

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2024**

**AMÁLIE-JOSEFÍNA  
BURSÍKOVÁ**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bursíková** Jméno: **Amálie-Josefína** Osobní číslo: **501239**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh systému chlazení šachty jaderného reaktoru typu GFR**

Název bakalářské práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

ÚJV Řež, a. s. je součástí několika mezinárodních projektů a sdružení vyvíjejících nové technologie v oblasti jaderných reaktorů i obnovitelných zdrojů energie. V rámci vývoje nového jaderného reaktoru typu GFR (gas-cooled fast reactor) ALLEGRO bude vyvinut nový koncept systému chlazení šachty reaktoru.

Cílem práce je provést základní návrh takového systému, obsahující popis funkce systému a základní tepelně-technické výpočty sloužící k dimenzování komponent systému. Výsledky této práce budou mít přímé využití ve špičkovém výzkumu nových jaderných technologií.

- 1) Proveďte literární rešerši na téma systémy chlazení šachty reaktoru a odvodu zbytkového tepla. Zaměřte se zejména na systémy použité ve vysokoteplotních plynem chlazených reaktorech.
- 2) Popište nový jaderný reaktor typu GFR ALLEGRO.
- 3) Pro různé tepotní hladiny vystupujícího vzduchu určete parametrické křivky chlazení šachty reaktoru pro odváděný výkon a tlakovou ztrátu (případně práci dmychadla) v závislosti na průtoku chladičeho vzduchu.
- 4) Určete hlavní parametry vodního okruhu chlazení potřebného pro odvod tepla z chlazení šachty reaktoru mimo kontejnment.

Seznam doporučené literatury:

- [1] M. Miller, L. Lommers, F. Shahrokhi: Main Features of the Reactor Cavity Cooling System for the Framatome SC-HTGR, , Proceedings of HTR 2018, October 8-10, 2018. Warsaw
- [2] P. Vácha: Stanovení teploty atmosféry uvnitř tlakové obálky demonstrátoru ALLEGRO při nominálním provozu, UJV-Z5104, 2019
- [3] R. Koryčanský: Ventilace tlakové obálky reaktoru GFR, diplomová práce, FSI VUT, 2014

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **16.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2025**

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

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 3.6.2024

.....

Amálie-Josefína Bursíková

## Poděkování

Ráda bych poděkovala za cenné rady, vedení a pomoc při psaní této práce doc. Ing. Pavlovi Záchovi, Ph.D. a doc. Ing. Václavovi Dostálovi, Ph.D.. Rovněž bych ráda poděkovala své rodině a přátelům za jejich nekonečnou podporu a pochopení během celého procesu psaní této práce. Veliké díky patří kolegům Ing. Janu Komrskovi za cenné odborné rady a rovněž Bc. Adamovi Paloudovi za vysvětlení složitých fyzikálních jevů a jejich matematickou aplikaci. Zvláštní poděkování patří Ing. Petrovi Váchovi, který sehrál významnou roli při stanovení tématu této práce. Jeho úsilí, inspirace a odborná podpora, jako člena projektu ALLEGRO, byla pro tuto práci klíčová.

Bez pomoci Vás všech by tato práce nebyla taková, jaká je. Děkuji!

## Anotační list

<b>Autor:</b>	Amálie-Josefína Bursíková
<b>Název BP:</b>	Návrh systému chlazení šachty jaderného reaktoru typu GFR
<b>Title of thesis:</b>	Design of the reactor cavity cooling system for GFR type nuclear reactor
<b>Rok vyhotovení:</b>	2024
<b>Studijní program:</b>	Teoretický základ strojího inženýrství
<b>Obor studia:</b>	Studijní program bezoborový
<b>Ústav:</b>	Ústav energetiky
<b>Vedoucí BP:</b>	doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 63 Počet obrázků: 24 Počet tabulek: 3 Počet grafů: 8 Počet příloh: 0
<b>Klíčová slova:</b>	GFR, ALLEGRO, RCCS, RVASC, DHR, jaderná energetika
<b>Keywords:</b>	GFR, ALLEGRO, RCCS, RVASC, DHR, nuclear power plant
<b>Anotace:</b>	Tato bakalářská práce se zabývá návrhem systému chlazení šachty jaderného reaktoru typu GFR. Práce obsahuje rešerši o konceptu GFR a jeho konkrétního typu ALLEGRO. Součástí rešerše je také studie DHR systémů s důrazem na RCCS a RVACS systémy. Součástí je i přehled přenosů tepla v kontextu jaderných reaktorů. V praktické části práce je provedena citlivostní analýza přenosu tepla. Na základě získaných výsledků je navržen vhodný systém dmyhadla a chladicího okruhu pro chlazení šachty reaktoru typu GFR.

**Annotation:**

This bachelor thesis focuses on the design of a cavity cooling system for GFR. The thesis includes a research on the GFR concept and the specific type of ALLEGRO reactor. The research also includes a study of DHR systems, with a focus on RCCS and RVACS systems and an overview of heat transfer in the context of nuclear reactors. In the practical part of the thesis, a sensitivity analysis of heat transfer is presented. Based on the results obtained, a suitable blower and cooling circuit system is designed for the reactor cavity cooling system of the GFR reactor shaft.

## Obsah

1	Úvod .....	15
2	Jaderné reaktory typu GFR.....	16
2.1	Definice a charakteristika GFR .....	16
2.2	Výhody a výzvy spojené s GFR .....	16
3	Reaktor ALLEGRO .....	16
3.1	Výzvy a budoucí vyhlídky .....	17
3.2	Návrh a technologie .....	17
3.3	Vývoj a spolupráce .....	18
3.4	Provozní charakteristiky.....	18
4	Bezpečnostní systémy v reaktorech typu ALLEGRO.....	19
4.1	Popis hlavních bezpečnostních systémů.....	19
4.1.1	Obálka reaktoru .....	19
4.1.2	Systém vstřikování plynu.....	19
4.1.3	DHR systémy .....	19
4.1.4	Vnitřní systémy DHR.....	21
4.1.5	Externí systémy DHR .....	21
4.1.6	Sekundární / intermediální DHR .....	22
5	Strategie pro odvod tepla ze šachty reaktoru ALLEGRO .....	22
5.1	Šachta reaktoru.....	22
6	Externí chlazení šachty reaktoru systémem RCCS.....	22
6.1	Konstrukční varianty systému RCCS.....	23
6.1.1	Chlazení vodou .....	24
6.1.2	Chlazení vzduchem.....	25
6.1.3	Kombinace voda-vzduch .....	27
7	Systém pasivního odvodu tepla .....	28



8	Externí chlazení šachty reaktoru systémem RVACS .....	28
8.1	Použití.....	29
8.2	Geometrie RVACS systémů .....	29
9	Chlazení atmosféry v kontejnmentu při havárii .....	31
9.1	CPSP – Bazény pro potlačení tlaku v kontejnmentu .....	31
9.2	CPHR – Systémy odvodu tepla a potlačení tlaku v kontejnmentu.....	32
9.3	Pasivní rozprašovací systém.....	35
10	Využití fyzikálních jevů pro sdílení tepla .....	35
10.1	Kondukce.....	36
10.2	Konvekce .....	36
10.2.1	Podobnostní čísla .....	37
10.2.1.1	Laminární a turbulentní proudění.....	37
10.2.1.2	Prandtlovo číslo.....	38
10.2.1.3	Nusseltovo číslo:.....	39
10.3	Sálání.....	39
10.3.1	Stefanův-Boltzmannův zákon .....	39
11	Problematika chlazení šachty reaktoru .....	40
12	Výpočtová analýza.....	40
12.1	Řešení ve výpočtovém programu MATLAB .....	41
12.2	Optimální varianta .....	41
13	Analýza přestupu tepla.....	41
13.1	Výpočet přestupu tepla na polokouli.....	43
13.2	Výpočet přestupu tepla na válci.....	45
13.3	Celkový tepelný tok.....	48
14	Tlakové ztráty .....	48
14.1	Tlakové ztráty v šachtě.....	49
14.2	Tlakové ztráty v mezikruží.....	50
14.3	Celkové tlakové ztráty.....	50

15	Hlavní parametry vodního okruhu chlazení .....	51
16	Výběr dmyhadla.....	52
17	Výsledky analýzy.....	53
17.1	Výsledky analýzy pro hodnoty výstupní teploty .....	54
17.2	Výsledky analýzy pro hodnoty ztrátového výkonu .....	54
17.3	Výsledky analýzy pro hodnoty tlakových ztrát.....	54
17.4	Výsledky analýzy pro výběr dmyhadla .....	54
18	Závěr.....	59
19	Zdroje .....	61

## Seznam obrázků

Obrázek č. 1	Hlavní okruh reaktoru ALLEGRO a systémy odvodu tepla [7] .....	17
Obrázek č. 2	Schématické uspořádání reaktoru v kontejnmentu[11] .....	20
Obrázek č. 3	Schéma různých systémů DHR [12].....	20
Obrázek č. 4	Schématické vyobrazení systému pro odvod tepla z reaktoru GT-MHR [13] .....	23
Obrázek č. 5	Schéma RCCS s vodou [14] .....	24
Obrázek č. 6	Schéma vodou chlazeného RCCS pro reaktory HTGR [13] .....	25
Obrázek č. 7	RCCS systém chlazený vzduchem. Schéma reaktoru GT-MHR [14] .....	26
Obrázek č. 8	Detailní schéma odvodu tepla pomocí vzduchu [14] .....	26
Obrázek č. 9	Schéma pro kombinaci chlazení voda-vzduch [14] .....	27
Obrázek č. 10	Schéma principu pasivního odvodu tepla [18].....	28
Obrázek č. 11	Schéma U-trubkového RVACS systému [21] .....	29
Obrázek č. 12	Schématický znázorněné čtyři geometrie systému RVAC[22].....	30
Obrázek č. 13	Bazény pro potlačení tlaku v kontejnmentu[23].....	31
Obrázek č. 14	CPSP systém instalovaný v elektrárně s ESBWR reaktorem[26] .....	32
Obrázek č. 15	Varianta 1 - Chlazení kontejnmentu pomocí kondenzátoru [23].....	33
Obrázek č. 16	Varianta 2 - Chlazení kontejnmentu pomocí kondenzátoru [21].....	33
Obrázek č. 17	Varianta 3 - Chlazení kontejnmentu pomocí kondenzátoru [21].....	34
Obrázek č. 18	Systémy pasivního odvodu tepla/potlačení tlaku v kontejnmentu [29] .....	34
Obrázek č. 19	Systém pasivního rozprašování [23].....	35
Obrázek č. 20	Schéma chlazení šachty reaktoru.....	42
Obrázek č. 21	Schéma chlazení v části polokoule .....	43
Obrázek č. 22	Schéma chlazení v části válce.....	45
Obrázek č. 23	Schéma pro výpočet tlakových ztrát v reaktoru.....	48
Obrázek č. 24	Dmychadlo AIR FOIL BEARING TURBO BLOWER [39].....	53

## Seznam tabulek

Tabulka č. 1 Výpis hlavních charakteristik pro reaktor ALLEGRO[4] .....	18
Tabulka č. 2 Tabulka s výsledky iterací pro část polokoule .....	45
Tabulka č. 3 Tabulka s výsledky iterací pro část válce.....	47

## Seznam grafů

Graf č. 1 Závislost výstupní teploty na rychlosti proudění vzduchu .....	55
Graf č. 2 Závislosti výstupní teploty na hmotnostním toku .....	55
Graf č. 3 Závislost ztrátového výkonu na rychlosti proudění.....	56
Graf č. 4 Závislost ztrátového výkonu na hmotnostním toku .....	56
Graf č. 5 Závislost tlakových ztrát na rychlosti proudění vzduchu.....	57
Graf č. 6 Závislost tlakových ztrát na hmotnostním toku .....	57
Graf č. 7 Závislost příkonu dmyhadla na rychlosti proudění vzduchu.....	58
Graf č. 8 Závislost objemového toku dmyhadla na rychlosti proudění vzduchu .....	58

## Seznam symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
$\lambda_{tr}$	Součinitele tření	[-]
$\lambda$	Tepelná vodivost	[W/m·K]
A, S	Plocha	[m <sup>2</sup> ]
T	Teplota	[°C] [K]
x, l	Délka	[m]
$\dot{Q}$	Tepelný tok	[W]
$\alpha$	Absorpce	[-]
$\alpha_1, \alpha_2$	Součinitel konvektivního přestupu tepla	[W/m <sup>2</sup> ·K]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
u, v	Střední hodnota rychlosti proudící tekutiny	[m/s]
D	Charakteristický průměr	[m]
$\vartheta$	Kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> /s]
Pr	Prandtlovo číslo	[-]
$\eta$	Dynamická viskozita tekutiny	[Pa·s]
$c_p$	Měrná tepelná kapacita tekutiny	[J/ kg·K]
Nu	Nusseltovo číslo	[-]
P	Výkon	[W]
$\epsilon$	Emisivita	[-]
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
E	Radiace	[W/m <sup>2</sup> ]
h	Výška	[m]
$\rho$	Hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\dot{m}$	Hmotnostní tok	[kg/s]
O	Obvod	[m]
P	Tlak	[Pa] [kPa]
$P_p$	Příkon	[W]
V	Objemový tok	[m <sup>3</sup> /min] [m <sup>3</sup> /s]

## Seznam zkratek

ABR	Anaerobic Baffled Reactor
AS	Air Separator
BWR	Boiling Water Reactor
CEA	Charles de Gaulle
CPHR	Containment Passive Heat Removal/pressure suppression systems
CPSP	Containment Pressure Suppression Pools
CV	Cavity Vessel
DHR	Decay Heat Removal
DRACS	Direct Reactor Auxiliary Cooling Systems
ELSY	European Leadcooled System
ESBWR	Economic Simplified Boiling Water Reactor
GDCS	Gravity-Driven Cooling System
GFR	Gas-cooled Fast Reactor
GT-MHR	Gas Turbine Modular Helium Reactor
H-MMR	Hybrid Micro Modular Reactor
HTR	High-Temperature gas-cooled
HTTR	High-Temperature engineering Test Reactor
IRACS	Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System
LOCA	Loss Of Coolant Accident
LOFA	Loss Of Flow Accident
LWR	Light Water Reactor
MTA EK	Hungarian academy of sciences centre for energy research
MYRRHA	Multi-purpose hybrid Research Reactor for High-tech Applications
NCBJ	National Centre for nuclear research
PBMR	Pebble Bed Modular Reactor
PBWFR	Pebble Bed Waste to Fuel Reactor
PEACER	Proliferation-resistant, Environment-friendly accident tolerant Continual & Economical Reactors
PGSFR	Prototype Gen-IV Sodium-cooled Fast Reactor
PRACS	Primary Reactor Auxiliary Cooling Systems
PRISM	Power Reactor Innovative Small Module
RCCS	Reactor Cavity Cooling System
RV	Reactor Vessel
RVACS	Reactor Vessel Auxiliary Cooling System
SBO	Station Blackout
SFR	Sodium-cooled Fast Reactor
V4G4	Visegrad 4 for Generation 4
VUJE	Výskumný Ústav Jadrovej Energetiky
XADS	Experimental Accelerator Driven Systém

# 1 Úvod

Téma bakalářské práce je "Návrh systému chlazení šachty jaderného reaktoru typu GFR". Tato bakalářská práce vznikla ve spolupráci s jaderným výzkumným centrem ÚJV Řež, a.s., který se podílí na několika mezinárodních projektech a je součástí sdruženích zaměřených na vývoj nových technologií v oblasti jaderných reaktorů a obnovitelných zdrojů energie. Práce bude sloužit ve vývoji nového jaderného reaktoru typu GFR (gas-cooled fast reactor) ALLEGRO, ve kterém bude popsán nový koncept systému chlazení šachty reaktoru.

Cílem této bakalářské práce je provést základní návrh systému pro chlazení šachty reaktoru, který obsahuje popis funkce tohoto systému a základní tepelně-technické výpočty potřebné pro dimenzování komponent systému.

V první části práce je popsán nový jaderný reaktor typu GFR ALLEGRO se zvláštním důrazem na jeho konstrukční a provozní charakteristiky. Zvláštní pozornost je věnována klíčovým prvkům chlazení, které zajišťují stabilitu a bezpečnost energetického systému.

Druhá část práce je věnována literární rešerši na téma technologie chlazení šachty reaktoru a odvodu zbytkového tepla. Zaměřuje se zejména na aplikace ve vysokoteplotních plynem chlazených reaktorech, které poskytují cenné poznatky pro návrh systému chlazení. V návaznosti je provedené krátké vysvětlení problematiky sdílení tepla.

Ve třetí části práce jsou pro různé teplotní hladiny vystupujícího vzduchu určeny parametrické křivky chlazení šachty reaktoru. Tyto křivky zahrnují odváděný výkon a tlakové ztráty v závislosti na průtoku chladicího vzduchu. Tento krok je klíčový pro optimalizaci chladicího systému a zajištění jeho efektivního provozu.

Čtvrtá část se věnuje určení hlavních parametrů vodního okruhu chlazení potřebného pro odvod tepla ze šachty reaktoru mimo kontejnment. To zahrnuje identifikaci optimálních parametrů pro zajištění efektivního přenosu tepla a minimalizaci energetických ztrát.

Práci uzavírá výběr vhodného dmyhadla, které zajišťuje optimální provoz celého systému.

## 2 Jaderné reaktory typu GFR

### 2.1 Definice a charakteristika GFR

Reaktor typu GFR je vysokoteplotní rychlý reaktor, který je chlazený heliem a používá uzavřený palivový cyklus. Zároveň je tento reaktor jedním z šesti pokročilých konceptů reaktorů vybraných mezinárodním fórem Generace IV. a nabízí řadu výhod oproti konstrukcím chlazených kapalinou [1, 2].

### 2.2 Výhody a výzvy spojené s GFR

Velikou výhodou reaktoru GFR je jeho udržitelné využívání zdrojů uranu a minimalizace odpadu. K minimalizaci odpadu dochází díky opakovanému přepracování paliva a štěpení dlouho žijících aktinoidů<sup>1</sup>. Další výhodou je účinnost tepelného cyklu a průmyslové využití produkovaného tepla například pro výrobu vodíku [1, 2].

Pro dosažení těchto cílů je však nezbytné řešit několik hlavních výzev. Rychlé reaktory musí disponovat velmi vysokým tokem neutronů pro maximální účinnost, což vyžaduje úzce uspořádanou aktivní zónu a minimální podíl konstrukčních materiálů a chladicího média. Tímto způsobem je dosažena obvykle vysoká hustota výkonu, která je u GFR v řádu 100 MW/m<sup>3</sup>, což je více než desetkrát vyšší hodnota než u reaktoru HTR [4].

