



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**REAKTORY A TEPELNÉ VÝMĚNÍKY VYUŽÍVAJÍCÍ
TEKUTÉ KOVY**

REACTORS AND HEAT EXCHANGERS USING LIQUID METALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Kmoníček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Šnajdárek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Jiří Kmoníček
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Ladislav Šnajdárek, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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 bakalářské práce:

REAKTORY A TEPELNÉ VÝMĚNÍKY VYUŽÍVAJÍCÍ TEKUTÉ KOVY

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mezi perspektivní typ jaderných reaktorů patří také rychlé reaktory jako je například projekt ESFR (Evropský Rychlý Sodíkem Chlazený Reaktor), který jako teplotonosnou látku využívá tekutý sodík. Jedna z klíčových komponent těchto zařízení je obecně výměník sodík/sodík, sodík/voda či sodík a jiné teplotonosné médium. Může se tak jednat o parní generátor či různé mezivýměníky. Z pohledu jaderné bezpečnosti je nutné provést správný a optimální návrh výměníku s ohledem na termofyzikální vlastnosti a reakcemi při styku různých médií, které výměník odděluje.

Cíle bakalářské práce:

Provedení rešerše různých jaderných zařízení využívající tekuté kovy jako teplotonosné médium.

Popsat koncepce výměníků tepla využívaných v jaderných elektrárnách.

Navrhnout koncepci vybraného typu výměníku využívající tekutý kov a provést předběžný návrhový výpočet.

Zpracovat návrhovou výkresovou dokumentaci.

Seznam doporučené literatury:

BORISANSKIJ, V. M. Zidkometaliceskije teplonositeli. Moskva, 1967, Atomizdat.

KONNIGS, Rudy J.M. a Roger E. STOLLER. Comprehensive Nuclear Materials 2nd Edition.

Amsterdam: Elsevier, 2020. ISBN 9780081028650.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá jadernými reaktory využívající tekuté kovy a tepelnými výměníky používané v jaderných elektrárnách. Dále je proveden tepelný výpočet pro vybraný parogenerátor. Součástí je i výkresová dokumentace vybraných částí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rychlé reaktory, sodík, chladiva, výměník tepla

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with nuclear reactors using liquid metals and heat exchangers used in nuclear power plants. Furthermore, a thermal calculation is performed for the selected steam generator. The drawing documentation of selected parts is also included.

KEYWORDS

Fast reactors, sodium, refrigerants, heat exchanger

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KMONÍČEK, Jiří. Reaktory a tepelné výměníky využívající tekuté kovy. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132332>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ladislav Šnajdárek.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 16. května 2021

.....

Jiří Kmoníček

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ladislavu Šnajdárkovi, Ph.D. za mnoho cenných a užitečných rad a za jeho skvělý přístup. Dále bych rád poděkoval přátelům a rodině za jejich podporu během studia.

1 OBSAH

Úvod.....	11
2 Základní rozdělení reaktorů.....	12
2.1 Reaktory III. generace.....	12
2.2 Reaktory III+ generace	12
2.3 Reaktory IV. generace	12
2.3.1 Plynem chlazené reaktory.....	12
2.3.2 Olovem chlazené reaktory	12
2.3.3 Sodíkem chlazené reaktory.....	13
2.3.4 Reaktory s nadkritickými parametry vody	13
2.3.5 Vysokoteplotní reaktory	14
2.3.6 Reaktory s roztavenými solemi	14
3 Reaktory s tekutými kovy	16
3.1 Konstrukce rychlých reaktorů chlazené sodíkem	16
3.2 Charakteristika reaktoru využívající sodík	17
4 Chladiva.....	21
4.1 Plynná chladiva.....	21
4.2 Kapalná chladiva.....	22
4.3 Roztavené soli.....	22
4.4 Tekuté kovy	23
4.4.1 Sodík.....	24
4.4.2 Olovo	25
5 Výměníky tepla	26
5.1 Výměník tepla na jaderné elektrárně	26
5.2 Výměník tepla u reaktorů chlazený tekutými kovy	26
5.3 Trubkové výměníky	27
5.3.1 Primární výměník s dvojitými trubkami.....	27
5.3.2 Primární výměník s jednoduchými trubkami	27
5.4 Deskové výměníky	27
6 Parní generátory	28
6.1 Koncepce parních generátorů	28
6.1.1 parní generátor v elektrárnách s reaktory chlazenými tekutými kovy.....	29
6.2 Parní generátory s reaktory VVER	29
6.2.1 Parní generátor s reaktory VVER-440.....	29
6.2.2 Parní generátor s reaktory VVER-1000.....	30
6.3 Parní generátor vytápěný tekutým kovem	31
6.4 Koncepce konstrukčních řešení parních generátorů se sodíkem	32
7 Konstrukce parního generátoru.....	35
7.1 Návrh větví a modulů	35
7.2 Sledovací systém netěsností.....	35
7.2.1 Systém sledování úniku u výměníku s dvojitými trubkami	35
7.2.2 Únik vody / páry do systému monitorování a sledování sodíku	35
7.2.3 Monitorování úniků sodíku do generátoru	36

7.3	Volba konstrukčního materiálu	36
7.4	Hydraulické vlastnosti generátoru.....	38
7.4.1	Požadavky na kvalitu média	40
7.5	Výpočet přenosu tepla.....	41
8	Výpočet.....	42
8.1	Určení hlavních parametrů	44
8.2	Výpočet hmotnostního průtoku vody a sodíku v PG	44
8.2.1	Teploty na straně vody a páry	44
8.2.2	Entalpie na straně vody a páry	44
8.2.3	Hmotnostní průtok vody a páry	44
8.2.4	Tepelné výkony.....	45
8.2.5	Teploty na straně sodíku	45
8.2.6	Entalpie na straně sodíku	45
8.2.7	Hmotnostní průtok sodíku.....	45
8.3	Výpočet délky článku v ekonomizéru	46
8.3.1	Výpočet součinitele přestupu tepla na straně vody v ekonomizéru	46
8.3.2	Výpočet součinitele přestupu tepla na straně sodíku v ekonomizéru	47
8.3.3	Výpočet součinitele přestupu tepla v ekonomizéru	47
8.3.4	Logaritmický teplotní rozdíl ekonomizéru	48
8.3.5	Délka ekonomizéru	48
	Závěr	48
9	Citovaná literatura..... Chyba! Záložka není definována.	
	Seznam použitých zkratk a symbolů	62
	Seznam příloh.....	63



ÚVOD

Cílem této práce je seznámit se s jadernými reaktory využívající tekuté kovy, které dokážou využít vyhořelé palivo z tlakovodních reaktorů a tím využít maximálního potenciálu Uranu. Tekuté kovy se také pyšní skvělou tepelnou vodivostí a tepelnou kapacitou. Velký důraz je zde kladen na rychlé reaktory, které využívají ke chlazení sodík. Dále se tato práce zabývá výměníky tepla, které se používají v jaderných elektrárnách a následně je proveden tepelný výpočet parogenerátoru, který využívá sodík jako teplonosné medium.

2 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ REAKTORŮ

2.1 REAKTORY III. GENERACE

Reaktory generace III představují další evoluční stupeň ve vývoji reaktorů. Hlavní technologické rysy jsou velmi podobné reaktorům druhé generace. Hlavními rozdíly oproti předchozí generaci je použití standardizovaných projektů, zkracující dobu schvalování a také dobu výstavby. Dále zlepšení ekonomiky provozu prodloužením doby provozu mezi odstávkami, zvýšení hodnoty vyhoření jaderného paliva a v souvislosti se standardizovaným projektem i snížení investičních nákladů. Významné je také zlepšení celkové bezpečnosti elektrárny (zvládnání vícenásobných poruch a těžkých havárií a také zlepšení odolnosti vůči vnějším vlivům). [1]

2.2 REAKTORY III+ GENERACE

Reaktory generace III+ představují další evoluční vylepšení III. generace reaktorů v souladu s novými bezpečnostními požadavky a s ohledem na zkušenosti z licencování a výstavby bloků III. generace. Nabízejí tak v současné době nejlepší dostupnou technologii v oblasti jaderných elektráren. Mimo jiné jsou v projektech zapracovány závěry z analýzy havárie jaderné elektrárny Fukušima (v EU ve formě závěrů ze tzv. stress testů a doporučení WENRA), jmenovitě vyšší odolnost vůči vnějším vlivům (např. zemětřesení, záplavy apod.), vyšší autonomie, zvýšená redundance a diverzita bezpečnostních systémů pro řešení základních projektových nehod, vícenásobných poruch i těžkých havárií a také možnost využití mobilních prostředků pro plnění bezpečnostních funkcí. [1]

2.3 REAKTORY IV. GENERACE

Projekty IV. generace jsou zatím předmětem vývoje v několika různých koncepčních směrech. Jde převážně o první demonstrační reaktory, pracující s rychlými neutrony a uzavřeným palivovým cyklem, které umožňují efektivnější využití jaderného paliva zároveň snížení množství radioaktivních odpadů. Patří sem však i některé technologie pracující s tepelnými neutrony a otevřeným palivovým cyklem. Zahájení provozu prvních pilotních jednotek této generace je podle stavu jejich vývoje odhadováno mezi lety 2030 až 2040, komerční nasazení potom po roce 2050. [1]

2.3.1 PLYNEM CHLAZENÉ REAKTORY

Teplota He jako chladiva na výstupu z reaktoru by měla být na úrovni 850 °C, což by bylo výhodné jak z hlediska účinnosti přeměn tepelné energie vázané na chladivo na elektrickou energii, tak z hlediska možnosti výroby vodíku termomechanickými procesy i z hlediska potřeb tepla o vysoké teplotě pro jiné průmyslové účely. Tlak plynu v reaktoru je uvažován na úrovni 7 až 10 MPa. Přeměna odvedeného tepla na elektrickou energii by mohla být uskutečněna realizací přímého a uzavřeného Braytonova oběhu. Počítá se s přepracováním vyhořelého paliva přímo na elektrárně s recyklací aktinidů s cílem minimalizace množství produkovaných dlouhodobých radioaktivních odpadů. [2]

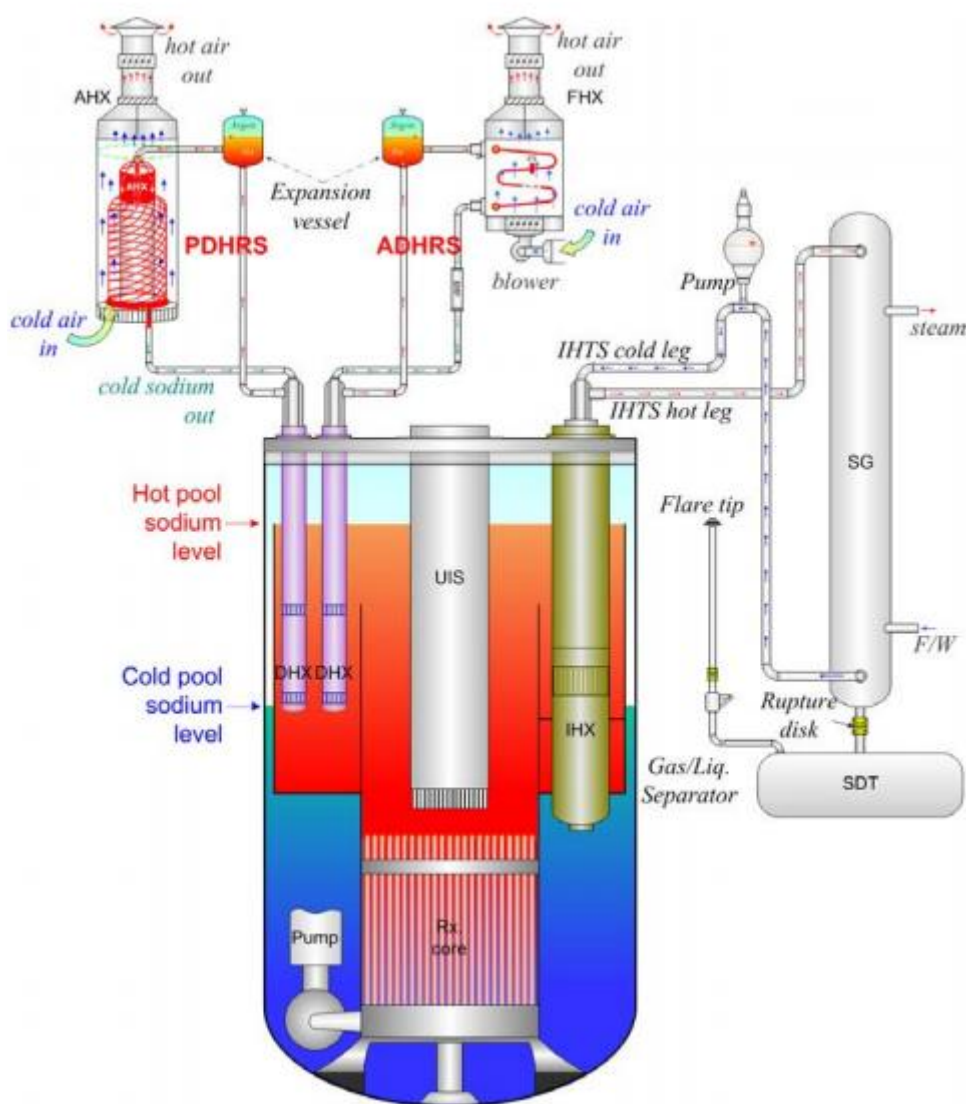
2.3.2 OLOVEM CHLAZENÉ REAKTORY

U těchto koncepcí se předpokládá odvod tepla z reaktoru kapalným olovem nebo kapalnou eutektickou slitinou olova a bizmutu, a to přirozenou cirkulací. Je třeba poznamenat, že teplota tavení čistého olova je 327,4 °C a eutektické slitiny 123,5 °C. Na výstupu z reaktoru se předpokládají již nyní dosažitelné teploty chladiva 550 °C (viz ruské ponorky třídy alfa, které

mají kompaktní reaktor o tepelném výkonu 155 MW), později teploty až 800 °C. Tlak v reaktoru je nízký a odpovídá v podstatě hydrostatickému tlaku. [2]

2.3.3 SODÍKEM CHLAZENÉ REAKTORY

V jaderných elektrárnách s rychlými reaktory této koncepce bylo již v minulosti získáno celkem víc jak 300 reaktor-roků provozních zkušeností v období asi 50 roků (USA, VB, Francie, Německo, Japonsko, Rusko, Indie, Čína). I nadále se počítá s teplotou sodíku na výstupu z reaktoru na úrovni 500 až 550 °C a uspořádáním ve třech okruzích a s variantami o elektrickém výkonu 150 až 500 MW s aktinidy v palivu a 500 až 1500 MW. Teplota tavení čistého sodíku za normálního tlaku je přibližně 97,3 °C. Tlak sodíku v prvním i druhém okruhu je nízký na úrovni hydrostatického tlaku. [2]



Obrázek 1: Sodíkem chlazený reaktor [3]

2.3.4 REAKTORY S NADKRITICKÝMI PARAMETRY VODY

Jde o reaktory, které mají pracovat při vysokých tlacích nad hodnotou kritického tlaku vody 22,129 MPa a teplotách vodní páry na výstupu z reaktoru 510 až 550 °C

v jednookruhovém uspořádání s přímým přívodem generované páry v jaderném reaktoru do parní turbíny. To umožní dosažení podstatně vyšší tepelné účinnosti zařízení (cca 45 %) než dosud provozovaných bloků s tlakovodním nebo varným reaktorem (mírně nad 30 %). Řešení bezpečnostních systémů bude podobné těm pro současné varné reaktory. V otevřeném palivovém cyklu bude třeba obohacené uranové palivo. Teoreticky může zařízení této koncepce být navrženo jako rychlý reaktor s recyklací aktinidů, získaných z přepracování vyhořelého paliva ze současných lehkovodních reaktorů. [2]

2.3.5 VYSOKOTEPLTNÍ REAKTORY

Jde o jaderná zařízení pro generaci tepla o vysoké teplotě chladiva (helium až 1000 °C) na výstupu z reaktoru, zejména se zaměřením na využití generovaného tepla pro výrobu vodíku termochemickými metodami nebo pro jiné průmyslové účely a také se zaměřením na výrobu elektrické energie. Počítá se s reaktory pracujícími s pomalými neutrony. Tlak helia v primárním okruhu je 7 až 10 MPa. Předpokládá se zpravidla dvouokruhové uspořádání s primárním okruhem s plynným chladivem reaktoru a se sekundárním okruhem s realizací zařízení pro energetickou konverzi s využitím Rankine-Clausiova oběhu a alternativě s využitím uzavřeného Braytonova oběhu s dosažením tepelné účinnosti oběhu nad 50 %. [2]

2.3.6 REAKTORY S ROZTAVENÝMI SOLEMI

Uran jako palivo je ve formě fluoridu v nosné kapalné soli a je tak vytvořena tzv. palivová sůl, která v reaktoru plní současně funkci paliva i chladiva. Ve variantě reaktoru, který využívá epitermální neutronové spektrum, tvoří uvnitř jeho nádoby aktivní zónu kanály vyrobené z grafitu, jimiž protéká palivová sůl a které přispívají k moderaci neutronů. Procesy štěpení a transmutací probíhají v aktivní zóně.

Ve variantě reaktoru s rychlými neutrony nejsou pochopitelně grafitové kanály. Produkty štěpení se z reaktorů odvádí kontinuálně s ^{238}U ve formě fluoridů do palivové soli.

