



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**NÁVRH KONCEPCE PASIVNÍHO CHLAZENÍ PRO
REAKTOR VVER-1000**

THE CONCEPT FOR PASSIVE COOLING OF THE VVER-1000 REACTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Lamoš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Martinec, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Pavel Lamoš**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Martinec, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Návrh koncepce pasivního chlazení pro reaktor VVER-1000

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se zabývá možnostmi návrhu pasivního chladicího systému pro konkrétní kontejnment jaderné elektrárny VVER-1000/V320Č (JE Temelín) v případě projektových nehod až do maximální projektové nehody.

Cíle diplomové práce:

1. Provést rešerši různých chladicích systémů používaných v jaderných elektrárnách.
2. Stanovit tepelný výkon odvedený z ochranné obálky během havárie při dodržení projektových omezení.
3. Provést tepelný výpočet a návrh výměníku určeného k odvodu tepla z ochranné obálky.
4. Provést dispoziční návrh řešení, koncepci a trasování potrubí tak, aby byla zajištěna pasivita systému.
5. Zhodnotit navržený systém z pohledu jaderné bezpečnosti.

Seznam literatury:

Jun Yang, Jaehyok Lim, Sung Won Choi, Doo Yong Lee, Somboon Rassame, Takashi Hibiki, Mamoru Ishii, Behaviors of passive safety systems under a Feed Water Line Break LOCA on a Generation III+ Boiling Water Reactor, Progress in Nuclear Energy, Volume 83, August 2015, Pages 35-42, ISSN 0149-1970.

Mohsen Salehi, Gholamreza Jahanfarnia, Small break LOCA analysis without emergency core cooling systems using the RELAP5/SCDAP code in VVER-1000 reactor, Annals of Nuclear Energy, Volume 87, Part 2, January 2016, Pages 299-307, ISSN 0306-4549.

J. Lim, J. Yang, S.W. Choi, D.Y. Lee, S. Rassame, T. Hibiki, M. Ishii, Assessment of passive safety system performance under gravity driven cooling system drain line break accident, Progress in Nuclear Energy, Volume 74, July 2014, Pages 136-142, ISSN 0149-1970.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem pasivního systému chlazení pro jaderný reaktor VVER-1000. Tento typ reaktoru se nachází v České republice v Jaderné elektrárně Temelín. V práci je uveden přehled chladicích systémů různých jaderných elektráren. Jelikož je práce zaměřena na pasivní bezpečnostní systém, a to pasivní chlazení, tak je zde uveden přehled v současnosti používaných pasivních bezpečnostních systému. V části práce je popsána jaderná bezpečnost a maximální projektová nehoda VVER-1000, a to LOCA havárie. Ve výpočtové části je práce zaměřena na tepelný výpočet výměníků tepla. Na výměnících je uvažována kondenzace a přirozené proudění. Pro chlazení je uvažováno proudění vzduchu. Na konci práce je uvedeno zhodnocení výsledků.

KLÍČOVÁ SLOVA

pasivní chlazení, přirozené proudění, kondenzace, jaderná bezpečnost, jaderná elektrárna

ABSTRACT

This thesis is focused on the design of passive cooling system for a nuclear reactor VVER-1000. This type of reactor is located in the Czech Republic in the location of Nuclear power plant Temelín. The thesis states an overview of the different cooling systems of nuclear power plants. The thesis is focused on passive safety system especially on passive cooling system, so there was done an overview of currently used passive safety system. In the work is discussed nuclear safety and the maximum projected accident of VVER-1000, which is called LOCA accident. In the design part of the thesis was done thermal calculation of heat exchangers. Exchangers are designed as condensers with a natural flow, where cooling of system is provided by outside airflow in case an accident. The results are evaluated at the end of the thesis.

KEYWORDS

passive safety, free convection, condensaion, nuclear safety, nuclear power plant

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LAMOŠ, P. *Návrh koncepce pasivního chlazení pro reaktor VVER-1000*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jiřího Martince, Ph.D a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....
Bc. Pavel Lamoš

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi byli nápomocni při vypracování diplomové práce. Obzvlášť bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Martincovi, Ph.D. za odborné vedení této diplomové práce, Ing. Jiřímu Hejčíkovi, Ph.D. za cenné rady a poskytnuté informace a Ing. Alexanderu Valdovi za poskytnuté informace a rady k diplomové práci.

OBSAH

Úvod.....	15
1 Chladicí systém jaderných elektráren	16
1.1 Systémy chlazení jaderných elektráren	16
1.1.1 VVER 440.....	16
1.1.2 VVER 1000.....	17
1.1.3 MIR 1200	18
1.1.4 AP1000	19
1.1.5 EPR	21
1.1.6 APWR.....	22
1.1.7 ESBWR.....	22
1.2 Pasivní bezpečnostní systémy	23
1.2.1 Pasivní systém pro odvod zbytkového tepla.....	24
1.2.2 Pasivní systém pro chlazení KTMT a snížení tlaku	27
1.3 Představení ETE.....	28
1.4 Bezpečnostní systémy ETE.....	30
2 Jaderná bezpečnost	32
2.1 Cíle jaderné bezpečnosti	32
2.2 Obecné bezpečnostní funkce.....	32
2.3 Bezpečnostní systémy	34
3 Projektové nehody VVER-1000	35
3.1 LOCA havárie	35
3.1.1 Malá LOCA	36
3.1.2 Velká LOCA	36
4 Návrh koncepce pasivního chlazení	39
4.1 Konstrukce výměníku v KTMT	39
4.1.1 Volba materiálu trubek	40
4.1.2 Počet a uspořádání trubek	40
4.2 Přestup tepla ve výměníku uvnitř KTMT	43
4.2.1 Filmová kondenzace	44
4.2.2 Přirozené proudění uvnitř trubky	46
4.2.3 ϵ -NTU metoda	48
4.3 Konstrukce výměníku vně KTMT	52
4.4 Přestup tepla ve výměníku umístěného vně KTMT.....	52
4.4.1 Kondenzace uvnitř trubky.....	52
4.4.2 Přestup tepla vně trubek.....	53

4.4.3	ϵ -NTU metoda 2	57
4.4.4	Vliv přirozeného proudění u výměníku vně KTMT	59
5	Zhodnocení výsledků	62
	Závěr	67
	Seznam použitých zdrojů	69
	Seznam použitých zkratk	71
	Seznam použitých symbolů	72
	Seznam použitých obrázků	74

ÚVOD

Předkládaná diplomová práce se věnuje problému dochlazování jaderných elektráren. V případě klasických elektráren na fosilní paliva je využito stejného principu pro získání elektrické energie, a to výroba tepelné energie. Na rozdíl od elektráren klasických nelze u jaderné elektrárny uzavřít přívod paliva, aby se přestalo vytvářet teplo. U jaderné elektrárny dojde k odstavení, ale štěpná řetězová reakce probíhá dál. Díky štěpení atomů neustále vzniká zbytkové teplo a to je velmi důležité odvádět z aktivní zóny jaderného reaktoru. Práce se zaměřuje na zdokonalení současného stavu na jaderné elektrárně VVER-1000, která je i v České republice využita pro výrobu elektrické energie. Návrh systému bude zaměřen na Jadernou elektrárnu Temelín, kde je tento reaktor postaven. Jak bylo zmíněno, v případě jaderných elektráren je potřeba mít neustále možnost chladit aktivní zónu reaktoru, aby nedošlo k roztavení paliva s následným poškozením zařízení, které by již pak nebylo možno dále provozovat. Pro chlazení je v případě běžného provozu použito transformace tepla na elektrickou energii. V případě havárie to není možné a je potřeba využít bezpečnostních systémů. Je využito buď aktivních, nebo pasivních systémů. Práce je zaměřena na pasivní systémy, které pro svoji funkci nepotřebují elektrickou energii. Pro návrh pasivního systému bude využito principu dvou výměníků, jednoho uvnitř ochranné obálky a druhého vně chlazeného vzduchem.

1 CHLADICÍ SYSTÉM JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Každá elektrárna, která pracuje s výrobou tepelné energie ve zdroji tepla (kotel, reaktor) a následně využívá vzniklé teplo pro vytvoření páry, potřebuje systém pro chlazení zařízení, ale i pro odvod nevyužitého tepla. Následující kapitola bude věnována jednotlivým chladicím systémům různých jaderných elektráren.

1.1 SYSTÉMY CHLAZENÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Jaderné elektrárny (JE) produkují značné množství tepelné energie, která je při normálním provozu využívána pro výrobu elektrické energie. Při provozu v režimu odstavení jaderné elektrárny je ale také nutno odvádět energii teplenou. Tepelná energie totiž vzniká pomocí štěpné řetězové reakce, při které je uvolňováno obrovské množství energie. Řetězovou reakci není možné jen vypnout, ale je možné ji pouze potlačit, a to pomocí řídicích (havarijních) tyčí nebo za pomoci kyseliny borité (H_3BO_3). I po odstavení reaktoru stále probíhá štěpná řetězová reakce a neustále se vyvíjí teplo. Z tohoto důvodu je nutné zajistit na elektrárně chlazení jaderného reaktoru nejen během normálního provozu, ale i v průběhu odstaveného reaktoru. Nejdůležitější je ovšem chlazení jaderného reaktoru a pomocných systémů v případě, že by nastala nehoda nebo havárie. Bude uveden popis systému chlazení a bezpečnostních systémů různých jaderných elektráren, především tlakovodních jaderných elektráren, jako je ETE VVER-1000 [2,24].

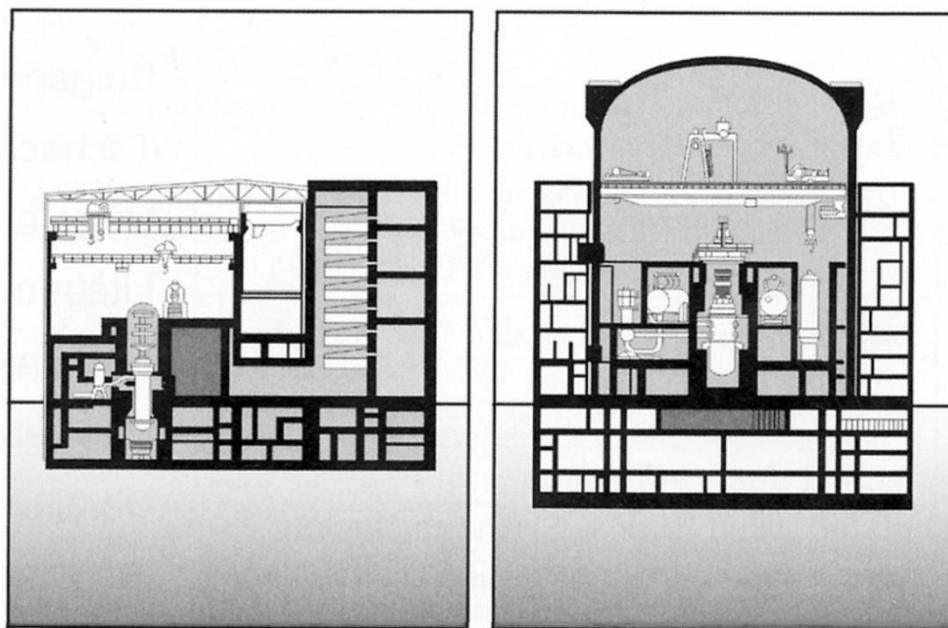
1.1.1 VVER 440

Jedná se o tzv. ruský typ tlakovodního jaderného reaktoru. VVER-440 nemá na rozdíl od VVER-1000 ochrannou obálku (kontejnment), ale pouze hermetické prostory. V reaktoru je jako chladivo a zároveň moderátor použita demineralizovaná voda. O chlazení aktivní zóny reaktoru se stará šest hlavních cirkulačních čerpadel (HCČ). Každé HCČ je umístěno na vlastní studené větvi chladicí smyčky. Tato čerpadla čerpají chladivo z parogenerátoru (PG), přes který chladivo proudí nejprve při odčerpání z reaktoru, a kde je tepelná energie obsažená v chladivu předána přes trubičky PG chladivu sekundárního okruhu.

U jaderných elektráren je nejdůležitější stále odvádět teplo z reaktoru. Nicméně, aby bylo zajištěno bezpečné odvádění tohoto tepla z reaktoru, je nutné zajistit chlazení i pro zařízení, která se přímo podílejí na chlazení nebo jej podporují. U VVER-440 k tomu slouží např. vložené okruhy chlazení (VOCH). Tyto okruhy slouží k zajištění chlazení důležitých technologických zařízení I.O, která přijdou do styku s radioaktivními látkami. Chladivem VOCH je technická voda důležitá (TVD). Mezi VOCH patří okruh chlazení HCČ, systém ochrany řízení reaktoru (SORR) a čerpadel havarijních systémů. Systém VOCH HCČ je určen pro chlazení HCČ, barbotážní nádrže, ložiskových stojanů aj. Systém je složen z čerpadel vloženého okruhu, tepelných výměníků, vyrovnávací nádrže, potrubních tras a armatur. Voda vloženého okruhu je dopravována k jednotlivým spotřebičům pomocí čerpadel. Vratným potrubím je voda přivedena k výměníkům, kde je ochlazována pomocí TVD. Systém VOCH SORR slouží k chlazení kazet pohonů hlavních regulačních kazet (HRK). Systém je složen z čerpadel, tepelných výměníků, mechanických filtrů a vyrovnávací nádrže. VOCH čerpadel havarijních systémů tvoří tři samostatné uzavřené okruhy. Každý tento okruh slouží k jednomu havarijnímu nízkotlakému systému chlazení (NT), vysokotlakému systému chlazení (VT) a sprchovému systému. Každý ze systému je složen z čerpadla, chladiče, vyrovnávací nádrže, propojovacího potrubí a armatur. Během normálního provozu bloku je systém udržován v pohotovosti. Ke chlazení reaktoru je nutné přidat také chlazení bazénu s použitým palivem (BSPP) a transportního bazénu. Systém se využívá k počátečnímu zaplnění BSPP a transportního bazénu, vyprázdnění bazénů, dopravu roztoku kyseliny borité

(H_3BO_3) a drenážování dělicí roviny reaktoru. Odvod tepla je realizován pomocí dvou na sobě nezávislých systémů, každý je dimenzován na 100 % výkon a je složen z čerpadla, tepelného výměníku, propojovacího potrubí a armatur. V provozu je jen jeden systém, druhý je v rezervě. Maximální teplota v bazénu je 60 °C.

Dalším systémem je systém havarijního chlazení aktivní zóny. Ten je složen z aktivní a pasivní části. Aktivní část systému havarijního nízkotlakého a vysokotlakého chlazení je tvořen třemi na sobě nezávislými systémy. Pasivní část systému havarijního chlazení je složena z hydroakumulátorů a ke správné funkci systému není potřeba iniciačního impulsu zvenci a přívodu energie. Jak aktivní, tak pasivní systém chlazení zajišťuje chlazení aktivní zóny reaktoru při haváriích s únikem chladiva [24].



Obr. 1 Řez reaktory VVER-440 a VVER-1000[1]

1.1.2 VVER 1000

VVER-1000 je také tzv. ruský typ tlakovodního jaderného reaktoru. Jak již bylo zmíněno VVER-1000 má na rozdíl od VVER-440 ochranou obálku, tzv. kontejnment, jak je možné vidět při porovnání na obrázku Obr. 1. Tento typ reaktoru je reaktor II. generace. Reaktor VVER-1000 je nejrozšířenějším ruským typem reaktoru. V reaktoru je stejně jako u VVER-440 použita demineralizovaná voda jako chladivo a moderátor. O chlazení aktivní zóny reaktoru se starají již jen čtyři HCČ. Každé HCČ je umístěno na vlastní studené větvi chladicí smyčky. Tato čerpadla čerpají chladivo z horizontálních PG. V PG je tepelná energie předána přes teplosměnnou plochu trubiček PG do sekundárního okruhu. Z PG je pára vedena na turbosoustrojí. VVER-1000 má na jeden reaktor pouze jedno turbosoustrojí, na rozdíl od VVER-440, u kterého jsou na jeden reaktor dvě turbosoustrojí. Z kondenzátoru je teplo odváděno také do chladicích věží. Maximální projektovou havárií, na kterou je reaktor VVER-1000 navržen bez vlivu na okolí, je protržení hlavního cirkulačního potrubí (HCP), spojené se zemětřesením a výpadkem vnějšího napájení. Oproti reaktoru VVER-440 je výrazněji vyšší neutronové namáhání aktivní zóny.

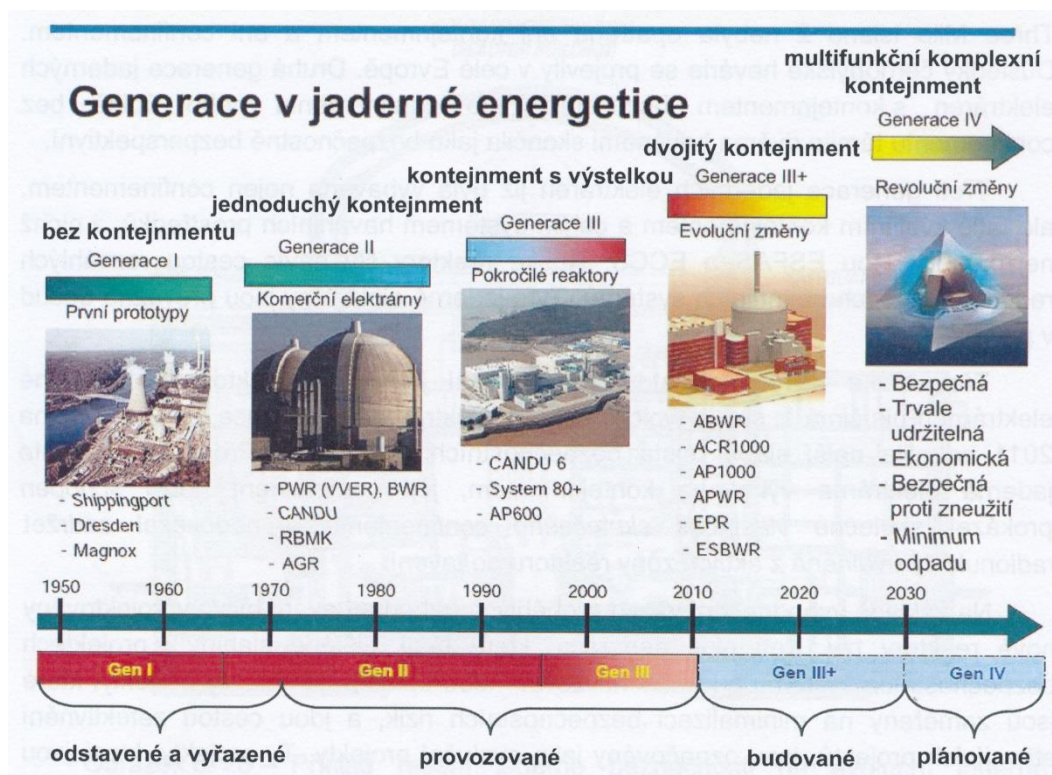
U reaktorů VVER-1000 je jako u VVER-440 několik vývojových variant, kde s postupem času a získávání zkušeností a informací z provozu docházelo k modifikacím pro zlepšení

bezpečnosti i provozu reaktoru. Podstatným rysem u všech vývojových variant tlakovodních reaktorů je zjednodušení konstrukce s cílem zvýšení aktivní a hlavně i pasivní bezpečnosti. Nové vývojové varianty mají zdokonalený kontejnment a vyšší objemy vody v primárním i sekundárním okruhu, což ještě dále snižuje riziko havárie s případným roztavením aktivní zóny [2].

Bezpečnosti a chlazení tohoto typu VVER-1000, konkrétně typ 320, bude věnována samostatná kapitola 1.4 v diplomové práci.

1.1.3 MIR 1200

Tlakovodní reaktor MIR 1200 je též reaktorem tzv. ruského typu. Jedná se o již III+ generaci. Tato generace jaderných reaktorů je nyní vývojově nejvyvinutější a v současné době je jich několik ve výstavbě. Reaktory generace III+ jsou celkově více založeny na využití pasivní bezpečnosti. V případě, že se reaktory dostanou do nestandardní situace, jsou samy uvedeny do bezpečného stavu s využitím pasivních systémů bez pomoci aktivních systémů. Na obrázku Obr. 2 je možno vidět základní rozdělení jaderných reaktorů na generace. V současné době jsou nejrozšířenější skupinou jaderné reaktory generace II a nyní jsou ve výstavbě jaderné reaktory generace III+.

