



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

NÁVRH KONDENZÁTORU JADERNÉ ELEKTRÁRNY

NUCLEAR POWER PLANT CONDENSER DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jaroslav Havel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel

Milčák

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jaroslav Havel**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Milčák**
Akademický rok: 2022/23

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:

Návrh kondenzátoru jaderné elektrárny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jaderná energetika má v rámci trvalé udržitelnosti nezpochybnitelné místo. V současnosti je ve světě ve fázi výstavby přibližně padesát reaktorů. Kondenzátory u energetických zařízení slouží k odvodu skupenského tepla páry a jejich návrh má vliv na účinnost a provozní spolehlivost.

Cíle bakalářské práce:

- stručný úvod do jaderné energetiky,
- popis účelu kondenzátoru v jaderných elektrárnách, konstrukční možnosti,
- tepelný výpočet kondenzátoru a předběžný návrh hlavních rozměrů,
- základní rozměrový výkres kondenzátoru.

Seznam doporučené literatury:

BEČVÁŘ, Josef. Jaderné elektrárny. 2. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1981, 634 s.

KLIK, František a Jaroslav DALIBA. Jaderná energetika. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 189 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-01-02550-0.

DUBŠEK, František. Jaderná energetika. Brno: PC DIR, 1994, 209 s. ISBN 80-214-0538-4.

MURRAY, Raymond LeRoy a Keith E HOLBERT. Nuclear energy: an introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes. 7th ed. Amsterdam: Elsevier, 2015, xvii, 550 s. : il. ISBN 978-0-12-416654-7.

STEHLÍK, Petr, Josef KOHOUTEK a Jan NĚMČANSKÝ. Tepelné pochody: výpočet výměníku tepla. Brno: VUT Brno, 1991, 129 s. : obr., tabulky, grafy. ISBN 80-214-0363-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce se zabývá návrhem kondenzátoru jaderné elektrárny pro nový jaderný zdroj Dukovany II s elektrickým výkonem 1 200 MW. Zadané parametry kondenzace reflektují typické parametry koncepcí tlakovodních reaktorů chlazených a moderovaných lehkou vodou o stejném výkonu a klimatické podmínky v dané lokalitě. Ze zadání práce a provedené rešerše vyvstaly na navrhované zařízení tyto požadavky: zajištění kondenzace páry v sekundárním okruhu v režimu filmové kondenzace, dodržení maximálního ohřátí chladicí vody o 10 K, optimální natočení svazku trubek a zajištění konkurenceschopnosti produktu. Pro zvolené koncepční řešení se čtyřtělesovým kondenzátorem byl sestaven tepelný výpočet, který byl řešen numericky metodou prosté iterace. Výpočet se prováděl s využitím softwaru EES. Z výsledků vyplynulo, že pro zajištění bezporuchovosti kondenzátoru je vyžadována teplosměnná plocha 121 263,96 m². Každé těleso kondenzátoru se sestává z 31 400 titanových trubek s průřezem ($\emptyset 22 \times 0,5$) mm a délkou 14 554 mm. Součástí práce je také rozměrový výkres.

KLÍČOVÁ SLOVA

kondenzátor, jaderná elektrárna, Dukovany II, tepelný výpočet, teplosměnná plocha

ABSTRACT

The submitted bachelor's thesis deals with the design of a condenser for the new Dukovany II nuclear power plant with an electrical output of 1,200 MW. The specified condensation parameters reflect typical parameters of pressurized light-water moderated and cooled reactors of the same power and climatic conditions in the given location. From the assignment of the thesis and the research carried out, the following requirements for the designed device emerged: to ensure the condensation of steam in the secondary circuit in filmwise condensation mode, to comply with the maximum cooling water heating of 10 K, to install the tube bundle at optimum angle and to ensure the competitiveness of the product. For the selected concept with a four-body condenser, a thermal analysis was made and solved numerically by a fixed-point iteration method. The calculation was performed using the EES software. The results showed that a heat transfer surface area of 121,263.96 m² is required to ensure failure-free operation of the condenser. Each condenser body consists of 31,400 titanium tubes with a cross-section of ($\emptyset 22 \times 0,5$) mm and a length of 14,554 mm. A dimensional drawing is also attached.

KEYWORDS

condenser, nuclear power plant, Dukovany II, thermal analysis, heat transfer surface area

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HAVEL, Jaroslav. *Návrh kondenzátoru jaderné elektrárny*. Brno, 2023, 57 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/148589>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Milčák.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Návrh kondenzátoru jaderné elektrárny* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Milčáka, s použitím znalostí nabytých při studiu a podkladů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

Jaroslav Havel

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Milčákovi za jeho odborné vedení, ochotu a velmi vstřícný přístup. Dále bych chtěl také poděkovat své rodině za podporu v celém průběhu studia.

Jaroslav Havel

OBSAH

Úvod	11
1 Úvod do jaderné energetiky	12
1.1 Podstata přeměny energie v jaderné elektrárně	12
1.2 Vývoj jaderné energetiky	13
1.3 Výhody a nevýhody jaderné energetiky	17
1.4 Současné využití jádra	18
2 Rešerše kondenzátoru	21
2.1 Princip činnosti a provedení kondenzátoru	21
2.2 Režimy kondenzace	24
2.3 Konstrukční možnosti	26
2.3.1 Hlavní části kondenzátoru	26
2.3.2 Konfigurace uspořádání trubek	28
2.3.3 Konfigurace vodní strany	30
3 Rozměrový, bilanční a tepelný výpočet	32
3.1 Formulace problému	32
3.2 Návrh koncepčního řešení	33
3.3 Metoda výpočtu	34
3.4 První iterace výpočtu	36
3.4.1 Analýza tepelného děje v sekundárního okruhu	36
3.4.2 Analýza tepelného děje v terciárním okruhu.....	37
3.4.3 Termofyzikální vlastnosti médií.....	37
3.4.4 Návrh potřebných rozměrů, počtu a materiálu komponent.....	38
3.4.5 Stanovení tepelného odporu kondenzátoru	40
3.4.6 Stanovení délky trubek a teplosměnné plochy kondenzátoru	41
3.4.7 Srovnání dopočítané a odhadované teploty vnější stěny trubky	42
3.5 Výsledky v jednotlivých iteracích výpočtu.....	43
3.6 Zavedení bezpečnosti vůči MS ztráty funkce	43
4 Diskuze návrhu	45
Závěr	46
Seznam použitých zdrojů	47

Seznam použitých zkratk a symbolů	53
Seznam příloh.....	56
Příloha A: 3D model kondenzátoru.....	57

ÚVOD

Současná lidská civilizace je silně závislá na elektrické energii. Do budoucna se navíc očekává další růst poptávky vlivem rozvoje elektromobility, digitalizace, zvyšování životní úrovně v rozvojových zemích apod., což ještě více umocní potřebu správně nastaveného energetického sektoru. Už dnes se ale bohužel velký podíl elektrické energie získává metodami, které zatěžují naši planetu nadměrnou produkcí CO₂ a dalších nežádoucích látek. Z tohoto důvodu je nutné stávající metody nahradit ekologicky šetrnějšími. Řešením z dlouhodobého horizontu se zdají být obnovitelné zdroje doplněné o systémy akumulace energie a zvyšování využití paliv prostřednictvím vyšší účinnosti. Ty však zatím nejsou připravené k masivnímu komerčnímu nasazení.

Jaderná energetika představuje dostupnou a ověřenou možnost získávání elektrické energie. Navzdory několika nevýhodám je energie přeměněná v jaderné elektrárně čistá, bezpečná a oproti obnovitelným zdrojům minimálně citlivá na meteorologické podmínky. Jádro navíc umožňuje energetickou nezávislost států, což ho činí i vzhledem k aktuální ruské invazi velmi atraktivním. Dá se proto konstatovat, že jádro má, minimálně pro blízkou budoucnost, velký potenciál a lze očekávat, že sehraje klíčovou roli v energetické infrastruktuře mnohých států. Problematika jaderné energie je blíže nastíněna v první kapitole.

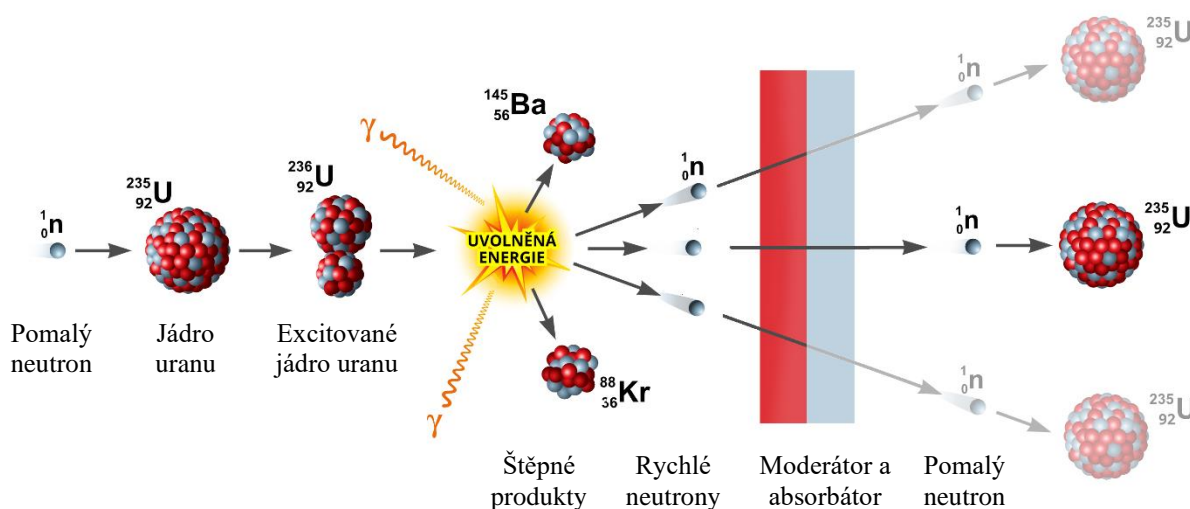
Česká republika je k jaderné energetice kladně nakloněna. Aktuálně se připravuje rozšíření dvou provozovaných jaderných elektráren o nový jaderný blok. Projekt se označuje jako Dukovany II. Do 30. listopadu 2022 museli jednotliví uchazeči předložit své první nabídky [1], díky čemuž je už v tuto chvíli složení kandidátů jasné. Mezi třemi řešeními, ze kterých se bude vybírat, jsou: (1) EPR1200 od francouzských firem EDF Group, Framatome a německé Siemens; (2) AP1000 od americké Westinghouse Electric Company LLC a (3) APR1000 od jihokorejské Korea Hydro&Nuclear Power [2]. Tato práce předkládá návrh kondenzátoru pro první řešení s elektrickým výkonem 1 200 MW.

Návrh vychází ze standardního postupu. Nejprve je v rešeršních kapitolách studován princip funkce, interakce s okolím a konstrukční možnosti zařízení. Také jsou zde identifikovány klíčové požadavky kladené na výsledný produkt. Následně je na základě rešerše (kap. 2) a tepelného výpočtu pro navržené koncepční řešení (kap. 3) připraven návrh, který je prezentován v příložené výkresové dokumentaci a diskutován ve čtvrté kapitole.

1 ÚVOD DO JADERNÉ ENERGETIKY

Jaderná energetika je odvětví energetického inženýrství, které se zabývá přeměnou energie v JE (jaderných elektrárnách). V nich dochází k získávání jaderné energie obsažené v jaderném palivu a její následné konverzi na poptávané koncové formy energie. Typicky se jedná o elektrickou energii. Kromě ní dokáže JE souběžně dodávat i užitečné teplo. Toto teplo pak elektrárna využívá pro vlastní spotřebu či pro potřeby měst ležících v okolí. V České republice je tímto způsobem od konce 90. let vytápěn Týn nad Vltavou a na podzim roku 2023 se očekává první použití horkovodu vedoucího do Českých Budějovic [3].