Teplota palivové soli na výstupu se předpokládá nejprve 700 °C, později až 800 °C. Tlak uvnitř reaktoru je nízkým mírně nad hodnotou atmosférického tlaku (v podstatě hydrostatický tlak kapalné soli). Atraktivní vlastnosti tohoto řešení jsou:

- vysoce aktivní odpady jsou tvořeny pouze produkty štěpení
- odtud kratší doba aktivity odpadů
- v reaktoru a v primárním okruhu je poměrně malý objem, malé zastoupení štěpitelných izotopů (^{242}Pu jako dominantní) vhodných pro jaderné zbraně
- malá spotřeba paliva v poměru k získané energii
- pasivní bezpečnost zařízení (negativní teplotní součinitel reaktivity, pasivní chlazení reaktoru atd.) pro prakticky libovolnou velikost zařízení

K tématu pracovního energetického spektra neutronů v termální, epitermální nebo rychlé oblasti je třeba poznamenat, že v rychlé oblasti spektra typického pro rychlé reaktory může být uran využit až 60 x efektivněji než v termální oblasti; dochází v ní k efektivnějšímu množení než v termální oblasti a není třeba moderátoru. V rychlém reaktoru tudíž může být plutonium „spalováno“ a současně „množeno“. Zachycením neutronu v jádře izotopů ^{238}U anebo také ^{240}Pu (oba jsou množivé materiály) dochází transmutací přímo nebo nepřímo k vzniku štěpitelných izotopů ^{239}Pu a ^{241}Pu . V aktivní zóně rychlého reaktoru je třeba k udržení štěpné řetězové reakce a transmutace obohacení izotopu ^{235}U nad 25 % (pak je účinný průřez pro štěpení rychlými neutrony dostatečný) nebo volit aktivní zónu s plutoniem (např.

vojenského původu nebo z přepracování vyhořelého paliva z reaktorů PWR). Kromě toho jsou rychlé reaktory schopné efektivně štěpit aktinidy, včetně těch, které jsou obsaženy (a lze je separovat) ve vyhořelém palivu z reaktorů PWR. [2]

3 REAKTORY S TEKUTÝMI KOVY

Jejich výhodou je nejen možnost využití vyhořelého paliva (použitím přepracovaného paliva můžeme zvýšit energetický výnos přírodního uranu až sedmdesátkrát), ale díky vysoké pracovní teplotě můžeme odsolovat vodu, vyrábět vodík nebo dodávat vysoko potenciální teplo pro různé průmyslové aplikace.

- + Použití paliva, které je pro klasické reaktory nevhodného. Toto nám umožní využít celého energetického potenciálu uranu.
- + Teplota v pracovním stavu je hluboko pod bodem varu. Takže nemusíme uměle zvyšovat tlak. Tím se snižuje pravděpodobnost náhlého prasknutí potrubí kontejnmentu
- + Velká tepelná kapacita. Není tak třeba velkých průtoků chladiva reaktorem a průřez potrubí nemusí být tak velký
- + Skvělá tepelná vodivost. Snižuje riziko havárie, neboť je možné nouzově dochlazovat s využitím přirozené tepelné cirkulace
- Podstatně vyšší obsah plutonia v aktivní zóně oproti klasickým reaktorům. Obohacení se pohybuje od 20-50 %. U klasických reaktorů se obohacení pohybuje kolem 4 %.
- Jedovatost
- Vznik koroze na základě změn fyzikální vlastností tekutých kovů - zhoršuje se odvod tepla
- Reakce probíhá za vysokých teplot. Nutný vývoj nových konstrukčních materiálů
- Vysoké náklady

3.1 KONSTRUKCE RYCHLÝCH REAKTORŮ CHLAZENÉ SODÍKEM

Jejich společným rysem je tříokružové zapojení do tepelného schématu jaderné elektrárny. Sodíkové chlazení si vyžádalo v minulém století vývoj zcela nové technologie spojené se zpracováním a přenosem tepelné energie z reaktoru do parní turbíny.

Zvláštností konstrukce vyplývají především z kompaktní prostorově těsné aktivní zóny, kterou tvoří centrální blok, konstituovaný z palivových souborů z vysoce obohaceného uranu (max 15-20 %) nebo plutonia, v obou případech ve formě oxidů (UO_2 , PuO_2), obklopený pláštěm palivo plodících souborů z oxidů ochuzeného uranu.

Po konstrukci rychlého reaktoru je charakteristické:

- Velké měrné objemové zatížení aktivní zóny, a to jak do hustoty toku neutronů, tak i co do vzniku tepelné energie
- Relativně malé rozměry aktivní zóny, při nichž i velmi malá změna jejího objemu vede k citelné změně reaktivity reaktoru
- Důležitým faktorem je vzájemné uspořádání a obsah paliva a plodiva. Čím větší je obsah plodiva v aktivní zóně, tím je větší reaktivita [4]

Na světě existuje několik funkčních reaktorů tohoto typu: Phénix a Superphénix (Francie), Monju (Japonsko). Celkem nový BN-800

3.2 CHARAKTERISTIKA REAKTORU VYUŽÍVAJÍCÍ SODÍK

Vyšší hustota štěpení, která je v rychlých reaktorech potřeba, vede k vyšší hustotě produkce tepla a zvyšuje nároky na efektivitu chlazení. Proto se u některých rychlých reaktorů, mezi které patří i BN-800, využívá tekutý sodík. Tyto reaktory chlazené tekutým sodíkem mají většinou dva sodíkové chladicí okruhy, aby sodík, který se dostává do aktivní zóny a může se v něm hromadit radioaktivita, byl oddělen od nejaderné části elektrárny. Teplo se mezi okruhy předává tepelnými výměníky. Druhý sodíkový okruh pak předává tepelnou energii přes tepelný výměník do okruhu s vodou, kde se pak produkuje pára pohánějící turbínu. Pára po průchodu turbínou kondenzuje a zbytkové teplo se předává do posledního chladicího okruhu, který ho odvede do chladících věží nebo do moře.

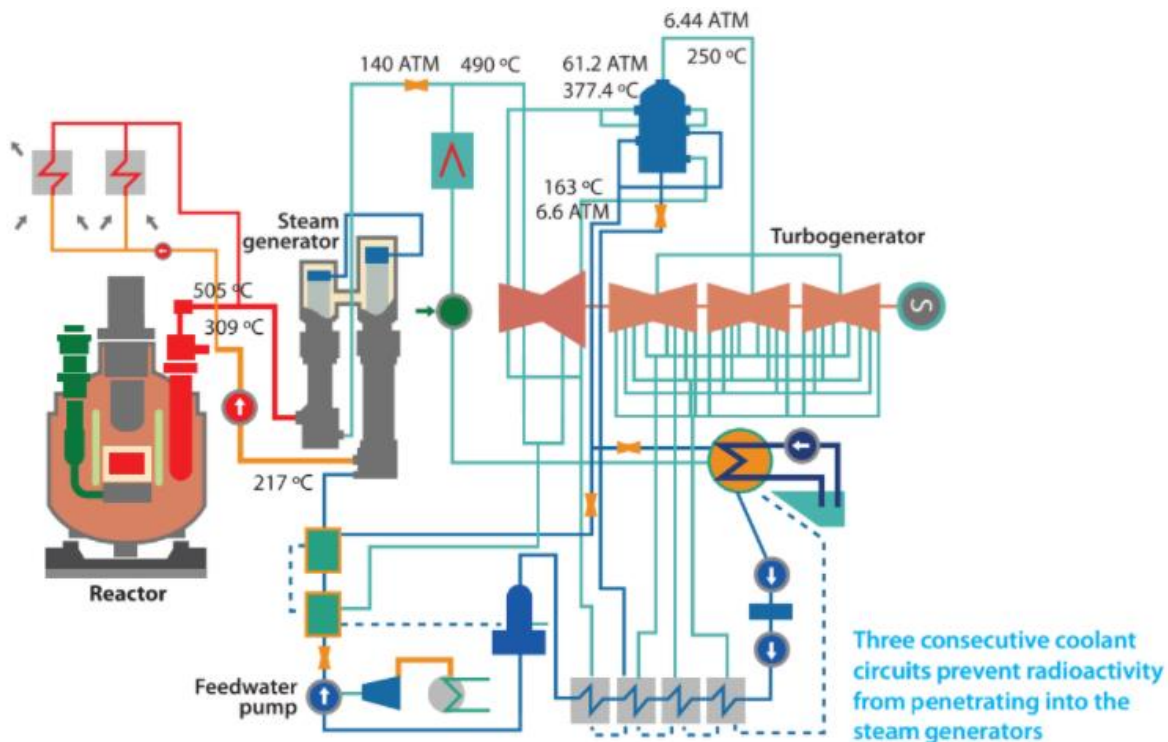
Nejčastější typ rychlého reaktoru chlazeného sodíkem je vanového typu, kdy je aktivní zóna ponořena ve velké nádobě vyplněné chladícím tekutým sodíkem, včetně typů BN-600 a BN-800. Teplota sodíku přesahuje 500 °C. Použitý sodík musí být velice čistý, aby v něm vznikalo co nejméně radioaktivity, a dokáže jej připravit jen velice málo firem.

Využití sodíku při chlazení má svá rizika spojená hlavně s bouřlivou reakcí sodíku se vzduchem a vodou. Má ovšem i svá pozitiva. Běžný tlakovodní reaktor je v podstatě velký „papiňák“, ve kterém obíhá voda o teplotách kolem 300 °C a tlaku stokrát či dvousetkrát vyšší, než je tlak naší atmosféry. I malá vada či netěsnost mohou mít vážné dopady, se kterými se při konstrukci reaktoru musí počítat. Reaktor BN-800 pracuje s tlakem jen o něco vyšším než atmosférickým. Podle svědků je tak od běžných reaktorů poznat i poklepem: jeho stěny jsou totiž podstatně slabší než u klasických tlakovodních reaktorů.

Velkou výhodou množivých reaktorů je i to, že v případě nehody by měly být robustnější. Stejně jako u dnešních lehkovodních reaktorů v nich po nehodě samovolně dojde k zastavení štěpné reakce. V reaktoru ovšem dále probíhá rozpad některých radioaktivních prvků, a vzniká tedy teplo. Je ho sice o mnohem méně než při provozu, ale pokud se ho nepodaří odvádět, reaktor se může přehřát. Připomeňme, že ve Fukušimě výpadek chlazení vedl k částečnému roztavení aktivních zón některých postižených reaktorů, i když radioaktivní pevné látky se mimo obal reaktoru nedostaly. [5]

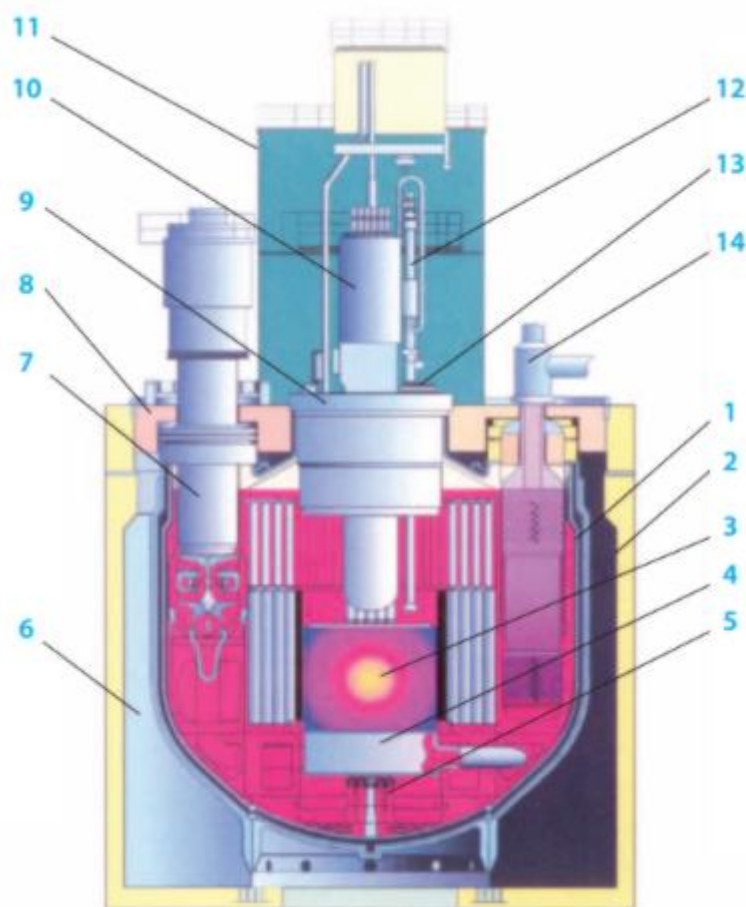
Sodíkové reaktory by díky kombinaci lepší konstrukce (společné všem moderním reaktorům), objemu sodíku v reaktoru a jeho fyzikálních vlastností, měly podobnou nehodu přestát s menšími potížemi než dnes nejrozšířenější zařízení. V BN-800 by sodík měl v reaktoru dostatečně silně cirkulovat pouze působením tepla a gravitace, takže nemá docházet k lokálnímu přehřátí a roztavení tyčí s palivem. Tekutého kovu je navíc v reaktoru více, než je potřeba, takže díky lepší schopnosti vsřebávat teplo a vyššímu bodu varu (cca 300 °C nad nejvyšší pracovní teplotou reaktoru) dokáže dlouho udržet reaktor zcela nepoškozený (nejméně 10 hodin, v praxi patrně více).

Nevýhodou systému je, že když se reaktor takto odstaví a nakonec ochladí, sodík v něm může zatuhnout. A pak v podstatě neexistuje možnost, jak reaktor znovu spustit a bude nutná výměna centrální části reaktoru (tj. aktivní zóny, která má rozměr válce necelé tři metry vysokého a metr širokého). To je možnost, se kterou konstrukce má počítat, ale samozřejmě může zásadně změnit reálnou ekonomiku provozu konkrétního reaktoru. [5]



Obrázek 2: Schéma tepelných toků reaktoru BN-800 [6]

Sodíková část okruhu chlazení je vyznačena červeně a oranžově a pracovní teplota se pohybuje cca od 300 do 500 stupňů Celsia. Za parogenerátorem už se používá výhradně voda (resp. pára), která pohání turbínu. Teploty v parním okruhu nejsou odlišné od sodíku (do cca 500 °C), ale tlaky jsou v něm podstatně vyšší (až 140násobek atmosférického tlaku)



Obrázek 3: Řez reaktorem BN-800 [7]

1. Tlaková nádoba reaktoru, 2. Ochranná obálka, 3. Aktivní zóna, 4. Tlaková nádoba, 5. Lapač koria (zařízení pro zachycení aktivní zóny v případě nějaké katastrofické nehody spojené s jejím roztavením), 7. Čerpadla sodíku v primárním okruhu, 12. Zařízení pro výměnu paliva, 14. Tepelný výměník

Tento reaktor využívá jako palivo i MOX, tedy směs oxidů uranu a plutonia. Bude tak mnohem efektivněji spalovat nejen zbrojní plutonium, ale také transurany z vyhořelého paliva. Vlastnosti plutonia 239 a uranu 235 se dost liší, takže využívání plutonia není možné ve všech reaktorech. Pro přípravu vhodného paliva se plutonium, které se získá z přepracování vyhořelého paliva, přimíchává k uranu 235 a uranu 238 a vytváří se již zmíněná směs, která se označuje jako MOX (Mixed Oxide). Recyklaci vyhořelého paliva a přípravu směsi MOX provádí jen pár států na světě.

	BN 350	BN 600	BN 800	Super Phenix
Tepelný výkon	1000 MW	1470 MW	2100 MW	3000 MW
Elektrický výkon	150 MW	600 MW	880 MW	1200 MW
Vstupní teplota chladiva	300 °C	377 °C	354 °C	362 °C
Výstupní teplota chladiva	500 °C	550 °C	547 °C	540 °C
Čerpadla	2	3	3	3
Palivo	MOX	MOX	MOX	MOX

4 CHLADIVA

Chladivo v reaktoru odvádí teplo z aktivní zóny, popřípadě i z jiných částí, jako jsou moderátor, regulační tyče atd. Jako chladivo se používají plyny, kapaliny, tekuté kovy a roztavené soli.

Chladivo musí mít vlastnosti:

- dobré tepelné vlastnosti, tj. vysoké měrné teplo a vysokou vodivost
- malou spotřebu energie k pohybu v chladícím systému
- vysoký bod varu s nízkou tavicí teplotou
- velkou tepelnou stabilitu
- odolnost proti vlivu záření
- nízkou korozní agresivitu
- nízký absorpční průřez
- malý sklon ke vzniku indukované radioaktivity
- nízkou cenu

Tepelně fyzikální vlastnosti chladiv [8]

Chladivo	CO ₂	He	H ₂ O	Na	K
Hustota	1,394 (100)	0,126 (100)		928 (100)	819 (100)
[kg·m ⁻³]	0,671 (500)	0,061 (500)	998,2 (20)	780 (700)	711 (500)
Měrné teplo	918 (100)			1 381 (100)	791,3 (200)
[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	1 155 (500)	5 204	4 183 (20)	1 277 (400)	766,2 (400)
Koeficient tepelné vodivosti	0,0228 (100)	0,1789 (100)		80,8 (200)	44,8 (200)
[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,0559 (500)	0,3047 (500)	0,599	71,2 (400)	37,7 (500)
Teplota tavení [°C]	-56,57	-271,4	0	97,8	63,7
Bod varu [°C]	-78,48	-268,99	100	883	760

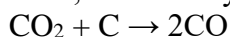
Poznámka: V závorce je uvedena teplota [°C], k níž se vztahuje příslušný údaj

4.1 PLYNNÁ CHLADIVA

Všeobecnou nevýhodu plyných chladiv je špatná schopnost odvádět teplo. Aby se nespotřebovalo velké množství energie na čerpání cirkulujícího chladiva, musí se pracovat se stlačeným plynem a s velkým ohřátím plynu. Používaná plyná chladiva jsou vzduch, oxid uhličitý a hélium.