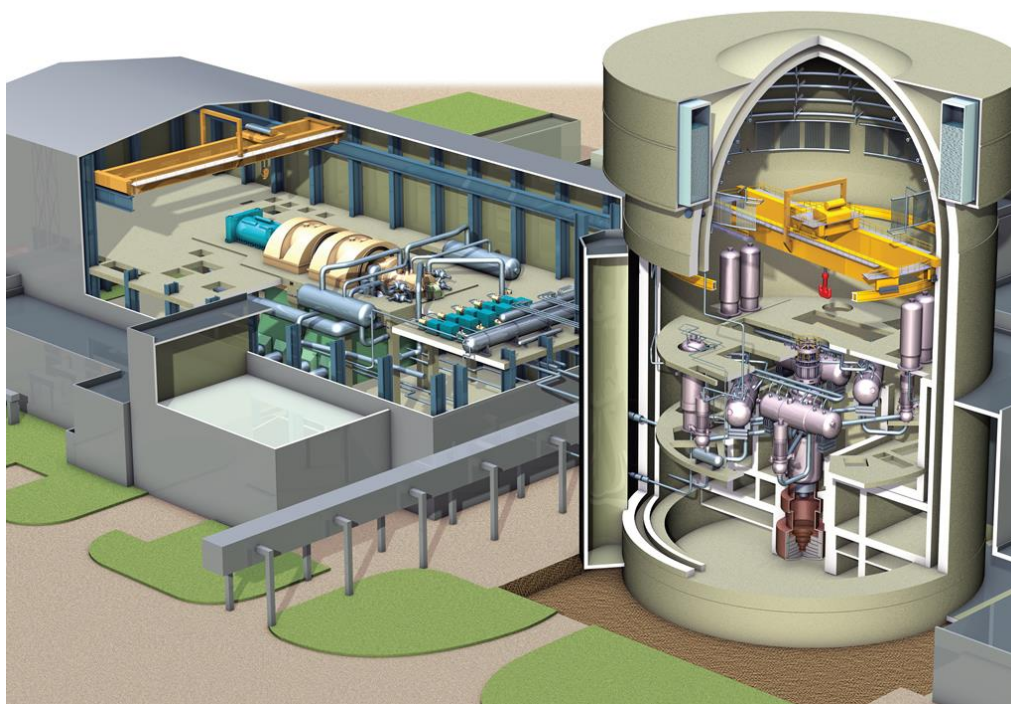


Obr. 2 Generace jaderných reaktorů[15]

Reaktor MIR-1200 (označovaný AES-2006) je evolučním projektem vycházejícím z reaktoru VVER-1000. Oproti původním projektům je elektrárna navržena na základě podstatného zvýšení spolehlivosti pomocí kombinace aktivních a pasivních bezpečnostních systémů, vyloučení případných potřeb extrémní evakuace obyvatelstva z okolí elektrárny v případě havárie, odolnosti vůči selhání lidského faktoru a odolnosti proti úplnému výpadku dodávek elektřiny (black out). JE by měla být maximálně nezávislá na zásazích operátora a na vnějších zdrojích v případě havárie. Bylo rozšířeno množství bezpečnostních systémů, hlavně

o pasivní bezpečnostní systémy. Jedná se o systémy: systém ochrany primárního okruhu před přetlakem, systém odstraňování vodíku s pasivními rekombinátoři, systém pasivního odvodu tepla (SPOT) a systém nezávislého napájení systémů pro likvidaci nadprojektových havárií .

Pro MIR-1200 byly navrženy SPOT systémy. Jedná se o systémy pasivního odvodu tepla. Ty se dělí na SPOT parogenerátory a SPOT z ochranné obálky. SPOT PG se stará o odvod tepla z reaktoru v případě úplné ztráty elektrického napájení vlastní spotřeby (tzv. již zmíněný black out). Tento systém by měl pracovat i za předpokladu, že nebude k dispozici žádná záložní dieselgenerátorová stanice. Systém brání přechodu do nadprojektové havárie. SPOT z ochranné obálky je systémem pro dlouhodobé odvádění tepla z ochranné obálky (KTMT) při jakékoliv havárii, včetně havárie s následkem black out, když není k dispozici žádný aktivní bezpečnostní systém, např. sprchový systém. Tento systém je možné vidět v řezu elektrárnou MIR 1200 na obrázku Obr. 3. Bezpečnostní systémy jsou nastaveny tak, že při řízení havárií nemusí operátor zasáhnout v prvních 30-ti minutách a také veškeré součásti systémů při projektové havárii jsou naprojektovány pro udržení bezpečného stavu I.O bez zásahu operátora po dobu prvních 24 hodin [3].



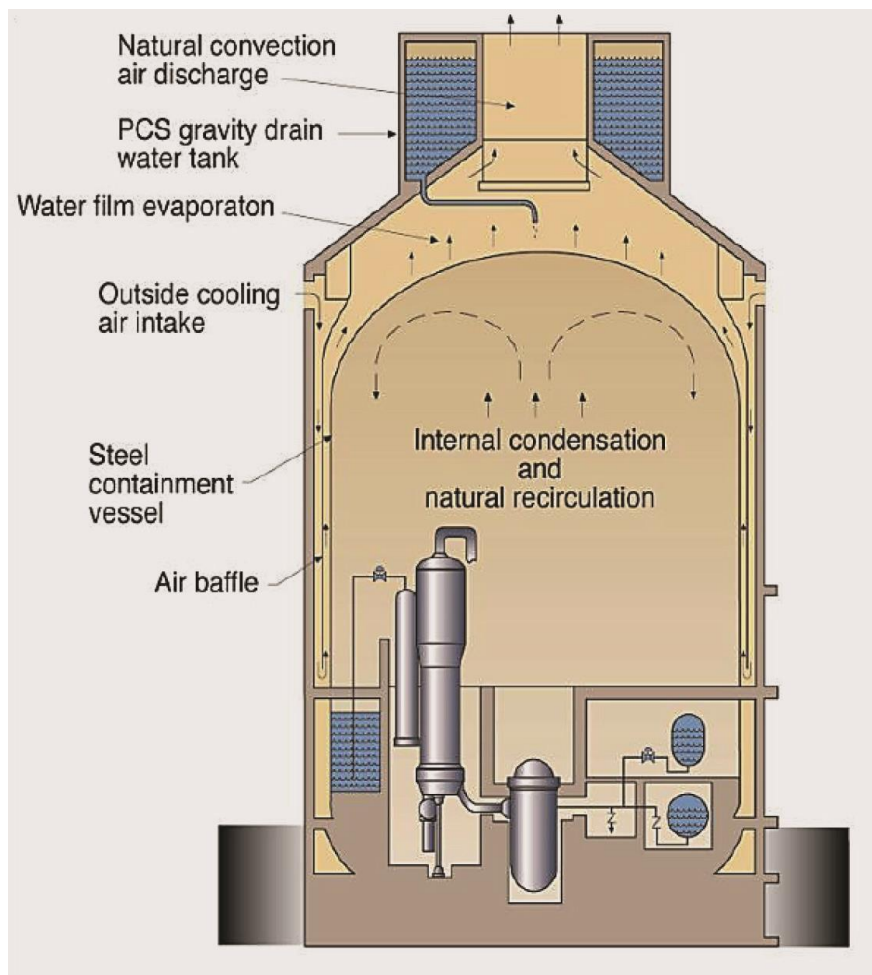
Obr. 3 Řez jaderným reaktorem MIR 1200 [4]

1.1.4 AP1000

Tlakovodní jaderný reaktor AP1000 je projektem americké firmy Westinghouse. Jedná se o evoluční projekt generace III+. Projekt elektrárny je založen na jednoduchém konceptu. Elektrárna je naprojektována tak, aby v případě projektové havárie (protržení primárního potrubí) byla schopna sama, bez zásahu aktivních systémů, zvládnout situaci. Tyto pasivní bezpečnostní systémy nevyžadují pro svoji činnost žádný zásah operátora. V případě jakékoliv události využívají pouze přírodní zákony (gravitace, přetlak plynu a přirozená cirkulace). Pro činnost pasivních systémů není tedy potřeba aktivních prvků (např. čerpadla, motory, ventilátory, apod.) Některé aktivní prvky ale potřeba jsou. Jsou to ventily, které se v případě události samy přestaví do polohy umožňující působení pasivních systémů [5].

AP1000 je navržena s ohledem na více úrovní ochrany do hloubky. Pasivní bezpečnost reaktoru je základním principem, podle kterého byl reaktor vyprojektován. Mezi část pasivních systémů patří pasivní systém nouzového chlazení aktivní zóny (AZ) a systém pasivního chlazení kontejnmentu.

Pasivní systém nouzového chlazení aktivní zóny zajišťuje odvod tepla z aktivní zóny, pasivní zaplavení reaktoru a odtlakování primárního okruhu. Pasivní systém nouzového chlazení aktivní zóny využívá tři pasivní zdroje vody pro doplňování chladiva do reaktoru: dvě nádrže pro doplňování vody, dva hydroakumulátory a nádrž vody pro výměnu paliva v kontejnmentu. Uvedené zdroje chladiva jsou napojeny na nátrubky reaktoru, aby v případě poškození primárního cirkulačního potrubí nedošlo ke ztrátě tohoto chladiva. V první fázi nouzového chlazení AZ je využito dvou doplňovacích nádrží, které jsou umístěny nad systémem chlazení reaktoru. Během normálního provozu jsou nádrže úplně zaplněny vodou a tlak v nich je stejný jako tlak v primárním okruhu. V případě potřeby je dodávka chladiva zajištěna samovolným otevřením ventilů v případě poklesu tlaku v I.O [5].



Obr. 4 Bezpečnostní systémy AP 1000 [5]

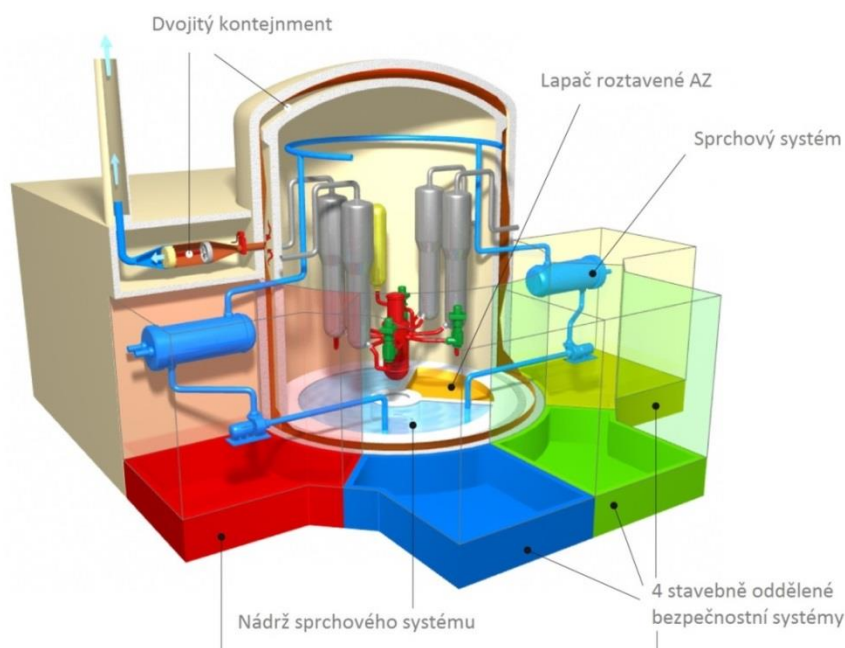
Systém pasivního chlazení kontejnmentu, který je možné vidět na obrázku Obr. 4, je využit v případě havárie ke chlazení ocelové tlakové obálky, která tvoří kontejnment. V případě těžké havárie je reaktorová nádoba zaplavena z vnější strany vodou z havarijních nádrží. Zaplavená voda ochlazuje přes stěny reaktoru roztavenou AZ a zabraňuje protavení AZ ven z reaktorové nádoby. Během ochlazování vzniká pára, která se shromažďuje v prostorech

kontejnmentu a na jeho vnitřních stěnách kondenzuje. Ocelová stěna kontejnmentu odebírá zkondenzované teplo, a to je předáváno proudícímu vzduchu, který proudí podél kontejnmentu z vnější strany v meziprostoru mezi ocelovou a betonovou obálkou. Mezi další součást pasivního systému patří samospádové sprchování kontejnmentu z nádrží umístěných na vrcholu betonové obálky. V případě havárie je účinnost chlazení zvýšena sprchováním ocelového pláště kontejnmentu.

Oproti jiným projektům je AP1000 navržen tak, že v případě těžké havárie využije zadržení roztavené aktivní zóny uvnitř reaktorové nádoby bez ztráty její integrity (In vessel retention). V průběhu těžké havárie by byla šachta reaktoru zaplavena vodou z bazénu pro výměnu paliva. Zaplavením šachty reaktoru společně s odvodem tepla přes stěnu nádoby je zabráněno případnému protavení reaktorové nádoby [5].

1.1.5 EPR

Reaktor EPR byl vyvinut firmou Areva NP a Siemens ve spolupráci Francie a Německa. Měl by být schopen využívat palivo MOX obsahující plutonium z přepracovaného vyhořelého paliva. Cílem vývoje tohoto reaktoru bylo zvýšení bezpečnosti, ale zároveň i konkurenceschopnosti produktu. Jedná se o jeden z projektů nejvýkonnějších tlakovodních reaktorů. Primární okruh se skládá ze čtyř smyček. K hlavním součástem reaktoru EPR patří tlaková reaktorová nádoba, hlavní cirkulační čerpadla a parogenerátory. Všechny tyto součásti se od předcházejícího designu zvětšily, což vedlo ke zvýšení bezpečnosti, operativnosti a výkonu. Jednotlivé sekce bezpečnostních systémů jsou fyzicky vzájemně odděleny do nezávislých tras, aby porucha jedné sekce neovlivnila sekci druhou. Budova reaktoru je dvouplášťové konstrukce a je schopna vydržet náraz dopravního i vojenského letadla. Ve čtyřech bezpečnostních objektech, které je možné vidět na obrázku Obr. 5, jsou umístěny hlavní bezpečnostní systémy, např. systém havarijního vstřikování, systém havarijního napájení a jejich podpůrné soustavy. Každý ze čtyř bezpečnostních subsystémů dokáže zvládnout všechny havarijní funkce samostatně. Subsystémy jsou samostatně instalovány v jedné ze čtyř bezpečnostních budov, které jsou odděleny od budovy reaktoru [6].



Obr. 5 Řez reaktorem EPR [7]

Dva ze čtyř bezpečnostních systémů jsou zakryty vnějším pláštěm. Tato opatření snižují riziko současného selhání všech čtyř bezpečnostních systémů. V případě poškození by nebyly zničeny všechny najednou. Pasivní systém pro chlazení je u EPR také navržen. Tento systém je schopen odvést zbytkové teplo reaktoru i za předpokladu úplné ztráty elektrického napájení. Nebezpečí selhání systému je omezeno odebráním aktivních členů v řetězci systému. Pasivní systém chlazení je schopen zvýšit čas pro rozhodování a vykonání potřebných kroků v případě havárie. K zajímavostem bezpečnostního systému reaktoru EPR patří „nádobu“, která při roztečení aktivní zóny zachytí taveninu, kterou zchladí chladivo omývající nádobu. Tím se zamezí proniknutí radioaktivity do okolí elektrárny [6].

1.1.6 APWR

Reaktor EU-APWR je projektem firmy Mitsubishi Heavy Industries na základě bloků plánovaných pro japonský energetický průmysl. Mezi navržené změny patří vysoká tepelná účinnost, snížení počtu dílů, 24měsíční palivový cyklus a zvýšení výkonu na 1700 MWe. EU-APWR je tlakovodní reaktor III generace. Primární okruh má čtyři smyčky. Sekundární okruh je složen z jednoho turbosoustrojí. Tím je snížen počet mechanických prvků a je tak možno dosáhnout vysoké účinnosti. Oproti dřívější generaci byla zvýšena tepelná účinnost a byl také zmenšen obestavěný prostor. Pro vyšší spolehlivost, snížení nároků na provozní testování a ke snížení radiační zátěže reaktorové nádoby byla zjednodušena reaktorová nádoba a její vestavby. Reaktor je navržen s bezpečnostními systémy, které zabraňují vzniku nehod. Mezi tyto systémy patří např. havarijní chlazení aktivní zóny, které vstřikuje chladivo s H_3BO_3 přímo do chladicího systému v případě nehody se ztrátou chladiva, nebo poruchy systému řízení chemických režimů, nebo popřípadě prasknutí hlavního parovodu. Pasivní havarijní chlazení aktivní zóny zahrnuje hydroakumulátory napojené na studenou větev cirkulačních smyček, dále aktivní systém vstřiku chladiva do reaktorové nádoby a systém havarijního odstavení. Kromě opatření pro snížení pravděpodobnosti vzniku těžkých nehod obsahuje projekt systémy, které zmírňují dopady případné těžké nehody. Mezi tyto systémy patří: systém odtlakování primárního okruhu, zaplavovaná šachta reaktoru s prostorem pro zachycení trosk roztavené aktivní zóny, spalovače (rekombinátory) vodíku v kontejnmentu a alternativní systém odvodu tepla z kontejnmentu [8].

1.1.7 ESBWR

ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor) je pasivním reaktorem III+ generace. Konstrukčně vychází z předcházejících typů varných reaktorů (SBWR a ABWR). Jedná se o varný typ reaktoru založený především na pasivních bezpečnostních systémech. Tyto systémy u ESBWR pracují bez použití čerpadel. To má za následek zvýšení bezpečnosti projektu, integritu a spolehlivost. Zároveň snižuje celkové náklady při výstavbě reaktoru. Je také využito přirozeného proudění toku chladiva uvnitř tlakové nádoby reaktoru. Tím pádem zde nejsou použita žádná oběhová čerpadla, s nimi související trasy potrubí, napájecí zdroje, výměníky tepla, přístrojové vybavení a ovládací prvky potřebné pro tyto systémy. Pasivní bezpečnostní systémy ESBWR zahrnují:

Separční systém kondenzace (ICS) – uzavřený pasivní chladicí systém, který přenáší zbytkové teplo do atmosféry. Voda, která chladí palivo, se přemění na páru a vystoupá do čtyř separačních výměníků, zkondenzuje zpátky do kapalné fáze a vrátí se zpět do reaktoru chladit jej. Umožňuje téměř okamžité obnovení provozu reaktoru.

Gravitační chladicí systém (GDCS) – pasivně vstřikuje chladicí vodu do reaktoru při havárii se ztrátou chladiva.

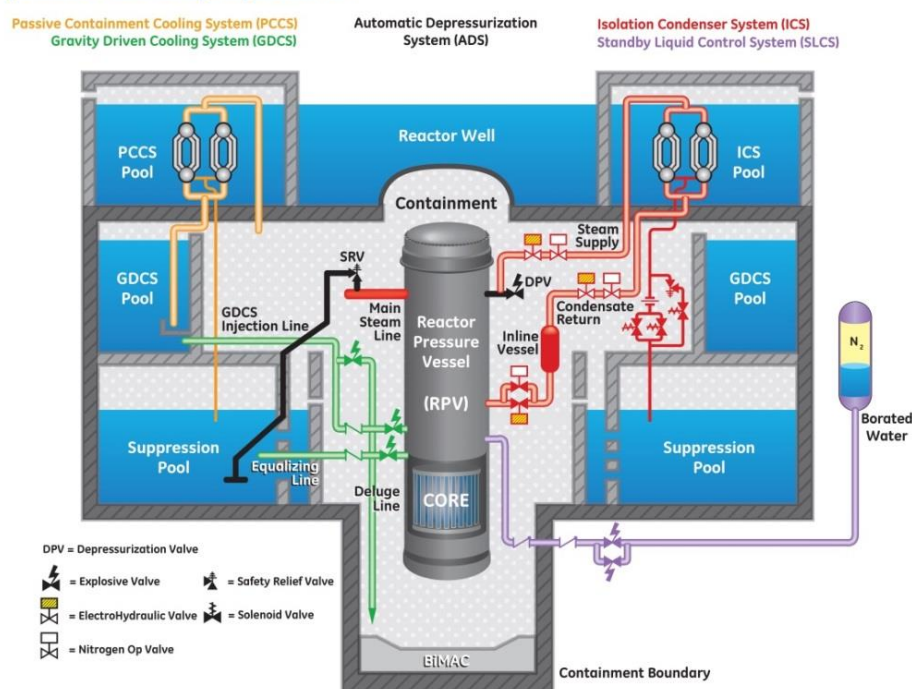
Pasivní systém chlazení kontejnmentu (PCCS) – pasivně přenáší zbytkové teplo z KTMT v případě prasknutí potrubí, nebo ztrátě tlaku uvnitř reaktoru. Pára v reaktoru stoupá do šesti PCCS výměníků, kde zkondenzuje, a vrátí se zpět do GDSC bazénů.

