u exotermní reakce, kde E je energie kalorimetrického systému (bez vzorku) a T je celková teplota systému. [14]

Kalorimetry s tepelně izolovaným vzorkem

U tohoto typu kalorimetru je snaha o dosažení adiabatického stavu pomocí odizolování měřeného vzorku tak, aby nedocházelo k výměně tepla mezi vzorkem a jeho okolím. V takovém případě by výpočet tepla, resp. tepelného toku měřeného vzorku zjednodušil na rovnici (1.17), resp. (1.18).

Nejlépejším možným řešením jak dosáhnout úplné adiabatické podmínky je umístění vzorku do vakuové komory. Samotný vzorek musí mít co možná nejmenší tepelný kontakt s komorou. Toho lze dosáhnout upevněním vzorku na tenké jehlice, nebo zavěšením pomocí tenkých nití. Stejně podmínky musí také splňovat elektrické připojení k teplotním sensorům.

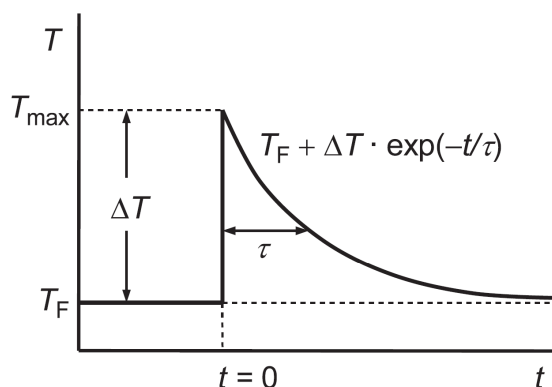
I přes všechny opatření, a s tím spojené vysoké náklady, nelze ideálního adiabatického stavu dosáhnout. Vždy totiž bude existovat přenos tepla přes mechanická spojení vzorku s izolovanou komorou a vyzařováním pomocí radiace. Tyto dva faktory povedou k pomalé změně teploty měřeného vzorku.

Z toho plyne, že změna teploty ΔT není časově konstantní. Rychlost úniku tepla je zpravidla úměrná teplotnímu rozdílu $T - T_F$ mezi měřicím systémem a jeho okolím. Změna teploty v čase je pak dána rovnicí: [14]

$$T(t) = \Delta T \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + T_F \quad (1.19)$$

kde $\Delta T = T_{max} - T_F$ je počáteční teplotní rozdíl měřicího systému a časová konstanta τ závisující na velikosti rychlosti úniku tepla ze systému a tepelné kapacitě měřicího systému. Obvykle se tato časová konstanta určuje experimentálně pomocí kalibrace.

Na obrázku 1.5 je zobrazena teplotní závislost exponenciální funkce v neideálním adiabatickém případě, u kterého v čase $t = 0$ nastane krátký exotermický tepelný impuls, jehož maximální teplota dosahuje teploty T_{max} .



Obrázek 1.5: Teplotní závislost neideálního adiabatického kalorimetru po krátkém exotermickém tepelném impulsu. [14]

Kalorimetry s nulovým teplotním rozdílem vůči okolí

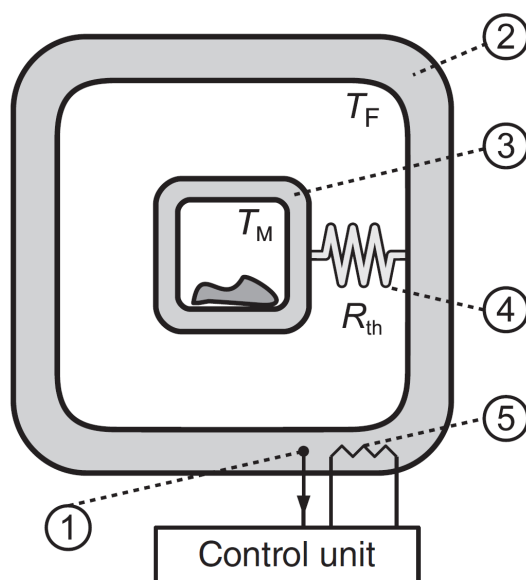
Tyto druhy adiabatických kalorimetrů využívají pro dosažení adiabatického stavu podmínku (ii). Udržováním nejen stejné teploty okolního prostředí, tak i nádoby s měřeným vzorkem se minimalizuje nekontrolovatelná výměna tepla, která by jinak negativně ovlivnilo přesnost měření.

Takovým kalorimetrem může být například tzv. adiabatický skenovací kalorimetr pro měření tepelných kapacit, který je schématicky zobrazen na obrázku 1.6. Teplota okolí je zajišťována pomocí pece, ve které je měřený vzorek umístěn. Vzorek i pec jsou vybaveny měřícím systémem a elektrickým ohříváčem. Pomocí tohoto uspořádání se sleduje nárůst teploty a vyrovnává se teplota vzorku, tak aby se zajistilo, že teplota vzorku bude vždy stejná jako teplota pece (okolí), tzv. $T_M(t) = T_F(t)$.

Jelikož měřící systém sleduje změnu teploty s určitým časovým zpožděním, teplota pece T_F se mění lineárně z počáteční teploty T_{ini} dle: [19]

$$T_F(t) = T_{ini} + \beta t \quad (1.20)$$

kde β představuje rychlost ohřevu. Při dodržení adiabatického stavu, je pak tepelná kapacita vypočítána ze známého množství dodaného výkonu do vzorku P_S .



Obrázek 1.6: Schéma adiabatického skenovacího kalorimetru, kde (1) jsou teplotní senzory; (2) pec (okolí); (3) měřící systém se vzorkem; (4) konečně velký tepelný odpor; (5) elektrické ohříváče. [14]

Kalorimetry pracující s rychlými teplotními změnami

Přenos tepla mezi vzorkem a jeho okolím prostřednictvím konvekce a kondukce má konečnou rychlost. Vydává-li měřený vzorek tepelnou energii v mnohem kratších intervalech, než vyžaduje přenos tepla do okolí, nastávají v tomto časovém intervalu tzv. kvazi-adiabatické podmínky. V tomto intervalu téměř veškerá tepelná energie zůstává ve vzorku. Pomocí přesného měření teplotních diferencí vzorku ve velmi krátkých intervalech a známé tepelné kapacity, lze tepelný tok určit ze závislosti (1.18). [14]

1.2.3 Kalorimetry založené na tepelné výměně

U této kategorie kalorimetrů není tepelný odpor R_{th} mezi měřícím systémem a okolím nulový (izotermický stav) ani nekonečný (adiabatický stav), ale je konečně veliký. Z důvodu existence konečného nenulového tepelného odporu, musí probíhat výměna tepla mezi měřícím systémem a okolím. Velikost tepelného toku tak závisí na velikosti teplot okolí T_F a teploty měřícího systému T_M .

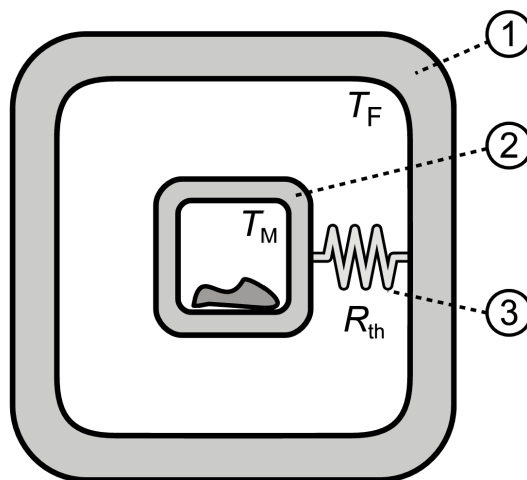
V závislosti na regulaci teploty okolí se u této kategorie kalorimetrů rozlišují tři provozní režimy: [14]

- (i) Teplota okolí se udržuje konstantní, tzv. isoperibolický režim.
- (ii) Teplota se lineárně mění v čase, tzv. skenovací režim.
- (iii) Teplota se mění postupně, nebo periodicky, tzv. modulovaný režim

Isoperibolické kalorimetry

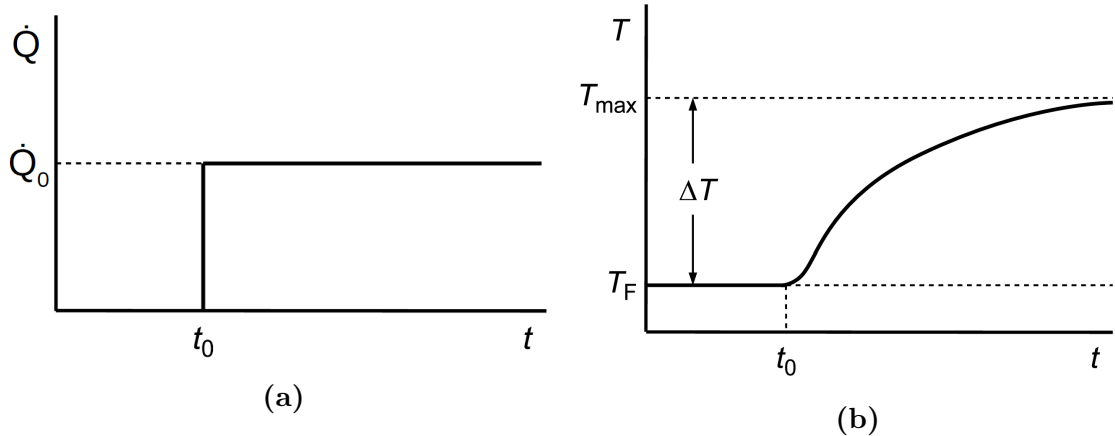
Základní podmínkou použití isoperibolických kalorimetrů je udržení teploty okolí T_F konstantní tak, aby tepelný tok \dot{Q} byl pouze funkcí teploty měřícího systému T_M . [20]

Obrázek 1.7 ukazuje konstrukční princip isoperibolického kalorimetru. Měřící systém je prostřednictvím tepelného odporu R_{th} propojen s okolním systémem o konstantní teplotě. V takovém kalorimetru pak mohou být všechny termodynamické procesy aproximovány na pouhou výměnu tepla mezi zkoumaným systémem a izotermickým tepelným zásobníkem s nekonečnou kapacitou.



Obrázek 1.7: Schéma isoperibolického kalorimetru: (1) termostat (okolí); (2) měřící systém se vzorkem; (3) tepelný odpor. [14]

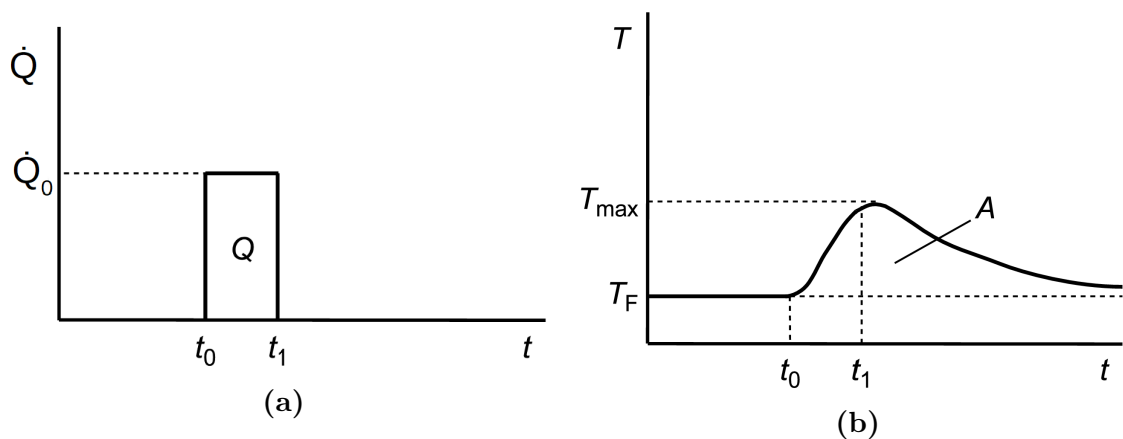
Máme-li konstantní tepelný tok \dot{Q}_0 produkovaný měřeným vzorkem (obrázek 1.8(a)), pak se teplota měřícího systému bude měnit výměnou tepla s okolím. V takovém případě bude teplota narůstat a limitně se přibližovat k maximální konečné teplotě T_{max} . Tato teplota představuje ustálený stav zobrazený na obrázek 1.8(b), při kterém se produkované teplo měřeného vzorku rovná teplu vycházející ze systému.



Obrázek 1.8: Časová závislost produkce konstantního tepelného toku \dot{Q}_0 pro isoperibolický kalorimetr začínající v čase t_0 . [14]

Na obrázku 1.9 (b) je znázorněn časový průběh vývoje teploty měřicího systému $T_M(t)$ s konstantním tepelným tokem konečného trvání (obrázek 1.9 (a)). Maximální rozdíl teplot $\Delta T = T_{max} - T_F$ závisí nejen na velikosti tepelného toku \dot{Q}_0 , ale také na časovém intervalu $t_1 - t_0$, ve kterém byl tepelný tok měřen. Vyznačená plocha A mezi křivkou $T_M(t)$ a teplotou okolí $T_F = const.$ je úměrná celkovému vyprodukovanému teplu:

$$Q = \dot{Q}_0 \cdot (t_1 - t_0) \quad (1.21)$$



Obrázek 1.9: Časová závislost produkce konstantního tepelného toku \dot{Q}_0 konečného trvání pro isoperibolický kalorimetr s dobou trvání $t_1 - t_0$. [14]

V predešlých úvahách nejsou zahrnuty mechanismy přenosu tepla, u nichž není velikost tepelného toku přímo úměrná teplotnímu rozdílu. Proto je u isoperibolických kalorimetrů snaha o co největší minimalizaci míry přenosu tepla konvekcí a zářením. Tyto mechanismy přenosu tepla nejsou přímo úměrné teplotnímu rozdílu, ale značně závisí na geometrii, povrchových vlastnostech, absolutní teplotě, atd.

V idealizovaném případě je tak tepelný tok \dot{Q} skrz pevné těleso s přesně definovaným tepelným odporem R_{th} mezi kalorimetrickým systémem a okolím zcela

závislý na teplotním rozdílu ΔT . Tepelný odpor v takovém případě slouží jako faktor proporcionality mezi měřenou veličinou ΔT a požadovaným průtokem tepla \dot{Q} . V ustáleném stavu se tepelný tok skrz rovinou stěnu řídí vztahem: [21]

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (1.22)$$

Tepelný odpor R_{th} není v obecném případě stacionární veličinou. Jeho hodnota je závislá na velikosti teploty, která se mění s časem. Dosazením rovnice (1.22) do diferenciálního tvaru tepelného toku (1.18) a její úpravou lze obdržet rovnici pro celkové teplo vyměněné měřeného vzorku s okolním systémem od t_{ini} do t_{fin} ve tvaru: [13]

$$Q = \int_{t_{ini}}^{t_{fin}} \frac{\Delta T(t)}{R_{th}(T(t))} dt \quad (1.23)$$

Vzhledem ke složité povaze vedení tepla uvnitř reálného kalorimetru je obecně nemožné přesně určit tepelný odpor R_{th} . Z tohoto důvodu se zavádí kalibrační faktor $K(T)$, který udává vzájemný poměr vyměněného tepla a plochy pod naměřenou křivkou, viz obrázek 1.9 (b).

$$Q = \int_{t_{ini}}^{t_{fin}} K(T) \cdot \Delta T(t) dt \quad (1.24)$$

Pro kalibrační faktor platí řada vlastností, které lze shrnout do následujících bodů: [14]

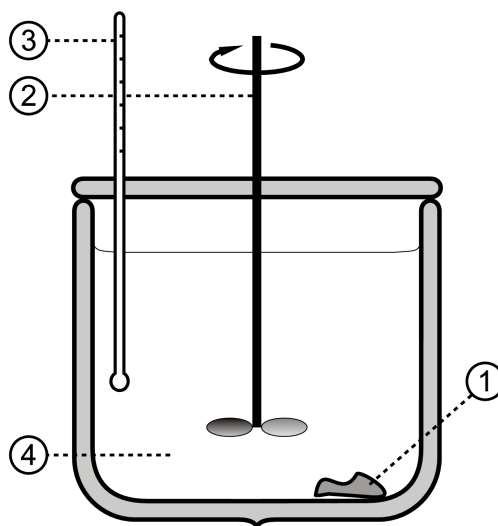
1. Kalibrační faktor $K(T)$ nelze kvůli komplikovaným mechanismům vedení tepla spočítat, ale místo toho musí být stanovován experimentálně.
2. Kalibrační faktor $K(T)$ je funkcí teploty protože samotná velikost teploty ovlivňuje tepelnou vodivost materiálů a účinnost tepelných ztrát. Pouze pro ustálený stav s malými teplotními rozdíly, lze kalibrační faktor $K(T)$ s určitou přesností považovat za nezávislý na teplotě. V takovém případě je kalibrační faktor konstantní a rovnice (1.24) přechází na tvar:

$$Q = K \cdot \int_{t_{ini}}^{t_{fin}} \Delta T(t) dt \quad (1.25)$$

3. Existuje-li ustálený stav, pak naměřené teplotní rozdíly ΔT v tělese mají přímou korelaci s tepelným tokem \dot{Q} . Při velkých výkyvech tepelného toku může být zamezeno kvantitativnímu vyhodnocení funkce teplotního rozdílu na čase. V takovém případě není kalibrační faktor K konstantní, ale je funkcí dalších parametrů měření.
4. Samotná kalibrace přístroje přináší řadu obtíží z důvodu, že k výměně tepla mezi kalorimetrickým systémem a okolím nedochází pouze konduktancí, ale i konvekcí a zářením. Z těchto důvodů je přesná kalibrace kalorimetru možná pouze tehdy, pokud kalibrační měření sledující profil teploty a času se rovná

profilu získanému při skutečném měření. Proto by kalibrace kalorimetru měla být prováděna pomocí tepelné události co nejpodobnější zkoušené události. Pouze v takovém případě budou podíly různých mechanismů přenosu tepla během vlastního měření stejné jako v průběhu kalibrace.

Jedním z možných příkladů takového isoperibolického kalorimetru je klasický směšovací kalorimetr, který je zobrazen na obrázku 1.10.



Obrázek 1.10: Schéma směšovacího kalorimetru, kde (1) je měřený vzorek; (2) míchadlo; (3) teplotní senzor; (4) kalorimetrická tekutina. [14]

V tomto případě kapalina naplňuje nádobu, která je co možná nejlépe tepelně izolována od okolí. Měřený vzorek o počáteční teplotě T_S se ponoří do kapaliny o teplotě T_{ini} . Kapalina začne měnit svou teplotu do vytvoření konečné teplotní rovnováhy T_{fin} . Bilance vyměněného tepla je pro takovou soustavu formulována jako: [22]

$$c_s \cdot m_s \cdot (T_S - T_{fin}) = c_{liq} \cdot m_{liq} \cdot (T_{fin} - T_{ini}) \quad (1.26)$$

kde c_s je měrná tepelná kapacita vzorku, m_s je hmotnost vzorku, c_{liq} je měrná tepelná kapacita kapaliny a m_{liq} je hmotnost kapaliny. Uvedeny vztah (1.26) platí pouze pro ideální případ, ve kterém veškeré teplo vyprodukované vzorkem slouží k ohřevu kapaliny bez jakýchkoliv teplotních ztrát do okolí.

V reálném případě pouze část tepla vyprodukovaného vzorkem zvyšuje teplotu kapaliny, jelikož se ohřívá samotná nádoba kalorimetru a veškeré další součásti kalorimetru (teplotní senzory, zařízení na promíchávání látek, atd.). Z těchto důvodů je nutné pomocí kalibrace určovat zdánlivou tepelnou kapacitu kalorimetru C_{cal} , která představuje součet dílčích tepelných kapacit složek kalorimetru. Tepelná bilance má následně tvar:

$$c_s \cdot m_s \cdot (T_S - T_{fin}) = C_{cal} \cdot (T_{fin} - T_{ini}) \quad (1.27)$$

Zdánlivá tepelná kapacita kalorimetru C_{cal} představuje kalibrační faktor platný pouze pro specifické podmínky příslušného experimentu. Experimentální stanovení tohoto faktoru se nejlépe provádí pomocí elektrického ohřevu, protože elektrická energie může být jednoduše produkována přesně na požadovaném místě a měřena s velkou přesností.

Skenovací kalorimetry s lineární změnou teploty okolí

V dnešní době patří skenovací kalorimetry (DSC) k jednomu z nejpoužívanějších kalorimetrů. Jejich hlavní výhodou je jejich snadná aplikovatelnost a poměrně přesná měření v krátkých časech. Jedná se o účinný kalorimetr pro zkoumání tepelného chování materiálů při změnách teploty. Převážně se využívají ke zkoumání tepelných kapacit, fázových přechodů a reakcí, které se vyskytují při určitých teplotách.

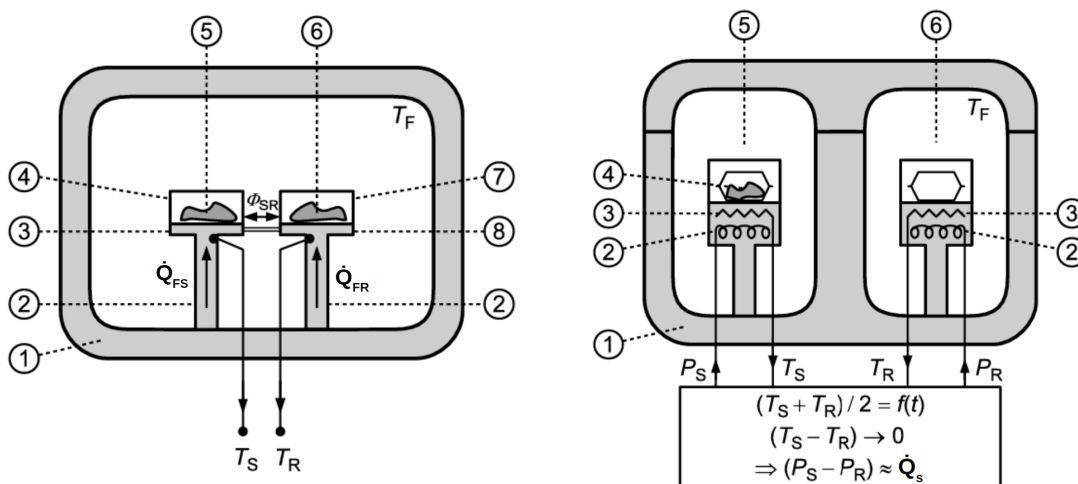
Hlavní charakteristikou skenovacích kalorimetrů je jejich dvojitý design a přímé spojení mezi dvěma měřicími systémy stejného druhu. Jakákoliv změna teploty proto působí na oba měřicí systémy stejně. Možnost přímo měřit rychlost tepelného toku je dosažena porovnáváním měřeného vzorku s referenčním materiálem, který prochází stejným procesem a za stejných podmínek jako daný měřený vzorek. Pokud jsou úniky tepla, a tím i nevyhnutelné chyby měření, vlastní dvěma systémům, pak tyto chyby měření mohou být vzájemně kompenzovány pomocí diferenciálního měření.

U skenovacích kalorimetrů není teplota okolního prostředí, případně měřicího systému udržována konstantní, ale mění se v čase předem stanoveným způsobem tak, aby se teplota okolí T_F měnila konstantní rychlostí $\beta = dT_F/dt$ od počáteční teploty $T_{F,ini}$ podle rovnice: [20]

$$T_F = T_{F,ini} + \beta \cdot t \quad (1.28)$$

V důsledku této změny teploty se díky různým tepelným kapacitám referenčního a měřeného vzorku zásadně mění rozdíl mezi dvěma rychlostmi toku tepla. V praxi se využívají dva základní typy skenovacích kalorimetrů, které se liší odlišným designem přístroje a způsobem měření tepelného toku.

První typ, jehož schéma je zobrazené na obrázku 1.11 (a), je *DSC s tepelným tokem*.



(a) (1) okolí (pec); (2) tepelný most; (3) a (8) podpora vzorků; (4) měřený vzorek; (5) a (6) umístěný vzorků; (7) referenční vzorek.

(b) (1) okolí (pec); (2) elektrický ohřivač; (3) termostat; (4) měřený vzorek; (5) a (6) měřicí systém pro vzorky.

Obrázek 1.11: (a) Diferenciální skenovací kalorimetr s tepelným tokem; (b) Diferenciální skenovací kalorimetr s kompenzací příkonu. [14]

Měřený a referenční vzorek jsou spolu spojeny prostřednictvím tepelného mostu s vysokou tepelnou vodivostí a daným tepelným odporem, který lze definovat pomocí

kalibračního faktoru $K(T)$. Jelikož oba materiály jsou zahřívány stejným tepelným programem (1.28), pak se z důvodu rozdílných tepelných vlastností obou materiálů naměří teplotní difference ΔT mezi měřeným vzorkem a referenčním materiálem. Tento teplotní rozdíl je úměrný velikosti rozdílu tepelného toku do vzorku \dot{Q}_{FS} a do referenčního materiálu \dot{Q}_{FR} , kde

$$\Delta\dot{Q} = K(T) \cdot \Delta T$$

Celkové teplo je pak úměrné rovnici (1.24) resp. [14]

$$Q = \int_{t_{ini}}^{t_{fin}} (\Delta\dot{Q} - g(t)) dt = \frac{1}{\beta} \int_{t_{ini}}^{t_{fin}} (\Delta\dot{Q} - g(T)) dT \quad (1.29)$$

kde funkce $g(t)$ tvoří základní linii tzv. *baseline*. Tato křivka představuje součet tepelného toku samotného měřicího systému a tepelného toku způsobeného samotným rozdílem tepelných kapacit měřeného a referenčního vzorku.

Druhým typem skenovacího kalorimetru je *DCS s kompenzací příkonu* skládající se ze dvou identických měřicích systémů viz. obrázek 1.11 (b), kterých je umístěn měřený a referenční vzorek. Do obou pecí se přivádí stejný tepelný výkon tak, aby průměrná teplota obou systémů vždy odpovídala předem nastavené teplotě, která se mění úměrně s časem podle nastaveného programu dle (1.28). Kromě základního ohřevu těchto dvou měřicích systémů je zde přidán další ohřev kompenzující změřené teplotní rozdíly, které jsou vyvolány tepelnými reakcemi měřeného vzorku. Platí, že jak přidáný kompenzační topný výkon ΔP , tak i tepelný tok \dot{Q} jsou úměrné teplotnímu rozdílu, kde [19]

$$\Delta P = K_1(T) \cdot \Delta T$$

$$\Delta\dot{Q} = K_2(T) \cdot \Delta T$$

Kalibrační faktor K_1 je nastavená veličina proporcionálního regulátoru daná výrobcem kalorimetru a K_2 je faktor nezávislejší na měřicích parametrech a stanovuje se kalibrační přístroje. Celkové teplo je pak úměrné kompenzační energii:

$$Q = \int_{t_{ini}}^{t_{fin}} \Delta P dt \quad (1.30)$$

Modulové kalorimetry s nelineární změnou okolí

Principem těchto kalorimetrů je, že se konvenčním programem lineárního ohřevu přidává další člen, který je modulován pomocí periodických funkcí malé amplitudy. Zobecněný nelineární topný program lze zapsat jako Fourierovu řadu: [19]

$$T_F(t) = T_{F,ini} + \beta \cdot t + \sum_{n=1}^{\infty} T_{A,n} \cdot \sin(n\omega t) \quad (1.31)$$

kde T_A je velikost amplitudy, ω je úhlová frekvence periodické funkce.