## 3 Reaktor ALLEGRO

Reaktor ALLEGRO patří do kategorie plynem chlazených rychlých reaktorů GFR (Gas Cooled Fast Reactor), zároveň patří do koncepce reaktoru IV. Generace. Jedná se o nový koncept reaktoru, jehož cílem je prokázat životaschopnost technologie GFR. Má se jednat o vůbec první reaktor svého druhu, tzv. demonstrátor. Vyvíjí se od roku 2002 ve Francii, po roce 2010 přešlo řízení projektu do střední Evropy. V roce 2013 vzniklo konsorcium V4G4 Centre Of Excellence, které sdružuje celkem 6 organizací z pěti zemí Evropy [5].

---

<sup>1</sup> Aktinoidy jsou skupinou kovových prvků v periodické tabulce prvků, které jsou známé svými radioaktivními vlastnostmi a mají obrovské atomové a iontové poloměry. Obvykle vyplňují elektronovou slupku 5f, s určitými odchylkami [3].

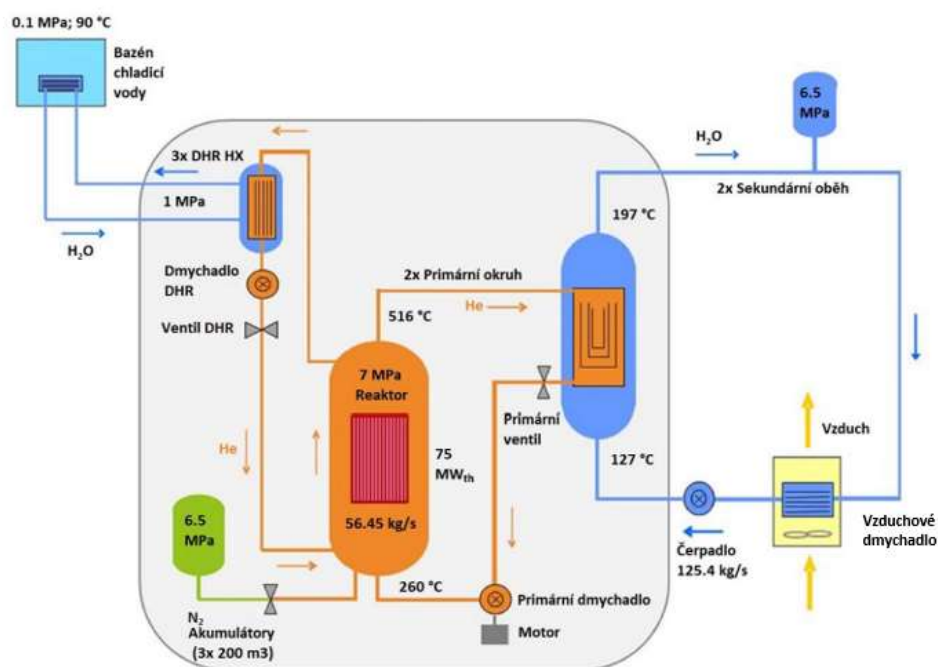


### 3.1 Výzvy a budoucí vyhlídky

Hlavním cílem projektu ALLEGRO je demonstrace nové koncepce rychlého reaktoru chlazeného plyným chladivem namísto tradičně používaných roztavených kovů (sodík, olovo). Reaktor ALLEGRO bude sloužit jako zkušební prostředí pro testování nových materiálů v oblasti výzkumu materiálů aktivní zóny reaktoru typu GFR. Další možností, která se v projektu zkoumá je možnost využití procesního tepla pro výrobu vodíku. A konečným cílem projektu ALLEGRO je kvalifikace technologie pro komerční využití technologie GFR v oblasti jaderné energetiky. Projekt ALLEGRO není navržen pro výrobu elektrické energie [4].

### 3.2 Návrh a technologie

Reaktor ALLEGRO má tepelný výkon v aktivní zóně  $75 \text{ MW}_t$ . Jako chladivo používá hélium, které cirkuluje ve dvou sousedních kanálech (horká a studená část) primárního okruhu. Během normálního provozu je teplo z primárního okruhu odváděno prostřednictvím výměníku tepla helium-voda do sekundárního okruhu. Konečný odvod tepla je realizován dvěma výměníky tepla voda-vzduch. V posledních letech je ve vývoji alternativní varianta s odvodem tepla skrz primární výměník plyn-plyn s následným využitím tepla v sekundárním okruhu [6].



Obrázek č. 1 Hlavní okruh reaktoru ALLEGRO a systémy odvodu tepla [7]

### 3.3 Vývoj a spolupráce

Reaktor ALLEGRO byl původně navržen francouzským výzkumným centrem CEA. V současné době je ALLEGRO vyvíjen v rámci projektu V4G4 CoE (Visegrad 4 for Generation 4 Centre of Excellence), na kterém se podílí Skupina ÚJV Řež a CVŘ (Česká republika), MTA EK (Maďarsko), NCBJ (Polsko) a VUJE (Slovensko), přidruženým členem je CEA (Francie) [8].

Vývoj ALLEGRA by měl postupovat dle harmonogramu [9]:

- 2010-2013- Přípravná fáze
- 2013-2025- Licenční a stavební fáze
- 2026-2046- Provoz reaktoru ALLEGRO
- 2046-2076- Fáze vyřazování z provozu

V současné době je však zjevné, že tento harmonogram nebude dodržen a fáze licenční a stavební se posune do budoucnosti [5].

### 3.4 Provozní charakteristiky

V projektu byly navrženy dvě po sobě jdoucí konfigurace paliva, jimiž je palivo typu MOX/UO<sub>2</sub> v ocelovém pokrytí, zatímco žáruvzdorná aktivní zóna obsahuje palivo typu (U,Pu)C v pokrytí SiC-SiCf. Cílem první aktivní zóny je dokončit kvalifikaci žáruvzdorného paliva. Cílová teplota na výstupu z aktivní zóny byla stanovena na 530 °C pro první aktivní zónu a 850 °C pro žáruvzdorné palivo. S hustotou výkonu až 100 MW<sub>t</sub>/m<sup>3</sup> je zajištěna vysoká efektivita výroby energie. Projekt je zaměřen na maximální využití pasivních systémů, což přispívá k zajištění bezpečnosti a spolehlivosti provozu reaktoru [4].

Hlavní charakteristiky pro ALLEGRO	
Jmenovitý výkon (tepelný)	75MW
Obohacení paliva	35% (MOX) / 19.5% (UO <sub>2</sub> )
Hustota výkonu	100 MW <sub>t</sub> /m <sup>3</sup>
Primární chladivo	He
Primární tlak	7 MPa
Teplota v aktivní zóně	260 °C / 530 °C
Experimental fuel in/out T	400 °C / 850 °C

Tabulka č. 1 Výpis hlavních charakteristik pro reaktor ALLEGRO[4]

## 4 Bezpečnostní systémy v reaktorech typu ALLEGRO

Pro reaktory typu ALLEGRO existují tři klíčové bezpečnostní systémy, jimiž jsou ochranná obálka reaktoru, systém DHR a nouzový systém vstřikování plynu [4].

### 4.1 Popis hlavních bezpečnostních systémů

#### 4.1.1 Obálka reaktoru

V současné době probíhá vývoj materiálu ochranné obálky reaktoru. Zkoumá se předepjatý beton a ocel. Obálka reaktoru plní několik klíčových funkcí mezi něž patří zabránění úniku radioaktivních látek a v případě havárie, poruchy chladicího systému (LOCA, Loss of Coolant Accident) udržení zvýšeného zbytkového tlaku v obálce primárním okruhu, čímž dojde k výraznému zlepšení odvodu tepla přirozenou konvekcí než při atmosférickém tlaku [4, 10].

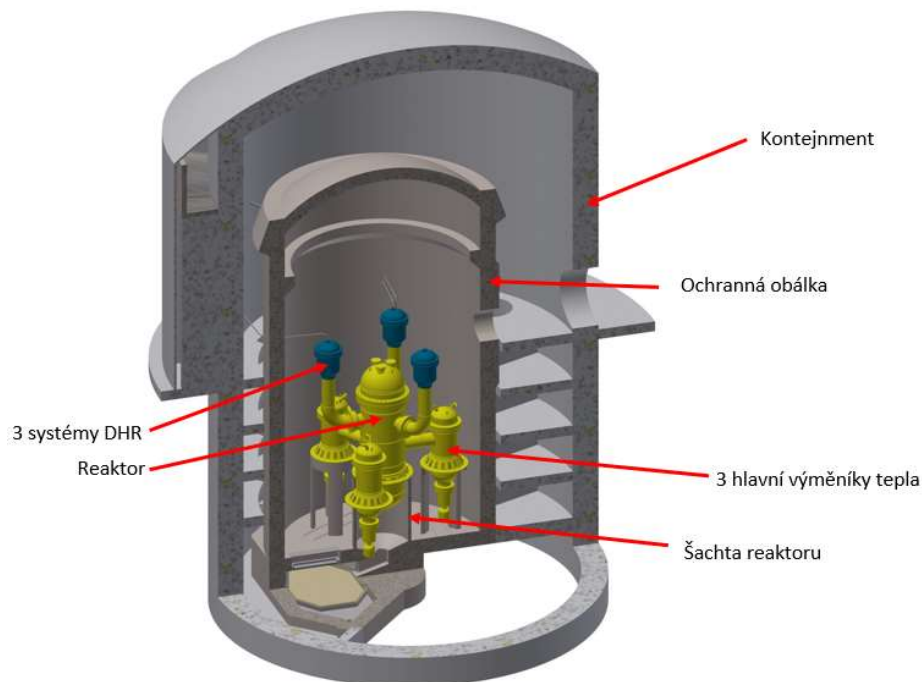
#### 4.1.2 Systém vstřikování plynu

Cílem systému vstřikování plynu je snížit maximální možné teploty paliva, které mohou vzniknout na pokrytí havárie typu LOCA. Pro reaktory typu GFR se vstřikují různě těžké plyny do primárního okruhu v různých polohách a s různými hmotnostními průtoky. Mezi plyny, které lze použít k chlazení, patří  $N_2$ , He,  $CO_2$ , Ar a směs 80 %  $N_2$  a 20 % He [3, 6].

#### 4.1.3 DHR systémy

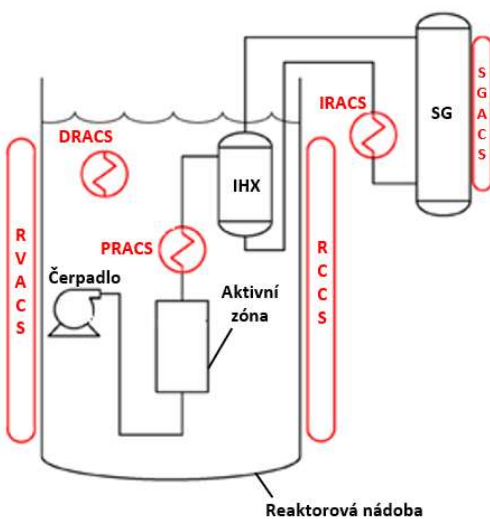
Systémy DHR jsou speciální chladicí smyčky, které jsou spojeny s tlakovou nádobou reaktoru RPV. Tento koncept je navržen s ohledem na to, že v případě těžké havárie fungují jako plně pasivní systém založený na přirozené konvekcii. Každá z těchto tří nezávislých chladicích smyček je schopna poskytnout odvod 100 % zbytkového tepla při pasivním režimu (nebo alternativně 2x100% plně pasivní + 1 poloaktivní). Tímto způsobem je zajištěna spolehlivost a bezpečnost provozu reaktoru i v případě selhání či ztráty jednoho z chladicích okruhů. Smyčky systému DHR jsou během provozu stále aktivní, což umožňuje rychlejší náběh v případě havárie. Při haváriích, jako je selhání napájení nebo ztráta průtoku chladiva (SBO/LOFA – Station Blackout/Loss of Flow Accident), představují hlavní prostředek pro odvod zbytkového tepla z reaktoru [4].

Návrh systému DHR je proveden tak, aby odvedl až 2,5 MW tepelného výkonu (což představuje 3 % celkového tepelného výkonu reaktoru) [10].



Obrázek č. 2 Schématické uspořádání reaktoru v kontejnmentu[11]

Systémy DHR jsou nedílnou součástí elektrárny, která během havárie často nevyžaduje žádný lidský zásah. Pro nejnovější generaci pokročilých reaktorů jiných než LWR (Light Water Reactor) bylo navrženo několik koncepcí systémů havarijního chlazení reaktoru. Na obr. 3. jsou demonstrovány různé koncepty pro reaktor SFR (Sodium-Cooled Fast Reactor), přičemž systémy jako chlazení šachty reaktoru RCCS a pomocné chladič systémy reaktorové nádoby RVACS jsou použitelné i pro jiné typy reaktorů [12].



Obrázek č. 3 Schéma různých systémů DHR [12]

Úsilí o vývoj systémů DHR pro pokročilé reaktory vyústilo v návrh různých konstrukčních koncepcí a v rozsáhlé související analýzy a testovací programy. Na základě specifických součástí reaktoru a mechanismů chlazení lze systémy DHR zhruba rozdělit do tří různých kategorií, jak je shrnuto níže [12]:

- DHR výměník uvnitř reaktoru
- DHR výměník vně reaktoru
- Sekundární / intermediální výměník DHR

#### **4.1.4 Vnitřní systémy DHR**

K vnitřním DHR systémům patří [12]:

- a) Přímé pomocné chladicí systémy reaktoru (DRACS, Direct Reactor Auxiliary Cooling Systems), které odvádí zbytkové teplo pomocí výměníků tepla ponořených přímo do bazénu chladiva v reaktorové nádobě.
- b) Primární pomocné chladicí systémy reaktoru (PRACS, Primary Reactor Auxiliary Cooling Systems) odvádí zbytkové teplo z primárního systému pomocí výměníků tepla nebo pomocí tzv. integrací pomocných jednotek do mezilehlých výměníků tepla.

#### **4.1.5 Externí systémy DHR**

K těmto systémům patří dvě smyčky[12]:

- a) Pomocné chladicí systémy reaktorové nádoby (RVACS, Reactor Vessel Auxiliary Cooling Systems) v nichž se zbytkové teplo odvádí ze stěn reaktoru a ochranné nádoby konvekcí anebo sáláním. Odváděné teplo je předáváno vzduchu proudícímu v betonové šachtě reaktoru a odváděno do okolí přímo nebo sekundární výměnou konvekcí do vody.
- b) Chladicí systém šachty reaktoru (RCCS, Reactor Cavity Cooling System), kde je zbytkové teplo odváděno sáláním anebo konvekcí přímo ze stěn tlakové nádoby reaktoru (RPV) do panelů stojatých trubek se vzduchem nebo vodou.

Ve srovnání s RVACS poskytuje RCCS další mezní vrstvu oddělenou od betonové šachty reaktoru a sekundárního chladiva. Koncepty RCCS navíc pracují buď v plně pasivním režimu přirozenou cirkulací, nebo jsou aktivní během normálního provozu a pasivní během havarijního provozu.

#### **4.1.6 Sekundární / intermediální DHR**

Pro sekundární DHR systém se používá pomocný chladicí systém reaktoru IRACS (Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System), kde je zbytkové teplo odváděno výměníkem tepla, který je součástí sekundární chladicí smyčky. Tento výměník tepla přenáší teplo do speciální mezismyčky, která odvádí teplo do vzduchem chlazených výměníků tepla [12].

### **5 Strategie pro odvod tepla ze šachty reaktoru ALLEGRO**

Hlavní část této práce se zabývá návrhem systému pro odvod tepla ze šachty reaktoru ALLEGRO. I přesto, že v popisu reaktoru ALLEGRO je uvedeno, že disponuje vnitřními chladicími systémy, tak jsou převážně koncipovány jako pasivní. Tato práce se zabývá odvodem zbytkového tepla za normálního provozu, tedy aby odvod zbytkového tepla byl aktivním procesem. Problém, který nastává je, že zbytkové teplo se hromadí v šachtě reaktoru a je nezbytné zajistit jeho aktivní odvod. Pro návrh strategie odvodu tepla ze šachty reaktoru se inspiroji externími systémy DHR.

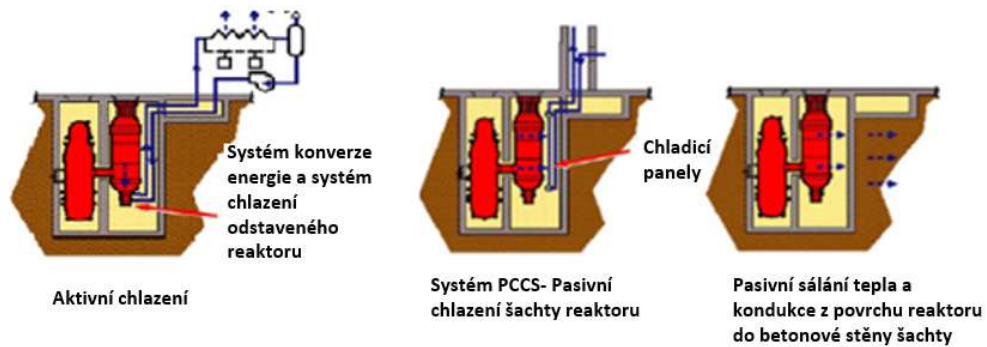
Pro pochopení problematiky je potřeba definovat pojem „šachta reaktoru“.

#### **5.1 Šachta reaktoru**

Šachta reaktoru je prostor, který obklopuje a chrání reaktorovou nádobu, která je v šachtě umístěna. Šachta je obvykle z betonu, což je materiál s vysokou odolností a schopností ochrany proti vnějším vlivům. Hlavním cílem šachty reaktoru je poskytnout stabilní a bezpečné prostředí před vnějšími vlivy, jako je tlak, teplota a radiace a zároveň minimalizuje riziko úniku nebo poškození.