1.1 PODSTATA PŘEMĚNY ENERGIE V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ



Obr. 1.1: Řízená štěpná reakce [4] (upraveno)

Energie se v JE získává řízenou štěpnou reakcí probíhající v aktivní zóně reaktoru. Proces zachycuje obr. 1.1. Zpomalený volný neutron narazí do jádra uranu ^{235}U . Jádro ho zachytí, čímž se dostane do excitovaného stavu ^{236}U . Takové jádro je nestabilní a rozpadá se. Produktem jsou pohybující se štěpné produkty¹, průměrně 3 rychlé neutrony a elektromagnetické záření. Aby mohla reakce správným způsobem pokračovat, musí být neutrony (1) zpomaleny moderátorem, protože rychlé neutrony mají menší účinný srážkový průřez² a (2) průměrně 2 z nich musí být absorbovány absorbatorem (regulační a havarijní tyče; kyselina boritá v chladivu), jinak by došlo k neřízené řetězové reakci a exponenciálnímu (geometrická řada) růstu výkonu, či naopak k utlumení reakce. Celý proces se neustále opakuje [4], [5]. Dalšími faktory, které mají vliv na tepelný výkon reaktoru, jsou dutinový koeficient³, teplotní koeficient reaktivity chladiva⁴ a výkonový koeficient reaktivity paliva⁵ [6]. Při rozštěpení jednoho jádra uranu se

¹ Pohyb je způsoben elektrostatickou odpuzivou silou, která v takovýchto vzdálenostech protonů dominuje.

² Termínem účinný srážkový průřez je označována míra pravděpodobnosti interakce jádra a neutronu.

³ Kladný dutinový koeficient (např. reaktor RBMK) znamená, že v případě varu chladicí vody (vznik bublin) reaktivita stoupá, kdežto u záporného dutinového koeficientu (např. nejrozšířenější [7] reaktory PWR) klesá vlivem snížené moderační schopnosti [6].

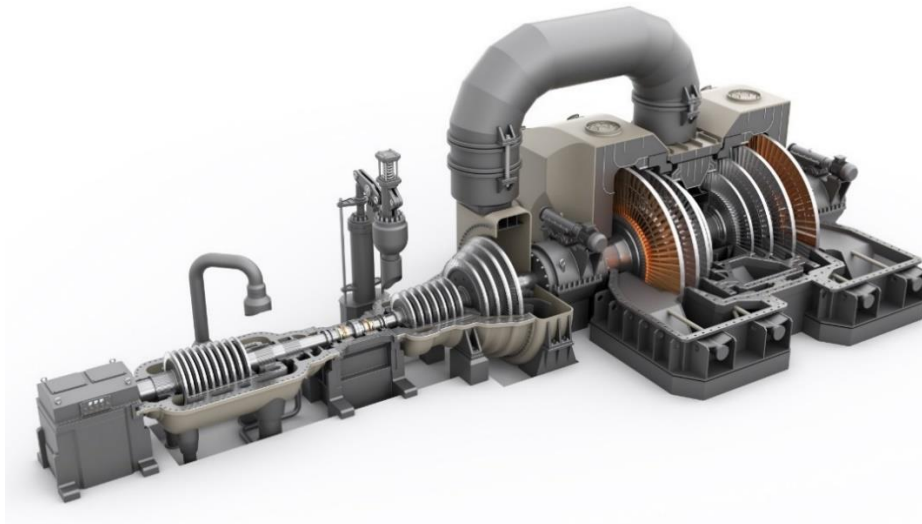
⁴ S rostoucí teplotou chladiva klesá reaktivita vlivem poklesu hustoty chladiva, a tím snížení moderační schopnosti [6].

⁵ S rostoucí teplotou paliva může dojít ke zvýšení reaktivity vlivem rozšíření rezonančního pásma ^{238}U [6].

uvolní $3,2 \cdot 10^{-11}$ J energie [8]. Většina energie se získává ze štěpných produktů, které jsou vnitřní strukturou paliva zpomalovány a tento pokles kinetické energie se projeví nárůstem teploty. Teplo se z reaktoru odvádí chladivem [4], [5]. Energie je následně v JE rozváděna teplosnosným médiem – nejčastěji pomocí vody, která průchodem JE postupně mění své skupenství.

Takto získaná energie se v JE přeměňuje až na čtyři složky. Účinnost JE se pohybuje v intervalu 34–40 % [9].

Klíčovou částí pro koncové formy energie je turbogenerátor (obr. 1.2). Jedná se o soustrojí parní turbíny spojené pevnou kotoučovou spojkou s elektrickým generátorem. Do parní turbíny vstupuje vodní pára (dále jen pára) s vysokou entalpií. Prochází mezilopatkovými kanály a současně předává část své energie turbogenerátoru. Kinetická energie rotačního pohybu soustrojí se v elektrickém generátoru dle Faradayova zákona přeměňuje na energii elektrickou. V případě, že elektrárna dodává i užitečné teplo, se částečně vyexpandovaná pára získává odběrem na turbíně.



Obr. 1.2: Parní turbína [10]

Zbývající dvě složky zahrnují nutné odpadní teplo (vychází z 2. termodynamického zákona) odevzdané v kondenzátoru do chladicího okruhu a energetické ztráty (v důsledku tření tekutin, ztrát do okolí, adiabatických dějů se změnou entropie, tření ploch s relativním pohybem apod.).

1.2 VÝVOJ JADERNÉ ENERGETIKY

Kořeny jaderné energetiky sahají až do období mezi roky 1895–1945. V této době vědci prováděli velké množství experimentů, skrz které se snažili blíže pochopit chování jádra atomu. Wilhelmu Conradu Röntgenovi (1895), Henrimu Becquerelovi (1896) a Paulu Ulrichu Villardovi (1896) se podařilo objevit záření alfa, beta a gama. Dalším, kdo přispěl k chápání radioaktivity, byl Ernest Rutherford, který v roce 1919 pomocí jaderné reakce iniciované alfa částicemi přeměnil dusík na kyslík. Intenzivní zkoumání radioaktivity dále pokračovalo. Prokázalo se, že izotopy podléhající radioaktivním přeměnám mají stejnou chemii, čímž se otevřely dveře i pro uměle připravené radioizotopy. Vědci dále zjistili, že rozštěpením jednoho jádra uranu se

uvolní přibližně $200 \cdot 10^6$ eV energie a že s pomocí ^{235}U jako jaderného paliva, použití moderátoru a absorbátoru a stanovení kritického množství uranu jsou schopni trvale udržet a řídit řetězovou štěpnou reakci [11]. Štěpná reakce tak získala kompletní podobu, v jaké je známá dnes (oddíl 1.1). Na těchto poznátcích byla později vybudována jaderná energetika (řízená řetězová štěpná reakce), kompaktní jaderné pohony (řízená řetězová štěpná reakce), ale také jaderné zbraně (neřízená řetězová štěpná reakce).

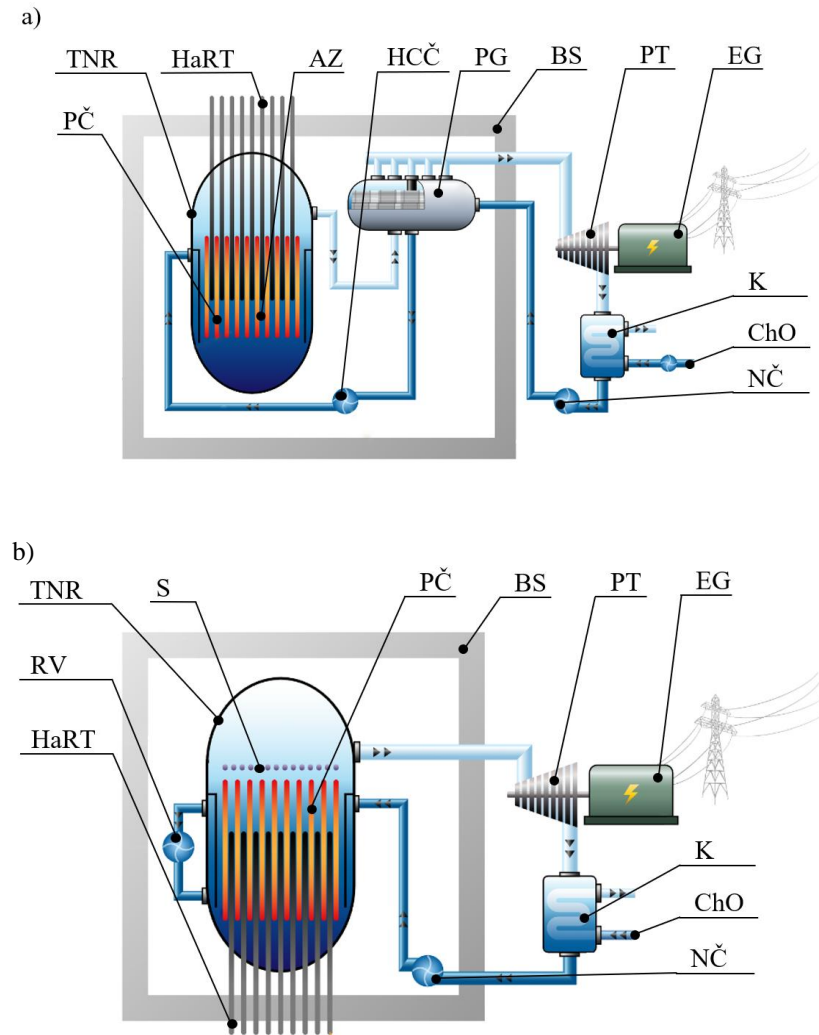
Následovalo období druhé světové války. Pozornost byla v této době z logických důvodů nasměrována k vývoji jaderných zbraní. Vědecké týmy se snažily zodpovědět zbylé otázky pro přenesení štěpné reakce do reálného světa. Jednou z nich bylo, kde vzít jaderné palivo, když v přírodě se vyskytuje 99,3 % uranu ve formě izotopu ^{238}U , který není pro proces štěpení vhodný, a pouhých 0,7 % ve formě izotopu ^{235}U . Přírodní uranové jaderné palivo vyžadovalo vysoký stupeň obohacení ^{235}U , proto byly v zemích jako USA, Velká Británie či Sovětský svaz studovány možné postupy jako tepelná difúze, plynná difúze, centrifugace a elektromagnetická separace. Výsledek jejich snažení je patrný z prosince 1942, kdy došlo na Chicagské univerzitě zásluhou Enrica Fermiho ke spuštění prvního jaderného reaktoru a z roku 1945, kdy byla svržena atomová bomba na japonská města Hirošima (6. 8. 1945) a Nagasaki (9. 8. 1945) [11], [12]. Přestože by se mohlo zdát, že vývoj jaderné energetiky v tomto období strádal, zjištěné poznatky z vývoje atomových bomb byly následně přeneseny i do mírové oblasti.

Po válce se pozornost přesunula na jadernou energetiku. Jaderný reaktor poprvé generoval elektrickou energii v roce 1951 (USA, reaktor EBR-1) [11]. Do sítě se elektrická energie z jádra dostala o 2 roky později v první JE na světě v Obninsku (Rusko, reaktor RBMK) [12], [13]. Až do šedesátých let vznikaly spíše prototypy jaderných reaktorů (generace I) s minimálním množstvím bezpečnostních prvků [14]. K této generaci patří například lehkovodní tlakový množivý reaktor PLWBR [14], plynem chlazený reaktor Magnox GCR [14] či reaktor první československé JE v Jaslovských Bohunicích KS-150 [15]. Reaktory postupně zlepšovaly své vlastnosti, což umožnilo jejich následné rozsáhlé nasazení.

Na předchozí prototypy navázala generace II. Tyto reaktory byly stavěny v sedmdesátých a osmdesátých letech. V současnosti tvoří páteř jaderné energetiky [16]. Nejpreferovanějším typem se staly reaktory chlazené a moderované lehkou vodou. Důvodem byla kompaktnost reaktoru, nízká cena a snadná dostupnost vody. Tyto reaktory se vyskytují ve dvou variantách. První variantou je tlakovodní reaktor, který bývá na západní straně zeměkoule označován pod zkratkou PWR (pressurised water reactor, tlakovodní reaktor) a v Rusku pod zkratkou VVER (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor, vodo-vodní energetický reaktor). Technologie vznikla zásluhou amerického admirála Hymana G. Rickovera a byla původně určena pro námořní účely [11]. Tento typ dle statistik (graf 1.1) v dnešním světě naprosto dominuje. Druhou variantou jsou reaktory BWR (boiling water reactor, varný vodní reaktor). Hlavní rozdíl mezi těmito variantami spočívá v přítomnosti (obr. 1.3a) či absenci (obr. 1.3b) parogenerátoru. V JE bez parogenerátoru se radioaktivní pára vytváří v samotném reaktoru a následně se dodává na turbínu. Zatímco ve variantě JE s parogenerátorem je přidán další okruh, pára se vytváří v parogenerátoru z demineralizované vody. V druhém případě tak proudí sekundárním okruhem médium bez známky aktivity. Třetí výrazněji zastoupený typ PHWR (pressurised heavy water reactor, těžkovodní reaktor) má své počátky v Kanadě [11]. Přehled všech současně provozovaných reaktorů včetně jejich základních charakteristik je uveden v tab. 1.1.



