

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Materiály s fázovou změnou pro ECCS systémy
jaderných elektráren**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petra MAŘÍKOVÁ**
Osobní číslo: **E16N0087P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Materiály s fázovou změnou pro ECCS systémy jaderných elektráren**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s různými PCM materiály.
2. Navrhněte pro různé teplotní parametry, systém PCM (phase changing materials), který bude sloužit jako absorbátor tepla po havarijním odstavení jaderného reaktoru EDU.
3. Určete úsporu objemu barbotážní věže pro daný PCM.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Tato předkládaná diplomová práce je zaměřena na akumulaci tepelné energie skrze fázovou změnu látek. Nejprve se zabývá rozdělením materiálů s fázovou přeměnou, poté i jejich charakteristikou. Dále se věnuje funkčnosti barbotážní věže v jaderné elektrárně Dukovany, kde je popsána havárie s únikem chladiva. Následně je navržen jiný materiál pro optimalizaci vnitřních parametrů kontejnmentu.

Klíčová slova

Jaderná elektrárna, materiál s fázovou změnou, barbotážní věž, Dukovany

Abstract

The master thesis is focused on the accumulation of thermal energy by phase changing materials. First, it deals with the distribution of phase changing materials and their characteristics. The next part deals with the functionality of the bubbling tower at the nuclear power plant Dukovany, it describes the accident with a refrigerant leak. And finally, there have been several calculations about material which can be used to optimalization the inner spaces in the containment.

Key words

Nuclear power plants, phase changing material, bubbling tower, Dukovany

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 22.5.2018

Petra Maříková

Poděkování

Na tomto místě bych především ráda poděkovala své vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za její neutuchající ochotu a schopnost kdykoli řešit vzniklé problémy. Dále bych také ráda poděkovala svému konzultantovi doc. Ing. Radku Škodovi, Ph.D. za jeho odborné rady, čas i poskytnuté materiály.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 PCM MATERIÁLY	12
1.1 CHARAKTERISTIKA PCM MATERIÁLŮ	12
1.2 TŘÍDĚNÍ A OBLASTI POUŽITÍ PCM MATERIÁLŮ	14
1.2.1 Anorganické látky - hydráty solí a soli	15
1.2.2 Organické látky - mastné kyseliny, parafíny, cukerné alkoholy	16
1.2.3 Eutektika	18
1.3 MATERIÁLY S VYSOKOTEPLTNÍ ZMĚNOU FÁZE	18
1.4 METODY ZLEPŠENÍ VÝKONU U PCM	18
1.4.1 Vylepšení přenosu tepla pomocí mezičlánku	21
1.4.2 Numerická analýza nabíjení a vybíjení	23
1.5 PROBLÉMY PCM	23
1.5.1 Mechanická stabilita	23
1.5.2 Fázová separace látek	23
1.5.3 Podchlazení látek	24
2 VAKUOBARBOTÁŽNÍ SYSTÉM	25
2.1 JADERNÁ ELEKTRÁRNA DUKOVANY	25
2.1.1 Dukovanský reaktor VVER-440/V-213	26
2.1.2 Kontejnmentový systém a barbotážní věž	27
2.1.3 Normální a havarijní provoz	32
2.1.4 Havárie s malým únikem chladiva	35
2.2 SYSTÉM PCM	35
2.2.1 Přehled látek	36
2.2.2 Volba materiálu	37
2.2.3 Zapouzdření látek - parafínů	38
3 ÚSPORA OBJEMU BARBOTÁŽNÍ VĚŽE	41
3.1 VYBRANÁ HAVÁRIE UVAŽOVANÉHO PRASKNUTÍ I.O.	41

3.2	PARAMETRY BARBOTÁŽNÍ VĚŽE	42
3.3	MODELOVÝ VÝPOČET.....	42
3.3.1	<i>Výpočet uvolněného tepla.....</i>	<i>43</i>
3.3.2	<i>Výpočet množství PCM.....</i>	<i>44</i>
3.4	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	48
ZÁVĚR		50
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ		51
PŘÍLOHY		1

Úvod

Jaderné energetické zařízení je systém, kde se klade velký důraz na bezpečnost. Nároky na jadernou bezpečnost se neustále zvyšují. Souběžně s tímto požadavkem dochází k vývoji nových bezpečnostních opatření na mnoha místech v JE, jsou ověřovány, inovovány postupy na základě zkušeností se stávajícím zařízením.

S rozvojem průmyslu a techniky jsou stále větší požadavky na akumulaci tepelné energie, která se nejčastěji akumuluje v pevných či kapalných látkách. Toto následně umožňuje využít nashromážděné teplo či chlad. Materiály s fázovou změnou poskytují zajímavý zdroj zkoumání, neboť by mohly svým vhodným technologickým použitím přinést užitek nejen v podobě lepší akumulace tepla, ale možná i větším využitím v oblasti energetiky. Tyto materiály jsou nyní využívány ve zdravotnictví, též jako izolanty u nízkoenergetických staveb.

Úkolem této práce je navrhnout optimalizaci barbotážní věže, jakožto součást kontejnmentového systému jaderné elektrárny Dukovany, tím vylepšit funkčnost věže souběžně s v současnosti využívaným roztokem vody, kyseliny borité a hydrazinhydrátem. Reaktory typu VVER V440/V-213 nemají plnotlaký kontejnment, proto je havarijní systém na potlačení tlaku a teploty projektován skrze kondenzaci v barbotážní věži. Byl by pro to využít materiál, který svou změnou fáze dokáže pojmout dostatečně velké teplo, neohrozit stávající systém, a zároveň tím tak splnit účel tohoto ochranného komplexu.

Seznam symbolů a zkratek

ECCS	system havarijního chlazení reaktorového jádra
PCM.....	materiály s fázovou změnou
SHS.....	materiál s dobrým tepelným úložištěm
HTF.....	kapalina pro přenos tepla
WANO.....	světová asociace provozovatelů jaderných elektráren
VBS	vakuobarbotážní systém
HZ.....	hermetická zóna
LOCA	havárie se ztrátou chladiva
I.O.	primární okruh

1 PCM materiály

Materiál, u kterého dochází k fázové změně skupenství se v anglickém jazyce označuje jako Phase changing materials (PCM). Používají se od konce 19. století jako prostředek pro tepelné ukládání energie. Jejich hlavním rysem je, že při tavení či tuhnutí za určité teploty dokáží uchovávat, či naopak uvolňovat velké množství energie. Teplo buď absorbují, nebo uvolňují a to právě ve chvíli, kdy se onen materiál mění z pevného skupenství na kapalný či naopak. [1]

1.1 Charakteristika PCM materiálů

Materiály s fázovou změnou mohou být charakterizovány jako látky využívající latentní teplo. Latentní neboli skryté teplo je teplo, které materiál současně během změny skupenství pojme a následně při reverzním fázovém přechodu uvolní. Díky tomu, že během zahřívání PCM dochází ke zvyšování teploty a skupenského tepla tuhé látky, ke změně z pevného na kapalné skupenství dochází při dosažení teploty tání (obr.1), nicméně teplota materiálu se nemění ani během vlastní fázové přeměny. [2]

Hlavními typy materiálů s možností akumulace tepla jsou materiály „citelné“ a „latentní“. Citelné systémy uchovávají energii díky změně teploty skladovacího média, tím může být voda, slaná voda, hornina, půda apod., nikoli však změnou jeho fáze. Množství akumulované energie u těchto materiálů závisí na změně teploty, hmotnosti a tepelné kapacitě látky. Přestože citelné systémy nemají velkou hustotu skladovací energie, jsou v současnosti nejpoužívanější pro akumulaci tepelné energie. Matematicky lze zapsat tuto akumulaci následovně:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} V \cdot \rho \cdot c \, dt = V \cdot \rho \cdot c (t_2 - t_1) \quad (1)$$

kde Q (J) teplo

V (m^3) objem akumulační látky

ρ (kg/m^3) hustota

c (J/kg K) měrná tepelná kapacita pracovní látky

t_1, t_2 ($^{\circ}\text{C}$) teplota na začátku a konci akumulace

U latentních systémů k uchování tepelné energie dochází právě při fázové změně, kdy se tedy nemění teplota, ale fáze materiálu. Obecně lze říci, že latentní systémy jsou v rámci objemové expanze kompaktnější, než je tomu u citelných systémů, a to díky chemickým reakcím, neboť změna objemu materiálu je kolem 10%. Jen u fázové změny plyn - kapalina dochází k větším změnám objemu, což je činní hůře využitelnými. [2]

$$Q = \rho_{PCM,t} \cdot V \cdot c_{PCM,t}(t_Z - t_1) + \rho_{PCM,t} \cdot V \cdot l_{PCM} + \rho_{PCM,k} \cdot V \cdot c_{PCM,k}(t_2 - t_Z) \quad (2)$$

kde $\rho_{PCM,t}$ (kg/m³) hustota PCM v tuhém stavu

$\rho_{PCM,k}$ (kg/m³) hustota PCM v kapalném stavu

$c_{PCM,t}$ (J/kg K) měrná tepelná kapacita v tuhém stavu

$c_{PCM,k}$ (J/kg K) měrná tepelná kapacita v kapalném stavu

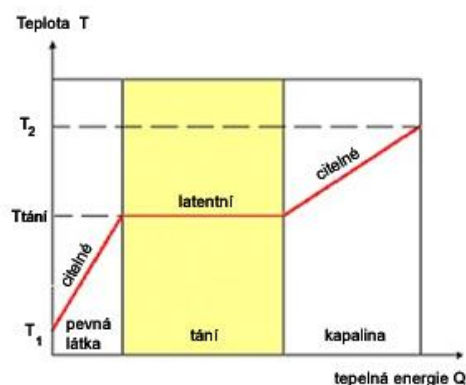
l_{PCM} (J/kg) měrné skupenské teplo

t_z (°C) teplota při které dochází ke změně skupenství

V (m³) objem akumulční látky

t_1, t_2 (°C) teplota na začátku a konci akumulace

Využití latentního tepla může být dosaženo změnami z kapalně fáze na pevnou a naopak, z pevné na plynnou fázi a obráceně. V oblasti PCM se však nejčastěji využívají změny z pevné fáze na kapalnou a z kapalně na pevnou. Ačkoli u přechodu z kapalných na plynné fáze je vyšší hodnota transformačního tepla, není toto tepelné ukládání praktické, neboť díky plynné fázi jsou zde velké objemové nároky a na tlak skladovacího materiálu. Změny z pevné fáze opět na pevnou jsou poměrně pomalé a mají nízké transformační teplo. [2]



Obr. 1 – Akumulace latentního tepla během tání [2]

PCM materiály s přeměnou fáze pevná – kapalná se považují za materiály s dobrým tepelným úložištěm (SHS – sensible heat storage). Absorbují teplo při téměř konstantní teplotě, až do doby tání, dokud není veškerý materiál přeměněn na kapalinu. Jakmile se teplota okolí začne snižovat, PCM ztuhne a uvolňuje uložené latentní teplo. [1]

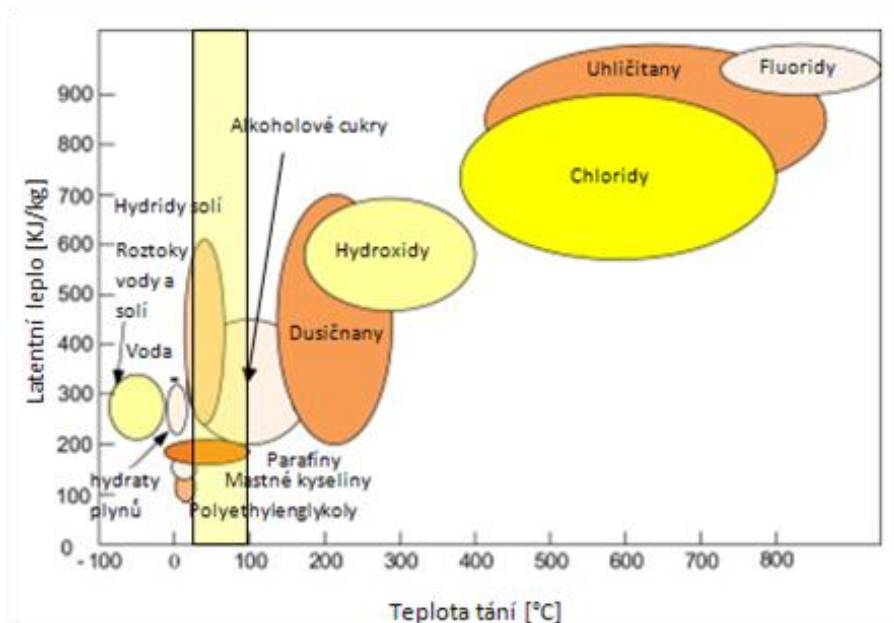
Obecnými požadavky na PCM se rozumí co největší akumulace tepelné energie v co nejmenším objemu materiálu, což lze vyjádřit entalpií tání (kJ/m^3). Rovněž také nehořlavost, vhodná teplota tání, cyklická stabilita, nízké objemové změny při fázovém přechodu, nízký sklon k podchlazování (děj, při kterém je třeba dosáhnout nižší teploty, než teploty tání, aby materiál ztuhnul), tak i nekorozivní vlastnosti a dobrá tepelná vodivost. Pro některé aplikace využití PCM je důležitý taktéž počet cyklů fázové přeměny. Z oblasti chemických požadavků se zde jedná o nutnost kompatibility PCM s okolními materiály, tak i jejich chemická stabilita po dobu životnosti a recyklovatelnost. Z ekonomického hlediska nesmíme zapomenout na nízkonákladovost, tak aby bylo PCM konkurence schopné. [2]

1.2 Třídění a oblasti použití PCM materiálů

Je celá řada aplikací, kde lze využít vlastnosti materiálů s fázovou změnou. Jednou z nejčastěji využívaných je stavebnictví. PCM se mohou vyskytnout ve formě desek, ať už ve stěnách či stropích. Při snížené potřebě dodatečného ohřevu podporují regulaci teploty díky dobré akumulaci tepla. PCM materiály mohou být využity i při skladování potravin z důvodu zachování delší čerstvosti a životnosti. Dalším důležitým sektorem využití je solární systém ohřevu vody, taktéž vzduchový topný a klimatizační systém. Příkladem pro snížení spotřeby energie jsou skleníky, kde se hodně energie spotřebuje v důsledku vytápění. Využití lze nalézt i pro transportní medicínské boxy, například pro krevní transfuze.

System skladování tepelné energie pro konkrétní aplikaci závisí na mnoha faktorech – době skladování, ekonomických, zásobovacích a provozních požadavcích a tepelné ztrátě. [3]

PCM lze obecně rozdělit do tří skupin: eutektika, materiály organického a anorganického původu.