Automatický systém odtlakování (ADS) – snižuje tlak v reaktoru, aby mohl systém GDSC vstříkovat chladivo, případně jiný systém nízkotlakého doplňování.

BiMAC chlazení roztaveného jádra – záložní systém v případě nežádoucího selhání systémů ICS, ADS a GDSC. Potlačuje vysoké teploty v jádře pomocí betonem chráněných šikmých trubek zaplněných vodou z GDSC bazénů. Pára přenáší zbytkové teplo do PCCS výměníků, kde zkondenzuje a vrátí se zpět do GDSC bazénů a odtud do BiMAC systému.

Pasivní systémy ESBWR reaktoru jsou zobrazeny na obrázku Obr. 6.

ESBWR passive safety systems



Obr. 6 Bezpečnostní systémy ESBWR [9]

Dalším záložním zdrojem pro nízkotlaké doplňování je trvale instalované diesellové čerpadlo, které čerpá vodu ze zásobníků vody v areálu elektrárny. Dále to jsou hasičské cisterny nebo přenosná požární čerpadla čerpající vodu do armatur na vnější straně reaktorové budovy [9].

1.2 PASIVNÍ BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY

V předcházejících podkapitolách byl zmíněn popis různých současných projektů elektráren s uvedením jejich chlazení, a to včetně pasivních systémů chlazení. Nyní budou tyto pasivní systémy blíže popásány. Tyto systémy jsou nedílnou a důležitou součástí bezpečnostních systémů.

Již v 90. letech minulého století bylo agenturou IAEA (International Atomic Energy Agency) navrženo rozšíření pasivních bezpečnostních systémů. IAEA tak se svými spolupracujícími výzkumnými a vývojovými centry a provozovateli jaderných elektráren začala spolupracovat

na vývoji těchto systémů. Nejvíce se začaly uplatňovat v nových projektech reaktorů, jako jsou generace III a III+. Na pasivní bezpečnost je kladen důraz v celém spektru jaderného průmyslu již od malých modulárních reaktorů až po velké jaderné centrály s výkonem v řádech tisíců MWe. U pasivních systémů by se daly vyzdvihnout určité výhody těchto systémů:

- nezávislost systému na akčních členech v systému (nezávislé na elektrické energii);
- není potřeba lidského zásahu;
- nižší náklady v porovnání s aktivními bezpečnostními systémy;
- není potřeba dalších záložních zdrojů pro jeho funkci;
- aplikace systému je možná do různých částí zařízení.

Pasivní systémy by se daly rozdělit podle druhu jejich využití na pasivní systém pro odvod zbytkového tepla a pasivní systém pro chlazení KTMT a snížení tlaku.

1.2.1 PASIVNÍ SYSTÉM PRO ODVOD ZBYTKOVÉHO TEPLA

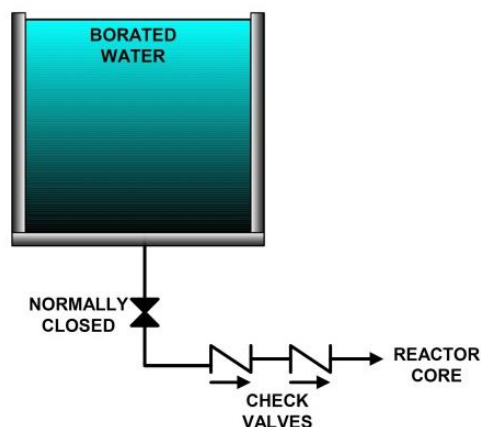
Tento typ pasivního systému se zabývá odvodem zbytkového tepla z aktivní zóny v případě havárie reaktoru. Mezi tyto systémy patří:

- gravitační zavodňovací nádrže;
- hydroakumulátory;
- zavodňovací nádrže na principu přirozené cirkulace;
- pasivně chlazený PG pomocí přirozené cirkulace;
- pasivní tepelné výměníky odvodu zbytkového tepla;
- pasivní chlazení aktivní zóny.

Nyní budou tyto systémy ve stručnosti popsány.

GRAVITAČNÍ ZAVODŇOVACÍ NÁDRŽ

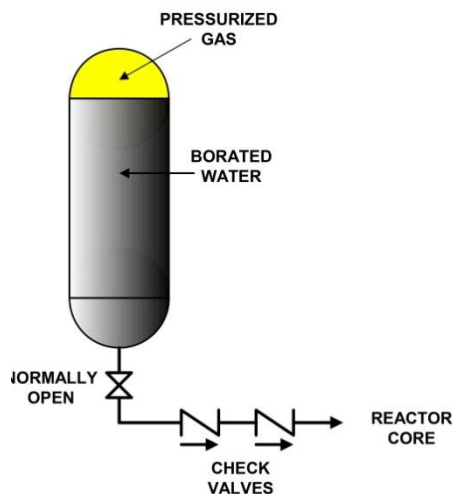
Systém gravitační zavodňovací nádrže je složen z nádrže, která je zaplněna vodou s H_3BO_3 , ale pod „nízkým“ tlakem. Nádrž je za pomoci ventilů propojena s aktivní zónou. Jak je možné vidět na obrázku Obr. 7, systém pracuje pouze za předpokladu nízkého tlaku v aktivní zóně, tedy je využit až v případě, kdy není tlak v I.O, a ne v první fázi nehody [10].



Obr. 7 Zavodňovací nádrže na principu gravitace [10]

HYDROAKUMOLÁTORY

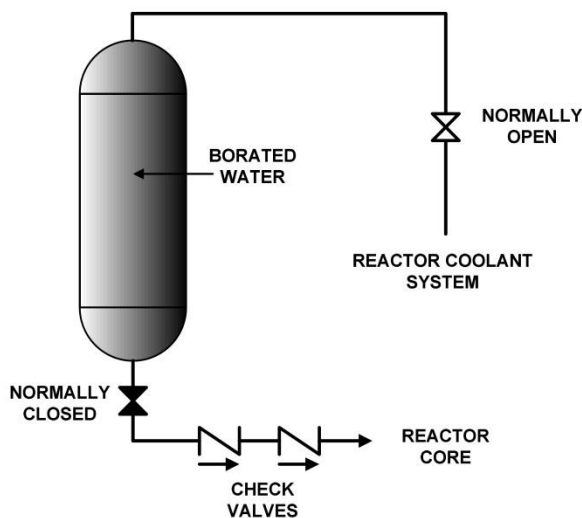
Tyto předtlakované nádrže jsou použity v současně provozovaných jaderných reaktorech jako součást havarijního chlazení. Nejčastěji to jsou velké nádrže naplněné z 75 % pomocí H_3BO_3 a zbylý objem je zaplněn dusíkem, nebo jiným inertním plynem. Jak je vidět na obrázku Obr. 8, obsah nádrže je oddělen od I.O. pomocí série ventilů. Pouze v případě havárie se ztrátou chladiva (LOCA) je v I.O. snížen tlak pod tlak v hydroakumulátorech. To má za následek otevření ventilů a vypuštění obsahu nádrží do I.O.



Obr. 8 Hydroakumulátor [10]

ZAVODŇOVACÍ NÁDRŽE NA PRINCIPU PŘIROZENÉ CÍRKULACE

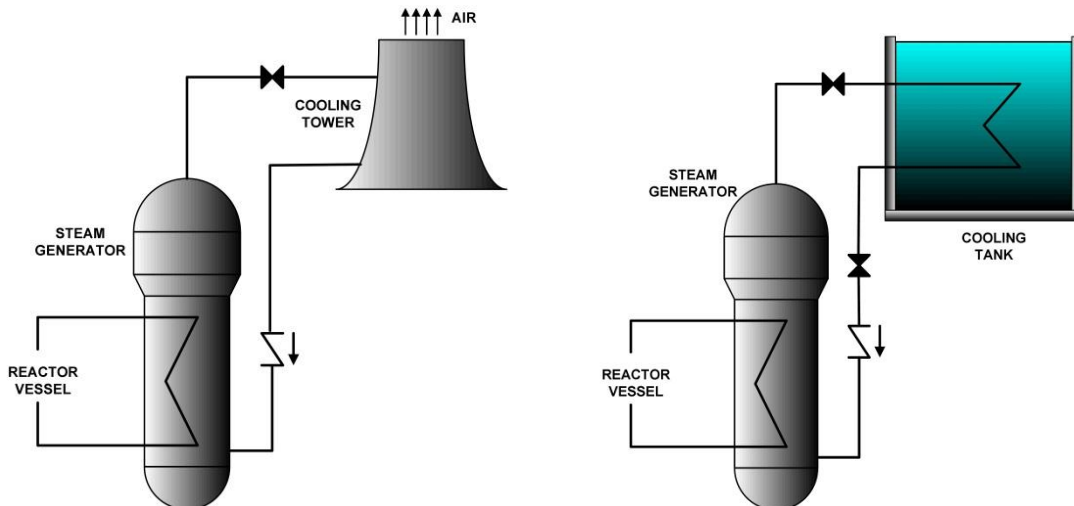
Při využití zavodňovacích nádrží jsou cirkulační smyčky založené na přirozené cirkulaci efektivním způsobem havarijního chlazení aktivní zóny. Několik pokročilých návrhů reaktorů zahrnuje připojení tohoto systému přímo do reaktorové nádoby, nebo do smyčky I.O. Tento systém pracuje na podobném principu jako hydroakumulátory. Jak je vidět na obrázku Obr. 9, samostatná nádrž je naplněna H_3BO_3 , ale v celém objemu. Také je propojena do aktivní zóny reaktoru, ale je spojena i do I.O. V případě havárie dojde k otevření ventilů ve spodní části nádrže a H_3BO_3 začne přirozeně proudit do aktivní zóny [10].



Obr. 9 Zavodňovací nádrže na principu přirozené cirkulace [10]

PASIVNĚ CHLAZENÝ PG POMOCÍ PŘIROZENÉ CIRKULACE

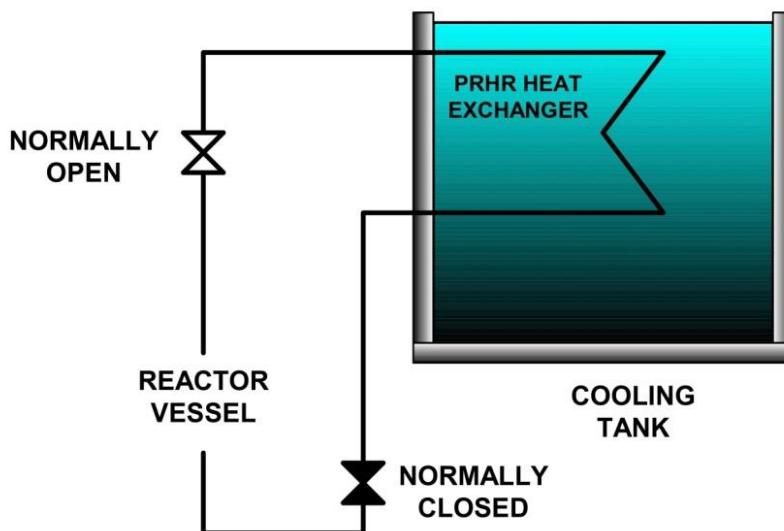
Některé pokročilé projekty tlakovodních elektráren používají pro odvod zbytkového tepla PG. To spočívá v chlazení páry z PG v nádržích s vodou, případně ve vzduchem chlazených výměnících, jak je možno vidět na obrázku Obr. 10.



Obr. 10 Pasivně chlazený PG pomocí přirozené cirkulace [10]

PASIVNÍ TEPELNÉ VÝMĚNÍKY ODVODU ZBYTKOVÉHO TEPLA

Pasivní výměníky odvodu tepla slouží v případě havárie k prodloužení doby chlazení aktivní zóny pomocí přirozené cirkulace, k vidění na obrázku Obr. 11. Systém je v normálním provozu natlakován a připraven k okamžitému použití v případě potřeby. Systém je optimalizován pro případ, kdy nedojde ke změně fázi kapaliny [10].



Obr. 11 Pasivní tepelné výměníky odvodu zbytkového tepla [10]

PASIVNÍ CHLAZENÍ AKTIVNÍ ZÓNY

Pasivní systémy chlazení aktivní zóny jsou primárně určeny pro varný typ reaktorů (BWR). Systém je složen ze separačních kondenzačních výměníků. Systém je v běžném provozu odpojen od aktivní zóny, ale v případě havárie začne přes tento systém proudit pára z reaktoru. Ve výměníku pára zkondenzuje a na základě gravitace a přirozené cirkulace se vrátí zpět do aktivní zóny.

1.2.2 PASIVNÍ SYSTÉM PRO CHLAZENÍ KTMT A SNÍŽENÍ TLAKU V KTMT

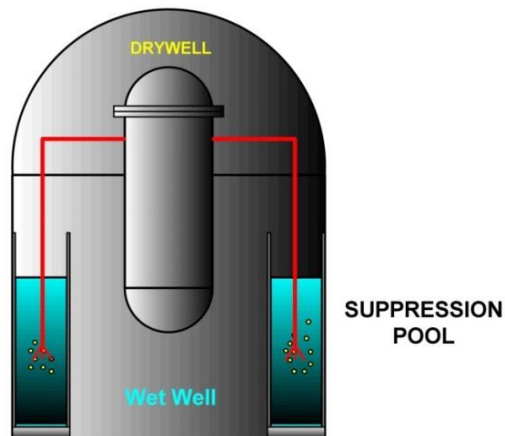
Dalším typem pasivního systému je pasivní systém pro chlazení KTMT a snížení tlaku v KTMT. Pro tuto funkci jsou využity systémy:

- bazény pro snížení tlaku v KTMT;
- systém pro odvod tepla z KTMT a snížení tlaku v KTMT;
- pasivní sprchový systém.

Stručný popis těchto systémů bude uveden v následující části.

BAZÉNY PRO SNÍŽENÍ TLAKU V KTMT

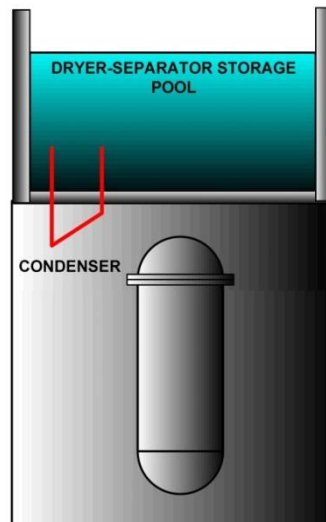
Využití bazénů pro snížení tlaku v KTMT je nejčastější u BWR reaktorů. Systém je zobrazen na obrázku Obr. 12. V případě LOCA havárie je pára z úniku udržována v primárním KTMT, kdy se současně zvyšuje teplota a tlak v důsledku vypařování. Z tohoto primárního KTMT proudí pára přes přetlakové ventily do bazénů umístěných nejčastěji pod primárním KTMT, kde pára zkondenzuje a sníží se nárůst tlaku v KTMT.



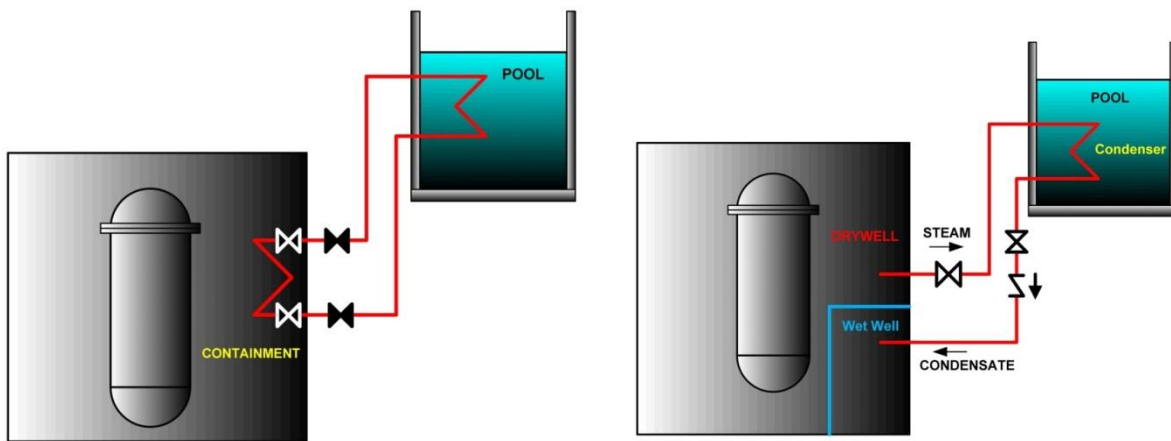
Obr. 12 Bazény pro snížení tlaku v KTMT [10]

SYSTÉM PRO ODVOD TEPLA Z KTMT A SNÍŽENÍ TLAKU V KTMT

Systémy pro odvod tepla a snížení tepla v KTMT využívají vyvýšených nádrží. Pára v KTMT zkondenzuje na kondenzátorech umístěných v KTMT, což má za následek snížení teploty a tlaku. Na obrázcích Obr. 13 a Obr. 14 je možné vidět tři typy tohoto pasivního systému. V jednom systému je využito přímého propojení z nádrže do KTMT. U druhého je propojení provedeno pomocí smyčky s výměníky a přirozeným prouděním a v třetím systému pomocí smyčky, kterou proudí pára a kondenzuje až v prostorách chladicí nádrže a odtud se vrací ve formě kondenzátu zpět do KTMT [10].



Obr. 13 Systém pro odvod tepla z KTMT a snížení tlaku v KTMT [10]



Obr. 14 Systém pro odvod tepla z KTMT a snížení tlaku v KTMT [10]

PASIVNÍ SPRCHOVÝ SYSTÉM

Posledním typem pasivního systému je sprchový systém. Princip funkce tohoto systému je založen na umístění nádrží se zásobou vody nad KTMT. Tato voda v případě havárie sprchuje vnější ocelový obal KTMT. Také zde dochází k využití vzduchového přirozeného chlazení. Tento systém bylo možné vidět již v kapitole AP1000 na obrázku Obr. 4 [10].

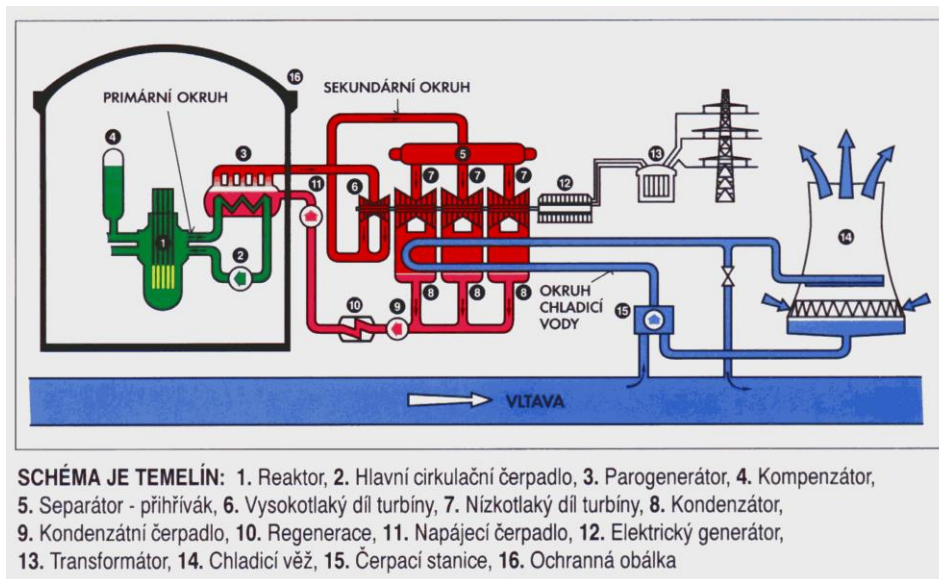
1.3 PŘEDSTAVENÍ ETE

Práce je zaměřena na reaktor VVER-1000, který je v České Republice v lokalitě Jaderné elektrárny Temelín. V následující kapitole bude Jaderná elektrárna Temelín popsána. Elektrárna se nachází v jižních Čechách přibližně 25 km severně od Českých Budějovic a 5 km jihozápadně od Týna nad Vltavou. Z geologického hlediska leží Temelín na moldnaubickém hřbetu, což je oblast se skalním podložím, seismicky klidná, geologicky stabilní a mimo geologické zlomy. Okolí elektrárny je v porovnání s jinými oblastmi České republiky řídkce zalidněno a z velké části zalesněno. Tato skutečnost je výhodná z hlediska bezpečnosti. Na obrázku Obr. 15 je letecký pohled na jadernou elektrárnu Temelín.



