



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF ENERGY

MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI PRO KONCEPT PASIVNÍHO SYSTÉMU S LEDNÍMI KONDENZÁTORY V PŘÍPADĚ LOCA HAVÁRIE

POSSIBILITIES OF NUCLEAR SAFETY ENHANCEMENT FOR CONCEPT OF PASSIVE
SYSTEM WITH ICE CONDENSERS IN CASE OF LOCA ACCIDENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ZBYNĚK PLUŠKE

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JIŘÍ MARTINEC, PH.D.

MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI PRO KONCEPT PASIVNÍHO SYSTÉMU S LEDNÍMI
KONDENZÁTORY V PŘÍPADĚ LOCA HAVÁRIE

Energetický ústav

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Zbyněk Pluške

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

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

Možnosti zvyšování jaderné bezpečnosti pro koncept pasivního systému s ledními kondenzátory v případě LOCA havárie

v anglickém jazyce:

Possibilities of nuclear safety enhancement for concept of passive system with ice condensers in case of LOCA accidents

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Lední kondenzátor pro vybrané druhy tlakovodních jaderných elektráren představuje bezpečnostní prvek v případě LOCA havárie. Snížení tlakové špičky a kondenzace vzniklé páry probíhá při fázové změně ledu v ledním kondenzátoru. Provozně je lední kondenzátor udržován pomocí chladicího zařízení a monitorovacích systémů. Záměna ledu jako klíčového prvku kondenzace za jiný materiál bez potřeby aktivního chlazení a kontroly zvyšuje míru bezpečnosti jaderné elektrárny a snižuje provozní náklady.

Cíle diplomové práce:

Rešerše použití ledních kondenzátorů ve stávajících tlakovodních jaderných elektrárnách.

Zpracování možnosti výměny ledu za jiný materiál.

Rešerše materiálů s vlastnostmi vhodnými pro akumulaci tepla.

Výpočet a návrh konstrukce pro výměník tepla s podobnou funkcí jako lední kondenzátor s uvážením použití vybraných materiálů.

Zpracování technické a ekonomické rozvahy pro nové řešení.

MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI PRO KONCEPT PASIVNÍHO SYSTÉMU S LEDNÍMI
KONDENZÁTORY V PŘÍPADĚ LOCA HAVÁRIE

Energetický ústav

Seznam odborné literatury:

Databáze technických článků ScienceDirect.

Databáze publikací World Nuclear Association.

Databáze publikací International Atomic Energy Agency.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Martinec, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 15.11.2011



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt:

Diplomová práce pojednává o bezpečnostních systémech jaderné elektrárny, především pasivní ochrany kontejnmentu. Ta má za úkol snížit nárůst tlaku během LOCA. Zabývá se určitým typem pasivní ochrany, a to ledovým kondenzátorem. V kapitolách je postupně vypracován návrh náhrady stávajícího materiálu za jiný, který mění svojí fázi při vyšší teplotě. Byl vybrán vhodný materiál, vypracován tepelný výpočet a konstrukční řešení. Na konci je vypracovaná ekonomická analýza výroby nového typu kondenzátoru.

Klíčová slova:

Ledový kondenzátor, Parafinový kondenzátor, PCM, Led, Parafín, Pasivní ochrana
Kontejnment, LOCA, primární chladicí systém.

Abstract:

The Thesis discusses about safety systems of nuclear power plants, primarily about passive containment protection. That have aims to reduce increase of pressure during the LOCA. It occupy specific type of passive system, it is Ice Condenser. In chapters is make step by step design of replacement current material for other material, that changes its phase at higher temperature. It chose a suitable material, prepared thermal calculation and structural design. Finally is prepared the economic analysis of production of new type condenser.

Keywords:

Ice Condenser, Paraffin Condenser, PCM, Ice, Paraffin, Containment, Passive Protection, LOCA, Primary Cool System

MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI PRO KONCEPT PASIVNÍHO SYSTÉMU S LEDNÍMI
KONDENZÁTORY V PŘÍPADĚ LOCA HAVÁRIE

Energetický ústav

MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI PRO KONCEPT PASIVNÍHO SYSTÉMU S LEDNÍMI
KONDENZÁTORY V PŘÍPADĚ LOCA HAVÁRIE

Energetický ústav

PLUŠKE, Z. *Možnosti zvyšování jaderné bezpečnosti pro koncept pasivního systému s ledními kondenzátory v případě LOCA havárie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D.

Já, Zbyněk Pluške prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne 25. 5. 2012

.....

Zbyněk Pluške

MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI PRO KONCEPT PASIVNÍHO SYSTÉMU S LEDNÍMI
KONDENZÁTORY V PŘÍPADĚ LOCA HAVÁRIE

Energetický ústav

MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI PRO KONCEPT PASIVNÍHO SYSTÉMU S LEDNÍMI
KONDENZÁTORY V PŘÍPADĚ LOCA HAVÁRIE

Energetický ústav

Děkuji, Ing. Jiřímu Martinecovi, Ph.D., Ing, Antonínu Kolbábkovi za odbornou pomoc při psaní této Diplomové práce.

MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI PRO KONCEPT PASIVNÍHO SYSTÉMU S LEDNÍMI
KONDENZÁTORY V PŘÍPADĚ LOCA HAVÁRIE

Energetický ústav

MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI PRO KONCEPT PASIVNÍHO SYSTÉMU S LEDNÍMI
KONDENZÁTORY V PŘÍPADĚ LOCA HAVÁRIE

Energetický ústav

Obsah

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ÚVOD | 13 |
| 1.1 | PROČ JE JADERNÁ ENERGIE DŮLEŽITÁ? | 13 |
| 2 | KONTEJNMENT | 15 |
| 2.1 | NÁVRH KONTEJNMENTU | 15 |
| 2.2 | BEZPEČNOSTNÍ KRITÉRIA A SYSTÉMY | 17 |
| 3 | OCHRANNÉ OBÁLKY S LEDOVÝM KONDENZÁTOREM | 18 |
| 3.1 | KONTEJNMENT | 18 |
| 3.2 | KONDENZÁTORU A JEHO FUNKCE | 19 |
| 3.3 | VÝHODY A NEVÝHODY LEDOVÉHO KONDENZÁTORU | 21 |
| 4 | PARAFINOVÝ KONDENZÁTOR | 21 |
| 4.1 | MATERIÁL | 21 |
| 4.1.1 | <i>Srovnání běžných látek a PCM</i> | 21 |
| 4.2 | ROZDĚLENÍ A POŽADAVKY NA PCM | 22 |
| 4.2.1 | <i>Výběr parafínu</i> | 24 |
| 4.2.2 | <i>Tepelná kapacita RT 28 HC a RT 31</i> | 26 |
| 4.2.3 | <i>Výpočet Entalpie parafínu</i> | 29 |
| 4.3 | 2.5.2 KONSTRUKCE KONDENZÁTORU..... | 30 |
| 4.3.1 | <i>Volba potrubí</i> | 30 |
| 4.3.2 | <i>Umístění v kontejnmentu</i> | 30 |
| 5 | VÝPOČET A NÁVRH KONDENZÁTORU S PARAFÍNEM | 32 |
| 5.1 | ROZBOR VÝPOČTU..... | 32 |
| 5.2 | ZVÝŠENÍ TLAKU V KONTEJNMENTU BĚHEM LOCA..... | 33 |
| 5.2.1 | <i>Výpočet suchosti páry pomocí měrných objemů</i> | 34 |
| 5.2.2 | <i>Hmotnost vzduchu a vody v prostoru ochranné obálky</i> | 34 |
| 5.2.3 | <i>Výpočet suchosti páry z rovnice energetické bilance</i> | 35 |
| 5.2.4 | <i>Výsledný tlak a teplota</i> | 36 |
| 5.3 | AKUMULACE TEPLA DO ZDIVA..... | 36 |
| 5.4 | KONDENZACE..... | 37 |
| 5.4.1 | <i>Laminární filmová kondenzace páry</i> | 39 |
| 5.5 | SAMOTNÝ VÝPOČET..... | 43 |
| 5.5.1 | <i>Výpočet úniku chladiva</i> | 43 |
| 5.5.2 | <i>Výpočet akumulace tepla do zdiva</i> | 46 |
| 5.5.3 | <i>Výpočet parafinového kondenzátor</i> | 49 |
| 6 | TECHNICKÉ ZPRACOVÁNÍ PARAFINOVÉHO KONDENZÁTORU | 54 |
| 7 | EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ | 56 |
| 7.1 | LEDOVÝ KONDENZÁTOR..... | 57 |
| 7.2 | PARAFINOVÝ KONDENZÁTOR | 59 |
| 8 | ZÁVĚR | 60 |
| 9 | BIBLIOGRAFIE | 61 |

MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI PRO KONCEPT PASIVNÍHO SYSTÉMU S LEDNÍMI
KONDENZÁTORY V PŘÍPADĚ LOCA HAVÁRIE

Energetický ústav

| | | |
|-----------|--------------------------------------|-----------|
| 10 | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK..... | 62 |
| 11 | PŘÍLOHY:..... | 64 |

1 Úvod

1.1 Proč je jaderná energie důležitá?

V dnešní době si nedokážeme představit život bez elektřiny, je na něj závislý nejen průmysl ale i každý z nás. Všechno co jíme a používáme je vyrobeno nebo provozováno pomocí elektrické energie. Z tohoto důvodu se poptávka po elektrické energii zvyšuje. Musíme být připraveni tuto potřebu pokrýt, a to s co nejmenším dopadem na životní prostředí.

Tepelné elektrárny jsou stále nejpoužívanějším zdrojem výroby energie, v roce 2011 měli 62 % podíl na výrobě elektrické energie. Je to tím, že výstavba takových to zařízení je „levná“ a pokud je potřeba jsou schopny najet na plný výkon během několika desítek minut. A však nastává zde problém, výroba elektřiny z fosilních paliv znečišťuje životní prostředí a zmenšuje jejich zásoby.



Obrázek 1.1: JE Dukovany.

Tepelné elektrárny spalující fosilní paliva vypouštějí do životního prostředí mnoho škodlivých látek, především CO_2 . Oxid uhelnatý v zemské atmosféře způsobuje zahřívání planety. V druhé řadě, uvolněním kyslíčnicku siřičitého, který s vlhkostí v ovzduší tvoří kyseliny padající se srážkami (kyselé deště), ničí lesy a úrodná pole. A v poslední řadě, zásoba fosilních paliv na planetě dochází. Zdroje uvádějí, že zásoby nám vydrží okolo 100 let. Také samotná těžba fosilních paliv má neblahé účinky na okolní prostředí a to především zvýšenou prašností, hlukem, ničením krajiny (povrchové doly), propady půdy (hlubinné doly), úniky ropy do moře (Ropné plošiny, tankery).

Naproti tomu, jaderné elektrárny jsou sice drahá a složitá zařízení, ale výroba



Obrázek 1.2: JE Temelín.

elektřiny je po dlouho let levná a čistá. Do ovzduší vypouštějí pouze vodní páru z chladicích věží. Problém zde nastává až při vyhoření paliva. Tento odpad je sice radioaktivní, ale je bezpečně uschován v Kastorech a dochlazován po dobu 2 až 5 let v bazénech radioaktivního odpadu. Oproti odpadu z elektráren na fosilní palivo, zde jeden Kastor představuje celoroční provoz reaktoru. Dalším faktem je energie samotného paliva, uran o

hmotnosti 5 g vyrobí tolik energie jako 0,5 tun kvalitního černého uhlí.

Uhlí se dodnes v některých oblastech (bez plynofikace) využívá na vytápění domova. Ropa, topné oleje a plyn se zase využívají jako palivo do dopravních prostředků (automobily, motocykly, lodě, letadla). Ropa je také ve velkém zastoupena v plastovém průmyslu. Zde je náhrada ropy velmi obtížná. Za to surový uran se přepracuje na obohacený uran a je využíván pouze v energetice. Zbytky uranu se po té využívají v jiných oborech než energetika, jako například vyrovnávací závaží v Boeingu 737, v plachetnicích, gyroskopech, atd. V kombinaci uranu s množivými reaktory, stávající množství uranu vydrží na několik stovek let.

Jaderná zařízení jsou složitý celek a pro provoz takového zařízení je potřeba dodržovat nařízení jaderné bezpečnosti. Je to z toho důvodu, aby nedošlo k zamoření životního prostředí produkty štěpné řetězové reakce. Jedním z mnoha nařízení je 300 % ochrana chladicího systému reaktoru, což znamená, že musí být minimálně 3 záložní čerpadla na chladicí okruh. Dnešní moderní jaderná zařízení se snaží využívat také jednoho pasivního záložního systému, který pro svou funkčnost nepotřebuje elektrickou energii. Několik patentů pasivní ochrany drží americká společnost Westinghouse. V některých JE využívá ledový kondenzátor umístěný v kontejnmentu. Tato práce se zamýšlí nad schopností provozu tohoto kondenzátoru a jeho možné vylepšení. Vylepšením je náhrada stávajícího ledu za látku, která má bod tání o vyšších teplotách než je pokojová. Tímto by se podstatně zlepšila bezpečnost tohoto zařízení.

2 Kontejnment

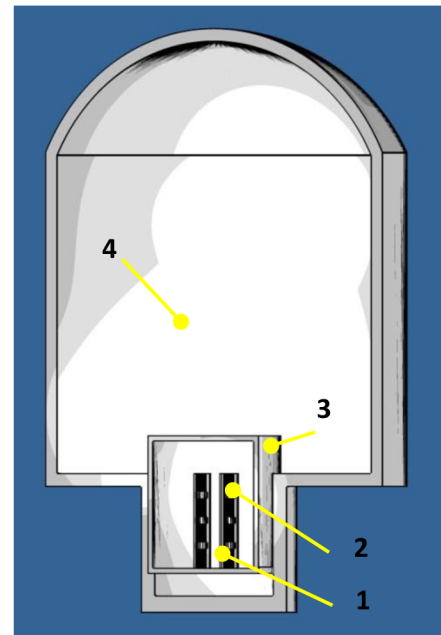
Řadí se jako poslední prvek v ochraně do hloubky.

Ochrana do hloubky:

1. Struktura paliva
2. Povlak palivového článku
3. Stěny primárního okruhu
4. Ochranná obálka

Ochranná obálka má za úkol chránit komponenty (primární okruh, reaktor a další bezpečnostní podmínky) umístěné uvnitř před okolními vlivy (pád letadla, povodně,

větrné smrště, zemětřesení). Ochranná obálka je navržena také tak, aby při případné havárii zadržela většinu štěpných produktů uvnitř a ochránila tak životní prostředí před kontaminací.



Obrázek 1.1: Schéma ochrany do hloubky.

Základní funkce kontejnmentu podle [1].

- 1) Uzavírá a chrání reaktor a součásti primárního okruhu před okolními vlivy (pád letadla, povodně, větrné smrště, zemětřesení)
- 2) Chrání okolí jaderné elektrárny před účinky záření (při chodu JE i při havárii)
- 3) Při nekontrolovatelném úniku radioaktivních štěpných produktů z primárního okruhu, umožní jak zachycení pevných produktů ve filtrech tak kontrolované vypouštění plyných štěpných produktů. Po vypuštění z komína dochází ke zředění plyných produktů se vzduchem v atmosféře.
- 4) Po havárii zadrží většinu štěpných produktů, jak přirozeným rozpadem a také pomocí sprchového systému.



Obrázek 2.2: Stavba kontejnmentu.

2.1 Návrh kontejnmentu

AEC (Atomic energy act) byla založena 1946 (po 2 světové válce). Roku 1962 zavedla pojem maximální možná nehoda, tou se stala DBA (design basis accident) a LOCA. Průmysl

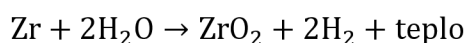
na to odpověděl mnoha ochrannými systémy, které měli za úkol se vypořádat s tlakovou změnou v kontejnmentu.

Ochranné obálky jsou navrženy podle maximálního tlaku a teploty, který se odvíjí od instalovaného parogenerátoru v případě havárie tzv. LBLOCA.

Velká ztráta chladicí kapaliny (LBLOCA - Large Break Loss of Coolant Accident) nastává ve chvíli přetržení primárního okruhu (gilotinové roztržení). Chladicí kapalina začne proudit do prostoru mimo primární potrubí, okamžitě se mění v páru a expanduje. Únik je poměrně rychlý, cca 10 až 15 sekund. To má za následek nárůst teploty a tlaku, podle kterého se kontejnment projektuje nebo jeho bezpečnostní prvky.

Teplota a tlak v atmosféře ochranné obálky jsou dále ovlivňovány následujícími energetickými zdroji [2]:

1. **Vnitřní energie chladiva.** Z hlediska bezpečnosti je nevýhodou velká vnitřní energie akumulovaná v chladivu o vysokých termodynamických parametrech. Velikost této energie je dána rychlosti výtoku chladiva z primárního okruhu a je určujícím faktorem zvyšování teploty a tlaku v atmosféře kontejnmentu až do úplného vyprázdnění chladiva v primárním okruhu.
2. **Energie akumulovaná v aktivní zóně a stěnách primárního okruhu.** Při činnosti reaktoru se komponenty v aktivní zóně zahřejí na vysokou teplotu. Po úniku chladiva pak tyto komponenty předávají (sáláním, vedením, konvekci) své teplo atmosféře kontejnment až do ustálení termodynamické rovnováhy. Rychlost přenosu tepla je však mnohokrát menší než v prvním případě.
3. **Zbytkové teplo uvolněné při štěpení a absorpci beta a gama záření.** Při LOCA havárii jaderný reaktor je stále zdrojem tepla. Toto teplo pochází z energie štěpení, jednak spontánním štěpením transuranu a jednak štěpení zpožděnými neutrony. Pro začátek je tato energie zanedbatelným členem ale z dlouhodobého hlediska má velký vliv na tlakové namáhání kontejnmentu. Navíc při selhání odvodu tepla reaktoru, může dojít k tavení aktivní zóny a tím k většímu uvolnění radioaktivity.
4. **Chemické reakce kovů s vodou.** Ztráta chladiva má za následek rychlé zvyšování teploty aktivní zóny. Při vysokých teplotách se mohou uplatnit reakce některých kovů (zirkon, hliník, ocel) s vodou. Velké množství energie se uvolňuje například při reakci zirkonia s vodou, která probíhá při teplotě nad 1 200°C.