Tímto postupem je možné získat podrobnější informace o časově závislých procesech, které ve zkoumaném vzorku probíhají. Modulovaný kalorimetr se hodí pro zkoumání skelného přechodu, krystalizace, odpařování, atd.

Kapitola 2

Bezpečnostní limity a předpisy na LVR-15

Cílem této kapitoly je seznámení se s pracovištěm reaktoru LVR-15 a jeho součástmi, které mají význam pro návrh experimentu na stanovení zbytkového tepelného výkonu paliva IRT-4M. Kromě popisu aktivní zóny reaktoru LVR-15 a paliva IRT-4M jsou zde popsána tři možná úložiště ozářeného paliva, ve kterých by bylo možné provést požadovaný experiment. Dále jsou uvedeny bezpečnostní podmínky a limity, vyplývající z přísných požadavků na projekt výzkumného jaderného zařízení. S těmito bezpečnostními předpisy je nutné počítat, jelikož slouží jako hraniční podmínky pro výpočty. V poslední části této kapitoly jsou popsány metody výpočtu zbytkového tepelného výkonu na reaktoru LVR-15.

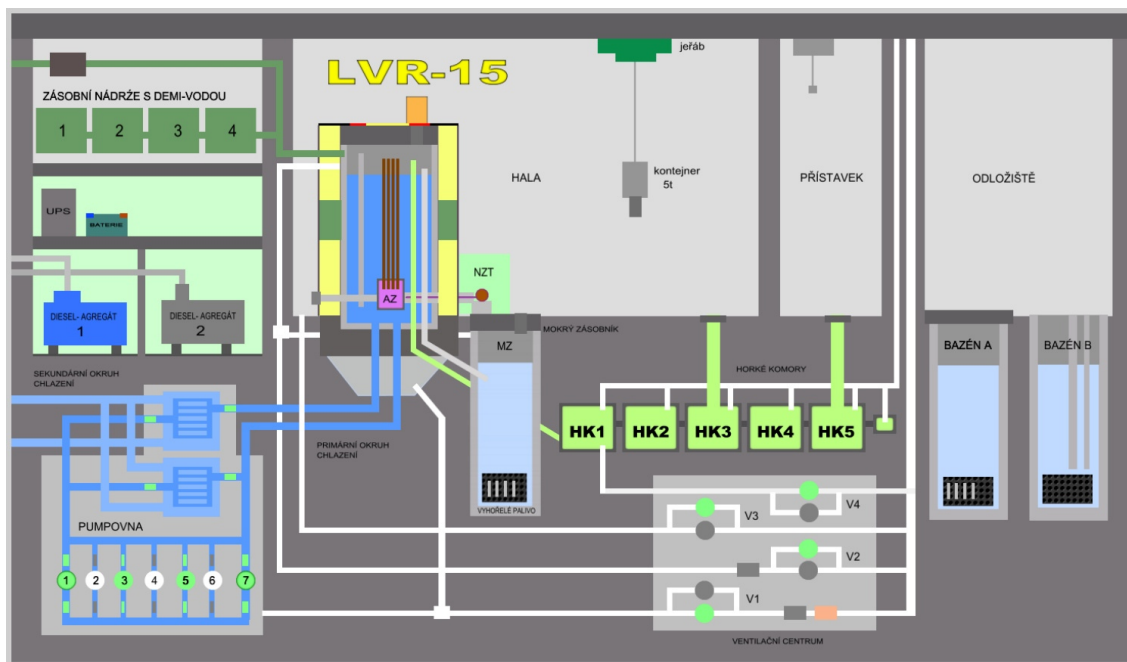
2.1 Popis reaktoru LVR-15

V roce 1957 byl v Ústavu jaderné fyziky ČSAV v Řeži u Prahy spuštěn první výzkumný reaktor v tehdejší ČSSR. Tento reaktor měl tepelný výkon 2 MW a nesl název VVR-S. V osmdesátých letech byl provoz lehkovodního reaktoru VVR-S ukončen a reaktor byl z důvodu zvýšení výkonu a bezpečnosti provozu rekonstruován na reaktor LVR-15. [23]

Reaktor LVR-15 je výzkumný lehkovodní reaktor tankového typu umístěný v beztlakové nádobě pod stínícím víkem a s maximálním provozním výkonem do 10 MW_t. Moderátorem i chladičem je demineralizovaná voda, reflektor je tvořen podle provozní konfigurace buď vodou, nebo bloky berylia.

Reaktor LVR-15 se využívá díky svému intenzivnímu zdroji neutronů jako univerzální výzkumné jaderné zařízení pro potřeby českého výzkumu a průmyslu. Kromě smyčkových a sondových experimentů, které jsou zaměřeny na materiálové a fyzikálně metalurgický výzkum se reaktor využívá k neutronové aktivační analýze, výrobě radioizotopů, radiofarmak atd. [24]

Zjednodušený náčrt reaktoru LVR-15 a jeho jednotlivých částí je zobrazen na Obr. 2.1. Podrobnější popis jednotlivých částí, které jsou podstatné pro tuto diplomovou práci budou popsány v níže.



Obrázek 2.1: Mapa reaktoru LVR-15. [24]

2.1.1 Aktivní zóna

Aktivní zóna (AZ) reaktoru LVR-15 je umístěna ve středu reaktorové nádoby tak, aby její střed byl cca 1,5 m nad dnem reaktoru a přibližně 4,3 pod víkem nádoby. Az tvoří hliníkový koš (tzv. separátor) o rozměrech 815 x 675 mm a výšce 880 mm, do kterého jsou zakládány palivové soubory, beryliové bloky, hliníkové vytěsnitele a ozařovací kanály. Tato zóna má obdélníkově uspořádanou mříž obsahující celkem 80 (10 x 8) pozic s roztečí 71,5 mm. [25]

Aktivní zóna může obsahovat 28 až 34 palivových kazet, z toho ve 12 palivových souborech jsou umístěny regulační tyče. Některé buňky mezi palivem jsou určeny pro kanály sond. Na periferii aktivní zóny bývají umístěny aktivní kanály experimentálních smyček, rotační kanál pro ozařování křemíku, potrubní pošta a vertikální ozařovací kanály. Pro provoz platí, že konfigurace musí být vždy uzavřená; to znamená, že buňky, které nebudou obsazeny palivovými sekcemi, musí být obsazeny speciálními vytěsniteli, které jsou tvořeny beryliovými reflektory nebo vodními vytěsniteli.

AZ lze v zásadě provozovat ve dvou variantách. První a základní variantou je tzv. kompaktní konfigurace s jedním až čtyřmi smyčkovými kanály. Pro zvýšení hustoty toku tepelných neutronů je možné v centru aktivní zóny vystavět neutronovou past. Tato centrální neutronová past může obsahovat vodní vytěsnitele, beryliové bloky, vhodné ozařovací kanály nebo vzduchové vytěsnitele. Výhodou tohoto uspořádání je výrazné zvýšení toku tepelných neutronů v této oblasti v porovnání se základní konfigurací. Hlavní využití takto vzniklých ozařovacích pozic je zejména při ozařování terčů pro výrobu Mo - Tc generátorů. Druhou variantou je konfigurace pro neutronovou zachytovou terapii, kdy je pomocí vzduchových vytěsnitelů vyváděn svazek neutronů do prostoru bývalé tepelné kolony. [25]

Reaktor je provozován kampanovitým způsobem. Obvykle je reaktor provozován v třítydenní nepřetržité provozní kampani s přestávkou 10–14 dní. Během odstávky

je provedena údržba a výměna paliva nebo v nestandardních kampaních pro krátkodobé experimenty podle požadavků experimentátorů.

Generované teplo v aktivní zóně je odváděno přes tři chladicí okruhy do řeky Vltavy. Primární chladicí okruh je osazen pěti hlavními cirkulačními čerpadly a dvěma havarijními čerpadly pro nouzové dochlazování připojenými na akumulátory, které zajišťují průtok chladicí demineralizované vody aktivní zónou a tepelnými výměníky. Při výpadku vnějšího napájení reaktoru el. energií je chlazení AZ a odvod zbytkového tepla zajišťován nucenou cirkulací pomocí HCČ a jedním čerpadlem pro nouzové dochlazování, která jsou napájena el. energií ze samostatného diesel-generátoru. Maximální střední teplota chladicího média na výstupu z reaktoru je 51,5 °C, maximální střední teplota na vstupu je 45 °C, nejvyšší průtok primárním okruhem je 2100 m³/h. [26]

2.1.2 Palivo IRT-4M

V aktivní zóně reaktoru LVR-15 jsou používány výhradně palivové soubory IRT-4M od ruského výrobce NZCHK Novosibirsk (konsorcium TVEL), na které přešel reaktor v roce 2011 v rámci programu RERTR, iniciovaným DOE (United States Department of Energy) na snížení obohacení paliva ve výzkumných jaderných reaktorech. [26]

Palivové soubory (PS) IRT-4M jsou sendvičového typu a vyrábějí se v osmitrubkové, šestitrubkové a čtyř trubkové variantě². Palivové jádro je tvořeno disperzí UO₂ s obohacením 19,7 % ²³⁵U v hliníkové matici. Při výrobě dochází k těsnému spojení obálky s palivem. Soubory IRT-4M mají formu koncentrických trubek čtvercového průřezu o celkové délce 880 mm, s aktivní (palivovou) částí o délce 600 mm.

Trubky jsou na obou koncích osazené koncovkami z materiálu SAV1. Pokrytí paliva je také vyrobeno z materiálu SAV1. Horní koncovka má otvor o průměru 64 mm pro uchopení PS manipulační tyčí. Spodní koncovka má čtyři výřezy o šířce 8 mm, hloubky 35 mm pro usazení v nosné desce aktivní zóny. Ve středu osmitrubkového PS je hliníkový vyjímatelný vytěsňitel pro usměrnění průtoku vody. [25]

Osmitrubkový PS je základní stavební jednotkou při výstavbě aktivní zóny reaktoru LVR-15. Do centrální trubky šestitrubkového palivového souboru je možno instalovat kanál s regulační tyčí nebo ozařovací kanál.

Základní jaderně fyzikální a geometrické charakteristiky palivových souborů jsou uvedeny v tabulkách 2.1, 2.2 a 2.3. Mechanické vlastnosti pokrytí jsou v tabulce 2.4. Výkresy osmitrubkových, resp. šestitrubkových palivových souborů jsou uvedeny v příloze A resp. B. [27]

²V reaktoru LVR-15 se používají pouze osmi a šesti trubkové palivové soubory

Složení palivového jádra	UO ₂ - Al	
Obohacení	19,7	[%]
Váhové zastoupení izotopů v palivovém jádru		
- ²³⁵ U	10,9	
- ²³⁸ U	44,2	
- Al	37,5	
- O	7,5	
Složení pokrytí	slitina SAV1	
Obsah ²³⁵ U ve		
- standardním PS	300,0 ± 15,0	[g]
- regulačním PS	263,8 ± 13,1	[g]
Celková hmotnost PS		
- standardního	6,0	[kg]
- regulačního	5,2	[kg]

Tabulka 2.1: Složení palivových souborů IRT-4M. [25]

Počet trubek		
- standardní PS	8	
- regulační PS	6	
Tloušťka stěny trubky	1,6	[mm]
Tloušťka pokrytí	0,45	[mm]
Minimální tloušťka pokrytí	0,30	[mm]
Tloušťka palivového jádra	0,7	[mm]
Délka palivového jádra v trubkách	600	[mm]
Hustota uranu v palivovém jádru	2,79	[gU/cm ³]
Tepelná vodivost λ pro 80-120 °C	80	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
Objem palivového jádra ve		
- standardním PS	551	[cm ³]
- regulačním PS	483	[cm ³]
Celková délka	882	[mm]
Příčný průřez	69,6 x 69,6	[mm]
Krok mřížky zóny	71,5	[mm]

Tabulka 2.2: Uspořádání palivového souboru IRT-4M. [25]

	Vnější rozměry [mm]	Poloměr zakřivení rohů [mm]
1. trubka	69,6	9,3
2. trubka	62,7	8,5
3. trubka	55,8	7,7
4. trubka	48,9	6,9
5. trubka	42,0	6,1
6. trubka	35,1	5,3
7. trubka	28,2	4,5
8. trubka (válcová)	21,3	
Vodní mezera mezi palivovými články [mm]	1,85	

Tabulka 2.3: Vnější rozměry trubek a poloměr zakřivení rohů [mm] palivových souborů IRT-4M. [25]

Hustota ρ	2,68	[g/cm ³]
Tepelná vodivost λ	201	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
Součinitel délkové teplotní roztažnosti α	22,3 · 10 ⁻⁶	[K ⁻¹]
Měrný elektrický odpor ρ	2,86 · 10 ⁻⁶	[Ω/cm]
Mez pevnosti σ	(2,06 - 2,26) · 10 ²	[MPa]
Mez tečení σ	1,08 · 10 ²	[MPa]
Modul pružnosti E	(6,3 - 6,7) · 10 ⁴	[MPa]
Tažnost při prasknutí δ	29	[%]

Tabulka 2.4: Základní vlastnosti hliníkové slitiny SAV1 pro rozmezí teplot 20–100 °C. [25]

2.2 Skladování ozářeného paliva

Pro skladování ozářených palivových souborů vytažených z aktivní zóně slouží na reaktoru LVR-15 bazén mokrého zásobníku vedle reaktoru, bazény A,B (odložiště RAO) a sklad VAO.

2.2.1 Mokrý zásobník

Nádrž mokrého zásobníku se nachází na hale reaktoru v objektu 211/1 a je určena ke skladování a přechodnému uložení vyhořelých palivových kazet na jejich dochlazení, které jsou vyjmuty z AZ před tím, než jsou odvezeny do skladu VAO. Mokrý zásobník je vyroben ze dvou svařovaných nádob. Vnější nádoba je z nerezavějící oceli o tloušťce 5 mm a vnitřní nádoba je z hliníkové slitiny SAV1 o tloušťce stěny 14-15 mm a dna 30 mm. [28]

Nádoba o objemu 8,42 m³ je umístěna v betonové šachtě pod úrovní podlahy haly reaktoru z boku reaktoru LVR-15. Nádrž je zakryta třemi litinovými deskami silnými 500 mm, ve kterých jsou zapuštěny dva manipulační otvory se zátkami. Spojení horního okraje nádoby reaktoru se zásobníkem je provedeno šikmou trubkou, která ústí u dna zásobníku.

Na dně MZ je umístěna kazetnice z hliníkové slitiny SAV1 zajišťující podkritičnost celého systému. Samotná kazetnice má rozměry 740 mm x 1800 mm a obsahuje 60 buněk s roztečí mříže 150 x 150 mm pro jednotlivé palivové články vyjmuté z AZ reaktoru. Prostředí, ve kterém jsou PS skladovány, tvoří demineralizovaná voda stejných parametrů, jaké jsou předepsány pro primární okruh jaderného reaktoru. Teplota vody v mokrého zásobníku je z větší části ovlivněna okolní teplotou vzduchu uvnitř haly reaktoru. Z měření teploty vody v MZ je prokázáno, že tato voda ani v létě nepřekračuje teplotu 30 °C. [29]

Zařízení MZ je zařazeno do bezpečnostní třídy 3 podle bodu 1.3.8., 1.3.9., 1.3.10. přílohy č.1, vyhlášky č. 329/2017 Sb. Technický výkres mokrého zásobníku s kazetnicí na PS je uveden v příloze C. [28]

2.2.2 Odložiště vyhořelého paliva

V zadním traktu objektu 211/7, který navazuje na halu reaktoru, jsou umístěny dva bazény sloužící jako odložiště vyhořelého paliva k dočasnému dočasnému skladování, ukládání zaktivovaných sond, smyček a dalších aktivních materiálů a k přechodnému uskladnění vyhořelých palivových kazet. S halou reaktoru je objekt spojen vraty přes přístavek. Z haly do objektu vedou koleje, po kterých jezdí elektrická drezína určená pro přepravu ozářených souborů s VP nebo s radioaktivními částmi experimentálního zařízení o vysokém dávkovém příkonu.

Vlastní skladovací prostor sestává ze dvou bazénů (A a B) napuštěných demineralizovanou vodou.

Bazén A má vnitřní rozměry 230 x 120 cm s hloubkou 6 m a je využívám převážně pro dočasné skladování ozářeného paliva v mřížové kazetnici s roztečí 150 x 150 mm. Tato kazetnice má kapacitu 96 buněk pro skladování VP s 0,5 mm tlustým plátkem kadmia vloženého mezi sousedící buňky. Teplota vody bazénu je převážně ovlivněna okolní teplotou vzduchu uvnitř objektu. Průměrná celoroční teplota vody je okolo 16 °C a v létě nepřesahuje 20 °C. [29]

Bazén B má obvod 440 x 120 cm, hluboký 6 m a slouží k dočasnému skladování zaktivovaných sond, smyček a dalších vysoce aktivních materiálů. Bazény byly postaveny z těžkého betonu nalitého mezi vnitřní a vnější plášť nerezové vany. Stěna a dno bazénu jsou tvořeny nerezovým vnitřním pláštěm, těžkým betonem síly 50 cm a vnější nerezovou stěnou. Skrz stěny ani dno bazénů neprocházejí žádné trubky. Výkres obou bazénů je uveden v příloze D. [28]

K příslušenství těchto bazénů patří technologický okruh na čištění vody a čerpadlo na odčerpávání vody o výkonu 60 l/min. Odběr vody pro filtraci a její vracení je realizováno trubkami vedenými uvnitř bazénu. Bazény nemají ve dně vypouštěcí otvor. Pro uložení VP jsou na dno bazénů postaveny stojany ze slitiny hliníku. Pro zavěšení experimentálního zařízení jsou na stěnách bazénu cca 30 cm pod horním okrajem instalovány držáky. Suché kanály jsou betonové o průměru 20 cm a hloubkou 5,5 m. [30]

Kromě bazénů je zde ještě šest suchých nerezových odkládacích kanálů zapuštěných do podlahy. Stínění aktivních zařízení v bazénech zajišťuje vrstva vody a v suchých kanálech ocelové zátky.

2.2.3 Sklad vysoce aktivních odpadů

Sklad vysoce aktivního odpadu (VAO) je určen ke skladování vyhořelého paliva a pevných VAO produkovaných z výzkumných reaktorů a RAO z některých dalších činností pro společnost ÚJV Řež a.s. a společnosti CVŘ s.r.o. Sklad VAO je situován mimo budovu reaktoru (objekt 211/8) a je řešen jako prefabrikovaná hala s půdorysem přibližně 12 x 72 m a výšce 15 m. Vnitřní prostor je rozčleněn na osm betonových boxů čtvercového půdorysu pro suché skladování pevných radioaktivních odpadů v suchých betonových obalových souborech.

Dva válcové bazény slouží pro mokré skladování vyhořelého paliva IRT-4M. Bazény jsou tvořeny vnitřní nerezovou nádrží umístěnou v nádrži z uhlíkaté oceli, která je usazena v betonovém loži. Bazény mají průměr 4,6 m a výšku hladiny vody 5 m. Skladovací kapacita bazénu A je 300 ks PS, bazénu B je 465 ks PS. Pro skladování VP je používán bazén B, bazén A slouží jako rezervní. Skladovací prostor boxů je ve vodorovných rovinách rozdělen betonovými panely na tři prostory. Horní krycí vrstvu tvoří dvě vrstvy stínících panelů. Rozměry boxů jsou 5,75 x 5,75 x 5 m. [30]

2.3 Bezpečnostní limity pro zacházení s palivem

Cílem jaderné bezpečnosti je chránit člověka, společnost a životní prostředí před radioaktivním ozářením a kontaminací. Požadavky na jadernou bezpečnost jaderných zařízení jsou v České republice obecně formulovány Vyhláškou č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt jaderného zařízení. Z ní vycházejí i požadavky na bezpečnost provozu reaktoru LVR-15, která je zajištěna kombinací inherentních bezpečnostních vlastností, inženýrských systémů a administrativních opatření.

Prováděné bezpečnostní analýzy reaktorových systémů jsou zaměřeny na kontrolu tepelně-hydraulického stavu palivových souborů IRT-4M. Systémy reaktoru musí zabezpečit adekvátní odvod tepla z palivových souborů nejen za normálních, nebo abnormálních, ale i za havarijních podmínek. Dále musí být všechny systémy reaktoru vybaveny bariérami, které brání úniku radioaktivních látek do životního prostředí a v případě vzniku havarijních podmínek znemožňují, nebo alespoň minimalizují jejich únik. [31]

2.3.1 Limitní provozní podmínky mokrého zásobníku

Cílem limitních provozních podmínek mokrého zásobníku je zajistit podkritičnost při skladování vyhořelého paliva a zajistit správné podmínky pro jeho skladování.

Pokud je vyhořené palivo v reaktoru, musí být v mokrému zásobníku dostatečný počet volných buněk k umístění tohoto paliva pro případ havárie. To znamená, že v kazetnici musí být trvale k dispozici 34 volných pozic nebo nejméně tolik, kolik je palivových souborů v aktivní zóně.

Samotná podkritičnost systému je zajištěna uložením PS ve stabilní kazetnici, jejíž rozteč mříže o rozměrech 150 x 150 mm zajišťuje dostatečnou podkritičnost. Mimo mříž není povoleno palivo skladovat.

Zbytkové teplo se je z PS odváděno pomocí přirozené konvekce. Nepřekročení limitních podmínek je zabezpečeno velkým vodním objemem mokrého zásobníku, ve kterém teplota chladicí vody nesmí přesáhnout 55 °C a hladina vody nesmí být menší než 3,2 m. V případě nesplnění těchto podmínek je nutné vodu doplnit nebo do 24 hodin instalovat přídatné chlazení. [32]

2.3.2 Limitní provozní podmínky odložiště VP

Podobně jako u mokrého zásobníku, jsou podmínky pro odložiště VP nastaveny tak, aby byla zajištěna jeho podkritičnost, byl zajištěn správný vodní režim pro skladování ozářených PS, zajištěna skladování nepoužívaných experimentálních zařízení a zamezeno únikům radioaktivních látek.

První podmínkou je, že ozářené palivové soubory je možné skladovat pouze v bazénu A. V bazénu B jsou skladována ozářená experimentální zařízení a části zařízení reaktoru. Palivové soubory je přípustné umísťovat pouze v úložných pozicích ve stojanech. Netěsné palivové soubory jsou skladovány v utěsněných pouzdech, která jsou zavěšena na stojanech. Samotná konstrukce stojanů zajišťuje podkritičnost minimálně $7 \beta_{eff}$ pro čerstvé palivo vyhovující §13 vyhlášky 329/2017 Sb. [32]

Odvod zbytkového tepla z PS je v odložišti VP zajištěn pomocí přirozené konvekce a nepřekročení limitních podmínek je zajištěno velkým objemem vody v bazénu

A a nízkým zbytkovým tepelným výkonem PS, který je daný dobou minimálně jednoho roku, po kterou musí PS strávit v mokřem zásobníku před jeho přepravou do odložiště VP. Hladina vody v bazénu při skladování paliva je minimálně ve výši 3,5 m ode dna bazénu a teplota chladicí vody nesmí přesáhnout 40 °C. Teplota se měří 1x za dva týdny pomocí ponorného teploměru. Není-li tato podmínka naplněna, je nutné neprodleně zajistit ochlazení vody jejím doplněním do bazénu, nebo neprodleně instalovat pomocné chlazení. [32]

2.3.3 Limitní provozní podmínky paliva IRT-4M

Z požadavků vyšší bezpečnostní úrovně plynou konkrétní postuláty na stav palivových trubek v podmínkách projektových nehod. Bezpečnostní kritéria sledují různé mechanismy porušení palivových trubek a stanovují limitní hodnoty kritériálních parametrů odpovídajících těmto mechanismům, při jejichž nepřekročení je garantováno zachování celistvosti pokrytí paliva.

Z hlediska termohydrauliky je bezpečnostním kritériem paliva IRT-4M nedovolení vzniku povrchového varu. Z těchto důvodů je výrobcem paliva stanoveno kritérium zásoby do povrchového varu Z_{pv} . Toto kritérium podle doporučení musí být větší nebo rovné 1,3 a je definována jako: [33]

$$Z_{pv} = \frac{T_{pv} - T_{vst}}{T_{ps} - T_{vst}} \quad (2.1)$$

kde T_{ps} je teplota povrchu palivového souboru vypočtena dle korelace pro přestup tepla při konvekci, T_{vst} je teplota chladiva na vstupu do palivového souboru a T_{pv} představuje teplotu povrchu palivového souboru vypočtena pro přestup tepla při povrchovém varu. Teplota povrchového varu T_{pv} se na doporučení výrobce paliva určuje dle Berglesa-Rohsenow korelace, která bere v potaz závislost lokálního tlaku p_{lok} při kterém na teplosměnném povrchu vznikají první parní bubliny, příslušnou teplotu sytosti T_S a plošnou hustotu tepelného toku q'' : [33]

$$T_{pv} = T_S + 0,555 \left(\frac{q''}{1,05 \cdot p_{lok}^{1,156}} \right)^{\frac{p_{lok}^{0,0234}}{2,17}} \quad (2.2)$$

Dle limitních a provozních podmínek reaktoru LVR-15 nesmí maximální zbytkový výkon po odstavení reaktoru pracujícího na výkonu 10 MW přesáhnout 0,8 MW. [32]

Souhrn všech limitních provozních podmínek pro palivo IRT-4M je shrnut v tabulce 2.5.

Maximální tlak na vstupu do AZ		0,132	[MPa]
Maximální tlakový spád chladiva na AZ		0,039	[MPa]
Minimální průtok chladiva primárním okruhem		200	[m ³ /hod]
Max. rychlost chladiva v mezerách mezi palivovými trubkami		3,6	[m/s]
Maximální teplota vody na vstupu do AZ		50	[°C]
Maximální měrný vydělovaný výkon ve vrstvě paliva při výkonu reaktoru 10 MWt (s uvážením vydělovaného výkonu v PS 93%)		1725	[MW _t /m ³]
Maximální plošný tepelný tok	q	0,663	[MW _t /m ²]
Maximální teplota pokrytí paliva	T_{ps}	98	[°C]
Koeficient zásoby do povrchového varu	Z_{pv}	1,3	
Teplota začátku povrchového varu vypočtena dle korelace Bergles-Rohsenow	T_{pv}	112,4	[°C]

Tabulka 2.5: Limitní provozní podmínky pro palivo IRT-4M. [27]

2.4 Zbytkový tepelný výkon reaktoru LVR-15

Termohydraulické výpočty jaderného paliva IRT-4M jsou na reaktoru LVR-15 založeny na bodovém modelu neutronové kinetiky reaktoru s tím, že všechny vstupní parametry modelu kinetiky reaktoru jsou převzaty z neutronově-fyzikálních výpočtů aktivní zóny LVR-15. Pomocí tohoto modelu lze spočítat jak okamžitý neutronový výkon, tak zbytkový tepelný výkon palivových souborů, který se stanovuje pomocí normy ANSI/ANS 5.1-1979 nebo ANSI/ANS-5.1-1994, realizovaném ve výpočtovém kódu RELAP/MOD3.3 konzervativně násobeným koeficientem 1,15. Zahrnuty jsou též zdroje tepla pocházející z rozpadu aktinidů. Zbytkový výkon se počítá za předpokladu předcházející nekonečné doby provozu reaktoru na počátečním výkonu. [33]

Hlavními oblastmi využití výpočetního programu RELAP.5/MOD3.3 jsou komplexní výpočetní analýzy stacionárních, přechodových a havarijních procesů, které mohou nastat v systémech vybavených zdrojem tepla a využívajících jako hlavní teplotnostné médium vodu v jedno; nebo dvoufázovém stavu.