Největší předností vzduchu je jeho snadná dostupnost. Má však některé podstatné nevýhody; mezi ně patří špatná tepelná vodivost, silné korozní působení při vyšších teplotách na většinu reaktorových materiálů, radioaktivita po ozáření a velký absorpční průřez pro tepelné neutrony.

Oxid uhličitý má malý účinný průřez pro pohlcování tepelných neutronů a rovněž poločas rozpadu ozářením vzniklé radioaktivní složky N^{16} je velmi krátký (7,3 s), takže nukleární vlastnosti CO_2 jsou velmi dobré. Má rovněž příznivé korozní vlastnosti, co se týče kovů, avšak za vyšších teplot napadá grafit. Při styku CO_2 s grafitem probíhá reakce.



Grafit má dobrou odolnost v CO_2 do teplot kolem 400 °C. Z hlediska tepelné vodivosti a spotřeby energie k dopravě chladicím systémem je oxid uhličitý méně vhodný než helium. Je však levný a je ho dostatek k dispozici.

Helium má velmi malý účinný průřez pro absorpci tepelných neutronů, je stabilní vůči teplotě a jadernému záření, chemicky netečné a nepůsobí korozivně na ostatní materiály. Hlavním důvodem, proč se prozatím nerozšířilo použití hélia, je jeho vysoká cena a nesnadná dostupnost, jakož i potíže souvisící s jeho těsněním.

4.2 KAPALNÁ CHLADIVA

Proti plyným chladivům se kapalná chladiva vyznačují všeobecně vyšší schopností odvádět teplo, avšak z korozního hlediska jsou nepříznivější. Patří k nim voda (lehká i těžká) a organické sloučeniny. Voda má velmi dobré tepelné vlastnosti a lze jí současně použít jako moderátor. Tepelná vodivost vody je asi uprostřed mezi plyny a tekutými kovy. Pro dosažení dobré tepelné účinnosti je však třeba pracovat s vodou za vyšších teplot a tlaků. Při provozu reaktoru dochází vlivem tvořícího se radioaktivního N^{16} k aktivaci vody.

Kritické parametry lehké a těžké vody [8]

Parametr	D ₂ O	H ₂ O
Kritická teplota [°C]	371,5	374,2
Kritický tlak [MPa]	22,438	22,129
Kritická hustota [kg·m ⁻³]	338	307

4.3 ROZTAVENÉ SOLI

Tuto skupinu tvoří především směs fluoridu lithného (LiF) a fluoridu berylnatého (BeF₂) s přídavkem fluoridu zirkoničitého (ZrF₄) s bodem tání 350 °C. Tato směs se vyznačuje vysokou radiační a tepelnou stabilitou, nízkou tenzí par a tepelnými vlastnostmi jako voda. Hodí se pro jaderné reaktory pracující za vyšších teplot.

4.4 TEKUTÉ KOVY

Kovová chladiva reaktorů mají několik vlastností:

- + velmi dobrý odvod tepla
- + vysoký bod varu (možnost činnosti chladicího systému za poměrně nízkých tlaků)
- + nerozkládají se zářením
- způsobují korozi mnoha materiálům
- sodík a draslík se stávají po ozáření zdrojem radioaktivity
- částečně moderují rychlé neutrony
- v klidovém stavu bývají z pravidla tuhé

Tepečně fyzikální vlastnosti kovových chladiv [8]

Chladivo	Na	NaK	Pb	Bi	PbBi
Hustota [kg·m ⁻³]	968 (100)	847 (100) 703 (700)	10 510 (400) 10 270 (600)	10 030 (300) 9 660 (600)	10 460 (200) 9 640 (800)
Měrné teplo [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	1230	146,5 (144 – 358)	154,9 (400 – 500)	148,2 (400) 166,2 (800)	879,2 – 921,1 (200-800)
Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	142	247 (200) 264 (400)	15,9 (400) 15,1 (600)	15,5 (400) -	-
Teplota tavení [°C]	97,72	-11	327,4	271	125
Bod varu [°C]	883	784	1 737	1 447	1 670

Poznámka: V závorce je uvedena teplota [°C], k níž se vztahuje příslušný údaj

Jaderné vlastnosti kovů používaných k ochlazení reaktorů [8]

Chladivo	Na		K		Bi	Hg		
Radioaktivní izotopy	N ²⁴		K ⁴²		Bi ²¹⁰	Hg ²⁰³		Hg ²⁰⁵
Poločas rozpadu	14,97 h		12,44 h		5 d	49, d		5,5 min
Druh záření	β	γ	β	γ	β	β	γ	β
Energie záření	0,223	0,22 0,44	0,33 0,572	0,243	0,187	0,033	0,043	0,28

Pro použití v hladících systémech je důležitá velká čistota kovů, protože většina příměsí zvyšuje korozní agresivitu. Materiály, které přicházejí do styku s tekutými kovy, jsou vystaveny jejich koroznímu působení. Kromě chemického slučování a difúze se uplatňuje také přenos hmoty chladivem z teplejších míst okruhu do chladnějších. Následkem tohoto přenosu vzniká zmenšování užitečného průměru potrubí, spojování pohyblivých částí, oduhličování oceli aj.

4.4.1 SODÍK

Oproti ostatním tekutým kovům je levný a je ho dostatek. V současné době je nejpoužívanějším chladivem pro rychlé reaktory. Vzhledem k nízké hustotě sodíku je i malá potřebná práce čerpadel.

Používání sodíku má i svá rizika:

- Reaktivita sodíku s vodou a vzduchem je velmi nebezpečná. Při kontaktu sodík vzplane (nízkým plamenem - v nových reaktorech s tímto počítají a sodík v případě havárie odtéká kanálky do podzemí kde se následně hasí)
- Sodík při havárii vytváří aerosol, který šíří radioaktivitu. Ne všechny sodíkové okruhy jsou ovšem radioaktivní
- V reaktoru se aktivuje a vzniká radioaktivní sodík s poločasem rozpadu 15 hodin
- Sodíkové potrubí je nutno elektrickým ohřevem udržovat na teplotě minimálně 150°C. Za pokojové teploty je v tuhém stavu. U sodíku běžné jakosti, který je vyráběn pro chlazení, převyšuje bod tání 100 °C, což v praxi znamená, že potrubí se nahřívá na 200 - 250 °C
- Čistý sodík není příliš agresivní vůči ocelím, ale oxidy v něm obsažené podstatně zvyšují rychlost koroze. Sodík též způsobuje snížení mechanických vlastností a křehnutí.

Termofyzikální vlastnosti sodíku [9]

t [°C]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg·K]	λ [W/m·K]	ν [m ² /s]	Pr [-]	σ [N/m]
27	967	1230	133	-	-	-
67	960	1290	127	-	-	-
97	954	1360	123	-	-	-
127	20	1373	84	$6,6 \cdot 10^{-7}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$	0,188
177	908	1340	82	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	0,183
227	897	1327	80	$4,7 \cdot 10^{-7}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$	0,178
277	866	1306	77	$4,1 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	0,173
327	874	1298	75	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	0,168
377	862	1285	72	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	0,163
427	849	1273	70	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	0,158
477	838	1264	67	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	0,153

527	827	1256	65	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	0,149
577	816	1256	63	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	0,145
627	803	1256	60	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	0,141
677	790	1264	58	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	-

4.4.2 OLOVO

Je to těžký toxický kov, který má velmi nízkou teplotu tání. Jeho největší výhodou je, že je odolný vůči korozi a má docela dlouho životnost. Nevýhodou je, že výstavba reaktorů s tímto chladivem je časově i finančně náročnější.

Používání olova má i svá rizika:

- Přítomnost nečistot v oloveném chladivu může dojít k částečnému nebo úplnému ucpání toku chladicí kapaliny, což narušuje hydrodynamiku a přenos tepla
- Usazeniny na teplosměnných plochách, zejména na palivových člancích reaktoru mohou způsobit nárůst teploty pláště

5 VÝMĚNÍKY TEPLA

Výměník tepla v jaderné elektrárně je zařízení sloužící k přenosu tepla z chladiva reaktoru do pracovní látky, obíhající výměníkem a hnacím strojem

Výměníky tepla je možno rozdělit podle základního hlediska na výměníky:

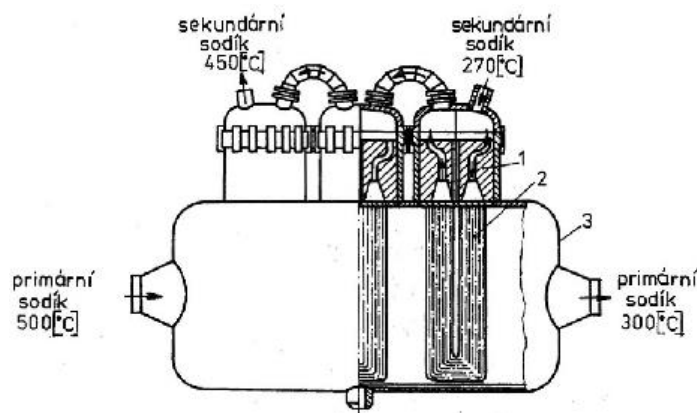
1. v nichž neprobíhá změna skupenství teplosměnných látek
2. v nichž nastává změna skupenství teplosměnné látky (parní generátor)

5.1 VÝMĚNÍK TEPLA NA JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ

V projektu jaderné elektrárny se z důvodů jaderné bezpečnosti používá zásadně výměníků tepla rekuperačního typu, v nichž jsou zahřívající a ohřívaná tekutina oddělena celistvou stěnou teplosměnné plochy.

Od konstrukce výměníku se žádá dosažení co největšího výkonu na jednotku prostoru a hmotnosti. Splnění tohoto požadavku vyžaduje kompaktní uspořádání teplosměnných ploch při využití všech prostředků vedoucích ke zintenzivnění sdílení tepla.

Speciálními výměníky tepla na jaderné elektrárně jsou tzv. mezivýměníky. Jde o výměníky umístěné na hranici mezi primárním a sekundárním okruhem. Jejich konstrukce musí být zcela přizpůsobena podmínkám platících pro radioaktivní látky, zvláště co do hermetičnosti, montáže, opravám a provozu vůbec.



Obrázek 4: Mezi-výměník reaktor BN-350 [10]

5.2 VÝMĚNÍK TEPLA U REAKTORŮ CHLAZENÝ TEKUTÝMI KOVY

Pro jaderné elektrárny s reaktory chlazenými tekutými kovy jsou vhodná tříokruhová schémata. Vhodné jsou dva druhy výměníků s tekutými kovy:

1. primární výměník, u něhož na obou stranách teplosměnné plochy proudí tekutý kov
2. sekundární výměník (parní generátor), u něhož na jedné straně teplosměnné plochy proudí tekutý kov a na druhé straně voda nebo její pára

Při konstrukci obou výměníků je nutné dbát na těsnost výměníku, musí být vyloučena možnost pronikání tekutého kovu do vzduchu nebo do vody. Úniky sodíku mimo parní

generátor jsou nepřipustné. Pokud k nim dochází, zapříčiňují požár a ohrožují provoz a snižují bezpečnost jaderné elektrárny. Jednou z možných variant pro posílení technické i jaderné bezpečnosti samotné koncepce parního generátoru je rozdělit celou teplosměnnou plochu na větší počet samostatných článků. Parní generátory vyhřívané kapalnými kovy jsou konstruovány výhradně jako trubkové výměníky tepla. [8] [2]

5.3 TRUBKOVÉ VÝMĚNÍKY

Trubkové výměníky patří k nejrozšířenějším a nejstarším typům výměníků. Nedochází v nich ke kontaktu pracovních látek. Tento typ výměníku se označuje jako rekuperační výměník. Trubkové výměníky se skládají z vnějšího pláště a vnitřních trubek. V mezitrubkovém prostoru jsou umístěny přepážky pro vedení trubek a také zpomalují průtok a prodlužují trajektorii proudění média v prostoru.

5.3.1 PRIMÁRNÍ VÝMĚNÍK S DVOJITÝMI TRUBKAMI

U systému dvojitých trubek proudí teplosměnné látky uvnitř vnitřní trubky a vně vnější trubky. V mezitrubkovém prostoru je pak látka, která nereaguje ani s jednou z teplosměnných látek. Často je v mezitrubkovém prostoru stojatý sodík. Toto řešení je sice bezpečnější, co se týče průniku jedné teplosměnné látky do druhé, ovšem tento systém se vyznačuje mnohem horším přestupem tepla a větší ekonomickou náročností než u systému jednoduchých trubek.

5.3.2 PRIMÁRNÍ VÝMĚNÍK S JEDNODUCHÝMI TRUBKAMI

Jednoduché trubky dosahují mnohem většího součinitele přestupu tepla. Je zde ovšem větší riziko, že při poškození trubky dojde ke smísení tekutého sodíku primární a sekundární smyčky. Proto se v primárním okruhu používá čistý sodík a v sekundárním okruhu je použita slitina sodíku s draslíkem, která má lepší schopnost pohlcování neutronů. [8]

5.4 DESKOVÉ VÝMĚNÍKY

U tohoto typu tepelných výměníků dochází k předávání tepla pomocí proudění mezi ocelovými deskami. Tyto desky mají ve svém profilu vylisovány kanálky, kterými proudí média vždy na střídačku – mezi první a druhou deskou teplejší médium, mezi druhou a třetí deskou chladnější atd. Tímto se dosáhne čistého protiproudu, což přináší velké výhody, zejména v úspoře místa. Lze dosáhnout až desetkrát vyššího přestupního koeficientu než u trubkových výměníků. Naopak od trubkových výměníků je vždy nutné deskové výměníky doplnit oběhovými čerpadly pro obě média, jelikož tlakové ztráty jsou velmi vysoké.

6 PARNÍ GENERÁTORY

Pod názvem parní generátor jaderné elektrárny rozumíme tepelný výměník sloužící k výrobě páry pomocí tepla předávaného v něm vodě a páře teplotnosnou látkou ochlazující jaderný reaktor, nebo vyplňující vložený teplosměnný okruh. Parní generátor je jedním z klíčových zařízení dvouokruhové, resp. tříokruhové jaderné elektrárny.

Podle druhu teplotnosné látky rozlišujeme tyto typy parních generátorů:

- vytápěný plynem,
- vytápěný tlakovou horkou vodou,
- vytápěný organickou látkou,
- vytápěný tekutým kovem (sodíkem)

Obecně se parní generátor skládá z:

- ohřívák (ekonomizér): napájecí voda se dohřívá teoreticky na teplotu varu
- výparník
- odlučováku vody
- přehřívák

6.1 KONCEPCE PARNÍCH GENERÁTORŮ

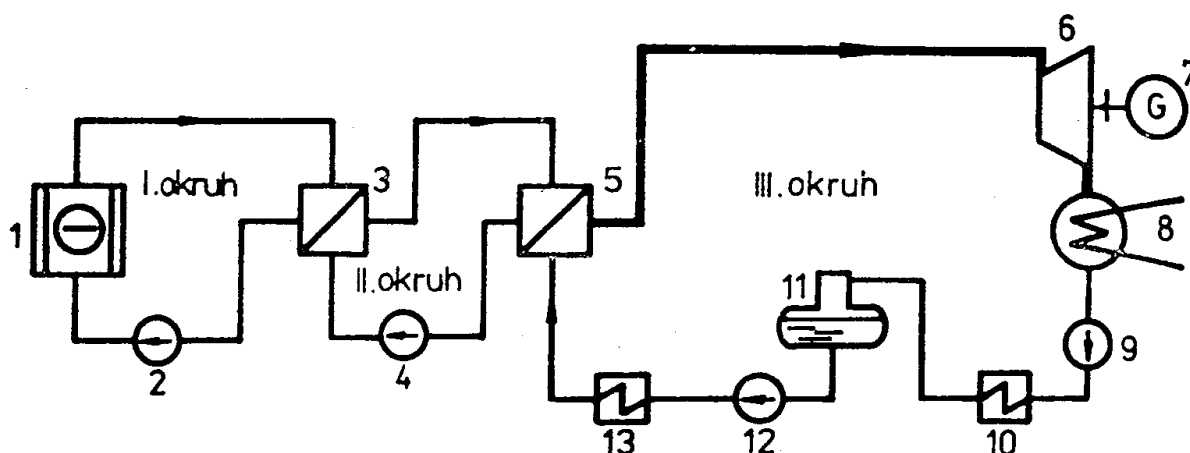
Pro konstrukci parního generátoru bývají zadány následující výchozí údaje: druh a parametry topné látky, parametry páry a napájecí vody, způsob kterým topná látka a pracovní látka protéká parním generátorem, způsob řešení vzájemné dilatace teplosměnných ploch a těles parních generátorů a kompenzace teplotních napětí v hlavních částech. Většina údajů a podmínek pro konstrukci se musí vybírat na základě technickoekonomické analýzy. Klasifikaci parních generátorů jaderných elektráren a určení jejich hlavních charakteristik provádíme podle následujících kritérií:

- Způsob umístění parního generátoru v budově či kobkách elektrárny, který řeší umístění osy parního generátoru vzhledem k podlaze kobky. Osa parního generátoru může být umístěna v horizontální nebo vertikální poloze.
- Způsob, jakým je omývána teplosměnná plocha, tj. zda topná látka teče v trubkách a pracovní látka v mezitrubkovém prostoru či naopak.
- Způsob a směr průtoku pracovní a topné látky parním generátorem.
- Způsob provedení teplosměnné plochy, která může být vytvořena z hladkých či žebrovaných trubek, sestavených do plochých šroubových či spirálových hadů, nebo z hladkých či žebrovaných trubek, po délce formovaných do tvarů U, L a Z, nebo ze svazku trubek v trubce, nebo z trubek typu Field.
- Způsob provedení tělesa parního generátoru, tj. zda je těleso (obálka, která odděluje pracovní a topnou látku od okolí) přímé nebo ve tvaru U, L či Z nebo kombinované.
- Způsob členění teplosměnné plochy a tělesa parního generátoru, tj. zda parní generátor je proveden jako tělesový, makročlankový nebo mikrochlankový.
- Způsob průtoku pracovní látky výparníkem, tj. zda je použito přirozené, nucené či průtočné cirkulace.
- Způsob odlučování páry, který určuje, zda k odlučování páry je použito bubňů nebo vertikálních odlučováků, jednostupňového či vícestupňového odlučování atd.