Uvolněná energie při 1 852°C je okolo 6 531 kJ/kg, navíc při této reakci se uvolňuje vodík. Při dostatečně velké koncentraci vodíku s vodní párou (20 molárních procent)

se může spalovat s kyslíkem na vodu. Při této reakci je uvolněno dalších 121 000kJ na jeden kg spáleného vodíku.

2.2 Bezpečnostní kritéria a systémy

Existují celkem tři kritéria, podle kterých je navržen bezpečnostní systém JE.

1. Schopnost **bezpečně odstavit reaktor** a udržet jej v podmínkách bezpečného odstavení.
2. Schopnost **odvádět zbytkové teplo** z aktivní zóny reaktoru.
3. Schopnost **omezit úniky radioaktivních látek** tak, aby úniky nepřekročili předepsané limity.

Schopnost **omezit úniky radioaktivních látek** se stará právě ochranná obálka. Dopomáhají k tomu bezpečnostní systémy, které se rozdělují na **Aktivní** a **Pasivní**.

Bezpečnostní systémy:

- A) **Aktivní systémy** – potřebují pro svoji funkčnost zdroj energie, spouštění operátorem nebo počítačovým systémem (např.: čerpadla sprchového systému)
- B) **Pasivní systémy** – pro svoji funkčnost využívají základních fyzikálních zákonů a není tedy potřeba jiných zdrojů energie nebo spouštěcích příkazů (gravitace, rozdíl teplot, přirozená konvekce)

3 Ochranné obálky s ledovým kondenzátorem

3.1 Kontejnment

S tímto systémem vyrovnání tlakového píku během LOCA přišla americká firma **Westinghouse**. Poprvé jí nainstalovala v JE Donald C. Cook. Momentálně jsou nainstalovány na devíti amerických a dvou japonských JE. Podobný bezpečnostní systém je také nainstalován na finské elektrárně s reaktory VVER 440.



Obrázek 3.1: JE Donald C. Cook.

Většina kontejnmentu obsahující tento pasivní systém jsou dvojité. Primární obálka je ocelová a sekundární je železobetonová. Pouze JE Donald C. Cook (výkon 1 060 MW, uvedení do provozu r. 1975 resp. 1978) má jednoduchou železobetonovou obálku s ocelovou výstelkou. Všechny tyto obálky mají oproti jiným o polovinu menší objem.

Rozdělení kontejnmentu:

- **Horní část:**
 - 18 500 m³
 - Sprchový systém (ECCS), zbytek je volný prostor
- **Spodní část:**
 - 7 800 m³
 - Primární okruh a reaktorová nádoba
- **Střední část:**
 - Parní generátory v ohraničené části
 - Kompenzátor objemu
 - Šachta pro odvod páry při LOCA do ledového kondenzátoru (0,2 m²)



Obrázek 3.2: JE firmy Westinghouse, AP1000.

Westinghouse na většině svých elektráren využívá i jiné pasivní ochrany, a to:

- **Plno-tlaková ochranná obálka**, která je naprojektována tak aby při havárii vzniklý maximální tlak vydržela.

- **Sub-atomická obálka**, ta je zase za normálního provozu pod tlakována tudíž při havárii není tlakový pík tak velký.

3.2 Kondenzátoru a jeho funkce

Funkce kondenzátoru lze zapsat do několika bodů, podle času od doby vzniku LOCA havárie.

Tedy:

1. Začátek LOCA havárie:

- dojde ke gilotinovému roztržení primárního potrubí, uniklé chladivo se změní v páru.

2. Odvádění uniklé páry do kondenzátoru:

- vzniklá pára je odváděná šachtou ke vstupním samo výklopným dveřím do kondenzátoru.

3. Vstupní dveře:

- vstupní dveře jsou navrženy tak, aby se sami otevřeli, pokud dojde k překročení navrženého tlaku.

4. Ledový kondenzátor:

- pára prochází skrz koše naplněné ledem (směs ledu a kyseliny borité), díky kterému ihned zkondenzuje a led roztává. Westinghouse uvádí, že na začátku LOCA zkondenzuje 2/3 ledu během 2 až 3 sekund. Zkondenzovaná pára spolu s roztátým ledem ztéká do spodní části kontejnmentu.

5. Konec LOCA havárie:

- Dlouhodobé dochlazování kontejnmentu je zajištěno sprchovým systémem (ECCS). Nejdříve odebírá vodu ze zásobníku a po té ze spodní části ochranné obálky, kde se nachází i zkondenzovaná směs páry s ledem.

3.3 Výhody a nevýhody ledového kondenzátoru

Kondenzátor má **několik předností**, které by se daly shrnout podle [1] takto:

- přetlak při prasknutí primárního potrubí dosáhne pouze 70 až 105kPa
- led zadrží velkou část radioaktivních štěpných produktů
- zastavěný objem v případě primárního okruhu s vertikálními parními generátory lze až o 50% snížit
- náklady na stavbu mohou být podstatně nižší

A však velkou **nevýhodou** je nutnost udržovat led stále v pevném stavu (velké nároky na energii pro provoz chladicího systému). Pokud by se stalo to, že dojde k poruše chladicího systému, mohlo by dojít k roztržení kontejnmentu a úniku radioaktivních štěpných produktů do okolního prostředí.

4 Parafinový kondenzátor

Podle **2.4.3** jsou výhody ledového kondenzátoru zřejmé. Největší výhodou je možnost snížit objem ochranné obálky na polovinu, tudíž je za potřebí i o polovinu méně materiálu na výstavbu takovéto ochranné obálky. Méně materiálu rovná se méně nákladná stavba.

Největší nevýhodou (kapitola **2.4.3**) je nutnost udržovat led v tuhém stavu. Dalo by se tomu předejít právě tím, že by se led vyměnili za jiný materiál o podobných vlastnostech. Nejlépe takový, který by při **pokojevé teplotě (22°C)** zůstal ještě v pevném stavu.

4.1 Materiál

4.1.1 Srovnání běžných látek a PCM

Tradiční materiály (voda, atd.) mají určité fyzikální vlastnosti (ρ, c), které udávají kolik tepla je schopný daný materiál naakumulovat.

Kalorimetrická rovnice běžných látek:

$$Q = \int V \cdot \rho \cdot c dT = V \cdot \rho \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (4.1)$$

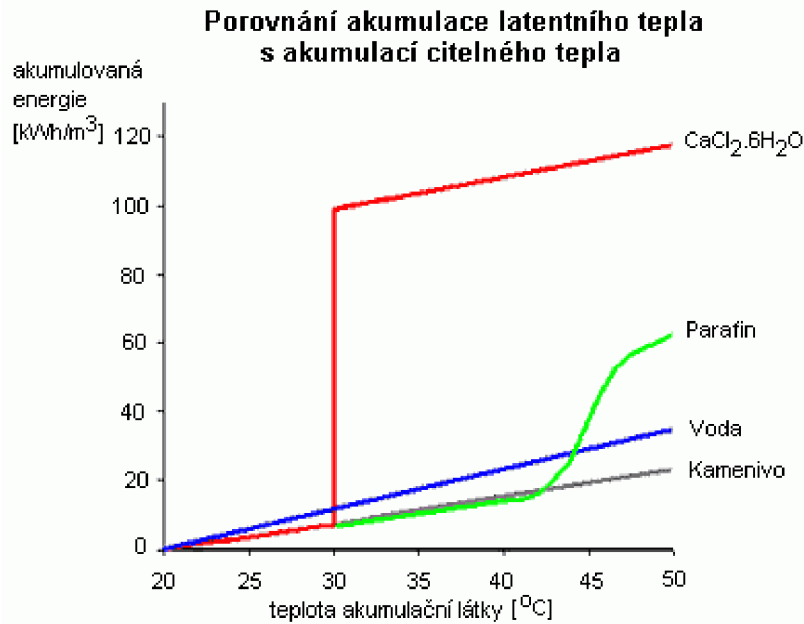
U PCM látek je tomu jinak, nevyužívají pouze citelného tepla ale také tepla potřebného pro změnu fáze.

Kalorimetrická rovnice PCM látek:

$$Q = \int V \cdot \rho_p \cdot c_p dT + V \cdot \rho_t \cdot l_t + \int V \cdot \rho_k \cdot c_k dT \quad (4.2)$$

$$Q = V \cdot [\rho_T \cdot l_T \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot (T_t - T_1) + \rho_k \cdot c_k \cdot (T_2 - T_t)] \quad (4.3)$$

Dobře to lze vidět na grafu akumulace energie pro zásobníky tepla. Parafin naakumuluje mnohem více energie než voda, díky latentnímu teplu, což je pro Parafinový kondenzátor vyhovující.



Obrázek 4.1: Graf porovnání materiálů s PCM.

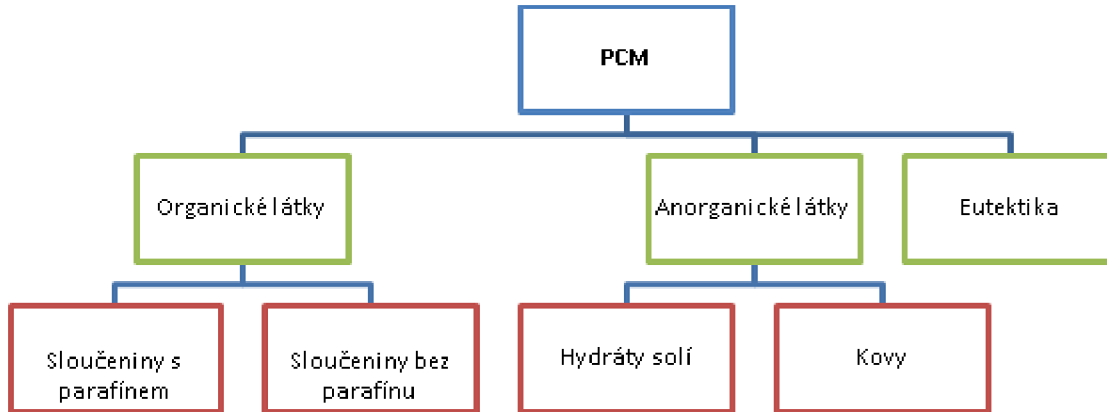
4.2 Rozdělení a požadavky na PCM

Hledaný materiál musí splňovat tyto předpoklady:

- musí patřit do kategorie PCM (Phase Change Material)
- snadno dostupný materiál
- nesmí být korozivní ani toxický
- vysoké skupenské teplo tání
- chemicky stabilní
- nízká hustota v tekutém stavu
- malé objemové změny během tání

-

Rozdělení PCM látek:



Obrázek 4.2: Schéma průběh nabíjení akumulátoru pro PCM a jiné látky.

Organické látky:

- výhody:
 - vysoké měrné skupenské teplo tání
 - chemická stabilita
 - nezpůsobuje korozy
- nevýhody:
 - horší tepelná vodivost
 - relativně velké změny objemu během změny skupenství
 - hořlavost

Anorganické látky:

- výhody:
 - vysoké měrné skupenské teplo tání
 - dobrá tepelná vodivost
 - nehořlavé a levné
- nevýhody:
 - způsobují korozi u většiny kovů
 - rozklad a ztráty hydroskopické vody

Eutektické materiály:

- tepelná vodivost podobná vodě
- objemová změna během tání a krystalizace je 5 až 10%
- chemicky stabilní
- vznik koroze
- nízká teplota tání, pod bodem mrazu

| Kategorie P/NP/MK | Název | | Teplota tání (°C) | Latentní teplo tání (kJ/kg) |
|----------------------|-----------------------|----|-------------------------|--------------------------------|
| P | Počet atomů uhlíku | 14 | 5.5 | 228 |
| P | | 16 | 16.7 | 237.1 |
| P | | 20 | 36.7 | 246 |
| NP | D-kyselina mléčná | | 26 | 184 |
| | Trimyristin | | 33-57 | 201-213 |
| MK | Kyselina octová | | 16.7 | 184 |
| MK | Polyetylen glykol 600 | | 20-25 | 146 |
| MK | Kyselina palmitová | | 55 | 163 |
| MK | Kyselina myristová | | 58 | 199 |

Tabulka 4.1: Druhy PCM a jejich latentní teplo.

Organické a Eutektické materiály nejsou vhodné pro použití v kondenzátoru, protože způsobují korozi u většiny kovů.

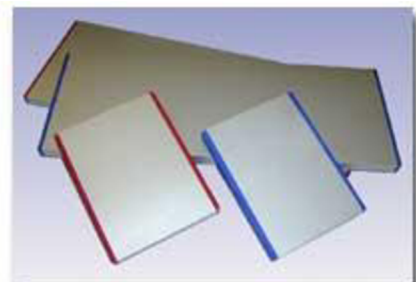
Eutektické kovy mají také příliš nízkou teplotu tání, ta je menší než u ledu (pod bodem mrazu).

Navrhovaný kondenzátor se řadí jako pasivní prvek v JE, což vylučuje další materiál a to hydráty soli. Mechanické míchání vyžaduje vynaložení velké části energie, jinak se materiál dostatečně nerozpustí (ucpání odtoku materiál). Krom jiného také způsobují korozi.

Organické látky jsou přijatelnější a to především sloučeniny s parafínem. Mají dobrou teplotu tání, velké latentní teplo a hlavně také výhodnější cenu.

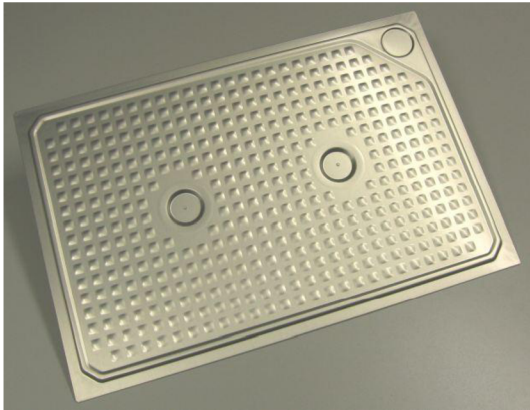
4.2.1 Výběr parafínu

Vhodným materiálem disponuje německá firma RubiTherm [3]. Firma zabývající se vývojem a výrobou PCM existuje od r. 1993. Prodávají parafínové PCM ve velkých rozsazích teplot, dokonce jsou schopni



Obrázek 4.3: Zdravotnické potřeby z PCM materiálu.

upravit materiál pro potřebnou teplotu tání. Jejich látky mají velkou tepelnou kapacitu a velkou škálu použití. CMS panely, které se používají např. v botanické zahradě v Berlíně, jsou jejich osvědčeným patentem. Dále disponují terapeutickými a zdravotnickými pomůckami využívající PCM látek.



Obrázek 4.4: CSM panely.

Vyráběné produkty RubiThermu se řadí do několika kategorií, a to:

- řada RT:
- řada SP:
- řada PX:
- řada GR:
- řada PK:

Produkt RT má největší tepelnou kapacitu. Kondenzátor nebude obsahovat chladicí systém za normálního provozu, tudíž hledaný produkt musí mít teplotu nad hranici teploty uvnitř kontejneru (26,85 °C). Nejvíce se hodí **produkt RT 28 HC** nebo **RT 31**.

RT 28 HC:

- teplota tání ... 28 °C
- **Tepelná kapacita (19,5 C do 34,5 C) ... 245 kJ/kg**
- Hustota ... 0,824 kg/l = 0,824 g/cm³
- Tepelná vodivost ... 0,2 W/mK
- Teplota vznícení ... 165 °C

RT 31:

- teplota tání ... 29 °C
- **Tepelná kapacita (19,5 C do 34,5 °C) ... 169 kJ/kg (o 45% menší)**
- Hustota ... 0,82 kg/l = 0,82 g/cm³
- Tepelná vodivost ... 0,2 W/mK
- Teplota vznícení ... 174 °C (o 5% vyšší)



Obrázek 4.5: Ukázka materiálu RT

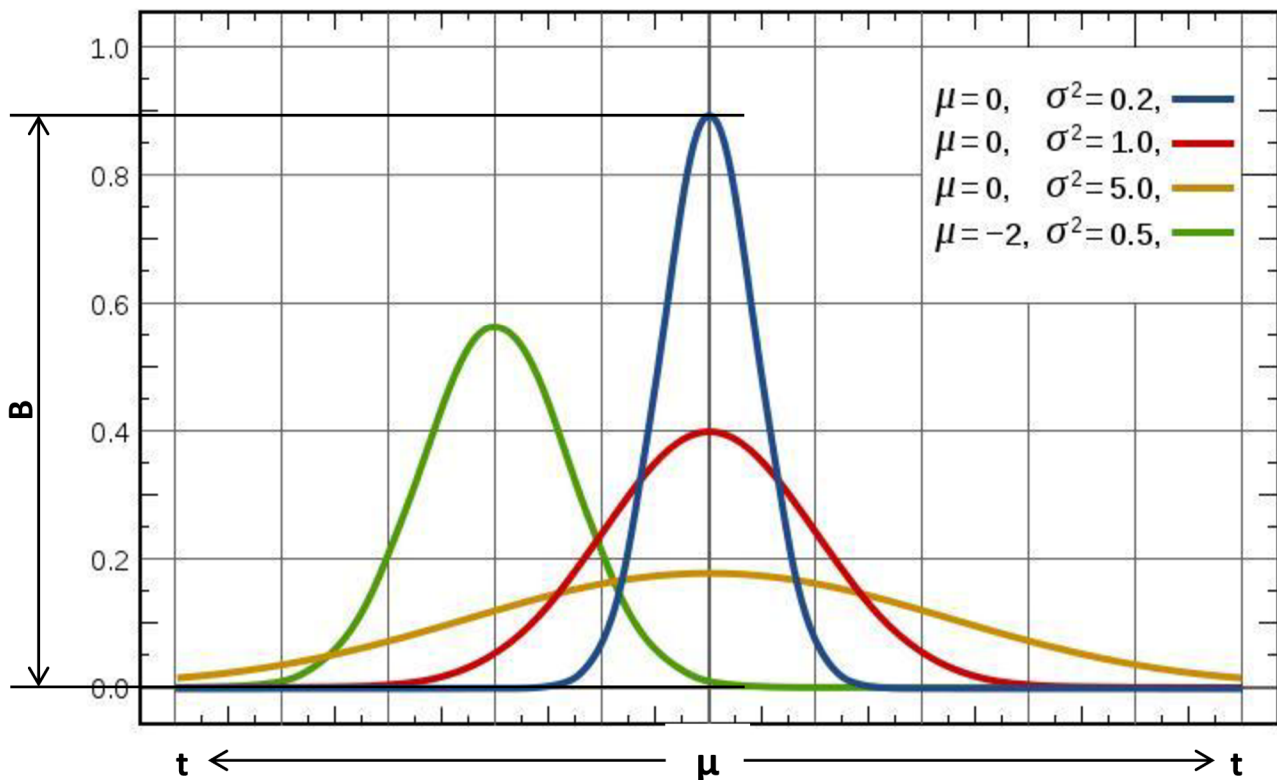
Pokud se budeme řídit tepelnou kapacitou je vyhovující spíše RT 28 HC, ale teplota vznícení je o 5% menší. RT 31 má zase tepelnou kapacitu přímo v bodě tání mnohem menší. Potřebná látka musí mít co největší tepelnou kapacitu.