Graf 1.1: Zastoupení jednotlivých typů reaktorů k 24. 1. 2023, zdroj dat: [7]



Obr. 1.3:

a) JE s parogenerátorem⁶,
 b) JE bez parogenerátoru
 Zdroj: [13] (upraveno)

Legenda:

- AZ = aktivní zóna
- BS = betonové stínění
- EG = elektrický generátor
- HaRT = havarijní a regulační tyče
- HCC = hlavní cirkulační čerpadlo
- ChO = chladicí okruh
- K = kondenzátor
- NČ = napájecí čerpadlo
- PČ = palivové články
- PG = parogenerátor
- PT = parní turbína
- RV = recirkulace vody
- S = separátor (sušič páry)
- TNR = tlaková nádoba reaktoru

Poznámka:

Obr. 1.3a – Tlakovodní reaktor PWR
 Obr. 1.3b – Varný reaktor BWR

⁶ Pro určité typy reaktorů může být přidán vedle parogenerátoru ještě další tepelný výměník, a tím i další okruh JE, tzv. vložený okruh. V tomto uspořádání energie z 1. okruhu s reaktorem prostupuje tepelným výměníkem do 2. okruhu a následně parogenerátorem do 3. okruhu s turbogenerátorem [16].

Tab. 1.1: Přehled současně provozovaných reaktorů, data k 24. 1. 2023, zdroj dat: [7], [13], [17]

Typ re- aktoru	Počet reaktorů		Palivo	Chladivo	Moderátor	Parogene- rátor
	v provozu	ve výstavbě				
PWR	303	49	obohacený UO ₂	H ₂ O	H ₂ O	ano
BWR	49	2	obohacený UO ₂	H ₂ O	H ₂ O	ne
PHWR	47	3	přírodní UO ₂	D ₂ O	D ₂ O	ano
LWGR	11	3	obohacený UO ₂	H ₂ O	grafit	ne
GCR	8	0	přírodní uran pokrytý oxidem magnesia; obohacený UO ₂	CO ₂	grafit	ano
FBR	3	0	směs PuO ₂ a UO ₂	tekutý sodík	- ⁷	ano
HTGCR	1	0	obohacený UO ₂	helium	grafit	ano

II. generace je zatížena několika jadernými haváriemi. Mezi tři nejznámější se řadí havárie JE Three Mile Island (1979, INES stupeň 5) způsobená kombinací selhání techniky a lidského faktoru; černobylská havárie (1986, INES stupeň 7) způsobená kombinací nedostatečně proškolené obsluhy a špatné konstrukce reaktoru a havárie JE Fukušima (2011, INES stupeň 7) způsobená následky tsunami. Každá nehoda byla pečlivě přezkoumána a byla provedena taková opatření, aby se tragédie v budoucnu neopakovaly. Nehody ale probudily i přes zpřísnění bezpečnostních předpisů v části společnosti obavy z jaderné energetiky.

Od devadesátých let až po dnešní dobu jsou uváděny do provozu reaktory III. a III+. generace (neexistuje pevná hranice). Tyto reaktory tvoří aktuální nabídku pro nové jaderné zdroje včetně uvažovaných reaktorů pro Dukovany II. Došlo u nich k posílení bezpečnosti, provozních parametrů, ekonomičnosti provozu, zkrácení schvalovacího procesu a prodloužení palivových kampaní. Díky technickému pokroku je možné reaktory dimenzovat na zaručenou 60letou životnost, přičemž není vyloučeno i její pozdější prodloužení. Generace III+ se ještě mnohem více zaměřila na využití fyzikálních zákonitostí pro prvky pasivní bezpečnosti jako je například gravitace či přirozený směr proudění. Díky nim je minimalizována možnost, aby se reaktor dostal do havarijního stavu [14], [16].

Aktuální vývoj jaderné energetiky se zaměřil na reaktory IV. generace, malé modulární reaktory či využití termonukleární fúze [18]. Generace IV by měla přinést uzavření palivového cyklu, vyšší účinnost vlivem nahrazení vody jako chladiva jinou látkou, např. sodíkem, možnost využití pro výrobu vodíku, vysokou inherentní bezpečnost a odstranění potřeby vnějšího havarijního plánu [16]. Malé modulární reaktory by měly přinést možnost decentralizované výroby energie z jádra, větší variabilitu na požadovaný výkon a sériovou výrobu. Poslední bod by vedl na snížení časové a finanční náročnosti výstavby JE a zjednodušení schvalovacího procesu [18]. Termonukleární fúze využívá zcela odlišný fyzikální mechanismus činnosti. Namísto jaderného štěpení dochází k jaderné fúzi. To je proces, při kterém se atomová jádra slučují v jádra těžších prvků a uvolňuje se energie. Pokud inženýři dokáží překonat technické obtíže návrhu fúzního reaktoru, získá lidstvo téměř nevyčerpatelný zdroj energie [18].

⁷ FBR je experimentální reaktor IV. generace, který pracuje s rychlými neutrony. Vyšší pravděpodobnost srážky neutronu s jádrem uranu se nedosahuje předáním kinetické energie neutronu moderátoru, ale vysokou koncentrací jader štěpitelného nuklidu. Reaktor tedy vyžaduje vyšší stupeň obohacení paliva.

1.3 VÝHODY A NEVÝHODY JADERNÉ ENERGETIKY

Jaderná energetika v současné podobě disponuje několika technicko-ekonomickými vlastnostmi. Mezi její výhody patří:

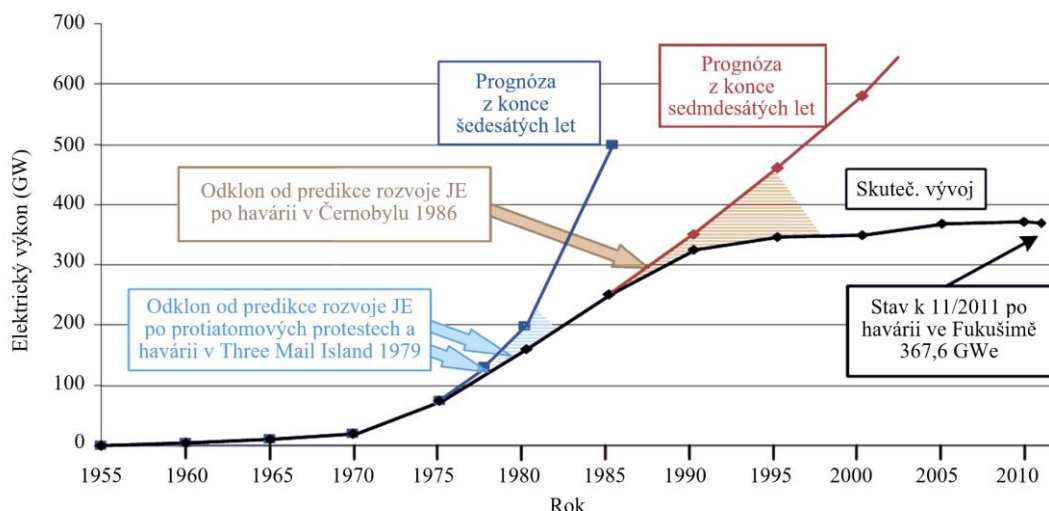
- minimální produkce emisí CO₂,
- stabilní dodávka elektrické energie bez ohledu na geografické umístění,
- nízké náklady během provozu JE,
- nízká citlivost na změnu ceny paliva,
- vysoká bezpečnost (vzhledem k mnoha bezpečnostním požadavkům),
- vysoká energetická hustota paliva,
- nízký poměr zastavěné plochy a výkonu.

Mezi nevýhody lze zařadit:

- drahá a časově náročná výstavba JE,
- jaderný odpad jako vedlejší produkt,
- konečné zásoby jaderného paliva,
- následky jaderných havárií,
- potřeba vysoce kvalifikovaného personálu.

Kromě těchto vlastností rozhoduje o úspěšnosti technologie i postoj veřejnosti. Dle průzkumu agentury IBRS v České republice podporuje jádro 72 % populace [19], [20]. Kromě veřejnosti nalézá jádro podporu i v politice předchozí a současné vlády. Opačným příkladem vlivu veřejného mínění je Rakousko, ve kterém nebyla v roce 1978 po výsledcích referenda spuštěna již dokončená JE Zwentendorf [21], [22]. V literatuře se často uvádí dva důvody, proč má veřejnost obavy z jaderné energetiky. První z nich pramení z výše zmíněného (oddíl 1.2) propojení jaderné energetiky a jaderných zbraní. Na tuto vazbu zareagovala Mezinárodní agentura pro atomovou energii, která klasifikuje uran s obsahem ²³⁵U menším nebo roven 20 % jako nízko obohacené jaderné palivo, které nelze použít pro jaderné zbraně [23]. Výrobci tuto hranici striktně dodržují, protože jak řekl prezident Partnership for Global Security Ken Luongo: „[...] nikdo nechce být obviněn z pokusu o šíření jaderných zbraní. [24]“⁸ Druhým důvodem nedůvěry je obava ze zmíněných (oddíl 1.2) jaderných havárií (graf 1.2).

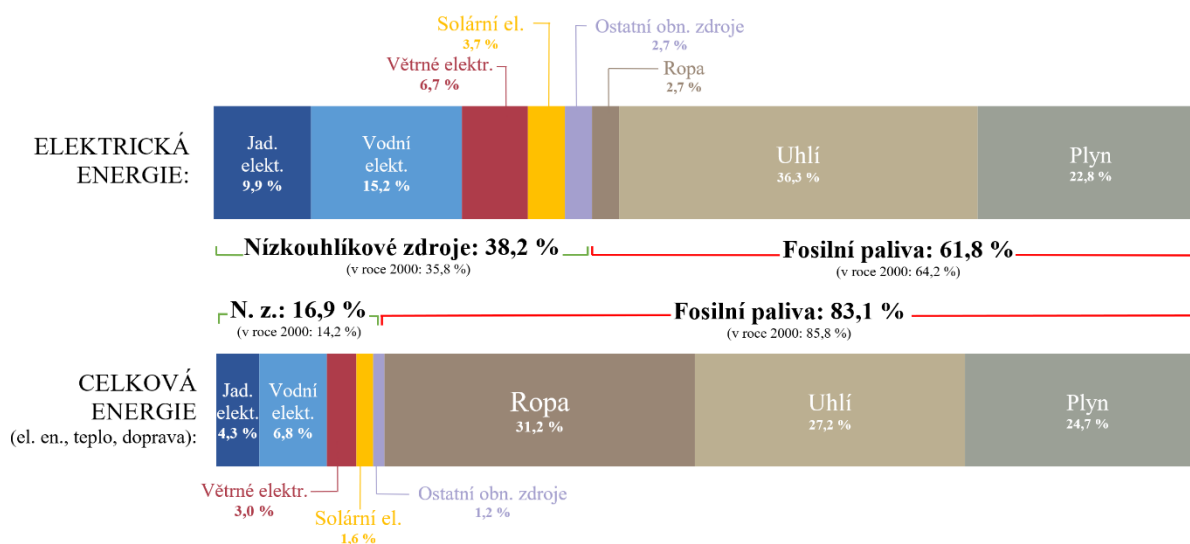
⁸ Znění originálu: „[...] nobody wants to be accused of trying to proliferate nuclear weapons.“



Graf 1.2: Vliv jaderných havárií na jadernou energetiku [16] (upraveno)