Obr. 2 – Třídění PCM dle teploty tání a latentního tepla [11]

1.2.1 Anorganické látky - hydráty solí a soli

Materiálové kompozity se základem anorganických solí a solných kompozitů s využitím latentního tepla ve velmi širokém teplotním rozsahu od 120 – 1000 °C jsou na bázi fluoridů, chloridů, bromidů, hydroxidů, dusičnanů, uhličitánů a uhlovodíků. Dvojnásobná či trojnásobná eutektická kompozice založená na fluoridech a chloridech je nejperspektivnější PCM z hlediska vysokého latentního tepla, rovněž i z důvodu nízkých finančních nákladů. Nevýhodou anorganických látek je riziko koroze okolních kovů.

Hydráty solí mají běžně teplotu tání mezi 5 - 130 °C. Ačkoli jsou chemicky relativně stabilní, mají i dobrou tepelnou vodivost, jejich nevýhodou je možná koroze okolních materiálů a nerovnoměrné tání, což může způsobovat problém s cyklickou stabilitou, neboť dochází k fázové separaci vody a koncentrovanému roztoku hydrátu soli, který se usazuje ke dnu.

Soli mají obecně teplotu tání nad 150 °C a vysokou tepelnou kapacitu vhodnou pro uchování tepla. Ačkoli se vždy skládají ze dvou prvků, k fázové separaci u nich nedochází. Z pohledu finančních nákladů a materiálů už tak atraktivní nejsou, poněvadž způsobují korozi kovů. [3], [10]

Tab.1 - Charakteristiky hydrátů solí využívaných jako PCM [7]

Materiál	Teplota tání (°C)	Entalpie tání (kJ/kg)	Hustota (kg/m ³)
LiClO ₃ ·3H ₂ O	8	155	1530 (kapalina) 1720 (pevná látka)
KF·3H ₂ O	18,5	231	1447 (kapalina) 1455 (pevná látka)
CaCl ₂ ·6H ₂ O	29,30	171,190	1562 (kapalina) 1710 (pevná látka)
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	296	- -
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32	254	- 1458 (pevná látka)
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	35-44	280	1442 (kapalina) 1522 (pevná látka)
Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	48-55	187, 209	1670 (kapalina) 1750 (pevná látka)
Na(CH ₃ COO)·3H ₂ O	58	226, 264	1280 (kapalina) 1450 (pevná látka)
Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O	78	265, 280	1937 (kapalina) 2180 (pevná látka)
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	89,9	149, 163	1550 (kapalina) 1636 (pevná látka)
MgCl ₂ ·6H ₂ O	117	165, 169	1450 (kapalina) 1569 (pevná látka)

1.2.1.1 Kovy a slitiny kovů

Některé problémy anorganických solí a solných kompozitů omezují jejich využitelnost v různých aplikacích. Jsou jimi nízká tepelná vodivost, vysoká korozivost a velké změny objemu během tavení. Kovové materiály přidané do kompozitu tyto problémy snižují a jsou konkurence schopné i přes nižší hustotu tepelného uložení. Kvůli vyšší tepelné vodivosti jsou výhodnější pro dosažení konstantní teploty. Nicméně jejich použití může přinášet mnoho netechnických problémů. Mezi ně se řadí olovo, hliník, rovněž hliník ve spojení s křemíkem. Slitiny Al-Mg-Zn (59,36 % Al, 34,02 % Mg a 6,62 % Zn) ukázaly, že latentní teplo a teplota tání této slitiny se po 1000 tepelných cyklech snížila o 3,06 - 5,3 K a objem 10,98 %. [3]

1.2.2 Organické látky - mastné kyseliny, parafíny, cukerné alkoholy

Obecně se jejich teplota tání pohybuje mezi 0 - 200 °C, při vyšších teplotách většina z nich není kvůli kovalentním vazbám stabilní.

Mastné kyseliny jsou charakterizovány obecným vzorcem CH₃(CH₂)_{2n}COOH. Vyznačují se dobrou cyklickou stabilitou, neboť u nich nenastává separace. Jejich teplota tání vzrůstá s délkou uhlíkového řetězce. Jejich tepelná vodivost je ovšem nízká, nízká je i teplota podchlazení.

Jedny z nejpoužívanějších organických PCM jsou parafíny, někdy též nazývány alkany. Jsou to nasycené uhlovodíky bez násobných vazeb mezi atomy uhlíku s voskovitou konzistencí při pokojové teplotě. Ačkoli mají dobrou skladovací hustotu tepelné energie, jejich tepelná vodivost je nízká. Teplota tání u parafínů přímo souvisí s počtem atomů uhlíku v materiálové struktuře. Táním dochází k nabytí objemu přibližně o 10 %. Ve vodě jsou nerozpustné, nereagují na většinu běžných chemických látek, ale jsou hořlavé. Stinnou stránkou parafínů je to, že jsou většinou vyráběny z ropných produktů, což zvyšuje závislost na ropě i z hlediska ekonomického. Nemluvě o geopolitických důsledcích v rámci zvyšování emisí uhlíku, které jsou v poslední době velmi diskutované.

Tab.2 – Někteří výrobci PCM

Firma	Rozmezí teplot tání
RUBITHERM	-9 ÷ 90 °C
Cristopia	-33 ÷ 27 °C
TEAP	-50 ÷ 89 °C
Mitsubishi Chemical	9,5 ÷ 118 °C
Climator	-18 ÷ 70 °C
EPS Ltd	-114 ÷ 164 °C

Cukerné alkoholy se vyznačují teplotou tání mezi 90 až 200 °C. K tuhnutí dochází i při nepatrném podchlazení. Nicméně většina z nich má vzhledem ke své hmotnosti a objemu dobrou skladovací tepelnou energii. [9], [10]

Tab.3 - Cukerné alkoholy a jejich charakteristiky [7]

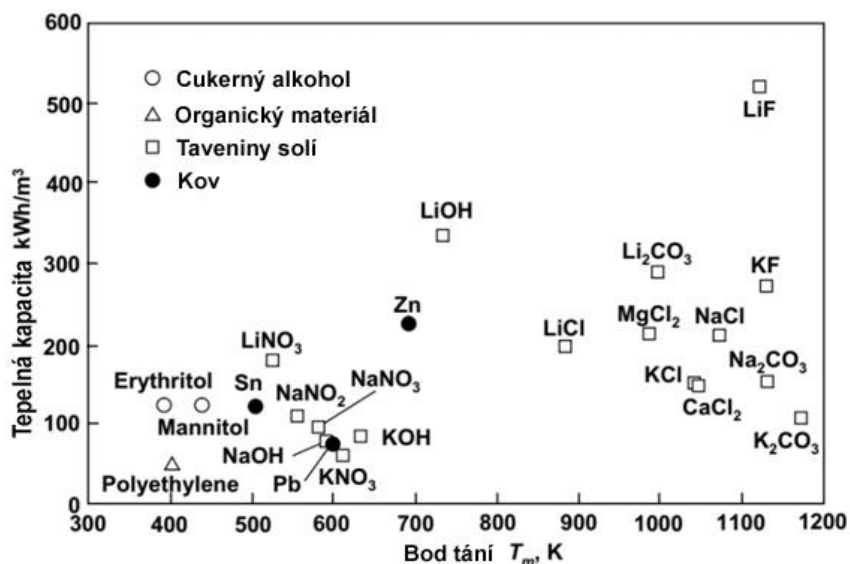
Materiál	Teplota tání (°C)	Entalpie tání (kJ/kg)	Hustota (kg/m ³)
Xylitol C ₅ H ₇ (OH) ₅	94	263	- 1500 (pevná látka)
D-Sorbitol C ₆ H ₈ (OH) ₆	97	158	- 1520 (pevná látka)
Erythrol C ₄ H ₆ (OH) ₄	120	340	1300 (kapalina) 1480 (pevná látka)
D-Mannitol C ₆ H ₈ (OH) ₆	167	316	- 1520 (pevná látka)
Galactitol C ₆ H ₈ (OH) ₆	188	351	- 1520 (pevná látka)

1.2.3 Eutektika

Pod tímto pojmem se skrývá směs dvou látek, kdy krystaly obou látek vytvoří tuhou směs. Aby byla teplota tuhnutí co nejnižší, směs by měla mít dobrý poměr obou látek. Jejich výhodou je vysoká stabilita, nevýhodu skýtá korozivní charakter vůči ostatním materiálům. [10]

1.3 Materiály s vysokoteplotní změnou fáze

Vysokoteplotní PCM s teplotami tání nad 300 °C mají potenciál pro ukládání tepelné energie koncentrované v solárních elektrárnách. Jsou to čisté soli, kovy, eutektika solí, rovněž i kovů. Materiály s teplotou tání v rozmezí 300 – 500 °C mohou být potenciálně využity jako média pro ukládání energie právě ze solárních systémů. [3]



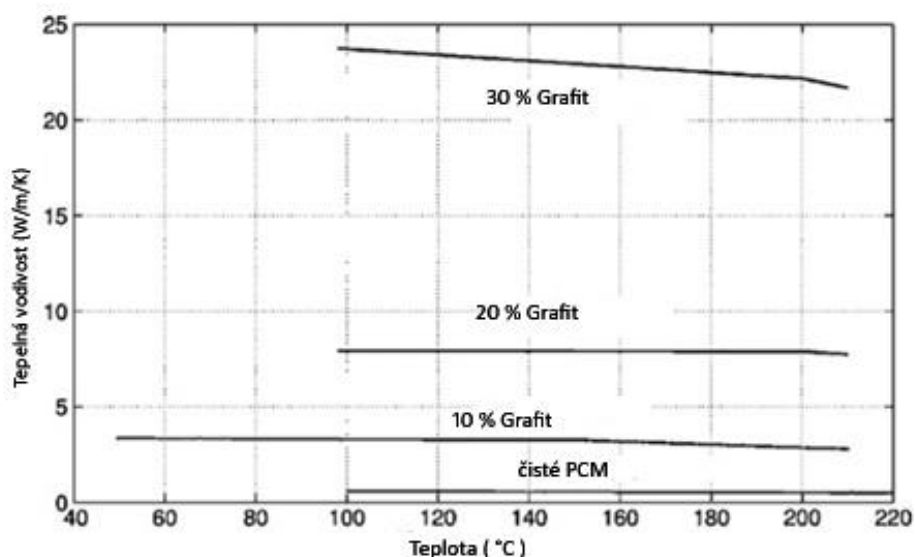
Obr. 3 – Tepelná kapacita vysokoteplotních materiálů [3]

1.4 Metody zlepšení výkonu u PCM

Během procesu vybíjení musí být energie, která se uvolnila ztuhnutím PCM, transportovatelná přes rostoucí pevnou vrstvu na povrchu výměníku tepla z pevného skupenství na kapalnou látku. Koeficient přenosu tepla je proto dominantním činitelem tepelné vodivosti pevných PCM. Většina z těchto materiálů poskytuje obvykle tepelnou vodivost kolem $0,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Pro přenosy tepla mezi kapalinou HTF (heat transfer fluid) a skladovacím materiálem je výsledek tepelné vodivosti ještě nižší. Lze jej zvýšit vytvořením vysoce tepelně vodivého materiálu výměníku. V keramické sloučenině je PCM

uvnitř zadržován mikroporozity vymezených keramickou sítí, kapilární silou a povrchovým napětím.

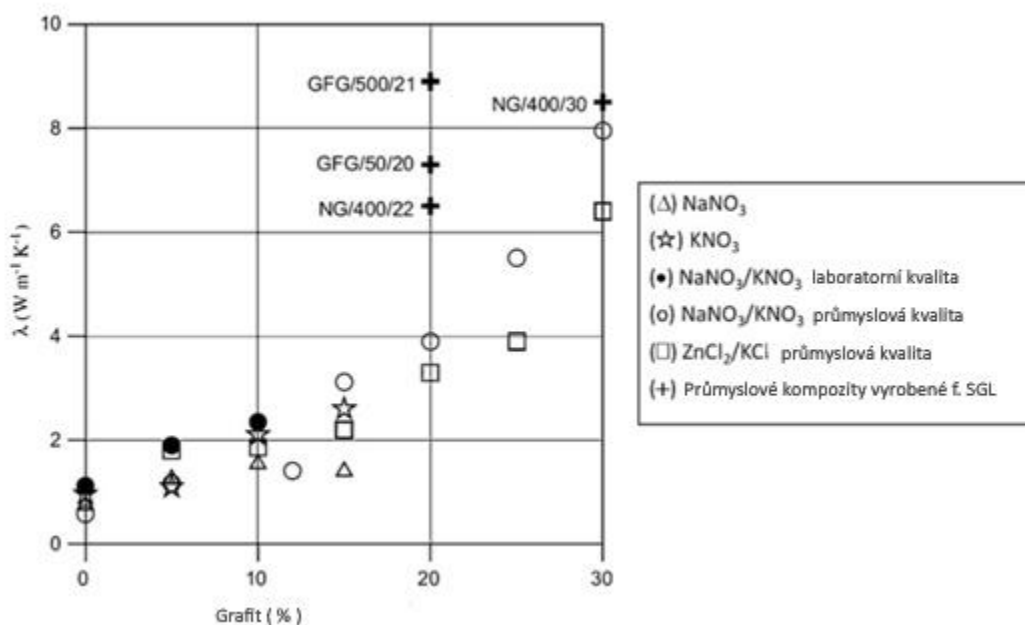
V nedávné době byl z toho důvodu zkoumán grafit jako zesilovač přenosu tepla, kvůli jeho vysoké tepelné vodivosti, nízké hustotě a chemické odolnosti. Tepelná vodivost parafinového grafitu v závislosti na procentuálním obsahu grafitu tak může být zvýšena až na $70 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Účinek hmotnostního zlomku expandovaného grafitu je v rámci tepelně vodivostního kompozitu významný. Sice se tím zvýší cena materiálu, ale zároveň dojde ke snížení objemu skladovací kapacity zvýšenou frakcí grafitu. Grafitový kompozit lze získat infiltrací / impregnací PCM v porézní struktuře grafitu, mechanickým rozptylem grafitu v PCM nebo kompresí předem smíchaného grafitu a PCM.