### **6 Externí chlazení šachty reaktoru systémem RCCS**

Externí chlazení šachty reaktoru je bezpečnostním prvkem založeným na konstrukční podmínce, že v případě selhání všech aktivních chladicích systémů a úplné ztrátě chladicí kapaliny nepřekročí teplota v šachtě reaktoru maximální teplotu stanovenou výrobcem. Na obrázku číslo 4 je vyobrazen modulární heliový reaktor s plynovou turbínou GT-MHR (Gas Turbine Modular Helium Reactor), který má dva aktivní systémy odvodu tepla. Těmito systémy jsou systém konverze energie a systém chlazení odstaveného reaktoru. V případě, že žádný z těchto aktivních systémů není k dispozici, zajišťuje odvod zbytkového tepla z aktivní zóny chladicí systém šachty reaktoru (RCCS). RCCS systémy jsou navrženy jako pasivní bezpečnostní systémy využívající přirozené tlakové diference a vztahové síly. Pokud se předpokládá, že RCCS selže, je teplo odváděno vedením do stěny šachty reaktoru a okolní země [13].



Obrázek č. 4 Schématické vyobrazení systému pro odvod tepla z reaktoru GT-MHR [13]

## 6.1 Konstrukční varianty systému RCCS

Existuje několik konstrukčních variant, která jsou specifická pro jednotlivé typy reaktorů od různých dodavatelů. Každý typ reaktoru má svá vlastní inženýrská řešení, která optimalizují jeho výkon a bezpečnost, a tím se mění i konstrukční provedení RCCS. Základní rozdělení RCCS je dle tekutiny, která se používá jako chladicí médium. Rozdíly v teplotních médiích odrážejí potřeby jednotlivých reaktorů a podporují jejich efektivní provoz [14].

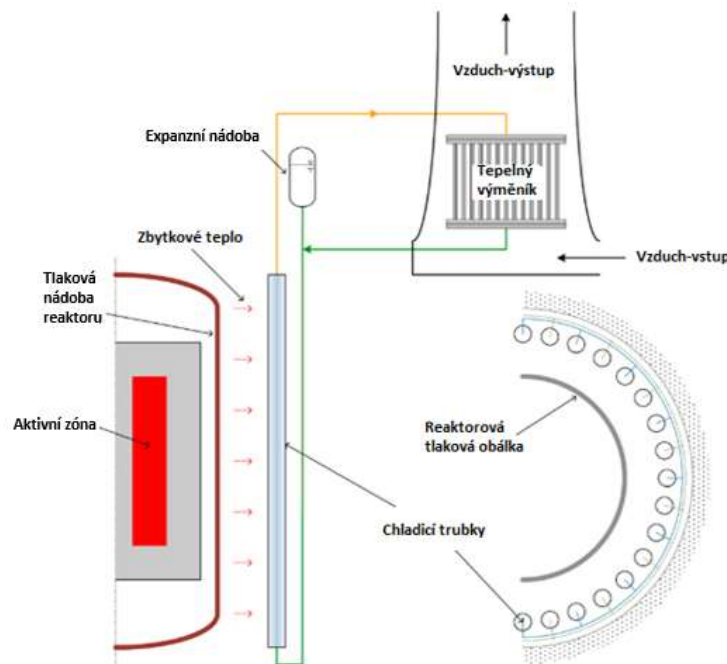
Kromě volby chladicího média, se také výrazně liší geometrie. Výběr konkrétní konstrukce chladicích systémů RCCS závisí i na dalších faktorech, včetně požadavků na výkon, provozních podmínek, technologických preferencí a bezpečnostních aspektů [12].

### Rozdělení dle chladicího média:

1. Voda
2. Vzduch
3. Kombinace voda-vzduch

### 6.1.1 Chlazení vodou

Vodou chlazený systém používá vodu k odběru tepla z šachty reaktoru. Odběr tepla je řízen přirozenou cirkulací pomocí vztlakových sil. Voda protéká chladicími panely a vzestupným potrubím se pohybuje vzhůru do vodní nádrže (v horní části reaktoru), nebo do výměníku tepla voda/vzduch [12, 15].

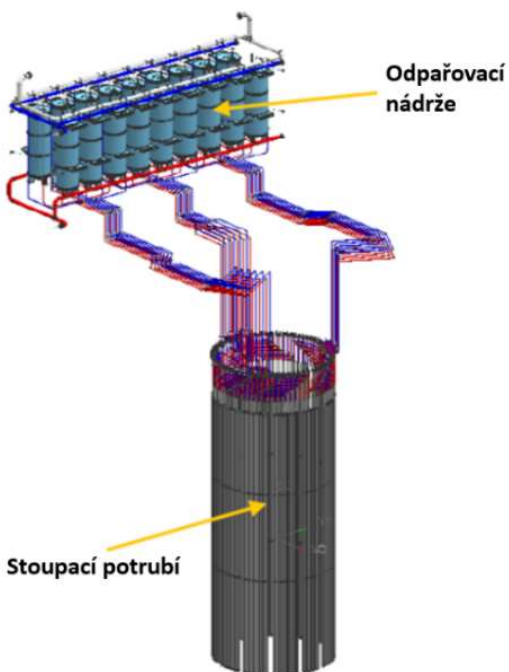


Obrázek č. 5 Schéma RCCS s vodou [14]

Vodou chlazený RCCS je nízkoteplotní a nízkotlaký systém se vstupní teplotou vody pod 30 °C. Počítá se, že za normálních podmínek nebude voda schopna dosáhnout teploty varu. Nastane-li havárie LOCA bude tento systém schopný pracovat v pasivním režimu přibližně 72 hodin do nutnosti venkovního zásahu [16].

Systém chlazení vodou byl instalován např. v HTR-10 (v Číně) a HTTR (v Japonsku). Nevýhodou tohoto systému jsou poměrně velké tepelné ztráty v panelech a komplikovaná potrubní síť. Pokud dojde k netěsnosti v systému zásobníku tepla (pravděpodobně v trubkách výměníku tepla voda/vzduch) dojde k postupnému vyčerpání zásoby vody a k zhoršení dostatečného odvodu tepla. Jako prevence se instalují dvě nezávislé smyčky se 100% kapacitou [14].





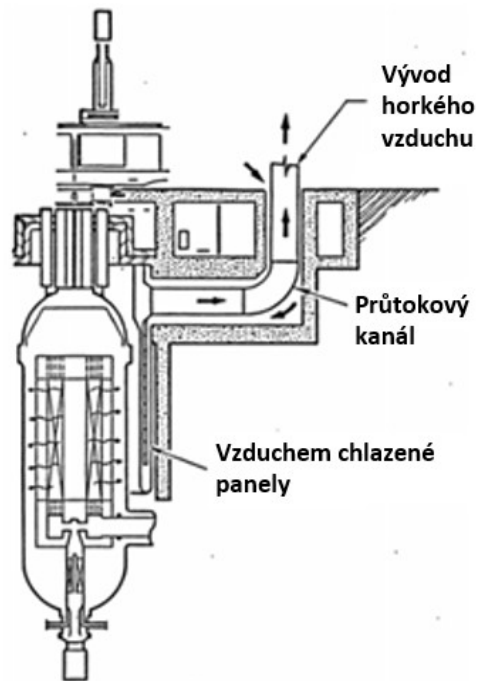
Obrázek č. 6 Schéma vodou chlazeného RCCS pro reaktory HTGR [13]

### 6.1.2 Chlazení vzduchem

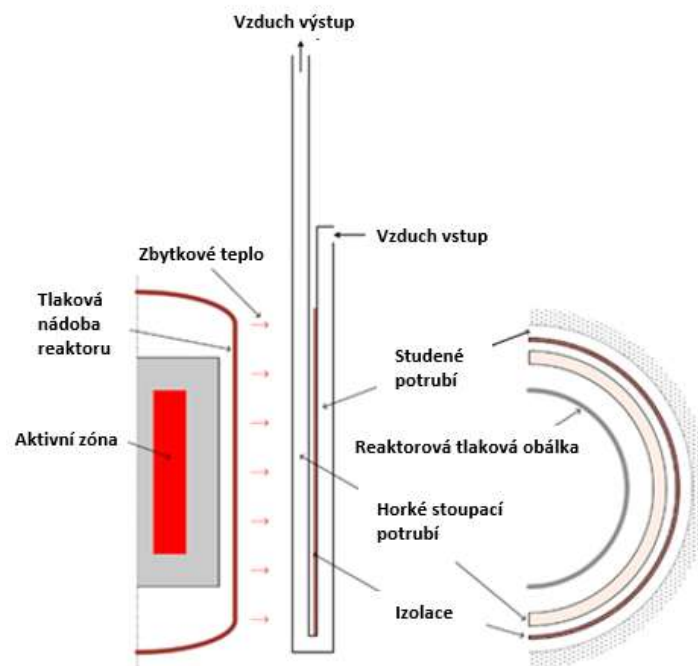
Další možnost odvodu tepla ze šachty reaktoru je realizována přirozenou cirkulací venkovního vzduchu přes chladicí panely. Koncept chlazení přirozeným vztlakem vzduchu je schematicky znázorněn na obrázku číslo 7. Konstrukce nemá žádné ventily ani aktivní součásti. Povrch chladicích panelů slouží jako bariéra oddělující vnější atmosféru od povrchu reaktoru. Tím se minimalizuje riziko úniku aktivovaného vzduchu z šachty reaktoru [12, 17].

Protože chladicí schopnost závisí na rychlosti přirozené cirkulace vzduchu, je k dosažení velkého průtoku vzduchu zapotřebí velký průřez potrubí vedoucí vzduch. Nevýhodou je, že pro instalaci velkých průtokových kanálů je třeba vyčlenit velký prostor. Dále se musí vzít v potaz, že proudění vzduchu může být ovlivněno podmínkami prostředí, například větrem. Vzhledem k tomu, že průchod vzduchu může být vážně poškozen vnějšími událostmi, je vzduchový systém navržen s kapacitou převyšující o 200 % [14].

Tento druh chladicího systému vodou byl instalován např. GT-MHR (v Rusku), PRISM (v USA), Superphénix (ve Francii) a PEACER (v Koreji) [14].



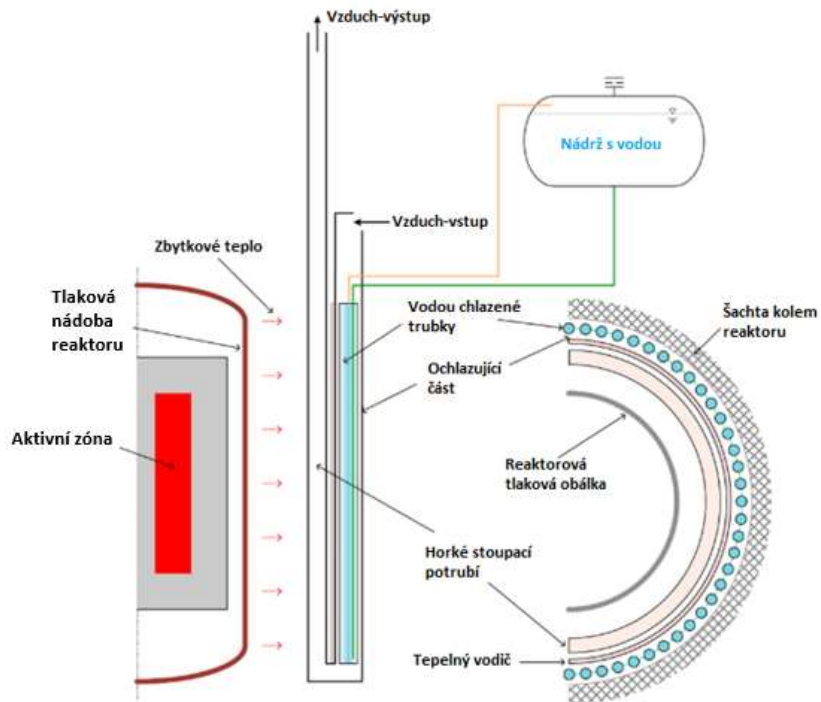
Obrázek č. 7 RCCS systém chlazený vzduchem. Schéma reaktoru GT-MHR [14]



Obrázek č. 8 Detailní schéma odvodu tepla pomocí vzduchu [14]

### 6.1.3 Kombinace voda-vzduch

Z uvedených RCCS konceptů vyplývá, že každý z nich má své silné stránky i svá omezení. Např. vzduchem chlazené RCCS často trpí nedostatečnou chladicí kapacitou, zatímco vodou chlazené RCCS mají příliš složitou a nákladnou údržbu. Proto byl navržen koncept, který kombinuje chlazení vody a vzduchu [12, 14].



Obrázek č. 9 Schéma pro kombinaci chlazení voda-vzduch [14]

Cílem systému kombinovaného chlazení vzduchem a vodou je minimalizovat výrazné přehřívání reaktorové nádoby v situaci, kdy dojde k závažnému selhání vzduchem chlazeného RCCS. Tento koncept je realizován pomocí vodní nádrže s lomícím diskem, vodním pláštěm a funkčním vodičem. Vodní plášť se skládá z trubek naplněných vodou, které jsou instalovány po obvodu šachty. Studený vzduch proudící směrem dolů přes spádovou trubku přispívá k ochraně proti přehřátí betonové šachty a zároveň udržuje teplotu vody ve vodním plášti [14].

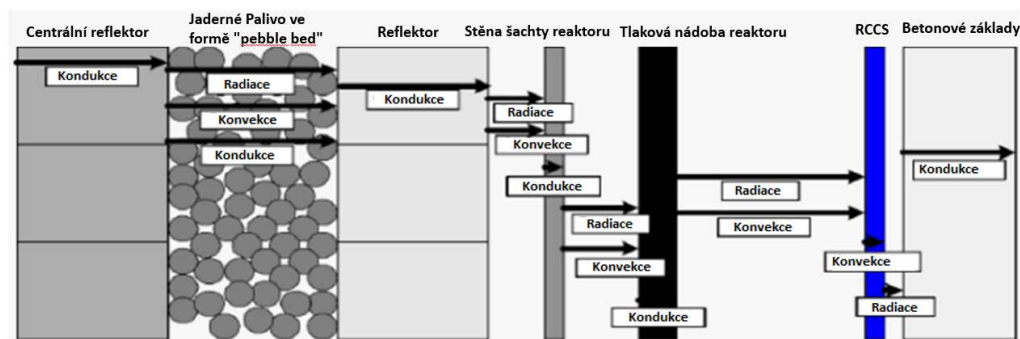
Když dojde k poruše v RCCS systému a proudění studeného vzduchu ustane, voda ve vodním plášti se ohřeje a postupně se vyvaří. V situaci s úplným vyvařením se lomící disk otevře a nádrž s vodou začne okamžitě doplňovat vodu [14].

Tento koncept byl použit např. pro reaktor PBMR [12].

## 7 Systém pasivního odvodu tepla

Při selhání RCCS systému je teplo z reaktorové nádoby odváděno do okolí. Proto šachta reaktoru musí udržet maximální teplotu, která bude sálat z aktivní zóny reaktoru a udržet ji hluboko pod její projektovanou hranicí. Při tomto způsobu chlazení pravděpodobně dojde po několika dnech ke creepové deformaci reaktorové nádoby [18].

Konstrukční řešení pro odvod zbytkového tepla spočívají ve velké tepelné kapacitě, vysoké tepelné vodivosti a nízké hustotě výkonu aktivní zóny. Nízká hustota výkonu aktivní zóny umožňuje omezit množství zbytkového tepla. Geometrie aktivní zóny je navržena jako dlouhá štíhlá válcová oblast, kde by se teplo mělo účinně odvádět přirozenými procesy, tj. vedením, konvekcí a sáláním. Tato schopnost pasivního odvodu tepla je graficky znázorněna na obrázku číslo 10 [18].

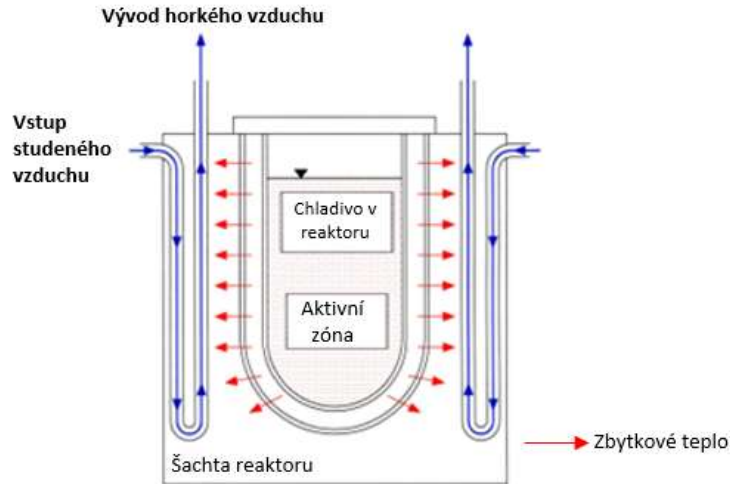


Obrázek č. 10 Schéma principu pasivního odvodu tepla [18]

## 8 Externí chlazení šachty reaktoru systémem RVACS

Dalším způsobem chlazení šachty reaktoru je za pomoci pomocného vzduchem chlazeného systém reaktorové nádoby RVACS (Reactor Vessel Auxiliary Cooling System). Stejně jak systémy RCCS, tak RVACS patří do kategorie pasivních systémů, který zaručuje odvod zbytkového tepla i v předpokládaných nad projektových podmínkách. Systém RVACS se vyznačuje vysokou spolehlivostí, vysokou hospodárností a inherentní bezpečností [19].

Na obrázku číslo 11 je vidět typický odvod tepla pomocí RVACS systému. Zbytkové teplo se z reaktorové nádoby odvede pomocí výměníku vzduchu přirozenou cirkulací vzduchu mimo šachtu [20].