Dalším výpočetním programem pro výpočet zbytkového tepelného výkonu palivových souborů na reaktoru LVR-15 se používá modul ORIGEN obsažený v programu SCALE. ORIGEN počítá časově závislé koncentrace, aktivity a zdroje záření pro velké množství izotopů současně produkovaných a absorbovaných pomocí štěpení a radioaktivního rozpadu v závislosti na výkonu reaktoru. Tepelná energie rozpadu je pak určována jako součet jednotlivých příspěvků od každého radionuklidu za pomoci jaderných knihoven.

Model pro výpočet zbytkového tepelného výkonu závisí na výpočetním programu, použitém pro bezpečnostní analýzy. Tyto programy vycházejí při výpočtu z provozní historie daného palivového souboru a sledují jeho celkové vyhoření, které závisí na typu paliva, výkonu reaktoru, efektivní dobu kampaně, atd.

Tabulky 2.6 a 2.7 ukazují srovnání průběhu zbytkového výkonu pro maximálně zatížený osmitrubkový palivový soubor IRT-4M s výkonem cca 563 kW.

První dva sloupce obsahují hodnoty počítané pomocí konzervativních metod jako je Wigner-Wayova křivka (1.6), nebo Glasstone křivka (1.8) popsané v kapitole 1.1.2, pro PS ozařovaný po dobu jednoho roku na výkonu 10 MW. Třetí sloupec byl počítán pomocí normy ANS 5.1 pro palivo v reaktoru MNR po dobu 10 let ozařování na nominálním výkonu 2 MW a přepočten za účelem srovnání na výkon palivového souboru. [9] [33]

Poslední sloupec byl vypočítán pomocí programu SCALE v modulu ORIGIN pro osmitrubkový palivový soubor IRT-4M, který byl ozařován 2 roky na nominálním výkonu 10 MW v reaktoru LVE-15. [33]

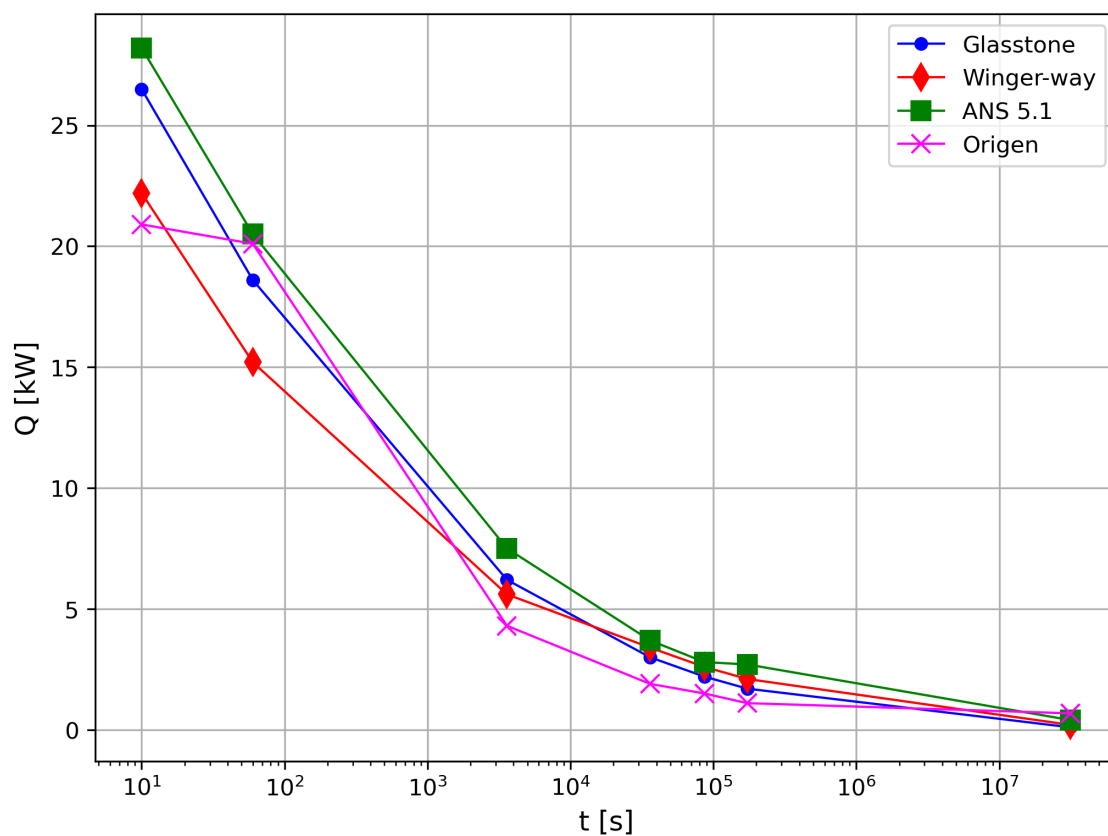
V grafu 2.2 jsou zaneseny závislosti zbytkového výkonu palivového souboru IRT-4M na reaktoru LVR-15 v čase pro různé výpočetní programy z tabulky 2.6 a 2.7.

Zbytkový výkon po čase	Glasstone LVR - 15 [%]	Wigner - Way LVR - 15 [%]	ANS 5.1 [%]	ORIGEN [%]
10 sekund	4,70	3,95	5,15	5,70
1 minuta	3,30	2,70	3,69	5,13
1 hodina	1,10	1,00	1,17	1,20
10 hodin	0,53	0,60	0,61	0,53
24 hodin	0,39	0,47	0,48	0,39
48 hodin	0,30	0,38	0,39	0,30
1 rok	0,02	0,03	0,09	0,09

Tabulka 2.6: Zbytkový výkon palivového souboru IRT-4M na reaktoru LVR-15 po odstavení z 10 MW v procentech nominálního výkonu. [9] [29] [33]

Zbytkový výkon po čase	Glasstone LVR - 15 [kW]	Wigner - Way LVR - 15 [kW]	ANS 5.1 [kW]	ORIGEN [kW]
10 sekund	26,5	22,2	29,0	20,9
1 minuta	18,6	15,2	20,5	18,8
1 hodina	6,2	5,6	7,5	4,4
10 hodin	3,0	3,4	3,4	1,9
24 hodin	2,2	2,6	2,7	1,4
48 hodin	1,7	2,1	2,2	1,1
1 rok	0,1	0,2	0,5	0,3

Tabulka 2.7: Zbytkový výkon palivového souboru IRT-4M na reaktoru LVR-15 po odstavení z 10 MW v kW. [9] [29] [33]



Graf 2.2: Zbytkový tepelný výkon palivového souboru IRT-4M v čase stanovený pomocí různých výpočetních programů.

Kapitola 3

Zhodnocení přijatelných variant

V předchozích kapitolách je podrobně rozebrána problematika zbytkového tepelného výkonu palivových souborů, kalorimetrických metod a bezpečnostních limitů na reaktoru LVR-15, které představují určitá omezení pro návrh experimentu. Na základě teoretické části v této kapitole zhodnotím možné lokality experimentu a možné konstrukční řešení kalorimetru.

3.1 Výběr lokality experimentu

Podkapitoly 2.2 a 2.3 se zabývají popisem lokací využívající se pro skladování palivových souborů vyzvednutých z AZ reaktoru LVR-15 a jejich limitními provozními podmínkami. Přestože jsou v areálu ÚJV Řež tři místa pro skladování ozářených palivových souborů, tak pouze dvě místa připadají v úvahu pro experimentální měření v kalorimetru. Pro sklad VAO platí přísná bezpečnostní pravidla a dle jejich limitů a podmínek by nebylo možné provést navržený kalorimetrický experiment.

Další překážka spočívá v tom, že transport ozářených palivových do skladu VAO, se může provádět pouze po dvouletém skladování v bazénech na pracovišti reaktoru LVR-15. K transportu je použito obalového souboru Škoda VPVR/M, u kterého je stanoven maximální povolený zbytkový výkon jednoho PS na 37,5 W. Z tohoto důvodu by nebylo možné měřit PS o vyšším výkonu. [34]

Kalorimetrické měření lze provést pouze v MZ, případně v bazénu A odložiště vyhořelého paliva, které se obě nacházejí přímo v objektu 211/7. Hlavní předností bazénu A odložiště vyhořelého paliva je jeho nižší průměrná teplota vody oproti MZ, kde mohou být teploty až o 10 °C vyšší. Tento teplotní rozdíl by mohl navýšit dobu do překročení maximální teploty pokrytí paliva. Na druhou stranu bazén A je vybaven technologickým okruhem na čištění vody, který může negativně ovlivnit výsledky měření.

Výhoda MZ spočívá v přímé návaznosti na reaktor, jelikož lze dopravovat palivové soubory přímo z aktivní zóny za pomoci pětitudového přepravníku, ručních manipulačních tyčí a tubusem spojující reaktor s MZ. Tímto způsobem by bylo možné měřit zbytkový tepelný výkon čerstvých palivových souborů. Pro přesun ozářených palivových souborů do bazénu A odložiště se provádí pomocí pětitudového přepravníku, který se s vloženým palivovým souborem přeloží na drezínu a převezé nad bazén A, kde se palivový soubor pomocí manipulačních tyčí přesune do vyhrazené buňky. Tuto proceduru nelze provádět s čerstvě vytaženými PS z AZ a proto se PS musejí po určitou dobu chladit v MZ než se přesunou do odložiště.

Další výhoda MZ spočívá v menší vytíženosti skladovacích kapacit. Dle dokumentu LaP může být v MZ najednou obsazeno pouze 26 pozic v kazetnici z celkového počtu 60 buněk, zatímco odložiště vyhořelého paliva podobnou limitní podmínku postrádá. Bylo by tedy možné přesunout všechny palivové soubory z MZ do odložiště vyhořelého paliva tak, aby měření nebylo ovlivněno tepelnými výkony ostatních PS. V opačném případě je množství přesunutých palivových souborů omezeno dokumentem LaP. [32]

Z výše uvedených důvodů je kalorimetrické měření palivových souborů v mokřém zásobníku výhodnější než v bazénu A odložitě vyhořelého paliva.

3.2 Výběr použitelných konstrukčních řešení kalorimetru

V podkapitole 1.2 byly kalorimetry rozděleny do tří skupin v závislosti na fyzikálním principu výměny tepla s okolím: kalorimetry izotermické, adiabatické a isoberibolické. Ačkoliv na těchto třech skupinách je založena řada různých druhů kalorimetrů s rozdílnými vlastnostmi a možnostmi použití, nejsou všechny typy kalorimetrů vhodné k měření tepelného výkonu na jaderném reaktoru.

3.2.1 Izotermické kalorimetry

Mezi výhody kalorimetrů založených na izotermickém ději patří jejich relativně jednoduchá konstrukce a vysoká citlivost. Přesto je nelze v podmínkách měření na jaderném reaktoru využít.

K udržení stejné teploty uvnitř a vně kalorimetrické nádoby by nebylo možné měření provádět v bazénech, které jsou používány pro skladování aktivních palivových souborů.

Izotermické kalorimetry s elektrickou kompenzací by pro svoji realizaci potřebovaly druhou referenční komoru a zařízení, které by bylo schopné kompenzovat teplotní rozdíly tak, aby byly obě komory udržované na stejné teplotě.

Konstrukční návrhy izotermického kalorimetru, které by byly schopné měřit zbytkový tepelný výkon palivových souborů, by tak byly komplikované a jejich použití by přinášelo značné bezpečnostní riziko.

3.2.2 Adiabatické kalorimetry

Výhoda adiabatických kalorimetrů spočívá v jednoduchém výpočtu tepelného toku dle rovnice (1.18). V takovém případě by pro experiment stačilo v kalorimetru měřit změnu teploty jako funkci času.

Hlavní komplikace při použití kalorimetru založeném na adiabatickém principu spočívají v:

1. Kalibračním řešením, kterým by bylo možné stanovit tepelnou kapacitu měřícího systému;
2. technickém řešení, které by zajistilo, aby mezi měřícím systémem a jeho okolím docházelo k minimálním únikům tepla skrze stěnu kalorimetru pro přiblížení se k ideálním adiabatickým podmínkám;

3. nepřekročení bezpečnostních limitů pro palivo IRT-4M popsaných v podkapitole 2.3.

Kalibrační měření, kterým lze stanovit tepelnou kapacitu měřícího systému pro adiabatický kalorimetr se zakládá na stejném principu jaký bude použit pro finální návrh kalorimetru použitého na reaktoru LVR-15 a tato kalibrace bude detailně v podkapitole 4.4.

Technické řešení adiabatického kalorimetru spočívá z kalorimetrické nádoby, která by obsahovala dostatečný počet tepelných čidel pro měření teplotního rozdílu v čase uvnitř kalorimetrické nádoby. Adiabatické podmínky lze zajistit dostatečnou vrstvou izolačního materiálu obklopujícího kalorimetrickou nádobou, která by zaručovala minimální tepelný tok skrz nádobu kalorimetru.

Druhou možností by bylo vytvoření sekundárního ocelového obalu okolo kalorimetrické nádoby a odčerpáním teplotnosného média ve vzniklém meziprostoru. Tímto postupem získáme dostatečný tepelný odpor mezi kalorimetrickou nádobou a okolním prostředím.

Ani jedna z těchto alternativ technického řešení adiabatického kalorimetru nedosahuje ideálních adiabatických podmínek. I přes snahu minimalizovat tepelný tok z kalorimetrické komory do okolí bude největší únik tepla přes horní i spodní přírubu zařízení a průchodky měřící elektroniky.

I přes tyto nedokonalosti od ideálního stavu je možné vytvořit *pseudoadiabatický* kalorimetr, který měří zbytkový tepelný výkon jaderného paliva s dostatečnou přesností. Největší omezení pro použití takového kalorimetru spočívá v nepřekročení bezpečnostních limitů stanovených pro palivo IRT-4M v podmínkách měření na adiabatickém kalorimetru.

Uvažujeme-li nejjednodušší variantu kalorimetru, která vychází z konstrukce pouzdra na palivový článek používaný běžně na reaktoru LVR-15 pro netěsné PS. Pouzdro s průměrem 125 mm a výšce 889 mm, je celá obalena dostatečnou izolací, která minimalizuje tepelný tok vystupující z vnitřku pouzdra.

Použitý odhad pro dobu ohřevu vody v kalorimetrické nádobě vychází z tepelné bilance systému, kterou lze vyjádřit takto: "Rychlost změny celkové energie systému Q za čas během procesu se rovná rozdílu mezi rychlostí celkové energie vstupující do systému \dot{Q}_{in} a celkové rychlosti energie opouštějící systém \dot{Q}_{out} během tohoto procesu." [21]

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = \frac{dQ}{dt} \quad (3.1)$$

Úpravou rovnice (3.1) pro uzavřený stacionární systém, tzn. adiabatický, lze dobu ohřevu t vyjádřit jako podíl množství tepla potřebného pro navýšení množství vody m s teplenou kapacitou c o teplotní rozdíl ΔT a tepelného toku palivového souboru \dot{Q}_{PS} a ve tvaru:

$$t = \frac{Q}{\dot{Q}_{PS}} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{\dot{Q}_{PS}} \quad (3.2)$$

V grafu 3.1 je pro různé hodnoty tepelného toku zobrazena doba, během které dojde ke zvýšení teploty z teploty $T_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ a teploty $T_2 = 98 \text{ }^\circ\text{C}$, která odpovídá maximální teplotě povrchu paliva IRT-4M stanovená výrobcem. Použité hodnoty velikosti tepelného toku \dot{Q}_{PS} v tabulce 3.1 jsou vybrány jako střední hodnoty zbytkového výkonu palivového souboru IRT-4M z různých výpočtových programů zanesených v tabulce 2.7.

Je nutné upozornit, že ve výpočtu byla přijata určitá zjednodušení, které mohou ovlivňovat celkovou dobu dosažení bezpečnostních limitů palivových souborů. Kromě uvažování konstantní tepelné kapacity vody $c = 4\,184 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ určenou pro střední teplotu vody $\bar{T} = 68 \text{ }^\circ\text{C}$, předpokládá rovnice 3.2 ideální rozvržení tepla do vody. I přes to, že díky vlivu přirozené konvekce, která automaticky vzniká díky rozdílným hustotám kapaliny, dojde k určitému promíchání kapaliny mezi palivovým souborem a chladnější vodou u izolované stěny kalorimetru, dojde k překročení bezpečnostních limitů pro palivový soubor dříve.

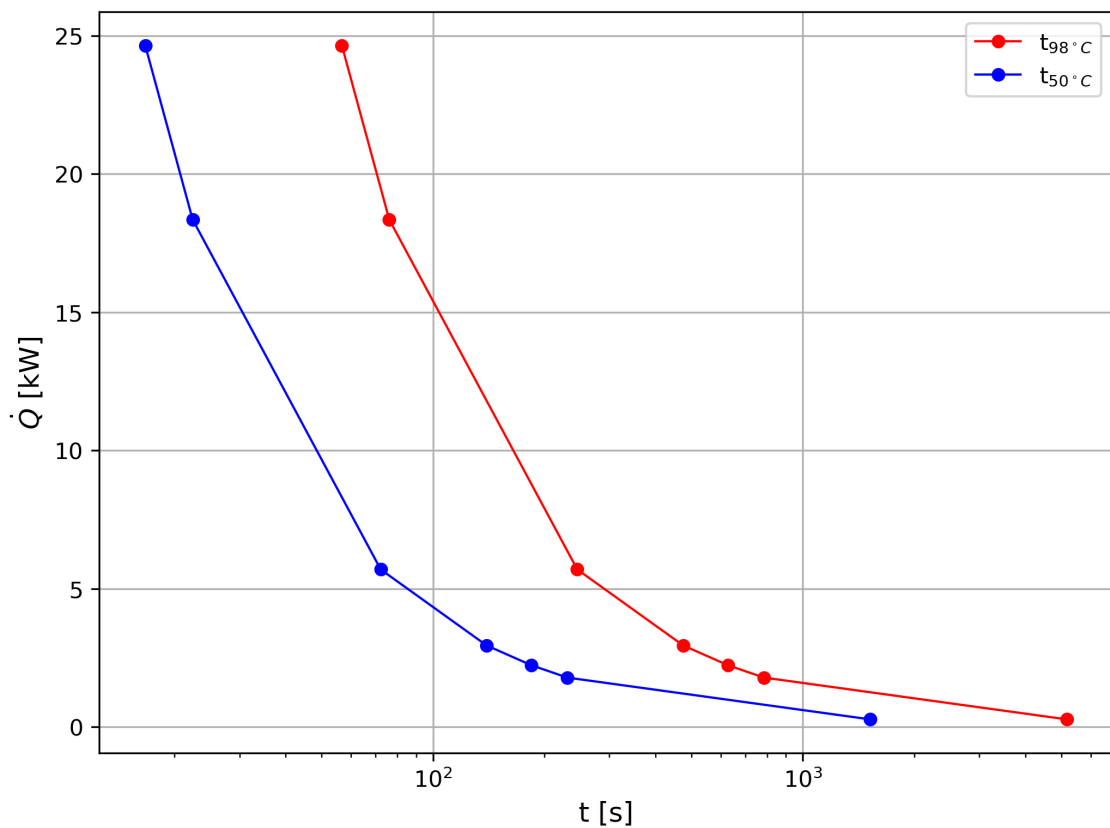
Z těchto důvodů jsou v tabulce 3.1 a v grafu 3.1 zahrnuty doby, během které dojde ke zvýšení teploty z teploty $T_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ na teplotu $T_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota $50 \text{ }^\circ\text{C}$ představuje v dokumentu limitů a podmínek [32] maximální teplotu vody proudící do AZ tak, aby dle rovnic (2.1) a (2.2) byla zásoba do povrchového varu $Z_{pv} \geq 1,3$.

Jak se vidět na grafu 3.1, tak doba za kterou překročí palivový soubor IRT-4M v adiabatickém kalorimetru přípustnou teplotu stanovenou bezpečnostními limity značně závisí na velikosti generovaného tepelného výkonu z palivových souborů. Při použití palivových souborů s výkonem jednotek kW by byl čas manipulace řádově v minutách než by došlo k porušení bezpečnostních limitů palivového souboru. Za tuto dobu by bylo nutné vložit palivový soubor do kalorimetrické nádoby, uzavřít horní víko, naměřit příslušné teploty a po otevření horního víka přesunou palivový soubor z kalorimetrické nádoby.

Adiabatickými kalorimetry je možné měřit méně výkonné PS, u kterých je menší riziko překročení bezpečnostních limitů během samotného měření. Možné řešení tohoto problému bylo použito při měření zbytkového tepelného výkonu ve švédském centrálním skladu vyhořelého paliva Clab [35], ve kterém byl použit adiabatický kalorimetr. Při tomto experimentu bylo použito přídatného zařízení, které bylo schopné během přípravy palivového souboru pomocí čerpadla přivádět chladnější vodu do vnitřku kalorimetru. Takovéto pomocné chladicí zařízení ale výrazně komplikuje celou konstrukci kalorimetru.

Zbytkový výkon po čase	\dot{Q}_{PS} [kW]	$t_{98^{\circ}C}$ [s]	$t_{98^{\circ}C}$ [min]	$t_{50^{\circ}C}$ [s]	$t_{50^{\circ}C}$ [min]
10 sekund	24,65	57,72	0,95	16,68	0,28
1 minuta	18,35	76,20	1,27	22,41	0,37
1 hodina	5,69	245,57	4,09	72,23	1,20
10 hodin	2,95	474,54	7,91	139,57	2,33
24 hodin	2,23	627,28	10,45	184,49	3,07
48 hodin	1,78	785,51	13,08	230,74	3,85
1 rok	0,27	5167,72	86,11	1519,62	25,33

Tabulka 3.1: Střední hodnoty zbytkového výkonu palivového souboru IRT-4M na reaktoru LVR-15 v čase a doba za kterou bude v adiabatickém kalorimetru překročena teplota palivového souboru stanovenou bezpečnostními limity.



Graf 3.1: Doba za kterou překročí palivový soubor IRT-4M přípustnou teplotu stanovenou bezpečnostními limity při různých výkonech palivového souboru v adiabatickém kalorimetru.

Kapitola 4

Návrh konstrukčního řešení kalorimetru pro reaktor LVR-15

4.1 Popis kalorimetrické metody

Na základě rešeršní části této diplomové práce a komentáře v kapitole 3 byl pro měření zbytkového tepelného výkonu palivových souborů IRT-4M na reaktoru LVR-15 vybrán kalorimetr založený na tepelné výměně pracující v isoperibolickém režimu, jehož teorie byla popsána v podkapitole 1.2.3.

Podmínka konstantní teploty okolí isoperibolického kalorimetru je zajištěna velkým objemem bazénu, ve kterém bude experiment proveden. Celkové teplo uvolněné palivovým souborem do svého okolí se řídí rovnicemi (1.23) resp. (1.24). Z těchto rovnic plyne, že pro různé velikosti tepelného výkonu produkovaného PS se teplota vody v kalorimetru bude zvyšovat různými rychlostmi. Princip měření zbytkového tepelného výkonu tedy spočívá v porovnání funkce rychlosti nárůstu teploty naměřeného kalorimetrem s předem naměřenými kalibračními křivkami.

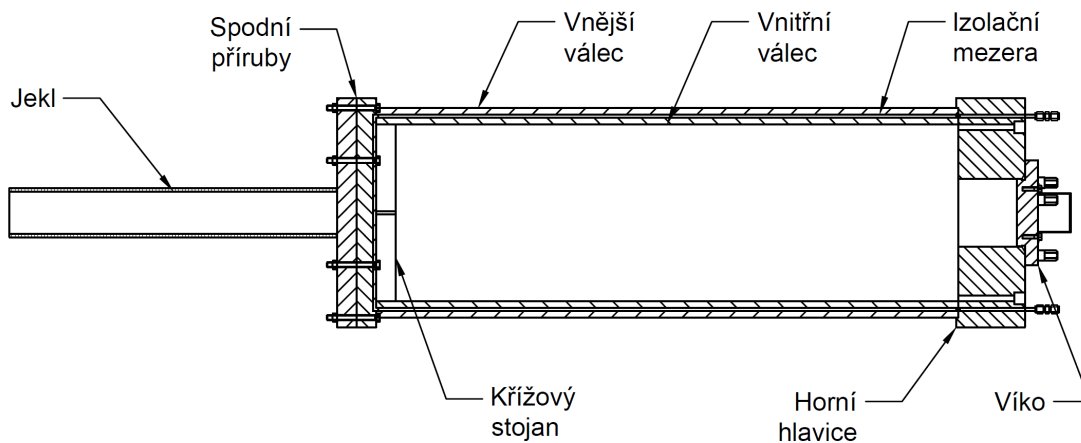
Před zahájením vlastního měření se pomocí elektrického ohřívače různých výkonů stanoví kalibrační křivky, jejichž měřením se bude podrobněji zabývat podkapitola 4.4. Při samotném měření výkonu palivového souboru IRT-4M se určí teplotní rozdíl ΔT mezi kalorimetrickou nádobou a okolím kalorimetru při kterém je měření zastaveno. Naměřená rychlost nárůstu teploty se porovná s odpovídajícími kalibračními měřeními a na jejich základě se určí celkový tepelný výkon.

4.2 Popis technického řešení kalorimetru

Design kalorimetru vychází z designu pouzdra na palivový článek pro netěsné PS. Samotný kalorimetr se skládá ze dvou soustředných válců dlouhých 889 mm, hlavice a spodní příruby kalorimetru. Celkové schéma kalorimetru je zobrazeno na obrázku 4.1 a na obrázku 4.2 (a) je 3D vyobrazení celého kalorimetru.

Vnitřní válec o vnějším průměru 290 mm tvoří kalorimetrickou nádobu z hliníkové slitiny AlMgSi o tloušťce stěny 10 mm. Celý vnitřní prostor je zcela zaplněn vodou z bazénu, ve kterém je prováděn experiment.

Druhý válec s vnějším průměrem 320 mm a tloušťce stěny 10 mm je vyroben ze stejné hliníkové slitiny AlMgSi. Tento válec tvoří fyzickou vnější bariéru mezi izolační vrstvou a okolním prostředím bazénu. Prostor mezi vnitřním a vnějším



Obrázek 4.1: Schéma kalorimetru pro měření zbytkového tepelného výkonu palivového souboru IRT-4M.

válcem o tloušťce 5 mm slouží jako tepelná izolace mezi kalorimetrické nádoby a vodou v bazénu. Izolační vrstva je vyplněná heliem o tlaku maximálně 50 kPa³.

Celková výška kalorimetru je 1,571 m. Zbytkový tepelný výkon generovaný palivovým souborem, případně elektrickým ohřívačem pro kalibrační měření, je odváděn pomocí přirozené konvekce celým vnějším povrchem kalorimetru, který je celý ponořen do vodního bazénu. Velikost odvodu tepla z PS může být ovlivněna změnou plynu s nižším součinitelem tepelné vodivosti v izolační mezeře stěny kalorimetru.

Vnějším povrchem kalorimetru, které je celý ponořen do vodního bazénu, je odváděn veškerý zbytkový tepelný výkon generovaný vloženým palivovým souborem případně elektrickými ohřívači pro kalibrační měření.

Spodní konec kalorimetru je spojen pomocí přírub k jeklu čtvercového půdorysu o rozměrech 75x75x5 mm s délkou 500 mm. Tento jekl je vyroben ze stejné hliníkové slitiny, z které je celá kalorimetrická nádoba a slouží pro stabilnější umístění celého kalorimetru v kazetnici PS na reaktoru LVR-15.