4.2.2 Tepelná kapacita RT 28 HC a RT 31

Rubitherm nedisponuje daty o tepelné kapacitě okolo bodu tání (2 200 J/kg.K), musí se tedy vypočítat s dostupných dat. Tepelná kapacita v tuhém a kapalném stavu je stejná, ale zásadně se mění v přechodovém stavu (řídí se tzv. Gaussovou křivkou). Pomocí Gaussovi křivky zjistíme tepelné kapacity u teplot v přechodové oblasti.

$$Cp(t) = A + B * e^{-\frac{(\mu-t)^2}{\sigma^2}} \left[\frac{kJ}{kg * K} \right] \quad (4.4)$$

Vzorec tepelné kapacity v přechodové oblasti:



Graf 1: Druhy Gaussovi křivky.

A ... tepelná kapacita v tuhém a tekutém stavu [kJ/kg.K]

B ... tepelná kapacita v přechodovém stavu při teplotě tání [kJ/kg.K]

μ ... teplota tání (střed Gaussovi funkce) [°C]

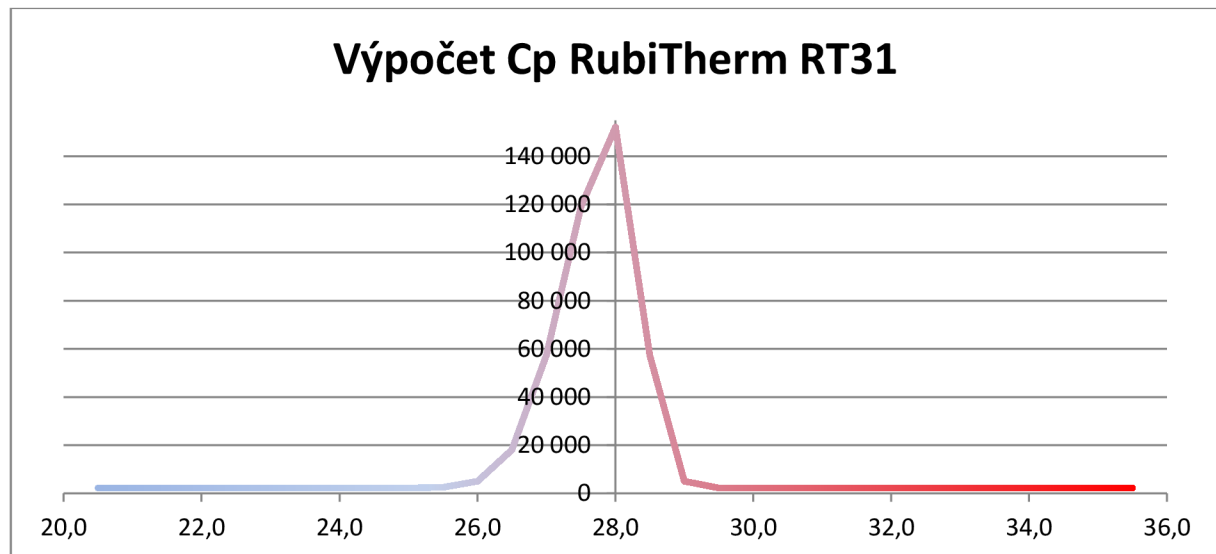
t ... příslušná teplota [°C]

σ ... šířka „kopce“ Gaussovi funkce [-]

Z dostupných hodnot byla zjištěna celková plocha pod křivkou v rozmezí 15°C ($\mu-t$; $\mu+t$). Středem toho rozmezí je teplota tání (μ). Kapacita tuhého a kapalného stavu byla stanovena Rubithermem na 2,2 kJ/kgK. Výška (B) a šířka (σ) „kopce“ se volila tak, aby teplota, při které začne PCM měknout, byla na začátku růstu Gaussovy funkce. Naopak teplota kdy PCM se rozteče bude na klesajícím konci a součet pod křivkou se musí rovnat hodnotě udané v technických datech (viz graf 4.6 a 4.7). Průběh funkce je vypočítán pomocí Excelu, výpočet je umístěn v přílohách na CD.

Tabulka 4.2: Tepelná kapacita RT 28 HC.

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|-------|
| T [°C] | 20,5 | 21,5 | 22,5 | 23,5 | 24 | 24,5 | 25 | 25,5 | 26 | 26,5 | 27 | 27,5 | 28 |
| Cp [kJ/kgK] | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,21 | 2,45 | 4,95 | 18 | 57,381 | 119 | 152,2 |
| T [°C] | 28,5 | 29 | 29,5 | 30 | 30,5 | 31 | 31,5 | 32 | 32,5 | 33 | 33,5 | 34,5 | 35,5 |
| Cp [kJ/kgK] | 57,38 | 4,95 | 2,22 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 |



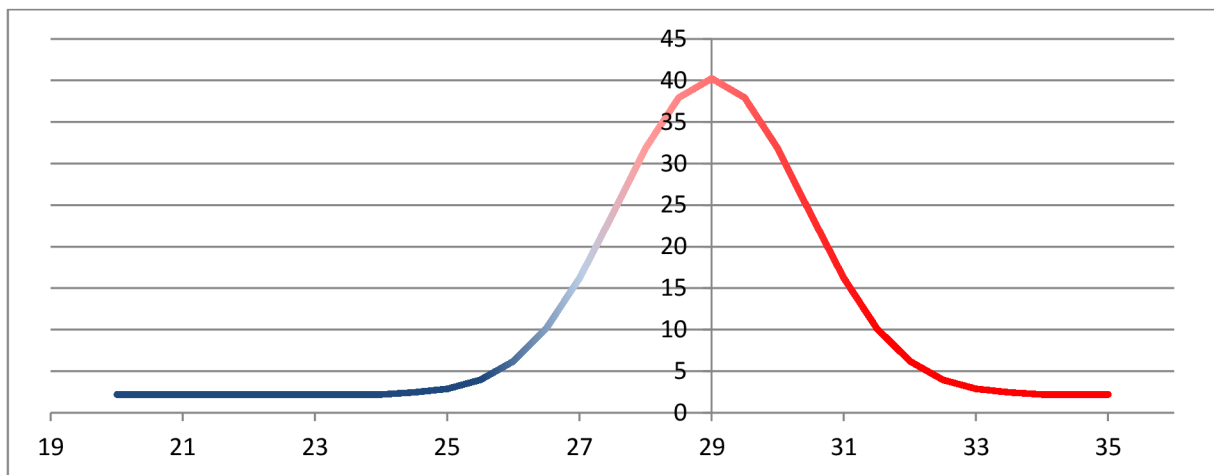
Obrázek 4.6: Graf Gaussovi funkce tepelné kapacity RT 28 HC.

Zde je ještě rozdíl v tom, že funkce roste pomaleji, než klesá. Je to dáno tím, že rozmezí teploty přechodu bylo od 27°C do 28°C a teplota tání necelých 28°C. Na levé straně je $\sigma^2 = 1$ a pravá strana má $\sigma^2 = 0,5$.

$$Cp(t) = 2,2 + 150 * e^{-\frac{(\mu-t)^2}{\sigma^2}} \left[\frac{kJ}{kg * K} \right] \quad (4.5)$$

Tabulka 4.3: Tepelná kapacita RT 31.

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|------|-------|--------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|
| T [°C] | 20 | 22 | 23 | 23,5 | 24 | 24,5 | 25 | 25,5 | 26 | 26,5 | 27 | 27,5 |
| Cp [kJ/kgK] | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,22 | 2,23 | 2,4 | 2,8 | 3,98 | 6,21 | 10,17 | 16,2 | 23,88 |
| T [°C] | 28 | 28,5 | 29 | 29,5 | 30 | 30,5 | 31 | 31,5 | 32 | 32,5 | 33 | 35 |
| Cp [kJ/kgK] | 31,83 | 37,9 | 40,25 | 37,945 | 31,8 | 23,88 | 16,2 | 10,2 | 6,21 | 3,98 | 2,9 | 2,20 |



Obrázek 4.7: Graf Gaussovi funkce tepelné kapacity RT 31

V tomto případě funkce rostla a klesala stejně, protože teploty přechodu jsou 27°C až 31°C a teplota tání je přímo uprostřed 29°C. Pro celou funkci je voleno $\sigma^2 = 2$, protože rozsah je širší, než tomu je u RT 28 HC.

$$Cp(t) = 2,2 + 38,05 * e^{-\frac{(\mu-t)^2}{\sigma^2}} \left[\frac{kJ}{kg * K} \right] \quad (4.6)$$

Z obou grafů je zřejmé, že v případě materiálu **RT 28 HC** jsou tepelné kapacity mnohem větší, než je tomu u RT 31. Pro parafinový kondenzátor použijeme tedy tento materiál.

4.2.3 Výpočet Entalpie parafínu

Pro tepelný výpočet je nezbytné znát entalpie obou látek (pára, parafín). Entalpie páry se dá zjistit pomocí programu X-steam (viz CD/přílohy/X-steam.xls), pro parafín je potřebné si entalpii vypočítat. Použijí se hodnoty tepelné kapacity vypočítané výše. Pokud budu uvažovat, že entalpie při teplotě 0°C je 0. Pak vzorec vypadá takto:

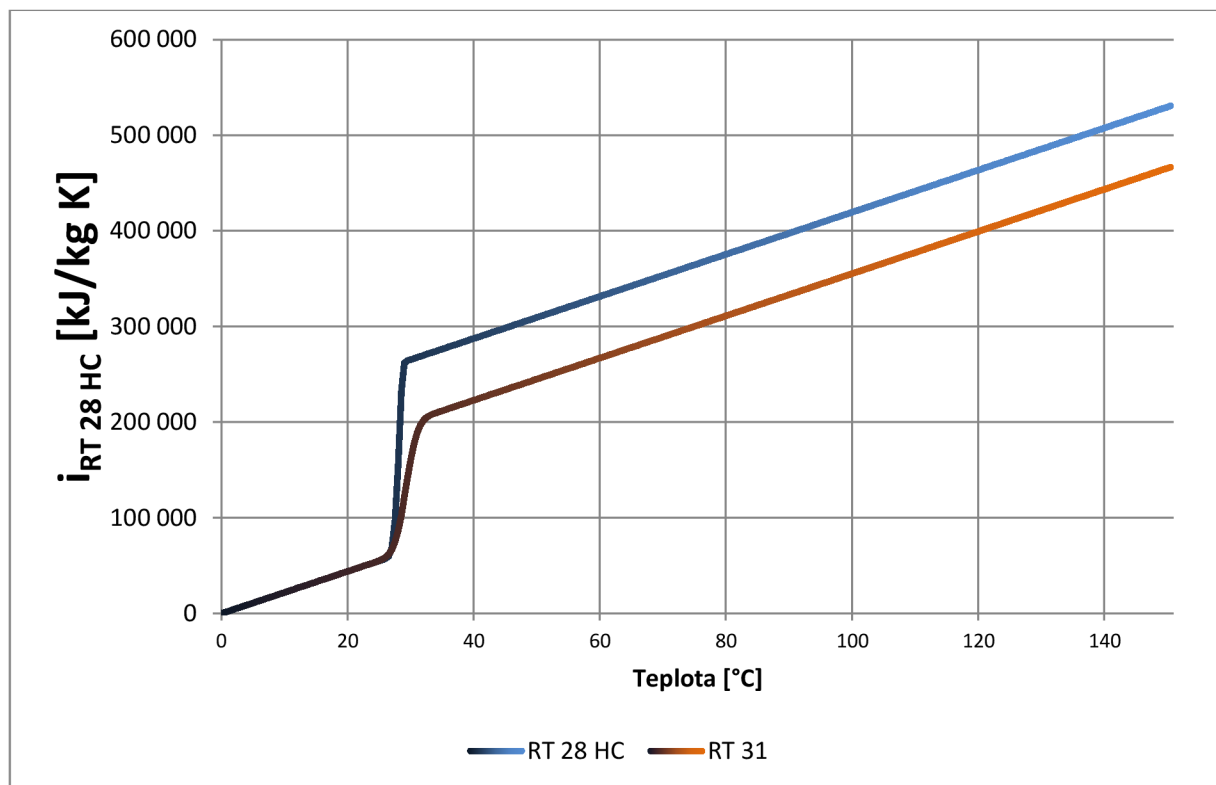
$$i_{RT}(t_i) = i_{RT,(i-1)} + c_p(t_{i-1}) * (t_i - t_{i-1}) \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (4.7)$$

Pro teplotu 29°C vypadá rovnice po dosazení takto:

$$i_{RT}(29) = 233,1 + 57,4 * (29 - 28,5) \quad (4.8)$$

$$i_{RT}(29) = 261,8 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (4.9)$$

Zbytek vypočtených hodnot pro teploty 0°C až 150°C je umístěn v Excel tabulce (viz CD/přílohy/RubithermRT28HC_entalpie.xlsx), jsou zde umístěny i výpočty tepelných kapacit a entalpií pro ostatní materiály Rubithermu. Pro ukázkou je zde a v přílohách diplomové práce uveden graf entalpie.



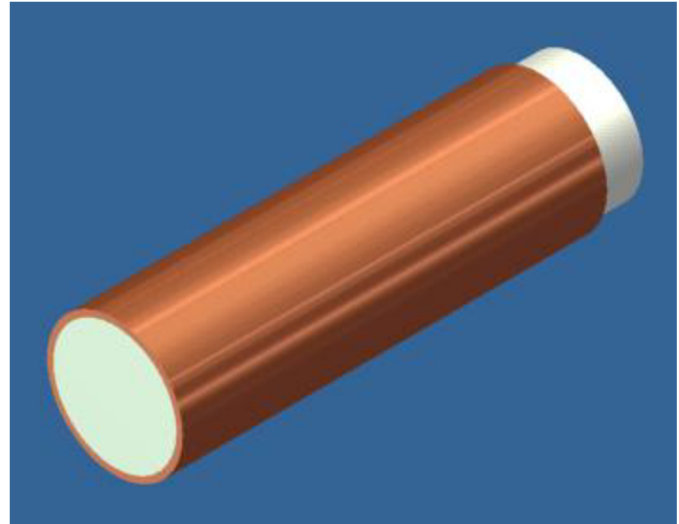
Graf 2: Entalpie RT parafinu od Rubitherm.

4.3 2.5.2 Konstrukce kondenzátoru

4.3.1 Volba potrubí

U parafinového kondenzátoru musí medium, tedy parafín, být oddělen od páry stěnou. Hlavně z toho důvodu že zkondenzovaná pára se nesmí smísit s parafínem, aby jí bylo možno dále používat pomocí ECCS (sprchového systému). Mohlo by dojít buď k ucpání, nebo vznícení.

Materiál, z kterého bude potrubí vyrobeno, musí mít dobrou tepelnou vodivost a vydržet teploty okolo 300°C. Pro dobrý přenos tepla jsou nejvhodnější měděné potrubí.



Obr. 4.1: Měděné potrubí s parafínem.

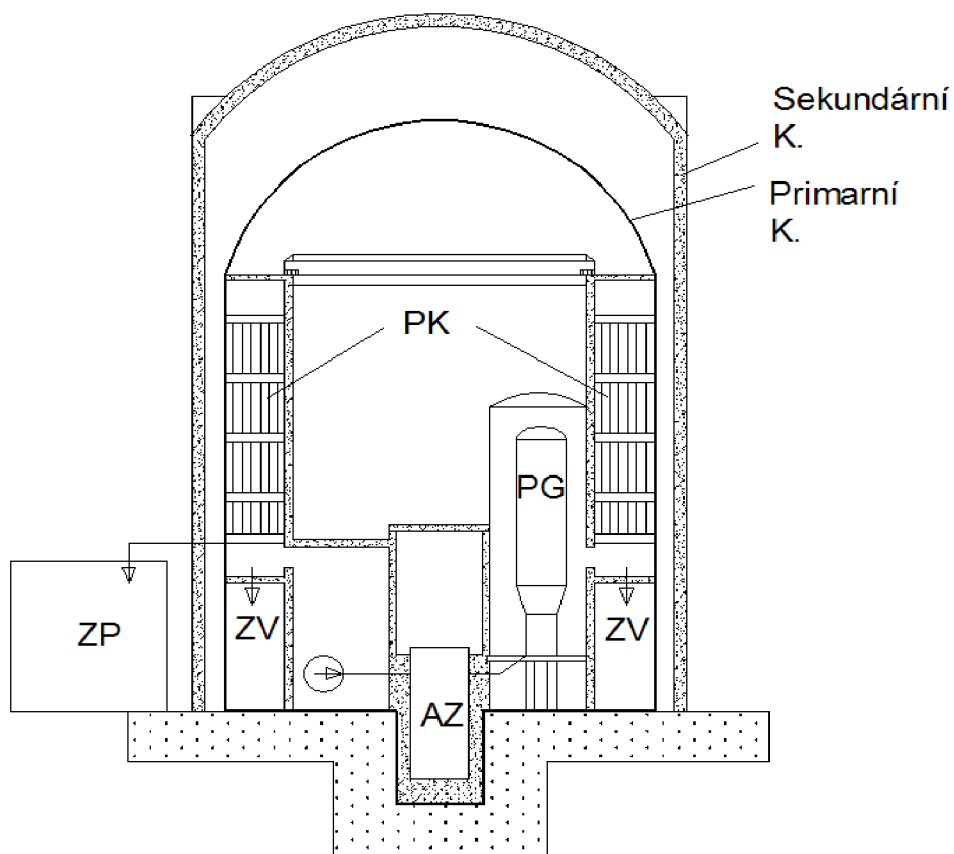
- Měděné potrubí:
 - Bod tání 1083°C
 - Tepelná vodivost 339 W/mK

4.3.2 Umístění v kontejnmentu

Při LOCA se pára dostane do prostoru kondenzátoru a svým pohybem vzhůru začne omývat povrchy trubek s parafínem. Pára se začne ochlazovat, až zkondenzuje na povrchu potrubí a steče směrem dolů, kde bude odváděna do zásobníku. Odtud bude čerpána pro sprchový systém ECCS. V prostoru kontejnmentu se zmenší teplota a tedy i tlak.