Obr. 4 – Účinek hmotnostního podílu expandovaného grafitu na tepelný účinek vodivosti kompozitu PCM [4]

Studie ukázala, že účinná tepelná vodivost rozptýlených kompozitů závisí na tepelné vodivosti grafitu, čímž se méně ovlivňují vlastnosti PCM. Pro zvýšení přenosu tepla je komprese materiálu obecně mnohem účinnější než disperze. Další výhodou komprese je to, že kompozitní materiál může být obráběn do libovolného tvaru, např. vstříkáním do formy. Existuje mnoho typů komerčně dostupných grafitů, jako jsou přírodní grafitové vločky, expandovaný přírodní grafit, zemní expandovaný přírodní grafit. Vzhledem k vlastním strukturám a vlastnostem způsobují různé typy grafitu odlišnou vodivost získaných kompozitů. [4]

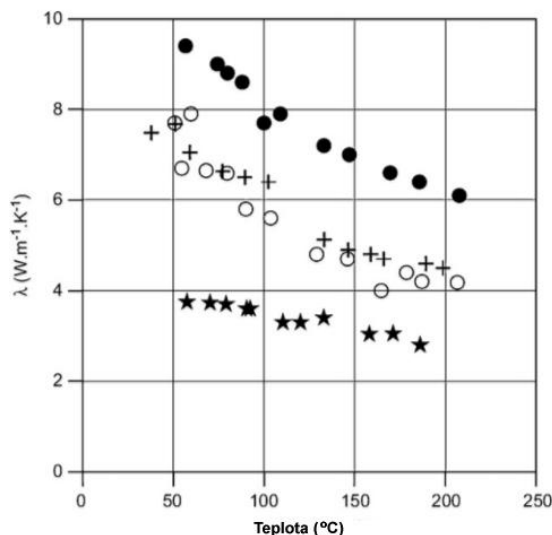
U sloučeniny $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ s použitím tří různých grafitů s frakcí 5 – 30 % měření tepelné vodivosti ukazuje, že zvýšení tepelné vodivosti je neúčinnější při malé grafitové frakci. Kompozity vyrobené z anorganických solí (NaNO_3 , KNO_3 , NaOH , KOH , ZnCl_2) a grafitu různých typů vykazují rostoucí tepelnou vodivost společně s rostoucím podílem grafitu.



Obr. 5 - Tepelná vodivost solí / eutektických grafitových kompozitů při pokojové teplotě

[4]

Grafitový kompozit $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ při testování tepelného cyklu ukázal, že latentní teplo se snižuje přítomností grafitu. Taktéž menší velikost grafitu vede k větší skladovací kapacitě po tepelném cyklu. Naopak při zvyšující se teplotě materiálu se tepelná vodivost kompozitu snižuje, jak je znázorněno na obr.6. Sůl či grafitový kompozit se obvykle začne tavit až v určitém teplotním rozmezí, namísto konstantní teploty, v prvních několika cyklech a až poté se začne chovat stabilně.

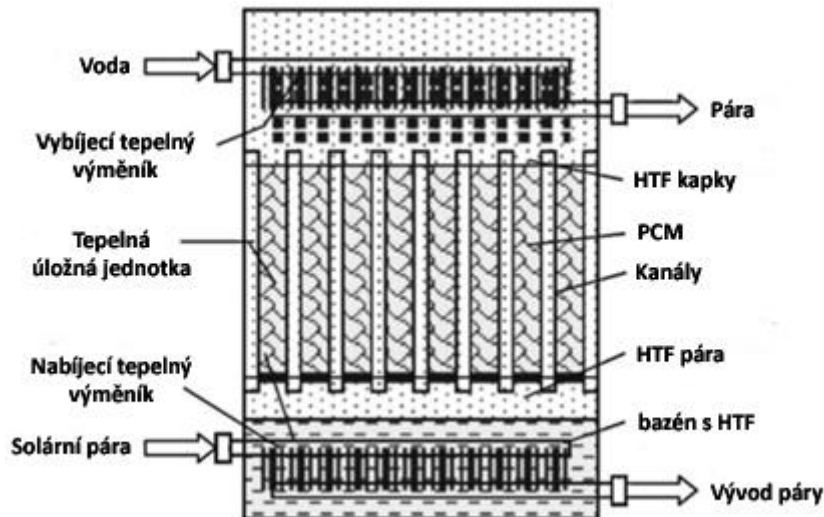


Obr. 6 – Tepelná vodivost čtyř typů kompozitů $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ -grafit [4]

Obecně lze říci, že rozšíření povrchu, které je vhodné pro přenos tepla, například pomocí kapslí nebo trubek se žebrováním, se zvyšuje jeho účinnost. Flexibilní kapsle v plastovém provedení se obvykle používají pro nízkoteplotní aplikace PCM. Pro zapouzdřené PCM s teplotou nad 200 °C je materiál většinou už drahý. Pokud se tuhá kapsle použije k zabudování do PCM, počáteční objem materiálu PCM by neměl překročit 80 % celkového objemu, tak aby odolal kolísání tlaku během tavení a tuhnutí. Pro zlepšení přenosu tepla se často používají závěsy uspořádané kolmo k ose potrubí, ve kterém je tekutina vhodná pro přenos tepla. Materiálem na závěs může být grafitová fólie, hliník, měď i ocel. Grafitová fólie poskytuje vysokou tepelnou vodivost, nízkou hustotu a dobrou odolnost proti dusičnanovým a dusitanovým solím při teplotách do 250 °C. Jak tato grafitová fólie, tak ani hliník nevykazují galvanickou korozi při styku s ocelí. [4]

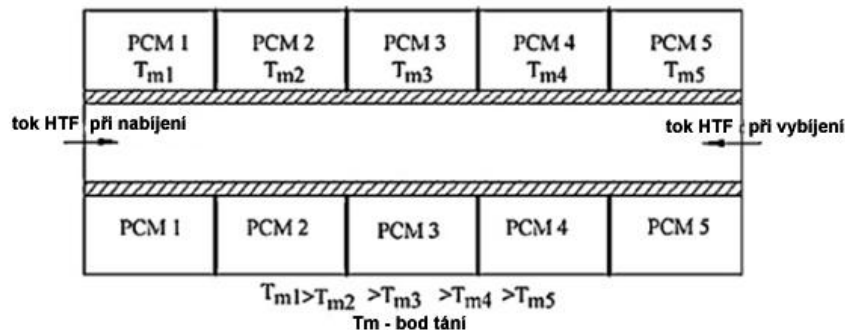
1.4.1 Vylepšení přenosu tepla pomocí mezičlánku

Koncept ukládání tepla obsahující vysoce teplotně vodivou kapalinu lze pojmenovat jako zpětné ukládání tepla. Celý úložný systém se skládá z jednotky pro uskladnění PCM, výměníků pro příjem a výdej tepla umístěných zdola i shora úložné jednotky. Nabíjecí tepelný výměník je umístěn v kapalině pro přenos tepla (HTF). Během procesu nabíjení absorbuje teplo-přenosná kapalina energii odpařováním, pára pak proudí nahoru skrze transportní kanály, kde na jejich povrchu z kondenzuje a latentní teplo par se přenáší přes stěny do PCM. Tepelné kanály slouží právě jako tepelné vedení mezi HTF a PCM. [4]



Obr. 7 – Schéma konceptu pro ukládání zpětného tepla [4]

Systémy tepelného ukládání používající více PCM s různými teplotami tání jsou dalšími atraktivními technologiemi v oblasti pro zvýšení přenosu tepla. V tomto typu systému se několik modulů obsahující různé PCM s různými teplotami tání vzájemně pospojují do série. Měly by být uspořádané tak, aby se teplota tání snížila během nabíjecího procesu a naopak, aby se zvýšila při vybíjení, kdy rychlost tohoto přenosu závisí hlavně na teplotním rozdílu mezi HTF a PCM. Pokud je použito jedno PCM, snížení rychlosti přenosu tepla je ovlivněno poklesem rozdílu ve směru toku kapaliny. Pokud je PCM řazeno jako na obr. 8, je teplotní rozdíl zhruba konstantní, jelikož teplota HTF i teplota tání PCM se snižuje ve směru proudění kapaliny při nabíjení, zvyšuje se ve směru toku proudícího média během procesu vybíjení. U používání více PCM je důležité věnovat pozornost výběru správných PCM kvůli jejich relativním poměrům mezi nimi. [4]

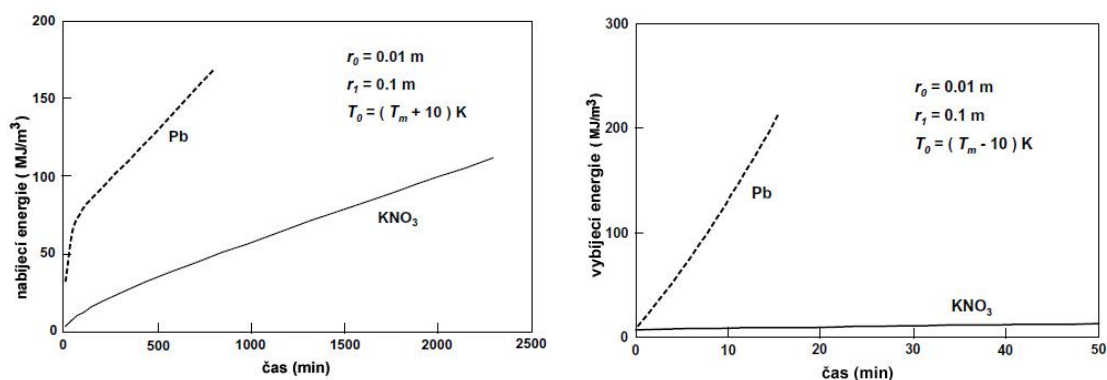


Obr. 8 – Řazení PCM materiálů [4]

1.4.2 Numerická analýza nabíjení a vybíjení

U nabíjení a vybíjení materiálů PCM je kromě tepelné kapacity a teploty tavení důležitá rovněž tepelná účinnost. Primární předpoklady modelu musejí splňovat konstantní fyzikální vlastnosti, zanedbatelnou objemovou roztažnost a u kapalin minimální konvekci. [3]

Například doba nabíjení energie je u olova mnohem kratší, než u dusičnanu draselného. Rychlost vybíjení KNO_3 je mnohem pomalejší, než u olova i při zachování stejného objemu. [3]



Obr. 9 – Srovnání nabíjecí a vybíjecí rychlosti KNO_3 a Pb [3]

1.5 Problémy PCM

Některé problémy materiálů s fázovou změnou byly již nastíněny na předešlých stránkách. Přesto bych ještě uvedla tři nejčastější problémy.

1.5.1 Mechanická stabilita

Mechanickou stabilitu u PCM lze najít pod označením tvarově-stabilní PCM (z anglického shape-stabilized PCM, ss-PCM). Tvar PCM je nezávisle na své struktuře udržován podporující strukturou - např. ss-parafín. Ten se přidává na mikroskopické úrovni do struktury materiálu polymeru, který tak může být lépe tvarovatelný. Stejně tak může být impregnován do stabilně porézního, či nasákavého materiálu, čímž může být třeba dřevovláknitá deska. [7]

1.5.2 Fázová separace látek

U PCM rozlišujeme tři typy tání: kongruentní tání, nekongruentní tání a semi-kongruentní tání. Příkladem materiálu, který má souběžné tání, je voda. Pokud se voda v kapalně fázi zchladí pod teplotu tání, bude pak mít ve své pevné fázi stejné homogenní složení jako předtím.

K tomu ale nedochází u nekongruentního tání, které lze vysvětlit na roztoku vody a soli s hmotnostním složením 10 % soli a 90 % vody. Pokud se roztok zchladí pod teplotu -4 °C, část kapalně fáze se mění na tuhou, ovšem zbylá část má ještě větší koncentraci soli, tím je roztok rozdělen na dvě části. Fáze s vyšší hustotou bude klesat ke dnu, naopak tomu bude s fází s menší hustotou. Tomuto jevu se proto říká fázová separace. Fázovou separaci můžeme zrušit prostým zamícháním, což ale nelze vždy využít. Proto je taktéž možné aplikovat aditiva, kterými se zvýší viskozita PCM, případně využít gel z polymeru, který svou strukturou snáze podrží obě fáze blízko sebe.

Třetím zmíněným typem je semi-kongruentní tání. Obvykle při tání hydrátů soli dochází ke vzniku pevné fáze s malým počtem molekul vody a kapalně fáze s nižší koncentrací soli. [7] [8]

1.5.3 Podchlazení látek

Některá z PCM na bodu teploty tání nezačínají tuhnout, toho jsou schopné dosáhnout až po dosažení ještě nižší teploty, kdy poté uvolňují nashromážděné latentní teplo. Pokud látka netuhne, latentní teplo se neuvolňuje a uvolňuje se jen citelné teplo.

Pokud jsou v kapalně směsi tuhé zárodky, může směs při vzniku tuhé fáze krystalizovat. Zárodky krystalizace mohou vznikat kvůli přítomnosti cizích tuhých částic ve směsi (nečistoty), případně pak na stěnách nádoby.