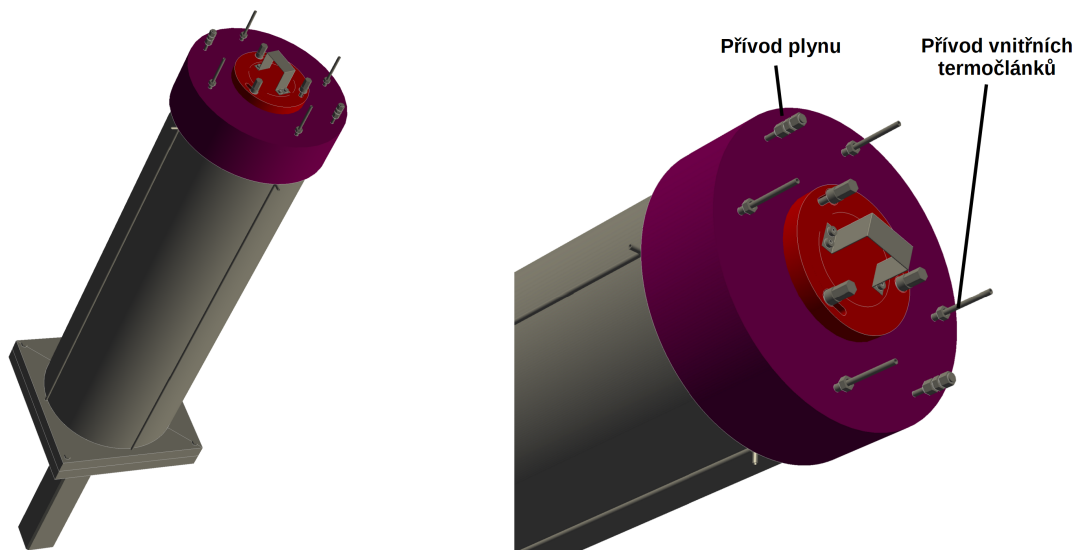
V horní části je kalorimetr zakončen hlavici zabezpečující napojení meziprostoru na přívod a odvod inertního plynu a instrumentaci pro pouzdra termočlánků, viz (obrázek 4.2 (b)). Dále je horní část vybavena uzavíratelným víkem pro vytvoření fyzické bariéry, která odizoluje palivový soubor v kalorimetrické nádobě od okolního prostředí.

Dolní část kalorimetrické nádoby je vybavena stojanem křížového profilu výšky 30 mm, šířky 5 mm a délce 270 mm do kterého zapadne spodní koncovka palivového souboru IRT-4M. Tento stojan napomáhá ke snazšímu polohování pro opakované měření a větší stabilitou PS v kalorimetrické nádobě. Je tak zabráněno dotyku PS s vnitřní stěnou kalorimetrické nádoby.

Kalorimetr je osazen dvěma okruhy teplosměnných jímek, které přicházejí do styku s mediem. První okruh je umístěn na stěně kalorimetrické nádoby a měří ohřev teploty vně nádoby. Druhý okruh je připevněný k vnější stěně kalorimetru, nebo je umístěný v bazénu MZ (viz kapitola 4.7) a slouží k měření teplotní difference mezi vnitřkem kalorimetrické nádoby a okolní teplotou bazénu.

V příloze E je technická dokumentace všech důležitých součástí kalorimetru.

³Nejedná se o tlakové zařízení dle Nařízení vlády č. 26/2003 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na tlaková zařízení, v platném znění.



(a) Celková sestava kalorimetru

(b) Detail hlavičky kalorimetru.

Obrázek 4.2: 3D zobrazení kalorimetru pro měření zbytkového tepelného výkonu palivových souborů IRT-4M.

4.3 Použité materiály a jejich kompatibilita s prostředím bazénu pro skladování ozářeného paliva

Při návrhu konstrukčního řešení kalorimetru byly záměrně použity pouze materiály, které jsou používány na reaktoru LVR-15.

Konstrukčním materiálem celé stěny kalorimetru je hliníková slitina AlMgSi s označením EN AW-6060 T6, ČSN EN 573-3 (421401). Tato slitina se na reaktoru používá pro její nízkou aktivaci, malý absorpční průřez pro neutrony, dobrou tepelnou vodivost a korozní odolnost.

Horní i spodní příruba kalorimetru je z nerezové oceli (316L). Tato ocel se zvýšeným obsahem niklu, byla zvolena na základě dlouholetých zkušeností s jejím použitím na reaktoru, velkou korozní odolností, dobrou svařitelností, tepelnou vodivostí okolo 15 W/mK a relativně nízkou aktivací oproti ostatním nerezovým ocelím.

Ačkoliv by použití pěnového polyuretanu jako izolace bylo konstrukčně méně náročné, než vytvoření plynové izolační vrstvy. Byla vybrána plynová izolace a to z důvodu možnosti měnit velikost rychlosti odvodu tepla z kalorimetru v závislosti na tepelném výkonu měřeného PS. Pro výpočty v této práci bylo použito helium z důvodu jeho větší tepelné vodivosti oproti ostatním plynům. Tím bude zajištěno, že teplota PS uvnitř kalorimetru nepřesáhne LaP paliva pro uvažované výkony. Výměnou helia za plyn s nižším součinitelem tepelné vodivosti by bylo možné měřit starší palivové soubory, které mají nižší zbytkový tepelný výkon než jsou soubory uvažované v této práci.

Do kontaktu s vodou přijde jak vnitřní a vnější plášť z kalorimetru z hliníkové slitiny, tak i horní a spodní příruba kalorimetru z nerezové oceli. Vzhledem k tomu, že v bazénech na reaktoru LVR-15 je demineralizovaná voda, jejíž čistota je určena

dle dokumentace LaP a předpokládané pasivaci uvažovaných materiálů, tak budou případné korozní účinky zcela zanedbatelné.

Při samotném měření a kalibraci kalorimetru není nutné uvažovat mechanické namáhání. Jediné namáhání materiálu bude zapříčiněn gravitačním a teplotním polem.

4.4 Kalibrační měření

4.4.1 Postup kalibračního měření

Aby bylo možné provést přepočítání nárůstu teploty na množství zbytkového tepelného výkonu, je nutné provést kalibrační měření a sestavit kalibrační křivky.

Pro kalibrační měření je nutné zajistit, aby kalibrační aparatura a podmínky měření byly co možná nejvíce identické samotnému měření PS. Z tohoto důvodu je nezbytné vytvořit elektrický ohřívač, který bude mít nejen stejnou geometrii jako má skutečný palivový soubor IRT-4M⁴, ale měl by být vyroben i ze stejných konstrukčních materiálů. Tím bude zajištěno, že se při kalibračním měření bude ohřívat stejné množství vody i se stejnými velikostmi přestupu tepla, jako při skutečném měření PS.

Topné těleso musí být schopné dodat elektrický výkon v rozmezí od několika wattů do několika kW v závislosti na velikosti zbytkového tepelného výkonu čerstvých palivových souborů. Z praktických důvodů je potřeba pro elektrický ohřívač vyrobit vlastní uzavíratelné víko, zajišťující fyzickou bariéru od okolního prostředí, s vlastním napojením kabelu, kterým je přiváděn elektrický proud. Napájení topného tělesa je zajištěno pomocí stabilizovaného zdroje, jehož výkon je měřen wattmetrem.

Po umístění kalibrační aparatury do kalorimetrické nádoby a uzavření víka kalorimetru se nastaví požadovaný výkon zdroje elektrického napětí. Až teplota uvnitř kalorimetrické nádoby stoupne na předem stanovenou teplotu, která vychází z průměrné teploty vody bazénu v době provádění měření⁵, tak se spustí zaznamenávání nárůstu teploty mezi jednotlivými soubory teplotních čidel.

Zaznamenávání nárůstu teplot je zastaveno po dosažení teplotního rozdílu mezi jednotlivými soubory teplotních čidel $\Delta T = 10$ K. Tento teplotní rozdíl se vypočítá odečtením průměrné hodnoty teploty okruhu teplotních čidel měřící teplotu kalorimetrické nádoby a průměrné hodnoty teploty okruhu teplotních čidel měřící teplotu vně kalorimetru.

Po ukončení měření se otevře víko kalorimetru, aby se voda uvnitř kalorimetru mohla rychleji ochladit a počká se dostatečnou dobu, až se díky velkému vodnímu objemu v bazénu znovu nastaví původní teploty.

Tento postup se opakuje pro různé výkony elektrického ohřívače pro zaznamenání nárůstu rozdílu teploty v čase pro stanovení kalibrační křivky daného výkonu.

⁴Trubka čtvercového průřezu o celkové délce 880 mm, kde střed topného tělesa bude 370 mm nad spodním koncem o délce 600 mm.

⁵V kapitole 2.3.1 bylo řečeno, že teplota v bazénu závisí na teplotě vzduchu uvnitř reaktorové haly. Z těchto důvodů je nutné provádět jak kalibrační měření tak i měření PS v období s nejmenšími teplotními výkyvy. Tím by měla být zaručena, co největší homogenita mezi jednotlivými měřeními.

4.4.2 Stanovení kalibračních křivek

Na základě kalibračního měření nárůstů teploty v čase se pro odpovídající výkony sestaví grafy a naměřené hodnoty se aproximují pomocí metody nejmenších čtverců příslušnou polynomickou závislostí. Pro určený počáteční bod našeho měření se spočítá směrnice regresní přímky, tzv. gradient dané polynomické závislosti.

Výsledkem kalibračního měření je tabulka velikostí gradientů pro různé známé výkony elektrického ohříváče. Hodnoty zanesené do této tabulky se znovu aproximují pomocí metody nejmenších čtverců kalibrační křivkou, jejíž obecná rovnice má tvar:

$$P = a + b \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.1)$$

kde P je výkon, a a b jsou příslušné konstanty kalibrační křivky a $\frac{dT}{dt}$ je měřená rychlost nárůstu teploty, resp. směrnice regresní přímky.

Palivový soubor IRT-4M a elektrický ohříváč použitý pro vytvoření kalibrační křivky nebudou mít úplně stejný objem a obsah materiálů ze kterých jsou vyrobeny. Z těchto důvodů se bude mezi kalibrací a experimentem lišit množství potřebné energie ke zvýšení teploty o jeden stupeň. K vyrovnání potřebného rozdílu je použit korekční faktor k , který je podrobněji zkoumán v podkapitole 4.8 a díky němu přejde rovnice (4.1) na tvar:

$$P = a + b \cdot k \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.2)$$

4.5 Metoda stanovení zbytkového tepelného výkonu

4.5.1 Postup měření

Při měření zbytkového tepelného výkonu palivovém souboru IRT-4M se postupuje dle následujícího postupu. Do kalorimetrické nádoby se umístí pomocí manipulačních tyčí měřený palivový soubor a následně se kalorimetrická nádoba zakryje víkem.

Záznam teplotního vývoje na teplotních čidlech je zahájen po dosažení předem určené teploty uvnitř kalorimetru. Tento proces je nutné praktikovat nejen z důvodu rozdílných teplot bazénu v průběhu roku, jako tomu bylo při kalibračním měření, ale také proto aby obsluha zařízení měla dostatek času na bezpečné uzavření víka kalorimetrické nádoby.

Stejně jako při kalibračním měření se celý experiment ukončí, dosáhne-li se teplotního rozdílu mezi jednotlivými soubory teplotních čidel $\Delta T = 10$ K.

Následně je víko kalorimetrické nádoby sundáno a celý palivový soubor je možné vyndat a bezpečně ho umístit pomocí manipulačních tyčí do vedlejšího otvoru kazetnice v bazénu MZ.

4.5.2 Stanovení tepelného výkonu

Na základě měření nárůstu teploty PS je do grafu vynesena časová závislost teplotního rozdílu mezi jednotlivými okruhy teplotních čidel. Obdobně jako při stanovování kalibrační křivky se na základě časového průběhu naměřených teplotních rozdílů určí metodou nejmenších čtverců příslušná polynomičká závislost a na jejím základě se pro počáteční bod vypočítá směrnice regresní přímky.

Výsledná hodnota směrnice regresní křivky se dosadí do obecné rovnice kalibrační křivky (4.2) a stanoví se tepelný výkon palivového souboru P .

4.6 Posouzení fyzikálních podmínek

Na základě popisu metody pro stanovování zbytkového tepelného výkonu pomocí kalorimetru je nutné provést výpočty, které potvrdí, že při měření palivových souborů různých výkonů, lze fyzikálně naměřit teplotní rozdíl ΔT mezi jednotlivými soubory teplotních čidel a stanovení teplotního profilu kalorimetru pro různé výkony.

4.6.1 Energetická bilance

Cílem této podkapitoly je prokázání schopnosti kalorimetru vytvořit požadované podmínky pro naměření nárůstu teploty uvnitř kalorimetrické nádoby⁶ a vypočítat poměr tepelných ztrát skrz jednotlivé stěny kalorimetru.

Z rovnice (3.1) tepelné bilance systému je patrné, že teplotní tok generovaný palivovým souborem \dot{Q}_{in} musí být větší než celkový tepelný tok vystupující ze systému \dot{Q}_{out} při dosažení požadované teplotní difference na stěně kalorimetru ΔT . To znamená, že platí:

$$\dot{Q}_{in} > \dot{Q}_{out} \quad (4.3)$$

V takovém případě bude možné po určité době naměřit na stěně kalorimetru teplotní diferencii ΔT . Velikost rozdílu tepelných toků v rovnici (3.1) pak představuje rychlost nárůstu teploty v kalorimetru.

Na 4.3 je zobrazen celkový tepelný tok \dot{Q}_{out} unikající z kalorimetru, který je roven součtu tepelného toku skrz horní příruby \dot{Q}_{UF} , dolní příruby \dot{Q}_{LF} a stěnu kalorimetru \dot{Q}_W .

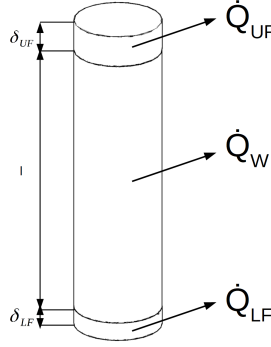
$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{UF} + \dot{Q}_{LF} + \dot{Q}_W \quad (4.4)$$

Pro výpočet tepelných toků je nutné odvodit základní rovnice přestupu tepla přes uvažované stěny kalorimetru. Dle Fourierova zákona vedení tepla je celkové množství tepla Q , které projde za jednotku času plochou S , úměrné zápornému gradientu teploty, ve tvaru [2]

$$dQ = -\lambda \cdot grad T \, dS dt \quad (4.5)$$

Na základě tepelné bilance (3.1) a Fourierova zákona (4.5) lze odvodit obecnou diferenciální rovnici popisující šíření tepla vedením: [2]

⁶Rozdíl teplot mezi souborem teplotních čidel uvnitř kalorimetrické nádoby a souborem čidel na vnějším povrchu kalorimetru bude $\Delta T = 10$ K.



Obrázek 4.3: Zjednodušené zobrazení celkového tepelného toku \dot{Q}_{out} vystupující z kalorimetru, který je roven součtu tepelného toku z horní příruby Q_{UF} , dolní příruby Q_{LF} a stěny kalorimetru Q_W .

$$\frac{\lambda}{\rho c} \nabla^2 T + \frac{q'''}{\rho c} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.6)$$

Tepelný tok skrz horní i dolní přírubu lze zjednodušit na 1D vedení tepla rovinnou stěnou o tloušťce δ . Pro stacionární případ bez vnitřního tepelného zdroje lze rovnici (4.6) a (4.5) převést na:

$$\dot{Q}_i = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta T \cdot S_i \quad (4.7)$$

Výpočet tepelného toku přes stěnu kalorimetru představuje šíření tepla ve válcové geometrii pro tři stěny představující tepelný odpor kalorimetru. Pro stacionární případ bez vnitřního tepelného zdroje lze rovnici (4.6) a (4.5) převést na:

$$\dot{Q}_W = \frac{\pi \cdot \Delta T \cdot l}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{AlMg}} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{gas}} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{AlMg}} \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} \quad (4.8)$$

V příloze F je uveden kód programu vytvořený v jazyku Python pro výpočet tepelných toků skrz stěny kalorimetru. Jednotlivé parametry důležité pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 4.1 a 4.2. Vypočítané tepelné toky pro geometrii kalorimetru při dosažení teplotní difference $\Delta T = 10$ K při teplotě okolního bazénu $T_\infty = 30$ °C v závislosti na použitém mediu v izolační vrstvě stěny jsou zaneseny do tabulky 4.3.

Porovnáním celkového tepla \dot{Q}_{out} potřebného pro dosažení měřené teplotní difference a střední hodnoty výkonu uvedené v tabulce 3.1 je patrné, že při použití 100% směsi helia v izolační vrstvě stěny, nebude možné nikdy změřit 12 měsíců staré palivové soubory. V takovém případě, by tepelný tok vystupující z kalorimetru byl natolik velký, že by nešlo naměřit teplotní rozdíl $\Delta T = 10$ K na vnitřní a vnější stěně kalorimetru.

Z těchto důvodů je nutné v izolační mezeře stěny kalorimetru volit medium s menší teplotní vodivostí. Z uvažovaných plynů v tabulce 4.3 je vidět, že jedině oxid uhličitý by dokázal dostatečně odizolovat kalorimetr tak, aby bylo možné naměřit požadovanou teplotní diferencii palivové soubory starší více než 1 rok.

δ_{UF} [mm]	δ_{LF} [mm]	l [mm]	r_1 [mm]	r_2 [mm]	r_3 [mm]	r_4 [mm]	T_∞
102	60	889	135	145	150	160	30

Tabulka 4.1: Geometrie kalorimetru, kde δ_{UF} resp. δ_{LF} je tloušťka přírub, l je délka kalorimetru, r_i jsou poloměry stěny kalorimetru a uvažovaná teplota bazénu T_∞

	Tepelná závislost [°C]	λ [W/mK]
AlMgSi	konst.	209
Ocel 1.4404	konst.	15
Helium 100%	lin. závislost 27 - 227	0,156 - 0,221
Mix He + N ₂ 70% + 30%	lin. závislost 27 - 127	0,093 - 0,113
Dusík 100%	polynom. závislost $a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^4$	$a = 0.3918 \cdot 10^{-3}$ $b = 0.9814 \cdot 10^{-4}$ $c = -5.0660 \cdot 10^{-8}$ $d = 1.503479 \cdot 10^{-11}$
Oxid uhličitý 100%	polynom. závislost $a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^4$	$a = -7.2139 \cdot 10^{-3}$ $b = 0.8014 \cdot 10^{-4}$ $c = 0.5476 \cdot 10^{-8}$ $d = -1.05256 \cdot 10^{-11}$

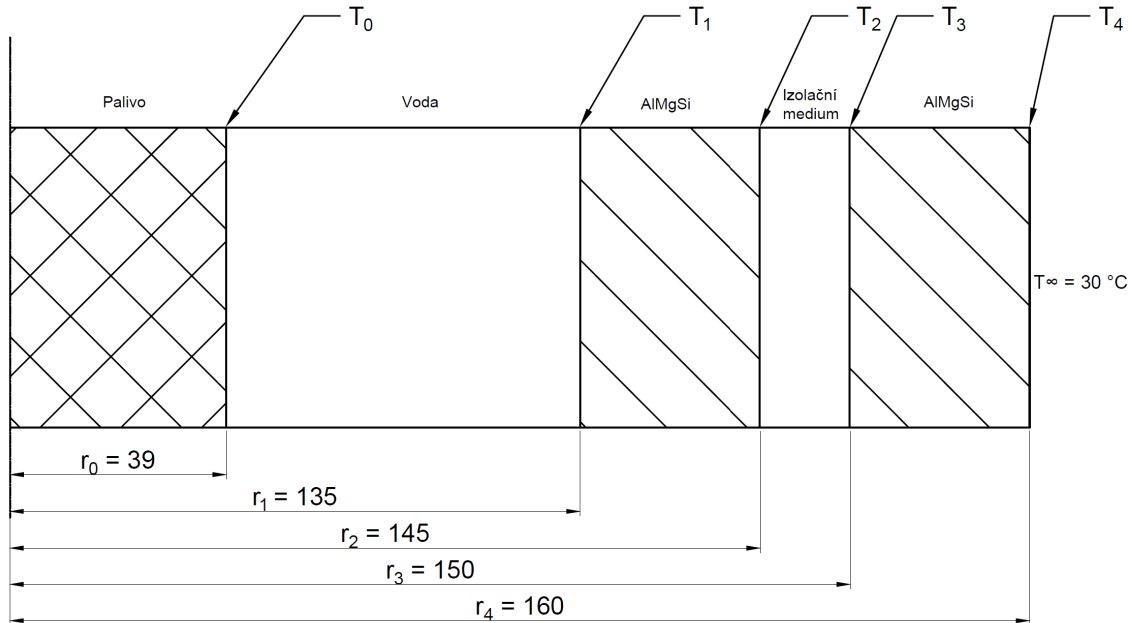
Tabulka 4.2: Tepelná vodivost materiálů použitých v kalorimetru. [36] [37] [38] [39] [40]

	Helium		Mix He + N ₂ 70% + 30%		Dusík		Oxid uhličitý	
	\dot{Q}_i [W]	\dot{Q}_i/\dot{Q}_{out} [-]	\dot{Q}_i [W]	\dot{Q}_i/\dot{Q}_{out} [-]	\dot{Q}_i [W]	\dot{Q}_i/\dot{Q}_{out} [-]	\dot{Q}_i [W]	\dot{Q}_i/\dot{Q}_{out} [-]
\dot{Q}_{UF}	84,20	0,17	84,20	0,22	84,20	0,31	84,20	0,33
\dot{Q}_{LF}	143,14	0,29	143,14	0,37	143,14	0,53	143,14	0,56
\dot{Q}_W	260,16	0,53	155,94	0,41	43,25	0,16	29,14	0,11
\dot{Q}_{out}	487,50		383,28		270,59		256,48	

Tabulka 4.3: Vypočítané tepelné toky pro geometrii kalorimetru pro dosažení tepelní diference $\Delta T = 10$ K v závislosti na použitém mediu v izolační vrstvě stěny.

4.6.2 Teplotní profil a charakteristické teploty

Pro výpočet teplotního profilu povrchem stěny kalorimetru je nutné stanovit jednotlivé teploty v hraničních bodech, viz obrázek 4.4. V tabulce 4.3 jsou vyjma vypočítaných celkových tepelných toků \dot{Q}_{out} pro dosažení požadované teplotní difference uvedeny též poměry tepelného toku vystupujícího z jednotlivých povrchů kalorimetru. Tyto poměry zůstávají pro všechny teplotní difference přibližně stejné⁷. Pomocí těchto poměrů lze spočítat tepelný tok přes stěnu kalorimetru \dot{Q}_i^{wall} pro střední hodnoty výkonu PS uvedených v tabulce 3.1.



Obrázek 4.4: Zjednodušené zobrazení geometrie stěny kalorimetru s hraničními teplotami.

Jak již bylo v této práci vysvětleno, veškeré vygenerované uvnitř kalorimetrické nádoby bude odváděno pomocí přirozené konvekce z vnějších stěn kalorimetru. Velikost této přirozené konvekce závisí na teplotním rozdílu mezi povrchem vnější stěny kalorimetru a okolní teplotou bazénu.

Pro výpočet konvekce je důležité znát Nusseltovo číslo, které udává poměr mezi konvektivním přestupem tepla a konduktivním vedením tepla v tekutině. Pro přirozenou konvekci je Nusseltovo číslo dáno Rayleighovým číslem v obecném tvaru: [21]

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{\alpha} \cdot x}{\lambda_f} = C \cdot Ra_x^m \quad (4.9)$$

kde $\bar{\alpha}$ je součinitel přestupu tepla, x je charakteristický rozměr, λ_f je tepelná vodivost kapaliny, C a m jsou konstanty záležící na geometrii systému a na režimu proudění.

Rayleighovo číslo je pak poměr Grasshofova čísla udávajícího poměr vztlkových sil k viskozitě a Prantlova čísla vyjadřujícího poměr viskozity ku přestupu tepla. Střední hodnotu tohoto podobnostního čísla lze vyjádřit jako: [21]

⁷Plyny mají velkou závislost růstu součinitele teplotní vodivosti vlivem růstu teploty. Z tohoto důvodu se poměr teplotních toků může nepatrně měnit.

$$\overline{Nu} = f(Gr, Pr) = \frac{\Delta T \cdot \gamma \cdot g \cdot x^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (4.10)$$

kde γ je součinitel teplotní roztažnosti, g je gravitační zrychlení a ν je kinematická viskozita. Veškeré hodnoty pro vodu byly vypočítány z tabulek pro vodu a vodní páru IAPWS-95 pro střední velikost teploty $\bar{T} = \frac{1}{2}(T_4 + T_\infty)$.

Dle [21] je možné vertikální válec s charakteristickým rozměrem výšky válce l aproximovat vertikální deskou výšky L , pokud pro jeho průměr D platí

$$D \geq \frac{35l}{Gr^{\frac{1}{4}}} \quad (4.11)$$

Pro všechny uvažované tepelné toky \dot{Q}_W je tato podmínka splněna a lze pro výpočet Nusseltova čísla použít vztahy pro vertikální desku v závislosti na velikosti Rayleighova čísla. Uvedené vztahy jsou v tabulce 4.4.

Ra	Nu
10^4 - 10^9	$\overline{Nu} = 0,59 \cdot Ra_L^{\frac{1}{4}}$
10^9 - 10^{13}	$\overline{Nu} = 0,1 \cdot Ra_L^{\frac{1}{3}}$

Tabulka 4.4: Vztahy pro střední Nusseltovo číslo pro přirozenou konvekci na vertikální stěně.

Je-li spočítáno střední Nusseltovo číslo, lze z (4.9) spočítat součinitel přestupu tepla a z Newtonova zákona spočítat teplotu stěny ve tvaru:

$$T_4 = T_\infty + \frac{\dot{Q}_i^{wall}}{\bar{\alpha} \cdot S_W} \quad (4.12)$$

Rovnice pro prostup tepla přes všechny tři válcové stěny kalorimetru byly odvozeny v předcházející podkapitole jako rovnice (4.8). Jednotlivé teploty T_3 , T_2 a T_1 lze spočítat jako:

$$T_i = T_{i+1} + \frac{\dot{Q}_i^{wall}}{2 \lambda \pi l} \ln \left(\frac{r_{i+1}}{r_i} \right) \quad (4.13)$$

Pro posouzení teplotního profilu mezi palivovým souborem a vnitřní stěnou kalorimetrické nádoby byl použit vztah pro přirozenou konvekci v uzavřeném prostoru. Při tomto proudění se na rozdíl od volného prostoru projevuje vliv okolních stěn a značně závisí na šířce mezery δ . Při dostatečně široké mezeře nebude téměř docházet k vzájemnému promíchávání proudu tekutiny stoupající podél stěny PS a klesající podél chladnější stěny kalorimetrické nádoby.

Dle [21] je možné přenos tepla při přirozené konvekci ve štěrbině válcové geometrie počítat z Fourierova zákona, viz rovnice 4.13, kde se místo součinitele tepelné vodivosti λ dosadí tzv. ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{ekv} = \lambda \cdot Nu$, který zahrnuje přenos tepla vedením i konvekcí.