Obrázek č. 11 Schéma U-trubkového RVACS systému [21]

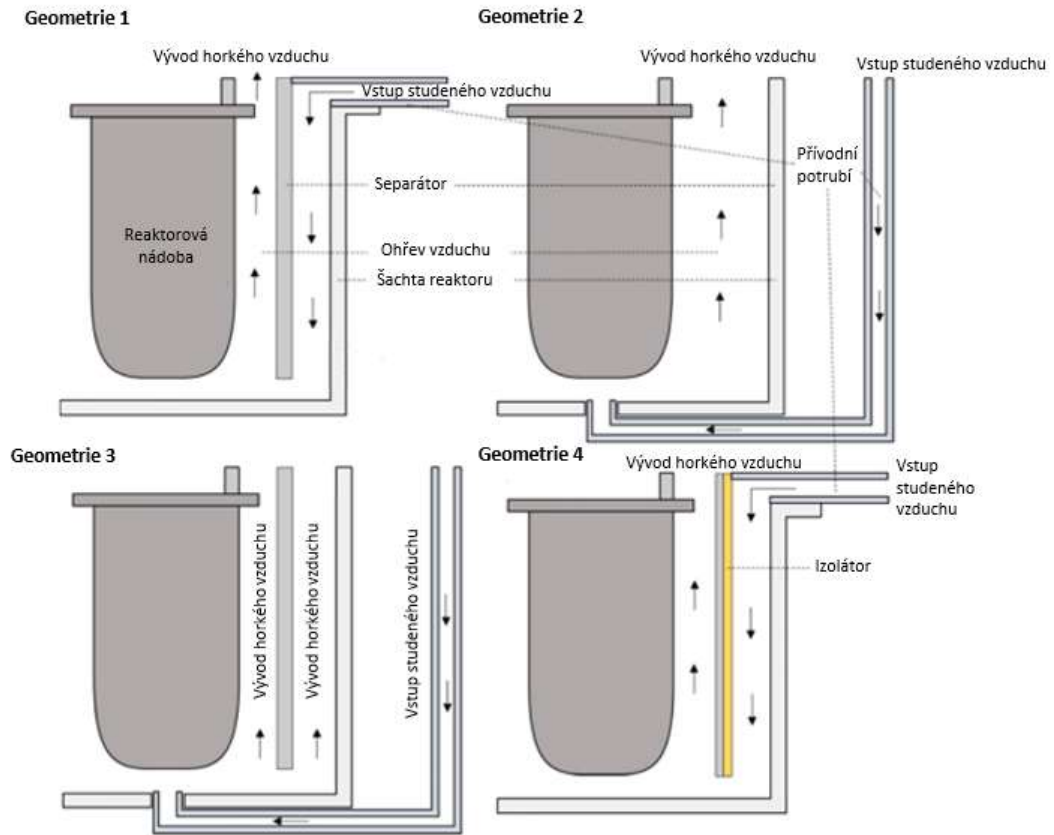
## 8.1 Použití

Obvykle se používá u rychlých reaktorů chlazených tekutým kovem, jako je Pb-Bi chlazený experimentální systém poháněný akcelerátorem (XADS - eXperimental Accelerator Driven System), víceúčelový hybridní výzkumný reaktor pro high-tech aplikace (MYRRHA - Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications), modulární energetický reaktor s inherentními a pasivními bezpečnostními prvky (S-PRISM - Power Reactor Innovative Small Module), Evropský systém chlazení olovem (ELSY - European Leadcooled System), aktinidový hořákový reaktor (ABR- Anaerobic Baffled Reactor), Pb-Bi chlazený malý rychlý reaktor s přímým kontaktem s vařící vodou (PBWFR- Pebble Bed Waste to Fuel Reactor) atd. [19].

## 8.2 Geometrie RVACS systémů

Chlazení pomocí RVACS systémů má několik konstrukčních provedení. Na obrázku číslo 12 jsou znázorněny čtyři různé geometrie RVACS systému. Součástí každého schématu je reaktorová nádoba RV (Reactor Vessel), průtokové kanály, oddělovač vzduchu AS (Air Separator), šachta reaktoru CV (Cavity Vessel) a vnější potrubí pro přívod vzduchu[22].

Přívod a odvod vzduchu jsou odděleny AS, který je instalován mezi RV a CV. Na vnější stěně CV je izolátor, který umožňuje za běžných provozních podmínek blokovat konvekční přenos tepla. Potrubí přívodu vzduchu je instalováno vně RVACS, aby se zabránilo ovlivnění přenosu tepla [22].



Obrázek č. 12 Schématicky znázorněné čtyři geometrie systému RVAC[22]

V geometrie 1, se teplo předává klesajícímu a stoupajícímu vzduchu. Tato konstrukce byla zvažována pro H-MMR. V případě geometrie 2 se využívá jen velká plocha šachty pro odvod horkého vzduchu. Efektivní plocha přestupu tepla a plocha proudění jsou u geometrií 1, 3 a 4 stejné, zatímco geometrie 2 má ve srovnání s ostatními geometriemi velkou plochu proudění a malou plochu přestupu tepla. Geometrie 3 je stejná jako geometrie 1 s tím rozdílem, že studený vzduch je přiváděn zespodu a vytváří dva vzestupné proudy vzduchu. Geometrie 4 se liší od geometrie 1 tím, že je na vnější straně přidána izolace. Pomocí izolace se sníží konvekční přenos tepla. Izolace byla široce přijata pro RVACS v reaktorech, jako je PGSFR (Prototype Gen-IV Sodium-cooled Fast Reactor), reaktor PRISM (The Power Reactor Innovative Small Module) a výzkumné reaktory na bázi olova[22].

## 9 Chlazení atmosféry v kontejnmentu při havárii

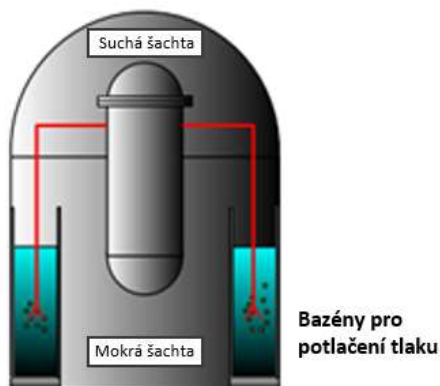
K tomu, aby v kontejnmentu nedošlo k havárii, bylo navrženo několik konceptů ke snížení tlaku uvnitř ochranné obálky. Hlavním úkolem je odvod tepla z prostor, ve kterých se nachází reaktor a ochlazovat stěny kontejnmentu.

Zde je přehled pasivních bezpečnostních systémů, které se pro tuto funkci používají [23]:

1. Bazény pro snížení tlaku v kontejnmentu CPSP (Containment pressure suppression pools)
2. Pasivní systémy pro odvod tepla/potlačení tlaku v kontejnmentu CPHR (Containment passive heat removal/pressure suppression systems)
3. Pasivní sprchové systémy (PCS – Passive containment spray system)

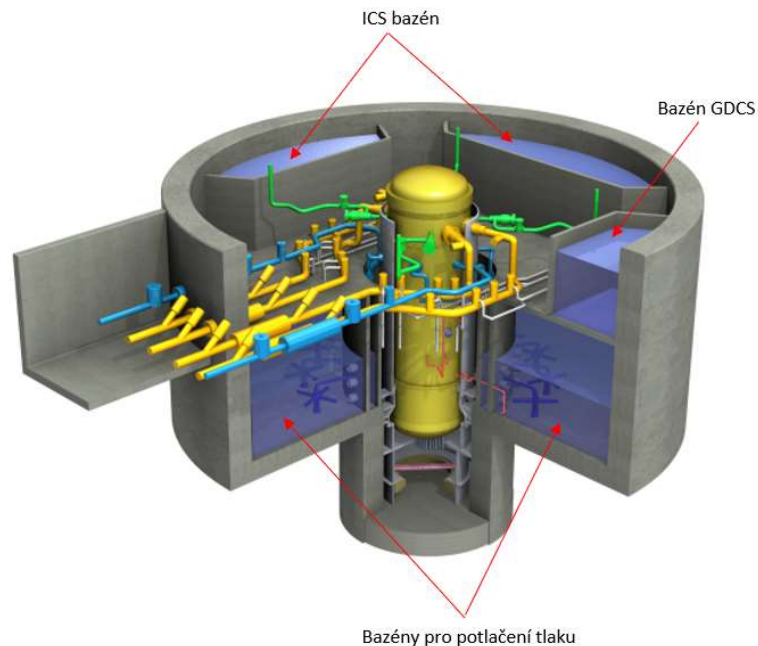
### 9.1 CPSP – Bazény pro potlačení tlaku v kontejnmentu

Tento systém se aktivuje, když dojde k poruše a do prostoru ochranné obálky reaktoru začne unikat pára. Tato pára s příměsemi se odvede skrz velké ventilační potrubí do bazénů pro potlačování tlaku. Zde má pára možnost zkondenzovat a tím se předejde nekontrolovatelnému nárůstu tlaku v budově kontejnmentu. Tento koncept se používá především u varných reaktorů (BWR- Boiling Water Reactor) [23].



Obrázek č. 13 Bazény pro potlačení tlaku v kontejnmentu[23]

Tohoto systému se využilo např. u ekonomicky zjednodušeného varného reaktoru ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor). Nejdůležitější bezpečnostní vlastností jsou izolační kondenzátory. Tyto kondenzátory, které fungují jako výměníky tepla odebírají páru z kontejmentu. Pak se tato pára kondenzuje a předává teplo do vodního bazénu a vzniklou vodu do gravitačních chladicích bazénů (GDCS – Gravity-Driven Cooling System), což jsou bazény umístěné v kontejmentu poblíž reaktoru [24, 25].



Obrázek č. 14 CPSP systém instalovaný v elektrárně s ESBWR reaktorem[26]

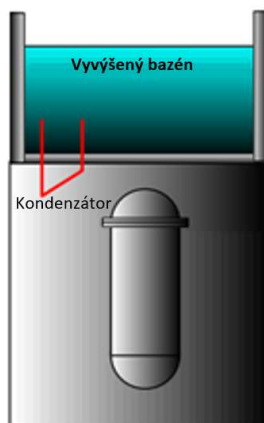
## 9.2 CPHR – Systémy odvodu tepla a potlačení tlaku v kontejmentu

Tento typ pasivního bezpečnostního systému využívá vyvýšený bazén jako chladič. Po vzniku havárie začne uniklá pára kondenzovat na povrchu trubek tepelného výměníku, čímž se sníží tlak a dojde k ochlazení v prostorech kontejmentu[23].

### Existují celkem tři varianty provedení:

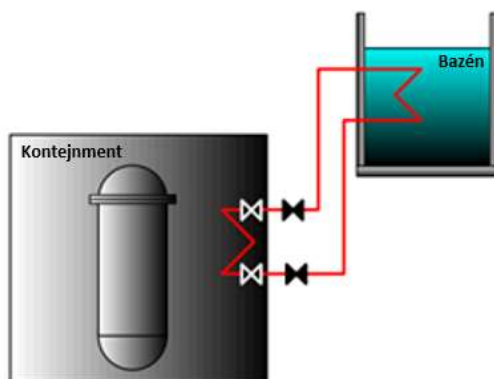
V první konceptu (obrázek číslo 15) je propojen prostor kontejmentu s bazénem umístěným v horní části kontejmentu. K propojení slouží otevřený tepelný výměník. Systém funguje tak, že uvnitř výměníku proudí jednofázová kapalina, která se pohybuje díky gravitačnímu gradientu a ten je ovlivněn sklonem výměníku [23].





Obrázek č. 15 Varianta 1 - Chlazení kontejnmentu pomocí kondenzátoru [23]

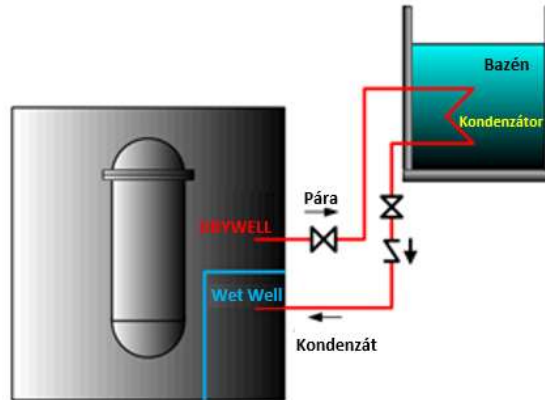
Ve druhé variantě koncepce (Obrázek č. 16) se bazén nachází mimo obálku. Bazén je s kontejnmentem propojen díky uzavřené chladicí smyčce, která je též naplněna jednofázovou kapalinou. Tento systém funguje tak, že uniklá pára začne kondenzovat na stěnách výměníku v něm dojde k ohřevu kapaliny. Na základě rozdílu hustoty dojde k přirozené cirkulaci. Ve vnějším bazénu se smyčka s kapalinou ochladí a opět přirozenou cirkulací proudí zpět do kontejnmentu [23].



Obrázek č. 16 Varianta 2 - Chlazení kontejnmentu pomocí kondenzátoru [21]

Třetí varianta konceptu (Obrázek č. 17) je odlišná tím, že se v prostoru kontejnmentu nachází dvě zóny (zóna 1. Drywell a 2. Wet well). Za normálního provozu ze zóny od sebe neliší, ale při havárii se v jedné z nich začne zvyšovat tlak. Propojení těchto zón je pomocí smyčky s dvěma větvemi. Pracovní médium ve smyčce je směs vody a páry.

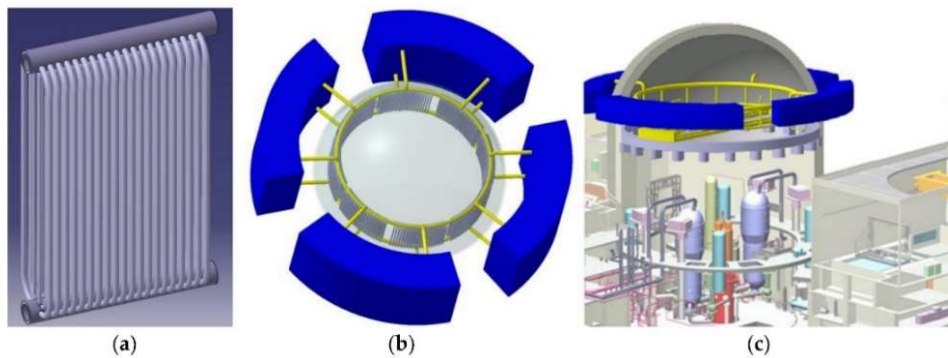
System funguje tak, že uniklá pára je nasávána vzestupnou větví, která se nachází v zóně Drywell (suchá šachta) do kondenzátoru nacházející se mimo obálku, kde se pára změní na vodu a je sestupnou větví odvedená do druhé zóny Wet well (mokrý zóna) [23].



Obrázek č. 17 Varianta 3 - Chlazení kontejneru pomocí kondenzátoru [21]

Na obrázku číslo 18 je znázorněný obecný model CPHR systému, který se skládá z výměníku tepla zabudovaného ve vysoké poloze a výměňkové nádrže s vodou. Nejdůležitějšími faktory, které mají vliv na přirozenou cirkulaci jsou: rozdíl teplot mezi atmosférou kontejneru a vodou ve výměňkové nádrži, výškový rozdíl mezi nádrží a výměníky tepla. Voda, která se nachází ve výměňkové nádrži se po dosažení teploty nasycení ohřívá a odpařuje do okolí. Nádrže s vodou byly navrženy, aby při těžké havárii zvládly chladit až 72 hodin [27, 28].

Na Obrázek č. 18 jde vidět: (a) svazek kondenzátorových trubek, (b) čtyři soustavy svazků trubek připojené k pasivní chladicí nádrži, (c) celková instalace chladicích svazků[29].

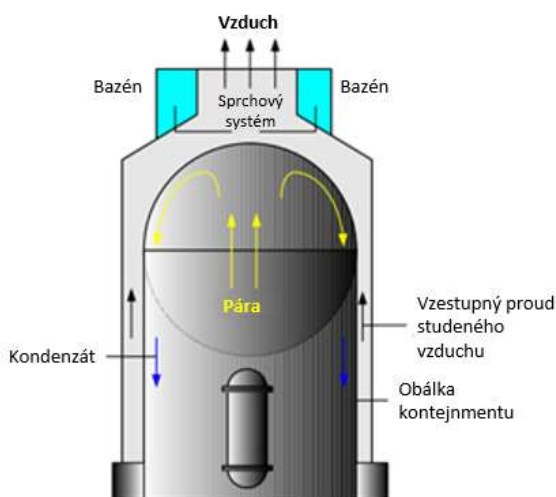


Obrázek č. 18 Systémy pasivního odvodu tepla/potlačení tlaku v kontejneru [29]

### 9.3 Pasivní rozprašovací systém

Tento typ systému je tvořen dvěma druhy chlazení, jak je patrné na obrázku číslo 19. První druh je chladicí systém s přirozeným prouděním vzduchu zabudovaným v boku konstrukce. Druhý druh chlazení je proveden za pomoci vyvýšených bazénů umístěných v horní části kontejnmentu. Po vzniku LOCA havárie dochází k nárůstu tlaku a teploty v ochranné obálce. Pára začne působit na vnitřní povrch ochranné obálky a díky zabudovanému systému proudění vzduchu je teplo předáváno přes stěnu do chladicího proudu vzduchu. V případě, že proud vzduchu nebude schopen odebrat určité množství tepla spustí se systém s rozprašováním, který má aktivnější chlazení během havárie [23].

V praxi tento systém chlazení můžeme vidět např. u reaktoru AP 1000.



Obrázek č. 19 Systém pasivního rozprašování [23]

## 10 Využití fyzikálních jevů pro sdílení tepla

Sdílení tepla (přenos tepla) je proces, při kterém dochází k výměně tepelné energie v důsledku různých teplot soustavy a okolí. Tento přenos tepla se odehrává tehdy, kdy látka o vyšší teplotě se bude postupně šířit do míst s teplotou nižší.

**Máme tři mechanismy sdílení tepla:**

1. Vedením (kondukce)
2. Prouděním (konvekce)
3. Sáláním (radiace)

## 10.1 Kondukce

Je to způsob přenosu tepelné energie v důsledku rozdílu teplot uvnitř tělesa nebo v kontaktu mezi tělesy. S tímto způsobem přenosu tepla v tělese se hojně setkáváme při konstrukci zařízení pro přenos tepla i při ohřevu a chlazení různých materiálů. Rovnice přenosu tepla vychází z Fourierova zákona o vedení tepla, který říká, že tok tepla vedením v libovolném směru je úměrný teplotnímu gradientu a ploše kolmé na směr toku a je ve směru záporného gradientu[30].