Přidáním speciálních aditiv - nukleátorů do směsi PCM, které snižují podchlazení na několik málo °C, je pravděpodobně nejjednodušší způsob, jak omezit podchlazení. U těchto přidaných látek je třeba mít teplotu tání o něco vyšší, než je teplota tání daného PCM. Problémem je, že většina nukleátorů má teplotu tání od PCM vyšší jen o 10 - 20 °C. [7] [8]

2 Vakuobarbotážní systém

2.1 Jaderná elektrárna Dukovany

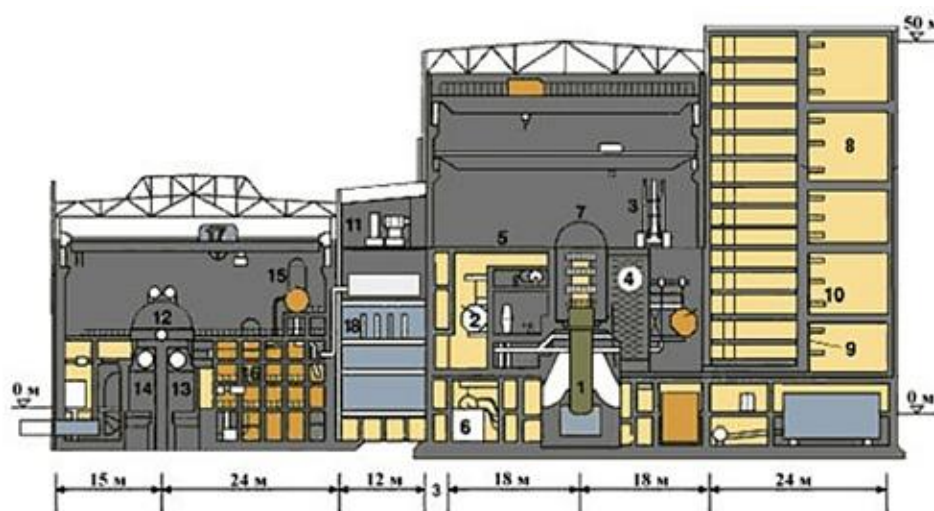
Jaderná elektrárna Dukovany (EDU), která se nachází přibližně 30 km od Třebíče, je první jadernou elektrárnou postavenou na českém území. Respektive s dodávkou elektrické energie začal první blok EDU v roce 1985 na tehdejší území ČSSR. Dnes je druhou největší elektrárnou v ČR, na předním místě je později vybudovaná jaderná elektrárna Temelín. [5]

Tehdejší ČSSR a SSSR se roku 1970 zavázala k výstavbě dvou jaderných elektráren – Dukovan a Jaslovských Bohunic. O pět let později se rozhodlo o výstavbě čtyř bloků, poněvadž došlo k přehodnocení projektu na stavbu elektrárny s tlakovodním reaktorem východního typu VVER 440/V-213, byla výstavba zahájena až v roce 1978. Značná část všech použitých zařízení pro výstavbu Dukovan byla vyrobena v tehdejší ČSSR. 12. února 1985 došlo k první navážce paliva, o téměř dva týdny později došlo k přifázování jednoho generátoru k síti, do konce února se na síť připojil i druhý generátor a ke konci března toho roku bylo dosaženo 100% výkonu prvního bloku jaderné elektrárny. V následujících devadesátých letech bylo vybudováno výcvikové středisko včetně simulátoru, byl vystavěn sklad použitého paliva. I v dalších letech procházela elektrárna modernizací bloků a vylepšováním systémů, tudíž v nynější době dodávají Dukovany 2040 MW (4x510 MW) namísto původních 1760 MW. Světová asociace provozovatelů jaderných elektráren WANO (World Association of nuclear operators) řadí EDU mezi první pětinu nejlépe provozovaných elektráren na světě. Ačkoli byla životnost elektrárny plánována na 30 let, kvůli dobrým provozním podmínkám a výsledkům bylo požádáno u SÚJB (státní úřad pro jadernou bezpečnost) o prodloužení povolení k provozu o dalších 10 let, kde by pro další provoz bylo potřeba provést jisté úpravy. [5]

Jaderná elektrárna Dukovany disponuje druhou generací reaktorů VVER (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij reaktor). Tento typ elektrárny nemá ještě plnotlaký kontejnment, jaký můžeme nalézt u pozdější VVER-1000/V-320 neboli JE Temelín, ale má vakuobarbotážní systém, který slouží k případnému snížení tlaku. Tyto reaktory, které jsou na území Evropy a Ruska nejrozšířenější, mají redundantní nezávislé havarijní systémy zahrnující vysokotlaká čerpadla, nízkotlaká čerpadla, hydroakumulační nádrže. Jsou projektovány na havárie s okamžitým oboustranným gilotinovým roztržením potrubí primárního okruhu. [6]

2.1.1 Dukovanský reaktor VVER-440/V-213

Palivem těchto reaktorů je obohacený uran na 2 – 5 %, který je formě tabletek oxidu uraničitého seskládaného do palivových proutků. 126 kusů těchto proutků je formováno do šestiúhelníkových palivových kazet, kterých je v aktivní zóně reaktoru 312. Ačkoli byl palivový cyklus původně dimenzován jako tříletý, optimalizací vyšším obohacením paliva se dosahuje cyklu čtyřletého (postupně se přechází na pětiletý), čím dochází nejen k jeho úspoře, ale i ke zvětšení výkonu. Lehká voda (H_2O) zde slouží jako chladivo i jako moderátor. V primárním okruhu je pod tlakem 12,3 MPa a teplotě mezi 267 – 297 °C. Primární okruh je tvořen šesti horizontálními parogenerátory, šesti chladicími větvemi a hlavním cirkulačním čerpadlem na každé smyčce, které v primárním okruhu zabezpečuje proudění chladiva. Tlaková nádoba reaktoru je z feritické oceli, navíc oplátována austenitickou nerezovou ocelí, ze které jsou vyrobeny i další komponenty primárního okruhu. Parogenerátory slouží k předávání tepla z primárního do sekundárního okruhu. Ten se skládá ze dvou turbogenerátorů, který převádí mechanickou energii na elektrickou. Po průchodu je pára odváděna do kondenzátoru, kde se ochlazuje a mění na vodu. Následuje terciární okruh, který zahrnuje systém chladicí cirkulační vody a technické vody s chladicími věžemi. [6]

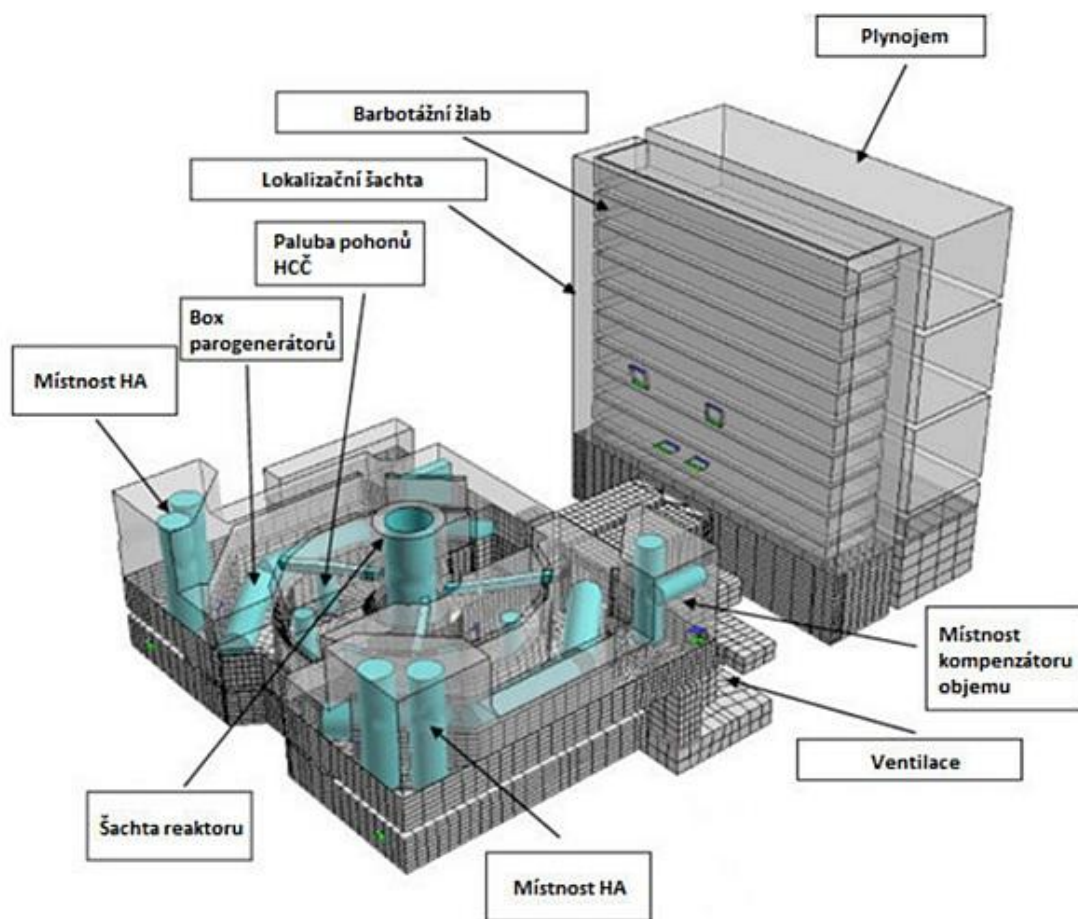


1 - Reaktorová nádoba, 2 - Parogenerátor, 3 - Zavážecí stroj, 4 - Bazén vyhořelého paliva, 5 - I.okruh, 6 - Systém dodávky napájecí vody, 7 - Víko reaktoru, 8 - Hranice systému I. okruhu, 9 - Barbotážní přepážky, 10 - Pojistné ventily barbotáže, 11 - Vzduchotechnika, 12 - Turbína 2x220 MWe, 13 - Kondenzátor, 14 - Blok turbíny, 15 - Napájecí nádrž s odplyňovákem, 16 - Separátor a přihříváč, 17 - Jeřáb, 18 - Elektrické vybavení a řízení

Obr. 10 – Řez jadernou elektrárnou s reaktorem VVER-440/V-213 [6]

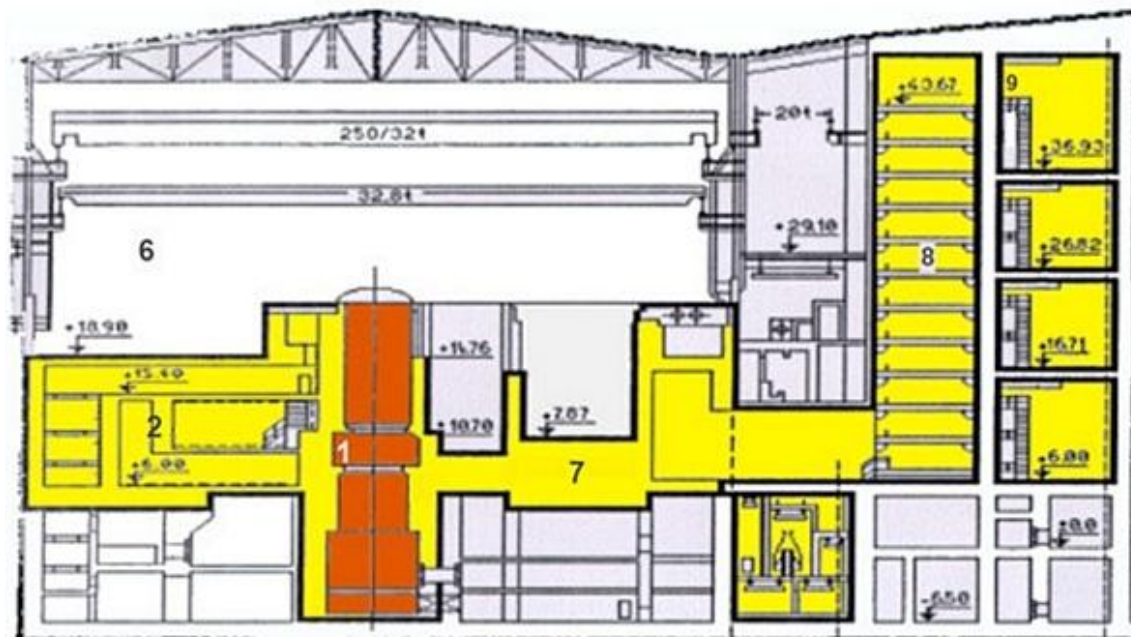
2.1.2 Kontejnmentový systém a barbotážní věž

U druhé generace lehkovodních reaktorů typu VVER-440/V-213 existuje několik bariér proti úniku štěpných produktů uranu. Nejzákladnějším je pokrytí paliva ze slitiny zirkonia a niobu. Pokud dojde k jeho poškození, štěpné produkty uranu putují potrubím společně s chladivem - vodou primárního okruhu, který je dobře utěsněný. V případě závady by voda o vysokém tlaku vytekla z primárního okruhu do hermetického prostoru kontejnmentu. Tato ochranná schránka je navržena tak, aby zabránila, či minimalizovala únik radioaktivní páry do okolí elektrárny. Je tvořena robustní betonovou budovou utěsněnou proti vlivům okolí, kde základními stavebními prvky stěn jsou armobloky. Celkový volný objem obálky tak činí 51 323 m³ bez započtení objemu v barbotážních žlabech. Odlišnost kontejnmentu oproti jiným typům vodo-vodních energetických reaktorů je právě obdélníková budova s barbotážní věží sloužící k potlačení tlaku u reaktorů VVER-440/V-213. Tuto ochrannou obálku tvoří více než 40 hermeticky těsných kobek, které jsou s barbotážní věží propojeny koridorem. V kobkách se nachází primární okruh včetně jeho příslušných komponent a také část sekundárního okruhu. [6]



Obr. 11 – Detail ochranné obálky reaktoru VVER-440/V-213 [6]

Základními vlastnostmi ochranného pláště je zajištění těsnosti před štěpnými produkty mimo hermetické prostory, jak během normální provozu, tak i během havárie. Rovněž má ochranný charakter pro chladicí systém reaktoru a zařízení elektrárny vně i uvnitř kontejnmentu (přírodní vlivy – zemětřesení, záplavy; člověkem vyvolané aktivity – letadlový nálet). Kromě toho usměrňuje dopad zvýšeného tlaku a teploty způsobené selháním chladicího systému uvnitř prostor. Kontejnmentový systém se skládá z následujících hlavních částí: hermetické kobky, barbotážní věže, koridorů, plynojemů, systémů k potlačení tlaku. [6]



1 - Šachta reaktoru, 2 - Box PG, 6 - Reaktorová hala, 7 - Spojovací koridor, 8 - Šachta barbotážní věže, 9 - plynojemy

Obr. 12 – Řez hermetickou zónou reaktoru (žlutě vyznačená část) [6]

2.1.2.1 Vakuobarbotážní systém

Pro snižování tlaku a kontrolu přetlakových stavů mají jaderné elektrárny typu VVER-440/V-213 několik zařízení, které jej pomáhají uskutečňovat. Je tím kondenzace, kterou zahrnuje pasivní a aktivní sprchový systém, barbotážní systém a plynojemy se zpětnými klapkami. Kontejnmentový i vakuobarbotážní systém je navržen na projektové havárie, musí tudíž vydržet silné dynamické přechodové stavy. Jedná se o pasivní systém, který je zcela nezávislý na energetických zdrojích. Tento komplex je dimenzován na potlačení nárůstu tlaku při maximální projektové události definované jako oboustranné prasknutí primárního okruhu. [6]

Vakuobarbotážní systém se nachází v barbotážní věži, která je propojena s hermeticky těsnými kobkami obklopující primární okruh, je nezávislý na energetických zdrojích. Účelem vakuobarbotážního systému (VBS) je snížení počátečního nárůstu tlaku a zachycení radioaktivních produktů štěpení v hermetických prostorech při mimořádné události, způsobené únikem chladiva z primárního okruhu. Při normálním provozu elektrárny se v hermetických prostorech udržuje podtlak na úrovni 100 - 150 Pa. Těsnost hermetické zóny je navržena tak, aby únik páry na maximálním projektovém přetlaku 150 kPa nepřesáhl 13 % hmotnosti obsahu hermetické zóny za dobu 24 hodin. Je tedy navržena

na vnitřní absolutní tlak od 80 kPa (podtlak 20 kPa) do 250 kPa (přetlak 150 kPa). [12]

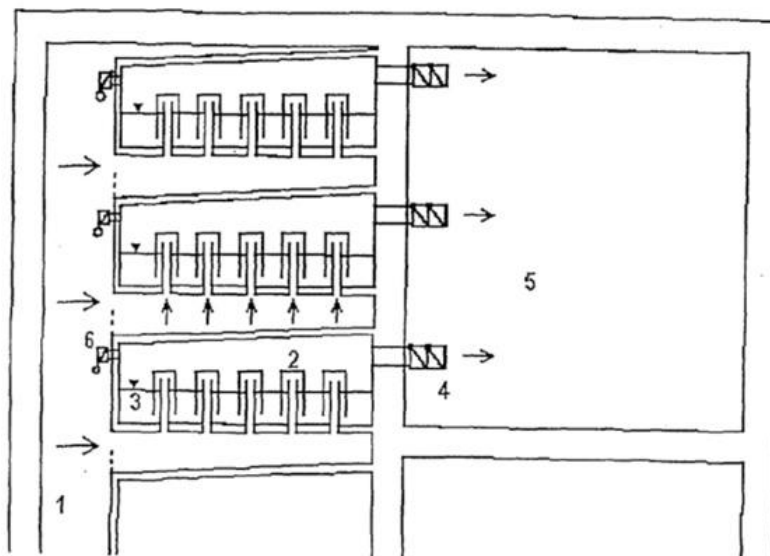
Hlavními částmi vakuobarbotážního systému jsou: žlaby se zpětnými a samouzavíratelnými klapkami, záchytné plynojemy, chladič roztoku H_3BO_3 , čerpadlo odvodu roztoku z barbotéru, vývěva pro zkoušení těsnosti barbotéru.