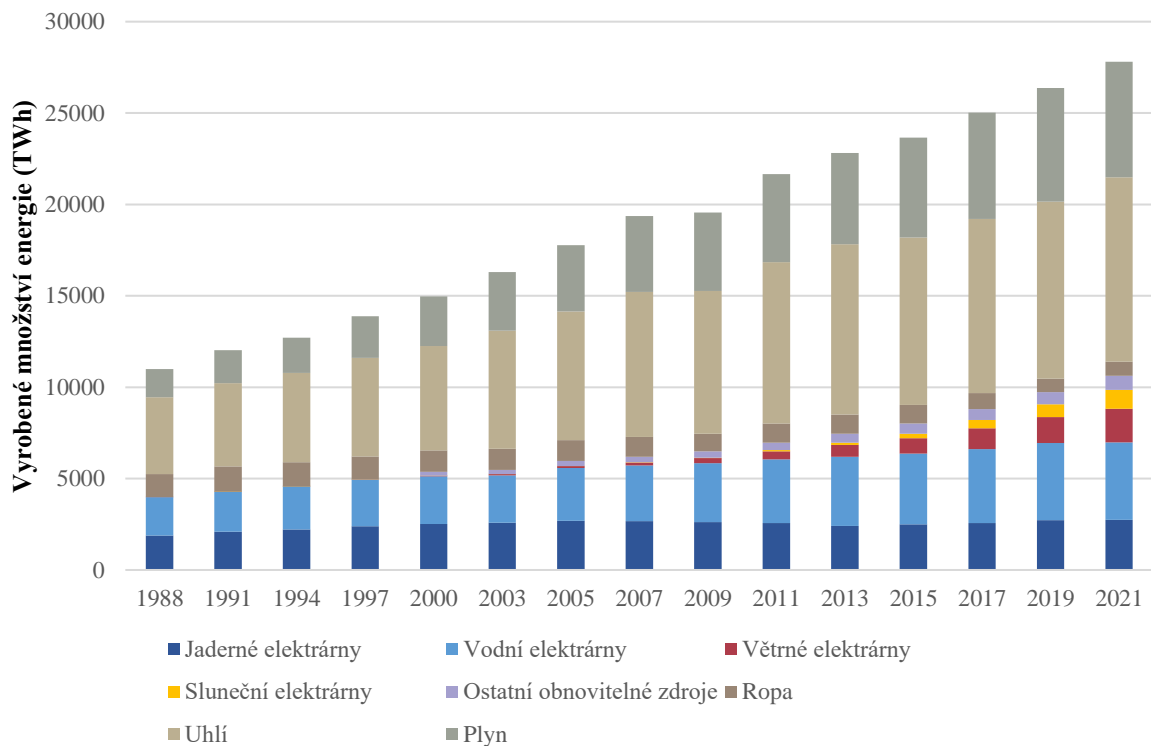
1.4 SOUČASNÉ VYUŽITÍ JÁDRA

V roce 2021 se ve světě vyrobilo celkem 163 709 TWh ($5,89 \cdot 10^{20}$ J) energie [25], z toho 27 813 TWh ($1,00 \cdot 10^{20}$ J) elektrické energie [26]. Složení zdrojů pro výrobu elektrické i celkové energie v tomto roce je zachycené a vyčíslené v grafu 1.3. Jádru se podílelo na 2 739 TWh ($9,86 \cdot 10^{18}$ J) elektrické energie [26], poměrově se jednalo o 9,9 %. Fosilní paliva přispěla 17 188 TWh ($6,19 \cdot 10^{19}$ J), poměrově 61,8 % [26]. Při uvážení celkové energie byl poměr ještě vyšší (83,1 %) [25]. S fosilními palivy se ale do budoucna nepočítá a jejich podíl bude nutné pokrýt jinými zdroji (za předpokladu stejné poptávky po energii a stejné účinnosti dílčích systémů).

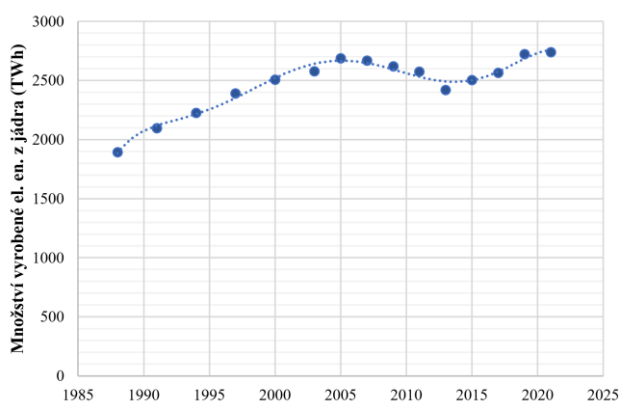


Graf 1.3: Světový energetický mix v roce 2021, zdroj dat: [25], [26]

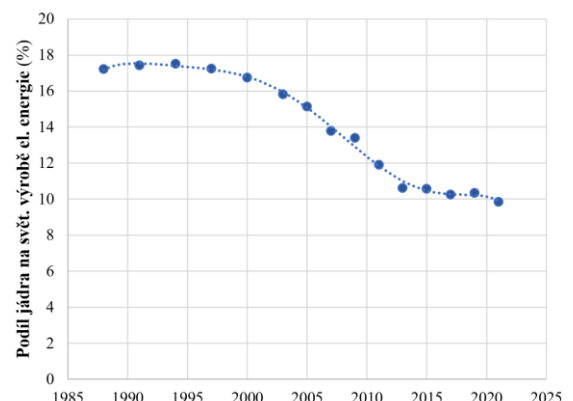
K plnému porozumění současné roli jádra je nutné zohlednit i statistiky z blízké minulosti. Analyzovala se výroba elektrické energie z jádra v posledních 34 letech. Z vynesného detailu pro jaderné elektrárny (graf 1.5) vyplývá, že počáteční růst vystřídal okolo roku 2005 období stagnace. Celkové množství energie však neustále rostlo (graf 1.4), což se projevilo na klesající funkční závislosti zastoupení jádra ve světovém energetickém mixu (graf 1.6). Tyto závislosti dokládají, že pro energetické společnosti bylo výhodnější stavět např. plynové elektrárny než JE.



Graf 1.4: Vyprodukovaná elektrická energie v období 1988–2021, zdroj dat: [26]



Graf 1.5: Detail na vyprodukovanou energii z jádra v období 1988–2021, zdroj dat: [26]



Graf 1.6: Zastoupení jádra ve světovém energetickém mixu v období 1988–2021, zdroj dat: [26]

Zemí, která nejvíce spoléhá na JE, se stala Francie. Jádro bylo v jejím energetickém mixu v roce 2021 zastoupeno 68,9 %. Dalším v pořadí byla Ukrajina (55,4 %), Slovensko (52,5 %) a Belgie (50,8 %). Česká republika byla s 36,7 % na 6. místě [27]. Protipólem k francouzské důvěře je Německo, které v dubnu 2023 odstavilo poslední jaderné reaktory v zemi.

V České republice dodaly EDU (Jaderná elektrárna Dukovany) a ETE (Jaderná elektrárna Temelín) v roce 2021 dohromady 30,7 TWh ($1,11 \cdot 10^{17}$ J) energie. Toto množství představuje 36,7 % z celkové vyrobené elektrické energie v zemi [28].

2 REŠERŠE KONDENZÁTORU

Kondenzátor je strojní zařízení, které se zařazuje za nízkotlaké díly parní turbíny. Sestává se z několika konstrukčních uzlů. Jeho konkrétní konstrukční skladba se v různých elektrárnách liší. Přesto se lze ve většině případů setkat s uzly, které zajišťují:

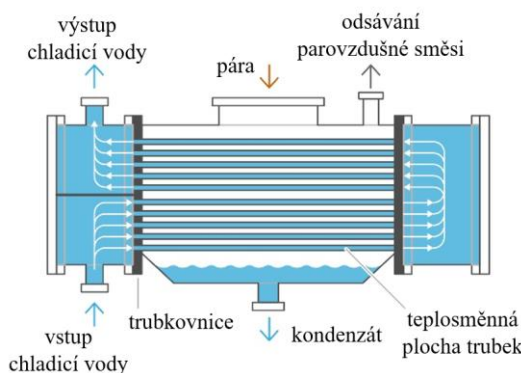
- kondenzaci,
- čištění (v EDU i ETE se používá globálně nejrozšířenější systém TAPROGGE [29]),
- odsávání nekondenzovatelných plynů z kondenzátoru (v EDU se využívají dvě vodorovné vývěvy + jedna rezervní [30]),
- pojištění proti překročení mezních stavů
- uzly zahrnující přívody par, provozních kondenzátů a demineralizované vody [30]

Vzhledem k zadaným cílům práce se rešerše omezuje pouze na konstrukční uzel pro zajištění kondenzace.

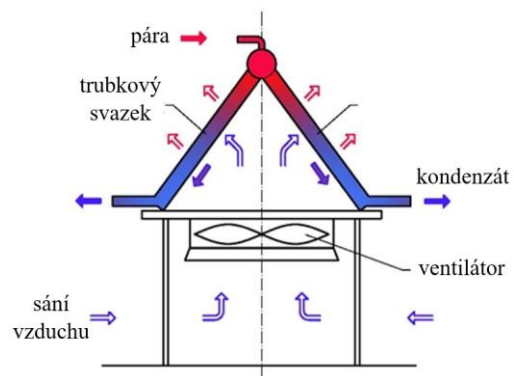
2.1 PRINCIP ČINNOSTI A PROVEDENÍ KONDENZÁTORU

Primární funkcí kondenzátoru je transformovat páru vystupující z parní turbíny či přepouštěcí stanice kondenzátoru⁹ do kapalného skupenství za hlubokého podtlaku [30]. Vzniklý kondenzát je z kondenzátoru odváděn kondenzátními čerpadly a dopravován k dalším úsekům sekundárního okruhu.

Zařízení se ve většině případů JE konstrukčně řeší jako povrchový tepelný výměník mezi sekundárním a terciárním okruhem¹⁰. Jako chladicí látka může být volena voda, vzduch, nemrznoucí směs či jiný specifický druh média [31]. Zastoupení posledních dvou chladicích médií je však marginální [31].



Obr. 2.1: Schéma vodou chlazeného kondenzátoru [31] (upraveno)



Obr. 2.2: Schéma vzduchového kondenzátoru s ventilátorem [32] (upraveno)

⁹ v případě najíždění, odstavení a poruchových stavech turbíny [30]

¹⁰ Mimo nich se lze setkat i s kondenzátory směšovacími a hybridními [33]. Tato práce se zaměřuje na povrchové kondenzátory.

Uspořádání médií v kondenzátoru závisí na chladicím médiu. V případě vodou chlazeného kondenzátoru (obr. 2.1) chladicí voda s různým stupněm úpravy proudí vnitřním prostorem trubek, zatímco pára interaguje s vnějším povrchem trubek. V ETE připadá na jeden kondenzátor 31 900 ks trubek, v EDU 31 716 ks trubek [29]. Vzduchové kondenzátory (obr. 2.2) mají pracovní média umístěna opačně. Do vnitřního prostoru teplosměnné plochy se přivádí pára, která se přeměňuje na kondenzát a, stejně jako u vodních kondenzátorů, s využitím gravitační síly stéká směrem dolů. Vzduch, který je poháněn axiálními ventilátory, obtéká vnější povrch jednotlivých trubek [32].

Pro evropské podmínky se typicky volí vodou chlazené kondenzátory [31]. V obou JE v České republice cirkuluje v chladicím okruhu voda z přilehlých umělých vodních nádrží. Vzduchové kondenzátory se aplikují převážně do geografických lokací s nedostatkem vody [31]. Mezi jejich výhody lze kromě nezávislosti na vodních zdrojích také zařadit nižší zatížení životního prostředí v důsledku úspory vody, eliminaci chemických látek pro úpravu vody a delší životnost zařízení v důsledku nižšího korozního zatížení chladicím médiem [32]. Stále jsou však oproti vodou chlazeným kondenzátorům rozměrově větší, dražší (3–4,5× [34]) a hlučnější. Vzhledem k zadání (dukovanská oblast, oddíl 3.1: zadány teploty chladicí vody) se zbytek práce zaměřuje na vodou chlazené kondenzátory.