Pro výpočet Nusseltova čísla byl použit Berkovskyho a Polevikův vztah: [21]

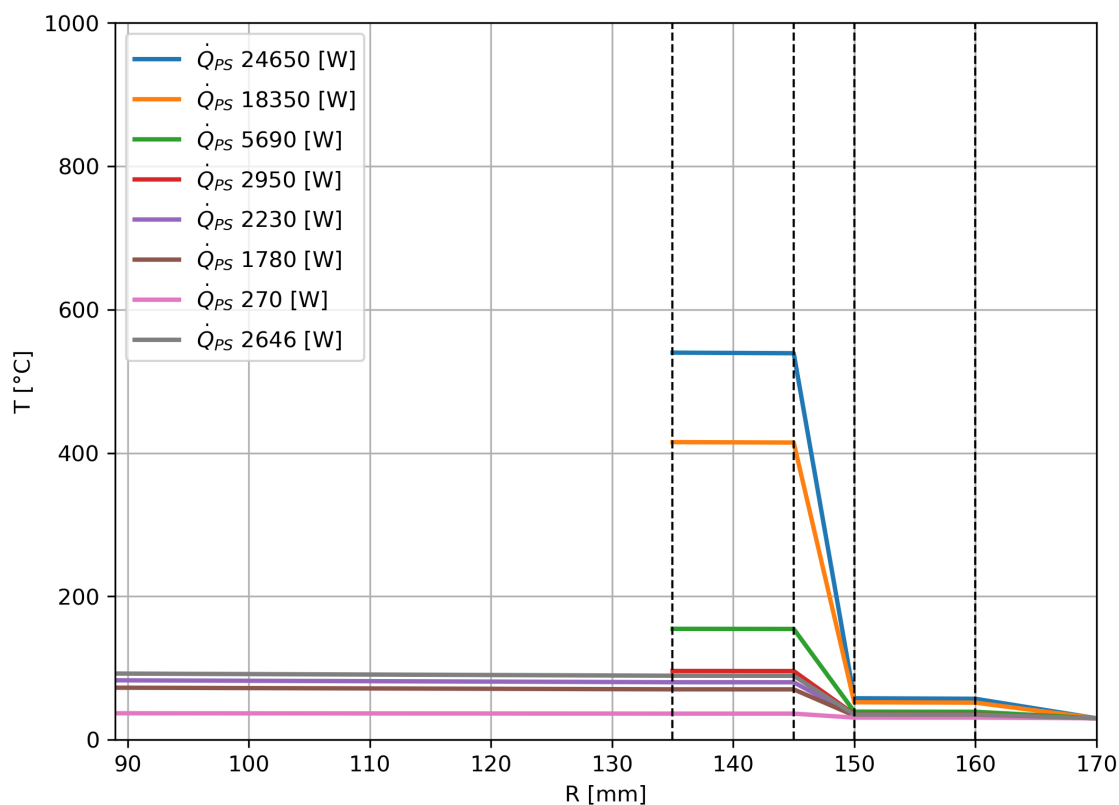
$$\overline{Nu} = 0,22 \left(\frac{Pr}{0,2 + Pr} Ra_\delta \right)^{0,28} \frac{l^{(-1/4)}}{\delta} \quad (4.14)$$

Na základě rovnic (4.12), (4.13) a (4.14) byl dle vytvořeného výpočetního programu uvedeného v příloze F spočítán teplotní profil válcové stěny kalorimetru pro uvažované plyny v izolační vrstvě. Průběhy teploty vody v kalorimetrické nádobě, tzn. teploty mezi T_0 a T_1 jsou počítány pouze pro případ, že nedochází k varu vody v celém objemu kalorimetrické nádoby.

Teplotní profily pro stacionární stavy v závislosti na výkonu PS jsou znázorněny v grafu 4.5, 4.6, 4.7 a 4.8 a jednotlivé hraniční teploty jsou uvedeny v tabulkách 4.5, 4.6, 4.7 a 4.8.

V tabulkách 4.5, 4.6, 4.7 a 4.8 jsou tučně vyznačeny maximální výkony stacionárního stavu při kterých dojde k překročení teploty povrchu $T_0 = 98 \text{ }^\circ\text{C}$, což je hranice bezpečnostních limitů paliva IRT-4M stanovená výrobcem. Měření palivových souborů s nižšími výkony než jsou uvedené maximální výkony stacionárního stavu lze považovat za dokonale bezpečné, protože nemůže za žádných okolností dojít k překročení stanovených bezpečnostních limitů.

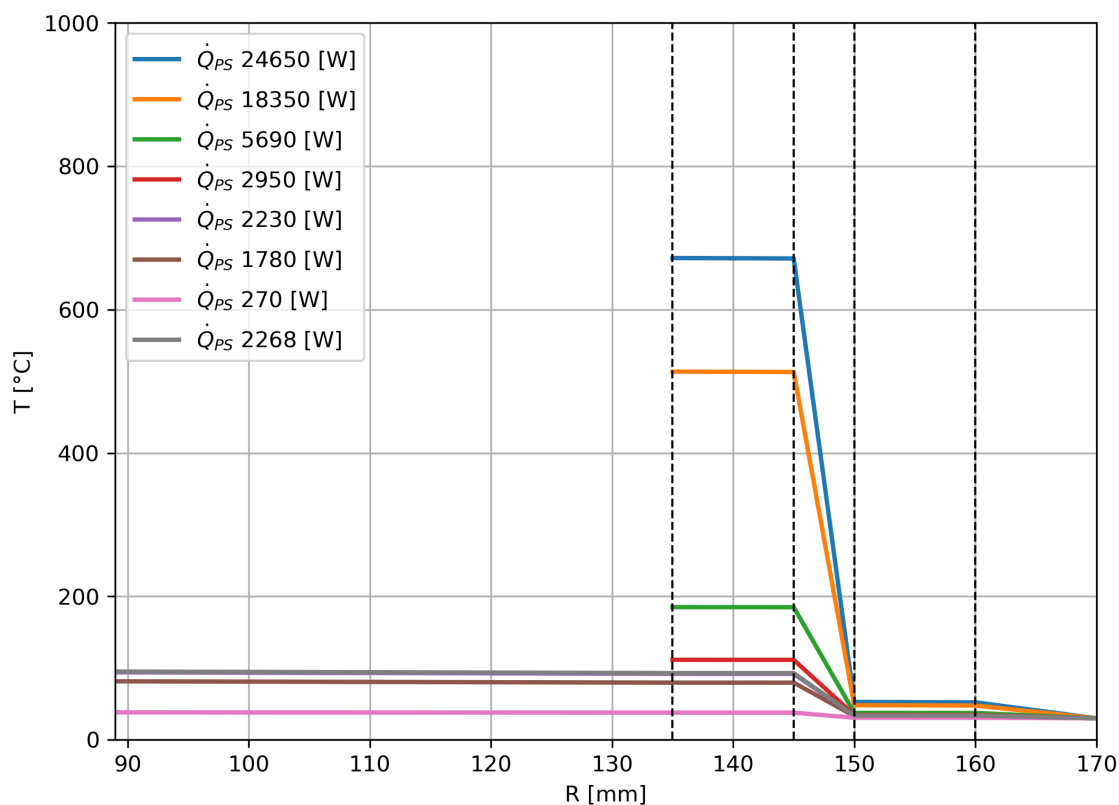
Ačkoliv většina uvedených teplot povrchu palivového souboru přesahuje stanovené bezpečnostní limity paliva, je nutné poznamenat, že těchto teplot se během měření palivového souboru IRT-4M nedosáhne. Nárůst teploty uvnitř kalorimetrické nádoby je časově závislý a díky tepelnému odporu izolační stěny bude teplotním čidlem uvnitř kalorimetrické nádoby naměřena teplotní diference $\Delta T = 10 \text{ K}$ mezi vnitřní a vnější stěnou kalorimetru dříve, než dojde k porušení bezpečnostních limitů paliva IRT-4M.



Graf 4.5: Teplotní profil stěny kalorimetru, při použití helia jako izolační vrstvy v závislosti na výkonu PS.

\dot{Q}_{PS} [W]	\dot{Q}_{He}^{wall} [W]	T_0 [°C]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_4 [°C]	ΔT_W [K]
24 650	13 065	-	539,96	539,16	57,93	57,21	482,76
18 350	9 726	-	415,18	414,59	52,34	51,80	363,38
5 690	3 016	-	154,77	154,58	39,23	39,06	115,71
2 950	1 564	-	95,97	95,88	35,62	35,54	60,44
2 646	1 402	98,00	89,36	89,27	35,18	35,31	54,05
2 230	1 182	88,60	80,28	80,20	34,56	34,49	45,79
1 780	943	77,47	70,39	70,33	33,84	33,79	36,60
270	143	38,00	36,51	36,50	30,93	30,92	5,59

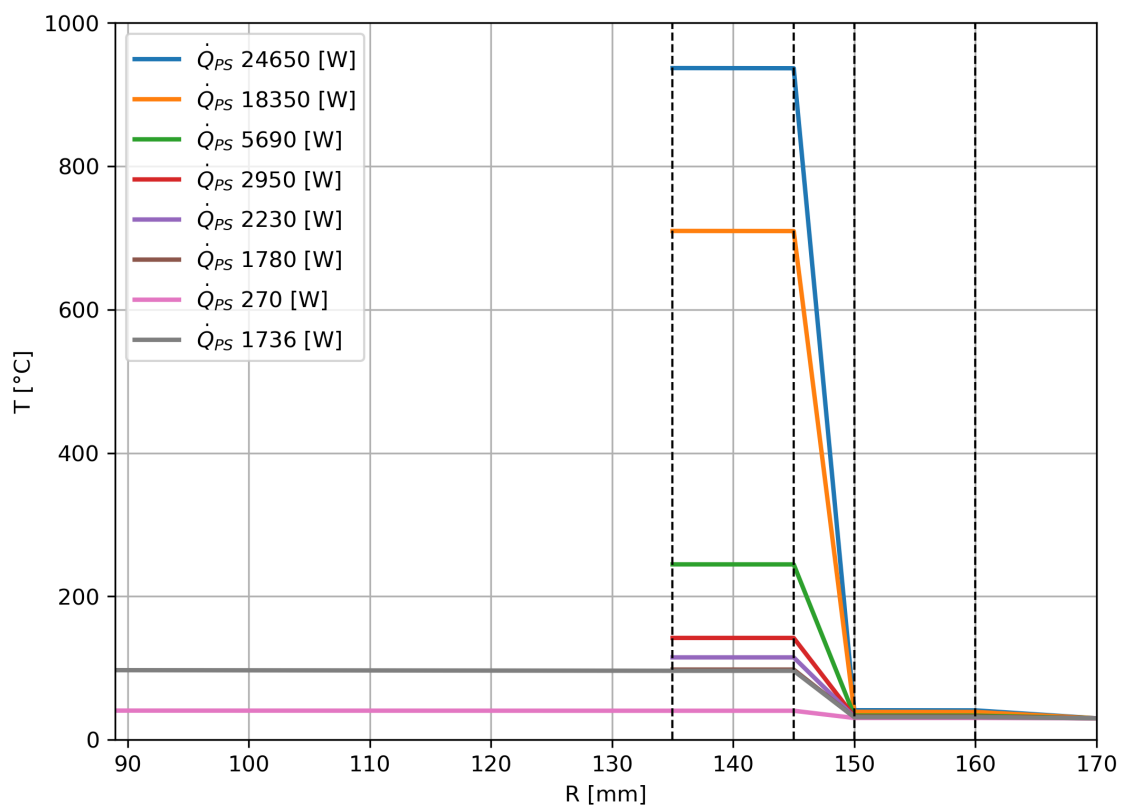
Tabulka 4.5: Vypočítané hraniční teploty stěny kalorimetru v závislosti na výkonu PS při použití helia jako izolační vrstvy.



Graf 4.6: Teplotní profil stěny kalorimetru, při použití mixu 70% He a 30% N₂ jako izolační vrstvy v závislosti na výkonu PS.

\dot{Q}_{PS} [W]	\dot{Q}_{Mix}^{wall} [W]	T ₀ [°C]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T ₃ [°C]	T ₄ [°C]	ΔT_W [K]
24 650	10107	-	671,94	671,32	52,75	52,20	619,74
18 350	7524	-	513,48	513,02	48,20	47,79	465,69
5 690	2333	-	185,06	184,91	37,52	37,39	147,66
2 950	1210	-	111,55	111,48	34,59	34,52	77,03
2 268	930	98,01	93,04	92,98	33,76	33,71	59,33
2 230	914	96,43	92,00	91,95	33,71	33,66	58,34
1 780	730	83,51	79,72	79,68	33,13	33,09	46,63
270	111	38,69	37,86	37,86	30,76	30,75	7,11

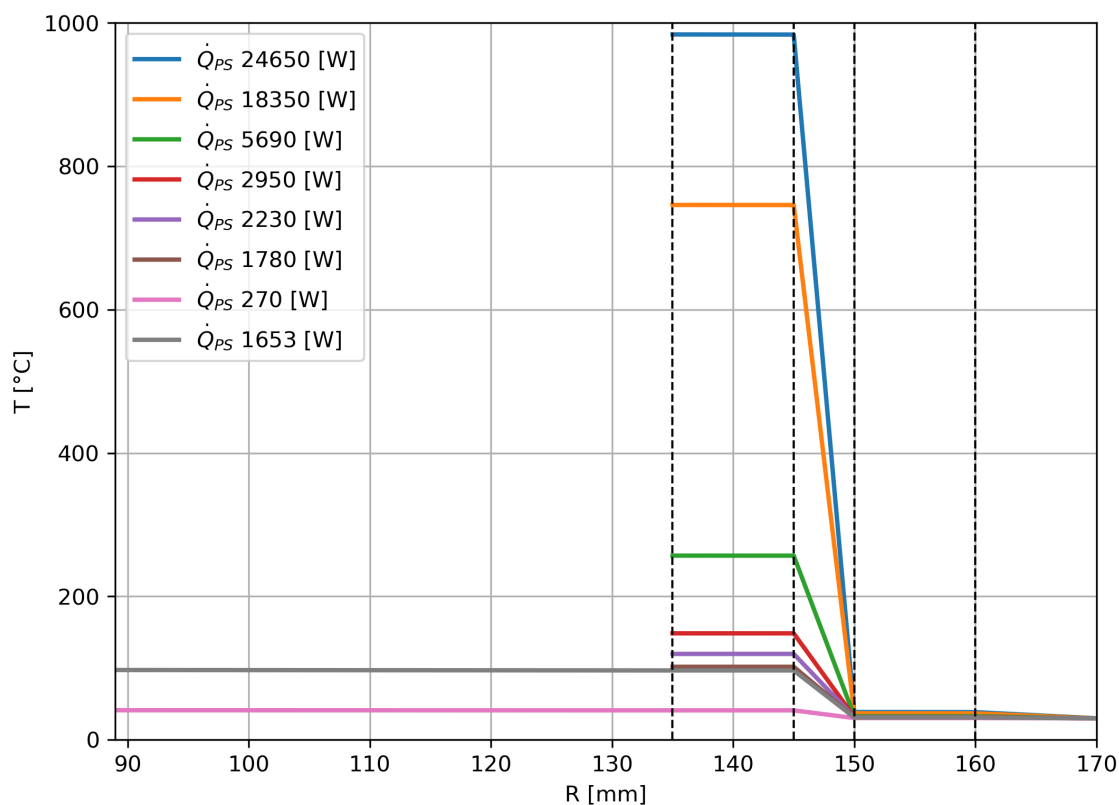
Tabulka 4.6: Vypočítané hraniční teploty stěny kalorimetru v závislosti na výkonu PS při použití mixu 70% He a 30% N jako izolační vrstvy.



Graf 4.7: Teplotní profil stěny kalorimetru, při použití kyslíku jako izolační vrstvy v závislosti na výkonu PS.

\dot{Q}_{PS} [W]	$\dot{Q}_{O_2}^{wall}$ [W]	T_0 [°C]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_4 [°C]	ΔT_W [K]
24 650	3944	-	936,91	936,67	41,23	41,02	895,89
18 350	2936	-	709,74	709,56	38,99	38,83	670,91
5 690	910	-	244,68	244,63	33,72	33,67	211,01
2 950	472	-	142,08	142,05	32,27	32,24	109,84
2 230	357	-	114,95	114,92	31,84	31,82	83,13
1 780	285	-	97,94	97,92	31,55	31,54	66,40
1 736	278	98,01	96,28	96,23	31,52	31,51	64,77
270	43	40,92	40,51	40,51	30,41	30,41	10,10

Tabulka 4.7: Vypočítané hraniční teploty stěny kalorimetru v závislosti na výkonu PS při použití dusíku jako izolační vrstvy.



Graf 4.8: Teplotní profil stěny kalorimetru, při použití oxidu uhličitého jako izolační vrstvy v závislosti na výkonu PS.

\dot{Q}_{PS} [W]	$\dot{Q}_{O_2}^{wall}$ [W]	T_0 [°C]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_4 [°C]	ΔT_W [K]
24 650	3944	-	983,78	983,61	38,68	38,53	945,25
18 350	2936	-	746,00	745,87	36,95	36,84	709,16
5 690	910	-	256,85	256,81	32,88	32,84	224,01
2 950	472	-	148,48	148,46	31,76	31,74	116,74
2 230	357	-	119,79	119,78	31,42	31,41	88,38
1 780	285	-	101,81	101,80	31,20	31,19	70,62
1 653	264	98,01	96,73	96,72	31,14	31,13	65,60
270	43	41,39	41,07	41,07	30,31	30,31	10,76

Tabulka 4.8: Napočítané hraniční teploty stěny kalorimetru v závislosti na výkonu PS při použití oxidu uhličitého jako izolační vrstvy.

4.7 Přístrojové vybavení

Měření nárůstu teploty kalorimetru probíhá pomocí dvou okruhů teplotních čidel, které měří teplotní diferenci mezi vnitřkem kalorimetrické nádoby a vnější vodou bazénu.

První okruh umístěný uvnitř kalorimetrické nádoby je tvořen 4 odporovými teploměry Pt100. Platinové teploměry jsou vybrány díky své vysoké přesnosti a časové stabilitě. Navíc lze u Pt100 považovat jejich teplotní charakteristiku za lineární pro oblasti teplot, ve kterém se bude kalorimetrické měření pohybovat.

Teploměry tohoto okruhu jsou pomocí závitu M20x1,5 zašroubované do vývrtu s upevňovacím závitem v horní přírubě kalorimetru a vedou skrz horní přírubu do vnitřku kalorimetrické nádoby. Použité teploměry nejsou z důvodu vyšší časové odezvy na změnu teploty umístěny v jímce a mají různé délky stonku. Pro měření teploty uprostřed aktivní části PS jsou použity 2 teploměry o délce ponoru 590 mm, přičemž pro potřeby měření slouží vždy pouze jeden z těchto teploměrů. Druhý teploměr slouží jako záložní teploměr pro případ poruchy měřících teplotních čidel. Další dva teploměry mají délku stonku 290 mm, resp. 890 mm a měří teplotu na horní, resp. dolní aktivní části PS.

Druhý okruh odporových teploměrů Pt100 je umístěn mimo kalorimetr a měří teplotu vody bazénu. Existují dvě možná umístění tohoto okruhu v závislosti na požadovaném experimentu a vnějších podmínkách:

Varianta 1: Teplotní čidla jsou umístěna v jiném stojanu kazetnice pro vytvoření referenčního bodu k naměření teplotní difference. Tato možnost umožňuje rychlejší naměření požadovaného teplotního rozdílu mezi prvním a druhým okruhem teplotních čidel, jelikož teplota měřená druhým okruhem je jen malou měrou ovlivněna teplem pronikajícím z kalorimetru. Pro potřeby experimentu stačí pouze jeden odporový teploměr. Dá se očekávat, že měření bude mnohem více ovlivněno dalšími uskladněnými PS v kazetnici MZ.

Varianta 2: Teplotní čidla jsou umístěny na vnějším povrchu kalorimetru ve stejné výšce jako jejich párový teploměr vně kalorimetrické nádoby. U tohoto uspořádání lze očekávat pomalejší měření teplotních diferencí. Nutnost mít párové teplotní čidla pro všechny teploměry z prvního okruhu, které jsou umístěny ve stejné výšce. Menší náchylnost na rozdílné teploty bazénu při různých měřeních. Výhodou tohoto uspořádání je, že naměřené kalorimetrické křivky lze jednoznačněji použít i v případě budoucího opakování měření s jinými PS.

Pro obě výše uvedené varianty postačí standardní čtyřvodičový kabelový odporový snímač teploty Pt100.

Teploměry jsou připojeny pomocí čtyřvodičového zapojení k univerzální měřicí ústředně OMU 408UNI. Tato ústředna byla vybrána na základě jejího osmi kanálovému vstupu, vysoké přesnosti, možnosti odčítat hodnoty na vstupech a záznamu naměřených údajů do datové paměti přístroje.

4.8 Stanovení nejistot

Pomocí současných technických prostředků, metodickými nástroji a časovými možnostmi není možné stanovit pravou hodnotu měřené veličiny.

Pravá hodnota měřené veličiny a naměřené hodnoty se odlišují. Existuje pouze jistá statistická pravděpodobnost, že naměřená hodnota veličiny se blíží k pravé hodnotě. [41]

Nejistoty v měřené hodnotě mohou pocházet z odchylek v měřících řetězcích a zařízeních. Tyto nejistoty lze rozdělit podle charakteru do tří skupin: [41]

1. Hrubé chyby - konstantní, které se při opakovaném měření nezmění.
2. Náhodné chyby - vyskytující se nepravidelně, jsou malé a v průměru výsledek nezkreslují.
3. Soustavné chyby - systematické, které mají stejný charakter a výsledek vždy zkreslují stejným směrem.

Hrubé chyby se mohou v experimentu objevit z mnoha příčin, např. v důsledku nesprávné kalibrace měřícího zařízení, poruchou zařízení, nepozorností, atd. Při experimentálním měření je nutné se vyvarovat jejich vzniku. Pokud k takovým chybám dojde, je nutné příslušné výsledky vyloučit ze souboru naměřených dat.

Náhodné chyby lze eliminovat za použití statistických metod ze souboru naměřených hodnot. Problémem při měření zbytkového tepelného výkonu palivových souborů je jejich pokles výkonu v čase, který je podrobně popsán v podkapitole 1.1. Z tohoto důvodu nemůžeme přesně replikovat experiment se stejným PS a předejít tak všem náhodným chybám při vyhodnocování výsledků.

V této podkapitole z těchto důvodů budou analyzovány převážně soustavné chyby, které lze korigovat nestatistickými metodami. Zdroje soustavných nejistot při určování zbytkového tepelného výkonu zahrnují:

1. Nejistota měřících zařízení
2. Nejistota kalibrace
3. Nejistota ve stanovování kalibračních křivek

Nejistota měřících zařízení

V kalorimetru je použito celkem 8 odporových teploměrů Pt-100 umístěných ve vlastních jímkách, viz (4.7). Odporové teploměry využívají závislost odporu na teplotě, proto i odchylky jsou závislé na teplotě. Průmyslově používané senzory Pt-100 dle normy DIN EN 60751 třídy přesnosti A musí platit maximální dovolené odchylky, které jsou uvedeny v tabulce. [42]

Na základě lineární interpolace z tabulky 4.9 byla nejistota platinových teploměrů Pt-100 pro teplotu 20°C stanovena na $\sigma_{Pt100} = 0,19^{\circ}\text{C}$.

Pro výpočet jednotlivých teplotních diferencí jsou použity tři dvojice teplotních čidel. Čtvrtá dvojice odporových teploměrů slouží pouze jako redundantní bezpečnostní prvek, který zvyšuje bezpečnost experimentu v případě poruchy ostatních čidel. Celková nejistota měření teploty pro měřící zařízení je:

$$\sigma_{\frac{dT}{dt}} = \sqrt{6 \cdot \sigma_{Pt100}^2} = 0,47^{\circ}\text{C}$$

T [°C]	σ_{Tp100} [°C]
0	0,15
200	0,55
400	0,95
600	1,35

Tabulka 4.9: Příпустné odchylky teploměrů Pt-100 třídy A dle DIN EN 60751.

Míra nejistoty měření teplot pomocí odporových snímačů teploty Pt-100 lze výrazně snížit pomocí stanovením kalibrační závislosti jednotlivých snímačů ve tvaru Callendarovy-Van Dusenovy rovnice. [43]

Nejistota kalibrace

Kalibrační měření popsané v podkapitole 4.4 by mělo co nejvíce reflektovat skutečné měření palivových souborů ITR-4M tak, aby se kalibrační faktory $K(T)$ v rovnici (1.24) pro kalibrační měření i pro samotné měření rovnaly. V takovém případě je možné porovnávat naměřené rychlosti změny teploty k určení tepelného výkonu.

Pro zajištění podobného teplotního pole je nutné, aby elektrický ohříváč měl nejen stejnou geometrii jako palivový soubor IRT-4M, ale také, aby byl vyroben z podobných konstrukčních materiálů. Veškeré odchylky mezi materiály a objemy elektrického ohříváče a palivového souboru IRT-4M budou vnášet určitou chybu do konečných výsledků vypočítaných tepelných výkonů.

Z těchto důvodů je nezbytné korigovat naměřené rychlosti nárůstu teploty konstantou k , která eliminuje tyto odchylky. Velikost konstanty k je dána poměrem energie potřebné ke zvýšení teploty v systému o 1 °C pro elektrický ohříváč Q^{EO} a palivový soubor Q^{PS} :

$$k = \frac{Q^{EO}}{Q^{PS}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i^{EO} \cdot c_i}{\sum_{i=1}^n m_i^{PS} \cdot c_i} \quad (4.15)$$

Čitatel v rovnici (4.15) představuje součet hmotností všech látek násobený jejich měrnou tepelnou kapacitou vyskytující se v kalibračním měření s elektrickým ohříváčem. Tato hodnota bude závislá na objemu vody v kalorimetru⁸, množstvím materiálu kalorimetru⁹, rozdílných konstrukčních materiálů EO a PS.

Hmotnosti jednotlivých komponent kalorimetru lze vypočítat na základě navrženého technického schématu v příloze E a znalostí materiálů, ze kterých jsou všechny části vyrobené. Přesto je nezbytné jednotlivé díly kalorimetru experimentálně zvážit za pomoci přesných vah a vyvarovat se tak odchylkám při samotné výrobě.

Na základě parametrů uvedených v tabulkách 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 a 4.1 jsou stanoveny hmotnosti jednotlivých částí kalorimetru a palivového souboru IRT-4M. V

⁸Možné odchylky v objemech EO a PS budou vytlačovat odlišné množství vody z kalorimetrické nádoby.

⁹Speciální víko pro přívod napájení elektrického ohříváče bude mít jiné parametry, než použité víko pro experimentální měření PS.

tabulce jsou 4.10 uvedeny hmotnosti a měrné tepelné kapacity jednotlivých částí kalorimetru, které jsou důležité pro stanovení množství energie ke zvýšení teploty systému pro palivový soubor Q^{PS} .

	m_i [kg]	c_i [J/kg·K]	$m_i \cdot c_i$ [kJ/K]
Voda v kalorimetrické nádobě	50,72	4180	212,00
Stěny kalorimetru	44,49	898	39,95
Horní příruba	69,65	500	34,82
Horní víko	1,35	898	1,21
Spodní příruby	58,71	500	29,36
křížový stojan	0,22	898	0,20
Plynová izolace			
- He	$0,34 \cdot 10^{-3}$	5178	1,75
- Mix He + N 70% + 30%	$0,46 \cdot 10^{-3}$	4163	1,90
- N ₂	$2,37 \cdot 10^{-3}$	1039	2,46
- CO ₂	$3,73 \cdot 10^{-3}$	976	3,63
UO ₂	1,54	233	0,36
SAV1	4,46	896	4,00

Tabulka 4.10: Hmotnosti, měrné tepelné kapacity a celkový jejich příspěvek ke stanovení Q^{PS} .