Vakuobarbotážní systém je v činnosti pouze při mimořádných stavech spojených se ztrátou chladiva z primárního nebo sekundárního okruhu, způsobující zvyšování tlaku a teploty v hermeticky uzavřených prostorech. Do činnosti se uvádí samovolně vzniklým tlakovým rozdílem mezi hermetickými prostory parogenerátoru, hlavním cirkulačním čerpadlem a záchytnými komorami. K potlačení tlaku dochází díky expanzi páry do velkého objemu s následnou kondenzací v barbotážních žlabech. Za normálního provozu jaderné elektrárny VBS není v činnosti, ale musí být neustále v pohotovosti (barbotážní žlaby musí být naplněné roztokem kyseliny borité). [6]

Barbotážní věž je budova o rozměrech 39 x 21,5 x 41,9 m a obsahuje přibližně 1500 m³ vody, která je rozdělena mezi jednotlivé žlaby. Na hermetické prostory reaktoru a primárního okruhu je napojena prostřednictvím spojovacího koridoru průřezu 11,5 x 6,2 m a délce 15 m. Spojovací koridor je rozdělen železobetonovou stěnou o tloušťce jednoho metru na dvě části. Samotná barbotážní věž je po celé své výšce rozdělena na prostor barbotážního kondenzátoru a čtyři plynojemy. Vnitřní stěny věže z důvodu maximální možné těsnosti mají vystýlku z ocelových plechů. [6]

Funkcí vakuobarbotážního systému je:

- pasivní sprchování objemu šachty ze žlabů, které snižuje tlak v hermetických prostorech
- záchyt radioaktivních produktů štěpení
- zachycení nezkondenzovaných plynných směsí v záchytných komorách po určitou dobu (např. směs vzduchu a radioaktivních par)
- kondenzace páry vznikající při úniku z primárního (resp. sekundárního) okruhu [6]



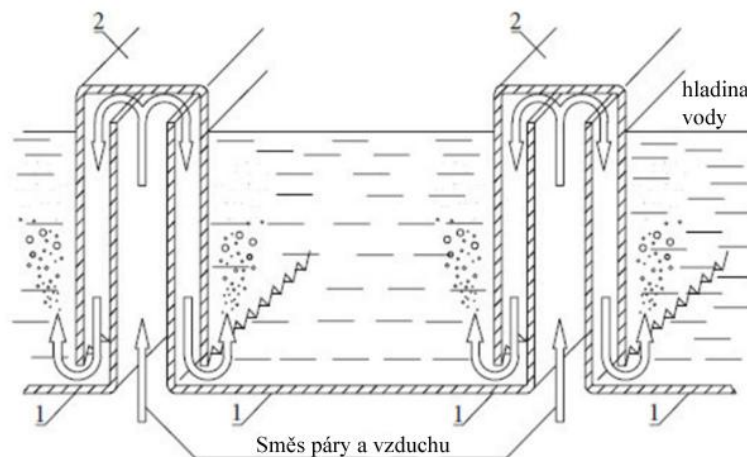
1 - Šachta barbotážní věže, 2 - Systém klobouček-mezera, 3 - Výška vodní hladiny,
4 - Zpětná klapka DN500, 5 - Plynojem, 6 - Samouzavírací klapka

Obr. 13 – Schéma vakuobarbotážního systému[6]

2.1.2.2 Barbotážní žlaby

V barbotážní věži se nalézá celkem 12 podlaží se žlaby, které jsou naplněny roztokem H_3BO_3 s přísadou N_2H_4 pro vázání jódu v havarijním režimu. Přes žlaby při mimořádných situacích spojených s porušením těsnosti primárního okruhu prochází paroplynná směs. Žlaby představují vstupní část komor barbotéru pro jednotlivá podlaží. Každý z těchto žlabů je tvořen 17 sekcemi, kdy každá z nich představuje devět systémů, tzv. klobouček-mezera, které jsou navzájem vyztuženy žebry. Z důvodu rovnoměrného probublávání paroplynné směsi skrze vodní vrstvu mají kloboučky pilový tvar. Kloboučky slouží k tomu, aby byl v mezeře tok proudící páry směrem vzhůru otočen o 180° , tím se tak paroplynná směs dostává pod vodní hladinu. Žlaby jsou navrženy na hloubku ponoření kloboučku asi 0,48 m a jejich sklon směrem k šachtě barbotéru činí 2 %.

[6]



1 - Klobouček, 2 - Mezera

Obr. 14 – Detail principu „klobouček – meze“ [6]

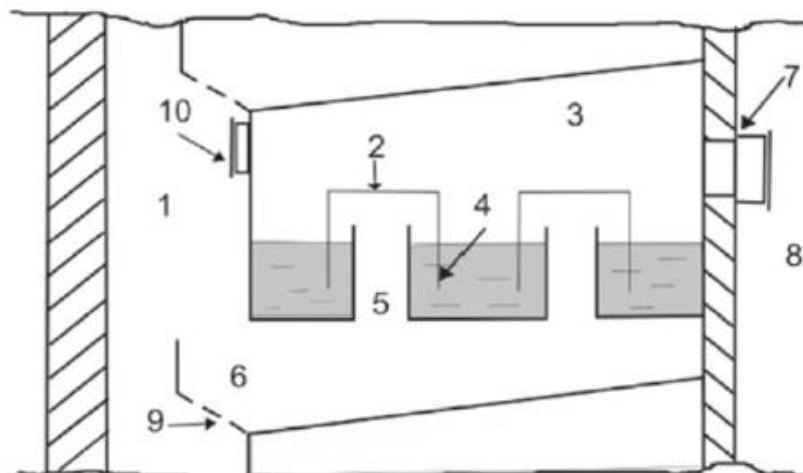
Žlaby zajišťují kontakt paroplynové směsi a studené vody, která je ve žlabu, což má za následek intenzivní kondenzaci. Každé tři žlaby a objemy jejich nesmáčených částí jsou propojeny s jednou záchytnou komorou. V celé věži jsou pak čtyři plynojemy. Mezi žlaby a plynojemy je blok zpětných klapek, který je tvořen dvěma klapkami s tlumiči, komorou mezi nimi a nosnou přírubou, jenž zadržují nezkondenzované plyny a páry v plynojemu. K jejich úplnému otevření dojde při přetlaku 10 kPa, otevírat se už začínají ale při 0,5 kPa. [6]

Parametry roztoku v barbotážních žlabech:

- výška hladiny 0,45 – 0,48 m
- roztok H_3BO_3 o minimální koncentraci 12g/kg a přísada hydrazinhydrátu N_2H_4 100mg/l
- teplota roztoku při běžném provozu 20 – 45 °C, maximálně 50 °C [6]

2.1.3 Normální a havarijní provoz

Během doby normálního provozu jsou barbotážní žlaby, které se nachází v řadě nad sebou, naplněny vodou. Horní část žlabu je pak propojena s plynojmem pomocí zpětného ventilu. Rovněž šachtu věže a horní část žlabů propojují zpětné klapky. Ty se uzavírají při přetlaku okolo 60 kPa. [6]

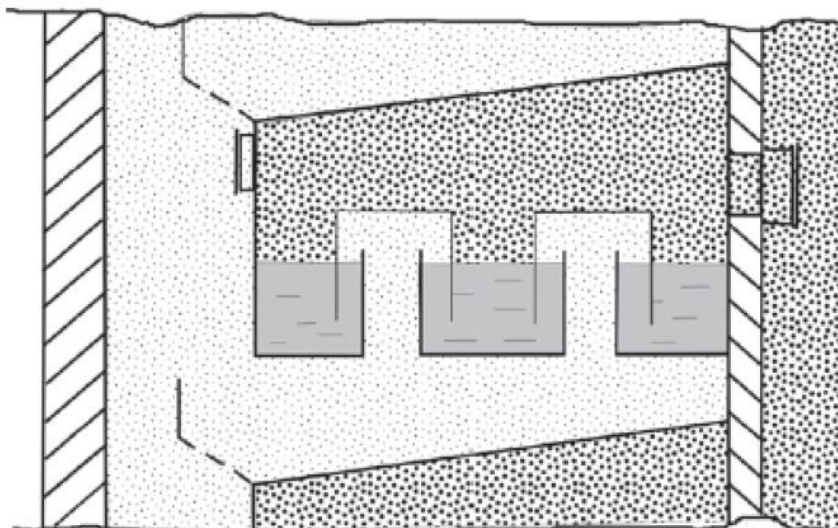


1 - Šachta barbotážní věže, 2 - Klobouček, 3 - Volný objem v nádrži barbotážního kondenzátoru, 4 - Vodní ucpávka, 5 - Vstupní kanál do systému klobouček-mezera, 6 - Záchytný objem pasivních sprch, 7 - Zpětná klapka DN250, 8 - Plynojem, 9 - Perforovaný plech, 10 - Samouzavíratelná klapka Js250

Obr. 15 – Princip vakuobarbotážního systému při normálním provozu [6]

V případě předpokládané havárie dojde ke gilotinovému roztržení potrubí primárního okruhu s následným vytékáním vody a jejímu vypařování v prostoru hermetické obálky. Skrz koridor proudí pára do šachty barbotážní věže, paroplynová směs pak proniká do žlabů prostřednictvím systému klobouček-mezera. Tato směsice vytlačí vodní hladinu pod kloboučkem, čímž se zvedne vodní hladina ve žlabu, skrze kterou prochází pára, ta zkondukuje, což způsobí zmenšení objemu procházející směsi. Nezkondenzované zbytky plynu a vzduchu se shromažďují nad vodní hladinou v prostoru barbotážního žlabu, v důsledku narůstajícího tlaku pak přestupují skrze zpětné klapky do plynojemu. Dobu trvání určuje narůstající tlak mezi šachtou barbotážní věže a plynojemy. [6]

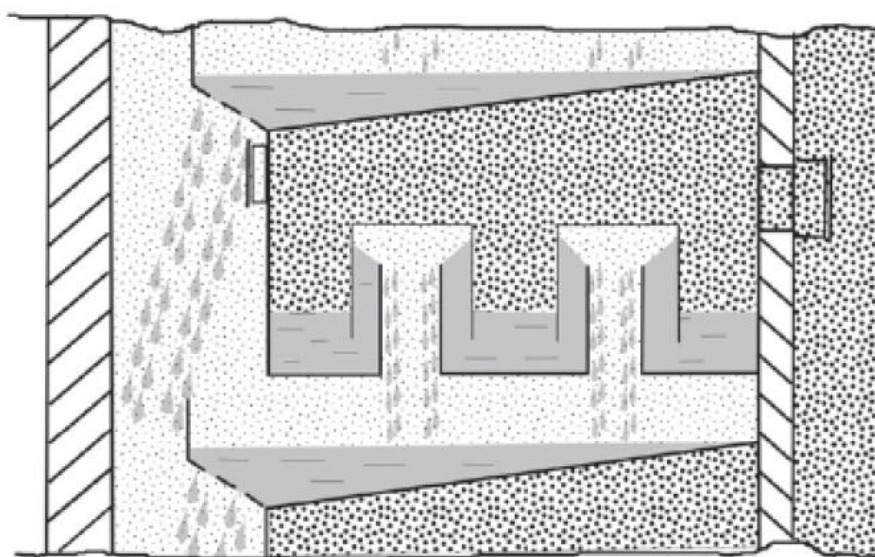
Po určité době, kdy se vyrovnají tlaky mezi barbotážními žlaby a plynojemy, se ustálí vodní hladina. Během toho dojde k automatickému uzavření zpětných klapky DN250 v plynojemech, čímž se zachytí vzduch a nezkondenzované části plynu, par. [6]



Obr. 16 – Vyrovnání tlaků v prostorech nad žlaby i plynojemy [6]

Společně se snižujícím se výtokem horké vody z primárního okruhu přeměňující se na páru, její kondenzací ve žlabech a činností sprchového systému postupně klesá i tlak v hermetickém prostoru.

Vysoký tlak koncentrovaný v místech nad žlaby je vyšší než ten v barbotážní šachtě, což způsobí zpětné vylití žlabů. Vodný kondenzát pak teče ze žlabů vyšších na stropy žlabů níže položené, protéká skrz perforovaný plech. Je třeba, aby samouzavíratelné klapky mezi prostory nad žlaby a plynojemy byly uzavřené, aby nedošlo k vyrovnání tlaků. Pak se jedná o pasivní způsob sprchování barbotážní šachty. [6]



Obr. 17 – Vakuobarbotážní systém při procesu zpětného vylití [6]

Trvá i několik minut, než dojde k úplnému vyprázdnění 100 000 l vodního kondenzátu.