Parafín uvnitř potrubí díky akumulaci tepla začne měnit svoji fázi z tuhé na kapalnou. Kapalným parafínem bude odtékat z potrubí do zásobníku mimo kontejnment. Je to z toho důvodu, aby teplota parafínu v zásobníku zbytečně nezvyšoval teplotu v kontejnmentu a tudíž i tlak.

Energetický ústav

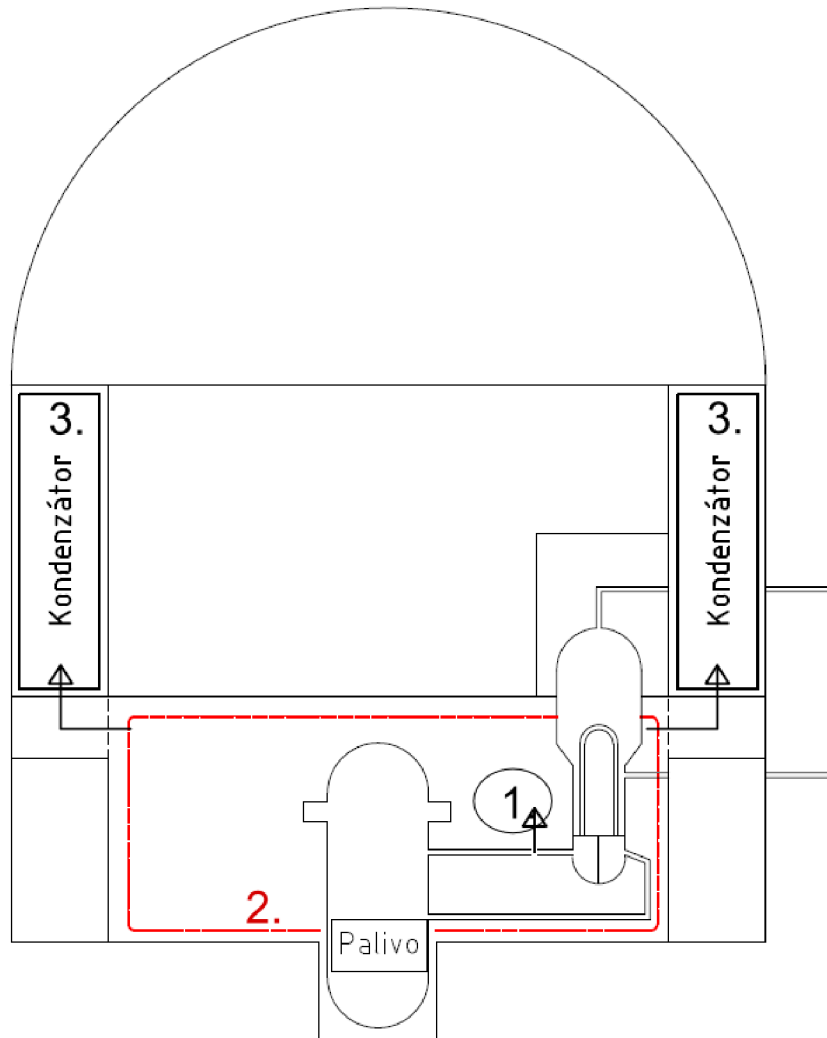


Obrázek 4.8: Schéma kontejnmentu s parafinovým kondenzátorem.

AZ ... aktivní zóna; PG ... parogenerátor; ZV ... zásobníky zkondenzované vody;
PK ... Parafinový kondenzátor; ZP ... zásobník parafínu

5 Výpočet a návrh kondenzátoru s parafínem

5.1 Rozbor výpočtu



Obrázek 5.1: Schéma postupu výpočtu

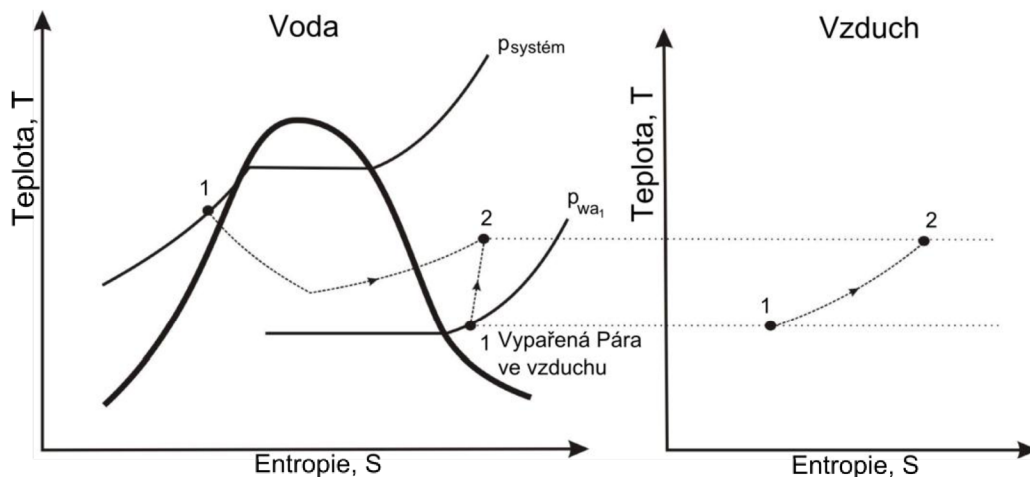
Výpočet je rozdělen do několika částí podle problematiky výpočtu a každý z nich je v samostatných kapitolách.

- 1) V počátku je potřeba zjistit jak expanduje chladivo z primárního okruhu. PWR reaktory mají chladivo v primárním okruhu o teplotě 618 K a tlaku 15,5 MPa, jakmile unikne do prostoru kontejnmentu, změní se její tlak i teplota. Tento problém je řešen v **kapitole 5.2** a samotný výpočet v **kapitole 5.5.1**.
- 2) Je potřeba si uvědomit, že než dorazí pára do kondenzátoru, částečně se schladí o zdi v kontejnmentu. Akumulace bude pouze částečná (cca 1 cm), protože úplná akumulace do zdiva by trvala hodiny. Viz **kapitola 5.3** a výpočet viz **kapitola 5.5.2**.

- 3) Po akumulaci a překročení nastaveného tlaku otevření dveří do kondenzátoru začne pára vnikat do kondenzátoru a kondenzovat. Problematika přestupu tepla přes film kondenzátu je řešena v **kapitole 5.4** a její výpočet v **kapitole 5.5.3**. Na konci z kondenzované páry stéká do spodní části ochranné obálky a je dále využívána přes filtry pro ECCS systém.

5.2 Zvýšení tlaku v kontejnmentu během LOCA

Výtok chladiva z primárního systému má za následek smíchání dvou kapalin v kontejnmentu za konstantního objemu. Dojde ke zvýšení tlaku a teploty. Pro výpočet je proveden podle knihy *Nuclear systém 1: Thermal hydraulic fundamentals*.



Obrázek 5.2: T-s diagram smíchání páry v kontejnmentu

Posloupnost výpočtu v knize je následovná. V první části výpočtu se zjišťuje suchost páry při smíchání vlhkého vzduchu nacházejícího se v kontejnmentu na začátku, a páry vzniklé při LOCA. Hodnoty potřebné pro výpočet, jako okolní teplota ochranné obálky, tlak, relativní vlhkost, jsou známy. Zbylou hodnotu a to výslednou teplotu T_2 je potřeba si zvolit.

V druhé části se zjišťuje stejná suchost páry ale pomocí rovnováhy energií, které jsou uvolněny při gilotinovém přetržení chladicího okruhu.

Výpočet je potřeba opakovat do té doby dokud se nebudou výsledné suchosti rovnat a to pomocí změny volené výsledné teploty T_2 . Proto je nejlepší využít pro výpočet program, kde budou navoleny níže uvedené rovnice a bude se pouze měnit výsledná teplota.

Jakmile jsou si suchosti rovny, bude nám takto volená teplota udávat nárůst tlaku v kontejnmentu (tlak odpovídající této teplotě uvedený v parních tabulkách).

Výsledný tlak se musí sečíst s atmosférickým tlakem v ochranné obálce.

5.2.1 Výpočet suchosti páry pomocí měrných objemů

$$x_{st} = \frac{\frac{V_T}{m_w} - v_{f_2}}{v_{fg_2} - v_{f_2}} \quad (5.1)$$

v_{f_2} měrný objem nasycené kapaliny při teplotě okolí kontejnmentu na konci LOCA

v_{fg_2} měrný objem vypařování při teplotě okolí na konci LOCA

V_T celkový objem (kontejnmentu a kapaliny v primárním systému)

m_w hmotnost vody ($m_{wa} + m_{wp}$)

5.2.2 Hmotnost vzduchu a vody v prostoru ochranné obálky

První hodnotu, kterou potřebujeme zjistit je hmotnost suchého vzduchu. Ten nalezneme pomocí stavové rovnice.

$$m_a = \frac{p_{a_1} V_c}{R_a T_{a_1}} \quad (5.2)$$

Známe veličiny:

- Objem kontejnmentu V_c
- Měrná plynová konstanta suchého vzduchu R_a
- Teplota v prostoru kontejnmentu na začátku T_{a_1}

Hmotnost vody v prostoru kontejnmentu m_{wa} a hmotnost vody v primárním systému m_{wp} zjistíme podle následujících rovnic.

$$m_{wa} = \frac{V_c}{v_{wa_1}} \quad (5.3)$$

$$m_{wp} = \frac{V_p}{v_{wp}} \quad (5.4)$$

Kde v_{wa_1} je hodnota měrného objemu přehřáté páry na počátku LOCA při tlaku p_{w_1} a teplotě T_{a_1} z tabulek páry. Měrný objem primárního systému v_{wp} také najdeme v tabulkách páry ale při tlaku primárního systému na počátku LOCA, tedy provozní tlak.

Parciální tlak suchého vzduchu se vypočítá pomocí Daltonova zákona.

Energetický ústav

$$p_{a_1} = p_1 - p_{w_1} \quad (5.5)$$

Kde p_1 je atmosférický tlak uvnitř prostoru a p_{w_1} je parciální tlak páry, který se dá jednoduše vypočítat díky známé relativní vlhkosti a saturačního tlaku při teplotě T_1 . Saturační tlak se nachází tabulkách mokré páry nebo pomocí programu X-steam.

$$p_{w_1} = \phi \cdot p_{sat}(T_1) \quad (5.6)$$

5.2.3 Výpočet suchosti páry z rovnice energetické bilance

Energetickou bilanci vypočteme pomocí množství vody (m_w) a rozdílu entalpií na počátku a na konci LOCA. Množství vody je směs vypařené vody ve vzduchu a vody v primárním systému.

$$m_{wp}(u_{f_2} + x_{st}u_{fg_2} - u_{wp_1}) + m_{wa}(u_{f_2} + x_{st}u_{fg_2} - u_{wa_1}) + m_a c_{va}(T_2 - T_{a_1}) = 0 \quad (5.7)$$

| | |
|------------|--|
| x_{st} | hledaná sytost páry |
| m_{wp} | hmotnost vody primárního systému |
| m_{wa} | hmotnost vody obsažené ve vzduchu kontejnmentu |
| m_a | hmotnost vzduchu v kontejnmentu |
| u_{f_2} | entalpie nasycené vody při teplotě T_2 |
| u_{fg_2} | entalpie nasycených par při teplotě T_2 |
| u_{wp_1} | entalpie nasycené kapaliny při tlaku primárního okruhu na počátku |
| u_{wa_1} | entalpie přehřátých par při teplotě okolí (T_{a_1}) a tlaku par (p_{w_1}) v kontejnmentu |
| c_{va} | měrné teplo vzduchu za konstantního objemu |
| T_2 | volená teplota okolí kontejnmentu na konci LOCA |
| T_{a_1} | teplota okolí kontejnmentu na počátku LOCA |

Entalpie na konci LOCA je směs dvou entalpií, nasycené kapaliny a páry o nějaké suchosti. Tato suchost se musí rovnat se suchosti vyjádřené v kap. 5.2.1. Po vyjádření bude rovnice vypadat následovně.

$$x_{st} = \frac{m_a c_{va}(T_2 - T_{a_1}) + m_{wp}(u_{wp_1} - u_{f_2}) + m_{wa}(u_{wa_1} - u_{f_2})}{u_{fg_2}(m_{wp} + m_{wa})} \quad (5.8)$$

5.2.4 Výsledný tlak a teplota

Jakmile se budou suchosti s obou výpočtu rovnat, budeme také znát teplotu T_2 . Pomocí tabulek páry nebo X-steamu zjistíme odpovídající tlak páry na konci LOCA (při T_2). V poslední řadě je potřeba přičíst ještě tlak vzduchu, který se nám zvýšil v důsledku zvýšené teploty na konci LOCA.

Tlak vzduchu:

$$p_{a_2} = \frac{m_a R_a T_a}{V_T} \quad (5.9)$$

Celkový tlak:

$$p_2 = p_{w_2} + p_{a_2} \quad (5.10)$$

S tímto celkovým tlakem p_2 můžeme počítat v dalších částech výpočtu.

5.3 Akumulace tepla do zdiva

Teplu, které je obsaženo v párách z primárního systému se částečně naakumuluje do zdiva, po dobu cesty a otevření dveří do kondenzátoru. Teplu předané zdivu se vypočítá

$$Q = m_b \cdot c_p \cdot (T_2 - T_{z_1}) \quad (5.11)$$

pomocí následující rovnice.

c_p tepelná kapacita zdiva

T_2 teplota okolního prostředí

T_{z_1} teplota zdiva na počátku

$$m = V_z \cdot \rho_z \quad (5.12)$$

V_z objem zdiva

ρ_z hustota zdiva

Teplotu ochlazené páry zjistíme podle rozdílu entalpií na začátku a na konci. Výslednou hodnotu teploty páry nalezneme pomocí této entalpie v tabulkách páry nebo X-steamu.

$$Q = I_2 - I_1 \rightarrow I_1 \quad (5.14)$$

$$I_1 = Q - I_2 \quad (5.13)$$

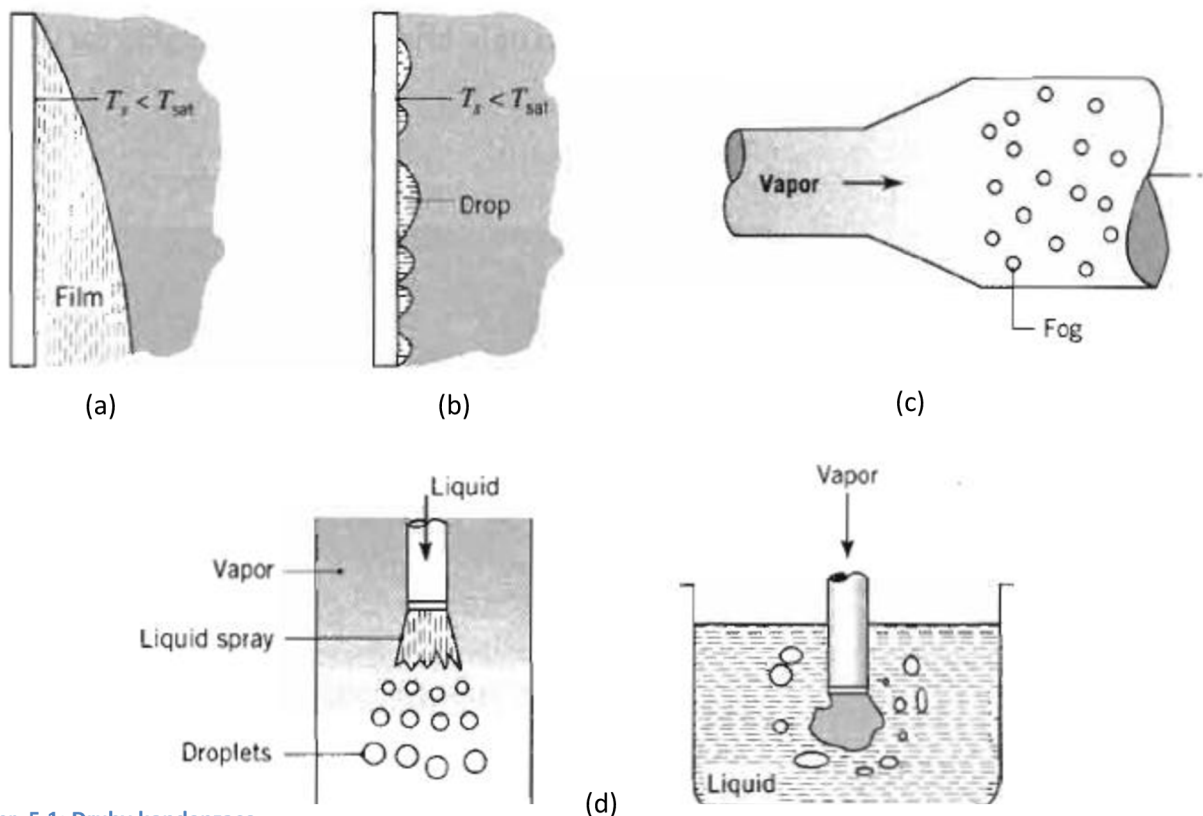
I_1 entalpie páry na konci

I_2 entalpie páry na začátku

5.4 Kondenzace

Kondenzace nastává v případě, že teplota páry klesne pod bod saturace. V průmyslovém zařízení k tomuto obvykle dochází při kontaktu mezi párou a studeným povrchem (obr). Latentní energie páry je uvolněna, teplo je přenášeno na studený povrch a vzniká kondenzace. Ostatní způsoby kondenzace jsou homogenní (obr 10.9C), kde pára kondenzuje v podobě kapek, které tvoří mlhu. Kontaktní kondenzace (obr 10.9D) nastává, když pára je přivedena do kontaktu se studenou kapalinou. Tato práce se bude zajímat pouze o filmovou a kapičkovou kondenzaci, která je potřebná pro výpočet kondenzátoru.