Z fyzikálního hlediska představují kondenzátory problematiku přenosu tepla se zahrnutím změny fáze látky. Jejich chování lze predikovat analytickým výpočtem [35], numerickým výpočtem [36] či experimentálním testem¹¹. Matematicky se toto zařízení popisuje zkombinováním tepelných bilancí parní strany a strany chladicího média a úlohy o přestupu tepla. Na parní straně pára během kondenzace odevzdává modifikované skupenské teplo kondenzace [35]. To posléze prostupuje skrz několik tepelných odporů (přestup tepla na parní straně, vedení stěnou trubky, vedení usazeninami, přestup na straně chladicího média; viz obr. 2.3), až je přijato chladicím médiem. Dojde k nárůstu jeho teploty. Tento nárůst musí splňovat environmentální regulace. Běžně se pohybuje v intervalu 5–8 K pro průtočné chlazení a 8–12 K pro věžové chlazení [37]. Teplota chladicího média však po délkové souřadnici kondenzátoru nenarůstá lineárně, nýbrž exponenciálně. Závislost s narůstající délkovou souřadnicí postupně konverguje k hodnotě teploty kondenzace páry. To dokládá teplotní profil médií v kondenzátoru v grafu 2.1.

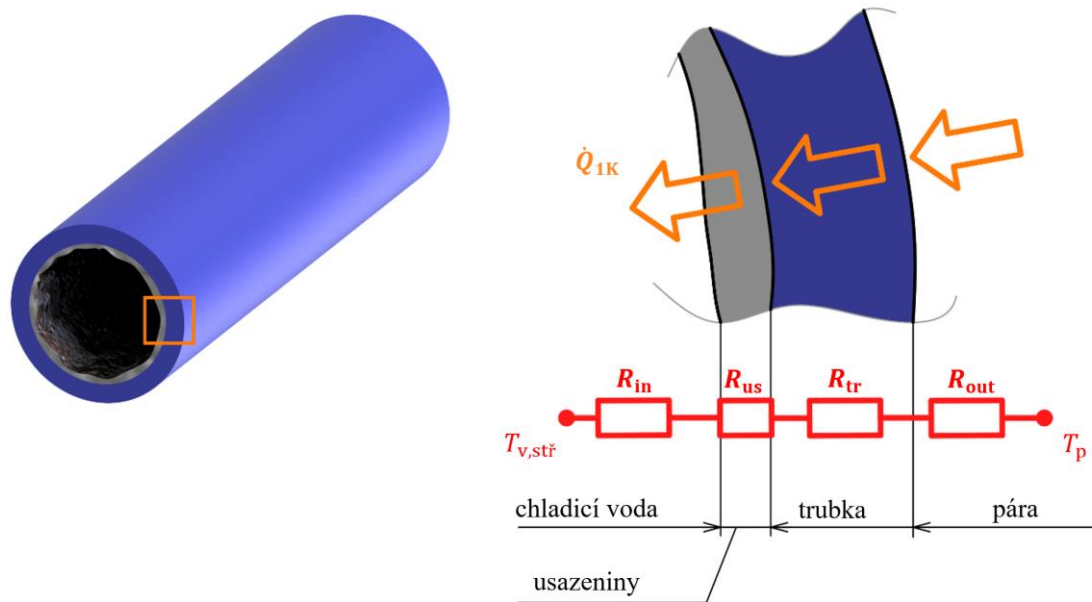
Klíčovým parametrem zařízení je velikost teplosměnné plochy. Přenos tepla je úspěšný jen tehdy, když je teplosměnná plocha, přes kterou tepelný tok prochází, dostatečně velká. Stanovení teplosměnné plochy bude řešeno v rámci kap. 4.

Na kondenzátory bývá běžně kladen požadavek na nízký tlak a teplotu kondenzace (svázané veličiny). Tento požadavek zapříčiní nízkou střední teplotu odvodu tepla a zvýšení termodynamické účinnosti cyklu, podle které JE pracuje. Existuje však hranice, kam až lze snižovat teplotu kondenzace. Ta musí být větší než teplota chladicí vody na kterékoliv souřadnici kondenzátoru, jak znázorňuje graf 2.1¹² [38]. Nejmenší rozdíl je mezi teplotou kondenzace T_p a výstupní teplotou chladicí vody T_{v2} . Rozdíl se označuje jako konco-

¹¹ Každý přístup různou mírou naplňuje kritéria na náročnost metody (časová, znalostní, finanční), spolehlivost výsledků a uzavřenost výsledných závislostí.

¹² 2. termodynamický zákon: Směr tepelného toku je vždy proti orientaci gradientu teploty.

vý rozdíl teplot ΔT_2 . Jeho hodnota se běžně pohybuje v intervalu 2,8–5,0 K [37]. V EDU nabývá 6,50 K a 6,05 K pro první, resp. druhý stupeň kondenzátoru [30].



Obr. 2.3: Prostup tepla v trubce kondenzátoru

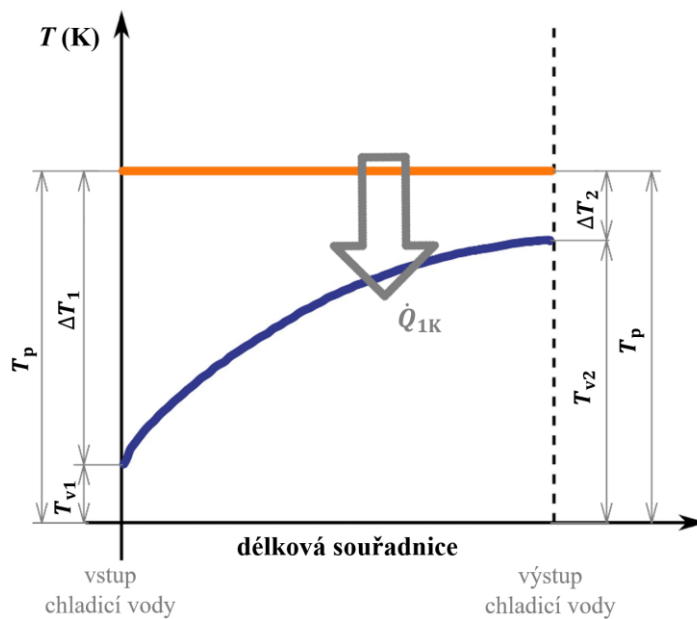
Tepelné odpory:

R_{out} – tepelný odpor kondenzace na parní straně (vnějším průměru trubky)

R_{tr} – tepelný odpor vedení tepla stěnou trubky

R_{us} – tepelný odpor vedení tepla usazeninami

R_{in} – tepelný odpor přestupu tepla na straně chladicího média (vnitřním průměru trubky)



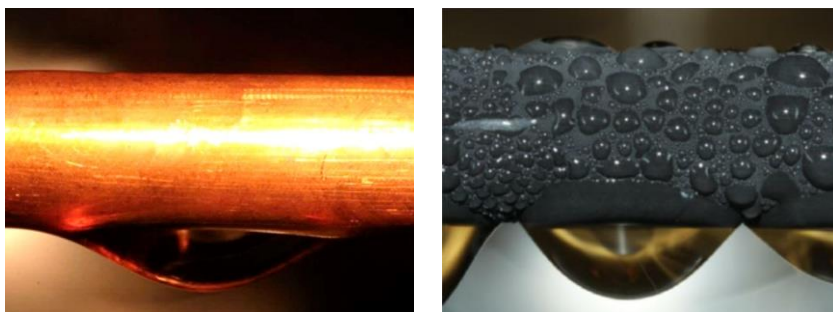
Graf 2.1: Průběh teplot médií v kondenzátoru

Legenda barev:

■ pára, ■ chladicí médium

2.2 REŽIMY KONDENZACE

Kondenzace může probíhat jedním ze dvou režimů (obr. 2.4):



Obr. 2.4: Režimy kondenzace. Filmová (vlevo) [39], kapková (vpravo) [40]

Filmová kondenzace. Charakteristickým znakem filmové kondenzace je povrch pokrytý kontinuálním filmem kondenzátu s postupně narůstající tloušťkou vlivem pokračující kondenzace a pohybu filmu¹³ způsobeným gravitací. Ze své podstaty představuje souvislý film značný tepelný odpor, který se projevuje v nízké hodnotě součinitele přestupu tepla na parní straně α_{out} [35]. To představuje hlavní negativní vlastnost režimu. Exaktněji tento jev popisuje Nusseltův model znázorněný na obr. 2.5. Za povšimnutí stojí teplotní profil filmu. Teplota filmu je rovna teplotě kondenzace po celém rozhraní pára-film. Kondenzace probíhá po celé této ploše. Směrem do filmu teplota kondenzátu lineárně¹⁴ klesá až na stěně film přebírá teplotu stěny¹⁵.

Kapková kondenzace. Charakteristickým znakem kapkové kondenzace je povrch pokrytý diskretními kapkami o různých rozměrech. Mechanismus procesu kondenzace je následující. Režim se vyvolává aplikací promotéru [41]. V aktivních nukleačních místech na povrchu stěny trubky (důlky, drážky apod.) dochází k masivní tvorbě zárodků kapek¹⁶ a ty potom postupně rostou. Růst lze rozložit na dva dílčí jevy: (1) na povrchu kapek pokračuje kondenzace páry, objem kapek se zvětšuje a (2) koalescenci¹⁷ (obr. 2.6a), která probíhá při nízké adhezi [41]. K jejímu snížení se používají superhydrofóbní povrchy¹⁸ opatřené mikro- nebo nanostrukturálními nerovnostmi [42]. Kapky rostou až do dosažení kritického rozměru, poté opouští povrch (obr. 2.6b) [41].

V současné chvíli se při návrzích kondenzátorů uvažuje konzervativně filmová kondenzace [35], která má dle Schmidta aj. [43] (citováno v [41]) 5–7× nižší součinitel přestupu tepla oproti kapkové kondenzaci. Kapková kondenzace se zatím nachází ve fázi výzkumu. Problémem je její trvalé udržení v reálných podmínkách, protože parazitní jevy (znečištění, oxidace, opotřebení promotérové vrstvy) způsobují, že po čase kapková kondenzace přechází do filmové kondenzace [35]. Výzkum kapkové kondenzace má i další nedostatky, na které Fil aj. [41] upozorňují ve své práci. Kritizují minimální probádanost geometrie se svazkem trubek (omezování na geometrii s jednou stěnou a jednou trubkou) a absenci výzkumu přímo v průmyslových aplikacích. Kromě jediné výjimky (Dalian First Power Station) se kondenzátory v elektrárnách

¹³ přesněji pohybu elementárních objemů filmu

¹⁴ předpoklad Nusseltova modelu filmu [35]

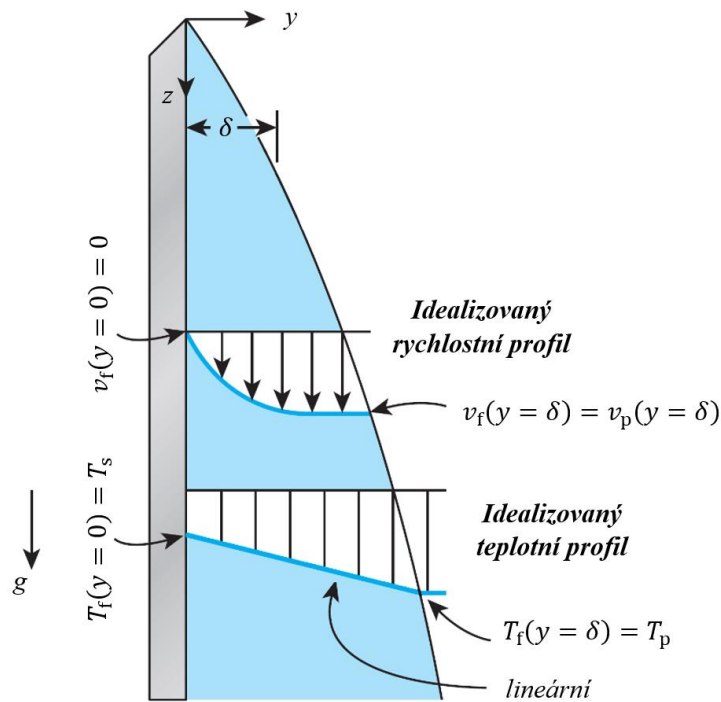
¹⁵ Podchlazenost kondenzátu zohledňuje modifikované skupenské teplo kondenzace zmíněné v oddílu 2.1 [35].