Obr. 15 Jaderná elektrárna Temelín [11]

V jaderné elektrárně Temelín se elektřina vyrábí ve dvou výrobních blocích s tlakovodními reaktory VVER 1000 typ V 320. Jedná se o ruský projekt, ale s řídicím systémem západní společnosti Westinghouse. Navzdory tomu byla většina komponentů vyrobena českými (československými) firmami. Začátek výstavby započal již v roce 1987, ale na prvním bloku proběhla první řízená reakce až v roce 2000. Do zkušebního provozu byl uveden roku 2002, kdy byla poprvé dosažena štěpná řetězová reakce i na druhém bloku. Původní projektový elektrický výkon elektrárny byl 2 x 1000 MWe, ale nyní je po mnohých technických úpravách elektrický výkon 2 x 1060 MWe. Tepelný výkon reaktoru je 3120 MW. Primární okruh je umístěn v hermetické obálce (kontejnmentu) a je tvořen reaktorem se čtyřmi chladicími cirkulačními smyčkami a kompenzátorem objemu. Aktivní zóna reaktoru je chlazena a moderována lehkou vodou, která je čerpána pomocí čtyř hlavních cirkulačních čerpadel, z nichž je každé umístěno na vlastní studené větvi horizontálního parogenerátoru. Ten zajišťuje hranici mezi primárním a sekundárním okruhem. Parogenerátor se nachází v prostorech kontejnmentu, ale zbytek sekundárního okruhu se nachází již mimo kontejnment v mezistrojovně, nebo strojovně. V prostorech kontejnmentu je též umístěn bazén s použitým palivem, které je zde dochlazováno po dobu 10 let, než je poté umístěno v kontejnerech CASTOR a následně během plánovaných odstávek přemístěno do meziskladu s použitým palivem v areálu elektrárny. Sekundární okruh je tvořen parogenerátorem, turbínovým soustrojím, generátorem, systémem regenerace (kondenzátory) a systémem napájecí vody. Voda je do parogenerátorů dodávána z napájecí nádrže pomocí turbonapáječek, nebo pomocných napájecích čerpadel. Kondenzační teplo je v průběhu normálního provozu odváděno do atmosféry, jakožto koncového jímače tepla, v počtu dvou chladicích věží na blok. Technická voda pro užití v areálu elektrárny je čerpána z přehradní nádrže Hněvkovice umístěné na řece Vltavě. Na obrázku Obr. 16 je zobrazeno schéma jaderné elektrárny Temelín.



Obr. 16 Schéma JE Temelín [11]

Tato podkapitola byla převzata z díla [11].

1.4 BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY ETE

Z bezpečnostního hlediska jsou v Jaderné elektrárně Temelín důležité základní bezpečnostní funkce. To je bezpečné odstavení reaktoru, následný odvod tepla z aktivní zóny a v neposlední řadě zamezení případných úniků radioaktivity do okolí. Podrobnější definice těchto funkcí je formulována jako:

- udržení podkritičnosti aktivní zóny (nezvyšuje se výkon reaktoru);
- zajištění chlazení aktivní zóny;
- zajištění odvodu tepla z aktivní zóny;
- udržení integrity I.O;
- zachovat integritu kontejnmentu;
- zachování zásoby vody v I.O.

Splnění výše uvedených bezpečnostních kritérií je docíleno pomocí principů ochrany do hloubky a plněním bezpečnostních funkcí. V případě ochrany do hloubky se předpokládají dva zásadní úkoly. Prevence nehod a zmírnění následků nehod (havárií). Splnění těchto úkolů hloubkové ochrany lze dosáhnout využitím pěti úrovní hloubkové ochrany a třemi ochrannými bariérami proti úniku radioaktivních látek do okolí. Těmito bariérami jsou: palivo a jeho pokrytí, tlaková hranice primárního okruhu a kontejnment [12].

V průběhu odstávky, když je hladina vody v reaktoru v úrovni studených nátrubků, se může stát, že dojde k poškození aktivní zóny. Když je palivo v tomto režimu umístěno v aktivní zóně, je třeba brát větší ohled na chlazení aktivní zóny. Snížit hladinu v reaktoru je tedy povoleno, až když je zbytkový výkon na úrovni, kterou lze odvést pomocí systému pro odvod zbytkového tepla. Brzy po odstavení reaktoru je v primárním okruhu velký zbytkový výkon, který je potřeba neustále odvádět. Pro odvod tepla z aktivní zóny se dá využít provozních systémů, ale také je možnost použití systémů zařazených do bezpečnostních systémů.

Jak bylo zmíněno, odvod tepla z aktivní zóny je velice důležitou funkcí s nejvyšší prioritou. Při normálním provozu je odvod tepla z aktivní zóny zajišťován do koncového jímače tepla. Koncovým jímačem tepla je v případě ETE atmosféra za použití II.O. Při využití normálního provozního systému je použito HCC, které zajistí nucenou cirkulaci v HCP, případně pomocí přirozené cirkulace, když nejsou HCC v provozu. V případě dochlazování bloku je pára, která vzniká v PG, odváděna přepouštěcí stanicí přímo do kondenzátoru turbíny. Odtud je teplo odváděno cirkulační chladicí vodou terciárního okruhu do chladicích věží s přirozeným tahem. Vzniklý kondenzát je z kondenzátoru vracen hlavními nebo pomocnými kondenzátními čerpadly přes turbonapaječky zpět do PG. Je možné použít i pomocný kondenzátor. V případě neefektivního využití odvodu tepla do kondenzátoru, a to v případě snížení hodnot v I.O, je odvod tepla realizován pomocí nízkotlakého systému chlazení aktivní zóny. Jedná se o bezpečnostní systém, ale v tomto režimu pracuje jako normální provozní systém. Odvod tepla z I.O se také realizuje pomocí výměníků havarijního systému chlazení aktivní zóny, z nichž je teplo odváděno pomocí systému TVD.

V případě, že nejsou k dispozici systémy normálního provozu, je možno využít bezpečnostní systémy. V takovém případě je odvod tepla realizován pomocí nucené, nebo přirozené cirkulace chladiva v I.O. Odvod tepla v II.O je pak realizován přepouštěcí stanicí do atmosféry. Při nedostupnosti pomocných napájecích čerpadel je dodávka vody do PG zajišťována pomocí havarijního napájecího čerpadla (se zálohou 3x100 %). Když není možné použít výše uvedené způsoby odvodu tepla z aktivní zóny, je možnost využití řízeného doplňování chladiva do I.O pomocí havarijního systému chlazení aktivní zóny a odvod tepla z I.O do KTMT.

V případě VVER-1000 je v projektu také počítáno s použitím pasivních systémů havarijního chlazení. Pasivní systémy zde zastupují hydroakumulátory. Tyto systémy by v případě havarijní situace spojené s poklesem tlaku v I.O při havárii s velkým únikem chladiva z I.O pracovaly na stejném principu, jak bylo uvedeno v kapitole 1.2 PASIVNÍ SYSTÉMY. Koncepte řešení jaderné bezpečnosti vychází z předpokladu, že je možné selhání funkce některého ze zařízení pasivního systému. Proto je tento systém zálohován ve složení 2x100 %, z nezávislých ale funkčně totožných systémů.

V prostorech KTMT jsou také umístěny BSPP a mají dvě sekce. Z hlediska odvodu zbytkového tepla z těchto BSPP se rozlišují dva možné výchozí stavy. Jeden stav, kdy je v bazénu umístěno použité palivo z předchozích kampaní pro snížení jeho aktivity a zbytkového tepelného výkonu. Druhým stavem je situace, kdy je v BSPP vyvezena celá aktivní zóna spolu s použitým palivem z předchozích kampaní, ale i palivo ze současné kampaně s vysokým zbytkovým výkonem. V obou případech je odvod tepla z BSPP zajišťován nucenou cirkulací vody, kterou zajišťuje k tomu určený systém chlazení (s redundancí 3x100 %) přes výměníky chlazené systémem TVD [12].

2 JADERNÁ BEZPEČNOST

Pro následné vyhodnocení řešeného problému je nutné definovat pojem jaderná bezpečnost. Jaderná bezpečnost je definována:

Definice jaderné bezpečnosti podle zákona č. 18/1997 Sb. (stávající atomový zákon) [13]:

Jaderná bezpečnost je stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod.

Definice jaderné bezpečnosti podle nově navrhovaného atomového zákona [14]:

Jaderná bezpečnost je stav a schopnost jaderného zařízení a lidí obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezit následky nehod.

Podrobnosti k rozsahu a způsobu zajištění jaderné bezpečnosti ukládá vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 195/1999 Sb. „O požadavcích na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti“.

2.1 CÍLE JADERNÉ BEZPEČNOSTI

Základním cílem z hlediska zajištění radiační ochrany a jaderné bezpečnosti je ochrana personálu jaderné elektrárny a okolního obyvatelstva před účinky radioaktivního záření a kontaminace radioaktivními látkami. Mezi tyto základní cíle patří:

- chránit personál, obyvatelstvo a okolí jaderného zařízení proti radiačnímu ohrožení vytvořením a prováděním efektivní ochrany;
- za normálního provozu jaderného zařízení zajistit, aby radiační ozáření personálu a obyvatelstva zůstalo pod stanovenými limity v takové nízké míře, jak je rozumně dosažitelné;
- zajistit omezení radiačního ohrožení při nehodách, případně haváriích.

Mezi základní cíle v případě předcházení nehod nebo havárii patří:

- zajistit, aby k nehodám obecně nedocházelo;
- zajistit, aby do projektu jaderného zařízení byly zahrnuty všechny události, dokonce i ty s velmi nízkou pravděpodobností výskytu tak, aby v případě jejich výskytu byly radiační následky těchto událostí minimální;
- zajistit jak prevenci, tak snížit pravděpodobnost výskytu jakýchkoliv nehod jaderného zařízení pomocí omezujících opatření [15].

2.2 OBECNÉ BEZPEČNOSTNÍ FUNKCE

Tři základní obecná bezpečnostní kritéria jsou podle [16] :

- kontrola reaktivity – schopnost bezpečně odstavit reaktor a udržet jej v podmínkách bezpečného odstavení za všech projektovaných provozních režimů a nehod;

- chlazení aktivní zóny – schopnost odvádět zbytkové teplo z aktivní zóny reaktoru za všech projektovaných provozních režimů a nehod (chlazení aktivní zóny);
- kontrola radioaktivního materiálu – schopnost zamezit únikům radioaktivních látek, ale pokud by únik nastal, zajistit, aby jeho velikost nepřekročila stanovené limity za všech projektovaných provozních režimů, během nehod a po nich.

Dalším důležitým bodem zajištění jaderné bezpečnosti je plnění bezpečnostních funkcí. Tyto funkce jsou stanoveny tak, aby mohlo být v plném rozsahu zajištěno splnění obecných bezpečnostních kritérií. Bezpečnostní funkce jsou plněny pomocí zařízení a stavebních konstrukcí zahrnutých již v projektu jaderné elektrárny. Nicméně tyto původní funkce jsou stále vylepšovány pomocí pokroků ve vývoji a výzkumu. Bezpečnostní funkce v dnešní době nejvíce provozovaných JE II. generace vycházejí z dokumentu IAEA [16]. Tento dokument obsahuje seznam celkem 20 bezpečnostních funkcí:

- a) zabránit nepříjemným přechodovým procesům spojeným se změnami reaktivity;
- b) udržet reaktor po každém odstavení bezpečně odstavený;
- c) odstavit reaktor podle potřeby tak, aby nedošlo k rozvoji očekávaných provozních událostí na havárie či v případě havárií zmírnit jejich následky;
- d) odstavit reaktor v případě havárie se ztrátou chladiva, pokud je takové odstavení nutné k zajištění chlazení aktivní zóny;
- e1) udržet dostatečné množství chladiva pro chlazení aktivní zóny v havarijních podmínkách, pokud nebylo porušeno tlakové rozhraní reaktoru;
- e2) udržet dostatečné množství chladiva pro chlazení aktivní zóny v průběhu a po odeznění všech provozních stavů;
- f) v případě porušení tlakového rozhraní primárního okruhu odvádět teplo z aktivní zóny;
- g) odvádět zbytkový tepelný výkon v případě neporušeného primárního okruhu;
- h) odvádět teplo z ostatních bezpečnostních systémů až do koncového stupně odvodu tepla;
- i) zajistit nezbytnou podporu bezpečnostních funkcí (elektrické, pneumatické, hydraulické zdroje, aj.);
- j) udržet přijatelný stupeň integrity paliva v aktivní zóně reaktoru;
- k) udržet integritu reaktorové tlakové hranice;
- l) omezit únik radioaktivních látek z ochranné obálky v průběhu a po odeznění havarijních podmínek;
- m) udržet radiační ozáření obyvatelstva a personálu v rámci přijatých limitů;
- n) omezit v průběhu jakéhokoliv provozního stavu výpustě a úniky radioaktivních látek pod předepsanými limity;

- o) udržet kontrolu podmínek prostředí v jaderné elektrárně k provozu bezpečnostních systémů a také k přístupu personálu při plnění činností důležitých pro bezpečnost;
- p) udržet v průběhu jakéhokoliv provozního stavu kontrolu nad radioaktivními úniky z vyhořelého paliva skladovaného v místě JE ale mimo chladicí systém reaktoru;
- q) odvádět zbytkové teplo z vyhořelého paliva skladovaného v místě JE ale mimo chladicí systém reaktoru;
- r) udržet dostatečnou podkritičnost paliva skladovaného v místě JE ale mimo chladicí systém reaktoru;
- s) předcházet selhání nebo omezit následky selhání komponent a konstrukcí, jejichž porucha by mohla vést k narušení plnění bezpečnostní funkce.

2.3 BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY

Bezpečnostní systémy slouží k zajištění bezpečného odstavení jaderného reaktoru, k odvodu tepla z aktivní zóny za podmínek uvedených v projektu elektrárny a k omezení následků abnormálního provozu a havarijních podmínek. Bezpečnostními systémy jsou zařízení, komponenty a systémy, které se podílejí na plnění bezpečnostních funkcí. V této kategorii jsou rovněž zahrnuty systémy související s jadernou bezpečností. U bezpečnostních systémů a systémů souvisejících s jadernou bezpečností je kladen důraz na spolehlivost. Ta je zajištěna pomocí základních principů, mezi které patří redundance, diverzita a separace.

Redundance (zálohování) – jedná se o metodu zvýšení bezporuchovosti systému použitím záloh. K zálohování se používá jak identických (stejnorodých), tak i diverzních (různorodých) systémů. V jaderných elektrárnách s tlakovodními reaktory druhé generace (např. ETE) se u většiny systémů používá trojnásobná záloha (3×100 %). V případě potřeby takového systému postačí pouze jeden ze tří instalovaných systémů.

Diverzita (různorodost) – je způsob zálohování, kdy ke splnění dané funkce systému je použito více různorodých zařízení nebo činností. Účelem tohoto způsobu zálohování je zvýšit spolehlivost systému snížením pravděpodobnosti selhání systému ze společné příčiny, např. konstrukční, systematická, výrobní porucha, či některé poruchy z vnějších příčin.

Separace (fyzické oddělení) – slouží, stejně jako diverzita, zejména k omezení poruch se společnou příčinou (požár, záplavy apod.) [16].

3 PROJEKTOVÉ NEHODY VVER-1000

Jako největší projektovaná havárie v případě jaderného reaktoru VVER-1000 je uvažována událost, při které dojde k přetržení potrubí v I.O. V okamžiku přetrhnutí potrubí prudce expanduje pára z místa poškození, a to z důvodu obrovského tlaku v I.O (cca 15,7 MPa) a nízkého tlaku v KTMT (podtlaku, cca -0,2 MPa).

3.1 LOCA HAVÁRIE

Zkratka LOCA znamená Loss of Coolant Accident. V překladu to znamená havárie se ztrátou chladiva. Tato havárie nastává při porušení těsnosti, nebo při prasknutí potrubí, či reaktorové nádoby. Tím dojde k úniku chladiva. To způsobí snížení, případně zcela omezení chladicí schopnosti primárního okruhu. Zjednodušeně by se LOCA havárie dala rozdělit do tří velikostí podle úniku chladiva.

PRASKNUTÍ HLAVNÍHO POTRUBÍ PRIMÁRNÍHO OKRUHU

Maximální LOCA (Large break, LB-LOCA) je nejčastěji analyzována a definuje se z hlediska nejhorších následků. Je předpokládáno prasknutí potrubí se zachováním plného výtokového průřezu ve studené nebo v horké větvi. Průběh procesu závisí na mnoha okolnostech, např. zásah nouzových dochlazovacích systémů. Fáze této havárie jsou předmětem současného intenzivního experimentálního výzkumu i komplexních výpočtových analýz a jsou nejdůležitější fází v průběhu LB-LOCA havárie.

PRASKNUTÍ POTRUBÍ S MALÝM NEBO STŘEDNÍM ÚNIKEM CHLADIVA

Zkušenosti z některých havárií (např. Three Mile Island) a pokročilejší výpočtové analýzy ukazují, že i těmto haváriím je třeba věnovat daleko větší pozornost než v minulosti. Důvodem zvýšené pozornosti je podstatně větší šance výskytu, ale také její odlišný průběh přechodového procesu. Ten může být méně příznivý v extrémních případech než v případě maximální projektové havárie.

PRASKNUTÍ TRUBKY PAROGENERÁTORU

Prasknutí trubky PG lze zařadit samostatně. Kvůli svým sekundárním jevům patří mezi tzv. progresivní poruchy. Tyto poruchy, které začínají jako relativně malé a lokalizované, mohou postupně nárůst do vážných rozměrů. Šíření poruch ve svazku trubek PG je hlavním důvodem. Další specifická vlastnost tohoto typu poruchy je, že dochází ke zvyšování hladiny a tlaku v havarovaném PG. Vlivem systému automaticky regulovaného napájení se vlivem signálu poklesu hladiny PG zmenšuje přívod napájecí vody. PG se tím pádem napájí vodou z primárního okruhu. Tento nežádoucí stav je schopen způsobit znečištění celého sekundárního okruhu radioaktivními produkty. V případě progresivního charakteru poruchy by došlo k velkému úniku vody z primárního okruhu do sekundárního okruhu. Při takovém stavu dojde k poklesu tlaku v primárním okruhu až na hladinu tlaku v PG, zatímco v sekundárním okruhu nastanou problémy s růstem tlaku.

Pro pochopení problému vzniku události, které je věnován výpočet, je nutné LOCA přesněji popsat. Havárie LOCA představuje soubor navzájem propojených jevů a procesů, které se velmi obtížně modelují a analyzují. Mezi hlavní důvody patří dosud omezený stupeň prozkoumání některých termohydraulických procesů, jejich komplexně propojená vzájemná vazba, náročnost matematického aparátu a technické obtíže s experimentálním ověřováním [25].

3.1.1 MALÁ LOCA

V případě Jaderné elektrárny Temelín s reaktorem VVER-1000 lze popsat dvě LOCA havárie, z nichž jedna je malá LOCA. Pod označením LOCA s malou ztrátou chladiva z primárního okruhu (malá LOCA, small-break LOCA, SBLOCA) se rozumí roztržení potrubí malého průměru nebo porušení integrity hlavního cirkulačního potrubí s ekvivalentním \varnothing 109 mm, přes které uniká chladivo větším průtokem, než dokáže kompenzovat systém normálního doplňování. Takové případy patří do Kategorie III (ANSI).

Při této havárii je počítáno s rozsahem úniku v rozmezí ekvivalentního průměru od 25 mm do 109 mm na horké i studené větvi hlavního cirkulačního potrubí. U všech režimů malé LOCA havárie se předpokládá ztráta pracovních a rezervních zdrojů (vnějších zdrojů) elektrického napájení. Následkem této ztráty napájení dochází k vypnutí všech zařízení normálního provozu a dochází ke startu diesel-generátorů a následnému zapínání vybraných zařízení.

U malých rozměrů úniku o \varnothing 25-50 mm a současně předpokladu ztráty napájení dochází v úvodní fázi nehody k růstu tlaku v I.O kvůli prudkému snížení odvodu tepla sekundárním okruhem. Při větších rozměrech úniku klesá tlak v I.O od začátku vzniku nehody.

Během nehody dochází k vysušení kompenzátoru objemu, varu chladiva I.O. Odvod tepla sekundárním okruhem se uskutečňuje díky odvodu páry přes pojišťovací ventil PG. V tom případě přechází chladivo v I.O v proudění pomocí přirozené cirkulace. Při větších malých LOCA haváriích s otvorem přibližně o \varnothing 100 mm dochází k přerušení proudění pomocí přirozené cirkulace a vytvoření hydrouzávěrů na chladných větvích hlavního cirkulačního potrubí. V tomto případě je vychlazování reaktoru zajištěno funkcí havarijního systému chlazení aktivní zóny a výtokem energie z I.O přes vzniklý otvor.