6.1.1 PARNÍ GENERÁTOR V ELEKTRÁRNÁCH S REAKTORY CHLAZENÝMI TEKUTÝMI KOVY

Teplo z radioaktivního sodíku primárního okruhu se předává v mezivýměníku neradioaktivnímu sodíku vloženého sekundárního okruhu a z něj teprve v parním generátoru vodě a vodní páře terciárního okruhu. Mezivýměníky v případě havarijní reakce sodíku s vodou v parním generátoru, chrání jednak okolí proti zamoření radioaktivním sodíkem, protože sekundární sodík je neradioaktivní, ale také chrání reaktor proti následkům chemické reakce v parním generátoru.

Příkladem postavené elektrárny s rychlým reaktorem chlazeným sodíkem je francouzský reaktor Supher Phenix nebo ruský reaktor BN-600.



Obrázek 5: Tříokruhové zapojení parního generátoru [11]

1 - rychlý reaktor, 2 - hlavní cirkulační čerpadlo, 3 - mezivýměník, 4 - cirkulační čerpadlo sekundárního okruhu, 5 - parní generátor, 6 - parní turbína, 7 - elektrický generátor, 8 - kondenzátor, 9 - kondenzát ní čerpadlo, 10 - nízkotlakové regenerační ohříváky, 11 - odplyňovák s napájecí nádrží, 12 - napájecí čerpadlo, 13 - vysokotlakové regenerační ohříváky.

6.2 PARNÍ GENERÁTORY S REAKTORY VVER

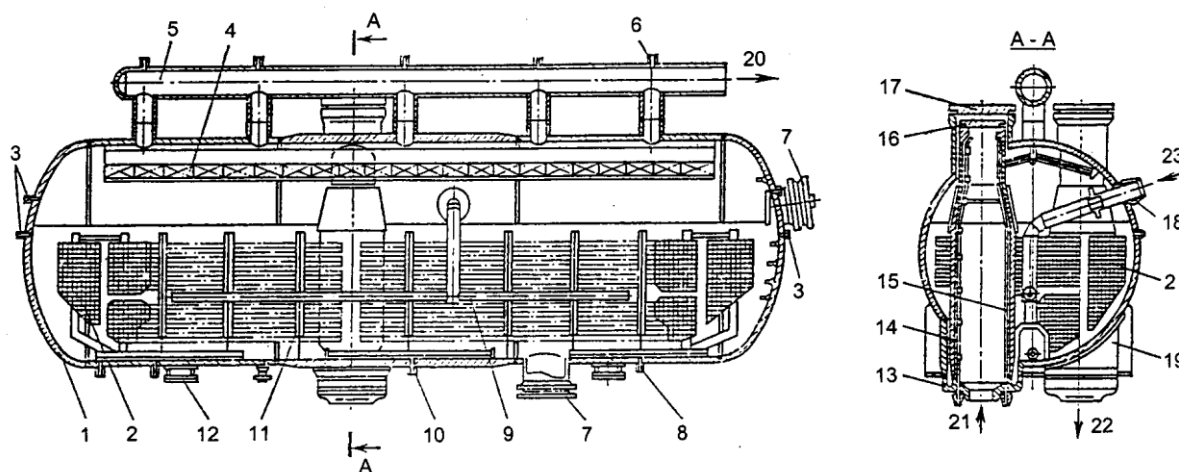
V zemích, které přijaly ruskou koncepci tlakovodního reaktoru VVER (PWR), jsou v provozu již tři generace horizontálního tělesového parního generátoru se zaplavenou teplosměnnou plochou a v tělese zabudovanými odlučováky vlhkosti. Tato koncepce dovoluje zvýšení jednotkového výkonu, je provozně spolehlivá a nenáročná na obsluhu.

6.2.1 PARNÍ GENERÁTOR S REAKTORY VVER-440

Těmito parními generátory je vybavena jaderná elektrárna v Dukovanech

Teplosměnná plocha parního generátoru je tvořena vodorovnými svazky trubek, které mají tvar U, o průměru 16 mm. Tyto trubky vycházejí ze svislého vstupního kolektoru primární vody a končí ve svislém výstupním kolektoru primární vody. Do obou kolektorů jsou trubky zaválcovány speciální technologií - výbuchem, čímž se najednou zaválcuje několik desítek trubek. Potom se pomocí poloautomatů trubky ještě přivařují. Vyvrtávání otvorů pro trubky do kolektorů se provádí na speciálních strojích. Svazky teplosměnných trubek jsou ponořeny pod hladinou sekundární vody. Cirkulace sekundární vody mezi trubkami svazku je přirozená. Součinitel přestupu tepla na sekundární (vnější) straně je velký (jedná se o var). Aby byl co

největší i výsledný součinitel průchodu tepla, je nutno zvětšit součinitele přestupu tepla na vnitřní straně trubek, tj. na straně primární vody. Toho je možno dosáhnout především zvýšením rychlosti vody, což zajišťuje hlavní cirkulační čerpadlo primárního okruhu. Protože se primární voda ochladí v parním generátoru jen asi o 30 °C, musí být její průtok mnohonásobně větší, než je množství vyráběné páry na sekundární straně parního generátoru. Sekundární napájecí voda je do parního generátoru přiváděna nátrubkem a rozváděna rozdělovacím kolektorem napájecí vody do teplejší poloviny svazků trubek. Tímto způsobem se vyrovnává parní zatížení hladiny vody, protože napájecí voda má nižší teplotu, než odpovídá teplotě varu při tlaku v parním generátoru. Pára, která se uvolňuje z hladiny, je zbavována vody průchodem žaluziovými odlučováky, načež vstupuje pěti nátrubky do výstupního kolektoru syté páry. Vlhkost páry na výstupu z parního generátoru nesmí přestoupit 0,25 %. Pracovní objem sekundární vody v parním generátoru činí 48,4 m³. Objem této vody při úplném zaplnění na sekundární straně činí 75 m³. Nepřetržitý odluh sekundární strany parního generátoru v hodnotě asi 0,4 % výroby páry a periodický odluh se provádí ze dna parního generátoru nátrubky. Vstupní a výstupní kolektory procházejí horní částí pláště, takže je do nich umožněn přístup shora. Víko kolektoru je utěsněno dvěma niklovými těsnícími kroužky. Případné porušení těsnosti u jednoho z kroužku je možno zjistit pomocí trubky napojené do prostoru mezi oběma kroužky. Odvzdušňovací trubky se používá k odvodu vzduchu z nejvýše položených míst - například při plnění parního generátoru primární vodou. Přes podpěry je parní generátor zavěšen na betonový strop tak, aby mohl kývat při vyrovnávání teplotních dilatací připojených primárních i sekundárních potrubí.



Obrázek 6: Parní generátor reaktoru VVER-440 [11]

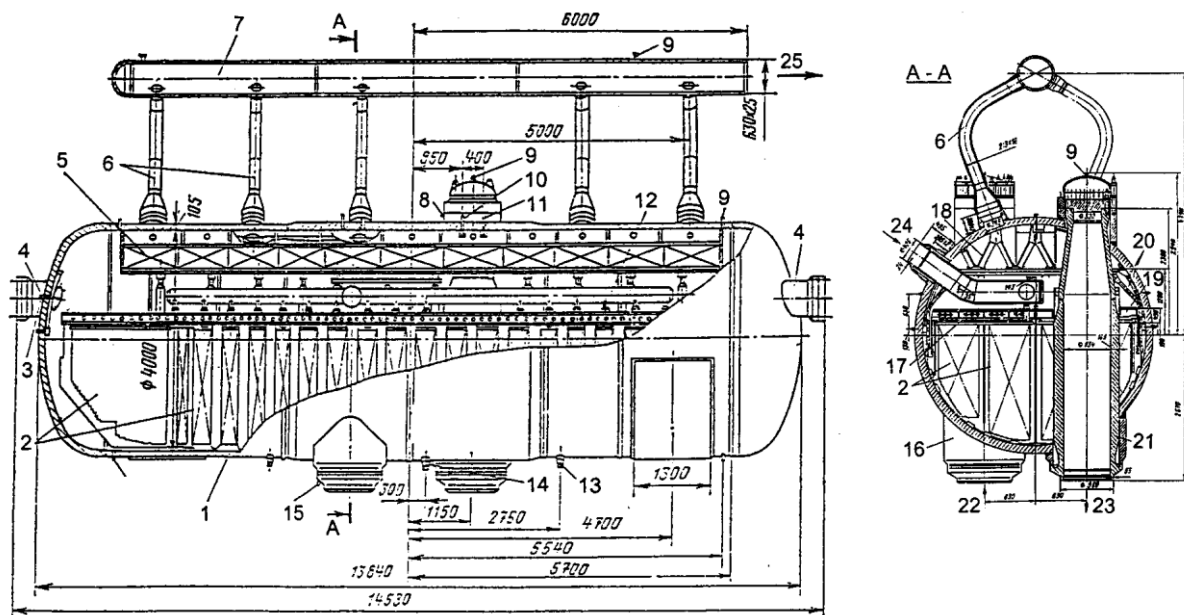
1 - těleso parního generátoru, 2 - svazek trubek teplosměnné plochy, 3 - nátrubky hladinoměru, 4 - žaluziový odlučovák, 5 - kolektor syté páry, 6 - odvzdušňovací nátrubek, 7 - průlez, 8 - nátrubek nepřetržitého odluhu, 9 - rozdělovací kolektor sekundární napájecí vody, 10 - nátrubek periodického odkalu, 11 - opěrné stojiny svazku trubek, 12 - vrchní část podpěry parního generátoru, 13 - vstupní kolektor primární vody, 14 - trubka odvodu vzduchu kolektoru, 15 - trubka odvodu úniku vody, 16 - víko kolektoru, 17 - víko průlezu, 18 - nátrubek vstupu sekundární napájecí vody, 19 - výstupní kolektor primární vody, 20 - výstup syté páry, 21 - vstup primární vody, 22 - výstup primární vody, 23 - vstup sekundární napájecí vody

6.2.2 PARNÍ GENERÁTOR S REAKTORY VVER-1000

Těmito parními generátory je vybavena jaderná elektrárna v Temelíně.

Plášť parního generátoru je svařen z prstenců zakružovaných ze 105 mm silných plechů. Pouze dva prostřední prstence jsou silnější (195 mm), protože jsou v nich vyřezány otvory pro průchod kolektorů primární vody. Z pevnostních důvodů těchto prstenců nejsou kolektory umístěny v jedné rovině kolmé k ose parního generátoru, nýbrž jsou poněkud přesazeny, aby každý z nich byl v jiném prstenci. Teplosměnné trubky o vnějším průměru 16 mm a tloušťce stěny 1,5 mm z nerezavějící austenitické oceli jsou ve svazku se střídavým uspořádáním. Rozteč mezi trubkami po výšce činí 19 mm, po šířce svazku (ve vodorovném směru) 23 mm. Kromě toho jsou ve svazku svislé mezery, které zlepšují přirozenou cirkulaci parovodní směsi v mezitrubkovém prostoru. Vodorovné mezery usnadňují montáž. Vzájemné distancování trubek ve svazku se provádí pomocí speciálních desek, které jsou připevněny ke svislým opěrným stojinám a k žebrům, která jsou přivařena k plášti parního generátoru. Svazek trubek je poněkud kompaktnější než u parního generátoru pro VVER-440, kde je uspořádání svazku za sebou, se svislými roztečemi trubek 24 mm a vodorovnými roztečemi trubek 30 mm.

Trubka napájecí vody je přivařena k nátrubku tak, aby se v místě průchodu pláštěm nedotýkala bezprostředně pláště parního generátoru a tím bylo zabráněno vzniku teplotních pnutí v plášti. Dále pokračuje napájecí voda do kolektoru a z něho do rozváděcích trubek, které vedou vodu do teplejší části svazku podélně. Napájecí voda se dohřeje na teplotu varu ve vroucí vodě mezi trubkami svazku. K rovnoměrnějšímu rozložení parovodní směsi v parním objemu parního generátoru pomáhá též pod hladinou ponořený vodorovný děrovaný štít (ve výši 260 mm nad svazkem trubek). Parovodní směs vystupující z hladiny projde nejprve prvním odučovákem vlhkosti - gravitačním - v parním prostoru. Druhé odučování proběhne potom v žaluziových odučovácích. Pára vycházející z parního generátoru má vlhkost 0,2 %.



Obrázek 7: Parní generátor reaktoru VVER-1000 [11]

6.3 PARNÍ GENERÁTOR VYTÁPĚNÝ TEKUTÝM KOVEM

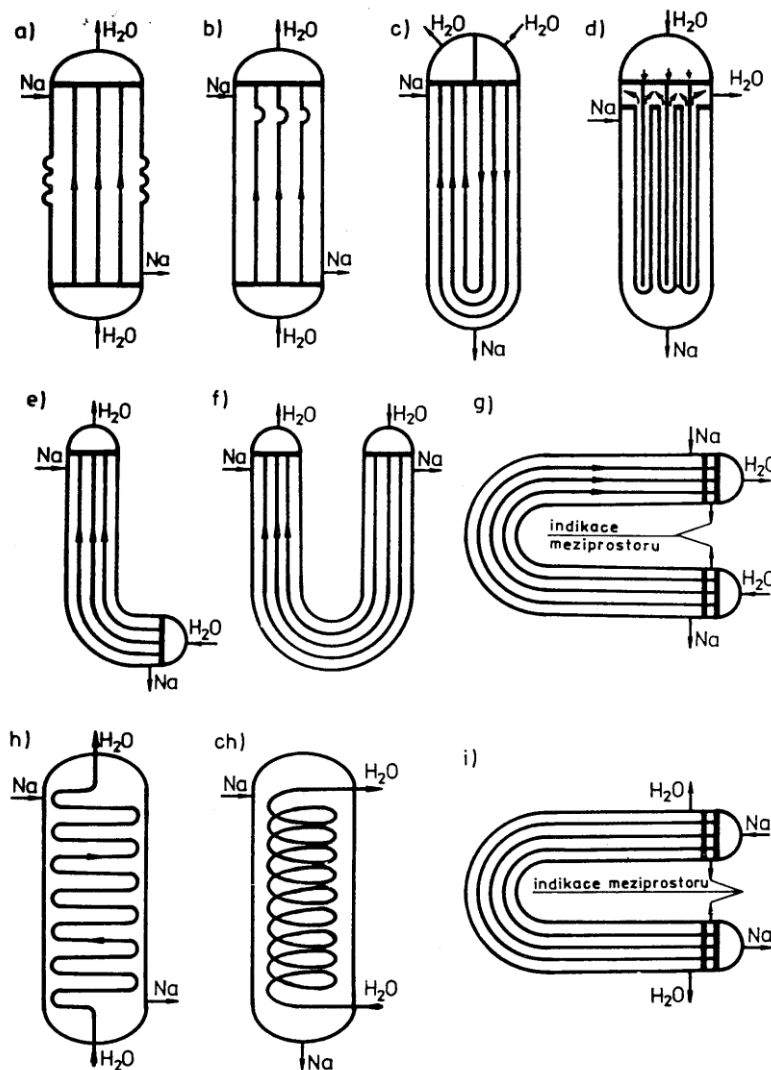
Největším problémem projektu jaderných elektráren s rychlými množivými reaktory, a to jak po technické, tak i ekonomické stránce, jsou na dnešní úrovni parní generátory. Obtížnost vývoje parních generátorů nebyla v dřívější době doceněna. Z hlediska vlastní konstrukce se

příliš neliší od parních generátorů jaderných elektráren s tepelnými reaktory. Společným rysem zůstává vysoká životnost, čistota povrchů a přesnost výroby.

Vzhledem k tomu, že teplosměnná plocha parních generátorů vytápěných sodíkem odděluje od sebe látky vzájemně chemicky velmi aktivní, způsobuje jakákoliv, i velmi malá, netěsnost teplosměnné plochy provozně technické těžkosti a může být zdrojem velkých a vážných havárií. Havárie parního generátoru způsobená reakcí sodíku s vodou může být zapříčiněna mikroúniky nebo makroúniky vody do sodíku. Havarijní stav způsobený mikroúnikem se v důsledku intenzivní koroze a eroze teplosměnné plochy parního generátoru změní ve velmi krátkém časovém intervalu (řádově hodiny) v makroúnik. Proto se věnuje značné úsilí vývoji spolehlivé konstrukce parního generátoru.

6.4 KONCEPCE KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ PARNÍCH GENERÁTORŮ SE SODÍKEM

Tyto koncepce mohou mít mnoho variant. Jsou velmi zjednodušeným způsobem naznačeny některé z konstrukčních typů parních generátorů, u nichž ohřívající látkou je tekutý sodík a látkou ohřivanou voda a vodní pára.