¹⁶ počet zárodků závisí na velikosti přechlazení páry pod teoretickou teplotou kondenzace

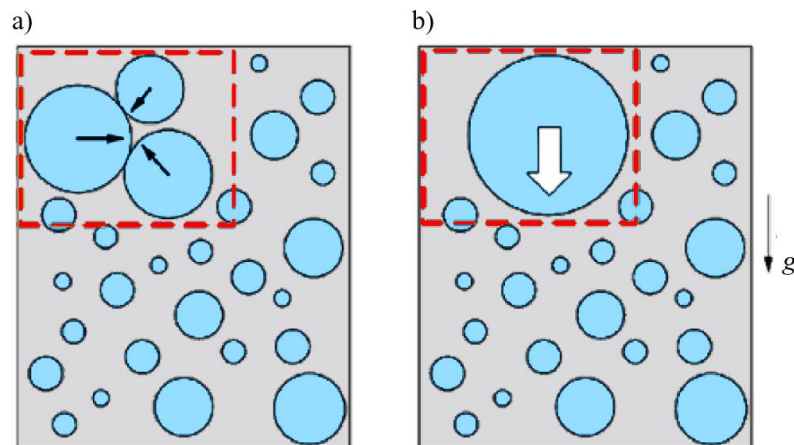
¹⁷ spojování sousedních menších kapek do jedné výsledné kapky

¹⁸ Superhydrofóbní povrch je speciální případ hydrofóbního povrchu s kontaktním úhlem větším než 150° [41].

pracující v režimu kapkové kondenzace nevyskytovaly a nevyskytují [41]. Na základě předchozích argumentů bude v této práci uvažována filmová kondenzace.



Obr. 2.5: Nusseltův model filmu [35] (upraveno)
 Legenda barev: □ stěna, ■ film (zkondenzovaná pára), □ pára



Obr. 2.6: Pohyb kapek po povrchu. a) koalescence, b) opouštění povrchu. [44] (upraveno)
 Legenda barev: □ stěna, ■ kapky (zkondenzovaná pára)

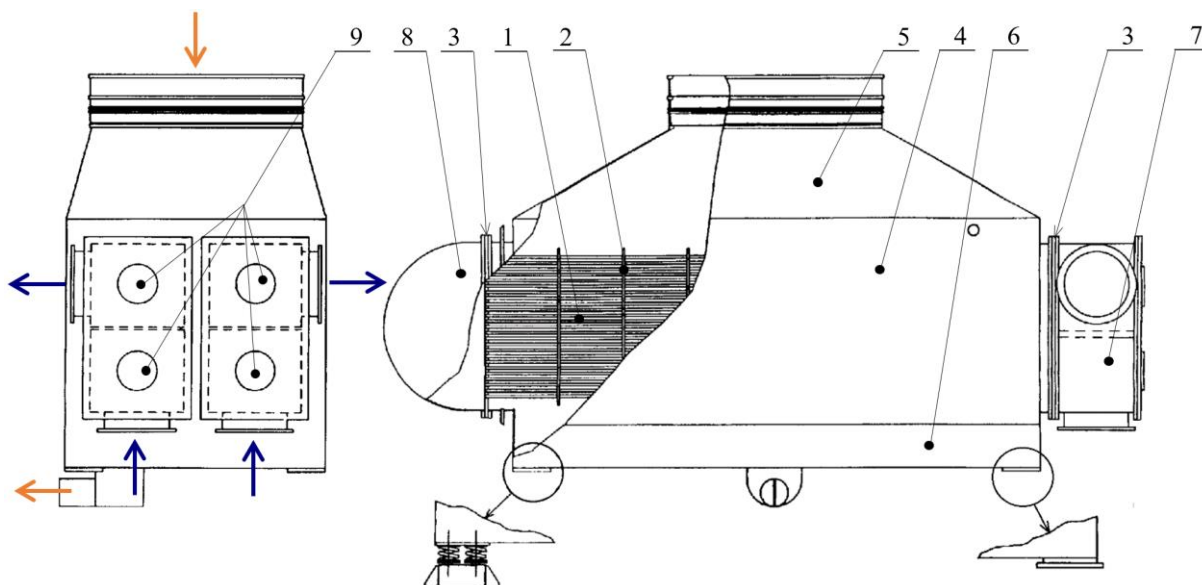
2.3 KONSTRUKČNÍ MOŽNOSTI

Na trhu se vyskytuje několik firem, které dodávají kondenzátory pro JE. Jednou z nich je společnost GE Steam Power, která má ve své nabídce i kondenzátor pro JE s elektrickým výkonem 1 200 MW. Jeho parametry jsou uvedeny v tab. 2.1. Trubky mají v tomto zařízení délku 15 m a výsledná teplosměnná plocha je 70 000 m². Kondenzátor je navržen pro mírně odlišné parametry (tlak na vstupu kondenzátoru, teplota chladicí vody, ohřev chladicí vody) než ty zadané v této práci (uvedeny v oddílu 3.1: tab. 3.1) [45]. Nicméně tato práce si i přesto klade za cíl přiblížit se délce trubek 15 m v zájmu zajištění konkurenceschopnosti.

Tab. 2.1: Technické parametry kondenzátoru GE Steam Power, zdroj dat: [45]

GE Steam Power: 1 200 MW			
Parametry kondenzace		Trubky	
Tepelný tok	2 030 MW	Materiál	nerezová ocel
Tlak na vstupu do kondenzátoru	7 kPa	Délka	15 m
Maximální obsah kyslíku při plném zatížení	0,002 %	Teplosměnná plocha	70 000 m ²
		Spoj trubka-trubkovnice	zaválcovaný/svařovaný
Chladicí voda		Hmotnost	
Chladicí okruh	sladká voda / chladicí věž	Hmotnost kondenzátoru	3 450 t
Návrhová teplota chladicí vody	295,15 K		
Ohřev chladicí vody	6 K		
Hmotnostní průtok chladicí vody	40 m ³ /s		

2.3.1 HLAVNÍ ČÁSTI KONDENZÁTORU



Obr. 2.7: Konstrukce kondenzátoru [46]. *Legenda barev:* ■ pára/kondenzát, ■ chladicí voda
Legenda komponent: 1 = svazek trubek; 2 = přepážky; 3 = trubkovnice; 4 = plášť kondenzátoru; 5 = nástavba kondenzátoru; 6 = sběrač kondenzátu; 7, 8 = vodní komora; 9 = servisní průlez

Konstrukce kondenzátoru je tvořena těmito komponentami:

Svazek trubek (obr. 2.7, pozice 1) je technickou realizací teplosměnné plochy. Trubky se nejčastěji vyrábí s ohledem na požadované vlastnosti z ušlechtilých materiálů, a to z titanu, nerezové oceli či slitin mědi. Od slitin mědi se však v nově navrhovaných elektrárnách ustupuje [47]. Tyto materiály odráží kladené požadavky na trubky, a to vysokou tepelnou vodivost a odolnost vůči korozi.

Vysoké tepelné vodivosti trubek se běžně dosahuje materiálem s vysokým součinitelem tepelné vodivosti a malou tloušťkou stěny trubky. Ve vědeckém prostoru se dále nachází několik studií, které řeší zlepšení přenosu tepla v kondenzátoru pasivními¹⁹ či aktivními²⁰ úpravami. Jejich nevýhodou je ale současný nárůst tlakové ztráty proudící kapaliny [35].

Dostatečné odolnosti vůči korozi nejen trubek, ale celé vodní strany, se dosahuje vhodnou volbou materiálu. Lze zvážit i korozní ochranu. Technicky správné jsou 2 metody – metoda obětované elektrody a vytvoření elektrického potenciálu pomocí externího zdroje a anody [46]. V praxi se ochrana nejčastěji řeší aplikací povrchových nátěrů [37]. Heat Exchange Institute [46] ovšem tento způsob odmítá. Odůvodňuje to skutečností, že v případě nedokonalého pokrytí povrchu ochranným nátěrem by obnažená místa byla vystavena velmi intenzivnímu působení chladicí vody. Poškození by v takovém případě bylo mnohem větší než v případě, kdy by ochranný nátěr nebyl nanesen vůbec.

Přepážky (obr. 2.7, položka 2) jsou desky, které se rozmísťují po určitých roztečích do svazku trubek. Jejich funkcí je řídit deformaci trubek²¹, zabránit vibracím za provozu a vyztužit plášť kondenzátoru.

Trubkovnice (obr. 2.7, položka 3) jsou masivní kovové desky, prostřednictvím kterých je uložen svazek trubek v plášti kondenzátoru.

Plášť kondenzátoru (obr. 2.7, položka 4) představuje vnější obálku celé konstrukce. Nejrozšířenější jsou dvě tvarové koncepce, a to válcový tvar pláště pro malé výkony (do 80 MW) a hranatý tvar pro zbylé spektrum výkonu [37]. Plášť se většinou řeší jako svařenec. Materiálem bývá uhlíková ocel se zaručenou svařitelností. Součástí pláště je **nástavba kondenzátoru** (obr. 2.7, položka 5) a ve většině případů²² i **sběrač kondenzátu** (obr. 2.7, položka 6). Sběrač může být vybaven falešným dnem (blíže v oddílu 2.3.3). Celou konstrukci uzavírají **vodní komory** (obr. 2.7, položka 7, 8), které jsou spojeny s přívodním a odvodním potrubím chladicí vody. Vodní komory jsou ke zbytku konstrukce připojeny pomocí přírub či zavařením. V případě svarového spoje je nutné myslet na svařitelnost se zbylým materiálem konstrukce. Většinou se volí stejný materiál jako materiál pláště. Takto uzavřená konstrukce je ještě opatřena servisními průlezy (obr. 2.7, položka 9) [37].

Trubkovnice společně s trubkami tvoří hranici mezi vodní a parní stranou. Je nežádoucí, aby se chladicí voda smísila s chemicky čistou demineralizovanou vodou. Případnou netěsnost je

¹⁹ bez externího napájení – příklady: zvyšování drsnosti povrchu trubek [35], žebrované trubky [35], vlněné trubky [48], implementace trubkových vložek a kroužků [49]

²⁰ s externím napájením – příklady: aplikování elektrického pole v případě dielektrických tekutiny, magnetického pole v případě ferotekutiny; oscilace tekutiny, pohyb trubek [49]

²¹ přepážky omezují průhyby trubek a zároveň udržují přibližně konstantní rozteče i v deformovaném stavu

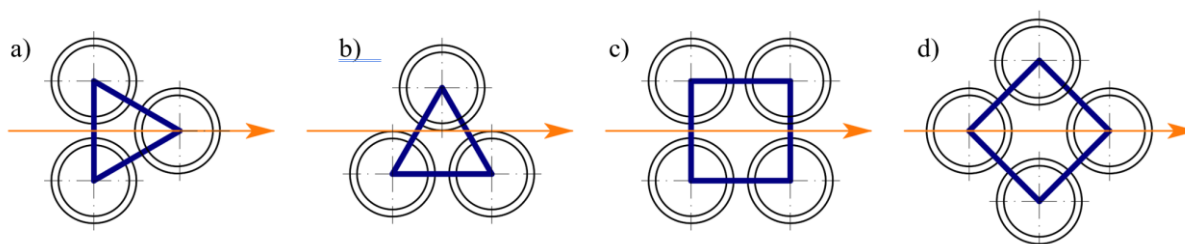
²² může být řešen jako samostatné těleso

možné odhalit při zkoušce tlakem kapaliny [50] či zkoušce tlakem plynu [50] anebo se projeví za provozu nárustem elektrické vodivosti kondenzátu [37].

2.3.2 KONFIGURACE USPOŘÁDÁNÍ TRUBEK

Trubky se ve svazcích uspořádávají do různých konfigurací, přičemž konfigurovat lze více směry.

Prvním hlediskem je typ obrazce, který vytváří spojnice středů trubek. Obr. 2.8 zobrazuje nejčastěji používaná uspořádání. Rozteč mezi trubkami je dána součtem vnějšího průměru trubek a typicky 6- až 7mm vůlí.



Obr. 2.8: Konfigurace spojnic středů trubek. a), b) rovnostranný trojúhelník; c), d) čtverec
Legenda barev: ■obrazec, →směr toku páry

Druhou konfigurační proměnnou je výsledný obrazec svazku v příčném řezu. Lze se setkat se spoustou typů obrazců, některé z nich zobrazují obr. 2.9–2.14. Jejich název je odvozen od názvu společnosti, která je s daným uspořádáním spojena. Volba konfigurace výrazně ovlivňuje kompaktnost a výsledné fyzikální chování kondenzátoru.