Kompenzace ztráty chladiva je zajištěna vysokotlakými čerpadly havarijního systému chlazení aktivní zóny, hydroakumulátory a nízkotlakými čerpadly havarijního systému chlazení aktivní zóny. Při velmi malém úniku (o průměru přibližně \varnothing 25 mm) stačí vysokotlaký systém havarijního chlazení aktivní zóny, při větších malých LOCA haváriích (oprůměru přibližně \varnothing 100 mm) dochází ke vstříkování jak z hydroakumulátorů, tak i doplňování pomocí nízkotlakého systému havarijního chlazení aktivní zóny.

Z analýz případů malých LOCA havárií plyne, že při menším rozměru úniku je přehřívání aktivní zóny krátkodobější, nebo k němu nedochází vůbec a dosažené hodnoty maximální teploty povlaku palivových proutků jsou nižší. Nedochází k deformacím palivových proutků ani jiných konstrukcí aktivní zóny. Je zabezpečeno dlouhodobé chlazení aktivní zóny.

3.1.2 VELKÁ LOCA

V případě roztržení hlavního cirkulačního potrubí velkého průměru následuje rychlá ztráta chladiva z reaktoru, prudké snížení tlaku v primárním okruhu, vysušení aktivní zóny reaktoru, ztráta chlazení aktivní zóny a přehřívání povlaků palivových proutků.

Režimy velké LOCA (LBLOCA) jsou nejvážnějšími nehodami se ztrátou chladiva reaktoru. Havárie je doprovázena narušením chlazení aktivní zóny a přehříváním povlaků palivových proutků. Mezi nimi je nejnebezpečnějším z hlediska zhoršení chlazení aktivní zóny režim s gilotinovým roztržením hlavního cirkulačního potrubí na vstupu do reaktoru

s dvoustranným výtokem. Tento stav je určující pro scénář v třídě havarijních podmínek LOCA [25].

Z hlediska chlazení aktivní zóny má proces LBLOCA tři fáze. Chlazení palivových proutků je zajištěno následovně:

- vypouštěním obsahu primárního okruhu přes aktivní zónu;
- vstřík kapaliny, hlavně z hydroakumulátorů znovu zaplňujících nádobu reaktoru a aktivní zónu, podporovaný čerpadly havarijního doplňování;
- vstřík pouze vysokotlakými a nízkotlakými čerpadly havarijního doplňování.

První fáze přechodového procesu je charakterizována rychlým odtlakováním I.O spojeným s velkými průtoky hmoty porušenou smyčkou a téměř úplnou ztrátou chladiva a obnažením aktivní zóny.

V průběhu druhé fáze události kapalina z hydroakumulátorů a z vysokotlakého a nízkotlakého havarijního vstříku opět zaplňuje aktivní zónu. Oddělení hydroakumulátorů při dosažení nízké hladiny, v kombinaci s růstem vývinu páry v PG, vede k opětovnému natlakování okruhu a snížení zaplnění nádoby reaktoru.

Ve třetí fázi přechodového procesu dojde ke druhému obnažení aktivní zóny, což vede ke zvýšení teploty povlaku palivových proutků. Obsah kapaliny v okruhu roste v důsledku vysokotlakého a nízkotlakého havarijního vstříku, dokud není spádová komora nádoby reaktoru znovu zaplněna a nedojde k zaplavení aktivní zóny.

V další fázi nehody pokračuje provoz čerpadel havarijního systému chlazení aktivní zóny, která dodávají vodu v průběhu dlouhodobého chlazení. Teploty aktivní zóny se sníží a dlouhodobou stabilní úroveň spojenou s odváděním vyvíjeného zbytkového tepla.

Nehody velkých a středních LOCA patří mezi události Kategorie IV ANSI.

Ve skupině středních a velkých LOCA byly analyzovány následující iniciační události:

- plné roztržení potrubí hydroakumulátoru o \varnothing 280 mm v blízkosti připojení k sestupné šachtě reaktoru;
- plné roztržení spojovacího potrubí kompenzátoru objemu o \varnothing 346 mm v blízkosti připojení k horké větvi hlavního cirkulačního potrubí;
- roztržení horké větve hlavního cirkulačního potrubí s výtokem primárního chladiva přes otvory o \varnothing 2 x 850 mm;
- roztržení chladné větve hlavního cirkulačního potrubí s výtokem primárního chladiva přes otvory o \varnothing 2 x 850 mm.

V případě seismické události je malá pravděpodobnost poškození potrubí z důvodu pružného uložení potrubí a veškerých souvisejících zařízení [25].

Celková LOCA havárie by šla charakterizovat jako porucha potrubí, při které dojde k úniku média (vody) do KTMT. Současně se vytváří pára, která stoupá do prostor reaktorového sálu, a kapalná část stéká do jímky umístěné ve spodní části hermetické obálky. Z této jímky je uniklé chladivo čerpáno pomocí čerpadel havarijního systému chlazení aktivní zóny zpět do I.O přes výměníky tepla. Tyto výměníky pro odvod tepla jsou chlazeny pomocí

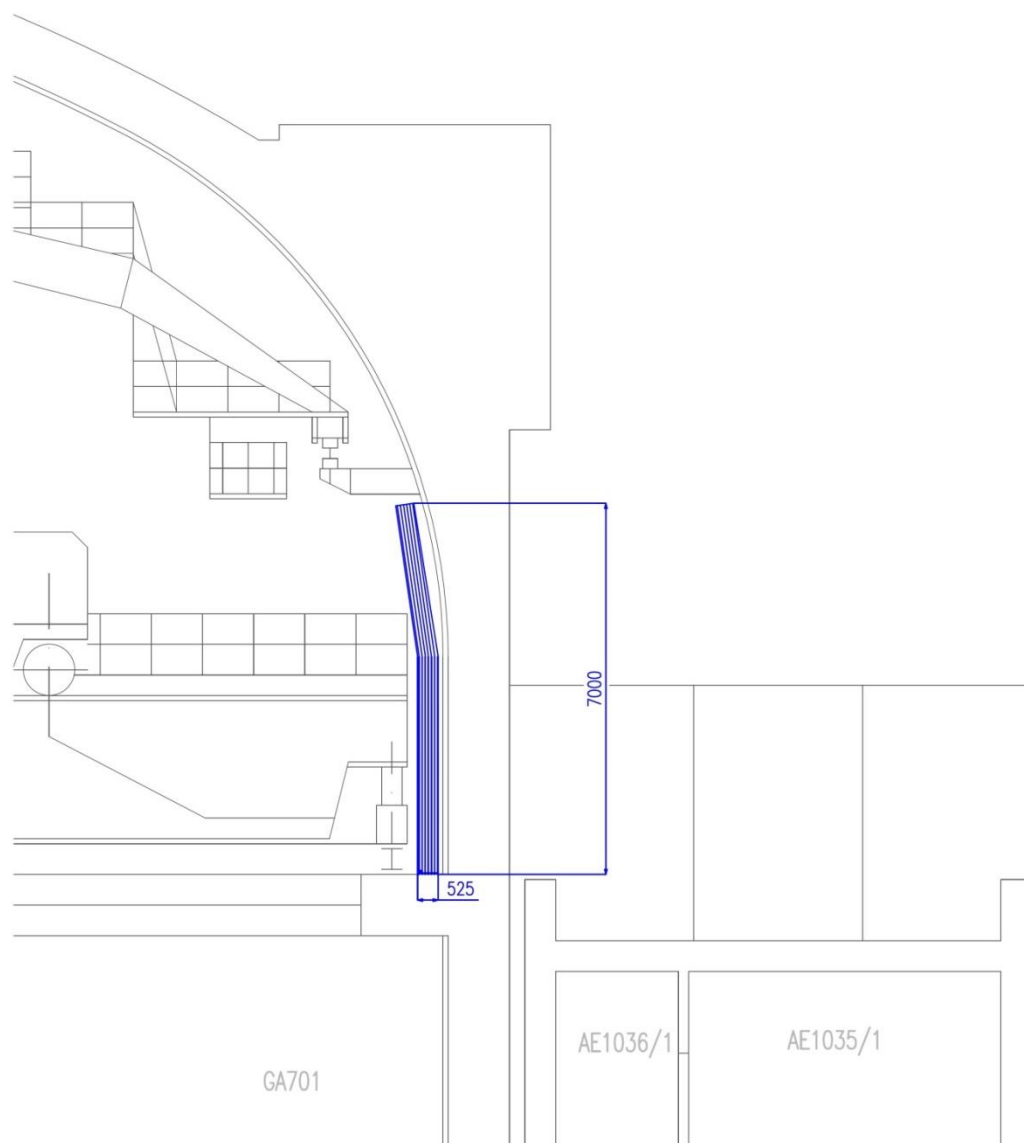
systemů pro technickou vodu důležitou. Současně je voda doplňována z havarijních pasivních bezpečnostních systémů, rezervních nádrží – hydroakumulátorů. V každém případě je nutné, aby aktivní zóna reaktoru byla neustále pod vodou. Porušené potrubí nelze uzavřít. Pouze je nutné stále doplňovat vodu tak, aby došlo k postupnému vyrovnání tlaků a omezení úniku z porušeného potrubí. Není možné využít odvodu tepla přes II.O, jelikož není tlak v I.O a není možnost dostat vodu do PG [26].

4 NÁVRH KONCEPCE PASIVNÍHO CHLAZENÍ

V tomto konkrétním případě bude pro návrh koncepce pasivního chlazení jaderného reaktoru VVER-1000 využit princip výměníků. Pro lepší zajištění jaderné bezpečnosti bude nejprve použito předpokladu dvou výměníků, z nichž jeden bude umístěn uvnitř kontejnmentu. Druhý výměník bude vně kontejnmentu na obestavbě a bude uvažováno chlazení vzduchem. Spojení bude zajištěno propojením potrubí, ve kterém bude uvažováno jako chladivo voda.

4.1 KONSTRUKCE VÝMĚNÍKU V KTMT

Na obrázku Obr. 17 je vidět schematické umístění výměníku uvnitř KTMT ve výřezu z řezu celého KTMT, který je vidět na obrázku. Výměník je vyznačen modře. Bude uvažována trubková konstrukce výměníku.



Obr. 17 Umístění výměníku uvnitř KTMT

4.1.1 VOLBA MATERIÁLU TRUBEK

Pro konstrukci výměníku bude použit materiál, který musí být schopen vydržet vysoké teploty během havárie. Pro co nejvyšší možné přenesení tepla musí mít materiál dobrou tepelnou vodivost. V tomto případě není vhodné použít materiály, jako jsou např. oceli a oceli legované chromem, jelikož v případě havárie s únikem radiace (neutronů) by dekontaminace přímo v prostorech KTMT nebyla jednoduchá.

Z tohoto důvodu bude zvolen jako návrhový materiál měď, jejíž tepelná vodivost má hodnotu přibližně 380 W/m·K podle [21].

4.1.2 POČET A USPOŘÁDÁNÍ TRUBEK

Rozměry trubek a jejich rozteče byly zvoleny na základě doporučení pro co největší možnou plochu a optimální celkový tepelný tok. Byla zvolena i malá rozteč, aby byl zvětšen počet trubek a tím i plocha výměníku. Zvolené hodnoty jsou uvedeny v tabulce Tab. 1.

Tab. 1 Parametry trubek

parametr	značka	hodnota	jednotka
vnější průměr trubky	D	20	mm
tloušťka stěny trubky	t	3	mm
vnitřní průměr trubky	d	14	mm
rozteč trubek	s ₁	30	mm
rozteč řad trubek	s ₂	30	mm
vzdálenost trubek	a ₁	10	mm

Z dostupných výkresů reaktorové budovy byl navrhnut tvar a umístění výměníku. Toto řešení pak bylo zkontrolováno se zaměstnanci ETE, kteří potvrdili tvar a možnost umístění výměníku uvnitř KTMT. Výměník uvnitř KTMT bude umístěn po obvodu reaktorového sálu. Délka výměníku je uvažována jako 95% celkového obvodu KTMT z důvodu umístění dalších technologií v místě návrhu. Obvod výměníku byl vypočítán podle dostupných výkresů.

Návrhové rozměry výměníku uvnitř KTMT jsou uvedeny v tabulce Tab. 2.

Tab. 2 Parametry výměníku

parametr	značka	hodnota	jednotka
výška výměníku	H	7	m
šířka výměníku	š	0,5	m
délka výměníku	L	130	m
obvod KTMT	O _{KTMT}	138	m

Nejprve je nutné spočítat celkové množství trubek výměníku. Následně bude určena celková plocha výměníku, který je teoreticky možné umístit do KTMT aby stále plnil potřebné podmínky pro přirozené proudění, které jsou nutné, aby systém byl pasivní. Vztahy pro výpočet uspořádání výměníku jsou z [20].

Výpočet počtu trubek v šířce výměníku n_{tr}

$$\check{s} = \frac{3}{2} \cdot s_1 + (n_{tr} - 1) \cdot s_1 \quad (1)$$

$$n_{tr} = 1 + \frac{\check{s}}{s_1} - 1,5 = 1 + \frac{0,5}{0,03} - 1,5 = 16,6667 \gg 17 \text{ trubek}$$

kde \check{s} je šířka výměníku [m]

s_1 je rozteč trubek v řadě [m]

n_{tr} je počet trubek v řadě [–]

Výpočet skutečné šířky výměníku \check{s}_{skut}

$$\check{s}_{skut} = \frac{3}{2} \cdot s_1 + (n_{tr} - 1) \cdot s_1 \quad (2)$$

$$\check{s}_{skut} = \frac{3}{2} \cdot 0,3 + (17 - 1) \cdot 0,3 = 0,525 \text{ m}$$

kde \check{s}_{skut} je skutečná šířka výměníku [m]

Výpočet počtu trubek v šířce výměníku n_{rad}

$$L = \frac{3}{2} \cdot s_2 + (n_{rad} - 1) \cdot s_2 \quad (3)$$

$$n_{rad} = 1 + \frac{L}{s_2} - 1,5 = 1 + \frac{132,01}{0,03} - 1,5 = 4\,399,87 \gg 4\,400 \text{ řad}$$

kde L je délka výměníku [m]

s_2 je rozteč řad [m]

n_{rad} je počet řad trubek [–]

Výpočet skutečné šířky výměníku L_{skut}

$$L_{skut} = \frac{3}{2} \cdot s_2 + (n_{tr} - 1) \cdot s_2 \quad (4)$$

$$L_{skut} = \frac{3}{2} \cdot 0,3 + (4400 - 1) \cdot 0,3 = 132,015 \text{ m}$$

kde L_{skut} je skutečná délka výměníku [m]

Celková vnější plocha jedné trubky S_{out}

$$S_{out} = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot H \quad (5)$$

$$S_{out} = \pi \cdot \left(\frac{0,03}{2}\right)^2 \cdot 7 = 0,439823 \text{ m}^2$$

kde S_{out} je vnější plocha jedné trubky [m^2]

D je vnější průměr [m]

H je výška výměníku [m]

Celková vnitřní plocha jedné trubky S_{in}

$$S_{in} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot H \quad (6)$$

$$S_{in} = \pi \cdot \left(\frac{0,024}{2}\right)^2 \cdot 7 = 0,307876 \text{ m}^2$$

kde S_{in} je vnitřní plocha jedné trubky [m^2]

d je vnitřní průměr [m]

Celkový počet trubek výměníku n_{tr_celk}

$$n_{tr_celk} = n_{tr} \cdot n_{řad} \quad (7)$$

$$n_{tr_celk} = 17 \cdot 4\,400 = 74\,800 \text{ trubek}$$

kde n_{tr_celk} je celkový počet trubek [–]

Celková vnější plocha výměníku $S_{výměník_KTMT}$

$$S_{výměník_KTMT} = n_{tr_celk} \cdot S_{out} \quad (8)$$

$$S_{výměník_KTMT} = 74\,800 \cdot 0,439823 = 32\,898,76 \text{ m}^2$$

kde $S_{výměník_KTMT}$ je vnější plocha celého výměníku [m^2]

Pro zjednodušení výpočtu v úvodní fázi je dán předpoklad, že výměník bude umístěn v KTMT jako jeden celek. Ale pro budoucí použití by bylo lepší rozdělení do většího počtu samostatných systémů výměníků.

4.2 PŘESTUP TEPLA VE VÝMĚNÍKU UVNITŘ KTMT

V reaktorovém sále (místnost GA701) uvnitř KTMT jsou následující podmínky prostředí, které jsou uvedeny v tabulce Tab. 3.

Tab. 3 Podmínky v místnostech [27]

místnost	provozní podmínky			havarijní podmínky		
	teplota	vlhkost	tlak	teplota	vlhkost	tlak
	°C	%	MPa	°C	%	MPa
	T_n	V_n	p_n	T_h	V_h	p_h
reaktorový sál GA701	45	60	0,0998	150	100	0,5
box PG GA407/1	57	90	0,0998	150	100	0,5
box PG GA407/2	57	90	0,0998	150	100	0,5
box PG GA506/1	60	90	0,0998	150	100	0,5
box PG GA506/2	60	90	0,0998	150	100	0,5
šachta GA501	60	90	0,0998	150	100	0,5

Pro možnost dalšího výpočtu je potřeba určit přesnější parametry, které jsou v reaktorovém sále GA701. Tyto parametry se týkají hlavně podmínek v případě havarijních podmínek, tedy teplota v místnosti 150 °C, tlak 0,5 MPa (pro některé výpočty využít převod 0,5 MPa=5 bar) a předpoklad, že prostor reaktorového sálu je nasycen parou.

Hodnoty, které budou použity pro výpočet a jsou uvedeny v tabulce Tab. 4, jsou získány z programu XSteam a SteamProperty.

Jako vstupní hodnoty do programů byl určen tlak 0,5MPa (případně 5 bar) a nasycenost (saturace).

Tab. 4 Parametry parní směsi

parametr	značka	hodnota	jednotka
vstupní hodnoty			
tlak	p	5	bar
určené hodnoty			
teplota saturace	t_{sat}	151,84	°C
latentní teplo	i_{fg}	2 107,9223	kJ/kg
entalpie kapalně fáze	i_l	640,185	kJ/kg
plynová konstanta kapalně fáze	$c_{p,l}$	4,3151	kJ/kg·K
dynamická viskozita kapalně fáze	μ_l	$1,8 \cdot 10^{-4}$	Pa·s
hustota kapalně fáze	ρ_l	915,2843	kg/m ³
tepelná vodivost kapalně fáze	λ_l	0,68356	W/m·K
entalpie parní fáze	i_v	2 748,1076	kJ/kg
plynová konstanta parní fáze	$c_{p,v}$	2,4127	kJ/kg·K
dynamická viskozita parní fáze	μ_v	$1,41 \cdot 10^{-5}$	Pa·s
hustota parní fáze	ρ_v	2,6681	kg/m ³

Aby bylo možné spočítat výsledný přestup tepla, je nutné nejdříve určit koeficienty přestupu tepla na vnitřní a vnější straně trubky výměníku.

V tomto případě je dána úvaha, že všechna voda, která unikne z I.O při havárii LOCA, se přemění na páru. Ve skutečnosti by to nemuselo nastat.

Nyní jsou určeny všechny potřebné hodnoty, je tedy možno postoupit k samotnému výpočtu kondenzace. V tomto případě bude uvažována filmová kondenzace pro výpočet. Filmová kondenzace způsobuje horší přestup tepla než v případě kapičkové kondenzace. Je tedy příhodnější využít princip filmové kondenzace pro výpočet z důvodu hoších výsledků, které mohou nastat.

4.2.1 FILMOVÁ KONDENZACE

V případě, že se nasycená pára dostane do styku s chladným povrchem, bude následně přecházet do kapalného skupenství, tzv. kondenzovat. Kondenzaci lze nazvat filmovou v případě, kdy je stěna smáčena kondenzátem, a ten odtéká ve formě souvislého filmu. Ve výpočtu bude uvažováno protiproudé proudění páry a kondenzátu. Je více pravděpodobnější, že pára bude proudit směrem vzhůru proti směru stékání kondenzátu.

Při uvážení protiproudého proudění je vhodné použít výpočet Nusseltova čísla pomocí vzorce pro laminární proudění z [17]. Vztah také předpokládá stejnou teplotu povrchu trubky na vnější i vnitřní straně.