Matematická formulace je uvedena v rovnici:

$$Q = -\lambda A dT/dx \quad (1)$$

$\lambda$  ... Tepelná vodivost materiálu [W/m·K]

$A$  ... Plocha [m<sup>2</sup>]

$T$ ... Teplota [°C, nebo K]

$x$  ... Délka [m]

$Q$ ... Tepelný tok [W]

## 10.2 Konvekce

S tímto způsobem přenosu tepla se setkáváme v situacích, kdy je tepelná energie předávána prouděním v látce. Tento způsob je v podstatě vedením ve velmi tenké vrstvě kapaliny na povrchu a následným mícháním způsobeným prouděním. Přenos energie probíhá kombinací molekulární difúze a objemového proudění. Tok tepla nezávisí na vlastnostech povrchu materiálu, ale závisí pouze na vlastnostech kapaliny. Tvar a povaha povrchu ovlivňuje pouze druh proudění. Konvekce není čistý způsob výměny tepla, jako vedení nebo sálání. Proto výpočet zahrnuje několik parametrů. Pokud je proudění způsobeno vnějšími prostředky, jako je ventilátor nebo čerpadlo, pak se jedná o nucenou konvekci. Pokud je proudění způsobeno vztakovými silami způsobenými rozdílem teplot v kapalném tělese, pak je tento způsob znám jako volná nebo přirozená konvekce. Charakteristická vlastnost, která hraje velkou roli je součinitel prostupu tepla. Ta nám umožňuje popsat, jak efektivně se teplo přenáší mezi dvěma materiály. Pro určení součinitele prostupu tepla se často využívají polo empirické vzorce, které jsou založeny na podobnostních číslech. Podobnostní čísla jsou matematické parametry, které nám umožňují vytvořit modelové situace, ve kterých lze snadno měřit a zkoumat proudění látek a přenos tepla [30].

V procesu návrhu se tak součinitel prostupu tepla stává z hlediska aplikace nejdůležitějším. Rovnice rychlosti prostupu tepla je zásluhou Newtona, který spojil všechny parametry do jediného a nazval jej součinitel konvektivního přestupu tepla, jak je uvedeno v rovnici [30].

Formulace Newtonova ochlazovacího zákona:

$$Q = \alpha A(T_1 - T_2) \quad (2)$$

A ... Plocha [m<sup>2</sup>]

$T_1$  i  $T_2$ ...Teplota [°C, nebo K]

Q ...Tepelný tok [W]

$\alpha$  ... Součinitel konvektivního přestupu tepla [W/m<sup>2</sup>·K]

### 10.2.1 Podobnostní čísla

U fyzikálních dějů může nastat podobnost, kdy i charakteristické veličiny si začnou být podobné. Vzhledem k tomu, že zkoumaný jev může být popsán několika veličinami a pro každou z nich může být poměrová konstanta podobnosti jiná. Např. může existovat podobnost hodnot hustoty, teploty, rychlosti atd.. Pro existenci podobnosti u složitějších jevů postačuje, aby konstanty podobnosti byly vzájemně vázány pro daný jev určitou závislostí. Tyto závislosti lze pak upravit a získat bezrozměrné poměry různých veličin. Tyto bezrozměrné skupiny veličin se nazývají podobnostní čísla nebo podobnostní kritéria nebo moduly podobnosti. Fyzikální děje jsou si pak podobné, pokud jsou odpovídající kritéria stejná [31].

#### 10.2.1.1 Laminární a turbulentní proudění

Rozeznáváme dva základní druhy proudění: laminární a turbulentní. Laminární proudění nastává při poměrně malých rychlostech nebo při vysoké viskozitě tekutiny. Zatímco u turbulentního proudění proud mimo svého postupného pohybu stálou střední rychlostí koná současně neuspořádaný pohyb i v jiném směru, než je směr proudu. Při těchto pohybech dochází k míšení částic [32].

Kritériem, kterým rozlišujeme laminární pohyb od turbulentního je bezrozměrné Reynoldsovo číslo  $Re$ . Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina charakterizující mechanickou podobnost proudění vazkých tekutin v geometricky podobných válcových profilech [32].

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (3)$$

$u$  ... Střední hodnota rychlosti proudící tekutiny [m/s]

$d$  ... Charakteristický rozměr (na příklad hydraulický průměr trubice) [m]

$\nu$  ... Kinematická viskozita [ $m^2/s$ ].

Kritické Reynoldsovo číslo  $Re_k$ , při kterém dochází ke změně proudu z laminárního na turbulentní, je pro průtok trubicí kruhového profilu,  $Re_k \cong 2300$ . Pod touto hranicí existuje, při nerušeném průtoku, pouze proudění laminární tedy v situaci kdy  $Re < Re_k$ . Oproti tomu nad hranicí  $Re_k \cong 2300$  se začne zvolna měnit laminární proudění do turbulentního. Je to dáno tím, že se vzrůstající hodnotou  $Re$  vzniká turbulentní proudění jen v některých místech trubice, které se postupně mění na celkové turbulentní proudění. Tomuto stavu říkáme přechodová oblast a platí pro  $Re = 2300$  až  $10\,000$ . Když dosáhneme, že  $Re > 10\,000$  jedná se už pouze o turbulentní proudění. [32].

### 10.2.1.2 Prandtlovo číslo

Prandtlovo číslo je další z podobnostních čísel a udává poměr mezi přenosem hybnosti a teplem na molekulární úrovni [33].

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (4)$$

$\eta$  ... Dynamická viskozita tekutiny [Pa·s]

$c_p$  ... Měrná tepelná kapacita tekutiny [J/ kg·K]

$\lambda$  ... Součinitel tepelné vodivosti příslušné tekutiny [W/m·K]

Pro velké hodnoty Prandtlova čísla  $Pr \gg 1$  probíhá převážně konvektivní přenos tepla v tekutině a pro malé hodnoty Prandtlova čísla  $Pr \ll 1$  probíhá převážně konduktivní přenos tepla v tekutině.

### 10.2.1.3 Nusseltovo číslo:

Nusseltovo číslo ukazuje poměr mezi konvektivním a konduktivním přenosem tepla na rozhraní mezi tekutinou a okolím [34]. Tento vztah je definován jako:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (5)$$

$\alpha$  ... Součinitel přestupu tepla [ $W/m^2 \cdot K$ ]

$l$  ... Charakteristický rozměr [ $m^2$ ]

$\lambda$  ... Tepelná vodivost tekutiny [ $W/m^2 \cdot K^4$ ]

## 10.3 Sálání

Tepelné sálání je součástí elektromagnetického spektra v omezeném rozsahu vlnových délek 0,1 až 10  $\mu m$  a je vyzařováno všemi povrchy bez ohledu na teplotu. Toto záření dopadající na povrchy je pohlcováno, a tak dochází k přenosu tepla zářením mezi povrchy o různých teplotách. K přenosu záření není zapotřebí žádné médium, ale pro přímý přenos záření by měly být povrchy ve vizuálním kontaktu[35].

### 10.3.1 Stefanův-Boltzmannův zákon

Rovnice přenosu tepla je dána Stefan-Boltzmannovým zákonem, který říká, že vyzářené teplo je úměrné čtvrté mocnině absolutní teploty povrchu a rychlosti přenosu tepla mezi povrchy [36].

$$P = \varepsilon \sigma AT^4 \text{ nebo } E = \alpha \sigma AT^4 \quad (6)$$

$P$  ... Výkon [ $W$ ]

$\varepsilon$  ... Emisivita ( $\varepsilon = 1$  pro dokonale černé těleso)

$\sigma$  ... Stefan-Boltzmannova konstanta  $5,67 \times 10^{-8}$  [ $W/m^2 K^4$ ]

$A$  ... Plocha zářiče [ $mm^2$ ]

$T$  ... Absolutní teplota [ $K$ ]

$E$  ... Radiace [ $W/m^2$ ]

$\alpha$  ... Absorbce [-]

## 11 Problematika chlazení šachty reaktoru

Cílem návrhu chlazení šachty reaktoru je udržet teplotu na výstupu reaktorové šachty pod projektovou teplotou 50°C. Tím se otevírá problematika způsobu chlazení, kde hrají roli tlakové ztráty a způsob odvodu tepla, které bude unikat do prostor atmosféry kontejnmentu, kde je stanovena projektová hranice pod 90°C. Důležité je připomenout, že systémy RCCS a RVACS patří do kategorie pasivních systému, já však navrhuji aktivní systém fungující za normálního provozu, proto se těmito chladicími systémy jen inspiroji. Pro chlazení šachty reaktoru ALLEGRO jsem si zvolila inspiraci v geometrii systému RVACS (Obrázek č. 12, geometrie b). Tato varianta je z hlediska konstrukce jednoduchá a zkoumané parametry se v ní dobře pozorují. V této práci se tudíž zaměřuji na jednotlivé faktory, které mají vliv na fyzikální vlastnosti pro přenos tepla a hledám nejlepší možnou variantu, která by se v praxi mohla využít.

Jednotlivými faktory je myšleno:

- a) Rychlost chladicího vzduchu, protože pokud bude vzduch proudit rychleji zvládne odvést větší množství tepla. Zároveň však rychlejší proudění zvýší koeficient přestupu tepla z reaktoru do vzduchu, a tudíž i množství tepla, které je nutné odvést. Je tedy třeba hledat kompromis a stanovit nejvhodnější hmotnostní tok vzduchu.
- b) Druhým důležitým parametrem je průměr reaktorové šachty, protože ten ovlivní průtočnou plochu, kterou vzduch proudí a tím ovlivňuje hmotnostní tok a druh proudění.

## 12 Výpočtová analýza

Výpočtová analýza je rozdělená do několika částí. První část slouží k volbě optimálního řešení, kde jsou zkoumanými parametry průměr reaktorové šachty a hmotnostní tok přiváděného média. V druhé části počítám tlakové ztráty. Ve třetí části navrhuji hlavní parametry vodního okruhu výměníku tepla. A v poslední části práce navrhnu dmychadlo pro neoptimálnější variantu.



## 12.1 Řešení ve výpočtovém programu MATLAB

V rámci analýzy tepelného přenosu jsem využila počítačový program MATLAB, ve kterém jsem provedla 100 iterací pro různé hodnoty výstupní teploty, 100 iterací pro rychlosti proudění vzduchu v rozmezí od 0,5 do 4 [m/s] a pro 4 různé průměry šachty reaktoru v množině {3,8 ;4; 4,2; 4,4} [m].

V kódu jsem využila funkci gasProp.m, se kterou dosazuji fyzikální vlastnosti vzduchu, které se mění v závislosti na teplotě. Hodnoty pro kinematickou viskozitu, tepelnou vodivost a Prandtlovo číslo jsem čerpala z Engineering ToolBox <sup>2</sup>. Vzhledem k tomu, že hodnoty v jednotlivých částech výpočtu zůstávají neměnné nebo se velmi málo mění, tak tyto drobné odchylky zanedbávám.

## 12.2 Optimální varianta

Rozhodla jsem se analyzovat několik matematických výpočtů, kde jsem experimentovala s různými hodnotami rychlosti proudění chladičoho vzduchu a s průměrem šachty reaktoru. Pozorovala jsem, jak tyto proměnné ovlivňují parametry pro výběr dmychadla. Z pozorování vychází, že s rostoucí rychlostí proudění vzduchu se zvyšují tlakové ztráty, což ovlivňuje i objemový tok. S narůstajícími hodnotami se hledání vhodného dmychadla stává náročnějším. Avšak musím dodržet požadované tepelné limity a zároveň omezit šířku šachty reaktoru kvůli prostoru v kontejneru. Nakonec počítám s variantou, kde je průměr šachty  $D_S = 4,2 \text{ m}$  a rychlost proudícího vzduchu je  $v = 0,6414 \text{ m/s}$ .

## 13 Analýza přestupu tepla

Vstupní hodnoty obou iterací jsou vstupní teplota vzduchu  $T_{in}$  a výstupní teplota vzduchu  $T_{out}$ , která je při první iteraci odhadnuta. Teplota povrchu reaktoru  $T_R$  se bere jako konstantní. Z těchto tří teplot se spočítá průměrný teplotní spád a určující teplota pro fyzikální vlastnosti vzduchu. Z rychlosti proudění a teplotního spádu je rovnicemi konvektivního přenosu tepla spočítán tepelný tok z reaktorové stěny do vzduchu. Pomocí kalorimetrické rovnice je z tepelného toku určen rozdíl teplot, ze kterého vychází nová výstupní teplota. Novou výstupní teplotu dosazuji na začátek výpočtu místo původního odhadu a výpočet je několikrát opakován, aby došlo k jejich shodě.

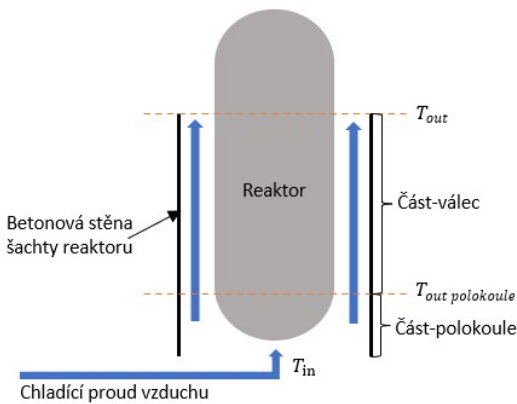
---

<sup>2</sup> Engineering ToolBox je webová stránka, která poskytuje základní informace pro technické výpočty.

Výpočet přestupu tepla mezi reaktorem a šachtou je složitý, jelikož tvar reaktorové nádoby není homogenní. Proto přestup tepla rozdělují do dvou částí:

- 1) Mezi vstupem chladicího vzduchu a kulovou částí reaktoru. Tento prostor je počítán jako přestup tepla na polokouli.
- 2) Kolem válcové části reaktoru, až k výstupu ze šachty. Tento prostor je počítán jako přestup tepla na válci.

Čárkované čáry oddělují část polokoule a část válce.



Obrázek č. 20 Schéma chlazení šachty reaktoru

### Vstupní hodnoty:

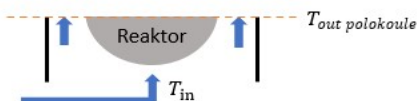
- Počáteční teplota vzduchu vstupujícího do šachty reaktoru ...  $T_{in} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Teplota povrchu reaktoru, která je považována za konstantní v reálném čase a po celém povrchu reaktoru ...  $T_R = 378,56 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Průměr reaktoru ...  $D_R = 3,5 \text{ m}$
- Výška ochlazované části reaktoru (chlazení je nutné pouze pro část reaktorové nádoby obsahující aktivní zónu) ...  $h_V = 3,2 \text{ m}$

### Zvolené hodnoty:

Teplota vzduchu opouštějící šachtu reaktoru je  $T_{out} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (pro první iteraci je odhadovaná). Po provedení citlivostní analýzy vybírám konfiguraci s průměrem šachty  $D_{\xi} = 4,2 \text{ m}$  a rychlost proudícího vzduchu  $v = 0,6414 \text{ m/s}$ , který odpovídá hmotnostnímu toku  $2 \text{ kg/s}$ .

### 13.1 Výpočet přestupu tepla na polokouli

Nejprve počítám průměrnou teplotu vzduchu opouštějícího polokouli reaktoru, která je získána jako aritmetický průměr mezi vstupní a výstupní teplotou. Tato průměrná teplota je dále využita k určení pracovní teploty, což je střední hodnota mezi teplotou reaktoru a průměrnou teplotou výstupního vzduchu.



Obrázek č. 21 Schéma chlazení v části polokoule

$$T_{out\ polokoule} = 50^{\circ}C \text{ (Odhad)}$$

$$T_{průměr} = \frac{T_{in} + T_{out\ polokoule}}{2} = \frac{30 + 50}{2} = 40^{\circ}C$$

$$T_{pracovní} = \frac{T_R + T_{průměr}}{2} = \frac{378,56 + 40}{2} = 209,28^{\circ}C$$

Následuje výpočet plochy koule a mezikruží, které jsou klíčové pro stanovení tepelného přenosu.

$$S_{polokoule} = 2\pi \left(\frac{D_R}{2}\right)^2 = 2\pi \left(\frac{3,5}{2}\right)^2 = 19,24\ m^2$$

$$S_{mezikruží} = \frac{\pi}{4} (D_S^2 - D_R^2) = \frac{\pi}{4} (4,2^2 - 3,5^2) = 4,23\ m^2$$

Dále zohledňuji, že v prostoru před polokoulí je rychlost proudění vzduchu nižší, nicméně jak proud vzduchu postupuje do mezikruží dochází k jeho zrychlení. Proto počítám s poloviční rychlostí, kterou nazývám střední.

$$v_{str} = \frac{v}{2} = \frac{0,6414}{2} = 0,3207\ m/s$$

Pracovní teplota  $T_{pracovní}$  má významný vliv na vlastnosti proudícího vzduchu, kterými jsou parametry:

- Měrná tepelná kapacita ...  $cp = 1,026\ kJ/(kg \cdot K)$
- Hustota ...  $\rho_1 = 0,7299\ kg/m^3$

Kinematická viskozita a tepelná vodivost také vycházejí z pracovní teploty, ale pro celou dobu výpočtu všech variant jsou považovány jako konstanty, protože se jejich hodnoty mění jen minimálně.

- Kinematická viskozita ...  $\vartheta = 26,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Tepelná vodivost ...  $\lambda = 38,82 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Prandtlovo číslo pro vzduch je  $Pr = 0,722$  používám jako konstantní, protože se mezi teplotami 30- 300°C téměř nemění.

Pro přesné řešení výpočtů tepelného přenosu a stanovení výsledné výstupní teploty je důležité správně zvolit korelační čísla.

Začínám s Reynoldsovým číslem, které udává, jaký je proud tekutiny. Zda-li laminární nebo turbulentní. To mě ovlivňuje, jaký vzorec budu vybírat pro Nusseltovo číslo. Pro výpočet Reynoldsova čísla dosadím do vzorce **(3)**.<sup>3</sup>

$$Re = \frac{v_{str} \cdot D_R}{\vartheta} = \frac{0,3207 \cdot 3,5}{26,34 \cdot 10^{-6}} = 42\,613,8$$

Nyní hodnotu Reynoldsova čísla vložím do rovnice pro výpočet Nusseltova čísla. Nusseltovo číslo je též bezrozměrná veličina, která poskytuje poměr mezi tepelným přenosem prouděním a vedením. Pro případ polokoule jsem zvolila korelaci sdílení tepla při obtékání koule. Vzorec je převzat z knížky „Sdílení tepla“[37] a musí platit meze  $20 < Re < 150000$ , kterou splňuji.

$$Nu = 0,37 Re^{0,6} Pr^{1/3} = 0,37 \cdot 42613,8^{0,6} \cdot 0,722^{1/3} = 198,9$$

Pro výpočet tepelných ztrát, je třeba spočítat součinitele tepelného přestupu, který udává schopnost tepla přestupovat ze stěny do tekutiny. Vycházím ze vzorce **(5)**.

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_R} = \frac{198,9 \cdot 38,82 \cdot 10^{-3}}{3,5} = 2,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Z Newtonova zákona o sdílení tepla prouděním vyplývá rovnice **(2)** pro tepelný tok tak, že tepelný tok je násobkem součinitele přestupu tepla, plochy a rozdílu teplot.

$$\dot{Q}_1 = \alpha_1 \cdot S_{polokoule} \cdot (T_R - T_{průměr}) = 2,2 \cdot 19,24 \cdot (378,56 - 40) = 14\,330,56 \text{ W}$$

<sup>3</sup> Kde charakteristický rozměr je průměr reaktorové nádoby.