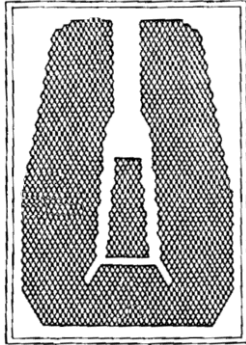
Heat Exchange Institute [46] ve své publikaci uvádí, že v oblasti poblíž středu trubkovnice na obr. 2.9, kde není odebrán materiál, dosahuje normálová složka tenzoru napětí vysokých hodnot. Je proto vhodné nechat tuto oblast bez otvorů pro trubky.

Kromě pevnostních důsledků má volba uspořádání vliv i na proudění páry a přenos tepla v kondenzátoru. Tento výrok potvrzuje studie Sata aj. [51], v rámci které došlo změnou uspořádání k 20% zvýšení přenosu tepla. Hodnota byla nejprve určena numerickým výpočtem a následně verifikována hydraulickým testem.

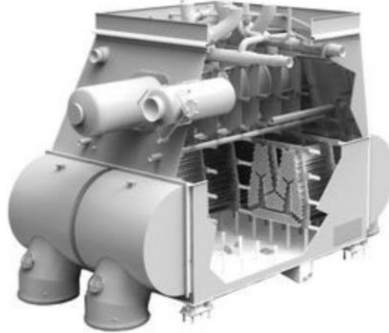
Zeng aj. [52] ve své publikaci porovnali pomocí matematického modelu uspořádání Alsthom Corporation (obr. 2.12), Balcke-Dürr Corporation (obr. 2.10) a Westinghouse (obr. 2.11). Dospěli k závěru, že varianta Balcke-Dürr vykazuje nejlepší chování z pohledu přenosu tepla. Pro definované vstupní parametry určili, že hodnota výsledného součinitele přestupu tepla této konfigurace je $3\,062\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, zatímco pro variantu Alsthom Corporation je při stejných vstupních parametrech hodnota pouze $2\,169\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ (70,8 % z hodnoty pro konfiguraci Balcke-Dürr) a pro variantu Westinghouse pouhých $2\,020\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ (66,0 %). Konfigurace Balcke-Dürr vykazuje nejen výborné vlastnosti z pohledu přenosu tepla, ale zároveň splňuje pevnostní předpoklad Heat Exchange Institutu. Z těchto důvodů bude v rámci této práce volena právě tato konfigurace.

Zeng aj. [52] rovněž popisují proudění páry při této konfiguraci (obr. 2.15), hmotnostní obsah vzduchu v páře (obr. 2.16) a skalární pole součinitele přestupu tepla (obr. 2.17). Obsah kyslíku

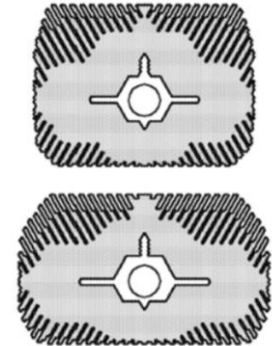
nepřesahuje v žádné oblasti hodnotu 0,1, což je jednou z příčin vysokého středního součinitele přestupu tepla této konfigurace.



Obr. 2.9: Heat Exchange Institute [46] (upraveno)



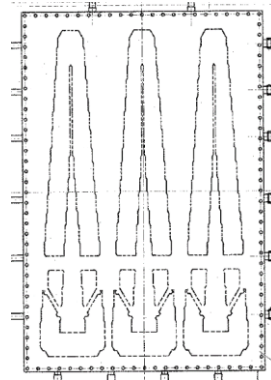
Obr. 2.10: Blacke-Dürr Corporation [53]



Obr. 2.11: Westinghouse [52]



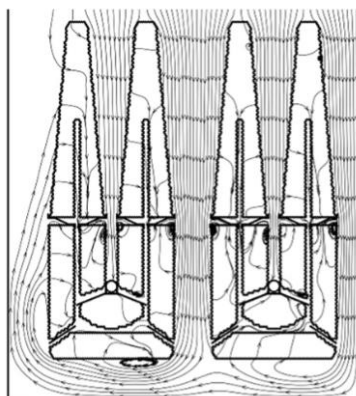
Obr. 2.12: Alstom Corporation [37] (upraveno)



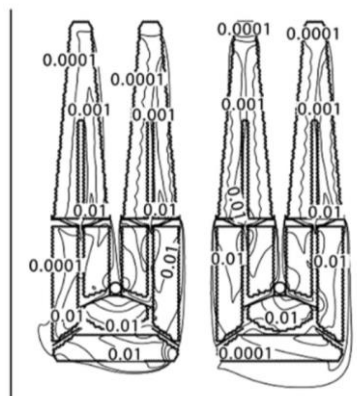
Obr. 2.13: EDU [30]



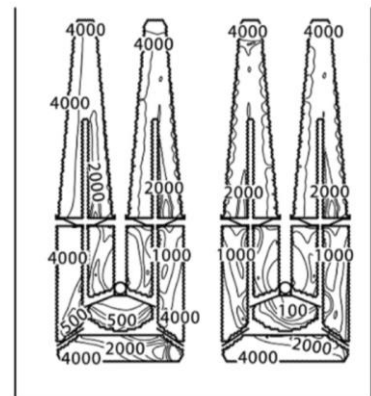
Obr. 2.14: GE Steam Power [45] (upraveno)



Obr. 2.15: Proudnice [52]



Obr. 2.16: Hmotnostní obsah vzduchu v páře [52]



Obr. 2.17: Lokální součinitel přestupu tepla [52]

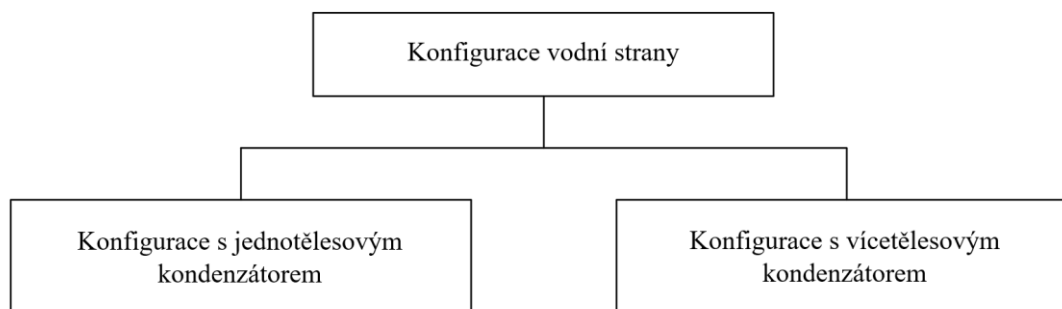
2.3.3 KONFIGURACE VODNÍ STRANY

Rozdělení způsobů, jak konfigurovat vodní stranu, zachycují tab. 2.2–2.4.

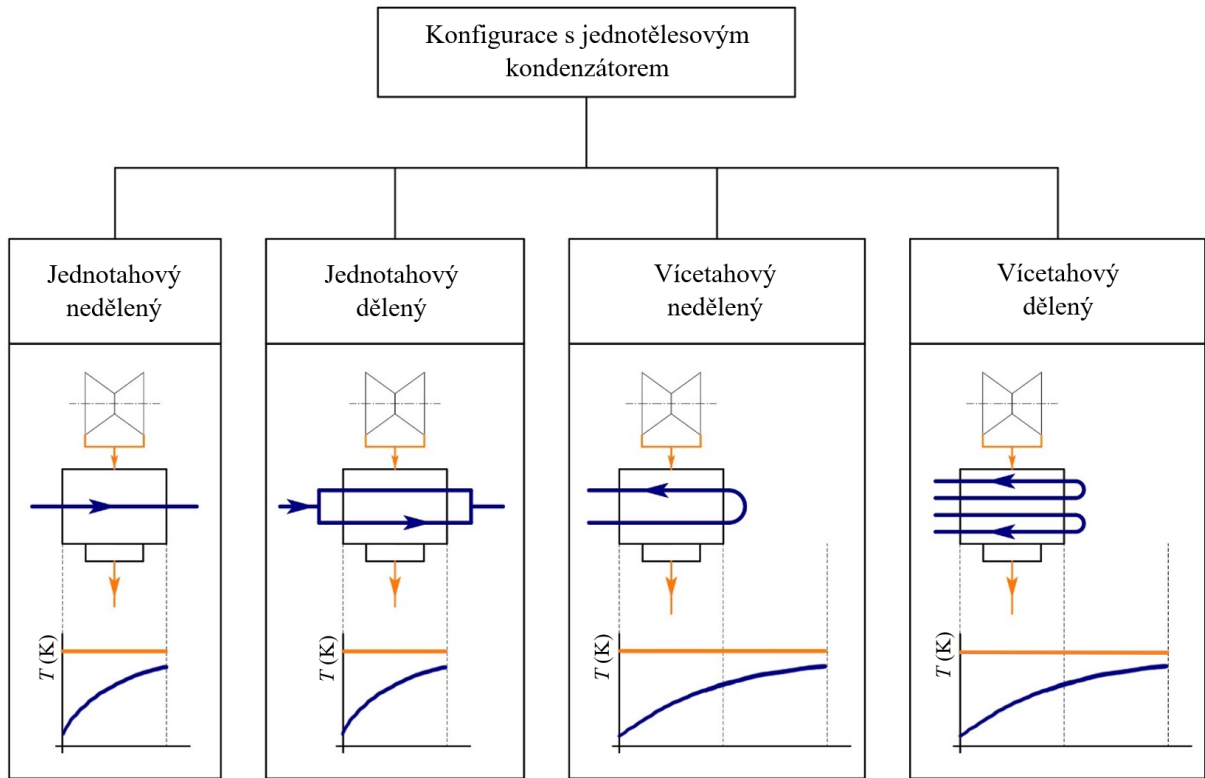
Jednotělesové kondenzátory se dělí na jednotahové nedělené, jednotahové dělené, vícetahové nedělené a vícetahové dělené. Vícetahové kondenzátory jsou charakteristické otočením směru toku vody. Vlastností dělených kondenzátorů je možnost pouze částečného odstavení, při kterém zůstane v provozu polovina kondenzátoru. Teplota a tlak kondenzace jsou ve všech čtyřech případech dány součtem výstupní teploty chladicí vody T_{v2} a zvoleným koncovým rozdílem teplot ΔT_2 (oddíl 2.1).

U vícetělesových kondenzátorů se rozlišuje, zda jsou uspořádány v sériovém či paralelním zapojení. Při paralelním postavení je chladicí voda rozdělována do jednotlivých větví a celkový hmotnostní průtok se rovná součtu průtoků v jednotlivých větvích. Ve všech tělesech kondenzuje pára za stejného tlaku a teploty, proto i teplota vzniklého kondenzátu je ve všech tělesech stejná. V sériovém zapojení protéká celkový hmotnostní průtok chladicí vody postupně všemi tělesy. Dochází k postupnému ohřevu chladicí vody, což implikuje rozdílné teploty a tlaky kondenzace v jednotlivých tělesech. Teploty kondenzátů v jednotlivých tělesech musí být vyrovnány. V EDU toto řeší následovně. Ve sběrači kondenzátu kondenzátoru prvního stupně (z pohledu chladicí vody první v pořadí, nižší teplota kondenzátu) je instalováno falešné dno, na kterém se shromažďuje vzniklý kondenzát. Odsud je veden potrubím a sprchami do sběrače kondenzátu kondenzátoru druhého stupně (z pohledu chladicí vody druhý v pořadí, vyšší teplota kondenzátu). Dojde k promísení obou kondenzátů a vyrovnání teplot. Výsledná směs je dále potrubím vedena zpět pod falešné dno [30]. V EDU kondenzáty proudí pouze gravitací [30], nicméně lze se setkat i s dopravou pomocí čerpadel [46]. V případě třech a více těles mohou být tělesa kondenzátoru řazeny kromě zmíněných dvou ještě složitějším sériovo-paralelním uspořádáním, které lze postupným rozkladem chápat jako dílčí sériová a paralelní uspořádání.