Jako teplota povrchu je zvolena střední teplota mezi teplotou páry uvnitř KTMT a teplotou vstupující do výměníku. Pro výpočet této teploty je možné použít vztah:

$$T_s = \frac{T_{sat} + T_{pp}}{2} \quad (9)$$

$$T_s = \frac{151,84 + 60}{2} = 105,92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

kde T_s je střední teplota [$^\circ\text{C}$]

T_{sat} je teplota saturace [$^\circ\text{C}$]

T_{pp} je teplota na vstupu do okruhu [$^\circ\text{C}$]

Podle [17] je možné spočítat součinitel přestupu tepla pomocí vztahu pro Nusseltovo číslo, který je uveden zde:

$$Nu_K = \frac{\alpha_K \cdot L_K}{\lambda_l} \quad (10)$$

$$Nu_K = 0.943 \cdot \left[\frac{\rho_l \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot i'_{fg} \cdot L_K^3}{\mu_l \cdot \lambda_l \cdot (T_{sat} - T_s)} \right]^{1/4} \quad (11)$$

kde Nu_K je Nusseltovo číslo při kondenzaci $[-]$

α_K je součinitel přestupu tepla při kondenzaci $[W/m^2 \cdot K]$

L_K je délka trubky $[m]$

λ_l je tepelná vodivost kapalné fáze $[W/m \cdot K]$

ρ_l je hustota kapalné fáze $[kg/m^3]$

ρ_v je hustota parní fáze $[kg/m^3]$

i'_{fg} je latentní teplo pro výpočet $[kJ/kg]$

g je gravitační zrychlení $[m/s^2]$

μ_l je dynamická viskozita kapalné fáze $[Pa \cdot s]$

Pro výpočet Nusseltova čísla je potřeba znát upřesněné latentní teplo, to se spočítá pomocí vzorce:

$$i'_{fg} = i_{fg} + 0,68 \cdot c_{p,l} \cdot (T_{sat} - T_s) \quad (12)$$

$$i'_{fg} = 2\,107,9223 + 0,68 \cdot 4,3151 \cdot (151,84 - 105,92)$$

$$i'_{fg} = 2\,240,1984 \text{ kJ/kg}$$

kde i_{fg} je latentní teplo $[kJ/kg]$

$c_{p,l}$ je měrná tepelná kapacita kapalné fáze $[kJ/kg \cdot K]$

Nyní je možné dosadit do vztahů a dostat výsledný koeficient přestupu tepla:

$$Nu_K = 0,943 \cdot \left[\frac{915,2843 \cdot 9,81 \cdot (915,2843 - 2,6681) \cdot 2\,240,1984 \cdot 10^3 \cdot 7^3}{1,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,68536 \cdot (151,84 - 105,92)} \right]^{1/4}$$

$$Nu_K = 30\,777,9302$$

$$\alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda_l}{L} \quad (13)$$

$$\alpha_K = \frac{30\,777,9302 \cdot 0,6835}{7} = 3\,005,52 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Výsledný koeficient přestupu tepla pro kondenzaci na povrchu trubky je 3005,5 W/m²·K.

4.2.2 PŘIROZENÉ PROUDĚNÍ UVNITŘ TRUBKY

Neméně důležité je určit koeficient přestupu tepla na vnitřní straně výměníku umístěného v KTMT. Vzorce pro výpočet koeficientu přestupu tepla při volném proudění, tedy volné konvekci, jsou uvedeny v [18].

První fáze výpočtu zahrnuje určení teploty vnitřní stěny. Jako tato teplota bude uvažována střední teplota mezi teplotou páry uvnitř KTMT a teplotou vstupující do výměníku.

$$Nu_{pp} = \frac{\alpha_{pp} \cdot s}{\lambda_{pp}} \quad (14)$$

$$\alpha_{in} = \frac{Nu_{pp} \cdot \lambda_{pp}}{s} \quad (15)$$

kde Nu_{pp} je Nusseltovo číslo při přirozené proudění [–]

α_{pp} je součinitel přestupu tepla při přirozené proudění [W/m^2K]

L_K je délka trubky [m]

s je charakteristický rozměr [m]

λ_{pp} je tepelná vodivost chladicí vody [$W/m \cdot K$]

$$Gr_S^* = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_E) \cdot s^3}{\nu_{pp}^2} \cdot \frac{s}{L} \quad (16)$$

kde Gr_S^* je Grashofovo číslo [–]

β je součinitel objemové roztažnosti [K^{-1}]

$T_w = T_s$ je teplota stěny [$^{\circ}C$]

$T_E = T_{pp}$ je na vstupu vody do výměníku [$^{\circ}C$]

ν_{pp} je kinematická viskozita chladicí vody [m^2/s]

Na základě postupu uvedeného v knize [18] je ve výpočtu využit charakteristický rozměr. Pro případ ohřívání trubky je charakteristický rozměr: $s = r = d/2$.

$$s = \frac{0,014}{2} = 0,007 \text{ m}$$

V případě výpočtu koeficientu přestupu tepla je také nutné nejdříve určit parametry vody v okruhu, které jsou uvedeny v tabulce Tab. 5.

Tab. 5 Parametry ve vnitřním okruhu výměníku

parametr	značka	hodnota	jednotka
vstupní hodnoty			
tlak	p	1	bar
teplota vstup	t _e	60	°C
určené hodnoty			
tepelná vodivost kapaliny	λ _{in}	0,6508	W/m·K
dynamická viskozita	μ _{in}	0,000466	Pa·s
hustota	ρ _{in}	983,21003	kg/m ³
kinematická viskozita	ν _{in}	4,7436·10 ⁻⁷	m ² /s
Prandtlovo číslo	Pr _{in}	2,9976	-
objemová roztažnost	β _{in}	0,000522	K ⁻¹
koeficient 1	C ₁	0,0625	-
koeficient 2	C ₂	0,52	-
charakteristický rozměr	s	0,007	m

Kinematickou viskozitu nebylo možné určit přímo pomocí programu XSteam, ale lze ji vypočítat pomocí vztahu pro výpočet z hustoty a dynamické viskozity. Koeficient objemové roztažnosti pro vodu byl určen z [21]. Koeficienty C₁ a C₂ jsou také z [19] pro případ ohřívání trubky.

$$v_{pp} = \frac{\mu_{pp}}{\rho_{pp}} \quad (17)$$

$$v_{pp} = \frac{0,000466}{983,21003} = 4,7436 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^2/\text{s]}$$

kde ρ_{pp} je hustota chladicí vody [kg/m³]

μ_{pp} je dynamická viskozita chladicí vody [Pa·s]

Nyní je možné spočítat Grashofovo číslo, které je nezbytné pro výpočet Nusseltova čísla.

$$Nu_{pp} = \left[\frac{1}{(C_1 \cdot Gr_S^* \cdot Pr)^{3/2}} + \frac{1}{[C_2 \cdot (Gr_S^* \cdot Pr)^{1/4}]^{3/2}} \right]^{-2/3} \quad (18)$$

kde Pr je Prandtlovo číslo [kg/m³]

C₁ je koeficient pro výpočet Nusseltova čísla [–]

C₂ je koeficient pro výpočet Nusseltova čísla [–]

$$Gr_S^* = \frac{9,81 \cdot 0,000522 \cdot (105,92 - 60) \cdot 0,007^3}{(4,7436 \cdot 10^{-7})^2} \cdot \frac{0,007}{7}$$

$$Gr_S^* = 358,3089$$

$$Nu_{pp} = \left[\frac{1}{(0,0625 \cdot 358,3089 \cdot 2,9976)^{3/2}} + \frac{1}{[0,52 \cdot (358,3089 \cdot 2,9976)^{1/4}]^{3/2}} \right]^{-2/3}$$

$$Nu_{pp} = 2,9585$$

$$\alpha_{pp} = \frac{2,9585 \cdot 0,6508}{0,007} = 275,0574 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Koeficient pro přestup tepla uvnitř trubky při přirozeném proudění je $275,0574 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

4.2.3 E-NTU METODA

Nyní, když jsou známy oba koeficienty přestupu tepla na vnitřní a vnější straně výměníku v KTMT, je možné vypočítat pomocí ϵ -NTU metody poměry ve výměníku vzhledem k velikosti tepla, které je potřeba odvést. Výpočtové vztahy pro ϵ -NTU metodu byly vzaty z [18].

V případě LOCA havárie by se celkem uvolnilo 3120 MWt z důvodu předpokladu, že výkon reaktoru je v okamžiku havárie 100 % a 3120 MWt je nominální tepelný výkon reaktoru.

V tabulce Tab. 6 jsou uvedeny předpoklady pro výpočet pomocí ϵ -NTU metody.

Tab. 6 Parametry pro ϵ -NTU metodu

parametr	značka	hodnota	jednotka
vstupní hodnoty			
tlak uvnitř okruhu	p	1	bar
určené hodnoty			
vstupní teplota horké větve	$T_{h,in}$	150,00	°C
vstupní teplota studené větve	$T_{c,in}$	60,00	°C
měrná tepelná kapacita studené větve	$c_{p,c}$	4 188,10	J/kg·K
plocha výměníku	$A_{vým,KTMT}$	37 542,00	m ²

Základní vzorec pro výpočet ϵ -NTU metody je:

$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_{min}} \quad (19)$$

kde NTU je koeficient „*Number of transfer unit*“ [–]

U je koeficient prostupu tepla stěnou výměníku [$W/m^2 \cdot K$]

A je plocha výměníku [m^2]

C_{min} je minimální tepelná kapacita proudu [W/K]

Dále je nutné určit efektivnost výměníku podle:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (20)$$

kde ε je koeficient účinnosti výměníku [–]

Q je přenesené teplo [W]

q_{max} je maximální přenesené teplo [W]

Hodnotu q_{max} je možno vypočítat podle:

$$q_{max} = C_{min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (21)$$

kde $T_{h,in}$ je vstupní teplota horké větve [$^{\circ}C$]

$T_{c,in}$ je vstupní teplota studené větve [$^{\circ}C$]

Minimální tepelná kapacita proudu určuje vztah:

$$C_{min} = \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \quad (22)$$

kde \dot{m}_c je hmotnostní průtok studené větve [kg/s]

$c_{p,c}$ je měrná tepelná kapacita studené větve [$J/kg \cdot K$]

Hmotnostní průtok chladnější (menší) vstupní hodnoty lze spočítat podle:

$$\dot{m}_c = \frac{Q}{c_{p,c} \cdot \Delta T_c} \quad (23)$$

kde ΔT_c je rozdíl teplot vstup/výstup studená větev [$^{\circ}C$]

Pro určení ΔT_c bude dán předpoklad, že se chladivo ve výměníku z vnitřní strany ohřeje z $60^{\circ}C$ na $80^{\circ}C$. Jelikož je při návrhovém tlaku 1bar teplota saturace $100^{\circ}C$, není žádoucí, aby voda v tomto okruhu vřela. Teplota saturace by mohla být posunuta na vyšší hodnotu pomocí zvýšení tlaku, který by ale bylo náročné udržet. Rozdíl teplot se spočítá pomocí:

$$\Delta T_c = T_{c,out} - T_{c,in} \quad (24)$$

kde $T_{c,out}$ je výstupní teplota studené větve [$^{\circ}C$]

Jsou známy všechny potřebné vztahy hodnot pro výpočet koeficientu NTU, který lze vypočítat podle [17] za předpokladu $C_r=0$ pro případ výměníku se změnou skupenství.

$$NTU = -\ln \cdot (1 - \varepsilon) \quad (25)$$

Nyní je možné provést dosazení hodnot a samotný výpočet.

$$\Delta T_c = 80 - 60 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_c = \frac{3,12 \cdot 10^9}{4188,1 \cdot 20} = 37\,248,39 \text{ kg/s}$$

$$C_{min} = 37\,248,39 \cdot 4188,1 = 156 \cdot 10^6 \text{ W/K}$$

$$q_{max} = 156 \cdot 10^6 \cdot (151,84 - 60) = 14,327 \cdot 10^9 \text{ W}$$

$$\varepsilon = \frac{3,12 \cdot 10^9}{14,327 \cdot 10^9} = 0,22$$

$$NTU = -\ln \cdot (1 - 0,22) = 0,2456$$

Pro další výpočet je nutné spočítat koeficient prostupu tepla U vztažený k vnější ploše trubky, který se určí z jednotlivých tepelných odporů vrstev podle [19]:

Tepelný odpor na straně páry:

$$R_K = \frac{1}{\alpha_K} \quad (26)$$

$$R_K = \frac{1}{3005,52} = 0,0003333 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

kde R_K je tepelný odpor na straně páry [$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$]

Tepelný odpor stěny trubky:

$$R_{stěna} = \frac{D}{2 \cdot \lambda_m} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (27)$$

$$R_{stěna} = \frac{0,02}{2 \cdot 380} \cdot \ln\left(\frac{0,02}{0,014}\right) = 0,000009 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

kde $R_{stěna}$ je tepelný odpor stěnou trubky [$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$]

λ_m je tepelná vodivost materiálu [$\text{W/m} \cdot \text{K}$]

Tepelný odpor na straně vody:

$$R_{pp} = \frac{D}{d} \cdot \frac{1}{\alpha_{pp}} \quad (28)$$

$$R_{pp} = \frac{0,02}{0,014} \cdot \frac{1}{275,0574} = 0,005194 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

kde R_{pp} je tepelný odpor na straně vody [$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$]

Součinitel prostupu tepla se potom rovná převrácené hodnotě sumy těchto odporů:

$$U = \frac{1}{\sum R_i} = \frac{1}{R_{pp} + R_{stěna} + R_K} \quad (29)$$

$$U = \frac{1}{0,005194 + 0,000009 + 0,0000333} = 180,641 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Když jsou známy všechny proměnné, je možno spočítat potřebnou plochu výměníku podle ϵ -NTU metody.

$$A = \frac{NTU \cdot C_{min}}{U} \quad (30)$$

$$A = \frac{0,2456 \cdot 156 \cdot 10^6}{180,641} = 212\,103,13 \text{ m}^2$$

Jen pro příklad lze uvést potřebnou velikost koeficientu prostupu tepla pro plochu výměníku uvnitř KTMT, který je technicky a dispozičně proveditelný.

$$U = \frac{NTU \cdot C_{min}}{A} \quad (31)$$

$$U = \frac{0,2456 \cdot 156 \cdot 10^6}{32898,76} = 1\,164,62 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Této hodnoty nicméně není za podmínek uvažovaných ve výpočtu jednoduché dosáhnout.

Pomocí doplňku MS Excel Řešitel byla zjištěna hodnota Q_{teor} , která označuje množství tepla, které je navrhovaný výměník s plochou 32 987 m² schopno přenést.

$$Q_{teor} = 0,483836 \text{ MW}$$

4.3 KONSTRUKCE VÝMĚNÍKU VNĚ KTMT

Jako další možnost bude uvažováno umístění výměníku nad obvodovým prstence (římsou) KTMT, kde by pára proudila prostupy a potrubím přímo do prostoru v tomto výměníku. Bude uvažováno horizontální uspořádání trubek výměníku. Nejdříve se navrhne rozmístění trubek do mříže. Pro určení rozměrů a hodnot výměňkové mříže je využito vzorců uvedených v podkapitole 4.1.3.

Pro výpočet stačí hodnoty uvedené v tabulce Tab. 7.

Tab. 7 Parametry trubek výměníku vně KTMT

parametr	značka	hodnota	jednotka
vnější průměr trubky	D_{out_KTMT}	40	mm
tloušťka stěny trubky	t_{out_KTMT}	3	mm
vnitřní průměr trubky	d_{out_KTMT}	34	mm
rozteč trubek	S_L	60	mm
rozteč řad trubek	S_T	60	mm
vzdálenost trubek	a_{out_KTMT}	10	mm

4.4 PŘESTUP TEPLA VE VÝMĚNÍKU UMÍSTĚNÉHO VNĚ KTMT

Vstupní parametry pro výpočet přestupu tepla uvnitř výměníku umístěného vně KTMT jsou uvažovány stejně jako v předešlé kapitole, kde jsou vedeny v tabulce Tab. 4.

4.4.1 KONDENZACE UVNITŘ TRUBKY

Nejdříve je nutné určit teplotu na povrchu trubek a teplotu vzduchu proudícího okolo. Pro výpočet teploty povrchu trubek je uvažován stejný vztah jako pro předchozí návrhový stav, a to rovnice (9). Teplota uvnitř je $T_{sat}=151,84 \text{ °C}$ a jako teplota vzduchu je zvolena konzervativně horší varianta, která může nastat v letních měsících, a to $T_{\infty}=50 \text{ °C}$. Střední teplota stěny se pak po dosazení do vztahu spočítá:

$$T_{s,out_KTMT} = \frac{151,84 + 50}{2} = 100,92 \text{ °C}$$

Je dán předpoklad, že kondenzace bude probíhat v horizontálních trubkách. Pro tento předpoklad se použije vzorec z [17] pro výpočet koeficientu přestupu tepla uvnitř horizontálních trubek:

$$\alpha_{K,out_KTMT} = 0.555 \cdot \left[\frac{\rho_l \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot i'_{fg_out_KTMT} \cdot \lambda_l^3}{\mu_l \cdot (T_{sat} - T_{s,out_KTMT}) \cdot d_{out_KTMT}} \right]^{1/4} \quad (32)$$

kde α_{K,out_KTMT} je součinitel přestupu tepla při kondenzaci uvnitř trubek [W/m^2K]

d_{out_KTMT} je vnitřní průměr trubek vnějšího výměníku [m]

Latentní teplo pro tento případ se spočítá:

$$i'_{fg_out_KTMT} = i_{fg} + \frac{3}{8} \cdot c_{p,l} \cdot (T_{sat} - T_{s,out_KTMT}) \quad (33)$$

$$i'_{fg_out_KTMT} = 2\,107,9223 + \frac{3}{8} \cdot 4,3151 \cdot (151,84 - 100,92)$$

$$i'_{fg} = 2\,188,959 \text{ kJ/kg}$$

Nyní je možno vypočítat přestup tepla za pomoci hodnot, které jsou známy z předchozího výpočtu přestupu tepla při kondenzaci.

$$\alpha_{K,out_KTMT} = 0.943 \cdot \left[\frac{915,2843 \cdot 9,81 \cdot (915,2843 - 2,6681) \cdot 2\,188,959 \cdot 10^3 \cdot 0,68536^3}{1,8 \cdot 10^{-4} \cdot (151,84 - 100,92) \cdot 0,04} \right]^{1/4}$$

$$\alpha_{K,out_KTMT} = 6\,488 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel přestupu tepla při kondenzaci uvnitř horizontálních trubek je $6488 \text{ W/m}^2\text{K}$.

4.4.2 PŘESTUP TEPLA VNĚ TRUBEK

Přestup tepla na straně vzduchu se spočítá na základě proudění okolo trubek jak je uvedeno v [17].

Nyní je potřeba určit parametry pro vzduch. Je uvažováno, že vzduch ve výměníku bude možné ohřát až na teplotu $80 \text{ }^\circ\text{C}$ a vstupovat bude o teplotě $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Střední teplota pro určení parametrů vzduchu je $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Parametry byly určeny pomocí [22] a jsou uvedeny v tabulce Tab. 8.

Tab. 8 Parametry vzduchu

parametr	značka	hodnota	jednotka
vstupní hodnoty			
tlak	p	1,013	bar
teplota vstup	T _∞	50	°C
určené hodnoty			
tepelná vodivost vzduchu	λ _{air}	0,028948	W/m·K
dynamická viskozita vzduchu	μ _{air}	0,000466	Pa·s
hustota vzduchu	ρ _{air}	1,044	kg/m ³
kinematická viskozita vzduchu	ν _{air}	0,000019491	m ² /s
měrná tepelná kapacita vzduchu	c _{p,air}	1,0092	kJ/kg·K
Prandtlovo číslo vzduchu	Pr _{air}	0,7096	-
teplota stěny	T _{surf}	100,92	°C
Prandtlovo číslo vzduchu na povrchu trubky	Pr _{surf}	0,707	-

Jako rychlost vzduchu volíme nízkou hodnotu v případě téměř bezvětří a to je $w_{air}=1$ m/s

Je potřeba spočítat maximální rychlost vzduchu v mříži a to z:

$$w_{max} = \frac{S_T}{S_T - D_{out_KTMT}} \cdot w \quad (34)$$

$$w_{max} = \frac{0,6}{0,6 - 0,4} \cdot 1 = 3 \text{ m/s}$$

kde w_{max} je maximální rychlost vzduchu [m/s]

S_T je rozteč řad trubek ve výměníku [m]

S_L je rozteč trubek v řadě ve výměníku [m]

w je rychlost vzduchu [m/s]

Nyní je možno spočítat Reynoldsovo číslo podle:

$$Re = \frac{w_{max} \cdot D_{out_KTMT}}{\nu_{air}} \quad (35)$$

$$Re = \frac{3 \cdot 0,04}{1,949 \cdot 10^{-5}} = 6\,156,688$$

kde Re je Reynoldsovo číslo [-]

ν_{air} je kinematická viskozita vzduchu [m^2/s]

D_{out_KTMT} je vnější poloměr trubek výměníku [m]

Je potřeba určit koeficienty C a m , ty se určí z [17]. Je uvažováno uspořádání mříže v zákrytovém uspořádání a vystřídáném uspořádání.