Abych si ověřila, že jsem správně zvolila výstupní teplotu na polokouli, tak si nejdříve vypočtu hmotnostní tok v mezikruží. Ten následně dosadím do kalorimetrické rovnice.

$$\dot{m}_1 = \rho_1 \cdot S_{\text{mezikruží}} \cdot v = 0,7299 \cdot 4,23 \cdot 0,6414 = 1,98 \text{ kg/s}$$

Z kalorimetrické rovnice vypočtu rozdíl teplot.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}_1}{c_p \dot{m}_1} = \frac{14\,330,56}{1026 \cdot 1,98} = 7^\circ\text{C}$$

Skutečnou výstupní hodnotu na polokouli vypočtu ze součtu vstupní hodnoty  $T_{in}$  a rozdílu teplot  $\Delta T$ .

$$T_{out\_real\_polokoule} = T_{in} + \Delta T = 30 + 7 = 37^\circ\text{C}$$

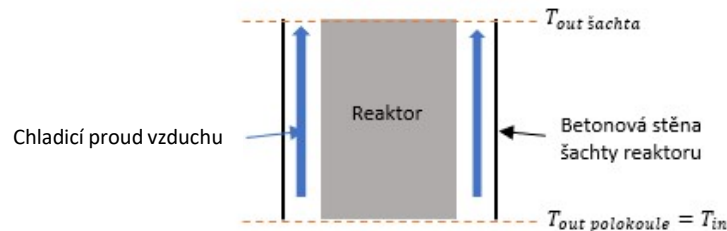
Poté dochází k iteraci s teplotou  $T_{out\_real\_polokoule}$  do doby než se  $T_{out\_real\_polokoule}$  neustálí na jedné hodnotě. V mém případě stačilo 5 iterací, aby se hodnota ustálila. V tabulce číslo 2 jsou uvedeny výsledky po iteraci s ustálenými hodnotami.

ITERACE	
Re	$4.2625 \cdot 10^4$
Nu	198.9958
$\alpha_1$ [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]	2.2
$\dot{Q}_1$ [W]	14 640
$\dot{m}_1$ [kg/s]	1.98
$T_{out\_real\_polokoule}$ [ $^\circ\text{C}$ ]	37.2

Tabulka č. 2 Tabulka s výsledky iterací pro část polokoule

## 13.2 Výpočet přestupu tepla na válci

Postup výpočtu pro část válce je velice podobný, jako byl u výpočtu pro polokouli.



Obrázek č. 22 Schéma chlazení v části válce

Z výpočtu polokoule mě vyšla výstupní teplota  $T_{out\_real\_polokoule}$ , která je rovna vstupní teplotě pro část válce. Pokračuji výpočtem plochy mezikruží a plochy válcové části reaktorové nádoby.

$$T_{in} = T_{out\_real\_polokoule} = 37,2^{\circ}C$$

$$S_{mezikruží} = \frac{\pi}{4}(D_S^2 - D_R^2) = \frac{\pi}{4}(4,2^2 - 3,5^2) = 4,23m^2$$

$$v = 0,6414 \text{ m/s}$$

$$S_{válce} = \pi \cdot D_R \cdot h_V = \pi \cdot 3,5 \cdot 3,5 = 35,18m^2$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = 1,98 \text{ kg/s}$$

Výstupní hodnotou  $T_{out\_šach}$  pro první výpočet je opět odhad. Dále počítám průměrnou teplotu vzduchu kolem válce, která se získá z aritmetického průměru mezi vstupní teplotou na začátku válce a výstupní teplotou z šachty reaktoru. Průměrnou teplotu využívám k určení pracovní teploty.

$$T_{out\_šachta} = 60^{\circ}C \text{ (Odhad)}$$

$$T_{průměr} = \frac{T_{in} + T_{out\_šacha}}{2} = \frac{37,2 + 60}{2} = 48,6^{\circ}C$$

$$T_{pracovní} = \frac{T_R + T_{průměr}}{2} = \frac{378,56 + 48,6}{2} = 213,5^{\circ}C$$

Pracovní teplota  $T_{pracovní}$  určuje tyto parametry:

- Měrná tepelná kapacita ...  $cp = 1,026 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot K)$
- Kinematická viskozita ...  $\vartheta = 26,51 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Hustota ...  $\rho_2 = 0,7251 \text{ kg}/\text{m}^3$
- Tepelná vodivost ...  $\lambda = 39,07 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot K}$

Prandtlovo číslo pro vzduch je  $Pr = 0,722$ , které stanovuji jako konstantní, protože se mezi teplotami 30-300°C nemění.

Pro určení Nusseltova čísla musím spočítat Reynoldsovo číslo. Poté dosazuji do vzorce **(3)**, kde charakteristický rozměr je mezikruží.

$$Re = \frac{v \cdot (D_S - D_R)}{\vartheta} = \frac{0,6414 \cdot (4,2 - 3,5)}{26,51 \cdot 10^{-6}} = 16 \, 936,25$$

### Nusseltovo číslo:

Pro případ sdílení tepla pro mezikruhovou štěrbinu vychází ze sbírky: „Tabulky a diagramy pro termodynamiku“ [38], kde dosazují do vzorce pro turbulentní proudění, dle vysoké hodnoty Reynoldsova čísla.

$$Nu = 0,015 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{D_s}{D_R}\right)^{0,25} = 0,015 \cdot 16\,936,25^{0,8} \cdot 0,722^{0,4} \cdot \left(\frac{4,2}{4,5}\right)^{0,25} = 31,26$$

Pokračuji ve výpočtu součinitele tepelného přestupu ze vzorce (5).

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{(D_s - D_R)} = \frac{31,26 \cdot 39,07 \cdot 10^{-3}}{(4,2 - 3,5)} = 1,74 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Z Newtonova zákona o sdílení tepla prouděním vyplývá rovnice (2). Z této rovnice vyjadřuji tepelný tok.

$$\dot{Q}_2 = \alpha_2 \cdot S_{\text{válc}} \cdot (T_R - T_{\text{průměr}}) = 1,74 \cdot 35,18 \cdot (378,56 - 48,6) = 20197,9 \text{ W}$$

Z kalorimetrické rovnice odvodím rozdíl teplot.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}_2}{c_p \dot{m}_2} = \frac{20197,9}{1026 \cdot 1,98} = 9,94^\circ\text{C}$$

Skutečná výstupní hodnota vyjde ze součtu vstupní hodnoty  $T_{in}$  a rozdílu teplot  $\Delta T$ .

$$T_{\text{out šachta}} = T_{in} + \Delta T = 37,25 + 9,94 = 47,19^\circ\text{C}$$

S novou výstupní teplotou  $T_{\text{out šachta}}$  se provede několik iterací dokud se hodnota  $T_{\text{out šachta}}$  neustálí na jedné hodnotě. V tabulce číslo 3 jsou výsledné ustálené hodnoty po iterování.

ITERACE	
Re	$1,7 \cdot 10^4$
Nu	33,47
$\alpha_2$ [W/(m <sup>2</sup> · K)]	1,89
$\dot{Q}_2$ [W]	22 410
$\dot{m}_2$ [kg/s]	1,98
$T_{\text{out šachta}}$ [°C]	48,23

Tabulka č. 3 Tabulka s výsledky iterací pro část válce

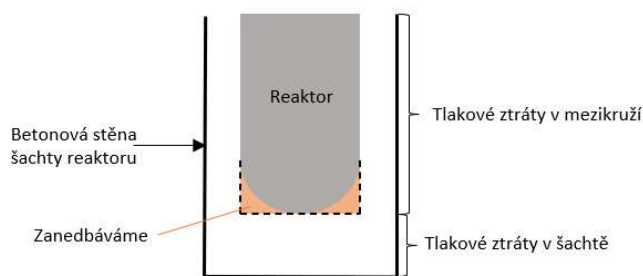
### 13.3 Celkový tepelný tok

Celkový tepelný tok je součtem jednotlivých tepelných toků. Hodnoty dosazujeme z tabulky číslo 2 a 3.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = 14\,640 + 22\,410 = 37\,050\text{W}$$

### 14 Tlakové ztráty

Výpočet tlakových ztrát v šachtě reaktoru je založen na hydraulických ztrátách třením. Tvar reaktorové nádoby připodobním prodlouženému válci, přičemž má tato aproximace zjednodušit analýzu výpočtu. Při zanedbání kulaté části se mění průtočná plocha, a tak tlakové ztráty budou vycházet vyšší, než budou za provozu. Na Obrázek č. 23 je znázorněné schéma aproximace, kde oranžové pole znázorňuje zanedbanou část.



Obrázek č. 23 Schéma pro výpočet tlakových ztrát v reaktoru

Výsledný vypočtený tlak je důležitý pro volbu dmychadla, které pohání proud chladicího vzduchu do šachty reaktoru. Tlakové ztráty počítám pro zvolené optimální řešení, kde šachta reaktoru má průměr 4,2m a rychlost chlazení je 0,6414m/s.

#### Vstupní hodnoty:

- Průměr reaktoru ...  $D_R = 3,5\text{ m}$
- Průměr šachty ...  $D_\zeta = 4,2\text{ m}$
- Výška reaktoru ...  $l_r = h_v + \frac{D_R}{2} = 3,2 + \frac{3,5}{2} = 4,95\text{ m}$
- Vzdálenost mezi vstupem chladiva a reaktorem ...  $l_n = 3\text{ m}$
- Rychlost ...  $v = 0,6414\text{ m/s}$
- Hustota vzduchu při vstupu do šachty reaktoru ...  $\rho_1 = 0,7299\text{ kg/m}^3$
- Hustota vzduchu na výstupu ze šachty reaktoru ...  $\rho_2 = 0,7251\text{ kg/m}^3$



Výpočet rozdělují do dvou částí. První bude prostor v šachtě reaktoru (bez reaktoru) a druhý prostor v mezikruží mezi šachtou a reaktorem (Obrázek č. 23).

### 14.1 Tlakové ztráty v šachtě

Začínám výpočtem plochy průřezu šachty reaktoru  $S_1$ , plochou mezikruží  $S_2$  a obvodovou délkou šachty reaktoru.

$$S_1 = \frac{\pi}{4} \cdot D_S^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 4,2^2 = 13,85 \text{ m}^2$$

$$S_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_S^2 - D_R^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (4,2^2 - 3,5^2) = 4,23 \text{ m}^2$$

$$O_1 = \pi \cdot D_S = \pi \cdot 4,2 = 13,19 \text{ m}$$

V průběhu přenosu tepla rychlost chladicího vzduchu zrychluje. Proto vypočítám původní rychlost chladicího vzduchu vstupujícího do šachty.

$$v_0 = \frac{v \cdot S_2}{S_1} = \frac{0,6414 \cdot 4,23}{13,85} = 0,196 \text{ m/s}$$

Následuje výpočet hydraulického průměru, kde je charakteristický rozměr průtočný profil. Hydraulický průměr je definován jako poměr čtyřnásobku vnitřního průřezu daného profilu „S“ a jeho smáčeného obvodu „O“.

$$D_{h1} = \frac{4 \cdot S_1}{O_1} = \frac{4 \cdot 13,85}{13,19} = 4,2 \text{ m}$$

Pro výpočet tlakových ztrát musím nejdříve vypočítat součinitele tření turbulentního proudění, který volím pro oblast hydraulicky hladkého potrubí (povrch betonové šachty považuji za hladký). Tyto nároky splňuje vzorec dle Blasiusa, kde je podmínka  $Re < 10^5$ .

$$\lambda_{tř1} = 0,3164 \cdot Re_1^{-0,25} = 0,3164 \cdot (4,2625 \cdot 10^4)^{-0,25} = 0,022$$

Po spočtení součinitele tření mohu spočítat tlakové ztráty v šachtě reaktoru způsobené třením.

$$P_{ztr} = \lambda_{tř1} \cdot \frac{l_n}{D_{h1}} \cdot \rho_1 \cdot \frac{v_0^2}{2} \cdot 10^6 = 0,022 \cdot \frac{3}{4,2} \cdot 0,7299 \cdot \frac{0,196^2}{2} \cdot 10^6 = 220,3 \text{ Pa}$$

## 14.2 Tlakové ztráty v mezikruží

Výpočet pro plochou mezikruží  $S_2$  mám již spočtenou.

$$S_2 = 4,23 \text{ m}^2$$

Obvodová délka pro mezikruží:

$$O_2 = \pi \cdot (D_\xi + D_R) = \pi \cdot (4,2 + 3,5) = 24,19 \text{ m}$$

Hydraulický průměr pro mezikruží:

$$D_{h2} = \frac{4 \cdot S_2}{O_2} = \frac{4 \cdot 4,23}{24,19} = 0,7 \text{ m}$$

Výpočet součinitele tření používám vzorec dle Blasius, kde je podmínka je  $Re < 10^5$ .

$$\lambda_{tř2} = 0,3164 \cdot Re_2^{-0,25} = 0,3164 \cdot (1,7 \cdot 10^4)^{-0,25} = 0,0277$$

Pokračuje výpočet tlakových ztrát v šachtě reaktoru způsobené třením podél reaktorové nádoby.

$$P_{ztr2} = \lambda_{tř2} \cdot \frac{l_r}{D_{h2}} \cdot \rho_2 \cdot \frac{v^2}{2} \cdot 10^6 = 0,0277 \cdot \frac{4,95}{0,7} \cdot 0,7251 \cdot \frac{0,6414^2}{2} \cdot 10^6 = 29\,215 \text{ Pa}$$

## 14.3 Celkové tlakové ztráty

V analýze uvažuji několik typů tlakových ztrát, jako jsou ztráty třením, ztráty způsobené vzlakem, ztráty změnou hustoty tekutiny a ztráty na vstupu a výstupu. Výpočet tlakových ztrát byl proveden pomocí počítačového programu MATLAB. Dle získaných hodnot jsou ztráty vzlakové, změnou hustoty a ztráty na vstupu a výstupu tak malé, že je nerozepisuji. Místo toho je zahrnuji v součiniteli bezpečnosti  $k$ .

Celkové ztráty třením jsou získané ze součtu tlakových ztrát třením v šachtě a v mezikruží.

$$P_{ztr} = P_{ztr1} + P_{ztr2} = 29\,215 + 220,3 = 29\,435,3 \text{ Pa}$$

Pro vyšší bezpečnost zavedeme koeficient bezpečnosti  $k = 1,2$ .

$$P_{ztr\text{-}bezpečnost} = P_{ztr} \cdot k = 29\,433,8 \cdot 1,2 = 35\,322,3 \text{ Pa}$$

## 15 Hlavní parametry vodního okruhu chlazení

Pro výpočet návrhu vodního okruhu chlazení jsem se soustředila na tepelný tok přenášený konvekcí ze šachty reaktoru. Ten musí být účinně odebírán chladicím okruhem. Teplotní parametry vodního výměníku tepla si volím a počítám s měrnou tepelnou kapacitou vody ( $c_p$ ). Z těchto hodnot jsem schopna vypočítat hmotnostní tok, který bude jedním z hlavních parametrů pro výběr výměníku.

Z výpočtu přestupu tepla znám hodnotu tepelného toku  $\dot{Q} = 37\,050\text{ W}$ . Zvolené parametry, které bude vodní okruh mít budou následující:

- $T_{in-výměník} = 20\text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{out-výměník} = 45\text{ }^\circ\text{C}$

Jelikož se jedná o výměník vzduch voda, tak tepelná kapacita vody je  $cp_{vody} = 4\,180\text{ J/kgK}$ . Nyní už stačí spočítat hmotnostní tok z kalorimetrické rovnice, který se stane důležitým parametrem pro výběr dmyhadla.

$$\dot{m}_{vody} = \frac{\dot{Q}}{c_{p_{vody}} \cdot (T_{out-výměník} - T_{in-výměník})} = \frac{37\,050}{4\,180 \cdot (45 - 20)} = 0,35\text{ kg/s}$$

## 16 Výběr dmyhadla

Pro výběr optimálního dmyhadla budu počítat s vypočtenými hodnotami z předchozích kapitol. Optimální dmyhadlo navrhuji z hodnot tlaku, příkonu a objemového toku vzduchu.

### Vstupní hodnoty:

- Rychlost ...  $v = 0,6414 \text{ m/s}$
- Tlakové ztráty ...  $P_{ztr-bezpečnost} = 35320,5 \text{ Pa}$
- Plocha průřezu mezikruží ...  $S_2 = 4,23 \text{ m}^2$
- Hmotnostní tok ...  $\dot{m} = 1,98 \text{ kg/s}$
- Hustota na výstupu ze šachty reaktoru ...  $\rho_2 = 0,7251 \text{ kg/m}^3$
- Tlak atmosféry ...  $P_{atm.} = 100 \text{ kPa}$

Výpočet potřebného příkonu stanovíme násobkem rychlosti, plochy a tlakových ztrát.

$$P_p = v \cdot S_2 \cdot P_{ztr-bezpečnost} = 0,6414 \cdot 4,23 \cdot 35320,5 = 95,8 \text{ kW}$$

Objemový tok je vypočteme pomocí podílu hmotnostního toku a hustoty.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_2} = \frac{1,98}{0,7251} = 2,73 \text{ m}^3/\text{s} = 163 \text{ m}^3/\text{min}$$

Tlak dmyhadla je součtem tlaku atmosférického a tlaku ztrát.

$$P = P_{atm.} + P_{ztr-bezpečnost} = 100 + 35,32 = 135,32 \text{ kPa}$$

Dle těchto parametrů jsem vybrala dmyhadlo – AIR FOIL BEARING TURBO BLOWER od značky Shandong Zhangqiu Blower Works<sup>4</sup>. Z výsledků analýzy vyšlo, že je zapotřebí, aby dmyhadlo mělo relativně malý tlak a dodávalo velký objemový tok.

---

<sup>4</sup> Vybráno ze stránek: <https://en.blower.cn/> [39]

## Popis dmyhadla

Dmyhadlo AIR FOIL BEARING TURBO BLOWER viz. obrázek číslo 24 je produkt s vysokou účinností, úsporou energie a je šetrný k životnímu prostředí. Používá bezolejové dynamické tlakové fóliové ložisko s chodem bez tření a nízkými mechanickými ztrátami. Díky integrované speciální konstrukci je jeho hlučnost  $\leq 75$  dB(A). Využívá plynulé nastavení otáček, které umožňují rychlý start a zastavení dmyhadla. Počet nepřetržitých spuštění a zastavení přesahuje hodnotou 200 000.