Vypočítaná hodnota Q^{PS} byla stanovena na:

$$Q_{He}^{PS} = 323,65 \text{ kJ/K}$$

$$Q_{Mix}^{PS} = 333,791 \text{ kJ/K}$$

$$Q_{N_2}^{PS} = 324,36 \text{ kJ/K}$$

$$Q_{CO_2}^{PS} = 325,53 \text{ kJ/K}$$

Velikost směrodatné odchylky σ_k je daná přesností měření jednotlivých objemů a hmotností konstrukčních materiálů EO a PS. Konstrukční návrh elektrického ohříváče potřebného pro homogenizaci teplotního pole přesahuje rámec této práce. Z tohoto důvodu v této práci není proveden ani konstrukční návrh či parametrické výpočty, ani odhad cen z tohoto zařízení.

Nejistota ve stanovování kalibračních křivek

Způsob stanovování kalibrační křivky je popsán v podkapitole 4.4.2. Velikost nejistot způsobených výpočtem kalibračních křivek závisí na kvalitě zvoleného regresního modelu, které pomocí metody nejmenších čtverců hledají minimum součtu tzv. reziduálních čtverců S_e .

Pro hodnocení kvality regrese má největší význam druhá odmocnina reziduálního rozptylu s^2 , která má význam statistického odhadu směrodatné odchylky σ ve tvaru: [44]

$$s_i = \sqrt{\frac{S_e}{n - (p + 1)}} \quad (4.16)$$

kde n je počet bodů v regresní křivce a p představuje počet odhadovaných regresních koeficientů. Platí, že čím je větší hodnota reziduálního rozptylu s^2 , tím hůře bude model vystihovat naměřená data.

Pro výpočet zbytkového tepelného výkonu palivového souboru IRT-4M dle rovnice (4.2) je nutné stanovit směrodatné odchylky s_a a s_b pro konstanty a a b . Velikost nejistot ze stanovení kalibračních křivek lze zmenšit zvýšením počtu kalibrací při různých výkonech.

Celková nejistota

Celková nejistota vypočítaných hodnot výkonu palivového souboru IRT-4M dle rovnice (4.2) získaných experimentálním měřením je daná součtem nejistot nepřímého měření. Celkovou nejistotu lze vyjádřit ve tvaru: [45]

$$\sigma_P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial a}\right)^2 s_a^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial b}\right)^2 s_b^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial k}\right)^2 \sigma_k^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial \frac{dT}{dt}}\right)^2 \sigma_{\frac{dT}{dt}}^2} \quad (4.17)$$

4.9 Ekonomické hodnocení

Pracoviště reaktoru LVR-15 pro který je kalorimetr navrhován je ve vlastnictví společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. Tato výzkumná organizace disponuje dílnou, která pro reaktor LVR-15 vyrábí vlastní ozařovací sondy a bude schopna výrobu kalorimetru realizovat. A to jak z hlediska výrobních prostor, výrobních zařízení tak i s ohledem na personální požadavky.

Dále uvedené ekonomické hodnocení zahrnuje pouze náklady na materiál potřebný k výrobě kalorimetru. Ostatní další náklady, které by s výrobou kalorimetru byly spojeny, (mzdy, odpisy budov a zařízení, režijní náklady nevýrobní části společnosti, konstrukce elektrického ohříváče, atd.) jsem nebyl schopen nijak zjistit a ověřit.

Dále se principiálně předpokládá, že v případě, že by se kalorimetr ve společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. vyráběl, nebylo by složité (ve spolupráci s vedením společnosti) potřebné ekonomické údaje získat a dopočítat kompletní cenovou, resp. nákladovou kalkulaci.

Hlavní součásti kalorimetru jsou uvedeny v příloze E a náklady těchto částí pro konstrukci kalorimetru jsou uvedeny v tabulce 4.11. Velikost nákladů je stanovena převážně dle nabídek od více dodavatelů rozhodujících profilů pro polotovar. Veškeré ceny jsou vypočítané na jednotku požadovaného polotovaru. V ceně jsou zahrnuty pouze hlavní komponenty kalorimetru. Potřebné součásti např. šrouby, matice a těsnění mají cenu několika korun a konečnou cenu výrazně neovlivní.

Tabulka 4.12 obsahuje náklady na měřicí zařízení pro měření s uvažovaným kalorimetrem. Výběr měřících zařízení a jejich dodavatelů byl vybrán na základě doporučení od výzkumných pracovníků na reaktoru LVR-15.

	Profil	Rozměr [mm]	Počet [ks]	Cena za materiál bez DPH [Kč/kus]
Jekl	Jekl	75x75x5-500	1	254,-
Dolní příruba A & B	Plech	350x350x30	2	13 453,-
Dolní příruba C	Tyč	∅300-10	1	854,-
Vnější stěna	Trubka	∅320x10-889	1	5 026,-
Vnitřní stěna	Trubka	∅290x10-889	1	4 540,-
Horní příruba	Tyč	∅350-107	1	13 361,-
Víko	Tyč	∅160-35	1	499,-
Celkem				51 440,-

Tabulka 4.11: Seznam všech důležitých částí pro výrobu kalorimetru, včetně množství a jejich ceny.[46] [47][48][49][50]

	Počet [ks]	Cena bez DPH [Kč/kus]
1. okruh Pt100		
- 290 mm	1	2 885,-
- 590 mm	2	3 249,-
- 890 mm	1	3 613,-
2. okruh Pt100	4	758,-
OMU 408UNI	1	10 270,-
Celkem		26 298,-

Tabulka 4.12: Seznam potřebných zařízení potřebné pro měření zbytkového tepelného výkonu. [51] [52] [53]

Kapitola 5

Zhodnocení navrženého řešení

Předkládané řešení kalorimetru dovoluje, na rozdíl od ostatních kalorimetrických metod, měřit zbytkový tepelný výkon pro velké rozsahy výkonů palivových souborů IRT-4M bez toho, aby došlo k porušení bezpečnostních limitů stanovených pro PS. Samotný princip měření nedovoluje, aby došlo k povrchovému varu PS, a to proto, že experiment bude v reálném čase ukončen dříve, než teplota povrchu PS dosáhne kritických hodnot.

Navržené řešení kalorimetru umožňuje bezpečně a s dobrou mírou přesnosti měřit zbytkový tepelný výkon použitých PS. Typ plynu použitého jako izolační medium mezi vnitřkem kalometrické nádoby a chladicí vodou v bazénu určuje, do jakého maximálního tepelného výkonu bude kalorimetr schopen bezpečně měřit. Při použití helia lze měřit až do hodnoty 488 kW, směs 70% helia a 30% dusíku umožňuje měření až do tepelného výkonu 383 kW, čistý dusík 271 kW a nejnižší tepelné výkony umožňuje změřit oxid uhličitý, který lze použít pro měření zbytkového tepelného výkonu pro více než jeden rok staré PS s výkonem 257 kW.

Pro případy, kdy by bylo potřeba měřit nižší tepelné výkony, než 257 kW, je možné použít izolačních plynů, které mají menší tepelnou vodivost, než mají plyny uvedené v této práci. Další cesta pro snížení minimálního měřitelného rozsahu navrženého kalorimetru spočívá ve snížení měřené teplotní difference mezi vnitřkem kalorimetrické nádoby a okolním prostředím. V takovém případě je ale cenou za snížení minimálního tepelného výkonu zhoršení přesnosti měření teplot odporovými teploměry a zároveň se díky menšímu počtu datových bodů zvýší i nejistota ve stanovování kalibračních křivek. Snížení teplotní difference tak bude mít vliv na zvýšení celkové nejistoty ve stanovení výkonů.

K nejvýraznějšímu snížení měřitelného tepelného výkonu kalorimetru dojde zredukováním tepelných ztrát unikajících do okolí přidáním dalších izolačních vrstev. Izolace může být ve formě např. pěnového polyuretanu, pomocí kterého by bylo možné odizolovat horní i spodní přírubu.

Při snižování tepelných ztrát je nutné brát v potaz předpokládanou velikost zbytkového tepelného výkonu měřeného PS a provést výpočty dokazující, že nedojde k porušení bezpečnostních limitů a podmínek pro palivo IRT-4M.

Výhodou navrženého kalorimetru je, že měření lze provádět přímo na pracovišti reaktoru LVR-15. Měření v bazénech určených pro skladování ozářeného paliva bude zajištěna bezpečnost pro obsluhu kalorimetru.

Celková cena materiálu potřebného na výrobu kalorimetru by neměla přesáhnout částku 90 000,- Kč bez DPH.

Závěr

První dvě části této diplomové práce mají rešeršní charakter a byly zpracovány se záměrem osvojení si potřebných základních informací pro návrh experimentu, kterým je možné naměřit zbytkový tepelný výkon palivového souboru IRT-4M na pracovišti experimentálního jaderného reaktoru LVR-15, které spadá pod výzkumnou organizaci Centrum výzkumu Řež. První část práce se detailně zabývá fyzikální podstatou zbytkového tepelného výkonu palivových souborů a fyzikální podstatou měření kalorimetrických metod, s jejíž pomocí by bylo možné navrhnout experiment na změření zbytkového tepelného výkonu palivového souboru IRT-4M. Další rešeršní část byla zpracována za účelem seznámení se s pracovištěm reaktoru LVR-15. Součástí této části je popis bezpečnostních limitů a předpisů na reaktoru LVR-15, které představují určitá omezení pro návrh experimentu

Ve třetí kapitole byly na základě rešeršních částí zhodnoceny možné lokality, ve kterých by bylo možné daný experiment realizovat a byla zhodnocena možná konstrukční řešení kalorimetru. Izotermické kalorimetry nelze žádným způsobem využít pro měření jaderného tepelného výkonu palivového souboru. Pro měření jaderného tepelného výkonu palivových souborů nelze využít ani adiabatické kalorimetry. I přes svoji konstrukční jednoduchost, adiabatický kalorimetr přináší značné riziko pro dodržení limitů a podmínek, které platí pro palivo IRT-4M na reaktoru LVR-15. Při využití čerstvě vytažených palivových souborů by se v uvažovaném adiabatickém kalorimetru dosáhlo nebezpečných teplot na povrchu palivového souboru v řádu vteřin. Použití adiabatického kalorimetru je proto teoreticky možné pro měření starších palivových souborů, které neprodukují tak vysoký tepelný výkon.

Poslední část je věnována vlastnímu návrhu experimentální metody a navrženému konstrukčnímu řešení kalorimetru určenému pro změření zbytkového tepelného výkonu palivového souboru IRT-4M. Navržené řešení je založeno na tepelné výměně pracující v isoperibolickém režimu, u kterého se kalibrační faktor sestavuje na základě kalibračního měření při známém výkonu. Popsané technické řešení kalorimetru, jehož hlavní části jsou zpracované do technické dokumentace v přílohách, pracuje na měření teplotních diferencí mezi vnitřkem kalorimetrické nádoby a okolní vodou bazénu. Jelikož je požadováno měřit v celém rozsahu teplotních výkonů palivových souborů, byla navržena izolace mezi vnitřní a vnější stěnou kalorimetru na základě odlišné velikosti tepelného odporu plynu. V práci bylo na základě energetické bilance dokázáno, že při zvolení izolační vrstvy ve formě helia je možné naměřit požadovaný teplotní rozdíl pro palivové soubory s velkým zbytkovým výkonem tak, aby nebyly porušeny limitní podmínky platící pro palivové soubory. Tepelná izolace ve formě helia nedovoluje naměřit potřebnou tepelnou diferencii pro starší palivové soubory. Z těchto důvodů jsou v práci uvedeny další izolační plyny, které umožňují měřit kalorimetru menší tepelné výkony. Dále je v této kapitole uvedeno potřebné přístrojové vybavení, které je důležité pro naměření potřebných teplotních rozdílů a

jsou navrženy dvě možnosti měření s rozdílnými rychlostmi měření nárůstu teploty a náchylnosti na okolní vlivy. Přesný výpočet výkonu je podmíněn velikostí nejistot, které jsou zapříčiněny měřením a stanovením kalibračních křivek. Poslední část kapitoly je věnována stanovení ceny pro výrobu kalorimetru a potřebného měřícího zařízení na základě výběru od různých dodavatelů.

V přílohách jsou uvedeny: výpočetní program (jazyk Python), vypracované technické výkresy důležitých součástí kalorimetru a ostatní obrázky, které jsou důležité pro celkovou představu stavu kalorimetrického měření palivových souborů na pracovišti reaktoru LVR-15.

Práce ukazuje možné hranice kalorimetrických metod pro měření tepelného zbytkového výkonu palivových souborů na jaderném pracovišti LVR-15 a má posloužit jako první krok k úplné podkladové dokumentaci a výrobě kalorimetru. V budoucnu by mělo být realizováno samotné experimentální měření a výpočet zbytkového tepelného výkonu palivového souboru IRT-4M z naměřených dat. Naměřené hodnoty poskytnou dostatečné množství dat pro možnou validaci výpočetních kódů, které se doposud používají pro výpočty zbytkových tepelných výkonů a posouzení dosavadních bezpečnostních analýz pro nakládání s vyhořelými palivovými soubory. Z těchto důvodů má provedení experimentálního ověření výpočetních modelů zbytkového tepelného výkonu velký význam, a to nejenom z hlediska technického, ale i z hledisek legislativních, ekonomických a bezpečnostních aspektů jaderného provozu.

Seznam Literatury

- [1] ALGORA, A., TAIN, J. L. *Decay Heat and Nuclear Data*, CHAPTER 5. IN-TECHOPEN, RIJEKA, 2012. STR. 71-86, DOI 10.5772/34622, ISBN 978-953-51-0018-8.
- [2] BEDŘICH HEŘMANSKÝ. *Termomechanika jaderných reaktorů*. PRAHA: ACADEMIA, FIRST EDITION, 1986. 436 s., ISBN 21-087-86.
- [3] VÝVIN TEPLA V JADERNÝCH REAKTORECH [ONLINE], 2018 [CIT. 22. PROSINCE 2020]. *Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT*. DOSTUPNÉ Z: [HTTP://ENERGETIKA.CVUT.CZ/WP-CONTENT/UPLOADS/2018/06/2014-ZS_1-VYVIN-TEPLA.PDF](http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/2014-ZS_1-vyvyn-tepla.pdf).
- [4] ČESKOSLOVENSKÁ KOMISE PRO ATOMOVOU ENERGIÍ. *Provozní režimy vodovodních energetických jaderných reaktorů*. ÚISJP PRAHA, PRVNÍ EDITION, 1980. 357 s.
- [5] TONG L. S., WEISMAN J. *Thermal analysis of pressurized water reactor*. AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, THIRD EDITION, 1996. 748 s., ISBN 0-89448-038-3.
- [6] HEZOUČKÝ F., ŠTECH S. *Základy teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními reaktory*. PLZEŇ: ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, FIRST EDITION, 2015. 198 s., ISBN 970-80-261-0548-0.
- [7] TODREAS N. E., KAZIMI M. J. *Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals*. TAYLOR & FRANCIS, 1990. 705 s., ISBN 1-56032-051-6.
- [8] KLOOSTERMAN, J. *Topic 3. Decay Heat Predictions: Experiments, Methods and Data. Integral validation and decay heat standards*. TU DELFT, AUGUST 2000. 47 s., IRI-131-2000-005.
- [9] GARLAND J. *Decay Heat Estimates for MNR*. MCMASTER UNIVERSITY, FEBRUARY 1999. TECHNICAL REPORT 1998-03 12 s.
- [10] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Spent fuel heat generation in an independent spent fuel storage installation [online]*. DECEMBER 2018. REGULATORY GUIDE 3.54, REVISION 2, 28 s. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.NRC.GOV/DOCS/ML1822/ML18228A808.PDF](https://www.nrc.gov/docs/ML1822/ML18228A808.pdf).
- [11] TOBIAS, A. DECAY HEAT. *Progress in Nuclear Energy*, VOLUME 5,(ISSUE 1), DECEMBER 1980. STR. 1-93, DOI 10.1016/0149-1970(80)90002-5, ISSN 978-0-08-027115-6,.

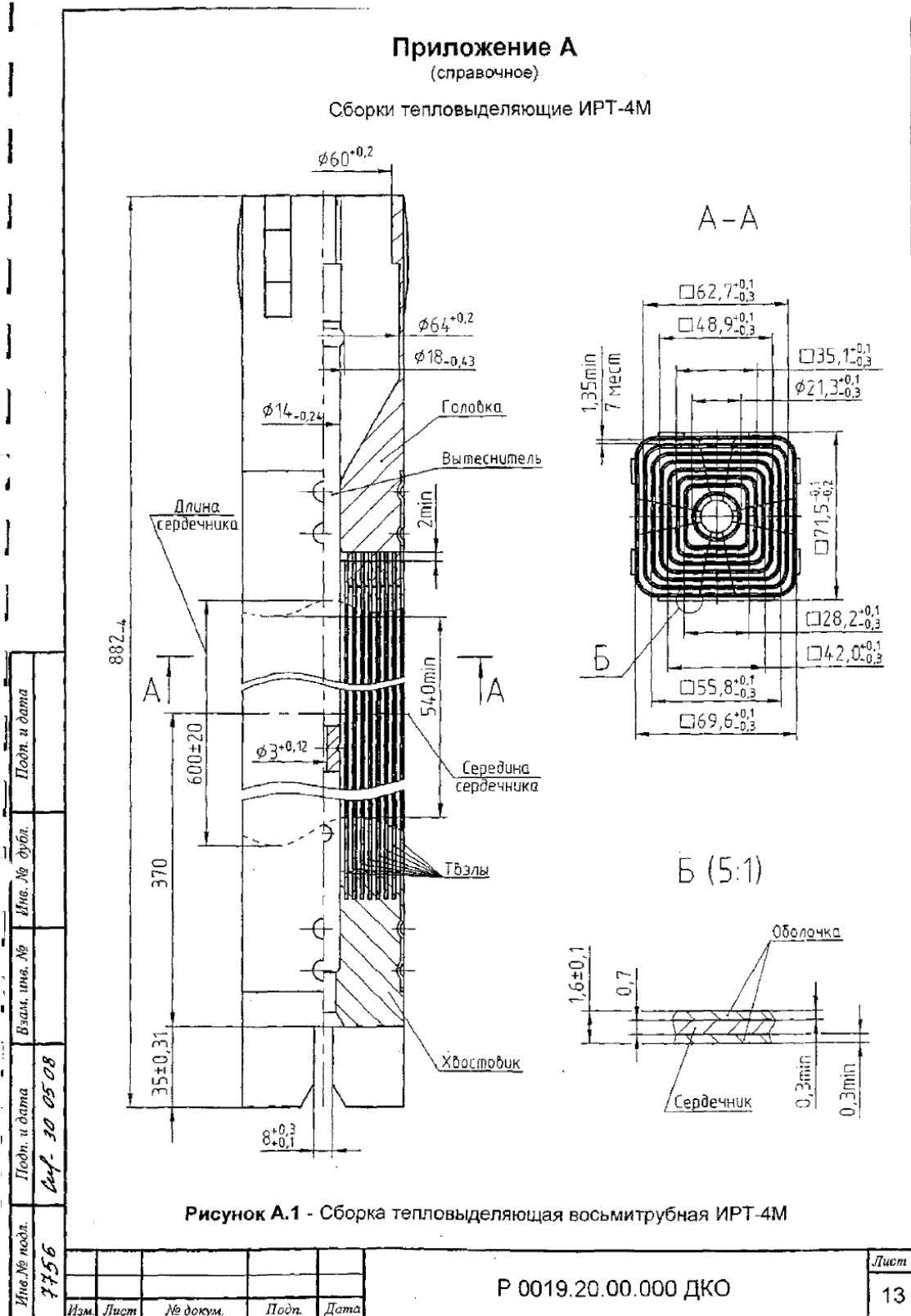
- [12] BROWN, M. E. *Handbook of thermal analysis and calorimetry*, VOLUME 1. ELSEVIER SCIENCE, NOVEMBER 2017. 780 s., ISBN 9780444531230, 9780080556314.
- [13] GIRALDO, L., RODRÍGUEZ-ESTUPIÑÁN, P., *Calorimetry of Immersion in the Energetic Characterization of Porous Solids*, IN: MORENO-PIRAJÁN, J. C. *Calorimetry - Design, Theory and Applications in Porous Solids*. INTECHOPEN, 2018. 124 s., ISBN 1789234395, 9781789234398.
- [14] SARGE, MATHIAS S., ET AL. *Calorimetry: Fundamentals, Instrumentation and Applications*. JOHN WILEY & SONS, APRIL 2014. 304 s., ISBN 978-3-527-32761-4.
- [15] WADSÖ, L. *The S1-calorimeter : a simple isothermal heat conduction calorimeter*, VOLUME VOLUME 7124 OF *Report TVBM (Intern 7000-rapport)*. DIVISION OF BUILDING MATERIALS, LTH, LUND UNIVERSITY, 1998.
- [16] ATKINS, P., PAULA, J., KEELER, J. *Atkins' Physical Chemistry: Molecular Thermodynamics and Kinetics*. OXFORD UNIVERSITY PRESS, 11 EDITION, 2019. 472 s., ISBN 0198823363, 9780198823360.
- [17] LIKES, R., *Chapter 21 - Princiles of Calorimetric Assay*, IN: REILLY, D., ENSSLIN, N., SMITH, H. JR. *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials*. LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY, MARCH 1991. STR. 617 - 640, ISBN 0-16-032724-5.
- [18] GIRALDO, L., *Calorimetry: A Technique Useful in Characterization of Porous Solid*, IN: MORENO-PIRAJÁN, J. C. *Calorimetry - Design, Theory and Applications in Porous Solids*. INTECHOPEN, 2018. 124 s., ISBN 1789234395, 9781789234398.
- [19] HÖHNE, G., HEMMINGER, W. K., FLAMMERSHEIM, H. J. *Differential Scanning Calorimetry*. SPRINGER, SECOND EDITION, 2001. 298 s., DOI 10.1007/978-3-662-06710-9, ISBN 978-3-642-05593-5.
- [20] HAINES, P. J. *Principles of thermal analysis and calorimetry*. ROYAL SOC. OF CHEMISTRY, CAMBRIDGE, 1ST EDITION, 2002.
- [21] ÇENGEL, YUNUS A. *Heat transfer: a practical approach*. MCGRAW-HILL, BOSTON, SECOND EDITION, 2003. 932 s., ISBN 0071151508; 9780071151504; 9780072458930; 0072458933.
- [22] CALORIMETY [ONLINE], 2012 [CIT. 22. PROSINCE 2020]. *BCcampus Open Textbooks*. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://OPENTEXTBC.CA/CHEMISTRY/CHAPTER/5-2-CALORIMETY/](https://opentextbc.ca/chemistry/chapter/5-2-calorimetry/).
- [23] HISTORIE REAKTORŮ VVR-S A LVR-15 V ÚJV ŘEŽ A.S., 2012 [CIT. 22. PROSINCE 2020]. [HTTPS://JADERNEINFO.WEBNODE.CZ/NEWS/HISTORIE-REAKTORU-VVR-S-A-LVR-15-V-UJV-REZ-A-S/](https://jaderneinfo.webnode.cz/news/historie-reaktoru-vvr-s-a-lvr-15-v-ujv-rez-a-s/).
- [24] REAKTOR LVR-15 [ONLINE], 2020 [CIT. 22. PROSINCE 2020]. *Centrum výzkumu Řež s.r.o.* DOSTUPNÉ Z: [HTTP://REAKTORY.CVREZ.CZ/REAKTOR-LVR-15](http://reaktory.cvrez.cz/reaktor-lvr-15).

- [25] ŠUNKA, M. *Kapitola 5 - Reaktor*, IN: DOSTÁL, P. *Provozní bezpečnostní zpráva reaktoru LVR - 15*. CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O., SEKCE PROVOZU REAKTORŮ 8400, VYDÁNÍ Č. 2 EDITION, 2019. REVIZE Č. 2, EVIDENČNÍ Č. CVR 2197.1 T.
- [26] RYCHECKÝ, P., *Kapitola 1- Úvod a stručný popis zařízení*, IN: DOSTÁL, P. *Provozní bezpečnostní zpráva reaktoru LVR - 15*. CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O., SEKCE PROVOZU REAKTORŮ 8400, VYDÁNÍ Č. 2 EDITION, 2019. REVIZE Č. 2, EVIDENČNÍ Č. CVR 2197.1 T.
- [27] SBORKI TĚPLOVYDĚLAJUŠČIJE IRT-4M. KATALOŽNOJE OPISANIJE, P0019.20.00.000 DKO, SOBSTVENNOST' OAO „NECHK“.
- [28] ŠTĚPÁNOVÁ, J. *Seznam vybraných zařízení reaktoru LVR - 15*. CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O., SEKCE PROVOZU REAKTORŮ 8400, VYDÁNÍ Č. 1 EDITION, 2019. REVIZE Č. 5, EVIDENČNÍ Č. PRO 8400.09.
- [29] NETŘEBSKÝ, P., RYCHECKÝ, J., NEUŽIL, J. *Kapitola 10 - Pomocné systémy*, IN: DOSTÁL, P. *Provozní bezpečnostní zpráva reaktoru LVR - 15*. CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O., SEKCE PROVOZU REAKTORŮ 8400, VYDÁNÍ Č. 2 EDITION, 2019. REVIZE Č. 2, EVIDENČNÍ Č. CVR 2197.1 T.
- [30] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. NÁRODNÍ ZPRÁVA PRO ÚČELY SPOLEČNÉ ÚMLUVY O BEZPEČNOSTI PŘI NAKLÁDÁNÍ S VYHOŘELÝM PALIVEM A O BEZPEČNOSTI PŘI NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY, 2005. REVIZE 2.3, 169 s., DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.SUJB.CZ/FILEADMIN/SUJB/DOCS/ZPRAVY/NARODNI_ZPRAVY/NZ_VP_RAO_2_3_CZ.PDF](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni_zpravy/nz_vp_raq_2_3_cz.pdf).
- [31] ANTES, M., *Kapitola 2 - Bezpečnostní cíle a požadavky*, IN: DOSTÁL, P. *Provozní bezpečnostní zpráva reaktoru LVR - 15*. CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O., SEKCE PROVOZU REAKTORŮ 8400, VYDÁNÍ Č. 2 EDITION, 2019. REVIZE Č. 2, EVIDENČNÍ Č. CVR 2197.1 T.
- [32] KIŇOVIČ, L., MILČÁK, J. *Limity a podmínky pro trvalý provoz reaktoru LVR-15*. CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O., SEKCE PROVOZU REAKTORŮ 8400, VYDÁNÍ Č. 1 EDITION, 2019. REVIZE Č. 10, EVIDENČNÍ Č. RP 8400.01.
- [33] ANTES, M., *Kapitola 16 - Bezpečnostní analýzy*, IN: DOSTÁL, P. *Provozní bezpečnostní zpráva reaktoru LVR - 15*. CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O., SEKCE PROVOZU REAKTORŮ 8400, VYDÁNÍ Č. 2 EDITION, 2019. REVIZE Č. 2, EVIDENČNÍ Č. CVR 2197.1 T.
- [34] MILČÁK, J. *Přepravní instrukce pro přepravu ozářeného paliva z objektu 211/1 do 211/8*. CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O., SEKCE PROVOZU REAKTORŮ 8400, 2020. EVIDENČNÍ Č. PI 8400.08.
- [35] *Measurements of decay heat in spent nuclear fuel at the Swedish interim storage facility, Clab*. SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB, DECEMBER 200. REPORT R-05-62, ISSN 1402-3091.