Obrázek 8: Koncepce parních generátorů [11]

- a) Řešení je použitelné pro tělesový (korpusový) nebo makromodulový parní generátor s přímými trubkami, přivařenými dole do dolní a nahore do horní trubkovnice. Vzájemná teplotní dilatace svazku trubek a pláště je řešena vlnovcovým kompenzátozem na plášti. Tohoto typu bylo použito například u reaktorů BN-600 a SNR-300.
- b) Řešení je použitelné pro tělesové i makromodulové parní generátory s přímými trubkami, přivařenými nahore i dole do trubkovnic. Vzájemná teplotní dilatace svazku trubek vůči plášti, ale i jednotlivých trubek ve svazku mezi sebou, je řešena kompenzačními ohyby na trubkách. Tohoto řešení bylo použito pro jeden z návrhů makromodulového přehříváku páry pro ruský reaktor BN-600.
- c) Tělesové řešení s trubkami tvaru U, přivařenými do jedné trubkovnice, výborně řeší dilatace mezi trubkami a pláštěm, ale také mezi jednotlivými trubkami. Tento princip byl použit u výparníků britského reaktoru PFR.
- d) Tělesové řešení s Fieldovými trubkami je vhodné pro výparník. Voda proudí dolů vnitřními Fieldovými trubkami, které jsou přivařeny do horní trubkovnice, dole obrací směr a proudí vzhůru (nyní již jako směs vody a páry) mezitrubkovým prostorem Fieldových trubek. Toto řešení bylo použito u prvních výparníků parních generátorů u ruského reaktoru BN-350.
- e) Tvarem L, který má plášť i všechny trubky přivařené na obou koncích do trubkovnic, jsou výborně řešeny všechny vzájemné dilatace. Toto řešení bylo použito u parních generátorů amerického reaktoru v Clinch River.
- f) Plášť i svazek trubek ve tvaru U řeší výborně veškeré dilatace. Trubky jsou přivařeny na obou koncích do trubkovnic. Takto byly konstruovány přehříváky páry prvních parních generátorů u reaktoru BN-350.
- g) Toto řešení je vhodné pro mikromodulové provedení parních generátorů. Plášť i trubky ve tvaru U vyrovnávají výborně dilatace. Parní generátory tohoto typu byly použity pro ruské reaktory BOR-60 a BN-350.
- h) Tělesový parní generátor má paralelně řazené trubkové hady. Takto byly konstruovány první parní generátory pro reaktor BOR-60, které se neosvědčily, takže byly později nahrazeny článkovými.
- ch) Tělesové řešení parního generátoru se šroubovicovitě vinutými teplosměnnými trubkami je vhodné pro velké výkony. Toto řešení bylo aplikováno u francouzského reaktoru Super Phenix.
- i) V tomto případě se jedná o tzv. „inverzní“ parní generátor. Sodík proudí vnitřními trubkami a voda a vodní pára v plášti. Plášť musí mít silnější stěny, spotřeba materiálu pro parní generátor vzroste, ale dosáhne se větší bezpečnosti. Vznikne-li totiž trhлина ve stěně trubky, oddělující vodu od sodíku, proniká samozřejmě voda, která má vyšší tlak, do sodíku. Experimentálně bylo zjištěno, že je-li sodík v trubkách malého průměru, nemůže se v tomto malém prostoru chemická reakce mezi vodou a sodíkem plně rozvinout a utlumí se. Zcela opačně je tomu u „přímých“ parních generátorů, kde je sodík mezi trubkami v plášti, takže zde je podstatně větší prostor v němž se chemická reakce může plně explozivně rozvinout. Mikromodulový „inverzní“ parní generátor byl instalován u reaktoru BOR-60.

Ke zvýšení bezpečnosti parních generátorů proti explozivní reakci sodíku s vodou byla uvažována různá konstrukční opatření. Jedním z nich jsou dvojité trubky. Jsou to dvě sousedě

trubky do sebe nasunuté, které k sobě téměř přiléhají, aby mezitrubkový prostor mezi nimi byl co nejtenčí. Je to vlastní indikační meziprostor vyplněný látkou, která nereaguje ani se sodíkem ani s vodou (např. helium, rtuť). Vytvořenou mezerou se však podstatně zhorší podmínky pro prostup tepla mezi sodíkem a vodou. Proto bylo navrženo řešení, kdy jsou obě trubky na sebe těsně nasunuty, ale jsou opatřeny jen drážkami, přímými, případně šroubovicovitě vinutými. Při vyplnění meziprostoru rtutí však docházelo k častým poruchám parních generátorů, neboť rtuť způsobovala korozi konstrukčních materiálů. Proto se toto konstrukční řešení u velkých elektráren nepoužívá. [11]

7 KONSTRUKCE PARNÍHO GENERÁTORU

7.1 NÁVRH VĚTVÍ A MODULŮ

Každá větev parního generátoru se skládá z ekonomizéru, výparníku a přehříváče.

Výkon reaktoru	38 MW		
Počet trubek	37		
Počet větví PG	10		
Průměr potrubí sodíku	219 mm		
Tloušťka potrubí sodíku	8 mm		
	ekonomizér	výparník	přehřívák
Materiál	2,25Cr1MoNb	2,25Cr1MoNb	2,25Cr1MoNb
Průměr potrubí	190 mm	190 mm	190 mm
Tloušťka pláště	3 mm	3 mm	3 mm

7.2 SLEDOVACÍ SYSTÉM NETĚSNOSTÍ

7.2.1 SYSTÉM SLEDOVÁNÍ ÚNIKU U VÝMĚNÍKU S DVOJITÝMI TRUBKAMI

V případě úniku páry nebo sodíku do meziprostoru mezi oběma částmi desky s dvojitými trubkami je nutné, aby byl personál zařízení okamžitě informován o typu úniku a místě úniku. Tyto informace musí být jasně uvedeny na panelu v místnosti pro zaměstnance.

Senzory musí být citlivé na dva různé typy úniků: únik sodíku nebo únik vody/ páry. Pára a kapalný sodík mohou vadnými svary proniknout do meziprostoru mezi oběma částmi desky s dvojitou trubkou. Z meziprostoru je trubice ϕ 14 x 3 mm vedena k sensorům. Pokud dojde k úniku na straně sodíku, sodík proudí v trubici k senzoru, který je umístěn uvnitř generátoru.

Kontaktní manometr umístěný mimo generátor se používá jako snímač úniku vody / páry. Pokud dojde k úniku páry, je aktivován spínač v kontaktním manometru.

7.2.2 ÚNIK VODY / PÁRY DO SYSTÉMU MONITOROVÁNÍ A SLEDOVÁNÍ SODÍKU

Únik vody do monitorovacího systému sodíku ZEUS 80 funguje metodou vyhodnocení dvou ze tří hodnot; to eliminuje subjektivní odhad monitorovací situace a eliminuje falešné signály, pokud například selže jeden ze sensorů. [12]

Monitorovací systém se skládá z:

- a) průtokoměry sodíku umístěné na výstupu sodíku z každé větve
- b) iontová pumpa s vodíkovou difúzní membránou umístěnou na výstupním potrubí sodíku před sodíkovou vyrovnávací nádrží
- c) vodíkové senzory v krycím plynu sodíkové vyrovnávací nádrže
- d) tlakový senzor k indikaci zvýšení tlaku plynu ve vyrovnávací nádrži sodíku

Na výstupu sodíkového potrubí z každé větve jsou upevněny dva magnetické průtokoměry. Do systému ZEUS 80 jsou zavedeny signály pouze osmi ze šestnácti instalovaných průtokoměrů.

7.2.3 MONITOROVÁNÍ ÚNIKŮ SODÍKU DO GENERÁTORU

V případě, že sodík unikne do generátoru, kapalný sodík spojuje elektrické kontakty senzorů, které jsou umístěny v nejnižší části generátoru. Taková nehoda je okamžitě opticky a akusticky signalizována

7.3 VOLBA KONSTRUKČNÍHO MATERIÁLU

Pro konstrukci generátoru byly vybrány následující materiály:

- Feriticko-perlitická ocel typu 2.25Cr1MoNb pro teplonosné trubky ϕ 25x 3 mm a trubkové desky
- Austenitická ocel 18Cr8Ni připojení sodíkového potrubí ϕ 108 x 8 mm.
- Austenitická nerezová ocel Cr-Ni podle pravidel Sandvik pro sodíkovou komoru ϕ 324x20mm a ϕ 219 x 8 mm.
- Austenitická ocel typu 18Cr8Ni pro svazky trubek a vnitřní části modulu na straně vody.

Vybrané materiály pro konstrukci generátoru [12]

Část generátoru	Ocel	Odpovídající norma
Trubkové desky	2,25Cr1MoNb	CSN 41 5418
Teplonosné trubky	10CrMo910	DIN 17 175
Plášť trubky, hlavní trysky	0,6Cr0,5MoV	CSN 41 5128
Vnitřní části	CrMo	CSN 41 5110
Potrubí sodíku	2,25Cr1MoNb	CSN 41 5418
Potrubí sodíku	18Cr8Ni	CSN 41 7248
Napájecí potrubí	vysoce kvalitní uhlíková ocel	CSN 41 2022

Parní potrubí	0,6Cr0,5MoV	CSN 41 5128
Sodíková komora	Cr-Ni	CSN 41 7249

Vlastnosti použitých ocelí:

- Feriticko-perlitická ocel typu 2.25Cr1Mo stabilizovaná Nobiem je ocel s dlouhodobou odolností proti tekutému sodíku do teplot 530 ° C.
- Feritická ocel typu CrMoV je žáruvzdorná nízkolegovaná ocel s nízkým obsahem uhlíku a se zaručenou svařitelností a vhodná pro energetická a chemická zařízení do provozní teploty 580 ° C (creepová oblast). V důsledku zpevnění těchto ocelí disperzí karbidů a karbonitridů vanadu MX je náchylnost k sekundárnímu vytvrzování. Jedná se o pozitivní proces pokud se jedná pouze o creepovou oblast, kdy je vlivem vysoké teploty zaručena vysoká plasticita materiálu. Pokud dojde k provozu v podcreepové oblasti (do 450 °C), dochází ke snížení plastických vlastností to znamená křehký lom a to může vést až k poškození svaru. Svar tepelně ovlivněná oblast je nejnáchylnější částí zařízení ke křehkému porušení.
- Austenitická ocel typu 18Cr8NiTi je austenitická svařitelná titanem stabilizovaná a interkrystalická korozivzdorná ocel. Ocel je vhodná pro výrobu zařízení a tlakových nádob v chemických aplikacích.

Vlastnosti ocelí [12] [13]

	2.25Cr1Mo	CrMoV	18Cr8NiTi
Korozivzdornost proti Na	dobrá	dobrá	výborná
Max. provozní teplota	530 °C	580 °C	620 °C
R _{p02}	210 MPa	200 MPa	205 MPa
R _m	410-600 MPa	460-610 MPa	500- 700 MPa

Termofyzikální vlastnosti ocelí Cr-Mo

t [°C]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg·K]	λ [W/m·K]	E [GPa]	σ [GPa]
20	7700	450	24,0	217	600,0
100		480	24,1	213	560,0
200		520	25,0	206	528,7
300		560	25,5	199	500,0
400		620	26,0	190	461,8
500		700	26,2	181	400,0
600		710	26,5	171	270,0
700		965	26,8	160	100,0

7.4 HYDRAULICKÉ VLASTNOSTI GENERÁTORU

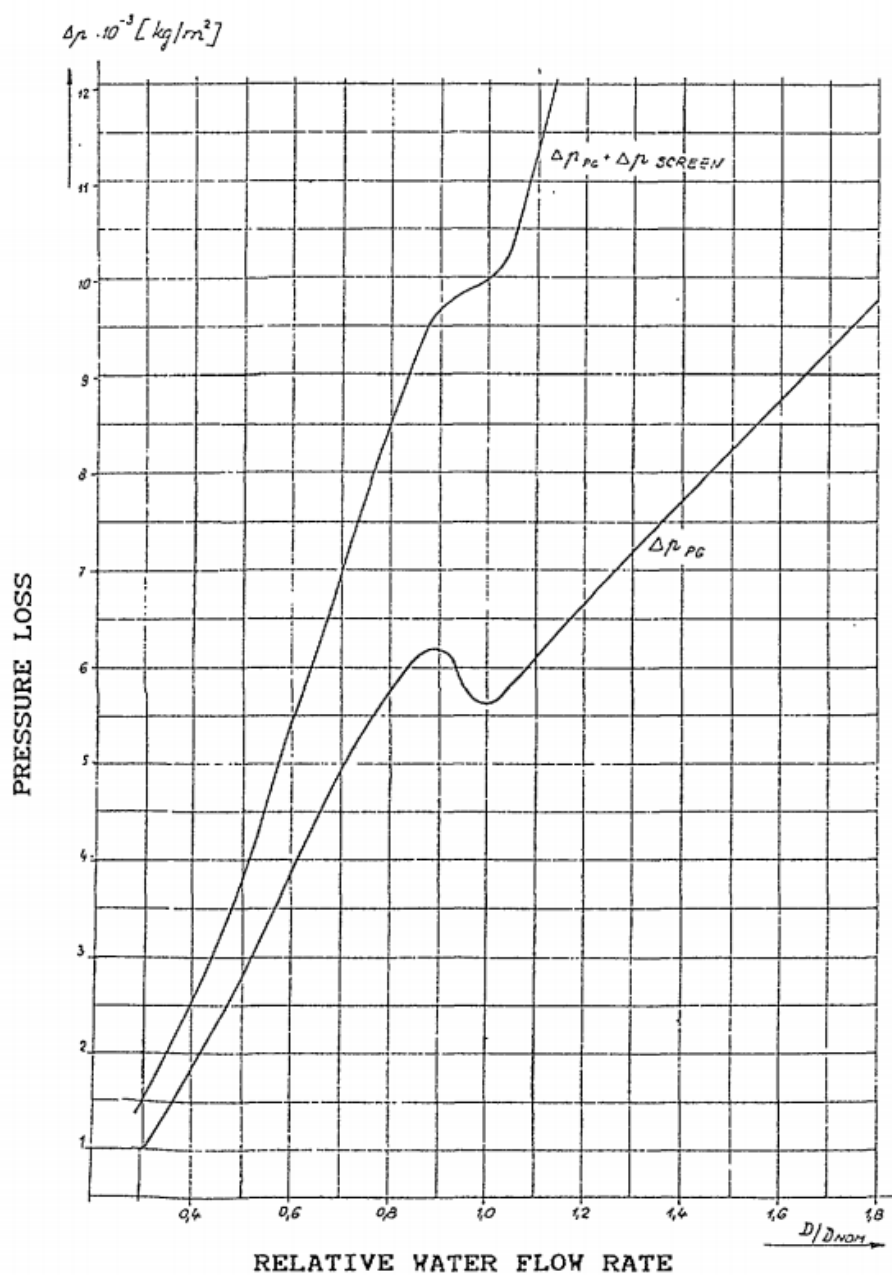
NA STRANĚ VODY/PÁRY

Hydraulická charakteristika byla vypočtena za předpokladu, že průtok sodíku, vstupní teploty sodíku a napájecí vody a tlak napájecí vody jsou nominální a konstantní hodnoty. Průtok vody byl změněn mezi 20 a 200% jmenovité hodnoty a následně byly vypočítány tlakové ztráty. Při výpočtech byla zohledněna také role odlučovače vody a páry.

NA STRANĚ SODÍKU

Lokální tlakové ztráty i ztráty třením byly uvažovány v hydraulických výpočtech na straně sodíku. Navrhovaný pokles tlaku mezi vstupem a výstupem sodíku za nominálních podmínek dosáhl 0,2 MPa.

Vypočtená hydraulická charakteristika generátoru je uvedena na obr.9. Horní charakteristika odpovídá řešení s clonou a spodní charakteristika bez clony umístěného na vstupu vody do modulu.