Kondenzace může nastat dvěma způsoby, závisí to na podmínkách kontaktního povrchu. Dominantní formou kondenzace je ta, kdy kapalným filmem zakryje celý studený povrch



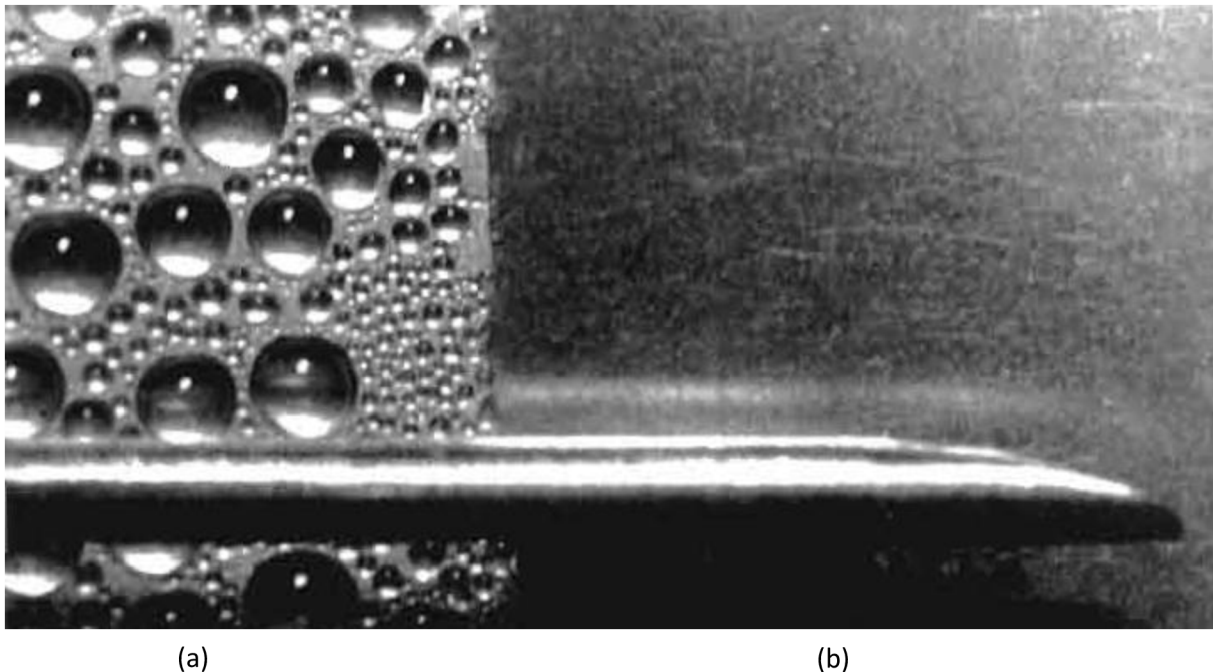
Obr. 5.1: Druhy kondenzace

(a) Filmová kondenzace, (b) Kapičková kondenzace, (c) Homogenní kondenzace, (d) Kontaktní kondenzace

a díky gravitační síle proudí neustále z povrchu. Filmová kondenzace je dosažena za podmínky čistého povrchu. Pokud je povrch potažen látkou, která zabrání vlhnutí, nastane kapičková kondenzace (90% povrchu obsahuje kapičky kondenzátu, zbytek splývá ve film

kondenzátu). Kapičky proudí, opět díky gravitační síle, z povrchu pryč. Filmová a kapičková kondenzace je ukázána na obr. 10.10. Tenký měděný oleát byl aplikován na povrchu v pravé straně obrázku, kde jde vidět kapičková kondenzace (kapičky mají cca 1 mm v průměru).

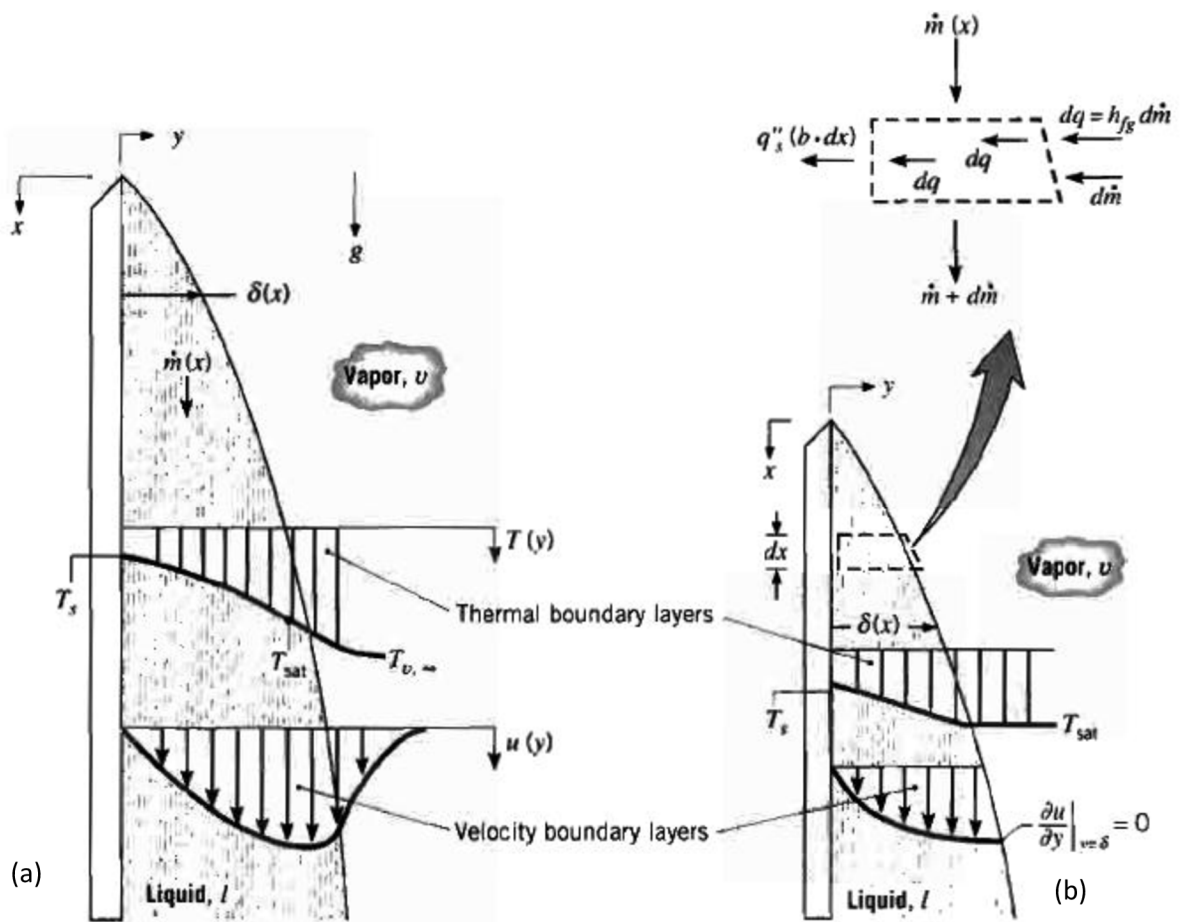
Bez ohledu na to jestli se jedná o kapičkovou nebo filmovou kondenzaci vždy nastává problém s přenosem tepla mezi párou a studeným povrchem. Tento problém je zapříčiněn vrstvou kondenzátu. Mnoho aplikací kondenzátoru z tohoto důvodu používá svazek trubek umístěných horizontálně, skrz které proudí chladicí kapalina a okolo trubek kondenzuje pára. Tento fakt je však pro parafinový kondenzátor je nežádoucí. Parafín, umístěný v trubkách, musí odtékat pomocí gravitační síly pryč z kondenzátoru. Pro vyšší rychlost kondenzace a tedy lepšímu přestupu tepla, by bylo vhodnější využít kapičkové kondenzace než filmové (kapky jsou v řádech μm). Lze to způsobit nátěrem povrchu, který zpomalí vlhnutí (silikon, teflon, vosk, mastné kyseliny). Nicméně, takovýto nátěr po chvíli ztratí svou efektivnost prostřednictvím oxidace, nánosu nebo bude definitivně odstraněn z povrchu a nastane filmová kondenzace. Pro návrh kondenzátoru je tedy výhodnější použít výpočet pomocí filmové kondenzace.



Obr. 5.2: Kondenzace na vertikálním povrchu

5.4.1 Laminární filmová kondenzace páry

Na obr 10.11 A lze vidět komplikaci pro přestup tepla, film kondenzátu vzniká na vrcholu stěny a proudí směrem dolů díky gravitační síle. Tloušťka filmu δ a hmotnostní průtok se zvyšuje se zvyšováním x (výška stěny). Teplota páry T_{SAT} , která proudí skrz film na povrch stěny, musí být větší než teplota stěny T_s ($T_{sat} > T_s$).



Obr. 5.3: Filmová kondenzace na vertikálním povrchu.

(a) Bez Nusseltové analýzy; (b) s Nusseltovou analýzou, pro svislou desku o šířce b

Jako výchozí rovnici použijeme základní rovnici přirozené konvekce. Přidáme gravitační zrychlení, a protože tato síla působí ve směru x -ové osy bude znaménko před ní plus. Po úpravě vypadá pohybová rovnice takto.

$$u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} = -\frac{1}{\rho_f} \cdot \frac{dp}{dx} + g + v \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} \quad (5.15)$$

Filmová kondenzace zavádí do pohybové rovnice několik podmínek:

- 1) Tlakový gradient musí být způsoben pouze výškou sloupce syté páry.

$$\frac{dp}{dx} = \rho_v g \quad (5.16)$$

- 2) Smykové napětí na hranici blány kondenzátu a syté páry musí být nulové. Dle okrajových podmínek pro $y = 0$ je $u = v = 0$ a pro $y = \delta$ je $\frac{\delta u}{\delta y} = 0$
- 3) Druhá podmínka zavádí do rovnice šířku mezní vrstvy (kondenzátu), abychom jí mohli spočítat, musíme provést energetickou bilanci. Díky tomu nám do pohybové rovnice vstupuje teplotní diference ($T_{sat} - T_w$), podobně tomu je při řešení přirozené konvekce jednofázové tekutiny.
- 4) Protože latentní teplo kapaliny pro nízké tlaky je velice vysoké a tudíž i při velkých přenášených tepelných tocích je film kondenzátu velmi tenký. Setrvačné síly na levé straně rovnice můžeme zanedbat, protože kondenzát stéká velmi pomalu (laminární

$$u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} = 0 \quad (5.17)$$

proudění).

Výsledkem je rychlost u , která je funkcí y a tloušťky filmu kondenzátu δ . Přičemž tloušťka kondenzátu δ je funkcí podél stěny $\delta = f(x)$, a proto rychlost u je také funkcí x . Nicméně závislost na y je výrazně převažující a proto píšeme

$$\frac{d^2 u}{dy^2} = -\frac{g}{\mu} \cdot (\rho_l - \rho_v) \quad (5.18)$$

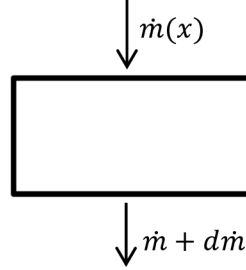
Dvojitou integrací a zavedení podmínek z 2), bude rovnice po úpravách vypadat následovně.

$$u = \frac{(\rho_l - \rho_v) \cdot g \delta^2}{\mu_l} \cdot \left[\left(\frac{y}{\delta} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right] \quad (5.19)$$

Šířku filmu kondenzátu zjistíme pomocí hmotnostního toku přitékajícího do objemového elementu.

$$\frac{\dot{m}(x)}{b} = \int_0^\delta \rho_l u(y) dy \quad (5.20)$$

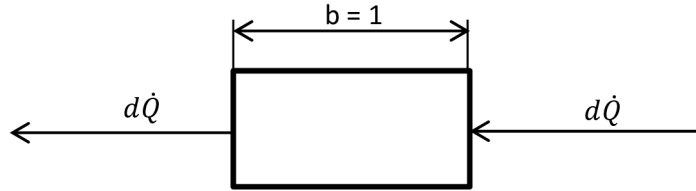
Dosadíme rovnici pro rychlost u a integrujeme. Dostali jsme množství kondenzátu \dot{m} vstupující do kontrolního objemu. V důsledku pokračující kondenzace přičteme dle bilance na obr. 5.3 (b) $d\dot{m}$, tímto dostaneme množství pokračující z kontrolního objemu.



$$\dot{m} = \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v) \cdot g \delta^3}{3\mu_l} \quad (5.21)$$

$$d\dot{m} = \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} \cdot dx = \frac{\partial \dot{m}}{\partial \delta} \cdot \frac{d\delta}{dx} = \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v) \cdot g \delta^2}{\mu_l} \cdot d\delta \quad (5.22)$$

Dále podle tepelné bilance na obr. 5.3 (b) vstupuje latentní teplo uvolněné kondenzací a tvoří film kondenzátu. Naopak zase vystupuje teplo do studené stěny.



$$\dot{Q} = \dot{q} dx \cdot b = \frac{T_{SAT} - T_w}{\frac{\delta}{\lambda}} \cdot dx \cdot b \quad (5.23)$$

$$d\dot{Q} = h_{fg} \cdot d\dot{m} \quad (5.24)$$

$$d\dot{Q} = d\dot{Q} \quad (5.25)$$

$$\frac{T_{SAT} - T_w}{\frac{\delta}{\lambda}} \cdot dx = h_{fg} \cdot d\dot{m} \quad (5.26)$$

$$d\dot{m} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \frac{1}{h_{fg}} \cdot (T_{SAT} - T_w) \cdot dx \quad (5.27)$$

Dosadíme $d\dot{m}$ a vyjádříme tloušťku kondenzátu a integrujeme podle osy x .

Energetický ústav

$$\delta(x) = \left[\frac{\lambda_l \mu_l (T_{SAT} - T_w) x}{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h_{fg}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5.28)$$

Teplotní profil ve filmu kondenzátu je lineární, platí

$$\frac{\lambda(T_{SAT} - T_w)}{\delta} = \alpha_x (T_{SAT} - T_w) \quad (5.29)$$

$$\alpha_x = \frac{\lambda}{\delta} = \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h_{fg}}{\mu_l (T_{SAT} - T_w) x} \right] \quad (5.30)$$

A střední součinitel přestupu tepla je podle Incropera [].

$$\bar{\alpha}_x = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \alpha_x dx = \frac{4}{3} \alpha_L \quad (5.31)$$

nebo

$$\bar{\alpha}_L = 1,13 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h_{fg}}{\mu_l (T_{SAT} - T_w) L} \right] \quad (5.32)$$

Kde kinematická viskozita kondenzátu je $\nu_l = \frac{\mu_l}{\rho_l}$

Pro latentní teplo h_{fg} se doporučuje použít modifikované latentní teplo ve formě

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0,68 \cdot c_{p_l} \cdot (T_{SAT} - T_w) \quad (5.33)$$

Vypočet zahrnuje vlastnosti kondenzátu ($\rho_l, \mu_l, k_l, c_{p,l}$), které je potřeba dohledat podle teploty. Tuto teplotu zjistíme jednoduše pomocí vzorce pro T_f .

$$T_f = \frac{T_{SAT} + T_w}{2} \quad (5.34)$$

Ted' už jednoduše vypočítáme celkový přenos tepla do plochy pomocí Newtonova zákona pro chlazení.

$$\vec{q} = \alpha_l \cdot S \cdot (T_{SAT} - T_w) \quad (5.35)$$

Hmotnostní tok kondenzátu je podíl celkového přeneseného tepla k modifikovanému latentnímu teple.

$$\dot{m} = \frac{\vec{q}}{h'_{fg}} = \frac{\alpha_l \cdot S \cdot (T_{SAT} - T_w)}{h'_{fg}} \quad (5.36)$$

Kde S je plocha stěny.

Energetický ústav

$$S = \frac{\pi D}{4} \cdot L \quad (5.37)$$

5.5 Samotný výpočet

5.5.1 Výpočet úniku chladiva

Počáteční hodnoty jsou uvedeny v tabulce, je známá velikost kontejnmentu, jeho tlak, relativní vlhkost a teplota. Stejně jako jsou známe hodnoty pro primární chladicí systém, což znamená jeho objem, tlak, teplota.

| | Objem [m ³] | Tlak [MPa] | Teplota [°K] | Suchost (xst) nebo relativní vlhkost (ϕ) |
|---|-------------------------|------------|--------------|--|
| Primární chladicí systém (počátek) | V _P = 354 | 15,5 | 617,9 | x |
| Kontejnment (počátek) | V _C = 50 970 | 0,101 | 300 | ϕ = 80% |
| Mix (konečný) | V _T = 51 324 | 0,523 | Hledaná | Hledaná |

Tabulka 5.1: Počáteční a konečné hodnoty

Konečná teplota v kontejnmentu je prozatím neznáma ale je potřeba si jí zvolit pro výpočet. Velikost teplota, pro tento systém s reaktorem PWR, se pohybuje okolo 350 °K až do 450 °K. Záleží to především na velikosti primárního systému a kontejnmentu. Voleno je 416,5 °K, vychází z teplot změřených firmou Westinghouse a je uvedena v dokumentu [5] v přílohách.