Pro zákrytové uspořádání jsou koeficienty uvedeny v tabulce Tab. 9.

Tab. 9 Koeficienty pro zákrytové uspořádání

konstanta C	0,27
konstanta m	0,63

Pro vystřídáné uspořádání jsou koeficienty uvedeny v tabulce Tab. 10.

Tab. 10 Koeficienty pro vystřídáné uspořádání

konstanta C	0,35
konstanta m	0,6

Kde konstanta C byla vypočtena na základě vztahu:

$$C = 0,35 \cdot \left(\frac{S_T}{S_L}\right)^{1/5} \quad (36)$$

$$C = 0,35 \cdot \left(\frac{0,6}{0,6}\right)^{1/5} = 0,35$$

kde C je výpočtový koeficient [–]

Za podmínek, které jsou splněny, je možné přejít k výpočtu Nusseltova čísla:

$$0,7 < Pr < 500$$

$$NL \geq 20$$

$$1000 < Re < 2 \cdot 10^6$$

Podmínka $NL \geq 20$ bude splněna, jelikož v případě realizace by počet trubek v podélném směru byl určitě větší než 20.

$$Nu_D = C \cdot Re^m \cdot Pr_{air}^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{air}}{Pr_{surf}}\right)^{1/4} \quad (37)$$

kde Nu_D je Nusseltovo číslo [–]

Pr_{air} je Prandtlovo číslo pro vzduch [–]

Pr_{surf} je Prandtlovo číslo pro teplotu vzduchu na povrchu trubky [–]

$$Nu_{D,Z} = 0,27 \cdot 6\,156,688^{0,63} \cdot 0,7096^{0,36} \cdot \left(\frac{0,7096}{0,707}\right)^{1/4}$$

$$Nu_{D,Z} = 58,266$$

$$Nu_{D,V} = 0,35 \cdot 6\,156,688^{0,6} \cdot 0,7096^{0,36} \cdot \left(\frac{0,7096}{0,707}\right)^{1/4}$$

$$Nu_{D,V} = 58,135$$

Z Nusseltova čísla je teď možné spočítat koeficient přestupu tepla na straně vzduchu podle:

$$\alpha_D = \frac{Nu_D \cdot \lambda_{air}}{D_{out}} \quad (38)$$

kde λ_{air} je tepelná kapacita vzduchu [$W/m \cdot K$]

$$\alpha_{D,Z} = \frac{58,266 \cdot 0,028948}{0,04} = 42,167 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\alpha_{D,V} = \frac{58,135 \cdot 0,028948}{0,04} = 42,073 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Součinitel pro přestup tepla na straně vzduchu vychází lépe pro trubky zákrytovém uspořádání, a to 42,167 W/m²·K. Pro následující výpočty pomocí ε-NTU metody bude použita tato hodnota.

4.4.3 ϵ -NTU METODA 2

Postup je stejný jako v předchozím případě výpočtu pomocí ϵ -NTU metody.

V tabulce Tab. 11 jsou uvedeny předpoklady pro výpočet.

Tab. 11 Parametry pro ϵ -NTU metodu výměníku vně KTMT

parametr	značka	hodnota	jednotka
určené hodnoty			
vstupní teplota horké větve	$T_{h,in}$	151,8	°C
vstupní teplota studené větve	$T_{c,in}$	50,00	°C
měrná tepelná kapacita studené větve	$c_{p,c,air}$	1009,2	J/kg·K

Pro určení ΔT_c bude dán předpoklad, že se chladivo ve výměník z vnější strany ohřeje z 50 °C na 80 °C.

Nyní je možné provést dosazení hodnot a samotný výpočet.

$$\Delta T_c = 80 - 50 = 30 \text{ °C}$$

$$\dot{m}_c = \frac{3,12 \cdot 10^9}{1009,2 \cdot 30} = 103\,051,92 \text{ kg/s}$$

$$C_{min} = 103\,051,92 \cdot 1009,2 = 104 \cdot 10^6 \text{ W/K}$$

$$q_{max} = 104 \cdot 10^6 \cdot (151,84 - 50) = 10,591 \cdot 10^9 \text{ W}$$

$$\epsilon = \frac{3,12 \cdot 10^9}{10,591 \cdot 10^9} = 0,29$$

$$NTU = -\ln \cdot (1 - 0,29) = 0,3490$$

Pro další výpočet je nutné spočítat koeficient prostupu tepla U vztažený k vnější ploše trubky, který se určí z jednotlivých tepelných odporů vrstev:

Tepelný odpor na straně vzduchu:

$$R_{air} = \frac{1}{\alpha_{K,out_KTMT}} \quad (39)$$

$$R_{air} = \frac{1}{42,073} = 0,0245 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

kde R_{air} je tepelný odpor na straně vzduchu [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

Tepelný odpor stěny trubky:

$$R_{stěna} = \frac{D_{out_KTMT}}{2 \cdot \lambda_m} \cdot \ln\left(\frac{D_{out_KTMT}}{d_{out_KTMT}}\right) \quad (40)$$

$$R_{stěna} = \frac{0,04}{2 \cdot 380} \cdot \ln\left(\frac{0,04}{0,034}\right) = 0,000009 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

Tepelný odpor na straně páry:

$$R_{out_KTMT} = \frac{D_{out_KTMT}}{d_{out_KTMT}} \cdot \frac{1}{\alpha_{out_KTMT}} \quad (41)$$

$$R_{out_KTMT} = \frac{0,04}{0,034} \cdot \frac{1}{6488,935} = 0,000181 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

kde R_{out_KTMT} je tepelný odpor na straně páry [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

Součinitel prostupu tepla se potom rovná převrácené hodnotě sumy těchto odporů:

$$U_{air} = \frac{1}{\sum R_i} = \frac{1}{R_{out_KTMT} + R_{stěna} + R_{air}} \quad (42)$$

$$U_{air} = \frac{1}{0,0245 + 0,000009 + 0,000181} = 40,454 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$$

kde U_{air} je koeficient prostupu vnějšího výměníku [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

Když jsou známy všechny proměnné, je možno spočítat potřebnou výměňku podle ε -NTU metody.

$$A_{air} = \frac{NTU \cdot C_{min}}{U_{air}} \quad (43)$$

$$A_{air} = \frac{0,349 \cdot 104 \cdot 10^6}{40,454} = 897\,117,36 \text{ m}^2$$

kde A_{air} je potřebná plocha vnějšího výměníku [m^2]

Plocha potřebná pro odvedení 3 120 MWt je 897 154,9 m^2 .

4.4.4 VLIV PŘIROZENÉHO PROUDĚNÍ U VÝMĚNÍKU VNĚ KTMT

V případě výpočtu je uvažováno, že při proudění vzduchu okolo trubek dochází k nucenému přestupu tepla. Pro upřesnění, zda není v tomto konkrétním případě i přirozený přestup tepla, je v [17] uveden porovnávací vztah na základě Reynoldsova čísla a Grashofova čísla. Reynoldsovo číslo je známo z předchozího výpočtu a Grashofovo číslo se spočítá podle [17]. Je ale potřeba z [22] určit vlastnosti vzduchu pro teplotu povrchu. Vlastnosti vzduchu při teplotě povrchu 100,92 °C jsou uvedeny v tabulce Tab. 12.

Tab. 12 Parametry vzduchu pro přirozený přestup tepla

parametr	značka	hodnota	jednotka
vstupní hodnoty			
tlak	p	1,013	bar
teplota stěny	T_{surf}	100,92	°C
určené hodnoty			
kinematická viskozita vzduchu	ν_{surf}	0,00002332	m^2/s
objemová teplotní roztažnost	β_{surf}	0,002677	K^{-1}
Prandtlovo číslo	Pr_{surf}	0,707	-
charakteristický rozměr	$L=D$	0,4	m

Nyní je možné spočítat Grashofovo číslo podle vzorce:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta_{surf} \cdot (T_{surf} - T_{\infty}) \cdot L^3}{\nu_{surf}^2} \quad (44)$$

kde Gr je Grashofovo číslo [–]

β_{surf} je součinitel objemové roztažnosti vzduchu pro teplotu na povrchu [K^{-1}]

T_{surf} je teplota povrchu [°C]

T_{∞} je teplota okolního vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

ν_{surf} je kinematická viskozita vzduchu pro teplotu na povrchu [m^2/s]

L je charakteristický rozměr [m]

Charakteristický rozměr je uvažován $L=D$ podle [17].

Po dosažení je Grashofovo číslo rovno:

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 0,002677 \cdot (100,92 - 50) \cdot 0,04^3}{0,00002332^2} = 157\,660,24$$

Následně lze zjistit, jestli je možné zanedbat vliv přirozeného přestupu tepla, nebo je nutné zahrnout vliv přirozeného přestupu tepla. Podle následujících podmínek z [17] je to možné rozhodnout.

a) $(Gr/Re^2) \ll 1$

b) $(Gr/Re^2) \sim 1$

c) $(Gr/Re^2) \gg 1$

Význam podmínek:

- a) je možné přirozený přestup tepla zanedbat;
- b) dochází ke kombinaci přirozeného a nuceného přestupu tepla;
- c) je potřeba uvažovat vliv přirozeného přestupu tepla.

V našem případě vychází poměr Grashofova a Reynoldsova čísla následně:

$$(Gr/Re^2) = (157\,660,24/6156,69^2) = 0,00416 \ll 1$$

Z toho plyne závěr, že je možné zanedbat vliv přirozeného přestupu tepla.

Nicméně je možné konzervativně uvažovat minimální rychlost vzduchu jako je bezvětří, při kterém se rychlost vzduchu blíží nule a docházelo by k přirozenému přestupu tepla z důvodu, že by se snížila velikost Reynoldsova čísla. Následně by se zvýšila hodnota poměru Reynoldsova čísla a Grashofova čísla na mnohem větší než 1. Docházelo by tedy k přirozené konvekci. Pro přirozený přestup tepla na horizontální trubce je pak možno použít vztah z [18]:

$$Nu_{pp_out} = \left\{ 0,60 + 0,387 \cdot \left[(Ra_{surf} \cdot f_3(Pr_{surf}))^{1/6} \right] \right\}^2 \quad (45)$$

kde Nu_{pp_out} je Nusseltovo číslo pro přirozené proudění na horizontálních trubkách [–]

Ra_{surf} je Rayleighovo číslo [–]

$f_3(Pr_{surf})$ je upravená hodnota Prandtlova čísla pro přirozené proudění na horizontálních trubkách [–]

$$f_3(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr_{surf}} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} \quad (46)$$

$$Ra_{surf} = Pr_{surf} \cdot Gr \quad (47)$$

Po dosazení je Nusselt roven:

$$f_3(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,559}{0,707} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} = 0,327$$

$$Ra_{surf} = 0,707 \cdot 157\,660,24 = 111\,465,79$$

$$Nu_{pp_out} = \left\{ 0,60 + 0,387 \cdot \left[(111\,465,79 \cdot 0,327)^{1/6} \right] \right\}^2 = 7,9979$$

Následně je vypočítán součinitel přestupu tepla při přirozené konvekci podle:

$$\alpha_{pp_out} = \frac{7,9979 \cdot 0,031457}{0,04} = 6,2897 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Nyní je možné vypočítat koeficient prostupu tepla podle rovnice (42):

$$U_{pp_out} = \frac{1}{0,000181 + 0,000009 + 0,15899} = 6,282 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Koeficient prostupu tepla je možné dosadit do výpočtu ε -NTU, a tím se získá výsledná potřebná plocha pro výměník vně KTMT.

$$A_{pp_out} = \frac{0,349 \cdot 104 \cdot 10^{-6}}{6,282} = 5\,776\,890,3 \text{ m}^2$$

Výsledná plocha při přirozeném přestupu tepla je $5\,776\,890,3 \text{ m}^2$. Tato hodnota pro úplné bezvětrí je násobně větší než v případě uvažovaného částečného bezvětrí.

5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Na základě výsledků, které byly formulovány v předchozí kapitole, je patrné, že množství uvolněného tepla při LOCA havárii je obrovské. Kombinace velkého množství tepla a podmínek, které musí být splněny, aby byla zajištěna pasivita systému, nevytvářejí optimální podmínky. Z toho plynou různá omezení, která je nutné brát na vědomí při návrhu takového systému. Jedná se zejména o nízkou rychlost proudění při přirozeném proudění a složitost udržet tlak v chladicí okruhu. Pokud je to možné, je optimální stejný průřez trubek chladicího okruhu a součet průřezů jednotlivých trubek výměníku. Při přirozené konvekci (proudění) není také možné dosáhnout velkého koeficientu přestupu tepla. To jsou jen některé omezující podmínky v případě přirozeného proudění pro zajištění pasivity systému. V tomto konkrétním případě není možné zajistit umístění výměníku o velikosti 212 149,02 m² uvnitř KTMT, a to z konstrukčního a dispozičního hlediska. Vzhledem k omezenému prostoru uvnitř KTMT je teoreticky možné umístit pouze výměník o rozměrech 0,5x7x138 m, který má plochu 32 898,76 m². Na hloubku není kvůli stávající technologii možné zvětšit rozsah výměníku a na výšku je umístění také omezeno stávající technologií, a to sprchovým systémem, jak je patrné na nákresu výměníku v obrázku a na pohled v obrázku Obr. 18 reaktorového sálu.



Obr. 18 Reaktorový sál [23]

Při úvaze využít volného prostoru na kopuli KTMT z vnitřní strany by bylo možné získat ještě přibližně 14 000 m² při stejných rozměrech trubek, roztečí a rozměrech výměníku 0,3x5,5x120 m. I kdyby se podařilo získat prostor pro umístění výměníku o tak velkých rozměrech, vyskytl by se další problém ve formě velikosti vnějšího výměníku napojeného na mezikruh chlazení. Jak je patrné z druhé části výpočtu, tak i v případě umístění kondenzátoru rovnou vně KTMT, je výměňková plocha velkých rozměrů. V případě vynechání mezikruhu by došlo k lepšímu přestupu tepla a zlepšení podmínek proudění. U výměníku vně KTMT je vypočtená plocha 897 154,9 m² a tato plocha je pro kondenzaci

přímou bez meziokruhu. V případě využití meziokruhu by tato plocha ještě vzrostla. Podle stejných vzorců pro výpočet by plocha výměníku, umístěného vně KTMT na prstenci, o rozměrech 5x6x130 m byla přibližně 128 300 m². Již takový výměník by byl konstrukčně a rozměrově náročné zařízení. Za těchto podmínek není jednoduché splnit základní podmínky jaderné bezpečnosti. Výměníky by bylo náročné při takových rozměrech zajistit v seismické odolnosti. Navíc i v teoretické havarijní události by pravděpodobně došlo k jejich poškození. V takovém případě by nebylo možné využít ani přímé kondenzace ve vnějším výměníku bez použití meziokruhu. V dalším kroku byla spočítána plocha výměníku v případě úplného bezvětrí. Tato plocha by pak byla 5 776 890,3 m². To je násobně vyšší než v případě uvažovaného proudění vzduchu, ale i takový stav by mohl nastat. Takovou plochu je prakticky nemožné umístit v prostorách obestavby KTMT.

Dalším problémem v případě návrhu výměníku je vytvoření tras pro potrubí. Pro potřeby umístění chladičoho výměníku (chladiče, popř. kondenzátor) vně KTMT na obestavbě je potřeba vytvořit nové průchodky skrz plášť KTMT.

V předprovozní bezpečnostní zprávě [27] je uvedeno, jak se navrhuje průchodky skrz ochrannou obálku a co také mají splňovat. Tyto potrubní a kabelové průchodky procházející stěnami hermetického prostoru se navrhuje tak, aby se

- mohla provádět detekce úniků, jejich záchyt a shromažďování;
- mohly provádět pravidelné zkoušky jejich těsnosti při projektovém tlaku nezávisle na zkouškách těsnosti hermetické obálky;
- zajistila jejich ochrana před účinky dynamických sil.

Samotné hermetické průchodky jsou vybaveny kontrolními komorami, které umožňují provést "lokální" zkoušky těsnosti jednotlivých průchodek nezávisle na integrálních zkouškách těsnosti celé obálky. Před integrální zkouškou těsnosti obálky jsou všechny hermetické průchodky "lokálně" odzkoušeny a o výsledku zkoušky je vystaven certifikát.

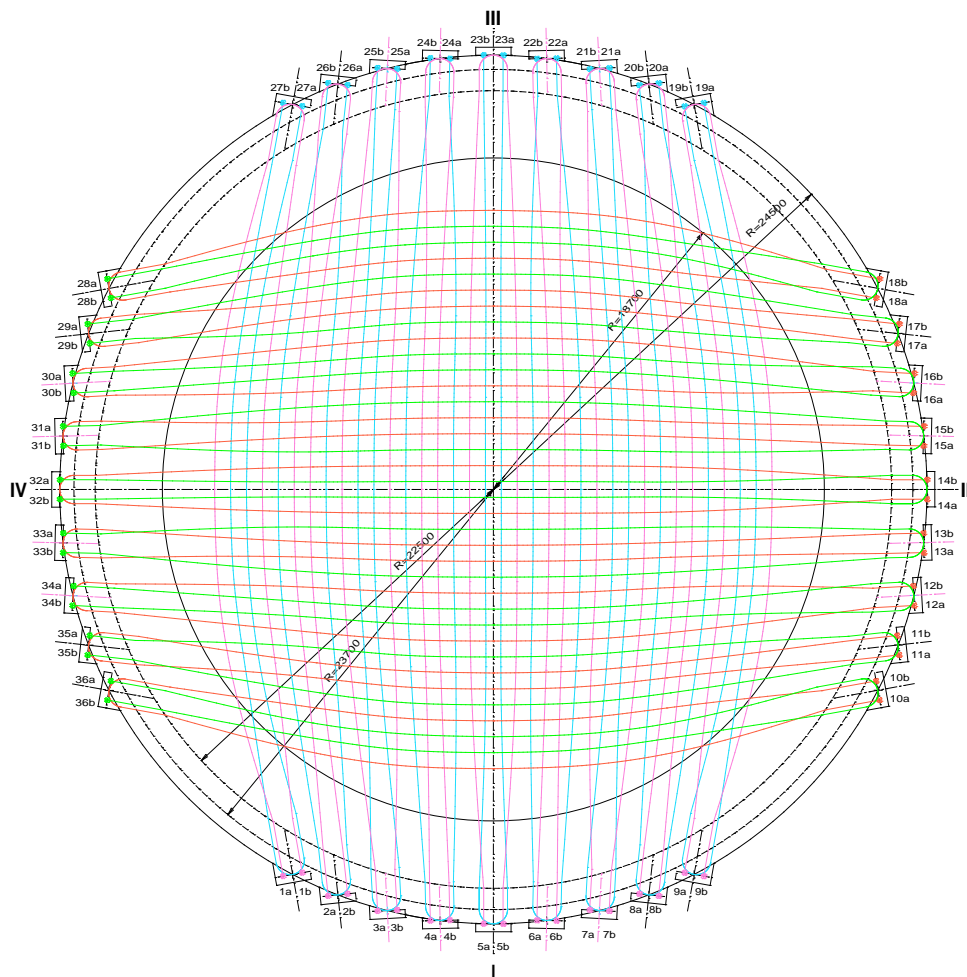
Zabudované díly potrubních a kabelových průchodek jsou řešeny v souladu s těmito požadavky. Při navrhování konstrukce hermetické obálky byly do statických výpočtů zahrnuty účinky od technologických a stavebních zařízení a dílů tak, aby zohledňovaly i účinky dynamických sil působících na zabudované díly průchodek.