- [36] JANDERA, M.; ŽIDLICKÝ, B.; ŠORF, M. *Příručka pro navrhování konstrukcí z korozivzdorné oceli*. ČVUT V PRAZE, 2017. 222 s., ISBN 978-80-01-06395-8 DOSTUPNÉ Z: [HTTP://WWW.STEEL-STAINLESS.ORG/MEDIA/1483/DMSSS-CZ.PDF](http://www.steel-stainless.org/media/1483/dmsss-cz.pdf).
- [37] VLASTNOSTI HLINÍKU [ONLINE], [CIT. 22. PROSINCE 2020]. *Alumeco CZ s.r.o.*. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.ALUMECO.CZ/TECHNICK%C3%A9-INFORMACE/%C3%BA%20DAJE-O-HLIN%C3%ADKU/VLASTNOSTI-HLIN%C3%ADKU](https://www.alumeco.cz/technick%C3%A9-informace/%C3%BA%20DAJE-O-HLIN%C3%ADKU/VLASTNOSTI-HLIN%C3%ADKU),.
- [38] HARVEY A. H. HUBER, M. L. *Thermal conductivity of gases*. CRC-PRESS, BOCA RATON, FL, 2011. VOLUME: 92ND ED. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://TSAPPS.NIST.GOV/PUBLICATION/GET_PDF.CFM?PUB_ID=907540](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=907540).
- [39] MELICHAR, T., BALÁZSOVÁ, M., FRÝBORT, O., HÁJEK, P., VINŠ, M. *Design of irradiation rig for testing of creep in cladding materials in LVR-15 reactor*. CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O., SEKCE VÝVOJ A VÝZKUM V ENERGETICE, ODDĚLENÍ ENERGETIKA A FÚZNÍ TECHNOLOGIE, VYDÁNÍ Č. 1 EDITION, 2018. REVIZE Č. 0, EVIDENČNÍ Č. CVR 3142.
- [40] E-TABULKY - TEPLOTNÍ VODIVOST PLYNŮ [ONLINE], [CIT. 22. PROSINCE 2020]. *ÚCHI VŠCHT Praha*. DOSTUPNÉ Z: [HTTP://UCHI-OLD.VSCHT.CZ/UPLOADS/ETABULKY/TEPVODPLYN.HTML](http://uchi-old.vscht.cz/uploads/etabulky/tepvodplyn.html),.
- [41] MARCINKA, O., . *Postup pro stanovování nejistot měření*. CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O., SEKCE PROVOZU REAKTORŮ 8400, 2016. , EVIDENČNÍ Č. CVR PP 03.
- [42] ČSN EN 6075. *růmyslové platinové odporové teploměry a platinové snímače teploty*. PRAHA : ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ, 2009. 32 s. TRŽIDÍCÍ ZNAK 258340.
- [43] HOW TO CALIBRATE AN RTD OR PLATINUM RESISTANCE THERMOMETER (PRT) [ONLINE], 2009 [CIT. 22. PROSINCE 2020]. *Instrumart.com - Fluke Corporation Hart Scientific Division*. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.INSTRUMART.COM/ASSETS/FLUKE-PRT-APPLICATION-NOTE.PDF](https://www.instrumart.com/assets/fluke-prt-application-note.pdf).
- [44] VYBÍRAL, B. *Zpracování dat fyzikálních měření*. STUDIJNÍ TEXT PRO ŘEŠITELE FO, STUDUJÍCÍ FYZIKU NA UHKA OSTATNÍ ZÁJEMCE O FYZIKU, 2020. 72 s., DOSTUPNÉ Z: [HTTP://FYZIKALNIOLYMPIADA.CZ/TEXTY/MERENI.PDF](http://fyzikalniolympiada.cz/texty/mereni.pdf).
- [45] BROŽ, J. A KOL. *Základy fyzikálního měření I*. STÁTNÍ PEDAGOGICKÉ NAKLADATELSTAVÍ, PRAHA, 1983. 1. VYDÁNÍ, 672 s.,.
- [46] ALUMECO CZ S.R.O. [ONLINE], [CIT. 22. PROSINCE 2020]. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.ALUMECO.CZ/](https://www.alumeco.cz/).
- [47] THE STEEL.COM [ONLINE], [CIT. 22. PROSINCE 2020]. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.THESTEEL.COM/CZ](https://www.thesteel.com/cz).
- [48] NEREZMATERIAL.CZ [ONLINE], [CIT. 22. PROSINCE 2020]. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.NEREZMATERIAL.CZ/](https://www.nerezmaterial.cz/),.

- [49] ALUCAD BOHEMIA S.R.O. [ONLINE], [CIT. 22. PROSINCE 2020]. DOSTUPNÉ Z: [HTTP://WWW.ALUNET.CZ/](http://www.alunet.cz/),.
- [50] EHLINIK.CZ [ONLINE], [CIT. 22. PROSINCE 2020]. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.EHLINIK.CZ/](https://www.ehlinik.cz/),.
- [51] JSP INDUSTRIAL CONTROLS, S.R.O [ONLINE], [CIT. 22. PROSINCE 2020]. DOSTUPNÉ Z: [HTTP://WWW.JSP.CZ/CZ/](http://www.jsp.cz/cz/),.
- [52] ORBIT MERRET, SPOL. S.R.O. [ONLINE], [CIT. 22. PROSINCE 2020]. DOSTUPNÉ Z: [HTTP://SHOP.MERRET.CZ/](http://shop.merret.cz/),.
- [53] RAWET S.R.O. [ONLINE], [CIT. 22. PROSINCE 2020]. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.RAWET.CZ/](https://www.rawet.cz/),.

Пříloha A - Osmi trubkový palivový soubor IRT-4M



Пříloha B - Šesti trubkový palivový soubor IRT-4M

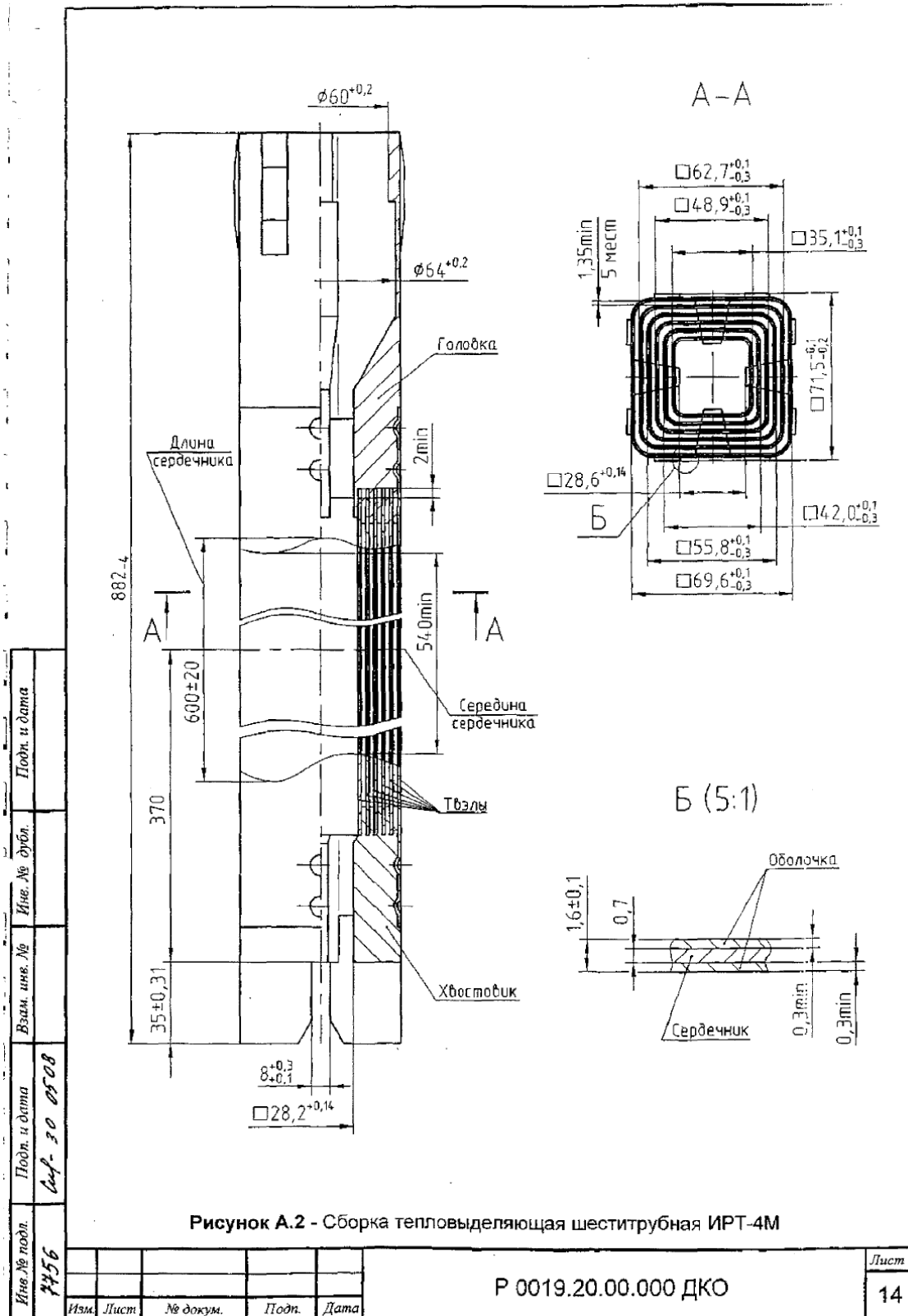


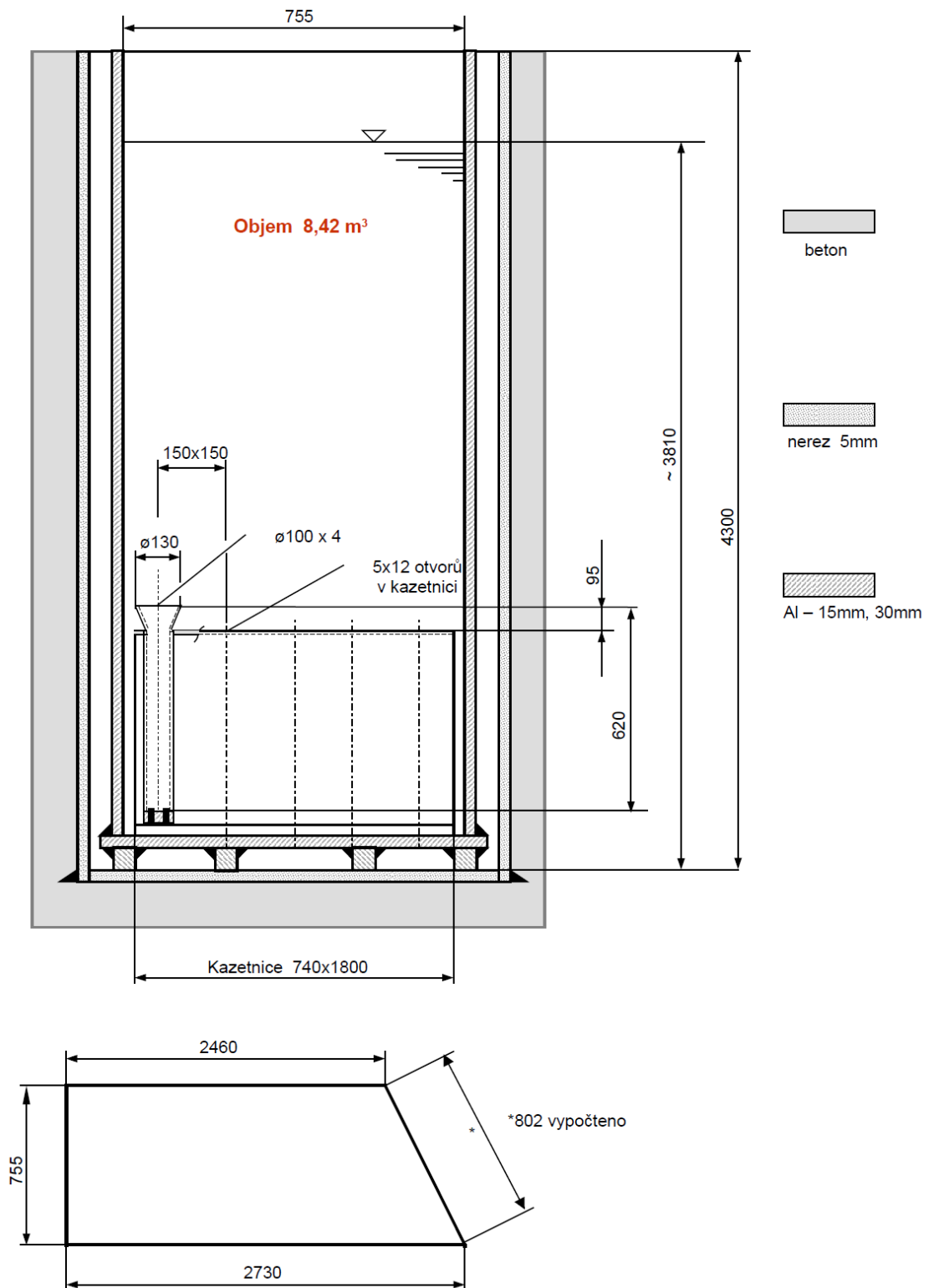
Рисунок А.2 - Сборка тепловыделяющая шеститрубная ИРТ-4М

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Исх. № дубл.	Подп. и дата
4456	вср-30 0808			

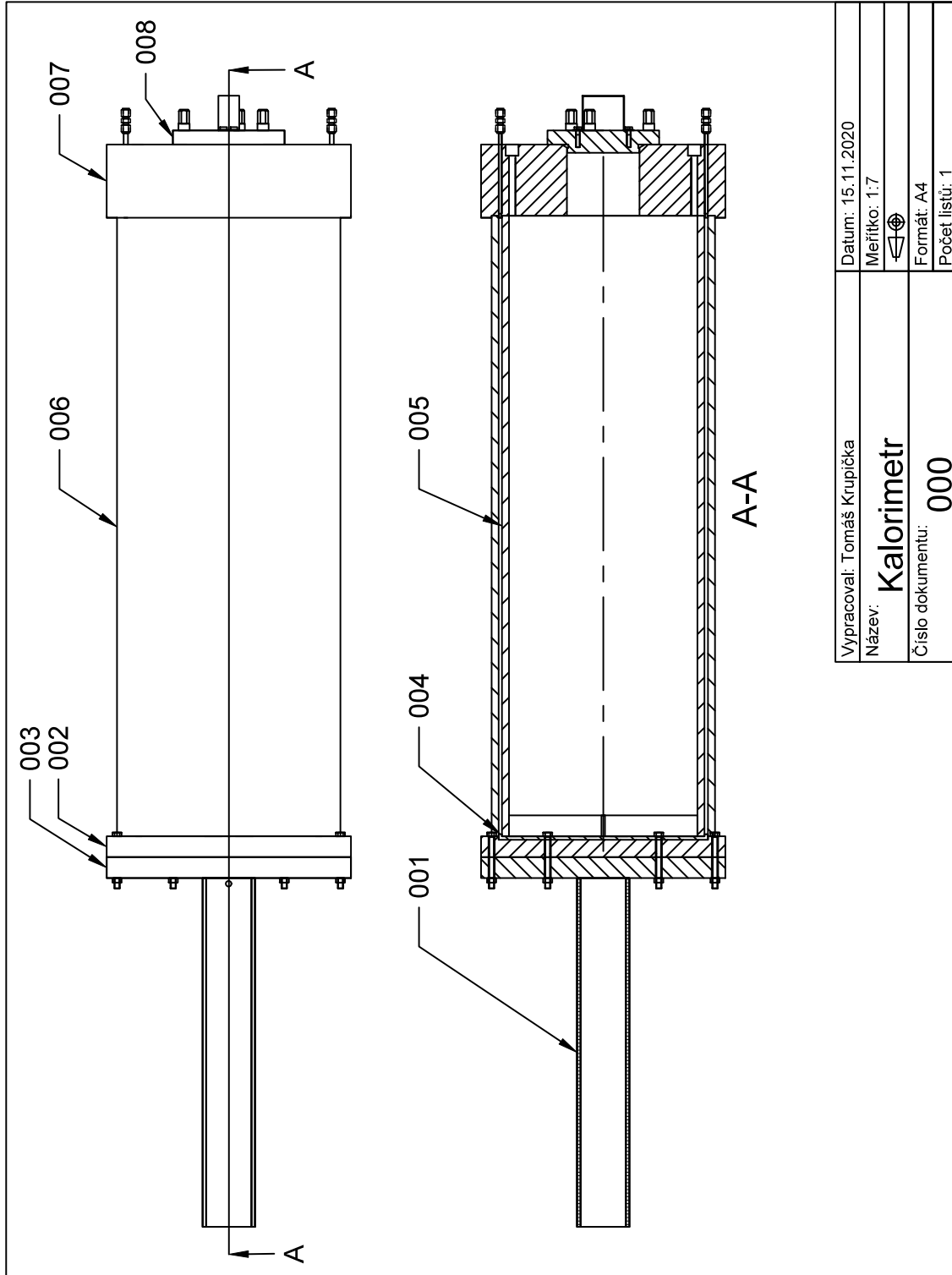
Р 0019.20.00.000 ДКО

Лист
14

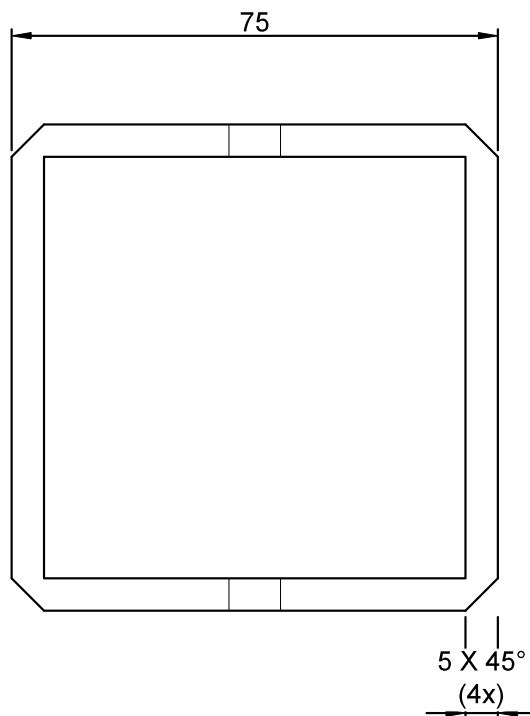
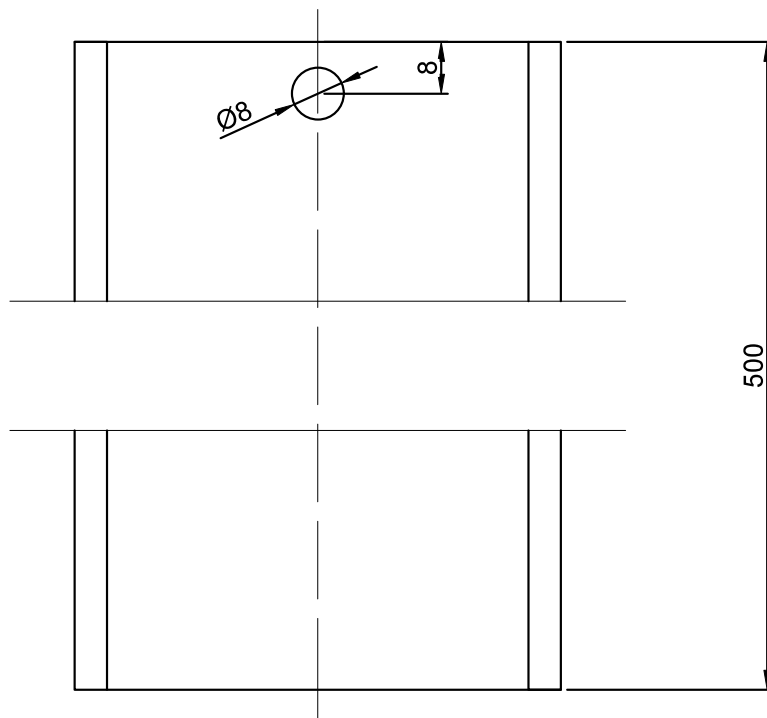
Příloha C - Mokrý zásobník



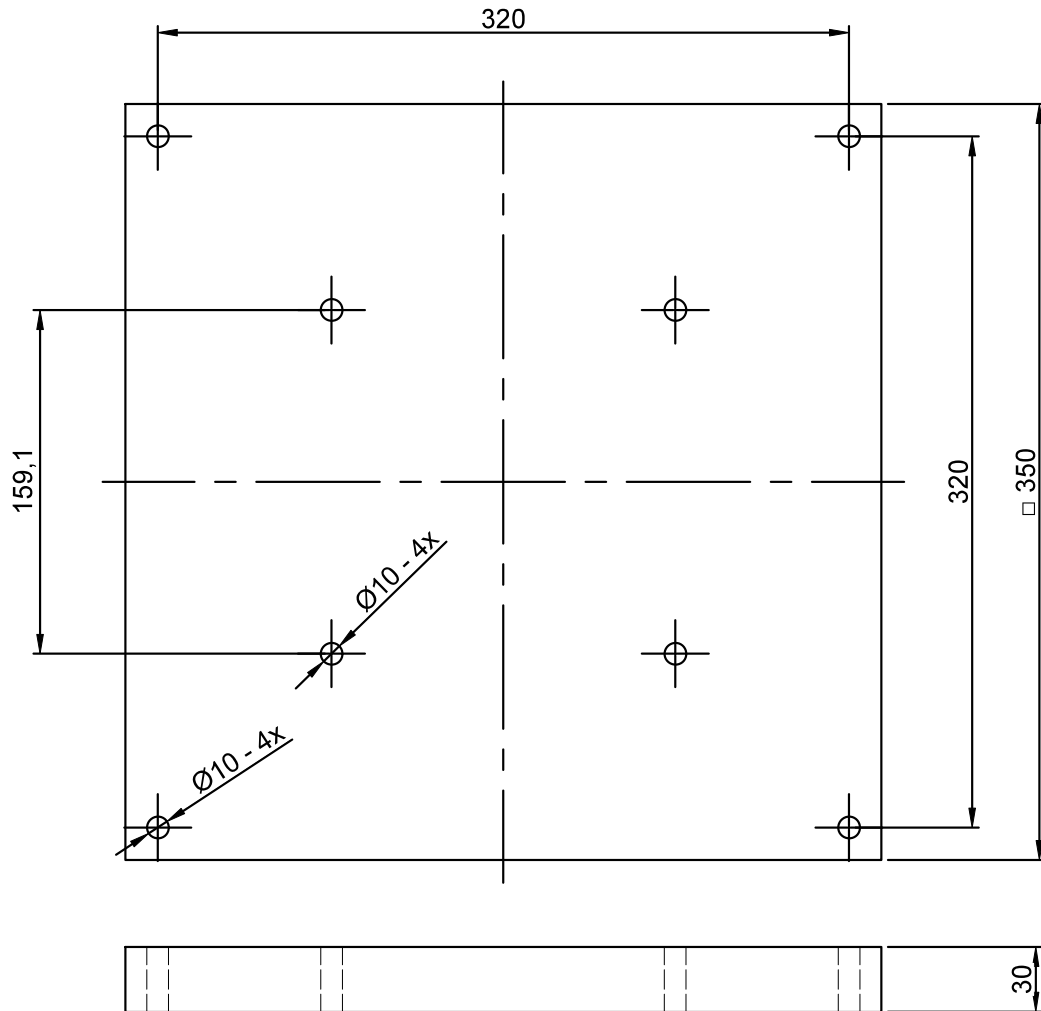
Příloha E - Výkresy kalorimetru



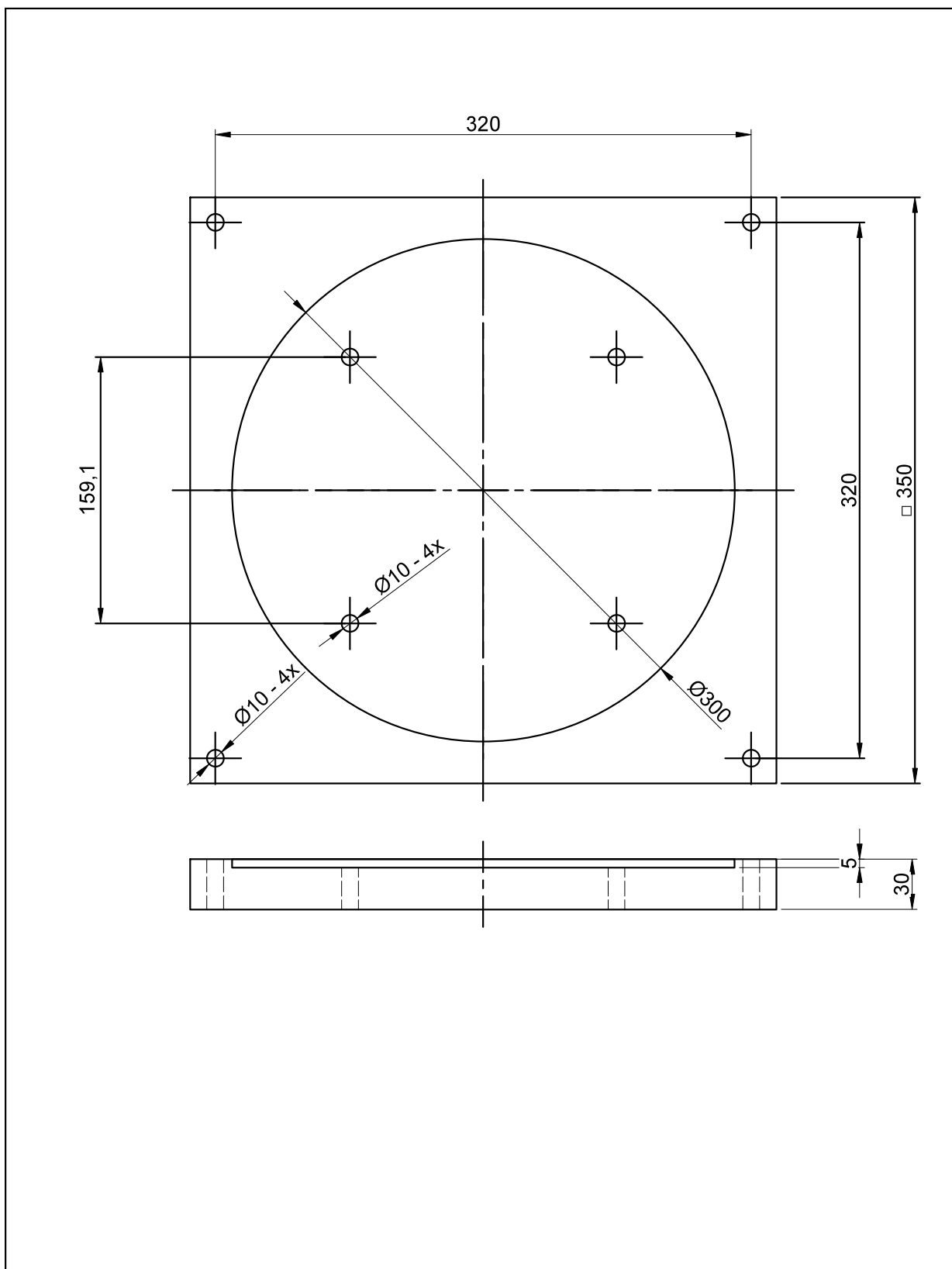
Vypracoval: Tomáš Krupička	Datum: 15.11.2020
Název: Kalorimetr	Meřítko: 1:7
Číslo dokumentu: 000	Formát: A4
	Počet listů: 1