Použitím rovnice (5.4), k nalezení parciálního tlaku vypařené vody v kontejnmentu, po dosazení dostáváme:

$$p_{w_1} = \phi \cdot p_{sat}(T_1) = 0.8 \cdot 3500 \text{ Pa} = 2829 \text{ Pa} \quad (5.38)$$

Tento parciální tlak následně odečteme od atmosférického tlaku, který se nachází v ochranné obálce a výsledkem je parciální tlak vzduchu v tomto prostoru se nacházejícím.

$$p_{a_1} = p_1 - p_{w_1} = 101378 - 2829 = 98171 \text{ Pa} \quad (5.39)$$

Pokud známe tlak vzduchu, můžeme si také vypočítat jeho hmotnost a to pomocí rovnice (5.2). Tato hodnota bude potřebná především v druhé části výpočtu, kde se bude zjišťovat suchost páry pomocí rovnováhy energií.

$$m_a = \frac{p_{a_1} V_c}{R_a T_{a_1}} = \frac{98\,171\text{ Pa} \cdot 45\,000\text{ m}^3}{286 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \cdot 300\text{ }^\circ\text{K}} = 51\,488\text{ kg} \quad (5.40)$$

Měrný objem přehřáté páry za teploty $T_{a_1}=300\text{ }^\circ\text{K}$ a atmosférického tlaku $101\,330\text{ Pa}$ je podle X-steamu $48,87\text{ m}^3/\text{kg}$. Nyní již jsou známy všechny hodnoty pro výpočet hmotnosti páry v atmosféře kontejnmentu před únikem chladiva v primárním systému.

$$m_{wa} = \frac{V_c}{v_{wa_1}} = \frac{45\,000\text{ m}^3}{48,87\text{ m}^3/\text{kg}} = 921\text{ kg} \quad (5.41)$$

Pro zjištění hmotnosti páry v primárním systému je opět potřeba vědět jeho objem V_p a měrný objem v_{wp} , který zjistíme v tabulkách X-steamu při tlaku systému $15,5\text{ MPa}$. Použitím rovnice (5.4), pak dostaneme.

$$m_{wp} = \frac{V_p}{v_{wp}} = \frac{354\text{ m}^3}{0,00168\text{ m}^3/\text{kg}} = 210\,403\text{ kg} \quad (5.42)$$

Nyní nalezneme suchost páry v celém objemu V_T při teplotě $416,5\text{ }^\circ\text{K}$ a množství páry m_w . Za těchto podmínek si z tabulek páry zjistíme měrný objem páry v_{fg_2} a syté kapaliny v_{f_2} při teplotě T_2

$$x_{st} = \frac{\frac{V_T}{m_w} - v_{f_2}}{v_{fg_2} - v_{f_2}} = \frac{\left(\frac{45\,354\text{ m}^3}{2,11 \cdot 10^5\text{ kg}}\right) - 0,00109 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{0,436 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} - 0,00109 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 0,46 \quad (5.43)$$

- Celkový objem je součet objemu primárního systému a objemu ochranné obálky

$$V_T = V_c + V_p = 45\,000\text{ m}^3 + 354\text{ m}^3 = 45\,354\text{ m}^3 \quad (5.44)$$

- Celkové množství páry je součet množství páry v primárním systému a množství páry, které se nacházelo v kontejnmentu na začátku LOCA.

$$m_w = m_{wa} + m_{wp} = 921\text{ kg} + 210\,403\text{ kg} = 211\,324\text{ kg} \quad (5.45)$$

Pro druhou část výpočtu, kde se hledá konečná suchost páry v kontejnmentu pomocí energetické bilance, potřebné zjistit entalpie páry:

- u_{wp_1} nasycená kapalina při tlaku primárního systému $15,5\text{ MPa} = 1\,629,85\text{ kJ/kg}$
- u_{f_2} nasycená kapalina při $416,5 = 595,38\text{ kJ/kg}$
- u_{fg_2} vypařovací teplo při $415\text{ }^\circ\text{K} = 1,95 \cdot 10^3\text{ kJ/kg}$
- u_{wa_1} přehřátá pára při $300\text{ }^\circ\text{K}$ a $2\,798\text{ Pa} = 2\,550,236\text{ kJ/kg}$

Po té z rovnice vyjádříme suchost:

$$x_{st} = \frac{m_a c_{va} (T_2 - T_{a1}) + m_{wp} (u_{wp1} - u_{f2}) + m_{wa} (u_{wa1} - u_{f2})}{u_{fg2} (m_{wp} + m_{wa})} \quad (5.46)$$

$$x_{st} = \frac{51\,488 \text{ kg} \cdot 719 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (416,5 - 300) + 210\,403 \text{ kg} \cdot (1\,629\,850 - 614\,354 \frac{\text{J}}{\text{kg}})}{2\,126\,500 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot (210\,403 + 921 \text{ kg})} + \quad (5.47)$$

$$\frac{921 \text{ kg} \cdot (2\,550\,236 - 614\,354 \frac{\text{J}}{\text{kg}})}{2\,126\,500 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot (210\,403 + 921 \text{ kg})}$$

$$x_{st} = 0,49 \quad (5.48)$$

Výsledek z předešlé části výpočtu vyšel 0,46 a z energetické bilance 0,49. Nyní je potřeba výpočet opakovat z vyšší teplotou na konci v kontejnmentu, k tomu slouží výpočet v excelu kde se mění pouze tato teplota.

Výsledná suchost a jí odpovídající teplota bude:

$$x_{st} = 0,49 = 0,49 \quad (5.49)$$

$$T_2 = 419 \text{ }^\circ\text{K}, p_{w_2} = 0,425 \quad (5.50)$$

Podle teploty na konci zjistíme v tabulkách páry odpovídající tlak, a to $p_{w_2} = 0,425$.

Nyní je potřeba započítat také parciální tlak vzduchu na konci LOCA. K tomu využijeme rovnice (5.7).

$$p_{a_2} = \frac{m_a R_a T_a}{V_T} = \frac{51\,488 \text{ kg} \cdot 286 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 419 \text{ }^\circ\text{K}}{45354 \text{ m}^3} \quad (5.51)$$

$$p_{a_2} = 0,137 \text{ MPa} \quad (5.52)$$

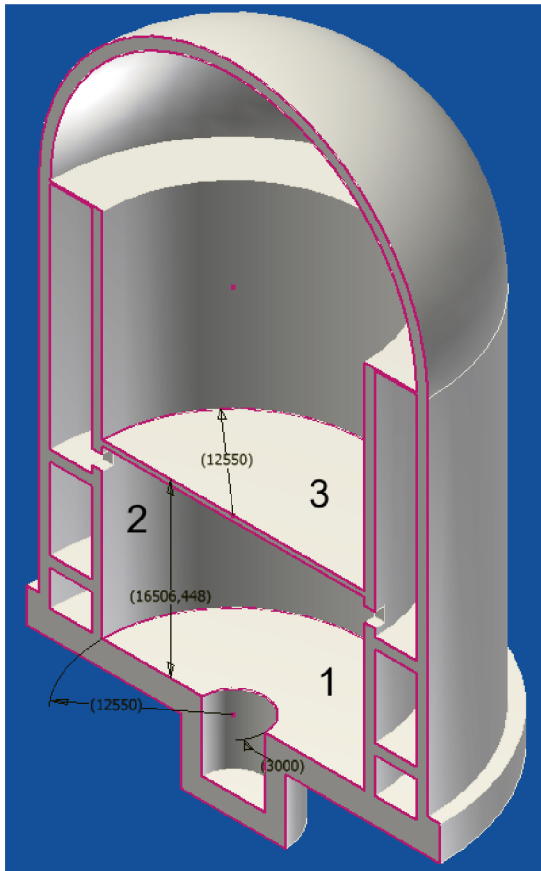
Tyto tlak dávají na konci LOCA celkový tlak, který bude v kontejnmentu.

$$p_2 = p_{w_2} + p_{a_2} = 0,425 + 0,137 = 0,563 \text{ MPa} \quad (5.53)$$

5.5.2 Výpočet akumulace tepla do zdiva

Konečná hodnoty v kontejnmentu, by se mohli ještě změnit díky akumulaci do okolních zdí. Místo kde se nyní nachází vypuštěná pára z primárního okruhu, obsahuje zdi které mají teplotu 22°C. Tyto betonové zdi mohou do sebe jistou část tepla naakumulovat. Jak tato akumulace bude velká zaleží na setrvání páry v tomto prostoru, odhaduje se, že to bude několik milimetrů.

V první řadě je potřeba zjistit, jak velké tyto prostory jsou. Nejdříve bude spočítána plocha těchto zdí a nakonec bude voleno od 0,5 mm až do 5 mm šířky zdi pro výpočet objemu.



Obr. 5.4: Rozměry stěn

- Plocha - 1:

$$S_1 = \pi \cdot (R^2 - r^2)$$

$$R = 12\,550 \text{ mm} = 12,55 \text{ m}$$

$$r = 3\,000 \text{ mm} = 3 \text{ m}$$

$$S_1 = \pi \cdot (12,55^2 - 3^2) = 466,5 \text{ m}^2$$

- Plocha - 2:

$$S_2 = A \cdot B = 2\pi r \cdot l$$

$$R = 12\,550 \text{ mm} = 12,55 \text{ m}$$

$$l = 16\,506,448 \text{ mm} = 16,51 \text{ m}$$

$$S_2 = 2\pi \cdot 12,55 \cdot 16,51 = 1\,301,6 \text{ m}^2$$

- Plocha - 3:

$$S_3 = \pi R_3^2$$

$$R_3 = 12\,550 \text{ mm} = 12,55 \text{ m}$$

$$S_3 = \pi \cdot 12,55^2 = 494,81 \text{ m}^2$$

- Celková plocha:

$$S_C = S_1 + S_2 + S_3 =$$

$$S_C = 446,5 + 1301,6 + 494,81 =$$

$$S_C = 2\,262,94 \text{ m}^2$$

Celkový objem:

$$V_C = S_C \cdot tl = 2\,262,94 \cdot 0,0025 = 5,66 \text{ m}^3$$

Velikost akumulovaného tepla vypočteme pomocí rovnice (5.9) budeme pouze volit jiný objem, který se liší podle zvolené tloušťky.

$$m = V_C \cdot \rho_b = 5,66 \cdot 2100 = 11\,880,4 \text{ kg} \quad (5.54)$$

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 11\,880,4 \cdot 1\,200 \cdot (419 - 300) = 1\,442\,048,5 \text{ kJ} \quad (5.55)$$

Ostatní hodnoty jsou **voleny** následovně:

c_p tepelná kapacita betonu = 1 200 J/kgK

m hmotnost betonu se liší podle zvolené tloušťky (viz tabulka 5.2)

ρ_b hustota betonu = 2 100 kg/m³

T_1 teplota stěny = 300 °K

T_2 teplota páry na počátku = 419 °K

| šířka [m] | V [m ³] | m [kg] | Q [kJ] | I ₂ [kJ] | i ₂ [kJ/kg] | T ₂ [°C] | p ₂ [bar] | p ₂ [MPa] |
|---------------|---------------------|----------|-------------|---------------------|------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 0,0005 | 1,13 | 2 376,1 | 288 409,7 | 578 928 180 | 2739,535 | 144,8 | 4,134 | 0,4134 |
| 0,0010 | 2,26 | 4 752,2 | 576 819,4 | 578 639 770 | 2738,17 | 143,7 | 4,010 | 0,401 |
| 0,0015 | 3,39 | 7 128,3 | 865 229,1 | 578 351 360 | 2736,806 | 142,6 | 3,889 | 0,3889 |
| 0,0020 | 4,53 | 9 504,4 | 1 153 638,8 | 578 062 950 | 2735,441 | 141,5 | 3,771 | 0,3771 |
| 0,0025 | 5,66 | 11 880,4 | 1 442 048,5 | 577 774 541 | 2734,076 | 140,5 | 3,666 | 0,3666 |
| 0,0030 | 6,79 | 14 256,5 | 1 730 458,3 | 577 486 131 | 2732,711 | 139,5 | 3,564 | 0,3564 |
| 0,0035 | 7,92 | 16 632,6 | 2 018 868,0 | 577 197 721 | 2731,347 | 138,4 | 3,454 | 0,3454 |
| 0,0040 | 9,05 | 19 008,7 | 2 307 277,7 | 576 909 312 | 2729,982 | 137,4 | 3,357 | 0,3357 |
| 0,0045 | 10,18 | 21 384,8 | 2 595 687,4 | 576 620 902 | 2728,617 | 136,3 | 3,252 | 0,3252 |
| 0,0050 | 11,31 | 23 760,9 | 2 884 097,1 | 576 332 492 | 2727,252 | 135,5 | 3,159 | 0,3159 |

Tabulka 5.2: Vypočtené hodnoty teploty a tlaku páry podle tloušťky stěny

V tabulce 5.2 lze vidět, jak s rostoucí tloušťkou stěny se zvyšuje naakumulované teplo. Pro další výpočet je volena střední hodnota tloušťky a to 2,5 mm. Teplota shladené páry byla vypočítaná z rozdílu entalpií, pomocí rovnice (5.12). K příslušné entalpie se nalezne teplota s tabulek páry nebo X-steam. Níže uvedený výpočet je pro zvolený průměr.

$$I_2 = I_1 - Q = 579\,216\,589 - 1\,442\,048,5 = 577\,774\,541 \text{ kJ} \quad (5.56)$$

Kde:

i_1 je měrná entalpie při teplotě 419 °K = 2 740,9 kJ/kg

m_w množství páry (viz předešlý výpočet) = 211 324 kg

Výpočet entalpie I_1 :

$$I_1 = i_1 \cdot m_w = 2\,740,9 \cdot 211\,324 = 579\,216\,589 \text{ kJ} \quad (5.57)$$

Z vypočtené entalpie si zjistíme měrnou entalpii a pomocí tabulek odvodíme teplotu a tlak.

$$i_2 = \frac{I_2}{m_w} = \frac{577\,774\,541}{211\,324} = 2\,734,0 \text{ kJ/kg} \quad (5.58)$$

$$T_2 = 140,5 \text{ °C}, p_{w_2} = 0,366 \text{ MPa}$$

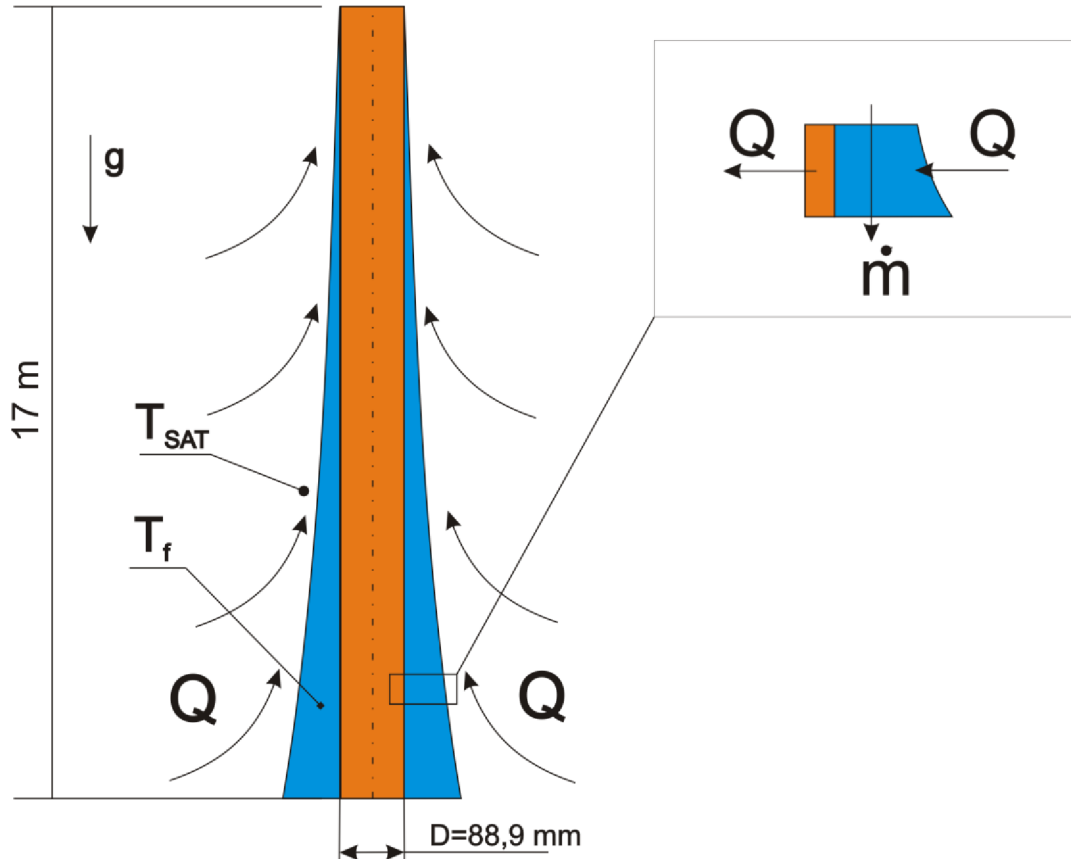
Nyní je potřeba vypočítat tlak vzduchu, viz rovnice (5.7), při teplotě T_2 a přičíst jej k tlaku páry.

$$p_{a_2} = \frac{m_a R_a T_{a_2}}{V_T} = \frac{51\,488 \cdot 286 \cdot 413,65}{45\,354} = 0,134 \text{ MPa}$$

$$p_2 = p_{a_2} + p_{w_2} = 0,502 \text{ MPa}$$

5.5.3 Výpočet parafinového kondenzátor

V první řadě je zapotřebí zjistit přestup tepla přes kondenzát, pak bude možné určit teplo (rovnice 5.58) a konečnou teplotu a tlak páry.