Pasivním sprchováním klesá tlak v kontejnmentu. Na dně barbotážní věže se vylitá voda shromažďuje, respektive díky spádovosti dna odtéká koridorem do boxu parogenerátorů. Tam se míchá s vodou z aktivního systému sprchování, koncentruje se do jímky kontejnmentového systému, kde následně probíhá její recirkulace. [6]

Zajištění podtlaku v hermetické obálce je způsobeno aktivním sprchováním v boxu parogenerátorů, které snižuje tlak uvnitř ochranné obálky na úroveň 80 kPa, než dojde k vypnutí systému a tím tak zabezpečuje ochranu proti úniku radioaktivních látek do okolí jaderné elektrárny. [6]

2.1.4 Havárie s malým únikem chladiva

Havárie s únikem chladiva ze sekundárního okruhu jsou charakteristické značně menším výtokem chladiva, než u předešlé větší havárie. Průběh havárií je podobný, ale trvá déle a při menších tlacích. Záchytné prostory nad barbotážními žlaby a šachtou věže jsou odděleny samouzavíratelnými klapkami Js250, které se otevírají, zavírají v závislosti na tlaku v okolních prostorech. Pokud nedojde k překročení určitého tlaku, jejich úkolem je zabránit zpětnému vylití žlabů. V případě vyrovnání tlaku v šachtě věže a záchytnými prostory na hodnotě 165 ± 5 kPa se zablokují samouzavírací zpětné klapky v uzavřené poloze a zůstanou zablockované po dobu, po kterou je tlak v šachtě barbotéru větší než 165 kPa. Po poklesu tlaku v boxech parogenerátoru (v důsledku sprchování, odvodu tepla do stěn hermetické zóny, poklesu nebo přerušení zdroje páry) poklesne i rozdíl tlaků na hodnotu podtlaku 80 kPa, a tím se ukončí barbotáž paroplynné směsi. [6]

2.2 Systém PCM

V následující části bych ráda rozvinula informace obsažené v první kapitole, která se zabývá obecnou charakteristikou PCM a oblastí jejich využití. Rozvedla bych některé materiály uvedené v obr.3, vysvětlila jejich chování a případné možné použití. Čímž by se eliminovaly látky vhodné pro nahrazení vodného roztoku v žlabech barbotážní věže.

2.2.1 Přehled látek

Taveniny solí

Chlorid hořečnatý – $MgCl_2$

- bílý, hygroskopický prášek získávaný z mořské vody, v ČR se používá jako posypová sůl, dobře rozpustný ve vodě, teplota tání je 708 °C [18]

Dusičnan draselný – KNO_3

- bílá, krystalická látka soli kyseliny dusičné, je silným oxidačním činidlem, součástí střelného prachu, dýmovnic, s teplotou tání 334 °C [19]

Dusičnan sodný – $NaNO_3$

- jinak také chilský ledek, snadno rozpustný ve vodě, hygroskopický, zdraví škodlivý, exploduje při hoření a hašení vodou, teplota tání 306,8 °C [20]

Kovy

Zinek – Zn

- modrobílý, kovový prvek se silným leskem, na vzduchu stálý, rozpouští se v roztocích hydroxidů, vyskytuje se v zemské kůře i mořské vodě, vyrábí se ze sulfidických rud, teplota tání 419,53 °C [21]

Olovo – Pb

- nízkotavitelný, velmi měkký, těžký, toxický kov pohlcující rentgenové záření, odolné vůči korozi vodou, teplota tání 327,5 °C [22]

Cín – Sn

- dobře kujný, zdravotně nezávadný kov, při teplotě 13,2 °C je přechod z bílého cínu na šedý, čímž se rozpadá v prach, taje při 231,93 °C [23]

Cukerný alkohol

Erythritol

- vyskytuje se přirozeně u některých druhů ovoce, vyrábí se fermentací glukózy, je nekalorický, neovlivňuje krevní cukr ani kazivost zubů. Má silně chladící účinek, když se rozpouští ve vodě. Není hygroskopický, má sklon ke krystalizaci, jeho teplota tání je 120 °C a teplota varu 329 °C

- vyskytuje se ve formě bílého krystalického prášku, molekulová hmotnost je $122,12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ a hustota $1450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, latentní teplo $339,8 \text{ kJ/kg}$ [24], [26]

Mannitol

- užívá se jako cukr při onemocnění diabetem, snižuje tlak v očích, zhoršuje srdce a ledviny, má nízkou hygroskopičnost, je na povlaku žvýkaček [25]

Z vlastností výše uvedených látek je patrné, že vybrané vzorky materiálů mají vysokou teplotu tání, kterou nelze uplatnit pro použití v prostorech kontejnmentového systému, který je dimenzován na těsnost obálky do $130 \text{ }^\circ\text{C}$ a maximálnímu tlaku 250 kPa . Část těchto materiálů je toxická vůči okolí, tak i pro lidské zdraví, některé jsou výbušné. Snad jen cukerné alkoholy by teoreticky mohly zaujmout, ovšem teplota tání u erythritolu se značně blíží maximální dovolené teplotě kontejnmentu, proto ani on není vhodným kandidátem pro použití při eliminaci teploty a tlaku havárie s únikem chladiva.

2.2.2 Volba materiálu

Látka by měla být netoxická, nekorozivní, nevýbušná, nehořlavá, relativně stabilní, ekonomicky výhodná, výrobně jednoduchá, s co největší tepelnou vodivostí, s nízkým sklonem k podchlazování, nízkou objemovou roztažností, s vhodnou teplotou tání $60 - 120 \text{ }^\circ\text{C}$. Za vhodné PCM lze obecně požadovat ty, které mají latentní teplo $160 \div 180 \text{ J/g}$ a více. Čím vyšší bude hodnota latentního tepla materiálu, tím méně ho bude potřeba k uložení vyžadovaného množství tepelné energie. Organické látky jsou díky své nekorozivnosti, netoxičnosti vhodnější než látky anorganické, rovněž sloučeniny parafinů mají velké latentní teplo a dobrou teplotu tání.

Materiálem vhodným pro daný teplotní rozsah se jeví parafin od německé firmy RubiTherm. Ta se vývojem a výrobou PCM zabývá od roku 1993. Jejich výrobky se dělí do několika kategorií, kdy skupina označovaná "RT" má nejvyšší tepelnou kapacitu a teplotní rozsah mezi -9 až $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Je tedy nejvhodnějším adeptem pro tento účel.

RT 82 (RubiTherm)

Tab.4 - Vlastnosti parafínu RT82 [17]

Teplota tání	82	(°C)
Latentní teplo	170	(kJ/kg)
Hustota pevné fáze při 15°	880	(kg/m ³)
Hustota kapalné fáze při 90°	780	(kg/m ³)
Měrná tepel. kapacita pevné fáze	1,8	(kJ/kgK)
Měrná tepel.kapacita kapalné fáze	2	(kJ/kgK)
Tepel. vodivost pevné fáze	0,2	(W/mK)
Objemová expanze	12,5	(%)
Teplota vzplanutí	>200	(°C)
Maximální provozní teplota	100	(°C)

2.2.3 Zapouzdření látek - parafínů

Zapouzdření PCM se ve většině aplikací využívá zejména z důvodu zabránění kontaktu s okolním prostředím, aby nedošlo k nežádoucí kontaminaci samotného materiálu s fázovou změnou a tím změně složení. Materiál zapouzdření by měl mít vlastnosti odpovídající požadavkům pro dobrý přenos tepla, mechanickou a chemickou stabilitu.

Prvním typem je makro zapouzdření. Tento typ lze spatřit v podobě trubek, váčků, koulí, panelů či fólií. Obvykle bývají tato pouzdra z kovových či plastových materiálů, takových, které dobře vedou teplo. PCM je tak lépe transportovatelné, případně lze tímto dojít i ke snížení jeho objemu.



Obr. 18 – Pěnové PCM ve fólii, roztok PCM v průhledném a hliníkovém obalu [15]

Druhým typem je mikro-zapouzdření, které dosahuje velikosti od 1 μm až po několik stovek mikrometrů. Komerčně používaný parafín pro mikroenkapsulaci má typické rozměry mezi 2 až 20 μm . PCM je v malém objemu uzavřen do polyménní kapsle kulovitého tvaru. Změna fáze je tudíž pro uživatele okem neviditelná, probíhá uvnitř částice. Vzhledem k jejich malé velikosti obvykle vypadají jako jemný bílý prášek. Kvůli tomu se hodí do začlenění do jiných materiálů - kompozitů, kde zlepšují tepelnou vodivost. Stejně tak mohou zvyšovat riziko nežádoucího podchlazení materiálu. Technicky proveditelné je dosud toto zapouzdření jen pro organické látky (parafíny). Je nutno přihlížet ke kompatibilitě materiálu stěny nádoby a PCM. Zapouzdření musí být navrženo tak, aby bylo schopné zvládat mechanické namáhání stěn nádoby způsobené změnami objemu PCM.



Obr. 19 – Mikroenkapsulace [16]

Za určitou nevýhodou parafínů lze považovat jejich samotnou strukturu. Pokud by parafínové vločky byly volně umístěny v barbotážních žlabech, při průchodu páry by změnilly skupenství, při zchladnutí na teplotu tuhé látky a přesunu s vodným roztokem by ovšem mohly nadělat v čerpadlech a sprchovém systému značné škody.

Materiálem pro konstrukci kondenzátoru musí být látka s velmi dobrou tepelnou vodivostí a odolností proti vysoké teplotě a tlaku. Za takové PCM lze obecně požadovat ty, které mají latentní teplo $160 \div 180 \text{ J/g}$ a více. Rovněž se musí jednat o materiál, který je inertní vůči radioaktivní páře. Vhodnou volbou by se jevil měděné potrubí, jehož teplota tání je $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ a tepelná vodivost okolo 339 W/mK . Parafín uvnitř koncentrovaný by se prostřednictvím teplosměnné plochy potrubí měnil z tuhé fáze na kapalnou. [13]

Neboť se cena mědi dlouhodobě pohybuje přibližně na 130 korunách za 1 kg Cu (3,10 USD/lb), z ekonomického hlediska už by osazení měděným potrubím nebylo tolik příznivé. Zajímavým alternativním materiálem by mohl být špičkový typ polymeru s potřebnými charakteristickými vlastnostmi, tak aby ve svém pouzdru mohl skrývat parafín.

Firma Titan Multiplast nabízí ve svém portfoliu výrobek zvaný PEI, který je odolný vůči vysoké teplotě (170 °C), taktéž proti radiaci a gama záření, je chemicky a tepelně stálý, disponuje vysokou pevností, tvrdostí a je samozhášivý. [14]

3 Úspora objemu barbotážní věže

V této kapitole se budu zabývat možnou úsporou objemu barbotážní věže, pokud by dosavadní systém pro kondenzaci par byl vylepšen materiálem s fázovou změnou.

3.1 Vybraná havárie uvažovaného prasknutí I.O.

Havárii se ztrátou chladiva (tzv. LOCA - Loss of Coolant Accident) lze definovat podle velikosti trhliny na potrubí primárního okruhu do několika kategorií:

- velká LOCA (Large Break - LB LOCA): více než 150 mm,
- střední LOCA (medium LOCA): 50 mm až 150 mm,
- malá LOCA (small LOCA): 15 mm až 50 mm

LOCA havárii lze obecně rozdělit na několik událostí: nejprve dochází k vyprazdňování chladiva z primárního okruhu, zaplavuje se spodní část reaktoru, poté nastává i zatopení aktivní části reaktoru. Pokud by k tomuto nedošlo, palivo by se začalo zahřívat a tavit.

U havárie definované jako LB LOCA se jedná o okamžité příčné (gilotinové) prasknutí studené větve hlavního cirkulačního potrubí mezi hlavním cirkulačním čerpadlem a reaktorem, což vede k velmi rychlému výtoku chladiva skrze prasklé potrubí do prostor hermetické zóny. Tímto masivním únikem se mění parametry v HZ, chladivo se při úniku s klesajícím tlakem mění v páru, dochází k nárůstu teploty paliva. Jedná se tak o maximální projektovou havárii na primárním okruhu jaderné elektrárny.

Časový průběh události je velmi rychlý. Absolutní tlak v boxu PG dosáhne svého maxima 215 kPa už za 10 s. Zároveň se zvyšuje absolutní tlak v záchytných komorách na 150 kPa. Se snižujícím se výtokem horké vody a pokračujícím transportem nekondenzovatelných plynů do záchytných komor, klesá tlak v boxech a postupně se tak vyrovnává s tlakem v záchytných komorách.

Chladivo primárního okruhu je voda pod tlakem 12,3 MPa, přibližné teplotě 282 °C a objemu 209 m³. V případě havárie s únikem chladiva do kontejnmentu se mění výše zmíněné parametry. Než dorazí směs páry do prostor barbotážní věže, lze předpokládat, že se z malé části ochladí o zdi koridoru a přilehlých prostor. VBS a systém sprchování prostoru boxu parogenerátorů zajišťují postupné snižování tlaku, teploty atmosféry a médií uvnitř hermetické zóny. Ke kontaktní kondenzaci dochází při průchodu žlaby, kdy se uvolní latentní energie páry. [12]

Zkusme uvažovat o aplikaci PCM parafinů v podobě koulí zapouzdřených v plastovém obalu plovoucích na hladině roztoku v barbotážním žlabu, z toho důvodu, aby byla zachována funkce pasivního sprchování. Jejich rozmístění lze ovšem provést i v prostorech koridoru, boxu parogenerátorů.

3.2 Parametry barbotážní věže

Rozměr budovy barbotážní věže, jak je již výše uvedeno, činí 39 x 21,5 a výšce 41,9 m. Z hermetického prostoru je napojena pomocí koridoru o rozměrech 11,5 x 6,2 m a délce 15 m. V celé budově jsou čtyři záchytné komory, o půdorysu 39 x 11,45 m a celkovém objemu 17 080 m³. Objem jednoho plynojemu je tedy 4270 m³. Šachta barbotážní věže má objem 13 787 m³ o rozměrech 39 x 8,55 m.

Žlaby jsou umístěny ve 12 patrech, kdy rozměr každého žlabu je 7,25 x 1,92 m a jeho celkový objem 114 m³. Pracovní objem roztoku při hladině 450 mm je přibližně 100 m³. Hladina vody se pohybuje na úrovni 450 ÷ 480 mm při teplotě mezi 20 ÷ 50 °C. Nominální tlak nad hladinou žlabu, při běžném provozu je 98 kPa, po ukončení barbotáže je přípustné rozmezí 103 ÷ 245 kPa. Rozteč pro proudění páry do kloboučku činí 50 mm, výška převáděcího kloboučku je 1920 mm. [12]

Tab.5 - Parametry kontejnmentu EDU [12]

$V_{\text{kont}} \text{ (m}^3\text{)}$	$p_{\text{max}} \text{ (MPa)}$	$p_{\text{min}} \text{ (MPa)}$	$p_{\text{prac}} \text{ (MPa)}$	$T_{\text{max}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{\text{prac}} \text{ (}^\circ\text{C)}$
51 323	0,25	0,08	0,15 ÷ 0,1	129	35

3.3 Modelový výpočet

Modelový výpočet bude zjednodušeně koncipován kalorimetrickou rovnicí pro výše vybraný PCM materiál od společnosti RubiTherm RT 82.