## Parametry dmyhadla

- Maximální rychlost otáčení může dosáhnout 95 000 otáček/minutu
- Účinnost motoru dosahuje až 97 %.
- Rozsah průtoku: 5 ~ 500 m<sup>3</sup>/min
- Rozsah tlaků: 20 ~ 120 kPa



Obrázek č. 24 Dmyhadlo AIR FOIL BEARING TURBO BLOWER [39]

## 17 Výsledky analýzy

V této části jsou komentovány výsledky a grafy z citlivostní analýzy vytvořené pomocí programu MATLAB. Tato analýza je provedena pro 4 možné rozměry šachty a různé vstupní rychlosti do šachty reaktoru. Pomocí této analýzy je získán optimální návrh chlazení šachty reaktoru. Výsledky této citlivostní analýzy jsou použity ve výpočtech uvedených v předchozích kapitolách.

### **17.1 Výsledky analýzy pro hodnoty výstupní teploty**

V Graf č. 1 a Graf č. 2 je zobrazena závislost výstupní teploty na rychlosti proudění vzduchu a hmotnostním toku. Z grafů je zřejmé, že výstupní teploty z šachty reaktoru klesají s rostoucí rychlostí proudícího vzduchu. Zároveň platí, že čím širší je šachta, tím je výstupní teplota z reaktoru nižší.

Červený bod v grafech udává výsledek naší analýzy. Černá čára v grafech představuje hranici, kterou nesmím překročit ( $T_{out} < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), což je požadavek od provozovatele.

### **17.2 Výsledky analýzy pro hodnoty ztrátového výkonu**

V Graf č. 3 a Graf č. 4 je vidět závislost ztrátového výkonu na rychlosti proudění vzduchu a hmotnostním toku. Na grafech je patrné, že ztrátový výkon roste s rostoucí rychlostí proudu vzduchu/ hmotnostním tokem. Pro závislost mezi průměrem šachty a ztrátovým výkonem platí, že čím je šachta širší, tím je ztrátový výkon nižší.

Červený bod v grafech označuje výsledek citlivostní analýzy.

### **17.3 Výsledky analýzy pro hodnoty tlakových ztrát**

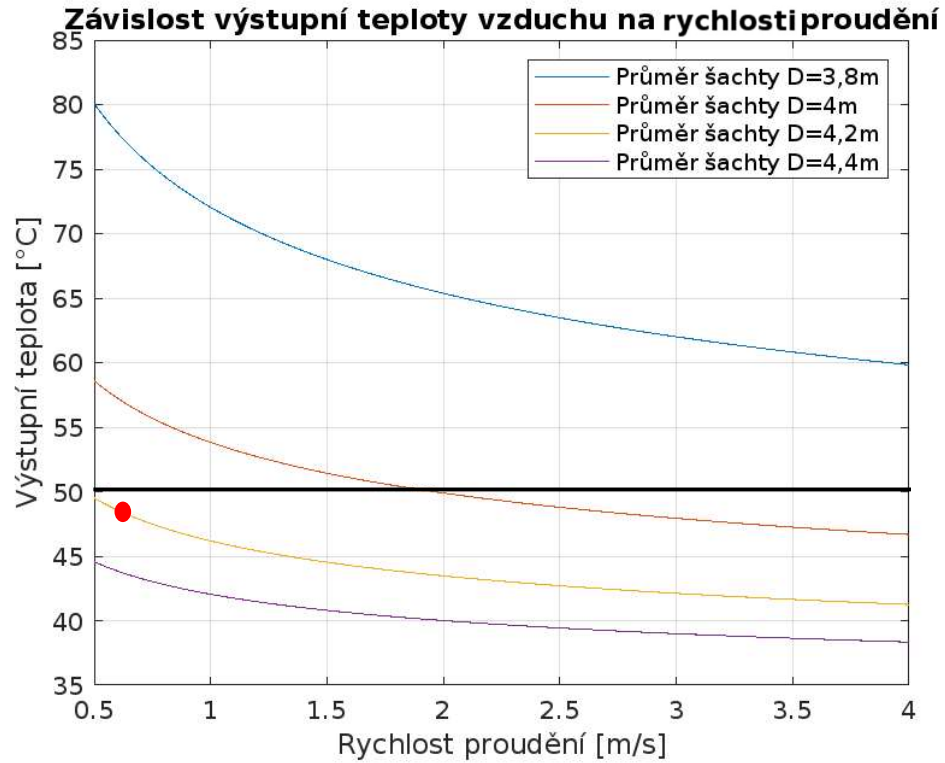
V Graf č. 5 a Graf č. 6 je závislost tlakových ztrát na rychlosti proudění vzduchu a hmotnostním toku. Na grafech je patrné, že se vrůstající rychlostí/ hmotnostním tokem rostou i tlakové ztráty. Pro závislost mezi průměrem šachty reaktoru a tlakovými ztrátami platí, že tlakové ztráty rostou se zvyšujícím se průměrem šachty.

Červený bod v grafech označuje výsledky citlivostní analýzy.

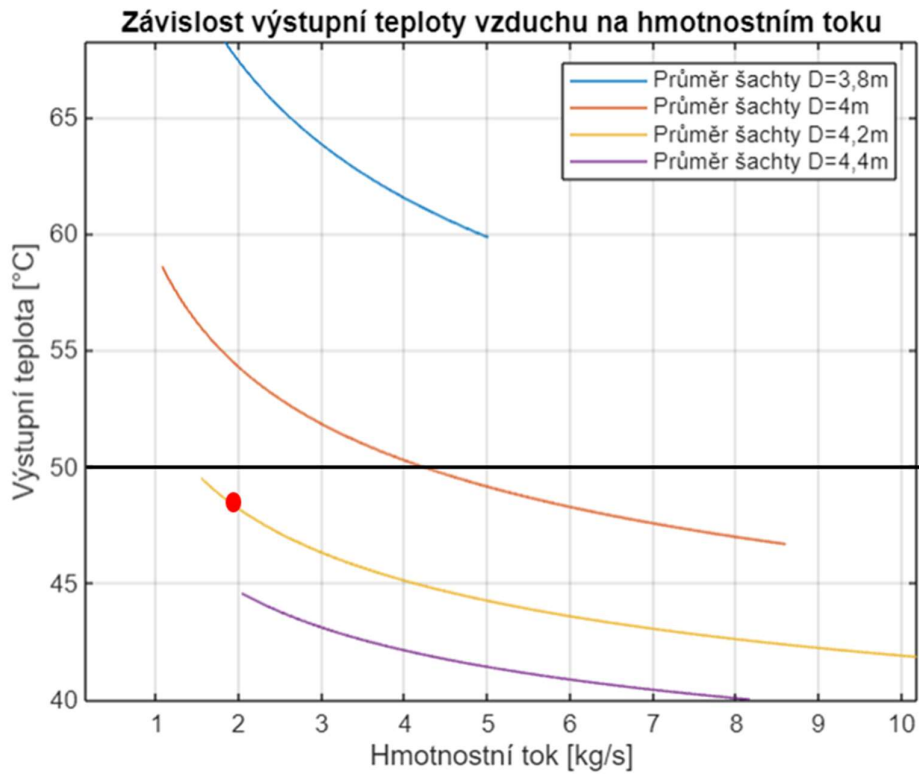
### **17.4 Výsledky analýzy pro výběr dmyhadla**

V Graf č. 7 a Graf č. 8 je zobrazena závislost příkonu dmyhadla na rychlosti proudění vzduchu a závislost objemového toku na rychlosti proudění vzduchu. Z grafů je zřejmé, že s rostoucí rychlostí stoupá hodnota příkonu i objemového toku. U grafu závislosti objemového toku na rychlosti je patrné, že čím větší je průměr šachty, tím víc se bude zvyšovat hodnota objemového toku. Proto je důležité vybrat vhodnou kombinaci rychlosti a průměru šachty, aby optimální návrh byl v rámci parametrů daných dmyhadlem.

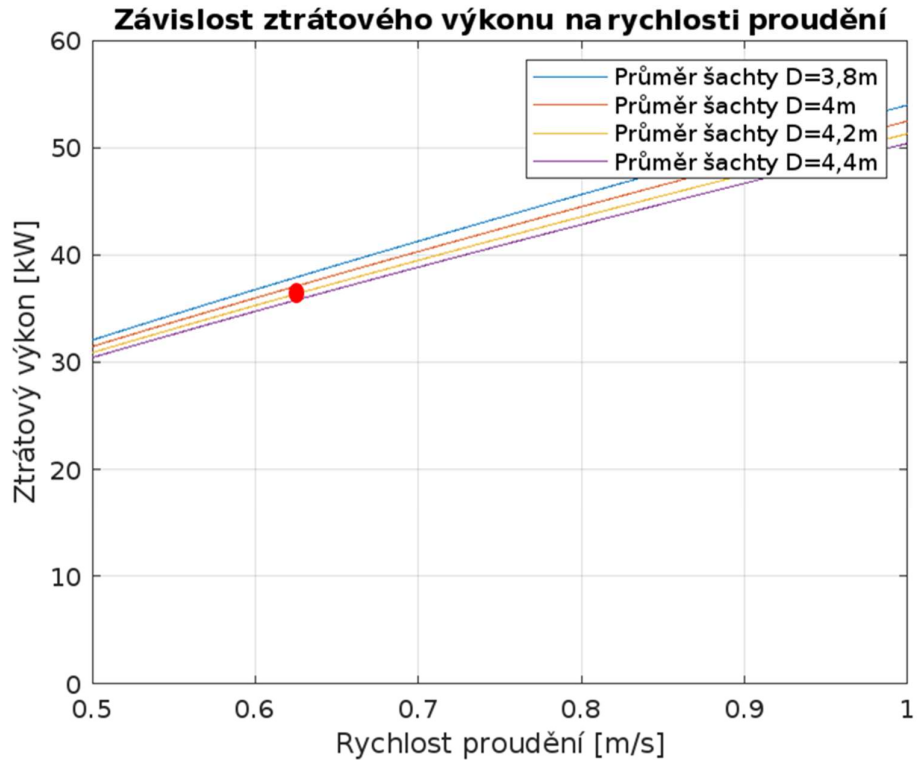
Červený bod v grafech ohraničuje výsledek citlivostní analýzy a černé křivky znázorňují rozsah, které jsou definovány vybraným dmyhadlem.



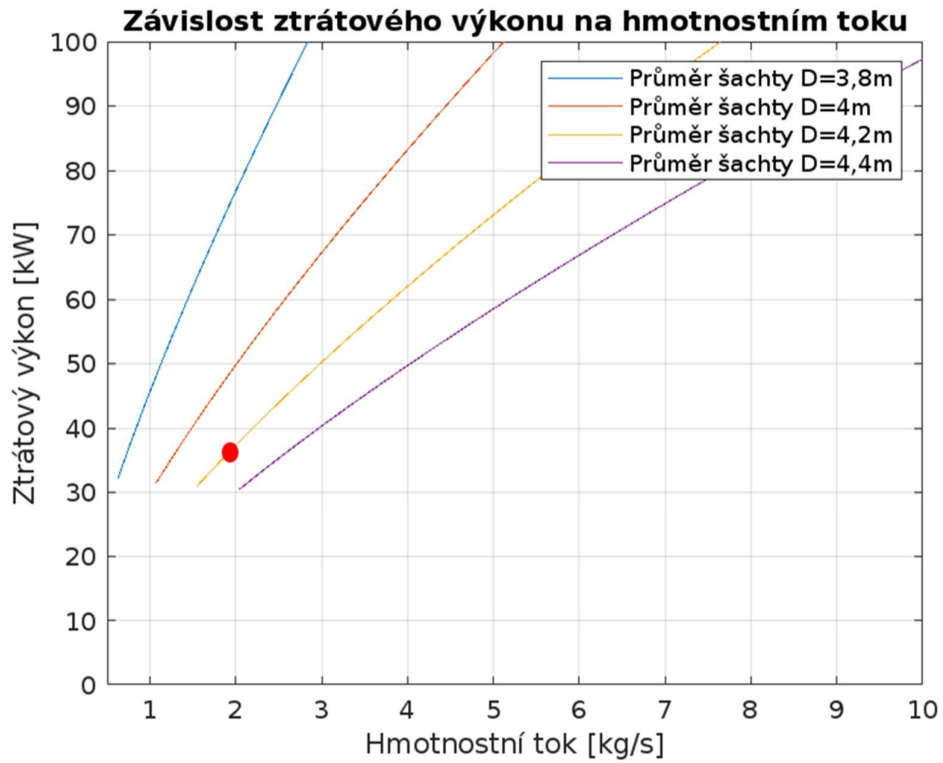
Graf č. 1 Závislost výstupní teploty na rychlosti proudění vzduchu