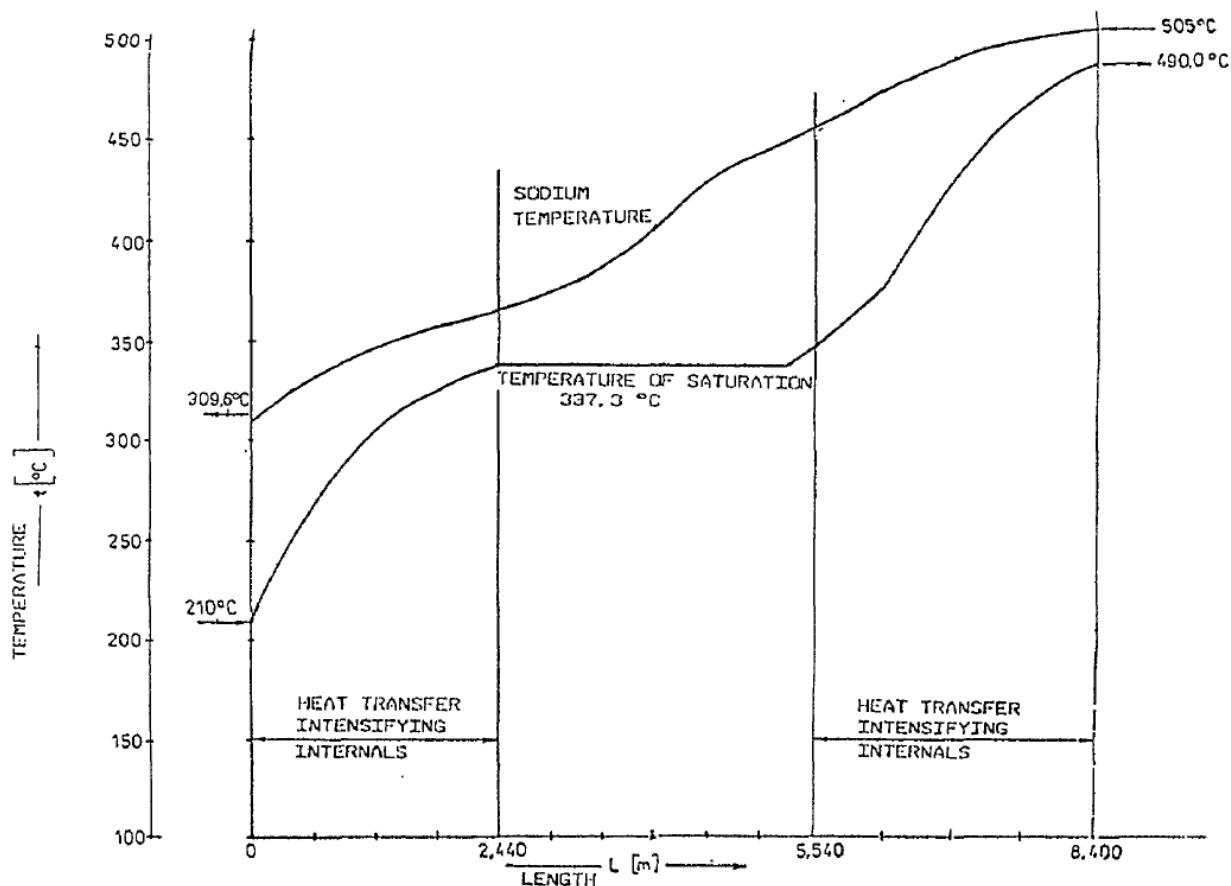
Obrázek 9: Vypočítaná hydraulická charakteristika generátoru [12]

- horní křivka - s clonou
- spodní křivka - bez clony na vstupu vody do modulu

POŽADAVKY NA KVALITU MÉDIA

Požadovaná kvalita napájecí vody [12] (str. 56)

Množství, koncentrace	Jednotka	Hodnota
Specifická elektrická vodivost za výměníkem	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	0,3
Kyslík	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	10
Železo	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	10
Měď	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	5
Sodík	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	10
Objem suspendovaných látek	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	30
pH	-	$9\pm 0,2$
SiO ₂	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	20
Chloridy	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	5



Obrázek 10: Teploty sodíku, vody a páry po délce trubice při jmenovité úrovni tepelného výkonu (26,3 MW) generátoru [12] (str. 62,63)

7.5 VÝPOČET PŘENOSU TEPLA

V minulých letech se počítalo **Nusseltovo číslo** na straně sodíku [12], [9]

$$Nu = 5 + 0,025 \cdot Pe^{0,8}$$

V dnešní době je pro chemicky čisté kovy doporučován vztah [2]

$$Nu = 7 + 0,025 \cdot Pe^{0,8}$$

M.A. Michejev aj. [14] doporučují pro výpočet středního součinitele přestupu tepla při vynuceném turbulentním proudění kapalného kovu a slitin alkalických zemin a těžkých kovů v ocelových trubkách s délkou l a vnitřním průměrem d rovnici

$$Nu = (3,3 + 0,014 \cdot Pe^{0,8}) \cdot \varepsilon$$

$$\text{pro } \frac{l}{d} < 30 \quad \varepsilon = 1,72 \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^{0,16}$$

$$\text{pro } \frac{l}{d} > 30 \quad \varepsilon = 1$$

Výsledky experimentálního studia přestupu tepla provedeného Subotinem lze shrnout do vztahu [2]

$$Nu = 4,36 + 0,025 \cdot Pe^{0,8} \quad [-] \quad (1)$$

Pro výpočet součinitele prostupu tepla **na straně přehřáté páry** byla použita následující rovnice [2], [12]

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot C_t \quad [-] \quad (2)$$

$$C_t = \left(\frac{Pe}{Pe_{st}}\right)^{0,25} \quad \text{pro } t \leq 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_t = 1 \quad \text{pro } t > 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

kde střední teplota pro výpočty je střední teplota přehřáté páry a střední teplota stěny trubky, která byla vypočítána ze středních teplot sodíku a páry.

Pro výpočet součinitele prostupu tepla v ekonomizéru byla použita následující kritická rovnice [2]

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{Pe}{Pe_{st}}\right)^{0,06} \quad [-] \quad (3)$$

Střední teplota pro výpočet byla průměrná teplota vody v ekonomizéru. Střední teplota stěny trubice byla vypočítána podobně jako teplota přehříváku.

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (4)$$

Součinitel prostupu tepla K_1 platný pro l m délky tepelného výměníku se vypočítá pomocí vztahu

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d}{d_1} + \frac{d}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d}{2 \cdot \lambda_u} \cdot \ln \frac{d'_2}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{d}{d_2}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (5)$$

Střední logaritmický teplotní rozdíl byl vypočítán pro každý modul pomocí rovnice.

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}; \quad t_1 > t_2 \quad [^\circ\text{C}] \quad (6)$$

Délky článku parního generátoru se určí pomocí rovnice

$$Q = K \cdot S \cdot \Delta t_{ln} = K \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot \Delta t_{ln}$$

$$l = \frac{\dot{Q}}{K \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot d \cdot \Delta t_{ln}} \quad [\text{m}] \quad (7)$$

Při výpočtu výparníku se řeší:

7.5.1 BUBLINKOVÝ VAR

S růstem tepelného toku teplota povrchu převyší rovnovážnou teplotu nasycení při daném tlaku. Na povrchu se postupně vyvíjí plně rozvinutý bublinkový var. Na výhřevné ploše se zákonitě vyskytují trhlinky a nerovnosti, ve kterých důsledkem působení povrchového napětí vzniknou plynové kapsy, které slouží jako varná jádra. Hlavně tyto místa nerovností povrchu budou zdroji vzniku parních bublinek. Bublínky jsou nestabilní, rostou s vydělováním páry z kapaliny, k růstu je potřebná určité množství energie, proto je nutné přivádět teplo do povrchové vrstvy obklopující parní bublinku. Na počátku je velikost těchto bublinek hodně malá. K přenosu tepla dochází vedením z přehřáté kapaliny. Nejintenzivnější nárůst rozměru bublinek je možné pozorovat v první fázi růstu. Na bublinku páry působí vztaková síla, která se snaží odtrhnout bublinku od výhřevné plochy, na které jí drží povrchové napětí. Maximální velikost parní bublinky v okamžiku odtržení od výhřevné plochy je o několik řádů větší než velikost při vzniku, tento děj je krátký a intenzivní, z čeho plyne výbušný profil varu a pulzační přemísťování páry a kapaliny v mezní vrstvě, kde dochází aj nejvýraznějšímu přenosu tepla. Tento konvektivní pohyb způsobuje až 98 % přenášeného tepelného toku. Pro součinitel přestupu tepla bublinkového varu se v literatuře udávají různé empirické vztahy, obecně, je to funkce tlaku, materiálových charakteristik vytápěcího povrchu a výhradně na přenášeném tepelném toku.

7.5.2 BLÁNOVÝ VAR

U blánového varu jsou nižší hodnoty součinitele přestupu tepla a současně dochází ke zvýšení teploty výhřevné plochy. Při následujícím snižování tepelného toku se blánový var zachová i při menším zatížení než je kritická hodnota

Výběr několika rovnic pro výpočet součinitele přestupu tepla při bublinkovém varu:

Rohsenowova [15] rovnice:

$$Nu = \frac{1}{C_{sf}} \cdot Re^{1-n} \cdot Pr^{-m} \quad [-]$$

$$n = 0,33; m = 0,7$$

S Rohsenowovou rovnicí se pomocí zadaného tepelného toku snadno určí součinitel přestupu tepla, potřebujeme však znát konstantu, která vyjadřuje vlastnosti rozhraní povrch-kapalina, její typické hodnoty se pohybují mezi 0,0025 až 0,015.

Mostinskiho [15] rovnice:

Když neznáme povrchové vlastnosti, můžeme použít Mostinskiho rovnici.

$$\alpha = 0,106 \cdot p_k^{0,69} \cdot q^{0,87} \cdot f(pr) \quad [-]$$

$$p_r = \frac{p}{p_k}$$

$$f(pr) = 1,8 \cdot p_r^{0,17} + 4 \cdot p_r^{1,2} + 10 \cdot p_r^{10} \quad [-]$$

Z hlediska výpočtu je nenáročná, ovšem očekává se menší nepřesnost kvůli nezahrnutí vlastností povrchu výtopné plochy. Kritický tlak se dosazuje v barech.

8 VÝPOČET

8.1 URČENÍ HLAVNÍCH PARAMETRŮ

Průtočný průřez sodíku ekonomizéru, výparníku a přehříváku

$$S_{Na} = m \left(\frac{\pi \cdot d_1^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \right) = 0,2191 \quad [\text{m}^2] \quad (8)$$

Průtočný průřez sodíku v jedné větve parního generátoru

$$S_{\text{větvě}} = \frac{S}{m} = 0,0219 \quad [-] \quad (9)$$

hydraulický průměr v ekonomizéru

$$d_h = \frac{4 \cdot s}{\pi \cdot d_1^2 + n \cdot \pi \cdot D_1^2} = 0,0308 \quad [\text{m}] \quad (10)$$

Průtočný průřez sodíku ekonomizéru, výparníku a přehříváku

$$S_{H_2O} = m \cdot n \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = 0,0461 \quad [\text{m}^2] \quad (11)$$

8.2 VÝPOČET HMOTNOSTNÍHO PRŮTOKU VODY A SODÍKU V PG

8.2.1 TEPLoty NA STRANĚ VODY A PÁRY

$$t_{H_2O}^A = 530 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{H_2O}^B = 315 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{H_2O}^C = 315 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{H_2O}^D = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

8.2.2 ENTALPIE NA STRANĚ VODY A PÁRY

$$i_{H_2O}^A = 3 \text{ } 416 \text{ } \text{kJ/kg}$$

$$i_{H_2O}^B = 2 \text{ } 520 \text{ } \text{kJ/kg}$$

$$i_{H_2O}^C = 2 \text{ } 520 \text{ } \text{kJ/kg}$$

$$i_{H_2O}^D = 758 \text{ } \text{kJ/kg}$$

8.2.3 HMOTNOSTNÍ PRŮTOK VODY A PÁRY

$$\dot{Q} = \dot{M}_2 \cdot (i_{H_2O}^A - i_{H_2O}^D) \Rightarrow \dot{M}_2 = \frac{\dot{Q}}{i_{H_2O}^A - i_{H_2O}^D} = 14,30 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

8.2.4 TEPELNÉ VÝKONY**TEPELNÝ VÝKON ČLÁNKU EKONOMIZÉRU**

$$\dot{Q}_E = \dot{M}_2 \cdot (i_{H_2O}^C - i_{H_2O}^D) = 12\,630 \text{ kW}$$

TEPELNÝ VÝKON VÝPARNÍKU

$$\dot{Q}_V = \dot{M}_2 \cdot (i_{H_2O}^B - i_{H_2O}^C) = 12\,630 \text{ kW}$$

TEPELNÝ VÝKON PŘEHŘÍVÁKU

$$\dot{Q}_P = \dot{M}_2 \cdot (i_{H_2O}^A - i_{H_2O}^B) = 12\,801 \text{ kW}$$

8.2.5 TEPLoty NA STRANĚ SODÍKU

$$t_{Na}^A = 547 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{Na}^C = t_{H_2O}^C + \Delta t_{Na,H_2O}^C = 315 + 10 = 325 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta t_{Na}^{AC}}{\dot{Q}_V + \dot{Q}_P} = \frac{\Delta t_{Na}^{AD}}{\dot{Q}_E + \dot{Q}_V + \dot{Q}_P} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t_{Na}^{AD} = \Delta t_{Na}^{AC} \cdot \frac{\dot{Q}_E + \dot{Q}_V + \dot{Q}_P}{\dot{Q}_V + \dot{Q}_P} = (547 - 325) \cdot \frac{12\,630 + 12\,570 + 12\,801}{12\,570 + 12\,801} = 333 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{Na}^D = t_{Na}^A - \Delta t_{Na}^{AD} = 547 - 333 = 214 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{Na}^{AB} = \Delta t_{Na}^{AC} \cdot \frac{\dot{Q}_P}{\dot{Q}_V + \dot{Q}_P} = (547 - 325) \cdot \frac{12\,801}{12\,570 + 12\,801} = 112 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{Na}^B = t_{Na}^A - \Delta t_{Na}^{AB} = 547 - 112 = 435 \text{ }^\circ\text{C}$$

8.2.6 ENTALPIE NA STRANĚ SODÍKU

$$i_{Na}^A = t_{Na}^A \cdot c_{Na}^A = 547 \cdot 1256 = 687 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i_{Na}^B = t_{Na}^B \cdot c_{Na}^B = 435 \cdot 1275 = 555 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i_{Na}^C = t_{Na}^C \cdot c_{Na}^C = 325 \cdot 1298 = 422 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i_{Na}^D = t_{Na}^D \cdot c_{Na}^D = 214 \cdot 1327 = 285 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

8.2.7 HMOTNOSTNÍ PRŮTOK SODÍKU

$$\dot{Q} = \dot{M}_1 \cdot (i_{Na}^A - i_{Na}^D) \Rightarrow \dot{M}_2 = \frac{\dot{Q}}{i_{Na}^A - i_{Na}^D} = 94,43 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

	Bod	Teplota [°C]	Entalpie [kJ/kg]	Hmotnostní průtok [kg/s]
Sodík	A	547	687	94,31
	B	435	555	
	C	325	422	
	D	214	285	
Voda	A	530	3 416	14,30
	B	315	2 520	
	C	315	1 641	
	D	150	758	

8.3 VÝPOČET DÉLKY ČLÁNKU V EKONOMIZÉRU

8.3.1 VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA STRANĚ VODY V EKONOMIZÉRU

$$\bar{t}_{H_2O,E} = \frac{t_{H_2O}^C + t_{H_2O}^D}{2} = \frac{315 + 150}{2} = 232,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{H_2O,E} = 823,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\eta_{H_2O,E} = 1,14645 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda_{H_2O} = 0,63904 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$Pr_{H_2O,E} = 0,809$$

Hodnoty určené pomocí programu Steam Lab [16]

$$w_{H_2O,E} = \frac{\dot{V}_{H_2O}}{S_{H_2O}} = \frac{\dot{M}_{H_2O}}{S_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O,E}} = \frac{14,30}{0,0491 \cdot 823,7} = 0,353 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Re_{H_2O,E} = \frac{w_{H_2O,E} \cdot \rho_{H_2O,E} \cdot d_{H_2O}}{\eta_{H_2O,E}} = \frac{0,376 \cdot 823,7 \cdot 0,0130}{1,146 \cdot 10^{-4}} = 33 \text{ } 013$$

$$Nu_{H_2O,E} = 0,021 \cdot Re_{H_2O,E}^{0,8} \cdot Pr_{H_2O,E}^{0,43} \cdot C_t = 0,021 \cdot 34 \text{ } 061^{0,8} \cdot 0,809^{0,43} \cdot 1 = 78,99$$

$$\alpha_{H_2O,E} = \frac{Nu_{H_2O,E} \cdot \lambda_{H_2O,E}}{d_{H_2O}} = \frac{78,99 \cdot 0,63904}{0,0130} = 3 \text{ } 883 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

8.3.2 VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA STRANĚ SODÍKU V EKONOMIZÉRU

$$\bar{t}_{Na,E} = \frac{t_{Na}^C + t_{Na}^D}{2} = \frac{325 + 214}{2} = 269,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{Na,E} = 879,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v_{Na,E} = 3,89 \cdot 10^{-7}$$

$$\lambda_{Na} = 75,97 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$Pr_{Na,E} = 0,00594$$

$$w_{Na,E} = \frac{\dot{V}_{Na,E}}{S_{Na}} = \frac{\dot{M}_{Na}}{S_{Na} \cdot \rho_{Na}} = \frac{94,43}{0,2191 \cdot 879,8} = 0,4899 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Re_{Na,E} = \frac{w_{Na,E} \cdot d_{Na}}{v_{Na,E}} = \frac{0,4899 \cdot 0,2031}{3,89 \cdot 10^{-7}} = 38\,771,79$$

$$Pe_{Na,E} = Re_{Na,E} \cdot Pr_{Na,E} = 38\,771,79 \cdot 0,00594 = 230,30$$

$$Nu_{Na,E} = 4,36 + 0,025 Pe_{Na,E}^{0,8} = 4,36 + 0,025 \cdot 230,30^{0,8} = 6,24$$

$$\alpha_{Na,E} = \frac{Nu_{Na,E} \cdot \lambda_{Na,E}}{d_h} = \frac{6,24 \cdot 75,97}{0,0308} = 15\,399,53 = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