Pro výpočet hustoty chladiva je nejprve třeba znát střední teplotu chladiva, tj. rozdíl mezi teplotou vstupující a vystupující z primárního okruhu.

$$T_{\text{stř}} = \frac{T_{\text{out}} + T_{\text{in}}}{2} = \frac{297 + 267}{2} = 282 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3)$$

Tab.6 - Parametry primárního okruhu EDU

P_t (MW)	T_{in} (°C)	T_{out} (°C)	c_p (kJ/kgK)	ρ_v (kg/m ³)	$V_{I.O.}$ (m ³)	$p_{I.O.}$ (MPa)	$Q_{I.O.}$ (m ³ /h)
5 500	267	297	5,17	815,66	209	12,25	42 000

Hustota chladiva - vody v primárním okruhu byla stanovena na základě tlaku a střední teploty chladiva, dále pak na hustotě vody při normálním tlaku.

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{a \cdot T_{stř.}} \cdot e^{b \cdot \Delta p} = 815,66 \cdot e^{-0,00075975 \cdot 282} \cdot e^{-1,8939 \cdot 10^{-10} \cdot 12,25 \cdot 10^6} \quad (4)$$

$$= 815,66 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$$

kde ρ_0 je hustota vody za normálních podmínek 998,205 kg/m³

a je koeficient -0,00075975 °C

b je koeficient $-1,8939 \cdot 10^{-10}$ Pa

Δp je tlakový rozdíl mezi primárním okruhem a atmosférou

p je atmosférický tlak v MPa

$$\Delta p = p_{I.O.} - p = 12,25 - 0,001 = 12,2499 \text{ MPa} \quad (5)$$

Měrná tepelná kapacita vody primárního okruhu c_p (kJ/kg/K) byla vypočtena pomocí programu XSteam_Excel_v2.6. Výpočet byl proveden pro tlak primárního okruhu 12,25 MPa a střední teplotu vody 282 °C.

3.3.1 Výpočet uvolněného tepla

Pro výpočet množství uvolněného tepla v případě gilotinového prasknutí potrubí je třeba nejprve zhruba odhadnout hmotnost vody obsažené v primárním okruhu. To lze provést pomocí rovnice:

$$m_{I.O.} = V \cdot \rho_v = 209 \cdot 815,66 = 170\,473 \text{ kg} \quad (6)$$

kde ρ_v je hustota vody v primárním okruhu (kg/m³)

V je objem vody v primárním okruhu (m³)

$$Q_{out} = m_{I.O.} \cdot c_p \cdot (T_{stř} - T_{prac}) = 170\,473 \cdot 5,17 \cdot (282 - 35) = 217\,692 \text{ MJ} \quad (7)$$

kde c_p je měrná tepelná kapacita primárního okruhu (kJ/kgK)

$m_{I.O.}$ je přibližná hmotnost vody I.O. (kg)

$T_{stř}$ je střední teplota chladiva (°C)

T_{prac} je pracovní teplota HZ při běžném provozu (°C)

Z této rovnice lze určit přibližné množství uvolněného tepla při LB LOCA havárii. Následně tak dopočítat jaké množství PCM bude třeba, aby dokázalo pojmout dostatečné množství vyvinutého tepla a nedošlo tak k maximální povolené teplotě, na kterou jsou hermetické prostory dimenzovány.

3.3.2 Výpočet množství PCM

Kalorimetrická rovnice, která vyjadřuje zákon zachování energie při tepelné výměně, zde bude zjednodušeně prezentovat rovnovážnost stavu na konci termické bilance v kontejnmentovém systému.

$$Q_{PMC} = Q_{I.O.} \quad (8)$$

Výpočtem tepla absorbovaného parafínem Q_{PCM} lze dostat přibližné potřebné množství PCM.

Teplo absorbované v PCM se skládá ze tří složek:

$$Q_{PMC} = Q_1 + L + Q_2 \text{ (J/m}^3\text{)} \quad (9)$$

kde Q_1, Q_2 je teplo absorbované při tání PCM (J/m³)

L je latentní teplo (J/m³)

Latentní teplo neovlivňuje teplotu dané látky. Je to teplo, které způsobuje změnu skupenství materiálu (v tomto případě z tuhé na kapalnou), aniž by se měnila teplota dané látky. Pro tento materiál je typické tání v rozmezí 78 až 82 °C.

$$L = l_t \cdot \rho_{PCM_l} = 170 \cdot 78 = 132,6 \text{ MJ/m}^3 \quad (10)$$

kde l_t je latentní teplo PCM (kJ/kg)

ρ_{PCM_l} je hustota kapalné fáze PCM (kg/m³)

Teplo přijaté z okolí (Q_1 a Q_2) se v případě parafinu RT 82 bude od sebe lišit změnou hustoty a měrnou tepelnou kapacitou, za kterých PCM mění svoje skupenství. Přičemž materiál je ve svém tuhém stavu schopen absorbovat pouze teplo Q_1 až do teploty tání. Po fázi latentního tepla, kdy je příjem tepla v látce největší, pohlcuje PCM teplo již za kapalného stavu..

$$Q = \rho_{PCM} \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \text{ kJ/m}^3 \quad (11)$$

$$Q_1 = \rho_{PCM_s} \cdot c_{p_s} \cdot (T_{melt} - T_{PCM}) = 880 \cdot 1,8 \cdot (82 - 76) = 64,9 \text{ MJ/m}^3 \quad (12)$$

kde ρ_{PCM_s} je hustota pevné fáze PCM při 15 °C (kg/m³)

c_{p_s} je měrná tepelná kapacita PCM v pevném skupenství (kJ/kgK)

T_{melt} teplota tání PCM (°C)

T_{PCM} je počítaná teplota PCM (°C)

$$Q_2 = \rho_{PCM_l} \cdot c_{p_l} \cdot (T_{max} - T_{melt}) = 780 \cdot 2 \cdot (128 - 82) = 28,1 \text{ MJ/m}^3 \quad (13)$$

kde ρ_{PCM_l} je hustota kapalné fáze PCM při 90 °C (kg/m³)

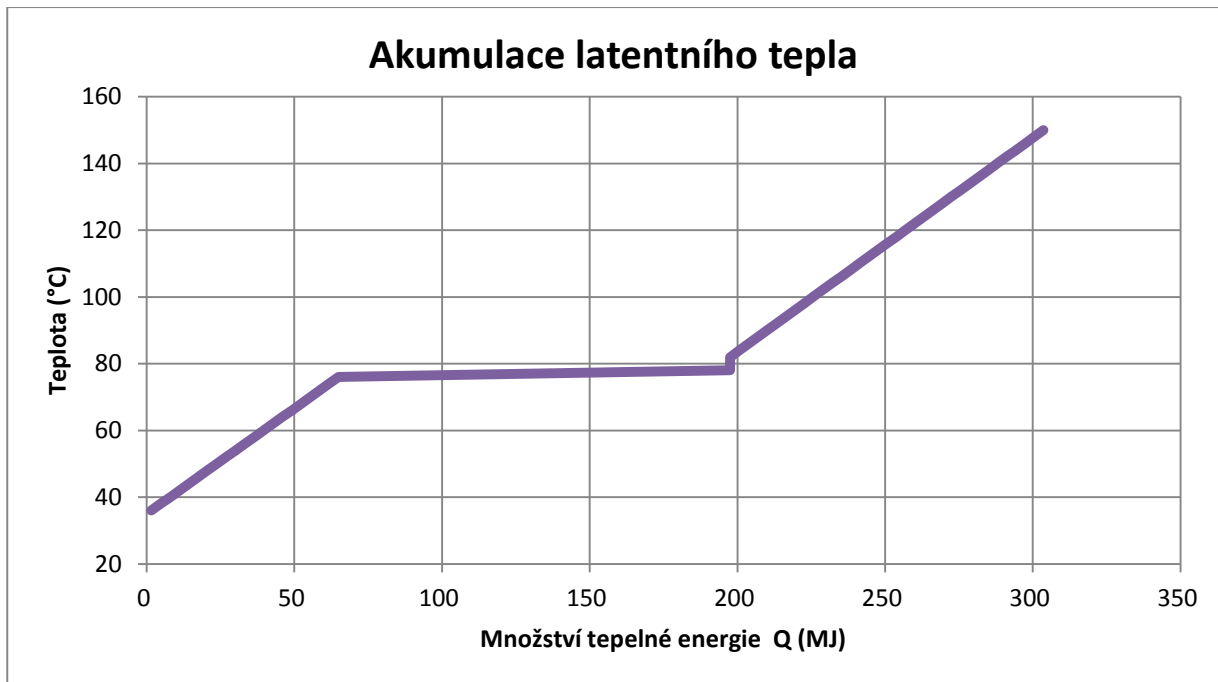
c_{p_l} je měrná tepelná kapacita PCM v kapalném skupenství (kJ/kgK)

T_{max} je počítaná teplota PCM (°C)

T_{melt} teplota již kapalného skupenství PCM (°C)

Součtem veškerého absorbovaného tepla v jednotlivých fázových skupenství pro maximální přípustnou hodnotu cca 130 °C kontejnmentu se dostaneme na:

$$Q_{PMC} = Q_1 + L + Q_2 = 272,4 \text{ MJ}/\text{m}^3 \quad (14)$$



Graf 1 - Závislost teploty a množství absorbovaném tepla v PCM

Graf. 1 vykazuje závislost teploty na akumulaci tepla v PCM, podobně jako je tomu na obr. 1. Je zřejmé, že k největší absorpci tepla dochází v latentní fázi materiálu. A se zvyšující teplotou úměrně roste i pohlcené teplo.

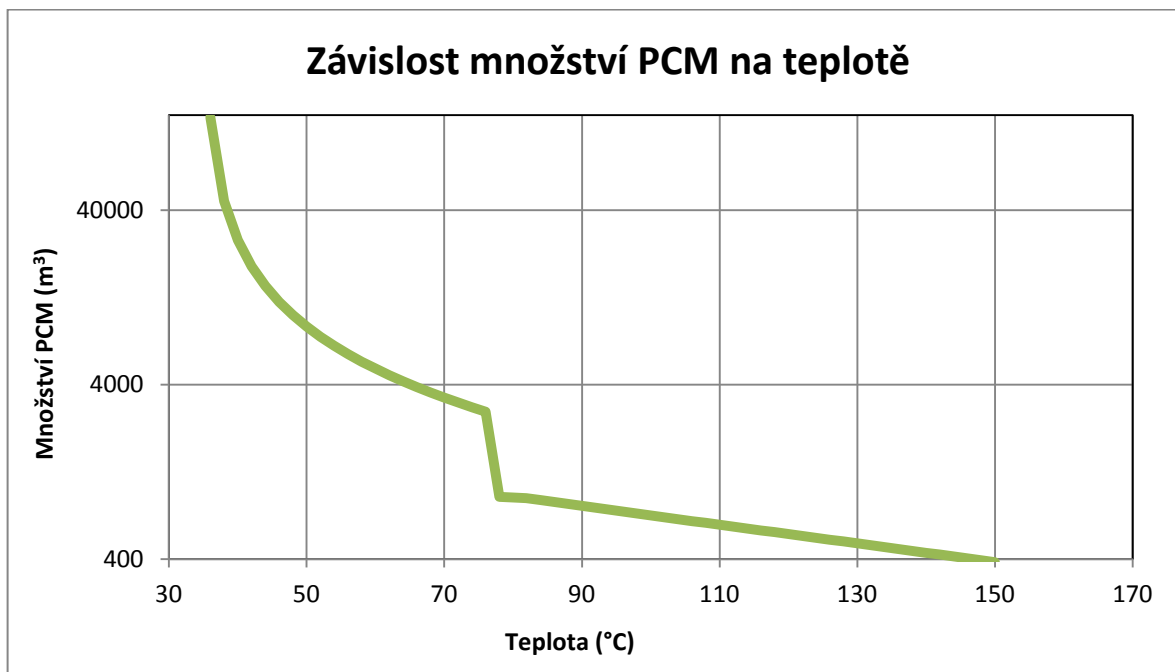
Z následující rovnice za pomoci jednotlivých fází absorbovaného tepla lze získat závislost množství 1 m³ PCM vůči teplu vzniklého prasknutím trubky primárního okruhu při vzrůstající teplotě.

$$V_{PCM}(T) = \frac{Q_{out}}{[\rho_{PCM_s} \cdot c_{p_s} \cdot (T_{melt} - T_{PCM})] + [l_t \cdot \rho_{PCM_l}] + [\rho_{PCM_l} \cdot c_{p_l} \cdot (T_{max} - T_{PCM})]} \quad (\text{m}^3) \quad (15)$$

kde ρ_{PCM_s} je hustota pevné fáze PCM při 15 °C (kg/m³)
 ρ_{PCM_l} je hustota kapalně fáze PCM při 90 °C (kg/m³)
 l_i je latentní teplo PCM (kJ/kg)
 c_{ps} je měrná tepelná kapacita PCM v pevném skupenství (kJ/kgK)
 c_{pl} je měrná tepelná kapacita PCM v kapalném skupenství (kJ/kgK)
 T_{PCM} je teplota, pro kterou je vzorec počítán (°C)
 T_{melt} teplota tání PCM (°C)
 T_{max} je maximální přípustná teplota kontejnmentu (°C)
 Q_{out} je množství uvolněného tepla z primárního okruhu (kJ)

po dosazení dostáváme:

$$V_{PCM}(129\text{ °C}) = \frac{217\,692\,239}{[880 \cdot 1,8 \cdot (82-76)] + [170 \cdot 780] + [780 \cdot 2 \cdot (129-128)]} = 504\text{ m}^3 \quad (16)$$



Graf 2 - Množství potřebného PCM vůči teplotě

Z grafu je patrné, že se vzrůstající teplotou v kontejnmentu je třeba aplikovat menší objem PCM, v tomto případě parafínu RT 82. Pro běžnou provozní teplotu 35 °C by to bylo 136 876 m³. Pokud bychom uvažovali maximální přípustnou teplotu 129 °C,

potřebného množství PCM bude přibližně 500 m³. Rovněž je zde patrná změna skupenství, kdy pro tuhý stav PCM by bylo zapotřebí relativně velkého množství materiálu, oblast latentního tepla pak ukazuje skokovou změnu závislosti množství na teplotě.