Graf č. 2 Závislosti výstupní teploty na hmotnostním toku

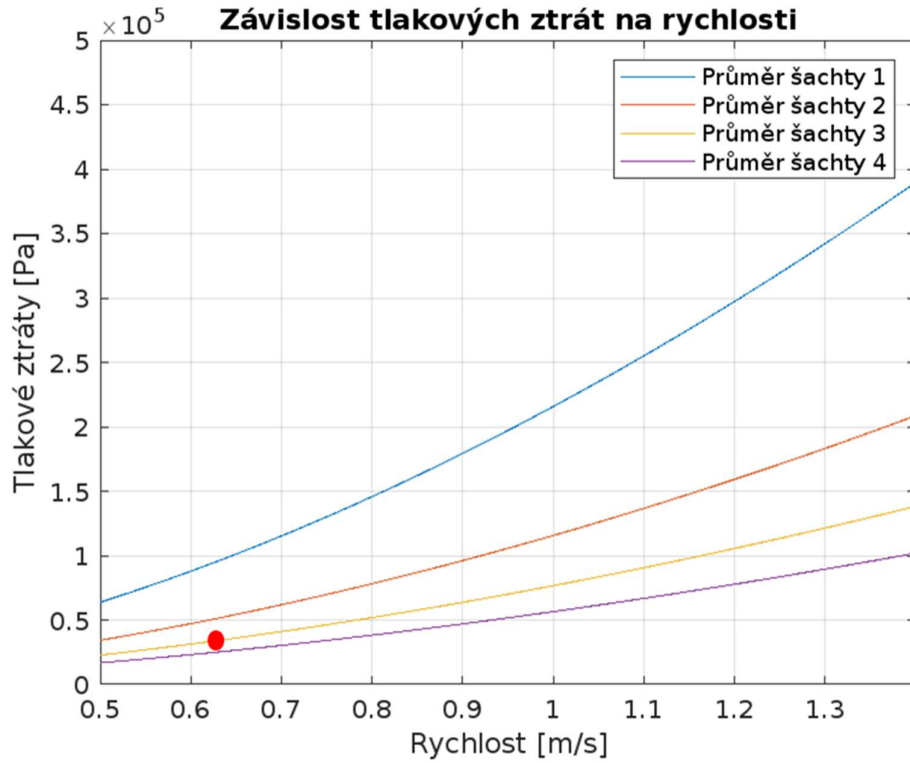


Graf č. 3 Závislost ztrátového výkonu na rychlosti proudění

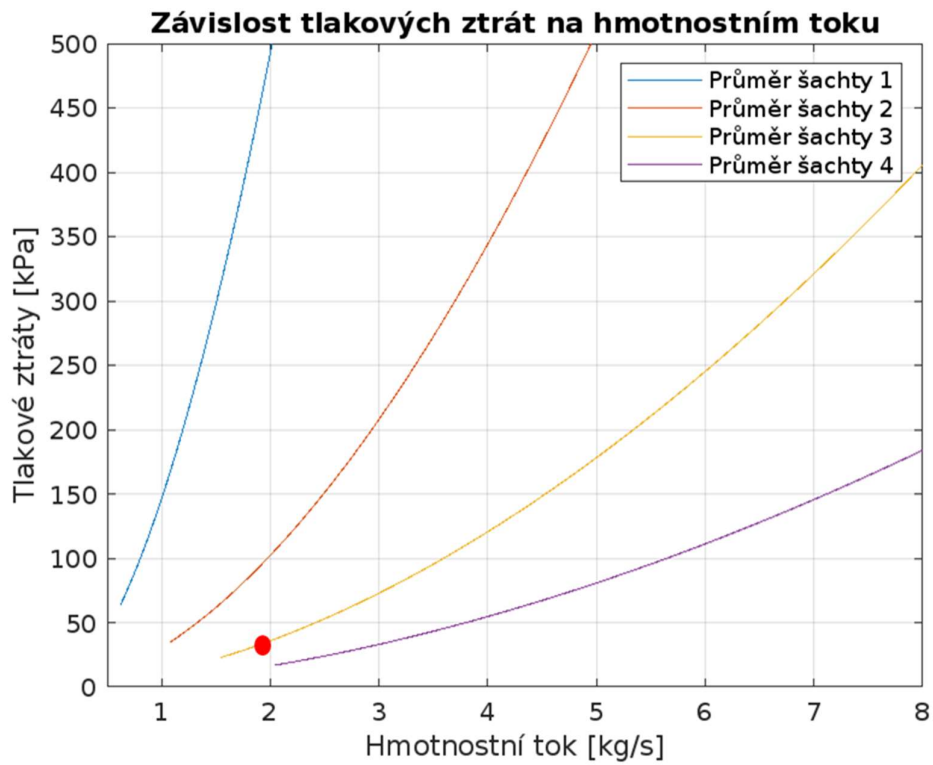


Graf č. 4 Závislost ztrátového výkonu na hmotnostním toku

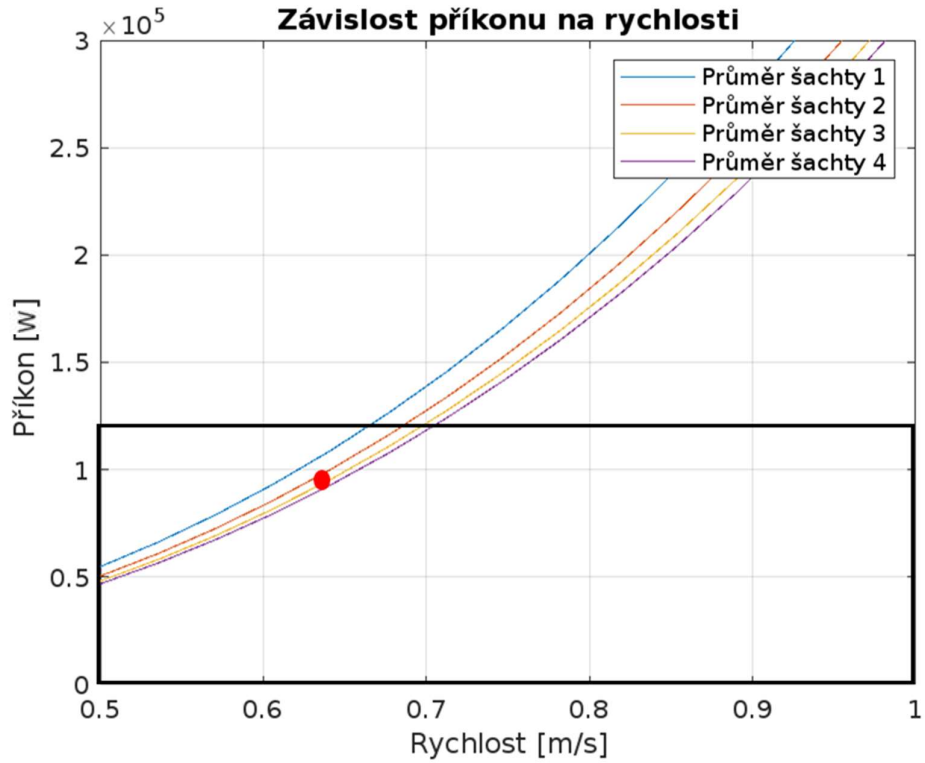




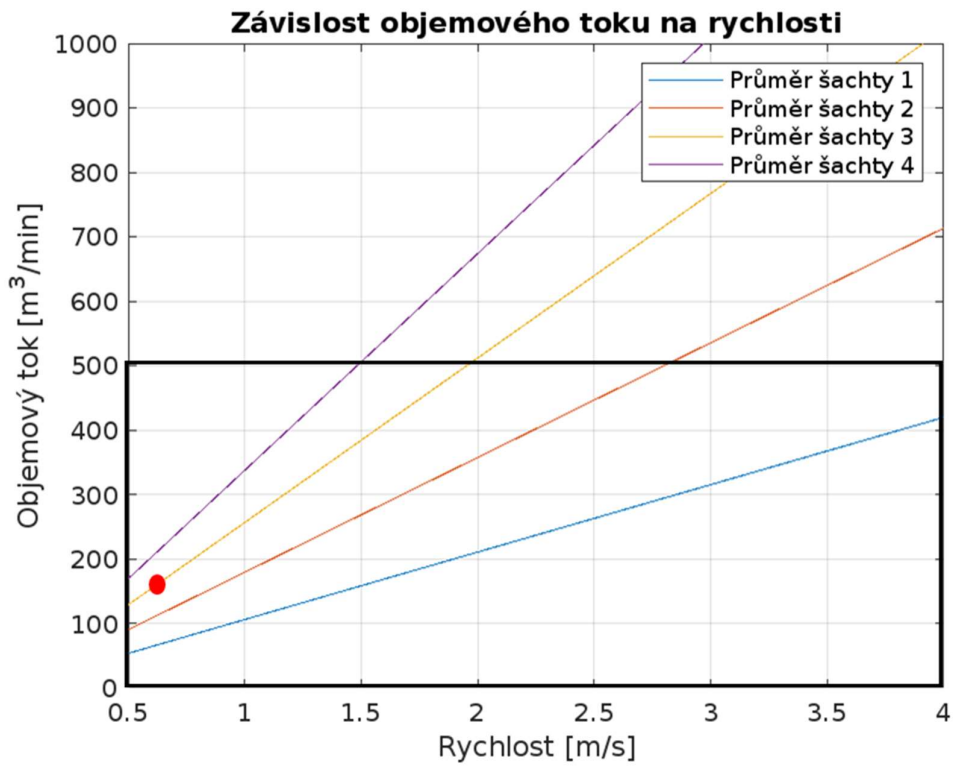
Graf č. 5 Závislost tlakových ztrát na rychlosti proudění vzduchu



Graf č. 6 Závislost tlakových ztrát na hmotnostním toku



Graf č. 7 Závislost příkonu dmyhadla na rychlosti proudění vzduchu



Graf č. 8 Závislost objemového toku dmyhadla na rychlosti proudění vzduchu

## 18 Závěr

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu systému chlazení šachty jaderného reaktoru typu GFR se zaměřením na jeho popis a funkci systému. Při popisu reaktoru GFR jsem se úzce zaměřila na reaktor typu GFR ALLEGRO, pro který je tato bakalářská práce určena.

Literární rešerší ve druhé části práce jsem popsala poznatky o existujících systémech chlazení šachty reaktoru a odvodu zbytkového tepla, zejména ve vysokoteplotních plynem chlazených reaktorech. Pro chlazení šachty reaktoru jsou důležité systémy odvodu zbytkového tepla tzv. DHR systémy. Pro návrh aktivního systému odvodu zbytkového tepla ze šachty reaktoru jsem vyšla z podobného konceptu, jakým disponují pasivní externí chlazení DHR systémy. Externí chlazení šachty je realizováno pomocí RCCS a RVACS. Dalším důležitým prvkem práce byl popis sdílení tepla a jeho matematické vyjádření, které jsem využila při výpočtu citlivostní analýzy.

Třetí část práce je zaměřená na určení parametrických křivek chlazení šachty reaktoru pro různé teplotní hladiny vystupujícího vzduchu. Jako matematický model sloužila geometrie b) na obrázku číslo 12 ze systému RVACS. V analýze tepelného přenosu byly všechny hodnoty spočteny v počítačovém programu MATLAB. Z vypočtených výsledků jsem hledala neoptimalnější řešení. Změna průměru reaktorové šachty na rychlosti a hmotnostním toku přiváděného média byla v reálných parametrech pro volbu dmyhadla a pro volbu provozních podmínek v jaderné elektrárně zásadní. Pro volbu dmyhadla jsem spočítala tlakové ztráty, které vznikají v šachtě reaktoru, a které je třeba překonat, aby bylo zbytkové teplo vyvedeno ze šachty reaktoru a následně z kontejnmentu.

V následující části jsem identifikovala hlavní parametry vodního okruhu chlazení nezbytného pro odvod tepla ze šachty reaktoru mimo kontejnment. To mi poskytlo informace pro zajištění efektivního přenosu tepla a minimalizaci energetických ztrát.

Posledním bodem práce bylo navržení vhodného dmyhadla. Z citlivostní analýzy a jejího grafického vyjádření (grafy číslo 1 - 8) jsem zjistila, že s rostoucí rychlostí proudění vzduchu a zužováním průměru šachty se zvyšují tlakové ztráty, které ovlivňují objemový tok. Z této skutečnosti jsem vybrala optimální řešení, kde průměr šachty je  $D_{\xi} = 4,2 \text{ m}$  a rychlost proudícího vzduchu je  $v = 0,6414 \text{ m/s}$ . Pro tuto variantu vychází řešení: výstupní teplota ze šachty reaktoru je  $48 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a celkové zbytkové teplo, které odvádíme, je  $37\,050 \text{ W}$ . Tlakové ztráty, které vznikly v šachtě reaktoru jsou rovny  $35 \text{ kPa}$ . Dmyhadlo jsem volila podle potřebných parametrů příkonu  $P_p = 95,8 \text{ kW}$  a objemového toku  $\dot{V} = 163 \text{ m}^3/\text{min}$ .

Z těchto výsledků jsem vybrala dmychadlo americké konstrukce AIR FOIL BEARING TURBO BLOWER od značky Shandong Zhangqiu Blower Works.

Cíl této bakalářské práce byl splněn. Výsledky mají praktický význam pro oblast jaderné energetiky, přispívají k rozvoji bezpečnějších a efektivnějších chladicích systémů pro jaderné reaktory typu GFR a především pro reaktor ALLEGRO. Práce se zapojuje do diskuse o budoucnosti jaderné energie a přináší konkrétní technická doporučení ve věci výzkumu v této oblasti.

## 19 Zdroje

- [1] IAEA. *Passive Shutdown Systems for Fast Neutron Reactors*. Vienna: IAEA, 2020. ISBN 978-92-0-101320-0.
- [2] Gas-Cooled Fast Reactor (GFR). In: *Generation IV International forum* [online]. Dostupné z: [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_42148/gas-cooled-fast-reactor-gfr](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42148/gas-cooled-fast-reactor-gfr)
- [3] TEAM XOMETRY. Actinides: Definition, Properties, Uses, and Types. In: *xometry.com*. 2024.
- [4] PETR VÁCHA a BRANISLAV HATALA. ALLEGRO PROJECT OVERVIEW. In: [online]. SNETP Forum. Online. 2. únor 2021. Dostupné z: [https://snetp.eu/wp-content/uploads/2021/02/Presentation\\_Branislav-Hatala-Petr-Vacha.pdf](https://snetp.eu/wp-content/uploads/2021/02/Presentation_Branislav-Hatala-Petr-Vacha.pdf)
- [5] ING. PETR VÁCHA. Odborná konzultace na téma reaktor ALLEGRO
- [6] P. VÁCHA, B. KVIZDA a Z. HOZER. *GFR RESEARCH AND DEVELOPMENT PROGRAMME IN V4 COUNTRIES* [online]. B.m.: IAEA. Dostupné z: [https://conferences.iaea.org/event/218/papers/18955/files/8197-Vacha\\_FR22\\_CN291-304\\_revised.pdf](https://conferences.iaea.org/event/218/papers/18955/files/8197-Vacha_FR22_CN291-304_revised.pdf)
- [7] KOMRSKA, Jan. *SIMULACE VZNIKU A ŠÍŘENÍ TAVENINY PŘI TĚŽKÝCH HAVÁRIÍCH JADERNÝCH REAKTORŮ* [online]. v Praze, 2022. Diplomová práce. ČVUT FS. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/102905>
- [8] KVIZDA, Boris, Gusztáv MAYER, Petr VÁCHA, Janusz MALESA, Arkadiusz SIWIEC, Alfredo VASILE, Slavomír BEBJAK a Branislav HATALA. ALLEGRO Gas-cooled Fast Reactor (GFR) demonstrator thermal hydraulic benchmark. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2019, **345**, 47–61. ISSN 00295493. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2019.02.006
- [9] DARILEK, P. a ZAJAC, R. ALLEGRO - introduction to GFR. In: *21. Atomic Energy Research Symposium on WWER Physics and Reactor Safety (1): INIS-SK--2011-029* [online]. 2011. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/42/105/42105741.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/105/42105741.pdf)
- [10] L. BELOVSKY a J. GADO. The ALLEGRO Experimental Gas Cooled Fast Reactor Project. In: *Wigner-115 Conference* [online]. 2017. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/49/085/49085957.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/085/49085957.pdf)
- [11] ALLEGRO PROJECT. ALLEGRO. *Allegroreactor* [online]. Dostupné z: <https://allegroreactor.cz>
- [12] LISOWSKI, Darius, Qiuping LV, Bogdan ALEXANDREANU, Yiren CHEN, Rui HU a Tanju SOFU. *An Overview of Non-LWR Vessel Cooling Systems for Passive Decay Heat Removal (Technical Letter Final Report)* [online]. ANL/NSE--21/3, 1786964, 168052. 2021 [vid. 2024-04-18]. Dostupné z: doi:10.2172/1786964
- [13] BRINKMANN, G., J. PIRSON a S. EHSTER. Important viewpoints proposed for a safety approach of HTGR reactors in Europe. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2006, **236**(5–6), 463–474. ISSN 00295493. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2005.11.017

- [14] LIM, Hong Sik, Nam-il TAK, Sung Nam LEE a Chang Keun JO. Water-jacket reactor cavity cooling system concept to mitigate severe accident consequence of high temperature gas-cooled reactor. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2018, **340**, 156–165. ISSN 00295493. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2018.09.029
- [15] MAYS, Brian, Lewis LOMMERS, Stacy YODER a Farshid SHAHROKHI. Sensitivity of SC-HTGR Conduction Cooldown to Reactor Cavity Cooling System Failure. *Nuclear Technology* [online]. 2022, **208**(8), 1311–1323. ISSN 0029-5450, 1943-7471. Dostupné z: doi:10.1080/00295450.2021.1947664
- [16] HUALI WU. *HEAT TRANSFER SIMULATION OF REACTOR CAVITY COOLING SYSTEM EXPERIMENTAL FACILITY USING RELAP5-3D AND GENERATION OF VIEW FACTORS USING MCNP* [online]. B.m.: Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of MASTER OF SCIENCE. srpen 2013. Dostupné z: <http://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/151265/WU-THESIS-2013.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- [17] BECHTEL NATIONAL, INC., SAN FRANCISCO, CA (USA) a GAS-COOLED REACTOR ASSOCIATES, LA JOLLA, CA (USA). *Reference modular High Temperature Gas-Cooled Reactor Plant: Concept description report* [online]. DOE/HTGR-86-118, 6626536. 1986 [vid. 2024-04-18]. Dostupné z: doi:10.2172/6626536
- [18] PURBA, Julwan Hendry a Damianus Toersiwi SONY TJAHYANI. A Comparative Study on Safety Design Requirements between HTGR and LWR. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2019, **1198**(2), 022020. ISSN 1742-6588, 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1198/2/022020
- [19] WU, Guowei, Ming JIN, Jiayue CHEN, Yunqing BAI a Yican WU. Assessment of RVACS performance for small size lead-cooled fast reactor. *Annals of Nuclear Energy* [online]. 2015, **77**, 310–317. ISSN 03064549. Dostupné z: doi:10.1016/j.anucene.2014.11.028
- [20] LEE, Min Ho, Ji Hwan HWANG, Ki Hyun CHOI, Dong Wook JERNG a In Cheol BANG. Application of two different similarity laws for the RVACS design. *Nuclear Engineering and Technology* [online]. 2022, **54**(12), 4759–4775. ISSN 17385733. Dostupné z: doi:10.1016/j.net.2022.07.023
- [21] CARLSSON, Johan. *Inherent safety features and passive prevention approaches for Pb/Bi-cooled accelerator-driven systems*. 2003. ISBN 978-91-7283-470-5.
- [22] LEE, Seongmin, Young Jae CHOI, Jeong Ik LEE a Yong Hoon JEONG. Investigation of various reactor vessel auxiliary cooling system geometries for a hybrid micro modular reactor. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2021, **379**, 111239. ISSN 00295493. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2021.111239
- [23] IAEA. *Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants*. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2009. ISBN IAEA-TECDOC-1624.
- [24] ROY CHALLENGER. ESBWR Design Summary. In: *NRC Staff - GE Meeting* [online]. Rockville, Maryland. 20. červen 2002. Dostupné : <https://www.nrc.gov/docs/ML0217/ML021770054.pdf>
- [25] ESBWR -GE-Hitachi. *nuclear street*[online]. Dostupné z: [https://nuclearstreet.com/nuclear-power-plants/w/nuclear\\_power\\_plants/esbwr-ge-hitachi](https://nuclearstreet.com/nuclear-power-plants/w/nuclear_power_plants/esbwr-ge-hitachi)

- [26] GE-HITACHI NUCLEAR ENERGY AMERICAS LLC. *ESBWR Design Control Document Tier 2* [online]. B.m.: GE-Hitachi Nuclear Energy. 2005. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1410/ML14100A506.pdf>
- [27] HAAG, Michel, P. Karthick SELVAM a Stephan LEYER. Effect of condenser tube inclination on the flow dynamics and instabilities in a passive containment cooling system (PCCS) for nuclear safety. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2020, **367**, 110780. ISSN 00295493. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2020.110780
- [28] HA, Huiun, Sangwon LEE a Hangan KIM. Optimal design of passive containment cooling system for innovative PWR. *Nuclear Engineering and Technology* [online]. 2017, **49**(5), 941–952. ISSN 17385733. Dostupné z: doi:10.1016/j.net.2017.03.005
- [29] JANG, Yeong-Jun, Dong-Jae CHOI, Sin KIM, Myung-Taek HYUN a Yeon-Gun LEE. Enhancement of Condensation Heat Transfer Rate of the Air-Steam Mixture on a Passive Condenser System Using Annular Fins. *Energies* [online]. 2017, **10**(11), 1777. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en10111777
- [30] KOTHANDARANMAN, C. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 3. nedatováno. ISBN 978-81-224-2642-7.
- [31] ING. RADEK ŠULC, PH.D. *Zvětšování měřítka v mechanicky míchaných nádobách* [online]. B.m.: České vysoké učení technické v Praze Fakulta strojní. 2012. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2012-07-Sulc.pdf>
- [32] KALČÍK, Josef. *Technická termodynamika*. Nakladatelství Československé akademie věd. 1963.
- [33] MICHAL ŠKORŇA. *Přestup tepla z vnějšího žebrovaného povrchu obalového souboru typu CASTOR v podmínkách skladování* [online]. Praha, 2022. Bakalářská práce. ČVUT FJFI. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/99636/F4-BP-2022-Skorna-Michal-BP2\\_SKORNA.pdf?sequence=-1](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/99636/F4-BP-2022-Skorna-Michal-BP2_SKORNA.pdf?sequence=-1)
- [34] What is Nusselt Number. In: *nuclear-power.com* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/introduction-to-heat-transfer/characteristic-numbers/what-is-nusselt-number/>
- [35] MESEGUER, José, Isabel PÉREZ-GRANDE a Angel SANZ-ANDRÉS. Thermal radiation heat transfer. In: *Spacecraft Thermal Control* [online]. B.m.: Elsevier, 2012 [vid. 2024-04-18], s. 73–86. ISBN 978-1-84569-996-3. Dostupné z: doi:10.1533/9780857096081.73
- [36] STEFANŮV - BOLTZMANNŮV ZÁKON. In: *eu.fme.vutbr.cz* [online]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0204.htm>
- [37] SAZIMA, Miroslav. *Sdílení tepla*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1993. ISBN 978-80-03-00675-5.
- [38] PETŘÍKOVÁ, Markéta a Pavel KRYŠTŮFEK. *Tabulky a diagramy pro termodynamiku* [online]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/items/777a2a88-68f2-4e3d-a522-c92a76b9a218>
- [39] SHANDONG ZHANGQIU BLOWER CO.,LTD. AIR FOIL BEARING TURBO BLOWER. *ZHANG GU* [online]. Dostupné z: [https://en.blower.cn/Products\\_detail/1.html](https://en.blower.cn/Products_detail/1.html)