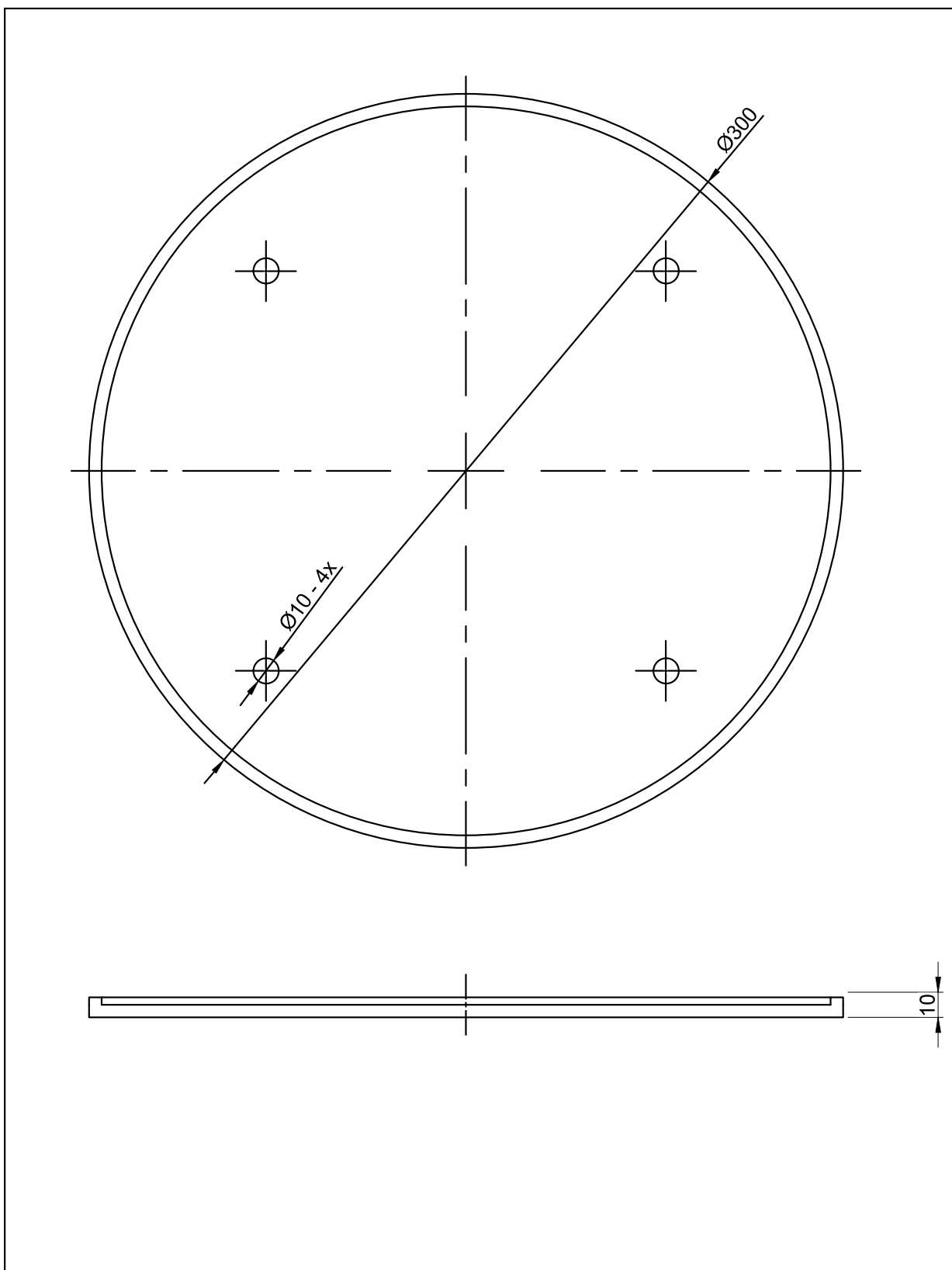
Polotovar: Jekl 75x75x5-500	Vypracoval: Tomáš Krupička	Datum: 15.11.2020
Materiál: EW AW 6060	Název: Jekl	Měřítko: 1:1
Mat. Norma: ČSN EN 573-3	Číslo dokumentu: 001	
Přesnost ISO 2768 - mK		Formát: A4
Tol. dle ISO 8015: NE		Počet listů: 1



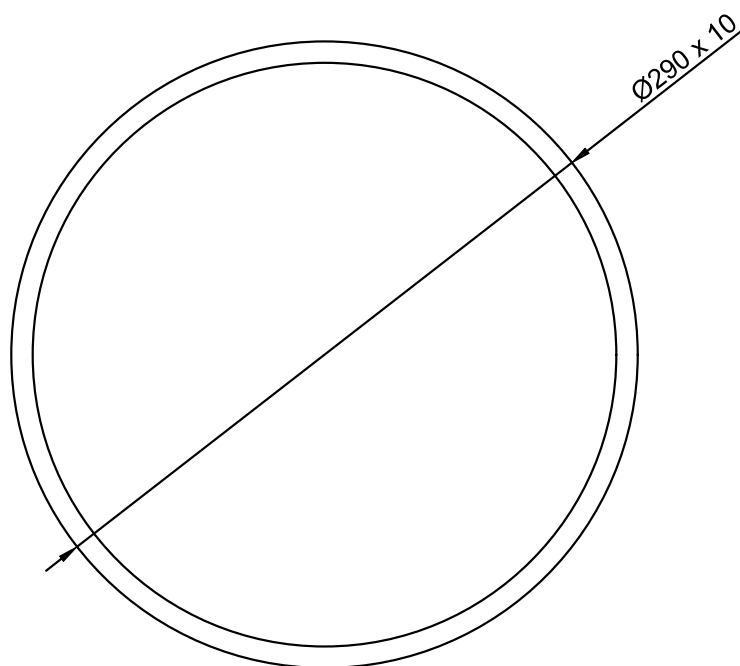
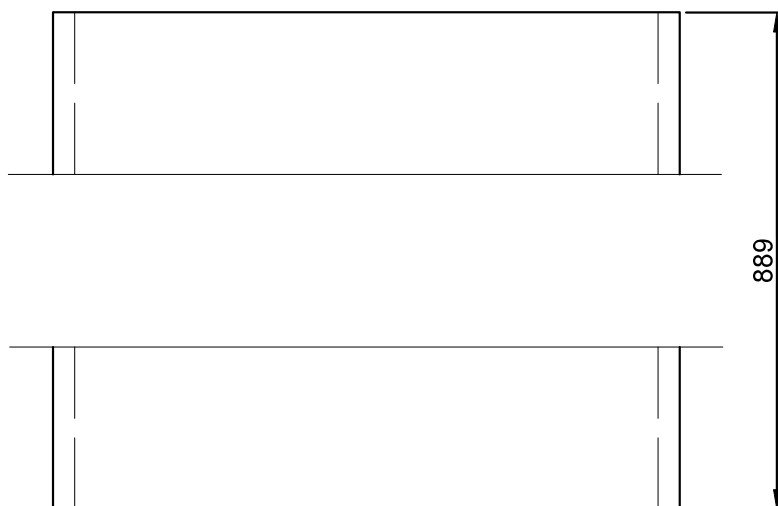
Polotovar: Plech 30x350x350	Vypracoval: Tomáš Krupička	Datum: 15.11.2020
Materiál: 1.4404	Název: Dolní příruba A	Meřítko: 1:3
Mat. Norma: ČSN EN 10088-1	Číslo dokumentu: 002	Formát: A4
Přesnost ISO 2768 - mK		Počet listů: 1
Tol. dle ISO 8015: NE		




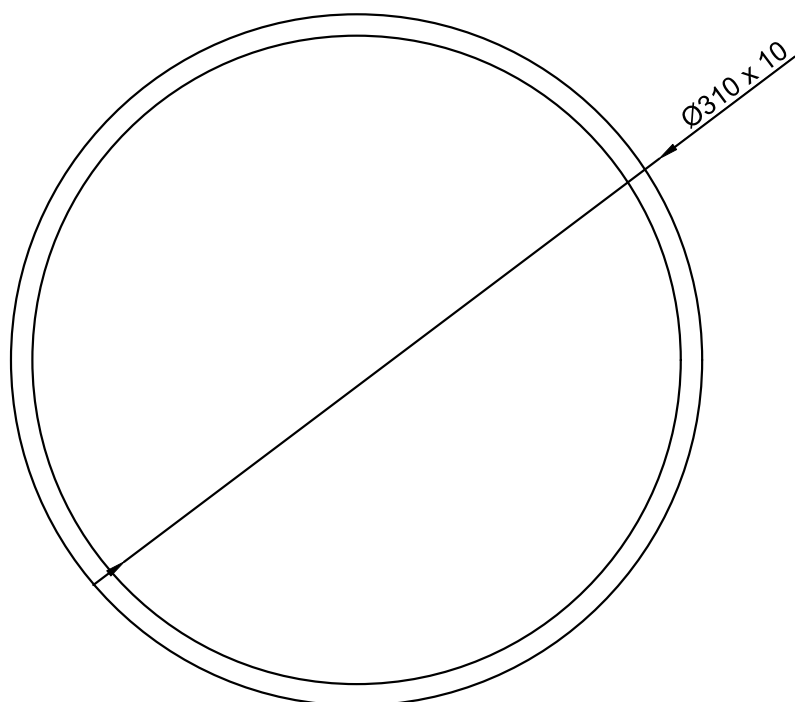
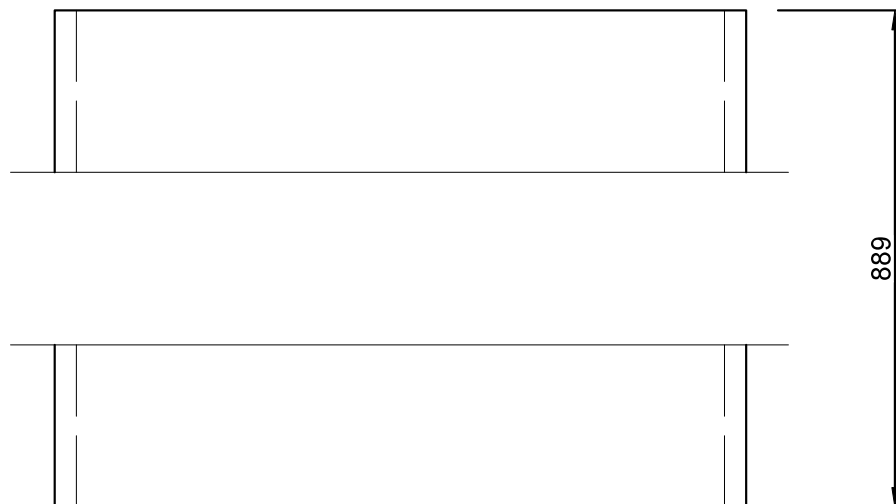
Polotovár: Plech 30x350x350	Vypracoval: Tomáš Krupička	Datum: 15.11.2020
Materiál: 1.4404	Název: Dolní příruba B	Meřítko: 1:3
Mat. Norma: ČSN EN 10088-1	Číslo dokumentu: 003	
Přesnost ISO 2768 - mK		Formát: A4
Tol. dle ISO 8015: NE		Počet listů: 1



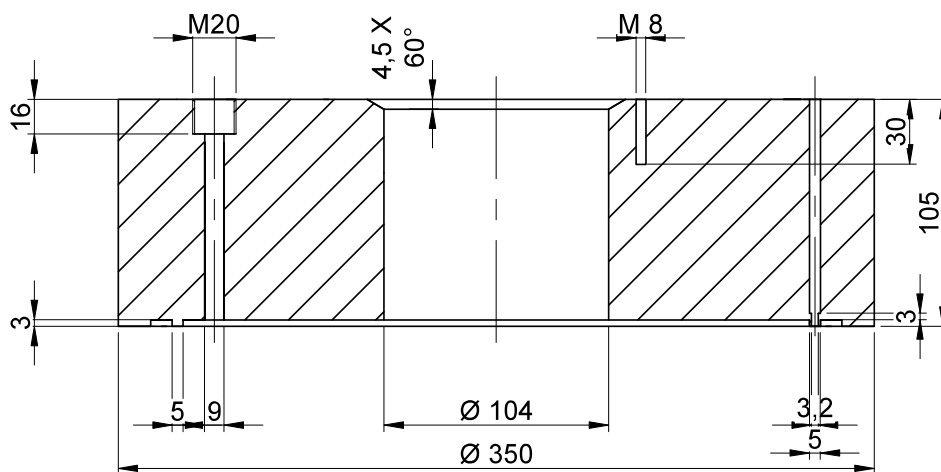
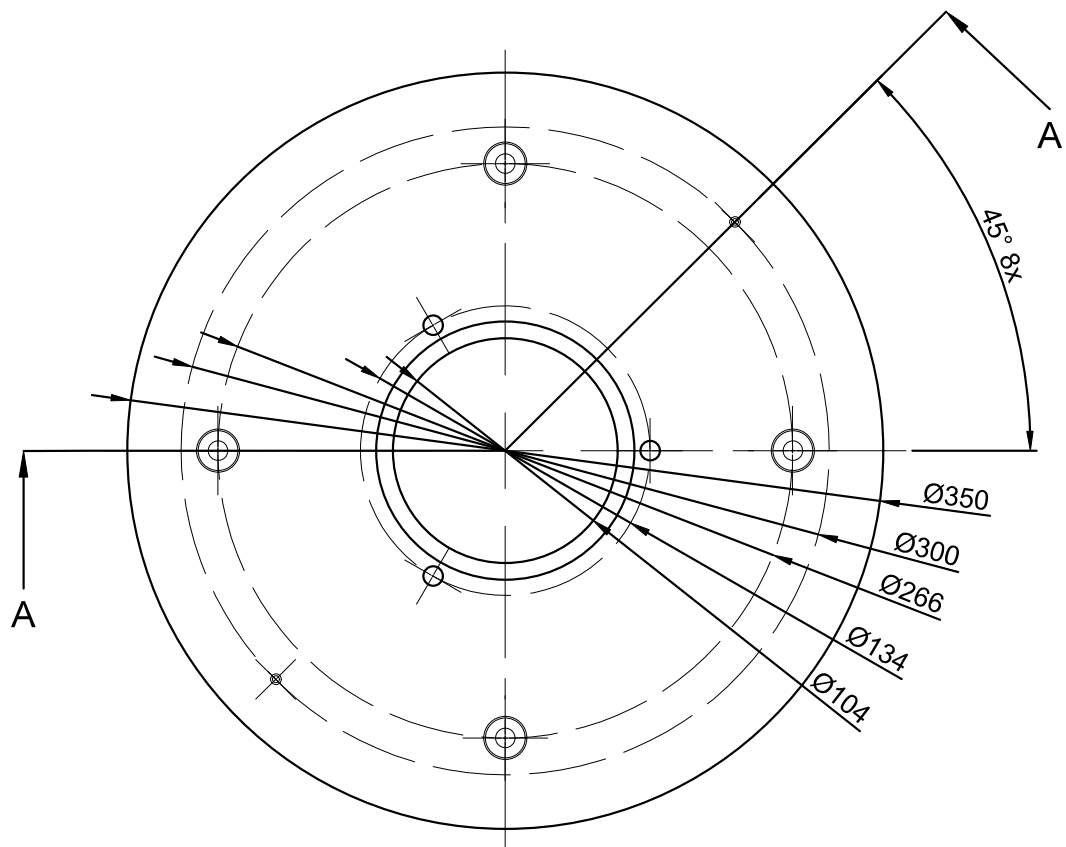
Polotovár: Tyč kr. Ø 300-10	Vypracoval: Tomáš Krupička	Datum: 15.11.2020
Materiál: 1.4404	Název: Dolní příruba C	Meřítko: 1:2
Mat. Norma: ČSN EN 10088-1	Číslo dokumentu: 004	
Přesnost ISO 2768 - mK		Formát: A4
Tol. dle ISO 8015: NE		Počet listů: 1



Polotovar: Trubka Ø 145x5-889	Vypracoval: Tomáš Krupička	Datum: 15.11.2020
Materiál: EW AW 6060	Název: Vnitřní stěna	Meřítko: 1:3
Mat. Norma: ČSN EN 573-3	Číslo dokumentu: 005	
Přesnost ISO 2768 - mK		Formát: A4
Tol. dle ISO 8015: NE		Počet listů: 1

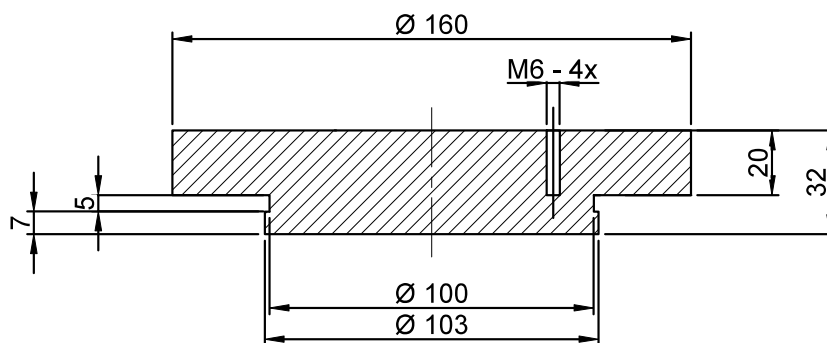
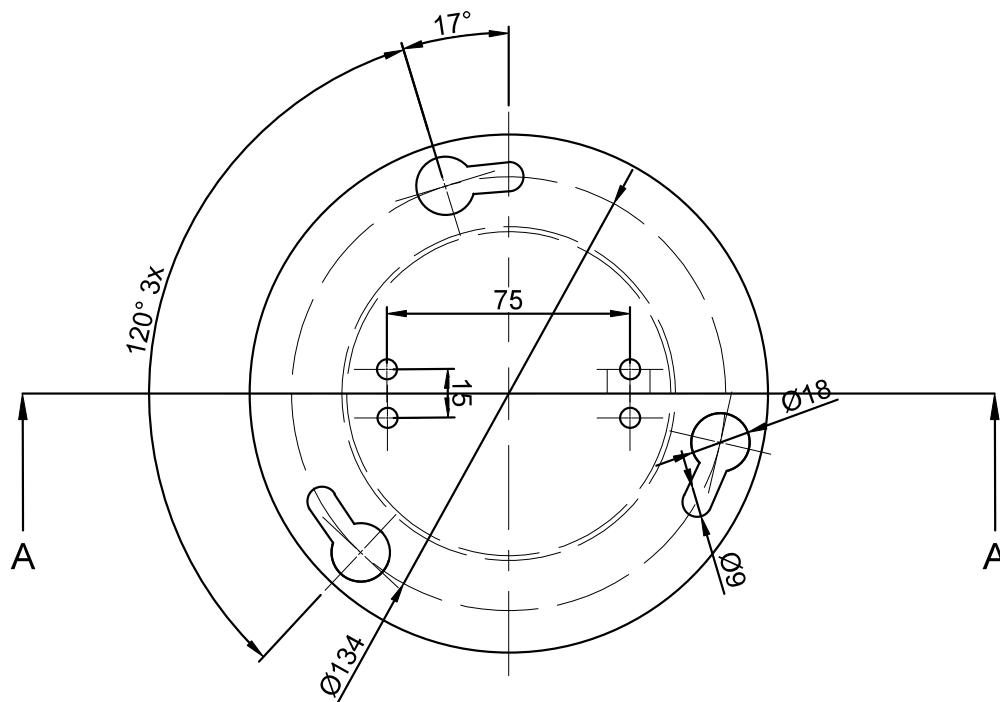


Polotovar: Trubka Ø 155x5-889	Vypracoval: Tomáš Krupička	Datum: 15.11.2020
Materiál: EW AW 6060	Název: Vnější stěna	Meřítko: 1:3
Mat. Norma: ČSN EN 573-3	Číslo dokumentu: 006	Formát: A4
Přesnost ISO 2768 - mK		Počet listů: 1
Tol. dle ISO 8015: NE		




A-A

Polotovár: Tyč kr. Ø 345-105	Vypracoval: Tomáš Krupička	Datum: 15.11.2020
Materiál: 1.4404	Název: Horní příruba	Meřítko: 1:3
Mat. Norma: ČSN EN 10088-1	Číslo dokumentu: 007	
Přesnost ISO 2768 - mK		Formát: A4
Tol. dle ISO 8015: NE		Počet listů: 1



A-A

Polotovár: Tyč kr. Ø 160-35	Vypracoval: Tomáš Krupička	Datum: 15.11.2020
Materiál: EW AW 6060	Název: Víko	Meřítko: 1:2
Mat. Norma: ČSN EN 573-3	Číslo dokumentu: 008	
Přesnost ISO 2768 - mK		Formát: A4
Tol. dle ISO 8015: NE		Počet listů: 1

Příloha F - Výpočet energetické bilance a tepelného schématu

```
import numpy as np
from decimal import *
from iapws import IAPWS97 as partab
import matplotlib.pyplot as plt

a = 1e-2 #nastaveni presnosti
num_of_dec = str(a)[: -1].find('.') #pocet desetinnych mist pro
    ↪ zaokrouhleni
HeN = False
N = False
CO2 = True

#geometrie
dr1 = 10e-3
dr2 = 5e-3
dr3 = 10e-3
dr_upperFlange = 3 * 34e-3
dr_lowerFlange = 6 * 10e-3

r0 = 38.965e-3
r1 = 135e-3
r2 = r1+dr1
r3 = r2+dr2
r4 = r3+dr3
l=889e-3
l_aktiv=600e-3
S_Flange = np.pi*r1**2
S_wall = np.pi*2*r1*l

lam_Flange = 15 #[W/mK]
lam_almg = 209

Tinfi = 30
T1=40
T_st = (T1-Tinfi)/2 + Tinfi
dT = T1-Tinfi

def R2(T_st):
    def lam_iz(T):
        if HeN == True:
            lam_hen27c = 0.093204
            lam_hen127c = 0.1134
            lam_iz = (T-27)/(127-27)*(lam_hen127c-lam_hen27c)+
                ↪ lam_hen27c
```

```

elif N == True:
    T+=273.15
    lam_iz = (0.3918e-3)+(0.9814e-4)*T+(-5.0660e-8)*T
        ↪ **2+(1.503479e-11)*T**3
elif CO2 == True:
    T+=273.15
    lam_iz = (-7.2139e-3)+(0.8014e-4)*T+(0.5476e-8)*T
        ↪ **2+(-1.05256e-11)*T**3
else:
    T+=273.15
    lam_he300k = 155.7e-3
    lam_he500k = 221.4e-3
    lam_iz = (T-300)/(500-300)*(lam_he500k-lam_he300k)+
        ↪ lam_he300k
    return lam_iz
R2 = 1/(2*lam_iz(T_st))*np.log(r3/r2)
return R2

R1 = 1/(2*lam_almg)*np.log(r2/r1)
R3 = 1/(2*lam_almg)*np.log(r4/r3)
R = R1+R2(T_st)+R3

q_upperFlange = lam_Flange/dr_upperFlange*(dT) #[W/m2]
q_lowerFlange = lam_Flange/dr_lowerFlange*(dT)
q_wall = np.pi*dT/R #[W/m]60

Q_upperFlange = q_upperFlange*S_Flange #[W]
Q_lowerFlange = q_lowerFlange*S_Flange
Q_wall = q_wall*1
Q_out = Q_upperFlange+Q_lowerFlange+Q_wall

Q_UF = Q_upperFlange/Q_out
Q_LF = Q_lowerFlange/Q_out
Q_W = Q_wall/Q_out

print("Q_UF =", '{:.{prec}f}'.format(Q_upperFlange, prec=num_of_dec),
    ↪ "[W];" , '{:.{prec}f}'.format(Q_UF, prec=num_of_dec), "[-]")
print("Q_LF =", '{:.{prec}f}'.format(Q_lowerFlange, prec=num_of_dec),
    ↪ "[W];" , '{:.{prec}f}'.format(Q_LF, prec=num_of_dec), "[-]")
print("Q_W =", '{:.{prec}f}'.format(Q_wall, prec=num_of_dec), "[W];" ,
    ↪ '{:.{prec}f}'.format(Q_W, prec=num_of_dec), "[-]")
print("Q =", '{:.{prec}f}'.format(Q_out, prec=num_of_dec), "[W]")
print("")

#####
#Tepelna schema
#####

```

```

Q = [24650,18350,5690,2950,2230,1780,270] #[W]
P = 0.1

if HeN == True:
    T4_app = [52.1,47.6,37.2,34.3,33.2,33,30.5]
elif N == True:
    T4_app = [40,38,33,32,31.5,30.5,30.3]
elif CO2 == True:
    T4_app = [38,36,32,31,31,31,30.2]
else:
    T4_app = [57.1,51.7,38.9,35.4,34.2,33.5,30.5]

Tinf = np.inf
T4 = np.ones(len(Q))*np.inf

for i in range(len(T4_app)):
    while np.abs(T4_app[i] - T4[i]) >= a:
        Pr = partab(T=Tinfi+273.15,P=P).Prandtl
        gamma = partab(T=Tinfi+273.15,P=P).alfav
        g = 9.8
        Kin_vis = partab(T=Tinfi+273.15,P=P).nu
        lam_watter = partab(T=Tinfi+273.15,P=P).k
        Gr = (T4_app[i] - Tinfi) * gamma * g * l**3/Kin_vis**2
        Ra = Gr * Pr
        if Ra < 10e9:
            Nu = 0.59*Ra**(1/4)
        else:
            Nu = 0.1*Ra**(1/3)
            alpha = Nu * lam_watter/l
            T4[i] = Q[i]*Q_W/(1*2*np.pi*r4)/alpha+Tinfi
            T4_app[i] += a/10
print("T4 = ", T4)

T3 = np.ones(len(T4))
for i in range(len(T4)):
    T3[i] = T4[i] + Q[i]*Q_W/l*R3/np.pi
print("T3 = ", T3)

T2 = np.ones(len(T3))
T2_app = np.ones(len(T3))*T3
Tst = np.ones(len(T3))*T3
for i in range(len(T3)):
    while np.abs(T2_app[i] - T2[i]) >= a:
        T2[i] = T3[i] + Q[i]*Q_W/l*R2(Tst[i])/np.pi
        Tst[i] = (T2[i] - T3[i])/2 + T3[i]
        T2_app[i] = T2[i]
print("T2 = ", T2)

```

```

T1 = np.ones(len(T2))
for i in range(len(T2)):
    T1[i] = T2[i] + Q[i]*Q_W/l*R1/np.pi
print("T1 = ", T1)

T0 = np.ones(len(T1))
Tst01 = np.ones(len(T1))*T1
T0_app = np.ones(len(T1))*T1+0.1
while np.abs(T0_app[i] - T0[i]) >= a:
    for i in range(len(T1)):
        if Tst01[i] > 100:
            T0[i] = None
        else:
            Pr = partab(T=Tst01[i]+273.15,P=P).Prandtl
            gamma = partab(T=Tst01[i]+273.15,P=P).alfav
            g = 9.8
            Kin_vis = partab(T=Tst01[i]+273.15,P=P).nu
            lam_watter = partab(T=Tst01[i]+273.15,P=P).k
            Gr = (T0_app[i] - T1[i]) * gamma * g * (r1-r0)**3/Kin_vis
                ↪ **2
            Ra = Gr * Pr
            Nu = 0.22*(Pr/(0.2+Pr)*Ra)**0.28*(l_aktiv)**(-1/4)
            lam_eff = lam_watter * Nu
            R0 = 1/(2*lam_eff)*np.log(r1/r0)
            T0[i] = T1[i] + Q[i]*Q_W/l*R0/np.pi
            Tst01[i] = (T0[i]-T1[i])/2+T1[i]
            T0_app[i] += a/10
print("T0 = ", T0)

```