Pro zvolený materiál Rubitherm RT 82 byla ještě vypočítána měrná tepelná kapacita materiálu, jak se změní během přechodu na kapalné skupenství.

$$c_p(T) = c_{pn} + \frac{c_{pn+1} - c_{pn}}{T_{n+1} - T_n} \cdot (T - T_n) = 1,8 + \frac{2-1,8}{90-15} \cdot (82 - 15) = 1,98 \text{ kJ/kgK} \quad (17)$$

kde c_{pn} je měrná tepelná kapacita pevné fáze (kJ/kgK)

c_{pn+1} je měrná tepelná kapacita kapalné fáze (kJ/kgK)

T teplota tání vybraného PCM (°C)

T_n teplota, při které má materiál měrnou tepelnou kapacitu c_{pn} (°C)

T_{n+1} teplota, při které má materiál měrnou tepelnou kapacitu c_{pn+1} (°C)

3.4 Ekonomické zhodnocení

Obecně lze říci, že aplikace PCM materiálů musí poskytnout určitý druh úspor energie, tak aby se mohly stát atraktivními i pro komerční využití. Výhody jejich instalace musí v konečném důsledku převážit náklady na pořízení a činnosti s tím spojené.

Parafinové vosky už nejsou na trhu čerstvou novinkou, s úspěchem se používají ve zdravotnictví, stavebnictví, tomu odpovídá i jejich cena. Bez zapouzdření je lze přibližně sehnat za 40 Kč za kilogram (2 USD/kg). [27]

Při předpokladu projektové havárie s maximální dovolenou hodnotou teploty 130 °C, je třeba použít spočítaný objem 504 m³ parafinu RT 82. K zjištění hmotnosti vypočteného množství PCM lze dosáhnout prostým násobením objemu a hustoty materiálu.

$$m_{PCM} = V_{PCM} \cdot \rho_{PCM} = 504 \cdot 880 = 443\,520 \text{ kg} \quad (18)$$

kde V_{PCM} je vypočtený objem PCM (m³)

ρ_{PCM} je hustota daného PCM (kg/m³)

Cena za materiál je tudíž:

$$Cena = m_{PCM} \cdot cena\ za\ 1\ kg = 443\ 520 \cdot 2 = 887\ 040\ USD \quad (19)$$

Kurz měny dle České národní banky k 8.5.2018 činí 1 USD = 21,438 Kč.

Investiční náklady na pořízení čistého PCM by činily přibližně devatenáct milionů korun českých. K tomu je nutné započítat náklady na zapouzdření, dopravu materiálu, jeho instalaci do prostor a s tím tak spojené možné bezpečnostní opatření při pohybu v hermetické zóně.

Přestože je PCM označován za pasivní způsob chlazení, který plní funkci záložního systému jaderné elektrárny a nepředpokládá se časté využití, bude zajisté vyžadovat údržbu a kontrolu. Pokud by se uvažoval monitoring chlazení PCM při cyklické výměně paliva, tj. jednou za čtyři až pět let, odhadem lze říci, že tato revize bude činit 3 % z investičních nákladů. Výhodou parafinové kondenzace, např. oproti ledovému kondenzátoru, při provozu jaderné elektrárny, je absence chlazení, kterou by nepotřeboval proto, aby zůstal v tuhém stavu.

Relativně rychlý únik chladiva z primárního okruhu, které se mění v páru, nastává ve chvíli prasknutí větve I.O., má za následek růst teploty a tlaku v kontejnmentu. Část páry, která se dostane do hermetických prostor, začne předávat své teplo PCM, část páry zkondenzuje a tím se sníží tlak. Aplikací PCM do vybraných prostor hermetické zóny a žlabů barbotážní věže by se zvětšila plocha potřebná pro kondenzaci, tudíž by došlo k rychlejšímu snížení tlaku i teploty.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zhodnotit vakuobarbotážní systém v jaderné elektrárně Dukovany během havárie s únikem chladiva, tzv. LOCA havárie, s použitím materiálu s fázovou změnou. Jelikož reaktory typu VVER 440/V-213 nemají plnotlaký kontejnment, musí mít jiný systém k potlačení tlaku a teploty v případě havárie. Kontejnmentový systém je pak složen z hermetických kobek, koridoru, barbotážní věže a jejich plynojemů. Jaderná elektrárna je dimenzována na maximální projektovou havárii nazývanou LB LOCA. Při ní dojde ke gilotinovému roztržení porubí primárního okruhu a výtoku chladiva. Ke snížení tlaku a teploty tedy dochází vlivem kondenzace v barbotážních žlabech. Toto lze označit za pasivní systém, neboť je nezávislý na energetických zdrojích a probíhá jen v závislosti na tlakových rozdílech.

Materiály, které dokážou během své fázové přeměny absorbovat teplo, se zabývám v první kapitole. Nejprve jsou rozčleněny do jednotlivých skupin, kde jsou popsány termofyzikální vlastnosti a nevýhody plynoucí z jejich podstaty.

Navržený materiál, parafín s označením RT 82, pravděpodobně nejlépe vyhovuje podmínkám přítomným ve vakuobarbotážním systému. Nezpůsobuje korozi, je technologicky a komerčně dostupný, teplota tání se nachází mezi maximální teplotou roztoku vody a kyseliny borité obsažené v barbotážních žlabech a maximální přípustnou teplotou hermetické zóny. Pro navrhovaný systém, kde je průměrná provozní teplota 35 °C, by bylo potřeba přibližně 444 tun parafínu RT 82. Ačkoli by se pořizovací cena parafínového systému bez započtení montážních prací, zapouzdření do polymeru, vyšplhala na 19 miliónů Kč, její provozní náklady jsou minimální.

Pokud by se uvažovalo o makroenkapsulaci PCM o velikosti 4cm kuliček zapouzdřených v polymérní schránce, mohly by plovat na hladině roztoku v barbotážních žlabech a nebyla by tudíž přerušena pasivní funkce VBS. Částečné snížení tlaku a teploty během LOCA havárie lze zajistit celkovým zvětšením kondenzační plochy PCM materiálu a jeho výbornou absorpcí tepla. Toho lze v praxi dosáhnout vhodným rozmístěním uvedených kuliček taktéž např. do nerezových kari sítí s menšími oky, do boxů parogenerátorů nebo i do horní třetiny koridoru spojující hermetickou zónu reaktoru s barbotážní věží.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Phase-change material - Wikipedia. [online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material
- [2] [online]. Dostupné z: <http://www.biom.cz/cz/odborne-clanky/materialy-pro-akumulaci-tepla-ze-spalovani-biomasy>
- [3] Screening of high melting point phase change materials (PCM) in solar thermal concentrating technology based on CLFR. *Elsevier* [online]. **2005**, 8 [cit. 2018-02-12].
- [4] Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. *Elsevier* [online]. **2012**, 15 [cit. 2018-02-12].
- [5] Jaderná elektrárna Dukovany. *Oenergetice.cz* [online]. [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrarny-cr/jaderna-elektrarna-dukovany/>
- [6] MODELÝ A ANALÝZY V KONTEJNMENTOVÉM SYSTÉMU S POTLACENÍM TLAKU PRI HAVÁRIÍCH S ÚNIKEM CHLADIVA [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=87498. Diplomová práce. VUT.
- [7] Akumulace tepelné energie skupenskou změnou látek [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=100516. DP. VUT.
- [8] MEHLING H., LUISA F. *Heat and cold storage with PCM an up to date introduction into basics and applications*. Berlin: Springer, 2008. ISBN 9783540685579.
- [9] *PureTemp* [online]. 2014 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.puretemp.com/stories/a-brief-comparison-of-ice-packs-salts-paraffins-and-vegetable-derived-phase-change-materials>
- [10] Akumulace tepelné energie skupenskou změnou látek [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=100516. BP. VUT.

- [11] Review of cold storage materials for subzero applications. *ScienceDirect* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212009048>
- [12] *Interní materiály ČEZ EDU*
- [13] *MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI PRO KONCEPT PASIVNÍHO SYSTÉMU S LEDNÍMI KONDENZÁTORY V PŘÍPADĚ LOCA HAVÁRIE* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=56662. DP. VUT.
- [14] *Titan Multiplast* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.titan-multiplast.cz/produkty/strojirenstvi-a-ostatni-prumysl-86/vysocevykonnostni-plasty-114>
- [15] *Rubitherm GmbH* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.rubitherm.eu/index.php/produktkategorie/makroverkaspelung-k%C3%BChlakkus>
- [16] *Rubitherm Technologies GmbH* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.rubitherm.eu/index.php/produktkategorie/mikroverkapselung>
- [17] *RubiTherm Technologies GmbH* [online]. 2016 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT82_DE_31052016.PDF
- [18] Chlorid hořečnatý. *Wikiwand.com* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://www.wikiwand.com/cs/Chlorid_ho%C5%99e%C4%8Dnat%C3%BD
- [19] Dusičnan draselný. *Wikiwand.com* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://www.wikiwand.com/cs/Dusi%C4%8Dnan_draseln%C3%BD
- [20] Dusičnan sodný. *Wikiwand.com* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://www.wikiwand.com/cs/Dusi%C4%8Dnan_sodn%C3%BD
- [21] Zinek. *Wikiwand.com* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.wikiwand.com/cs/Zinek>
- [22] Olovo. *Wikiwand.com* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.wikiwand.com/cs/Olovo>
- [23] Cín. *Wikiwand.com* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z:

<http://www.wikiwand.com/cs/C%C3%ADn>

[24] Erythritol. *Wikiwand.com* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.wikiwand.com/en/Erythritol>

[25] Mannitol. *Wikiwand.com* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.wikiwand.com/en/Mannitol>

[26] *Phase change materials for thermal energy storage in low* [online]. , 53 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <file:///C:/Users/MyPC/Downloads/2017+-+PCMs+for+thermal+energy+storage+in+low-+and+high-T+applications+-+a+SOTA+-+PCM-Eff.pdf>

[27] *PCMs for Residential Building Applications: A Short Review Focused on Disadvantages and Proposals for Future Development* [online]. 2017, , 18 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <file:///C:/Users/MyPC/Downloads/buildings-07-00078.pdf>

Přílohy

T _{PCM} (°C)	Kelviny	Q _{out} (kJ)	Δ T	Q ₁ (kJ/m ³)	L (kJ/m ³)	Q ₂ (kJ/m ³)	SUMA Q (kJ/m ³)	V _{PCM} v m ³	m _{PCM} (kg)
36	309,15	216 810 895	1	1 584			1 584	136876	120 450 497
38	311,15	215 048 204	3	4 752			4 752	45254	39 823 742
40	313,15	213 285 514	5	7 920			7 920	26930	23 698 390
42	315,15	211 522 824	7	11 088			11 088	19077	16 787 526
44	317,15	209 760 134	9	14 256			14 256	14714	12 948 156
46	319,15	207 997 444	11	17 424			17 424	11937	10 504 921
48	321,15	206 234 753	13	20 592			20 592	10015	8 813 451
50	323,15	204 472 063	15	23 760			23 760	8606	7 573 039
52	325,15	202 709 373	17	26 928			26 928	7528	6 624 489
54	327,15	200 946 683	19	30 096			30 096	6677	5 875 634
56	329,15	199 183 993	21	33 264			33 264	5988	5 269 418
58	331,15	197 421 302	23	36 432			36 432	5419	4 768 630
60	333,15	195 658 612	25	39 600			39 600	4941	4 347 969
62	335,15	193 895 922	27	42 768			42 768	4534	3 989 628
64	337,15	192 133 232	29	45 936			45 936	4183	3 680 713
66	339,15	190 370 542	31	49 104			49 104	3877	3 411 658
68	341,15	188 607 851	33	52 272			52 272	3608	3 175 216
70	343,15	186 845 161	35	55 440			55 440	3370	2 965 796
72	345,15	185 082 471	37	58 608			58 608	3158	2 779 016
74	347,15	183 319 781	39	61 776			61 776	2967	2 611 393
76	349,15	181 557 091	41	64 944			64 944	2796	2 460 123
78	351,15	179 794 400		64 944	132 600		197 544	910	800 931
80	353,15	178 031 710		64 944	132 600		197 544	901	793 079
82	355,05	176 357 154		64 944	132 600		197 544	893	785 619
84	357,15	174 506 330	2	64 944	132 600	3 120	200 664	870	765 287
86	359,15	172 743 640	4	64 944	132 600	6 240	203 784	848	745 958
88	361,15	170 980 949	6	64 944	132 600	9 360	206 904	826	727 213
90	363,15	169 218 259	8	64 944	132 600	12 480	210 024	806	709 024
92	365,15	167 455 569	10	64 944	132 600	15 600	213 144	786	691 368
94	367,15	165 692 879	12	64 944	132 600	18 720	216 264	766	674 221
96	369,15	163 930 189	14	64 944	132 600	21 840	219 384	747	657 562
98	371,15	162 167 498	16	64 944	132 600	24 960	222 504	729	641 370
100	373,15	160 404 808	18	64 944	132 600	28 080	225 624	711	625 626
102	375,15	158 642 118	20	64 944	132 600	31 200	228 744	694	610 311
104	377,15	156 879 428	22	64 944	132 600	34 320	231 864	677	595 409
106	379,15	155 116 738	24	64 944	132 600	37 440	234 984	660	580 902
108	381,15	153 354 047	26	64 944	132 600	40 560	238 104	644	566 776
110	383,15	151 591 357	28	64 944	132 600	43 680	241 224	628	553 015
112	385,15	149 828 667	30	64 944	132 600	46 800	244 344	613	539 605
114	387,15	148 065 977	32	64 944	132 600	49 920	247 464	598	526 533
116	389,15	146 303 287	34	64 944	132 600	53 040	250 584	584	513 787
118	391,15	144 540 596	36	64 944	132 600	56 160	253 704	570	501 355
120	393,15	142 777 906	38	64 944	132 600	59 280	256 824	556	489 224
122	395,15	141 015 216	40	64 944	132 600	62 400	259 944	542	477 385
124	397,15	139 252 526	42	64 944	132 600	65 520	263 064	529	465 827
126	399,15	137 489 836	44	64 944	132 600	68 640	266 184	517	454 539
128	401,15	135 727 145	46	64 944	132 600	71 760	269 304	504	443 513
130	403,15	133 964 455	48	64 944	132 600	74 880	272 424	492	432 740
132	405,15	132 201 765	50	64 944	132 600	78 000	275 544	480	422 210
134	407,15	130 439 075	52	64 944	132 600	81 120	278 664	468	411 917
136	409,15	128 676 385	54	64 944	132 600	84 240	281 784	457	401 851
138	411,15	126 913 694	56	64 944	132 600	87 360	284 904	445	392 006
140	413,15	125 151 004	58	64 944	132 600	90 480	288 024	435	382 374
142	415,15	123 388 314	60	64 944	132 600	93 600	291 144	424	372 948
144	417,15	121 625 624	62	64 944	132 600	96 720	294 264	413	363 723
146	419,15	119 862 934	64	64 944	132 600	99 840	297 384	403	354 691
148	421,15	118 100 243	66	64 944	132 600	102 960	300 504	393	345 846
150	423,15	116 337 553	68	64 944	132 600	106 080	303 624	383	337 184