8.3.3 VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA V EKONOMIZÉRU

$$\lambda_{tE} = 25,42 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_u = 0,5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$u = 0,5 \text{ mm}$$

$$K_E = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{H_2O,E}} \cdot \frac{D_{H_2O}}{d_{h_2O}} + \frac{D_{H_2O}}{2 \cdot \lambda_{tE}} \cdot \ln \frac{D_{H_2O}}{d_{H_2O}} + \frac{D_{H_2O}}{2 \cdot \lambda_u} \cdot \ln \frac{d_{H_2O}}{d_{H_2O} - 2 \cdot u} + \frac{1}{\alpha_{Na,E}} \cdot \frac{D_{H_2O}}{D_{H_2O}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{3\,883} \cdot \frac{0,0190}{0,0130} + \frac{0,0190}{2 \cdot 25,42} \cdot \ln \frac{0,0190}{0,0130} + \frac{0,0190}{2 \cdot 0,5} \cdot \ln \frac{0,0190}{0,0130 - 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{15\,399,53} \cdot \frac{0,0190}{0,0190}} =$$

$$= 1370,10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

8.3.4 LOGARITMICKÝ TEPLTNÍ ROZDÍL EKONOMIZÉRU

$$\Delta t_{ln,E} = \frac{\Delta t_{Na,H_2O}^C - \Delta t_{Na,H_2O}^D}{\ln \frac{\Delta t_{Na,H_2O}^C}{\Delta t_{Na,H_2O}^D}} = \frac{(t_{Na}^C - t_{H_2O}^C) - (t_{Na}^D - t_{H_2O}^D)}{\ln \frac{t_{Na}^C - t_{H_2O}^C}{t_{Na}^D - t_{H_2O}^D}} = \frac{(325 - 315) - (214 - 150)}{\ln \frac{325 - 315}{214 - 150}}$$

$$\Delta t_{ln,E} = 29,23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

8.3.5 DÉLKA EKONOMIZÉRU

$$\dot{Q}_E = K_E \cdot S_E \cdot \Delta t_{ln,E} = K_E \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_{H_2O} \cdot l_E \cdot \Delta t_{ln,E} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow l_E = \frac{\dot{Q}_E}{K_E \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \Delta t_{ln,E}} = \frac{12\,630}{1370,1 \cdot 10 \cdot 37 \cdot \pi \cdot 0,019 \cdot 29,23} = 14,28 \text{ m}$$

Celková délka části ekonomizéru je volena $l_E = 14,3 \text{ m}$

8.4 VÝPOČET DÉLKY ČLÁNKU VÝPARNÍKU

8.4.1 VÝPOČET KRITICKÉ SUCHOSTI VE VÝPARNÍKU

$$\rho_{H_2O,V} \cdot w_{H_2O,V} = \frac{\dot{M}_{H_2O}}{\dot{V}_{H_2O,V}} \cdot \frac{\dot{V}_{H_2O,V}}{m \cdot n \cdot \frac{\pi \cdot d_{H_2O,V}^2}{4}} = \frac{4 \cdot \dot{M}_{H_2O}}{m \cdot n \cdot \pi \cdot d_{H_2O}^2} = \frac{4 \cdot 14,30}{10 \cdot 37 \cdot \pi \cdot 0,013^2} = 291,18$$

$$x_K = (0,92 - 0,035 \cdot p_2) \cdot \sqrt{\frac{1000}{\rho_{H_2O,V} \cdot w_{H_2O,V}}} \cdot \left(\frac{d_2}{0,008}\right)^{0,15} =$$

$$= (0,92 - 0,035 \cdot 15) \cdot \sqrt{\frac{1000}{291,18}} \cdot \left(\frac{0,013}{0,008}\right)^{0,15} = 0,7874$$

8.4.2 TEPLOTA A ENTALPIE PÁRY V MÍSTĚ KRITICKÉ SUCHOSTI

$$t_{H_2O}^K = 315 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$i_{H_2O}^K = 2\,265 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad [16]$$

8.4.3 TEPELNÉ VÝKONY ČÁSTÍ S BUBLINKOVÝM A BLÁNOVÝM VAREM

8.4.4.1 TEPELNÝ VÝKON ČÁSTI S BUBLINKOVÝM VAREM

$$\dot{Q}_{VBu} = \dot{M}_{H_2O} \cdot (i_{H_2O}^K - i_{H_2O}^C) = 14,30 \cdot (2\,265 - 1\,641) = 8\,923 \text{ kW}$$

8.4.4.2 TEPELNÝ VÝKON ČÁSTI S BLÁNOVÝM VAREM

$$\dot{Q}_{VB1} = \dot{M}_{H_2O} \cdot (i_{H_2O}^B - i_{H_2O}^K) = 14,30 \cdot (2\,520 - 2\,265) = 3\,647 \text{ kW}$$

8.4.4 TEPLOTA A ENTALPIE SODÍKU V MÍSTĚ KRITICKÉ SUCHOSTI

$$\frac{\Delta t_{Na}^{AC}}{\dot{Q}_V + \dot{Q}_P} = \frac{\Delta t_{Na}^{AK}}{\dot{Q}_V + \dot{Q}_P} \Rightarrow \Delta t_{Na}^{AK} = \Delta t_{Na}^{AC} \cdot \frac{\dot{Q}_{VB1} + \dot{Q}_{VBu}}{\dot{Q}_V + \dot{Q}_P} = (547 - 325) \cdot \frac{3\,647 + 8\,923}{12\,570 + 12\,801}$$

$$= 144 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{Na}^K = t_{Na}^A - \Delta t_{Na}^{AK} = 547 - 144 = 403 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$i_{Na}^K = c_{Na}^K \cdot t_{Na}^K = 1280 \cdot 403 = 516 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

8.4.5 VÝPOČET DÉLKY ČLÁNKU VÝPARNÍKU S BUBLINOVÝM VAREM

8.4.5.1 VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA STRANĚ VODY A PÁRY VÝPARNÍKU S BUBLINKOVÝM VAREM

$$t_{H_2O,VBu} = 315^\circ\text{C}$$

Výpočet je proveden iteračním způsobem. Uveden je pouze poslední krok.

Je voleno $l_{VBu} = 3,79$

$$q_{H_2O,v} = \frac{\dot{Q}_{VBu}}{m \cdot n \cdot l_{VBu} \cdot \pi \cdot d_{H_2O}} = \frac{8\,923}{10 \cdot 37 \cdot 3,79 \cdot \pi \cdot 0,013} = 155\,801 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\alpha_{H_2O,VBu} = \frac{10,45 \cdot q_{H_2O,v}^{0,7}}{3,3 - 0,0113 \cdot (t_{H_2O,VBu} - 100)} = \frac{10,45 \cdot 155\,801^{0,7}}{3,3 - 0,0113 \cdot (315 - 100)} = 51\,778,20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

8.4.5.2 VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA STRANĚ SODÍKU S BUBLINKOVÝM VAREM

$$\bar{t}_{Na,VBu} = \frac{t_{Na}^C + t_{Na}^K}{2} = \frac{325 + 403}{2} = 364 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{Na,VBu} = 864,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v_{Na,VBu} = 3,31 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\lambda_{Na,VBu} = 71,06 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$Pr_{Na,VBu} = 5,03 \cdot 10^{-3}$$

$$w_{Na,VBu} = \frac{\dot{V}_{Na,VBu}}{S_{Na}} = \frac{\dot{M}_{Na}}{S_{Na} \cdot \rho_{Na,VBu}} = \frac{94,43}{0,2191 \cdot 864,4} = 0,4987 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Re_{Na,VBu} = \frac{w_{Na,VBu} \cdot d_h}{v_{Na,VBu}} = \frac{0,4987 \cdot 0,0308}{3,31 \cdot 10^{-7}} = 46\,377$$

$$Pe_{Na,VBu} = Re_{Na,VBu} \cdot Pr_{Na,VBu} = 46\,377 \cdot 5,03 \cdot 10^{-3} = 233$$

$$Nu_{Na,VBu} = 4,3 + 0,025 \cdot Pe_{Na,VBu}^{0,8} = 4,3 + 0,025 \cdot 233^{0,8} = 6,26$$

$$\alpha_{Na,VBu} = \frac{Nu_{Na,VBu} \cdot \lambda_{Na,VBu}}{d_h} = \frac{6,26 \cdot 71,06}{0,0308} = 14\,450,45 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

8.4.5.3 VÝPOČET SOUČINITELE PROSTUPU TEPLA V ČÁSTI VÝPARNÍKU S BUBLINKOVÝM VAREM

$$\lambda_{t,VBu} = 25,8 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\lambda_u = 0,5 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$u = 5 \cdot 10^{-4} m$$

$$\begin{aligned} K_{VBu} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{H_2O,VBu}} \cdot \frac{D_{H_2O}}{d_{H_2O}} + \frac{D_{H_2O}}{2 \cdot \lambda_{t,VBu}} \cdot \ln \frac{D_{H_2O}}{d_{H_2O}} + \frac{D_{H_2O}}{2 \cdot \lambda_u} \cdot \ln \frac{d_{H_2O}}{D_{H_2O} - 2 \cdot u} + \frac{1}{\alpha_{Na,VBu}} \cdot \frac{D_{H_2O}}{D_{H_2O}}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{51\,778} \cdot \frac{0,019}{0,013} + \frac{0,0199}{2 \cdot 25,8} \cdot \ln \frac{0,019}{0,013} + \frac{0,019}{2 \cdot 0,5} \cdot \ln \frac{0,013}{0,013 - 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{14\,450} \cdot \frac{0,019}{0,019}} \\ &= 2\,604,96 \frac{W}{m^2 \cdot K} \end{aligned}$$

8.4.5.4 LOGARITMICKÝ TEPLTNÍ ROZDÍL V ČÁSTI VÝPARNÍKU S BUBLINKOVÝM VAREM

$$\Delta t_{ln,VBu} = \frac{\Delta t_{Na,H_2O}^K - \Delta t_{Na,H_2O}^C}{\ln \frac{\Delta t_{Na,H_2O}^K}{\Delta t_{Na,H_2O}^C}} = \frac{(t_{Na}^K - t_{H_2O}^K) - (t_{Na}^C - t_{H_2O}^C)}{\ln \left(\frac{t_{Na}^K - t_{H_2O}^K}{t_{Na}^C - t_{H_2O}^C} \right)} = \frac{(403 - 315) - (325 - 315)}{\ln \frac{403 - 315}{325 - 315}}$$

$$\Delta t_{ln,VBu} = 35,89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

8.4.5.5 DÉLKA ČÁSTI VÝPARNÍKU S BLÁNOVÝM VAREM

$$\dot{Q}_{VBu} = K_{VBu} \cdot S_{VBu} \cdot \Delta t_{ln,VBu} = K_{VBu} \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_{H_2O,V} \cdot l_{VBu} \cdot \Delta t_{ln,VBu} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow l_{VBu} = \frac{\dot{Q}_{VBu}}{K_{VBu} \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \Delta t_{ln,VBu}} = \frac{8\,923}{2\,605 \cdot 10 \cdot 37 \cdot 0,019 \cdot 35,89} = 4,32 m$$

8.4.6 VÝPOČET DÉLKY ČLÁNKU VÝPARNÍKU S BUBLINOVÝM VAREM

8.4.5.1 VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA STRANĚ VODY A PÁRY VÝPARNÍKU S BLÁNOVÝM VAREM

$$t_{H_2O,VBu} = 315 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$v'_{H_2O,VBu} = 0,00174 \frac{m^3}{kg}$$

$$v''_{H_2O,VBu} = 0,0088 \frac{m^3}{kg} \quad [16]$$

$$\rho_{H_2O,VBu} = 59,3 \frac{kg}{m^3}$$

$$\eta_{H_2O, VBl} = 2,38 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda_{H_2O, VBl} = 0,136 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$Pr_{H_2O, VBl} = 2,92$$

$$w_{H_2O, VBl} = \frac{\dot{V}_{H_2O, VBl}}{S_{H_2O}} = \frac{\dot{M}_{H_2O}}{S_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O, VBl}} = \frac{14,30}{0,0491 \cdot 113,6} = 4,91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Re_{H_2O, VBl} = \frac{w_{H_2O, VBl} \cdot d_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O, VBl}}{\eta_{H_2O, VBl}} = \frac{4,91 \cdot 0,013 \cdot 59,3}{2,38 \cdot 10^{-5}} = 158\,888$$

$$x = \frac{1 + x_k}{2} = \frac{1 + 0,7874}{2} = 0,8937$$

$$C = \left[x + \frac{v''_{H_2O, VBl}}{v'_{H_2O, VBl}} \cdot (1 - x) \right]^{0,8} \cdot \left\{ 1 - 0,1 \cdot \left[\left(\frac{v''_{H_2O, VBl}}{v'_{H_2O, VBl}} - 1 \right) \cdot (1 - x) \right]^{0,4} \right\} =$$

$$= \left[0,8937 + \frac{0,0088}{0,00174} \cdot (1 - 0,8937) \right]^{0,8} \cdot \left\{ 1 - 0,1 \cdot \left[\left(\frac{0,0088}{0,00174} - 1 \right) \cdot (1 - 0,8937) \right]^{0,4} \right\}$$

$$C = 0,6439$$

$$Nu_{H_2O, VBl} = 0,023 \cdot C \cdot (Re \cdot Pr)^{0,8} = 0,023 \cdot 0,6439 \cdot (158\,888 \cdot 2,92) = 505,54$$

$$\alpha_{H_2O, VBl} = \frac{Nu_{H_2O, VBl} \cdot \lambda_{H_2O, VBl}}{d_{H_2O}} = \frac{505,54 \cdot 0,136}{0,013} = 5\,286,66 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

8.4.5.1 VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA SODÍKU V ČÁSTI VÝPARNÍKU S BLÁNOVÝM VAREM

$$\bar{t}_{Na, VBl} = \frac{t_{Na}^K + t_{Na}^B}{2} = \frac{403 + 435}{2} = 419,03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{Na, VBl} = 843,1 \text{ kg/m}^3$$

$$v_{H_2O, VBl} = 3,08 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\lambda_{Na, VBl} = 68,18 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$Pr_{NaO, VBl} = 4,78 \cdot 10^{-3}$$

$$w_{Na, VBl} = \frac{\dot{V}_{Na, VBl}}{S_{Na}} = \frac{\dot{M}_{Na}}{S_{Na} \cdot \rho_{Na, VBl}} = \frac{94,30}{0,2191 \cdot 843,1} = 0,5113 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Re_{Na,VBl} = \frac{w_{Na,VBl} \cdot d_h}{\nu_{Na,VBl}} = \frac{0,5113 \cdot 0,0308}{3,08 \cdot 10^{-7}} = 51\,100$$

$$Pe_{Na,VBl} = Re_{Na,VBl} \cdot Pr_{NaO,VBl} = 51\,100 \cdot 4,78 \cdot 10^{-3} = 244,3$$

$$Nu_{Na,VBl} = 4,3 + 0,25 \cdot Pe_{Na,VBl}^{0,8} = 4,3 + 0,25 \cdot 244,3^{0,8} = 6,33$$

$$\alpha_{Na,VBl} = \frac{Nu_{Na,VBl} \cdot \lambda_{Na,VBl}}{d_h} = \frac{6,33 \cdot 68,18}{0,0308} = 14\,027,47 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

8.4.5.3 VÝPOČET SOUČINITELE PROSTUPU TEPLA V ČÁSTI VÝPARNÍKU S BUBLINKOVÝM VAREM

$$\lambda_{t,VBl} = 26,01$$

$$\lambda_u = 0,5 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$u = 5 \cdot 10^{-4} m$$

$$K_{VBl}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{H_2O,VBl}} \cdot \frac{D_{H_2O}}{d_{h_2O}} + \frac{D_{H_2O}}{2 \cdot \lambda_{t,VBl}} \cdot \ln \frac{D_{H_2O}}{d_{H_2O}} + \frac{D_{H_2O}}{2 \cdot \lambda_u} \cdot \ln \frac{d_{H_2O}}{d_{H_2O} - 2 \cdot u} + \frac{1}{\alpha_{Na,VBl}} \cdot \frac{D_{H_2O}}{D_{H_2O}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{5\,286,66} \cdot \frac{0,019}{0,013} + \frac{0,0199}{2 \cdot 25,8} \cdot \ln \frac{0,019}{0,013} + \frac{0,019}{2 \cdot 0,5} \cdot \ln \frac{0,013}{0,013 - 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{14\,027} \cdot \frac{0,019}{0,019}}$$

$$=$$

$$= 1\,579,6 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

8.4.5.4 LOGARITMICKÝ TEPLTNÍ ROZDÍL V ČÁSTI VÝPARNÍKU S BUBLINKOVÝM VAREM

$$\Delta t_{ln,VBU} = \frac{\Delta t_{Na,H_2O}^B - \Delta t_{Na,H_2O}^K}{\ln \frac{\Delta t_{Na,H_2O}^B}{\Delta t_{Na,H_2O}^K}} = \frac{(t_{Na}^B - t_{H_2O}^B) - (t_{Na}^K - t_{H_2O}^K)}{\ln \frac{(t_{Na}^B - t_{H_2O}^B)}{(t_{Na}^K - t_{H_2O}^K)}} = \frac{(435 - 315) - (403 - 315)}{\ln \frac{435 - 315}{435 - 315}}$$

$$\Delta t_{ln,VBU} = 103,21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

8.4.5.5 DÉLKA ČÁSTI VÝPARNÍKU S BUBLINKOVÝM VAREM

$$\dot{Q}_{VBl} = K_{VBl} \cdot S_{VBl} \cdot \Delta t_{ln,VBl} = K_{VBl} \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_{H_2O,V} \cdot l_{VBl} \cdot \Delta t_{ln,VBl} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow l_{VBl} = \frac{\dot{Q}_{VBl}}{K_{VBl} \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \Delta t_{ln,VBl}} = \frac{3\,647}{1\,579,6 \cdot 10 \cdot 37 \cdot 0,019 \cdot 103,21} = 1,01 m$$