Obrázek 5.3: Schéma proudění kolem kondenzátu

Materiál trubky je měď, jeho tepelná vodivost je velká a stěna trubky malá, tudíž je možné zanedbat tepelná odpor trubky. Pro zjištění množství tepla, které přestoupí do parafínu, využijeme rovnice (5.33).

$$\vec{q} = \alpha_l \cdot S \cdot (T_{SAT} - Tw) \quad (5.59)$$

A do ní dosadíme vypočtenou rovnici přestupu tepla (5.30).

$$\bar{\alpha}_L = 1,13 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h_{fg}}{\mu_l (T_{SAT} - T_w) L} \right] \quad (5.60)$$

Vstupní hodnoty výpočtu:

- **Pro páru na vstupu:**

T_{SAT} teplota páry = 140,5 °C = 413,65 °K

ρ_v hustota páry při tlaku p_2 a teplotě T_{SAT} = 925,76 kg/m³

h_{fg} entalpie mokré páry při tlaku p_2 a teplotě $T_{SAT} = 591,43$ kJ/kg

g hodnota tíhového zrychlení = $9,81$ m/s²

- **Kondenzát:**

T_w teplota povrchu trubky na počátku = $26,85$ °C = 300 °K

T_f teplota filmu kondenzátu = $83,675$ °C = $356,825$ °K

$$T_f = \frac{T_{SAT} - T_w}{2} = \frac{140,5 - 26,85}{2} = 83,675 \text{ °C} \quad (5.61)$$

ρ_l hustota kondenzátu při teplotě $T_f = 969,46$ kg/m³

μ_l dynamická viskozita při teplotě $T_f = 3,36 \cdot 10^{-4}$ Ns/m² = $3,36 \cdot 10^{-4}$ Pa/s

k_l tepelná vodivost kapaliny při teplotě $T_f = 0,672$ W/mK

$c_{p,l}$ tepelná kapacita při teplotě $T_f = 1119$ J/kgK

- **Rozměry trubky:**

T_w teplota stěny = $26,85$ °C = 300 °K

D průměr trubky = $0,0889$ m

t_l tloušťka trubky = $2,5$ mm = $0,0025$ m

L délka potrubí = 17 m

Nyní můžeme dosadit do (5.59) a vypočítat přestup tepla kondenzátem do parafínu.

$$\bar{\alpha}_L = 1,13 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h_{fg}}{\mu_l (T_{SAT} - T_w) L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5.62)$$

$$\bar{\alpha}_L = 1,13 \left[\frac{9,81 \cdot 969,46 \cdot (969,46 - 925,76) \cdot 0,672^3 \cdot 591430}{3,36 \cdot 10^{-4} \cdot (413,65 - 300) \cdot 17} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\bar{\alpha}_L = 657,93 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ještě než bude dosaženo výsledný přestup tepla kondenzátem do rovnice (5.33), musí se vypočítat plocha potrubí.

$$S = \pi D \cdot L = \pi \cdot 0,0889 \cdot 17 = 4,75 \text{ m}^2 \quad (5.63)$$

Nyní tepelný výkon.

$$\vec{q} = \alpha_l \cdot S \cdot (T_{SAT} - T_w) = 657,93 \cdot 4,75 \cdot (413,65 - 300) \quad (5.64)$$

$$\vec{q} = 355019 \text{ W} = 355 \text{ kW}$$

Výsledný tepelný výkon je 355 kW. Platí to pro jednu trubku o stejných rozměrech a kontinuálním tokem páry. Teplota ochlazené páry se dá zjistit z rozdílu entalpií na začátku a na konci, stejně jako se dá zjistit teplota ohřátého parafínu. Jak dlouho bude trvat než se parafín ohřeje na teplotu kapaliny a odteče pryč, zjistíme následujícím způsobem. Nejdříve bude vynásoben tepelný výkon časem v sekundách, díky tomu dostaneme teplo v Joulech.

$$q[J] = q[W] \cdot \text{čas} \quad (5.65)$$

Každý krok je rozdělen podle času, tedy 1 sekunda je 1 krok. Nyní bude vypočten první krok.

$$q = 355\,019 \frac{J}{s} \cdot 1\,s = 355\,kJ \quad (5.66)$$

Entalpie parafínu na začátku za teploty 26,85 °C bude $i_1 = 66\,132\,J/kg$ (viz tabulky páry nebo x-steam) a teplo je 355 kJ. Entalpie i_1 musí být vynásobena množstvím parafínu v potrubí, které se vypočte následovně.

$$m_{pf} = \rho_{pf} \cdot V_{pf} = 820 \cdot 0,094 = 77,07\,kg \quad (5.67)$$

Hustota byla uvedena v katalogových listech výrobce parafínu a tento list je k nahlédnutí v přílohách [P-01]. Zde je uvedena hustota 0,768 až 0,88 kg/l, voleno byla střední hodnota 0,82 kg/l. Po převodu je hustota parafínu 820 kg/m³.

Výpočet objemu byl následovný.

$$D_{pf} = D_{tr} - 2 \cdot tl. = 0,0889 - 2 \cdot 0,0025 = 0,0839\,m \quad (5.68)$$

$$S_{pf} = \frac{\pi D_{pf}^2}{4} = \frac{\pi 0,0839^2}{4} = 0,006\,m^2 \quad (5.69)$$

$$V_{pf} = S_{pf} \cdot L = 0,006 \cdot 17 = 0,094\,m^3 \quad (5.70)$$

Nyní můžeme dosadit do vzorce níže.

$$I_1 = i_1 \cdot m_{pf} = 66\,132 \cdot 77,07 = 5\,096\,655\,J \quad (5.71)$$

Pokud k němu přičteme vypočtené teplo v rovnici (5.66), dostaneme entalpii parafínu na konci prvního kroku.

$$I_2 = q + I_1 = 355\,019 + 5\,096\,655 = 5\,451\,673,45\,J \quad (5.72)$$

Výsledek se podělí hmotností parafínu v tomto potrubí a dostaneme měrnou entalpii.

$$i_2 = \frac{I_2}{m_{pf}} = \frac{5\,451\,673,45}{77,07} = 70\,738\,J/kg \quad (5.73)$$

Podle této měrné entalpie nalezneme v tabulce parafínu (viz přílohy [P-01.1]) dvě teploty a tato měrná entalpie se nachází někde v tomto rozmezí. Pomocí interpolace zjistíme o jakou teplotu jde, viz tabulka níže. Výsledná teplota je 27,03 °C.

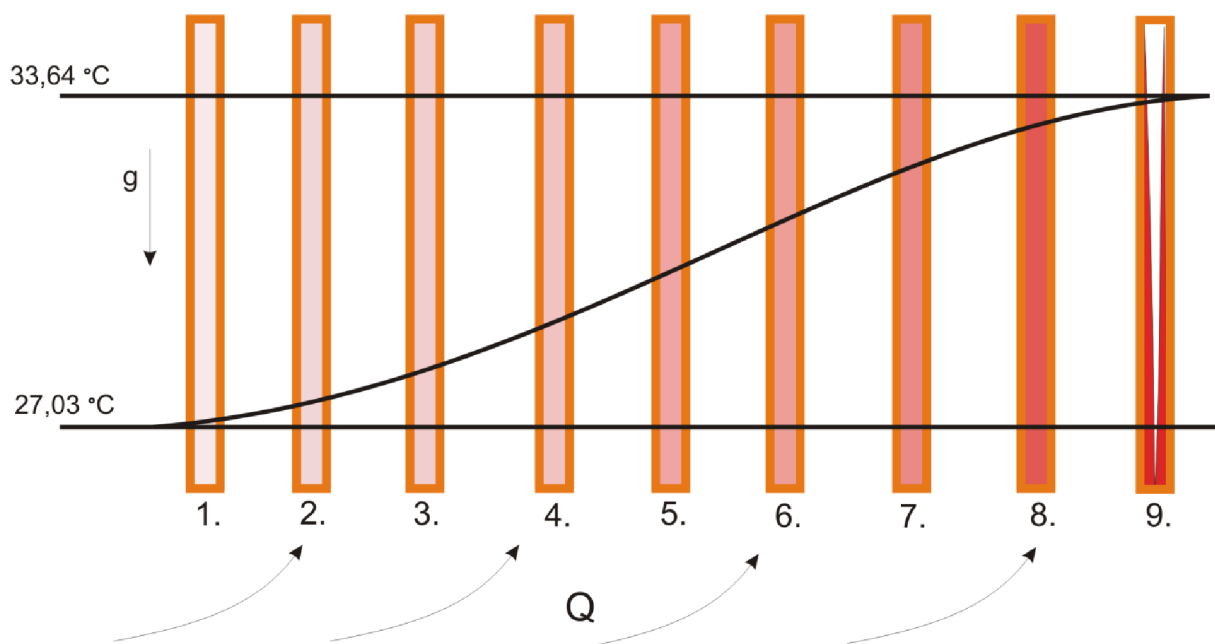
| T [°C] | | |
|--------------|------------------|-------------|
| 27 | 68 833,02 | J/kg |
| 27,03 | 70 738,08 | J/kg |
| 27,5 | 97 523,98 | J/kg |

Tabulka 5.3: Interpolace

S touto teplotou se bude počítat v dalším kroku, který má stejný postup jako v případě prvního kroku. Takovýchto kroků bylo uděláno několik a všechny jsou vypsány v příloze [P-02]. Kroků bylo celkem 9, tedy 9 sekund trvá, než se rozpustí parafín v potrubí a odeče pryč (viz tabulka níže).

| Čas/krok [s] | $l_{2,x}$ [J/kg] | $T_{2,x}$ [°C] |
|--------------|------------------|----------------|
| 1 | 70 738 | 27,03 |
| 2 | 79 951 | 27,19 |
| 3 | 93 771 | 27,43 |
| 4 | 112 197 | 27,62 |
| 5 | 135 230 | 27,82 |
| 6 | 162 869 | 28,04 |
| 7 | 195 115 | 28,25 |
| 8 | 231 967 | 28,49 |
| 9 | 273 426 | 33,64 |

Tabulka 5.4: Kroky výpočtu



Obrázek 5.4: Ohřívání parafínu po krocích (sekundách).

Pro zjištění počtu potrubí, aby bylo možno schladit prostor a tak i snížit tlak v kontejnmentu, bude předpokládáno, že všechny parafín v potrubí v kondenzátoru se roztopí během 9 sekund. Tepelný výkon z rovnice (5.66) byl násoben počtem trubek tak dlouho, dokud výsledná měrná entalpie odpovídala tlaku nižšímu než stanovených 70,5 kPa kontejnmentů s ledovým kondenzátorem. Opět, výsledná entalpie byla dohledána v tabulkách páry a k ní odpovídal výsledný tlak.

$$q_c = q \cdot n_{tr} = 355\,019 \cdot 14\,800 = 47\,288,5 \text{ MJ} \quad (5.74)$$

Počáteční měrná entalpie $i_2 = 591\,433 \text{ kJ/kg}$ přísluší teplotě páry na začátku, tedy $T_2 = 140,5 \text{ °C}$ a $p_2 = 501 \text{ kPa}$. Znovu byla měrná entalpie upravena do požadovaného stavu, tedy vynásobená množstvím páry $m_w = 211\,323,5 \text{ kg}$. Výsledná entalpie i_1 bude vypadat následovně.

$$I_2 = i_2 \cdot m_w = 591\,433 \cdot 211\,323,5 = 1,2498 \cdot 10^{11} \text{ J} \quad (5.75)$$

$$I_1 = I_2 - q_c = 1,24 \cdot 10^{11} - 47,288 \cdot 10^9 = 77\,695,29 \text{ MJ} \quad (5.76)$$

$$i_1 = \frac{I_1}{m_w} = \frac{77\,695,29 \cdot 10^6}{211\,323,5} = 367\,660 \text{ J/kg} \quad (5.77)$$

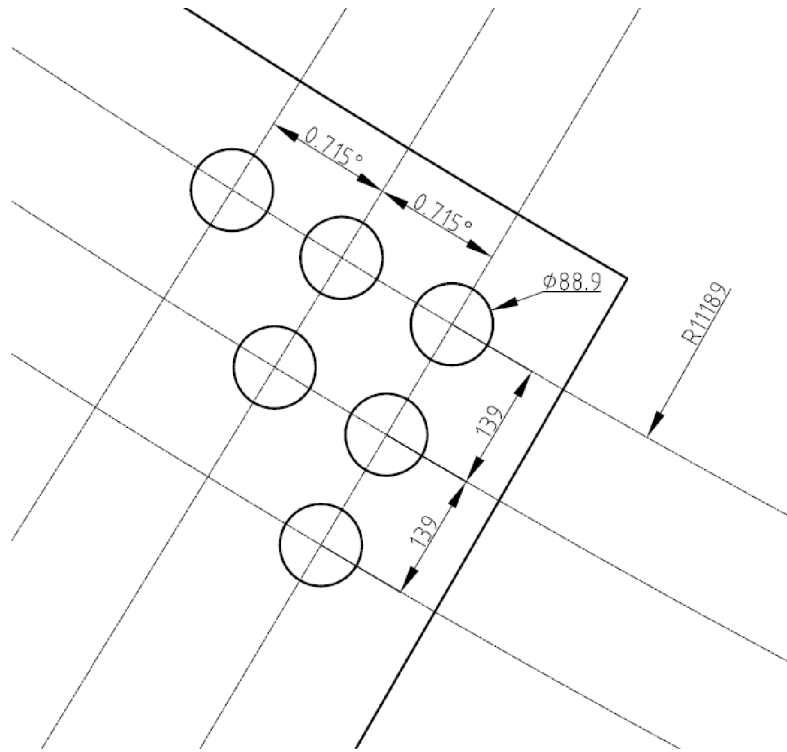
Tomu odpovídá teplota páry v tabulkách $87,8 \text{ °C}$ a tlak $64,50 \text{ kPa}$. Výsledek tedy vyhovuje požadavkům kontejnmentu s ledovým kondenzátorem. Množství parafínu, které je obsažené v potrubí se vypočte pomocí objemu parafínu v jednom potrubí, hustotě parafínu, a nakonec se vynásobí počtem trubek v kondenzátoru.

$$m_{pf} = V_{c,pf} \cdot \rho_{pf} \cdot n_{tr} = 0,094 \cdot 820 \cdot 14\,800 = 1\,141 \text{ t} \quad (5.78)$$

Lze vidět že výsledná váha parafínu cca souhlasí s množstvím ledu používaném v ledových kondenzátorech, kterého je potřeba zhruba 1 000 tun na jeden PWR reaktor o stejných parametrech.

6 Technické zpracování parafinového kondenzátoru

Uložení potrubí v kontejneru bylo rozvrženo dle **obrázku 7.1**.



Obrázek 6.1: Rozmístění potrubí v kontejneru (půdorys).

Takto rozdělené potrubí v kontejneru, by mělo na šířku celkem 30 řad. V každé řadě se nachází jiný počet potrubí, protože se s rostoucím poloměrem se zvětšuje místo pro potrubí (viz tabulka níže).

| Řada [-] | o [mm] | Tr. [ks] | Řada [-] | o [mm] | Tr. [ks] |
|----------|--------|----------|----------|--------|----------|
| 1 | 58 585 | 417 | 16 | 69 503 | 496 |
| 2 | 59 313 | 423 | 17 | 70 230 | 501 |
| 3 | 60 041 | 428 | 18 | 70 958 | 506 |
| 4 | 60 769 | 433 | 19 | 71 686 | 512 |
| 5 | 61 497 | 438 | 20 | 72 414 | 517 |
| 6 | 62 224 | 444 | 21 | 73 142 | 522 |
| 7 | 62 952 | 449 | 22 | 73 869 | 527 |
| 8 | 63 680 | 454 | 23 | 74 597 | 533 |
| 9 | 64 408 | 459 | 24 | 75 325 | 538 |
| 10 | 65 136 | 465 | 25 | 76 053 | 543 |
| 11 | 65 863 | 470 | 26 | 76 781 | 548 |
| 12 | 66 591 | 475 | 27 | 77 508 | 554 |
| 13 | 67 319 | 480 | 28 | 78 236 | 559 |
| 14 | 68 047 | 486 | 29 | 78 964 | 564 |
| 15 | 68 775 | 491 | 30 | 79 692 | 569 |

Celkem potrubí v p. kondenzátoru:

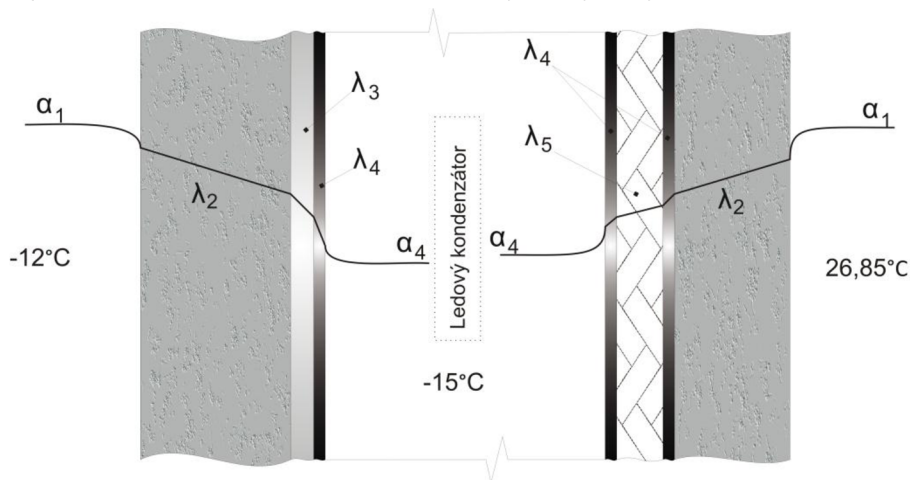
14802

Obrázek 6.2: Tabulka počtu trubek v řadách

7 Ekonomické zhodnocení

Srovnání ceny postavení ledového a parafinového kondenzátoru v JE jde jen částečně, protože nejsou známe ceny všech parametrů pro jeho výstavbu. Je jisté, že ceny obou kondenzátorů jsou dosti veliké.

Firma Westinghouse pro svůj ledový kondenzátor vyrábí speciálně upravený led ve vlastních mrazicích strojích, protože se do ledu přidává kyselina boritá. Dále u tohoto kondenzátoru jsou nutné velmi dobré zateplovací materiály, protože samotná místnost je vlastně obrovský mrazicí box a je nutné zde udržovat teplotu pod 0°C po celou dobu provozu. Konstrukce košů na led, samo výklopné dveře, jeřáb lze cenově nahradit ekvivalentem použitým u parafinového kondenzátoru.