Na základě konzultace se zaměstnanci ETE se dospělo k následujícím závěrům:

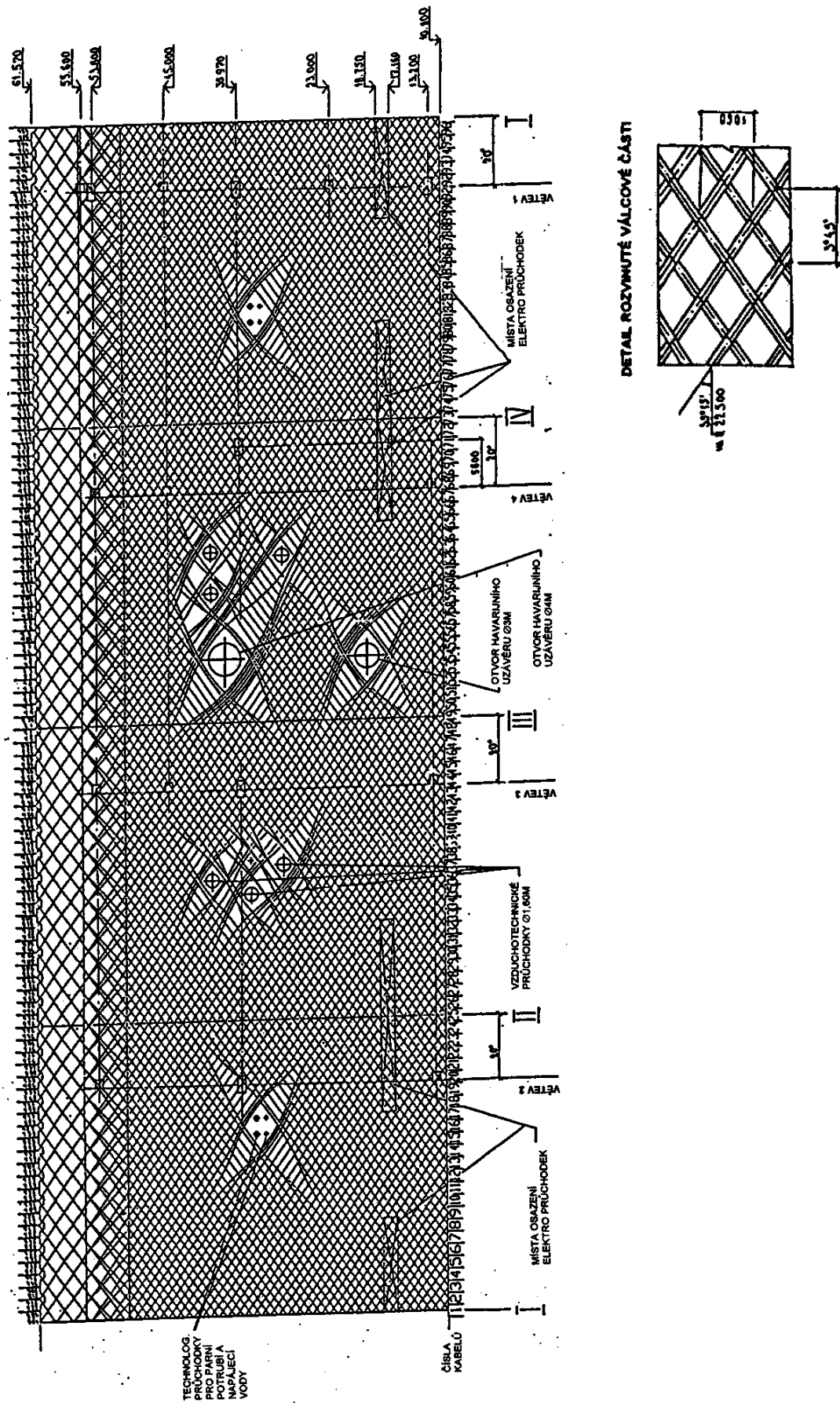
Dle výše uvedených podmínek a z obrázků konstrukce ochranné obálky lze vyvodit závěr, že realizovat další nový prostup potrubí skrz stěnu nebo kopuli kontejnmentu je velice obtížné a složitě technicky řešitelné. Nemožné to není, ale technické řešení má spousta omezení a podmínek. A to nejen technických, ale také legislativních (Atomový zákon, zásady jaderné a technické bezpečnosti, KTMT je vybrané zařízení plnicí bezpečnostní funkci). Nelze přerušit kanály pro vedení předpjatých kabelů plnicí bezpečnostní funkci obálky. Výběr vhodného místa je dále omezen prostorovou náročností stávající technologie uvnitř obálky. Umístění omezeného počtu průchodek do kopule je sice reálné, ale na kopuli nelze umístit další technologii, aniž by to mělo dopad do provozu stávajícího manipulátoru (pohybuje se po celé kopuli dokola), a také je omezené další zatížení kopule. Jako vhodný prostor pro umístění dalšího zařízení je střecha obestavby bloku.

Technicky řešitelné se jeví realizace několika průchodek (v řádech jednotek) s průměrem omezeným do 300 mm, kterými prochází potrubí do DN250. Pro zajištění pasivity systému by bylo potřeba zachovat co největší možný průřez potrubí, ale to by se nedařilo zajistit ani pro průřez navrhovaného výměníku uvnitř KTMT, natož pak pro potřebný výměník na základě velikosti tepla, které je nutné odvést přes tento systém. Tento systém by tedy obtížně plnil podmínky ke splnění jaderné bezpečnosti.

Na následujících obrázcích Obr. 19 a Obr. 20 je možné vidět konstrukci ochranné obálky spolu s trasováním předpjatých lan v obálce.



Obr. 19 Schéma rozmístění předpínacích kabelů v kopuli KTMT [27]



Obr. 20 Schéma vedení kabelů ve válcové části KTMT [27]

Na obrázku Obr. 21 je možné vidět vnější pohled na vrchní vnější část KTMT a na obrázku Obr. 22 pohled na manipulátor, který je umístěn na obvodovém prstenci KTMT.



Obr. 21 Pohled na vnější část KTMT



Obr. 22 Manipulátor na prstenci KTMT

ZÁVĚR

V práci je v počátečních kapitolách uvedena problematika pasivního chlazení různých jaderných reaktorů. Následně jsou zde popsány různé typy pasivních systémů, které jsou používány při návrhu projektů jaderných elektráren. Je možno pozorovat, že na základě zkušeností, bohužel i negativních jako jsou havárie v Černobylu a Fukushima, je u současných projektů kladen nemalý důraz na použití pasivních systémů. Jak ukázala událost ve Fukushima, tak v případě nehody se ztrátou elektrického napájení, je problém uchládit zbytkové teplo reaktoru, které stále vzniká. To je velkou výhodou pasivních systémů, které pro svoji činnost nepotřebují zdroj napájení, či ojedinele jen lokální zdroje energie (baterii) pro otevření ventilu. Další výhodou je, když je systém schopen pokrýt odvod celého množství zbytkového tepla.

V dalších částech práce byl uveden pojem jaderná bezpečnost a bezpečnost jaderných elektráren. Tento pojem určuje podmínky provozu jaderných energetických zařízení. Jeden ze základních cílů bezpečného provozování jaderných energetických zařízení je právě zajištění chlazení zbytkového tepla. Mezi základní cíle samozřejmě patří předcházení vážných nehod, ale když nějaká nastane, je potřeba omezit její rozšiřování a zhoršování případných následků. Byl také uveden pojem LOCA, který byl potřeba zmínit z důvodu podmínek uvažovaných pro návrh výměníku pasivního systému. Pojem LOCA určuje podmínky, které byly naprojektovány jako maximální projektová nehoda, a to je prasknutí hlavního cirkulačního potrubí. Při této nehodě by se uvolnilo velké množství tepla ve formě páry.

Další samostatná kapitola je věnována návrhu dvou výměníků, které by byly propojeny cirkulačním okruhem. Nejprve byly vypočítány rozměry a plocha vnitřního navrhovaného trubkového výměníku, který je teoreticky možné umístit do prostor KTMT. Bylo uvažováno, že na povrchu vnitřního výměníku bude probíhat kondenzace. Došlo k výpočtu koeficientu přestupu tepla pro kondenzaci na povrchu trubek. K zajištění pasivity systému bylo potřeba počítat s přirozeným prouděním v chladicím okruhu. Následně byla za pomoci koeficientů přestupu a metody ε -NTU spočítána plocha výměníku, která je ve skutečnosti potřeba pro odvod tepla, které se vytvoří během LOCA havárie. Pro případ uvažování umístění výměníku uvnitř KTMT a současné přirozené cirkulace byla plocha mnohonásobně větší, než kterou je možné umístit uvnitř KTMT.

Dalším bodem bylo navržení jiného způsobu kondenzace páry z LOCA havárie. Výměník by se umístil na vrchní prstenek KTMT a s prostorem KTMT by byl propojen potrubím bez vloženého okruhu. I v tomto případě byl spočítán součinitel přestupu tepla pro kondenzaci uvnitř trubek výměníku vně KTMT a součinitel přestupu tepla na vnější straně výměníku, který by byl chlazený vzduchem. Dále byla spočítána plocha potřebného výměníku pro tento případ konstrukce. Nicméně vypočítaná plocha má vyšší hodnotu, než by bylo možné umístit na prstenek KTMT. Pro úplnost bylo uvažováno úplné bezvětrí, při kterém by byla pouze přirozená konvekce. V tomto případě je potřebná plocha výměníku mnohonásobně větší než pro případ uvažování proudění vzduchu.

Následně proběhlo v další kapitole zhodnocení výsledků výpočtů. Jak plyne ze zhodnocení, je pro uvažované množství tepla vzniklého při LOCA havárii velikost vypočtené plochy příliš velká. Tato plocha by byla velmi složitě umísťována v prostorech KTMT reaktoru VVER-1000, což není technicky nemožné, ale bylo by to velice náročné, a to i prostorově. Problémem je také umístění výměníků vně KTMT, kde jsou již jiné technologie, na které je nutno brát zřetel již při návrhu. Dalším problémem je provedení dalších průchodů skrz ochrannou obálku, které nelze provádět v počtu a rozměrech bez daných pravidel. Je potřeba

dbát na zachování jaderné bezpečnosti, a to by v případě nerespektování projektových omezení v obálce vedlo k porušení podmínek jaderné bezpečnosti.

Bylo by možné navrhnout systém výměníků, které by byly schopny zajistit přirozenou cirkulaci, ale zároveň by byl tento systém schopný přenést menší množství tepla. Dalším řešením by bylo možné uvažovat umístění kondenzátorů naplněných parafinem, který je schopen absorbovat velké množství tepla, jak uvádí vedoucí práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D. ve svém výzkumu na toto téma. Ale stále je potřeba brát ohled na projektová a rozměrová omezení, která s sebou nesou navrhování nových zařízení a postupů pro starší technologie. Zajímavým řešením je také možnost využití ORC cyklu pracujících na principu nejrozšířenějšího způsobu výroby elektrické energie pomocí páry a přes okruh s turbínou a generátorem. Pro správnou funkci tohoto systému je potřeba vysokých vstupních parametrů (hlavně teplota). ORC cyklus funguje na stejném principu jako klasický parní oběh, ale je možné použít jinou látku, která je schopna pracovat za nižších parametrů. Tento systém je využíván pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla. To by se v případě vstupních podmínek, které jsou uvažovány při havárii, dalo využít. Nebyla by potřeba velká účinnost, ale využila by se další elektrická energie v případě havárie. Cyklus by potřeboval elektrickou energii jen v případě uvedení zařízení do provozu. Ale u tohoto systému je diskutabilní pasivita systému. Jak bylo zmíněno v práci, pro pasivní systémy je důležité, aby měly pokud možno co nejméně pohyblivých a mechanických částí, které by se mohly porouchat. Z toho důvodu by to nebylo úplně vhodné řešení.

Jak plyne z výše zmíněného a z výsledků výpočtů, je návrh zlepšení a nových systémů do současných zařízení velice obtížně technicky proveditelný. V případě Jaderné elektrárny Temelín je kladen velký důraz na bezpečnost, a přes to, že je většina bezpečnostních systémů navržena jako aktivních a závislých na napájení, pracuje personál elektrárny neustále na údržbě a zlepšení současných bezpečnostních systémů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PROF.DR. BÖCK. Module 05 WWER/ VVER (Russian designed Pressurized Water Reactors). In: *ÖKTG* [online]. 2016 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.oektg.at/wp-content/uploads/05-Russian-designed-PWRs1.pdf>.
- [2] Temelín. SKUPINA ČEZ. *ČEZ* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete.html>
- [3] ZDEBOR, Jan. Projekt MIR.1200 a aktuální požadavky na bezpečnost jaderných elektráren. In: *ŠKODA JS a.s.* [online]. 2012 [cit. 2016-03-22]. Dostupné z: <http://www.skoda-js.cz/file/edee/cs/aktuality/j.zdebor-projekt-mir.1200.pdf>
- [4] Rozhodnutí o změnách povolení pro nové finské jaderné bloky. In: *Atominfo* [online]. 2014 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2014/09/rozhodnuti-o-zmenach-povoleni-pro-nove-finske-jaderne-bloky/>
- [5] AP1000 Nuclear Power Plant. *WESTINGHOUSE* [online]. [cit. 2016-03-22]. Dostupné z: <http://www.westinghousenuclear.com/New-Plants/AP1000-PWR>
- [6] EPR™ reactor: the very high power reactor (1,650 MWe). *Areva.com* [online]. [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://www.areva.com/EN/global-offer-419/epr-reactor-one-of-the-most-powerful-in-the-world.html>
- [7] Safe, Reliable, Economical Advanced Pressurized Water Reactor for European Market. In: *Mitsubishi Heavy Industries* [online]. 2008 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e461/e461016.pdf>
- [8] *L'EPR : un enjeu industriel pour le futur* [online]. In: . 2013 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://regards-citoyens.over-blog.com/article-l-epr-un-enjeu-industriel-pour-le-futur-121497021.html>
- [9] ESBWR Nuclear Power Plant. *GE HITACHI* [online]. [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/esbwr.html>
- [10] *Passive safety systems and natural circulation in water cooled nuclear power plants*. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2009. ISBN 978-920-1113-092.
- [11] LAMOŠ, P. *Diverzní systém pro odvod tepla z aktivní zóny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D.
- [12] Ocenění bezpečnosti a bezpečnostních rezerv JE Temelín (z pohledu skutečností havárie JE Fukushima). In: *Skupina ČEZ* [online]. 2012 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/zatezove-testy-eu/provedeni-a-vysledky-zatezovych-testu-je-temelin.html>
- [13] *Zákon č. 18/1997 Sb. ze dne 24. ledna 1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů*.
- [14] *Návrh nového atomového zákona, v připomínkovém řízení, Praha, 2014*

- [15] URBANČÍK, Libor. *Jaderná bezpečnost: na půdorysu atomového zákona*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4971-8.
- [16] Safety functions and component classification for BWR, PWR and PTR. Vienna: IAEA, 1979. ISBN 92-012-3979-3.
- [17] INCROPERA, Frank P. a David P. DEWITT. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 5th ed. New York: J. Wiley, c2002. ISBN 04-713-8650-2.
- [18] [EDITED BY] VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN (GVC). *VDI heat atlas*. 2nd ed. New York: Springer, 2010. ISBN 978-354-0799-993.
- [19] KRBEK, Jaroslav, Bohumil POLESNÝ a Jan FIEDLER. *Strojní zařízení tepelných centrál: návrh a výpočet*. Brno: PC-DIR, 1999. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1334-4
- [20] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [21] *Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.engineeringtoolbox.com/>
- [22] Calculation of thermodynamic state variables of air. *Peace software* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: http://www.peacesoftware.de/einigewerte/luft_e.html
- [23] PANCER, Václav. Výměna paliva v jaderné elektrárně je v polovině. In: *Československý deník* [online]. 2009 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://ceskobudejovicky.denik.cz/zpravy_region/vymena-paliva-je-v-polovine20090903.html

Interní dokumenty ETE:

- [24] KOLEKTIV AUTORŮ. Učební texty pro doškolení ÚJE: VVER 1000 → VVER 440. Brno, 2003.
- [25] HONČARENKO, Radim a Petra PILEČKOVÁ. Činnosti při haváriích - postupy pro úniky primárního chladiva. ETE.
- [26] JELÍNEK, Martin, operátor ETE [ústní sdělení]. ETE, 23.5.2014.
- [27] Provozně bezpečnostní zpráva ETE, ETE.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ADS	automatický systém odtlakování
AZ	aktivní zóna
BSPP	bazén s použitým palivem
BWR	varný reaktor
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
GDSC	gravitační systém chlazení
HČČ	Hlavní cirkulační čerpadlo
HCP	hlavní cirkulační potrubí
I.O	primární okruh
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICS	separační systém kondenzace
II.O	sekundární okruh
JE	jaderná elektrárna
KO	kompensátor objemu
KTMT	kontejnment
LB-LOCA	Large break LOCA
LOCA	Loss of Coolant Accident
NTTQ	nízkotlaký systém havarijního chlazení
NTU	výpočtová metoda
PCCS	pasivní systém chlazené kontejnmentu
PG	parogenerátor
SB-LOCA	Small break LOCA
SORR	systém ochrany řízení reaktoru
TVD	technická voda důležitá
VOCH	vložený okruh chlazení
VTTQ	vysokotlaký systém havarijního chlazení
HRK	hlavní regulační kazety
NT	nízkotlaký
VT	vysokotlaký
SPOT	systém pasivního odvodu tepla

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

A	[m ²]	plocha výměníku
C	[-]	výpočtový koeficient
C_{min}	[W/K]	minimální tepelná kapacita proudu
c_p	[kJ/kg·K]	měrná tepelná kapacita
D	[m]	vnější průměr
d	[m]	vnitřní průměr
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení
Gr_S^*	[-]	Grashofovo číslo
H	[m]	výška výměníku
i	[kJ/kg]	entalpie
i_{fg}	[kJ/kg]	latentní teplo
L	[m]	délka výměníku
L_K	[m]	délka trubky
L_{skut}	[m]	skutečná délka výměníku
m_c	[kg/s]	hmotnostní průtok studené větve
n	[-]	počet
NTU	[-]	koeficient „ <i>Number of transfer unit</i> “
Nu	[-]	Nusseltovo číslo
Pr	[-]	Prandtlovo číslo
Q	[W]	přenesené teplo
q_{max}	[W]	maximální přenesené teplo
R	[m ² ·K/W]	tepelný odpor
Ra	[-]	Rayleighovo číslo
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
s	[m]	charakteristický rozměr
s_1	[m]	rozteč trubek v řadě
s_2	[m]	rozteč řad
S_{in}	[m ²]	vnitřní plocha jedné trubky
S_L	[m]	rozteč trubek v řadě výměníku
S_{out}	[m ²]	vnější plocha jedné trubky
S_T	[m]	rozteč řad trubek ve výměníku
$S_{výměník,KTMT}$	[m ²]	vnější plocha celého výměníku
\check{s}	[m]	šířka výměník
\check{s}_{skut}	[m]	skutečná šířka
T	[°C]	teplota
U	[W/m ² ·K]	koeficient prostupu tepla stěnou výměníku
w	[m/s]	rychlost vzduchu
w_{max}	[m/s]	maximální rychlost vzduchu

α	[W/m ² ·K]	součinitel přestupu tepla
β	[K ⁻¹]	součinitel objemové roztažnosti
ε	[-]	koeficient účinnosti výměníku
λ	[W/m·K]	tepelná vodivost
λ_m	[W/m·K]	tepelná vodivost materiálu
μ	[Pa·s]	dynamická viskozita
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita
ρ	[kg/m ³]	hustota

air – vzduch

c – chladná větev

h – horká větev

in – vstup

K – kondenzace

l – vodní složka směsi

out – výstup

out_KTMT – výměník umístěný vně KTMT

Použité indexy:

pp – přirozené proudění

pp_out – přirozená konvekce u výměníku vně KTMT

řad – řada

s – střední hodnota

sat – saturace

surf – povrch

tr – trubka

v – parní složka směsi

V – vystřídání uspořádání

Z – zákrytové uspořádání

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Řez reaktory VVER-440 a VVER-1000[1].....	17
Obr. 2 Generace jaderných reaktorů[15]	18
Obr. 3 Řez jaderným reaktorem MIR 1200 [4]	19
Obr. 4 Bezpečnostní systémy AP 1000 [5].....	20
Obr. 5 Řez reaktorem EPR [7].....	21
Obr. 6 Bezpečnostní systémy ESBWR [9].....	23
Obr. 7 Zavodňovací nádrže na principu gravitace [10]	24
Obr. 8 Hydroakumulátor [10].....	25
Obr. 9 Zavodňovací nádrže na principu přirozené cirkulace [10]	25
Obr. 10 Pasivně chlazený PG pomocí přirozené cirkulace [10].....	26
Obr. 11 Pasivní tepelné výměníky odvodu zbytkového tepla [10].....	26
Obr. 12 Bazény pro snížení tlaku v KTMT [10]	27
Obr. 13 Systém pro odvod tepla z KTMT a snížení tlaku v KTMT [10].....	28
Obr. 14 Systém pro odvod tepla z KTMT a snížení tlaku v KTMT [10].....	28
Obr. 15 Jaderná elektrárna Temelín [11].....	29
Obr. 16 Schéma JE Temelín [11]	30
Obr. 17 Umístění výměníku uvnitř KTMT.....	39
Obr. 18 Reaktorový sál [23]	62
Obr. 19 Schéma rozmístění předpínacích kabelů v kopuli KTMT [27].....	64
Obr. 20 Schéma vedení kabelů ve válcové části KTMT [27].....	65
Obr. 21 Pohled na vnější část KTMT	66
Obr. 22 Manipulátor na prstenci KTMT.....	66