8.4.7 CELKOVÁ DÉLKA VÝPARNÍKU

$$l_V = l_{VBU} + l_{VBl} = 4,32 + 1,01 = 5,33$$

Skutečná délka výparníku je zvolena $l_V = 5,40 m$

8.5 VÝPOČET DÉLKY PŘEHŘÍVÁKU

8.5.1 VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA STRANĚ VODY V PŘEHŘÍVÁKU

$$\bar{t}_{H_2O,P} = \frac{t_{H_2O}^A + t_{H_2O}^B}{2} = \frac{530 + 315}{2} = 422,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{H_2O,P} = 59,7 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_{H_2O,P} = 2,76 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad [16]$$

$$\lambda_{H_2O,P} = 0,082 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$Pr_{H_2O,P} = 1,13$$

$$w_{H_2O,P} = \frac{\dot{V}_{H_2O}}{S_{H_2O}} = \frac{\dot{M}_{H_2O}}{S_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O,P}} = \frac{14,30}{0,0491 \cdot 59,7} = 4,8767 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Re_{H_2O,P} = \frac{w_{H_2O,P} \cdot \rho_{H_2O,P} \cdot d_{H_2O}}{\eta_{H_2O,P}} = \frac{4,8767 \cdot 59,7 \cdot 0,012}{2,76 \cdot 10^{-5}} = 137 \ 130$$

$$Nu_{H_2O,P} = 0,021 \cdot Re_{H_2O,P}^{0,8} \cdot Pr_{H_2O,P}^{0,43} \cdot C_t = 0,021 \cdot 137 \ 130^{0,8} \cdot 0,43 \cdot 1 = 284,94$$

$$\alpha_{H_2O,P} = \frac{Nu_{H_2O,P} \cdot \lambda_{H_2O,P}}{d_{H_2O}} = \frac{284,94 \cdot 0,082}{0,013} = 1 \ 797,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

8.5.2 VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA STRANĚ SODÍKU V EKONOMIZÉRU

$$\bar{t}_{Na,P} = \frac{t_{Na}^A + t_{Na}^B}{2} = \frac{547 + 435}{2} = 491 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{Na,P} = 825,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v_{Na,P} = 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\lambda_{Na,P} = 64,80 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$Pr_{Na,P} = 4,39 \cdot 10^{-3}$$

$$w_{Na,P} = \frac{\dot{V}_{Na,P}}{S_{Na}} = \frac{\dot{M}_{Na}}{S_{Na,P} \cdot \rho_{Na,P}} = \frac{94,43}{0,2191 \cdot 825,9} = 0,5219 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Re_{Na,P} = \frac{w_{Na,P} \cdot d_h}{v_{Na,P}} = \frac{0,5219 \cdot 0,0308}{2,78 \cdot 10^{-7}} = 57 \ 793$$

$$pe_{Na,P} = Re_{Na,P} \cdot Pr_{Na,P} = 57\,793 \cdot 4,39 \cdot 10^{-3} = 254$$

$$Nu_{Na,P} = 4,36 + 0,025 Pe_{Na,P}^{0,8} = 4,36 + 0,025 \cdot 254^{0,8} = 5,67$$

$$\alpha_{Na,P} = \frac{Nu_{Na,P} \cdot \lambda_{Na,P}}{d_h} = \frac{5,67 \cdot 64,80}{0,0308} = 11\,943,66 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

8.5.3 VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA V PŘEHŘÍVÁKU

$$\lambda_{tP} = 26,18 \frac{W}{m \cdot K}$$

nánosy se neuvažují

$$K_E = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{H_2O,P}} \cdot \frac{D_{H_2O}}{d_{h_2O}} + \frac{D_{H_2O}}{2 \cdot \lambda_{tP}} \cdot \ln \frac{D_{H_2O}}{d_{H_2O}} + \frac{1}{\alpha_{Na,P}} \cdot \frac{D_{H_2O}}{D_{H_2O}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{1\,797,29} \cdot \frac{0,019}{0,013} + \frac{0,019}{2 \cdot 26,18} \cdot \ln \frac{0,019}{0,013} + \frac{1}{11\,943,66} \cdot \frac{0,019}{0,019}} = 966,59 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

8.5.4 LOGARITMICKÝ TEPLTNÍ ROZDÍL PŘEHŘÍVÁKU

$$\Delta t_{ln,P} = \frac{\Delta t_{Na,H_2O}^A - \Delta t_{Na,H_2O}^B}{\ln \frac{\Delta t_{Na,H_2O}^A}{\Delta t_{Na,H_2O}^B}} = \frac{(547 - 530) - (435 - 315)}{\ln \frac{547 - 530}{35 - 315}} = 52,70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

8.5.5 DÉLKA PŘEHŘÍVÁKU

$$\dot{Q}_P = K_P \cdot S_P \cdot \Delta t_{ln,P} = K_P \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_{H_2O} \cdot l_P \cdot \Delta t_{ln,P} \Rightarrow$$

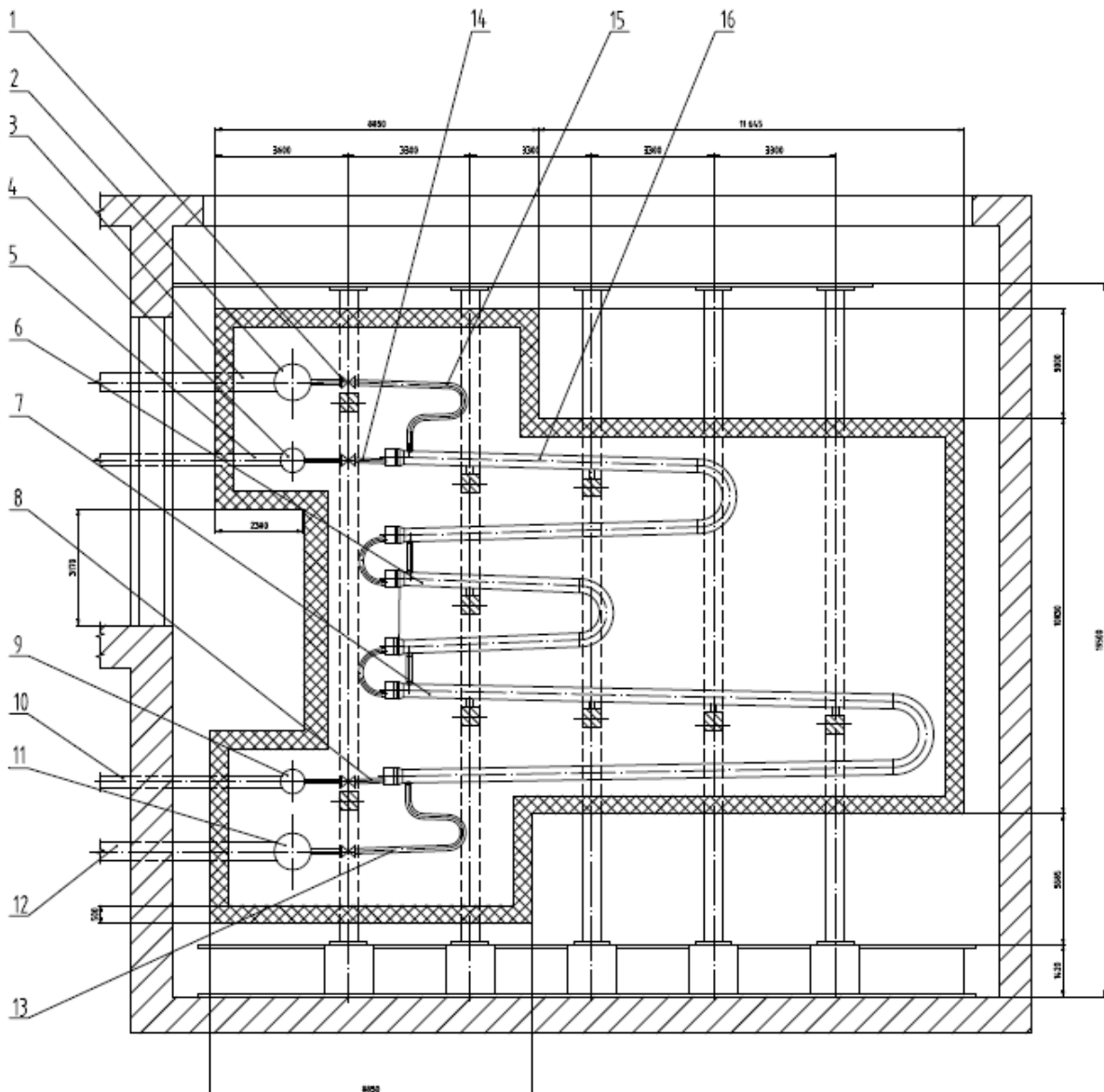
$$\Rightarrow l_P = \frac{\dot{Q}_P}{K_P \cdot m \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \Delta t_{ln,P}} = \frac{12\,801}{966,5 \cdot 10 \cdot 37 \cdot \pi \cdot 52,70} = 11,38 \text{ m}$$

Celková délka přehříváku je zvolena $l_P = 11,4 \text{ m}$.

8.6 SOUHRN VÝSLEDKŮ TEPELNÉHO VÝPOČTU

	Tepelný výkon [MW]		Součinitel přestupu tepla [W/m ² ·K]		součinitel prostupu tepla [W/m ² ·K]	logaritmický teplotní rozdíl [°C]	délka teplosměnné plochy [m]	
			sodík	voda				
ekonomizér	12 630		15 399	3883	1370	29,23	14,3	
výparník	bublínkový var	8 923	12 570	14 450	51 778	2 605	35,89	4,4
	blánový var	3 647		14 027	5 287	1 580	103,21	1
přehřívák	12 807		11 944	1 797	966,59	52,70	11,4	
							31,1	

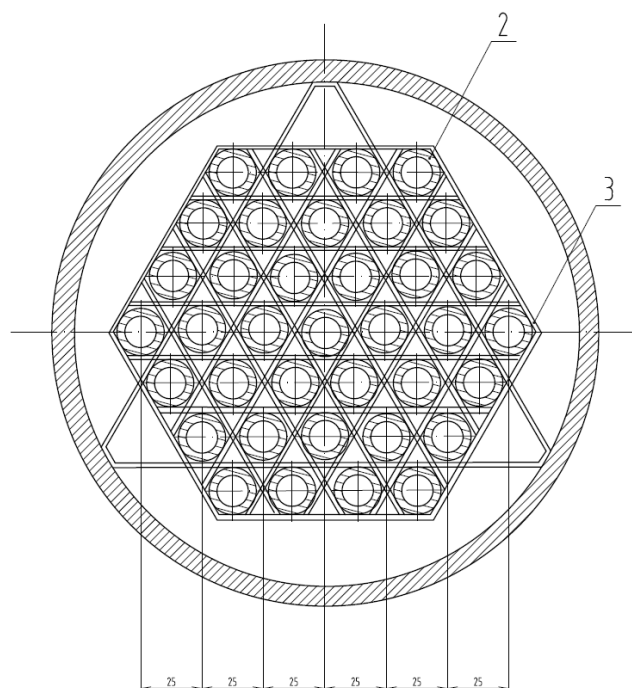
PARNÍ GENERÁTOR



Obrázek 11: Parní generátor

1. Uzavírací armatura; 2. Vstupní komora sodíku; 3. Vstupní potrubí sodíku od PG; 4. Výstupní komora páry; 5. Výstupní potrubí páry z PG; 6. Článek Výparníku; 7. Článek ekonomizéru; 8. Přiváděcí potrubí vody do větve; 9. Výstupní komora vody; 10. Vstupní potrubí vody do PG; 11. Výstupní komora sodíku; 12. Výstupní potrubí sodíku z PG; 13. Odváděcí potrubí sodíku z větve; 14. Odváděcí potrubí páry z větve; 15. Přiváděcí potrubí sodíku do větve; 16. Článek přehříváku

Celkový návrh parního generátoru o výkonu 38 MW je schematicky uveden na obr. 12, kde je rozdělen do 3 sekcí. Ekonomizér, přehřívák i výparník mají průměr trubek 190 mm a jejich celková délka teplosměnné plochy je 31,1 m.



Obrázek 14: Detail přehříváku

1. Obalová trubka; 2. Teplosměnná plocha; 3. Distanční mřížka; 4. Výstupní komora páry; 5. Komora páry; 6. Trubkovnice; 7. Přívádčí potrubí sodíku

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala jadernými reaktory, které využívají tekuté kovy jako teplotnosné medium, zejména sodík, který má výhodné termofyzikální vlastnosti a je poměrně levný. Dále byla provedena rešerše výměníků tepla, které se používají v jaderných elektrárnách.

Pro tepelný výpočet byl zvolen inverzní parní generátor, kde voda a vodní pára proudí trubkami a sodík v plášti. Toto řešení je ekonomicky výhodné vzhledem k menší spotřebě materiálu, protože sodík má podstatně nižší tlak než voda, takže pláště parních generátorů mohou mít slabší stěny. Jako materiál parního generátoru byl zvolen 2,25Cr1MoNb. Je to feriticko-perlitická ocel stabilizovaná Niobem. Je to ocel s dlouhodobou odolností proti tekutému sodíku do 540 °C. Všechny trubky jsou válcované bez podélných svarů. Celková délka článků je podle tepelného výpočtu 31,1 m. Kde bylo navrženo 10 paralelních větví a 37 trubek v každé větvi. Na základě výpočtů byly stanoveny délky jednotlivých částí a proveden návrhový výkres výměníku.

9 CITOVANÁ LITERATURA

- [1] Základní typy jaderných reaktorů: Vývojové generace technologie jaderných reaktorů. ČEZ [online]. Praha 4: ČEZ, a. s, 2021 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>
- [2] MATAL, Oldřich a Hugo ŠEN. *Jaderná zařízení a jejich bezpečnost*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4349-5.
- [3] Fast Reactors and Related Fuel Cycles. IAEA [online]. Austria: IAEA, 2015 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1665Vol1Web-68441300.pdf>
- [4] DUBŠEK, František. *Jaderná energetika*. Vyd. 2. dopl. Brno: PC-DIR, 1997. ISBN 80-214-0833-2.
- [5] WAGNER, Vladimír. Reaktor BN-800. *IDnes.cz* [online]. Praha 5: MAFRA, a. s., © 1999–2021 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/veda/mnozivy-rychly-reaktor-bn-800.A140708_132545_veda_mla
- [6] Schéma tepelných toků reaktoru BN-800. In: *IDnes.cz* [online]. Praha 5: MAFRA, a. s., © 1999–2021 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/veda/mnozivy-rychly-reaktor-bn-800.A140708_132545_veda_mla/foto/MLA5468cd_BN800heatflowchart.png
- [7] Řez reaktorem BN-800. In: *IDnes.cz* [online]. Praha 5: MAFRA, a. s., © 1999–2021 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/veda/mnozivy-rychly-reaktor-bn-800.A140708_132545_veda_mla/foto/MLA546896_BN800.png
- [8] BEČVÁŘ, Josef. *Jaderné elektrárny: celostátní vysokošk. učebnice*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978. Řada strojírenské literatury.
- [9] BORISANSKIJ, B.V. *Zidkometaliceskije teplonositeli*. Moskva: Atomizdat, 1967. ISBN 9780081028650.
- [10] [online]. , 2 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/veda/mnozivy-rychly-reaktor-bn-800.A140708_132545_veda_mla/foto/MLA5468cd_BN800heatflowchart.png
- [11] RAČEK, Jiří. Energetická zařízení. *Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně* [online]. Brno: docplayer.cz, 2013 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/173178043-Energeticka-zarizeni.html>



- [12] Fast reactor steam generators with sodium on the tube side. *IAEA* [online]. A-1400 Vienna, Austria, 1994, , 109 [cit. 2021-03-06]. ISSN 1011-4289. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/25/028/25028986.pdf?r=1&r=1
- [13] SONDEL, Martin, Drahomír SCHWARZ a Jaroslav KOUKAL. *Ověření vlastností svarového spoje ocelí P91 a 15128 pro dlouhodobé teplotní expozici: Nové materiály, technologie zařízení pro svařování*. 13. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., 2010. ISBN 978-80-248-2304-1.
- [14] MICHEJEV, Michail Aleksandrovič. *Osnovy teploperedači*. 3. Moskva: Gosenergoizdat, 1956.
- [15] WHALLEY, P.B. *Two-Phase Flow and Heat Transfer*. 3rd ed. 42Oxford Univ Press, New York: Oxford Chemistry Primers, 1996.
- [16] *Software SteamTab* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <http://www.chemicalogic.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

p	[MPa]	Tlak
m	[-]	Počet větví parního generátoru
n	[-]	Počet teplosměnných trubek větve parního generátoru
D	[m]	Vnější průměr potrubí
d	[m]	Vnitřní průměr potrubí
d_h	[m]	Hydraulický průměr
s	[m]	Tloušťka potrubí
S	[m]	Průtočný průřez
t	[°C]	Teplota
i	[kJ·kg]	Entalpie
\dot{Q}	[W]	Výkony
\dot{M}	[kg÷s]	Hmotnostní průtok
c	[kg÷kgs]	Měrná tepelná kapacita
ρ	[kg÷m ³]	Hustota
η	[Pas]	Dynamická viskozita
ν	[m ² ÷s]	Kinematická viskozita
λ	[W÷mK]	Tepelná vodivost
w	[m÷s]	Rychlost proudění
\dot{V}	[m ³ ÷s]	Objemový průtok
Pr	[-]	Prandtlovo číslo
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
Pe	[-]	Peckletovo číslo
Nu	[-]	Nusseltovo číslo
α	[W÷m ² K]	Součinitel přestupu tepla
u	[m]	Tloušťka nánosů
K	[W÷m ² K]	Součinitel prostupu tepla
Δt_{ln}	[°C]	Logaritmický teplotní rozdíl
l	[m]	Délka článku
x	[-]	Suchost páry
q	[W÷m ²]	Měrný tepelný tok
v	[m ³ ÷kg]	Měrný objem

SEZNAM PŘÍLOH

Dne 1. 5. 2021 zpracoval Jiří Kmoníček.

1. Výkresová dokumentace vybraných částí