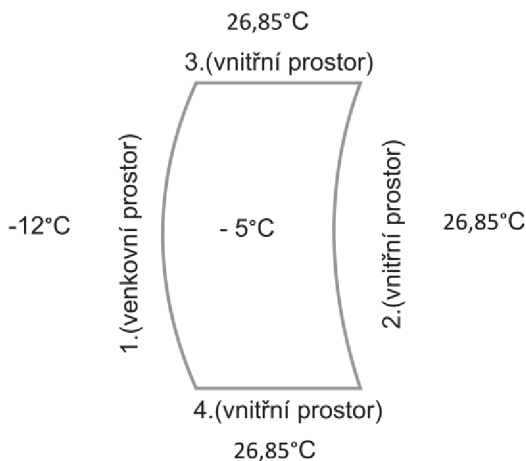


Obrázek 7.1: Složení stěn ledového kondenzátoru.

- α_1 [W/m²K] součinitel přestupu tepla na vnější straně (vodorovný tok)
- λ_2 [W/mK] tepelná vodivost betonu
- λ_3 [W/mK] tepelná vodivost ocelové obálky kontejnmentu
- λ_4 [W/mK] tepelná vodivost ocelové zábrany proti páře
- λ_5 [W/mK] tepelná vodivost izolace (skelná vlákna)
- α_4 [W/m²K] součinitel přestupu tepla na vnitřní straně (vodorovný tepelný tok)

7.1 Ledový kondenzátor

Teplota na vnější straně je -12°C (1 stěna), teplota na vnitřních stěnách vně kondenzátoru je $26,85^{\circ}\text{C}$ (3 stěny, strop a podlaha). Tři stěny jsou izolovány skelnou vatou (4), která je vložena mezi stěnu zabraňující prostupu páry do zdiva a izolace. Na levé straně obrázku je vidět ocelová výztuž (3) kontejmentu. Teplota uvnitř musí být pod bodem mrazu, proto je zvoleno mrazící zařízení a ne chladicí.



Obrázek 7.2: Očíslování stěn ledového kondenzátoru.

Tepelné součinitele:

- $\alpha_1 = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $\lambda_2 = 1,58 \text{ W/mK}$
- $\lambda_3 = 50 \text{ W/mK}$
- $\lambda_4 = 50 \text{ W/mK}$
- $\alpha_4 = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $\lambda_5 = 0,039 \text{ W/mK}$

Plochy:

- $S_1 = 1\,547 \text{ m}^2$
- $S_2 = 1\,206 \text{ m}^2$
- $S_3 = 85 \text{ m}^2$
- $S_4 = 85 \text{ m}^2$
- $S_5 = 325,7 \text{ m}^2$
- $S_p = 325,7 \text{ m}^2$

Ve výpočtu přestupu tepla kruhovou stěnou se nachází přirozený logaritmus ($\ln r_2/r_1$), tento logaritmus pro dlouhou kruhovou zeď by vycházela nula, stejně jako přestup tepla. Z těchto důvodů se pro výpočet uvažují stěny jako rovinné.

Přestup tepla „k“ na levé stěně:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{b_3}{\lambda_3} + \frac{b_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_4} \quad (7.1)$$

$$R_1 = \frac{1}{23} + \frac{1}{1,58} + \frac{0,008}{50} + \frac{0,005}{50} + \frac{1}{8} = 0,802 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$k_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{0,802} = 1,247 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Přestup tepla „k“ na ostatních zdech a stropu i podlahy:

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_4} + \frac{b_4}{\lambda_4} + \frac{b_5}{\lambda_5} + \frac{b_4}{\lambda_4} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_4} \quad (7.2)$$

$$R_{2,3,4,S,P} = \frac{1}{8} + \frac{0,005}{50} + \frac{0,3}{0,039} + \frac{0,005}{50} + \frac{0,5}{1,58} + \frac{1}{8} = 8,26 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Energetický ústav

$$k_{2,3,4,P,S} = \frac{1}{R_{2,3,4,P,S}} = \frac{1}{8,26} = 0,121 \frac{W}{m^2K}$$

Tepelná ztráta:

$$Q_1 = k_1 \cdot (t_{in} - t_{out}) \cdot S_1 = 1,247 \cdot (-5 - 12) \cdot 1\,547 = 17\,335 \text{ W} \quad (7.3)$$

$$Q_2 = k_2 \cdot (t_{out} - t_{in}) \cdot S_2 = 0,121 \cdot (26,85 - 3) \cdot 1\,206 = 4\,355 \text{ W} \quad (7.4)$$

$$Q_3 = k_3 \cdot (t_{out} - t_{in}) \cdot S_3 = 0,121 \cdot (26,85 - 3) \cdot 85 = 307 \text{ W} \quad (7.5)$$

$$Q_4 = k_4 \cdot (t_{out} - t_{in}) \cdot S_4 = 0,121 \cdot (26,85 - 3) \cdot 85 = 307 \text{ W} \quad (7.6)$$

$$Q_P = k_P \cdot (t_{out} - t_{in}) \cdot S_P = 0,121 \cdot (26,85 - 3) \cdot 325,7 = 1\,176 \text{ W} \quad (7.7)$$

$$Q_S = k_S \cdot (t_{out} - t_{in}) \cdot S_S = 0,121 \cdot (26,85 - 3) \cdot 325,7 = 1\,176 \text{ W} \quad (7.8)$$

$$Q_{Celk} = Q_1 \text{ až } P = 24\,656 \text{ W}$$

Celkové teplo, které bude ovlivňovat vnitřní prostor je 24,7 kW. Pro tuto velikost nebylo možné najít jednotku podle výkonu, kde by byla známa i cena, a proto byla vybrána jednotka odvozená výkonem na m³ prostoru. NORDline SFK 400 je schopna chladit prostor o 50 m³ v rozsahu teplot od -15°C do -25°C. Ledový kondenzátor zabírá celkem 5 536,9 m³.

$$Počet\ jednotek = \frac{5\,536,9}{50} = 111 \text{ ks}$$

Cena za jednu = 114 000,- Kč

$$Cena\ celkem\ za\ jednotky = 111 \cdot 114\,000 = 12\,654\,000 \text{ Kč} \quad (7.9)$$

Další položkou je zateplení skelnou vatou o šířce 300 mm na plochu 2 027,4 m², cena za 1 m² je 336,72 Kč.

$$Cena\ celkem\ za\ izolaci = 336,72 \cdot 2\ 027,4 \cdot 3 = 2\ 057\ 998,4\ Kč \quad (7.10)$$

Celková cena se však nedá přesně určit, kvůli tomu že nejsou známe ceny ostatních komponentů (viz na začátku kap.). Na závěr nemůže být opomenut také provozní náklad chladírenských jednotek, který v takovém to objemu je velký.

7.2 Parafinový kondenzátor

U parafinového kondenzátoru stojí nejvíce samotný parafín a měděné potrubí. Cena jednoho kilogramu parafínu RT 28 HC je 5 euro.

$$Cena_{pf} = m_{pf} \cdot cena\ za\ kg = 1\ 141 \cdot 5 = 5\ 705\ 000\ € \quad (7.11)$$

$$Cena_{pf}\ v\ Kč = 5\ 705\ 000 \cdot 25,43 = 145\ 078\ 150\ Kč$$

Měděné potrubí se prodává po metrech délky, kde metr potrubí DN 88,9 stojí 400 Kč.

$$\begin{aligned} Cena\ potrubí &= n_{tr} \cdot L \cdot cena\ za\ metr = 14\ 800 \cdot 17 \cdot 400 \\ &= 100\ 640\ 000\ Kč \end{aligned} \quad (7.12)$$

Cena celkem pak bude vypadat takto.

$$celková\ cena = 145\ 078\ 150 + 100\ 640\ 000 = 245\ 718\ 150\ Kč \quad (7.13)$$

Svou cenou se nejspíše vyrovná ceně provozu ledového kondenzátoru, proto je potřeba promyslet ještě jednou konstrukční řešení (změnit typ potrubí, jinak uložený parafín, atd.). Pokud se jedná o bezpečnost, je určitě výhodnější. Parafinový kondenzátor nepotřebuje za dobu normálního provozu JE chlazení, aby zůstal v tuhém stavu, nehrozí roztečení při poruše chladicího systému.

8 Závěr

K zadní bylo přístupováno, jako k úkolu zbezpečnit původní kondenzátor. Jak bylo zmíněno, největší nevýhodou ledových typů je především možnost roztečení ledu, při selhání chladicího systému. Proto byl navržen parafín, který má teplotu nad teplotou v kontejnmentu. Nedochozí tak k roztékání a bezpečnost je zvyšována. Z hlediska výrobní ceny je parafinový kondenzátor mnohem dražší, ale u původního nejsou známi ceny výroby ledu s příměsí kyseliny borité a celého provozu.

Navržený materiál, tedy parafín, nejlépe vyhovuje požadavkům zmíněným v **kapitole 5.1.1**. Nezpůsobuje korozi, není potřeba mechanického míchání, je dostupný, atd. Nevýhodou je jeho cena, za 1 kg materiálu 5 Euro. Pro navržený kontejnment je potřeba 1 141 tun. Měděné potrubí bylo zvoleno v ohledu na jeho přenos tepla. Cena 1 m trubky je 400 Kč, navržený kondenzátor potřebuje 251 600 m potrubí.

Ledový kondenzátor používá led s příměsí kyseliny borité a potřeba speciálního zařízení pro výrobu požadovaného množství a kvality. Pro zvolený typ reaktoru a jeho chladicího systému je potřeba také okolo 1 100 tun. Led je umístěn ve speciálních koších. Největší položkou zde je zateplení prostoru před vnikáním tepla a hlavně chladicí systém. Tento systém po celou dobu normálního provozu musí být schopen odvést teplo z ledu a udržet jej v pevném stavu. Pokud by se stalo, že chladicí systém selže (špatný kompresor, motor ventilátoru jsou nejčastější a nejběžnější poruchy), může nastat tavení ledu. V takovémto případě je velmi ohrožena bezpečnost JE.

Nyní se nový typ kondenzátoru nevyplatí (z finančního hlediska), ale s rozšiřujícím se používáním parafínu jako akumulátoru tepla bude jeho cena klesat. Také by bylo lepší vyvinout lepší typ parafínu, který by měl větší tepelnou kapacitu. Z páry by pak přešlo mnohem více uvolněného tepla do materiálu. Zcela určitě je navržený typ kondenzátoru bezpečnější, pak tedy záleží na zadavateli, co je pro něj přednější (bezpečnost nebo finance).

9 Bibliografie

1. **Heřmanský, B.** *Jaderné reaktory 1.* [Elektronické skriptum k předmětu Jaderné reaktory vyučovaném ve 3. ročníku na ČVUT FJFI] Praha : autor neznámý, 2010.
2. **Mišák, J.** *Ochrann obálky jadrových elektrárn s tlakovodnými reaktormi.* 1972. stránky 279 - 283. roč. 14, č. 18.
3. **Todreas, Neil E. a Kazimi, Mujid S.** *Nuclear systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals.* místo neznámé : Taylor and Francis, 1993. ISBN 1-56032-051-6.
4. **Incropera, Frank P a Witt, D. P. De.** *Fundamentals of Heat Transfer.* místo neznámé : John Wiley and Sons, inc., 1981. ISBN 0-471-42711-X.
5. **Rubitherm.** Rubitherm - Products. *Rubitherm.* [Online] 2010. <http://www.rubitherm.com>.
6. Skelná vata. *Stavebniny-rychle.* [Online] 2012. <http://www.stavebniny-rychle.cz/isover-multimax-30-tl-100mm-2-88m2-bal.html>.
7. abcelektrodum. *NOSRETI a.s.* [Online] 2012. [Citace:] [http://www.abcelektrodum.cz/\(F\(hcZlcjubineTO996OH20IKhNAr8uDJRYogou0s00IVZLE-_ZRJ6-XyHtGDFEqc90Yc0Bk-fQm7Hrsjzm2bdWnnlrG3Z6TZHA8luaJdM1Tp3EELmTiSmj9kBGzjXBfp5eDPAzAaVZo_uogat3OSIEy3arf s1yf32qlNZvayUIkQTumUV7Bix_NVHnXGHnYYxjlvQM47ZfmBeP8sG2wo_7wSB3MU1\)\)/c](http://www.abcelektrodum.cz/(F(hcZlcjubineTO996OH20IKhNAr8uDJRYogou0s00IVZLE-_ZRJ6-XyHtGDFEqc90Yc0Bk-fQm7Hrsjzm2bdWnnlrG3Z6TZHA8luaJdM1Tp3EELmTiSmj9kBGzjXBfp5eDPAzAaVZo_uogat3OSIEy3arf s1yf32qlNZvayUIkQTumUV7Bix_NVHnXGHnYYxjlvQM47ZfmBeP8sG2wo_7wSB3MU1))/c).
8. **Doc. Ing. Miroslav Jílek, CSc., Ing. Zdeněk Randa.** *Termomechanika: Sbírka příkladů.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2005. S 2162.
9. **Prof. Ing. Bedřich Heřmanský, CSc.** *Jaderné reaktory I.: Reaktory II. generace (1. jaderná éra).* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2010.
10. Westinghouse Nuclear Systems. *Westinghouse Electric Company LLC.* [Online] 2012. <http://www.westinghousenuclear.com/>.
11. **Sterling J. Weems, Chevy Chase, Harold W. McCurdy.** *Google patents.* [Online] 2012. <http://www.google.com/googlepatents>.
12. **Vladimir D. Stevanovic, Miroslav Stanojevic, Dejan Radic, Milorad Jovanovic.** Three-fluid model predictions of pressure changes. *Science Direct.* [Online] 2012. [Citace:] www.sciencedirect.com.
13. **Jorge Kurita, Michael Kivisalu, Soumya Mitra, Ranjeeth Naik, Amitabh Narain.** Experimental results on gravity driven fully condensing flows in vertical tubes,. *Science Direct.* [Online] www.sciencedirect.com.
14. **Włodzimierz Wróblewski, Sławomir Dykas, Aleksandra Gepert.** International Journal of Multiphase Flow. *Science Direct.* [Online] www.sciencedirect.com.
15. **Edwin S. Lyman, PhD.** PLUTONIUM FUEL AND ICE CONDENSER REACTORS:. *Nuclear Control Institute.* [Online] <http://www.nci.org/>.

10 Seznam použitých zkratek

| | |
|------------|---|
| c_{va} | měrné teplo vzduchu při atmosférickém tlaku [J/kgK] |
| c_p | tepelná kapacita [J/kgK] |
| D | průměr [m] |
| g | hodnota tíhového zrychlení [m/s ²] |
| v_{f_2} | měrný objem nasycené kapaliny při teplotě okolí kontejnmentu na konci LOCA [m ³ /kg] |
| v_{fg_2} | měrný objem vypařování při teplotě okolí na konci LOCA [m ³ /kg] |
| $v_{wa,1}$ | měrný objem kontejnmentu na počátku |
| v_{wp} | Měrný objem primárního systému |
| h_{fg} | entalpie mokré páry u kondenzace |
| i_1 | měrná entalpie páry na počátku [J/kg] |
| i_2 | měrná entalpie páry na konci [J/kg] |
| I_1 | entalpie páry na konci [J] |
| I_2 | entalpie páry na začátku [J] |
| k_l | tepelná vodivost kapaliny [W/mK] |
| m_w | hmotnost vody ($m_{wa} + m_{wp}$) [kg] |
| m_{wa} | hmotnost vody v kontejnmentu na počátku [kg] |
| m_{wp} | hmotnost vody v primárním systému na počátku [kg] |
| m_a | hmotnost vzduchu v ochranné obálce [kg] |
| m_b | hmotnost betonu |
| \dot{m} | hmotnostní tok kondenzátu [kg/s] |
| p_{a_1} | tlak na počátku LOCA [Pa] |
| p_1 | tlak atmosférický [Pa] |

| | |
|-------------|--|
| p_{w_1} | tlak vody na počátku ve vzduchu v kontejnmentu [Pa] |
| p_{sat} | tlak nasycených par při určité teplotě [Pa] |
| Q | tepelná energie [W] |
| R_a | měrná plynová konstanta suchého vzduchu [J/molK] |
| T_2 | teplota okolí kontejnmentu na konci LOCA [°C] |
| T_{a_1} | teplota okolí kontejnmentu na počátku LOCA [°C] |
| T_{z_1} | teplota zdiva na počátku [°C] |
| T_{SAT} | teplota páry v kondenzátoru [°K] |
| T_w | teplota povrchu trubky [°K] |
| T_f | teplota filmu kondenzátu [°K] |
| u_{f_2} | entalpie nasycené vody při teplotě T_2 [kJ/kg] |
| u_{fg_2} | entalpie nasycených par při teplotě T_2 [kJ/kg] |
| u_{wp_1} | entalpie nasycené kapaliny při tlaku primárního okruhu na počátku [kJ/kg] |
| u_{wa_1} | entalpie přehřátých par při teplotě okolí (T_{a_1}) a tlaku par (p_{w_1}) v kontejnmentu [kJ/kg] |
| V_T | celkový objem (kontejnmentu a kapaliny v primárním systému) [m ³] |
| V_C | objem kontejnmentu [m ³] |
| V_P | objem primárního systému [m ³] |
| V_Z | objem zdiva [m ³] |
| ρ_z | hustota zdiva [kg/m ³] |
| ρ_l | hustota kondenzátu [kg/m ³] |
| ρ_v | hustota páry [kg/m ³] |
| μ_l | dynamická viskozita filmu kondenzátu [Pa/s] |
| \emptyset | relativní vlhkost [%] |
| x_{st} | suchost páry [-] |

11 Přílohy:

- [P-01] Katalogový list RT 28 HC, Rubitherm (www.rubitherm.de)
- [P-02] Katalogový list RT 31, Rubitherm (www.rubitherm.de)
- [P-01.1] tabulka entalpií parafínu RT 28 HC
- [P-01.2] Srovnání RT 28 HC a RT 31