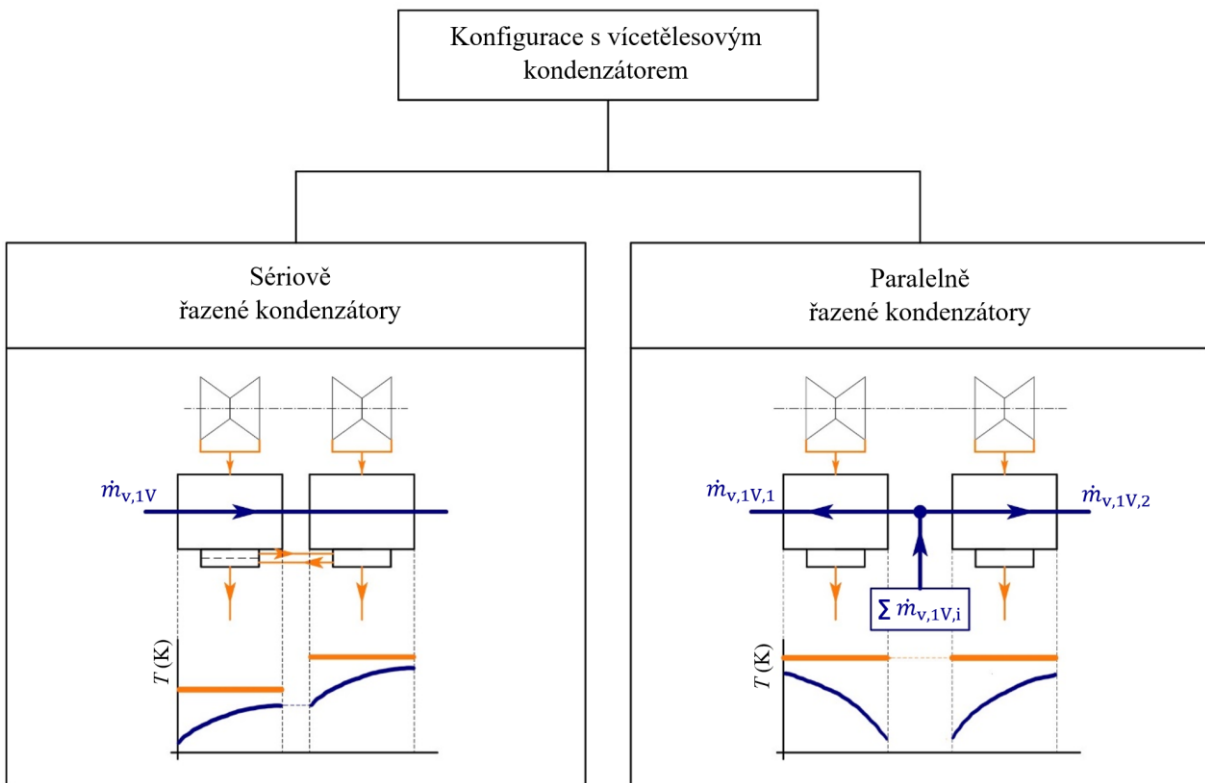
Tab. 2.2: Rozdělení konfigurací vodní strany podle počtu těles



Tab. 2.3: Druhy jednotělesových kondenzátorů. *Legenda barev:* ■ pára/kondenzát, ■ chladicí voda



Tab. 2.4: Druhy uspořádání s vícetělesovým kondenzátorem. *Legenda barev:* ■ pára/kondenzát, ■ chladicí voda



3 ROZMĚROVÝ, BILANČNÍ A TEPELNÝ VÝPOČET

3.1 FORMULACE PROBLÉMU

Smyslem této práce je vytvořit projektový návrh kondenzátoru pro nový jaderný zdroj EDU s elektrickým výkonem 1 200 MW.

Kondenzátor je navrhován, jak je v praxi zvykem, pro stacionární provozní stav. Na základě provedené rešerše jsou na kondenzátor kladeny tyto požadavky:

1. Kondenzátor musí zajistit úplné zkondenzování páry v sekundárním okruhu, v režimu filmové kondenzace s pomocí chladicího účinku vody v terciárním okruhu JE.
2. Chladicí voda nesmí překročit zadané dovolené ohřátí (10 K, viz tab. 3.1), které je určeno na základě environmentálních regulací.
3. Svazek trubek musí být uspořádán v konfiguraci Balcke-Dürr s dořešením úhlu natočení svazku trubek, aby vzniklý kondenzát a přisávané nekondenzovatelné plyny měly nejmenší možné dopady na kvalitu a parametry procesu kondenzace.
4. Výsledné zařízení musí být schopné rozměrově konkurovat podobnému řešení na trhu, tj. délka trubek musí být maximálně o 10 % větší oproti délce trubek v kondenzátoru firmy GE Steam Power.

Výchozí parametry pro návrh kondenzátoru (tab. 3.1) byly zadány vedoucím práce. Jednotlivé hodnoty vychází z typických parametrů koncepcí 1 200MW JE s tlakovodními reaktory²³ a přírodních podmínek v dukovanské oblasti.

Tab. 3.1: Zadané parametry

Veličina	Hodnota
Sekundární okruh	
Kondenzační tlak	$p_p = 5 \text{ kPa}$
Suchost páry	$x = 0,88$
Hmotnostní průtok páry kondenzátory	$\dot{m}_p = 980 \text{ kg/s}$
Terciární okruh	
Vstupní teplota chladicí vody	$T_{v1} = 293,15 \text{ K} (= 20 \text{ °C})$
Výstupní teplota chladicí vody	$T_{v2} = 303,15 \text{ K} (= 30 \text{ °C})$
Tlak chladicí vody	$p_v = 0,35 \text{ MPa}$

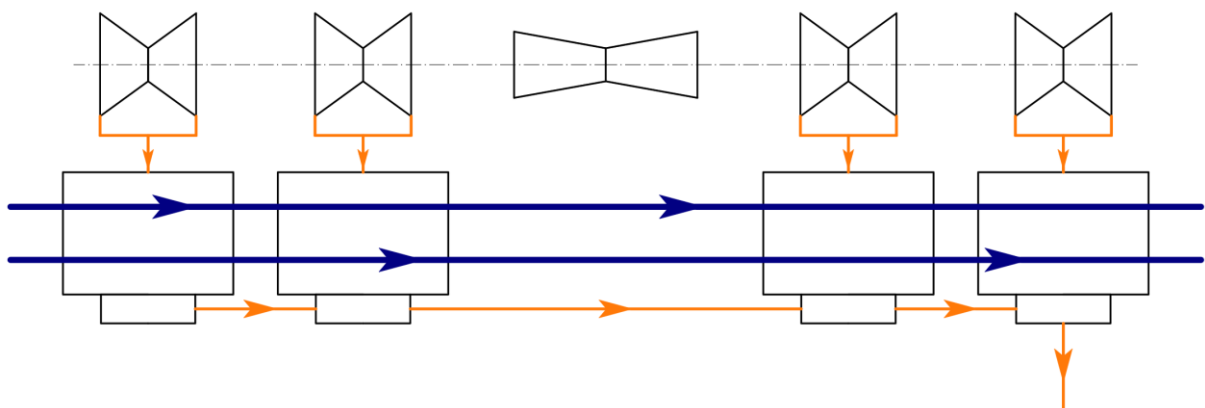
²³ V rámci projektu Dukovany II jsou uvažovány tlakovodní reaktory, které se osvědčily v rámci stávajících bloků.

3.2 NÁVRH KONCEPČNÍHO ŘEŠENÍ

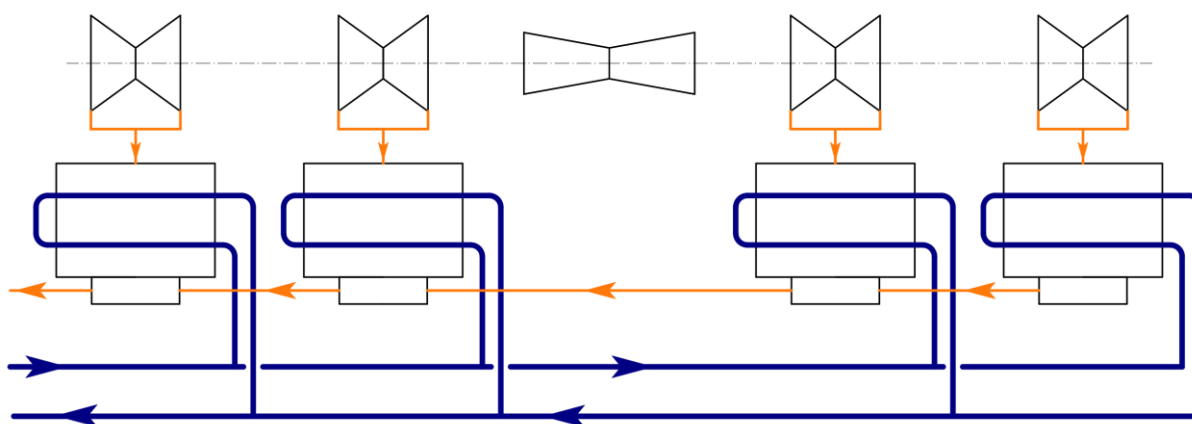
Při návrhu sekundárního okruhu platí běžně konvence, že počet nízkotlakých dílů parní turbíny je stejný s počtem těles kondenzátoru. Pokud tendr na výstavbu nového bloku vyhraje řešení s elektrickým výkonem 1 200 MW, jeho návrh bude mít na starost francouzská firma EDF. Ta ale zatím koncepci EPR1200 nepoužila. Bude ji upravovat z koncepce EPR1600 [54], která je pro účely stanovení počtu nízkotlakých dílů parní turbíny nepoužitelná. Ohledně typického provedení sekundárního okruhu se ale lze inspirovat u obdobných řešení. Ve schématu koncepce VVER-1200 [55] i MIR.1200 [56] (vychází z VVER-1200) se nachází čtyři nízkotlaké díly parní turbíny. V této práci jsou vypracovány dvě koncepční řešení. U obou jsou uvažovány právě čtyři tělesa kondenzátoru.

Koncepce A (obr. 3.1) představuje tělesa jednotahových dělených kondenzátorů zapojených sériově za sebou. Do každého tělesa vstupuje čtvrtina celkového hmotnostního toku páry, tj. 245 kg/s. Pára během kondenzace odevzdává teplo chladicí vodě, která se díky tomu postupným průchodem všemi tělesy ohřeje ze vstupní teploty před prvním tělesem 293,15 K na výstupní teplotu za posledním tělesem 303,15 K. Rozdílné teploty v jednotlivých tělesech kondenzátoru znamenají čtyři různé tlaky kondenzace, a tím čtyři různé teploty kondenzátu, které musí být dodatečně vyrovnány.

Koncepce B (obr. 3.2) se skládá ze čtyř dvoutahových nedělených kondenzátorů umístěných ve čtyřech paralelních větvích chladicí vody. Stejně jako v předchozím případě vstupuje do každého tělesa kondenzátoru čtvrtina celkového hmotnostního toku páry, tj. 245 kg/s. Chladicí voda se však ohřívá z teploty 293,15 K na 303,15 K průchodem pouze jedním kondenzátorem a celkový hmotnostní průtok chladicí vody je vzhledem k hmotnostnímu průtoku procházejícím jedním tělesem čtyřnásobný. V této koncepci jsou všechna čtyři tělesa geometricky i fyzikálně identická, díky čemuž lze výpočet zjednodušit a pracovat pouze s jedním tělesem. Další vlastností je stejná teplota kondenzátu ve všech tělesech. Propojení sběračů ve schématu slouží pouze k rovnoměrnějšímu rozložení kondenzátu v jednotlivých nádržích a konstrukčně přístupnějšímu odvodu kondenzátu ze soustavy.



Obr. 3.1: Koncepční řešení A
 Legenda barev: ■ pára/kondenzát, ■ chladicí voda


Obr. 3.2: Konceptní řešení B

Legenda barev: ■ pára/kondenzát, ■ chladicí voda

U obou koncepcí je možné správně nastavit parametry teplosměnné plochy tak, aby bylo zajištěno plnění požadované funkce systému (požadavky č. 1–3). Rozměrové vlastnosti (požadavek č. 4) zase tvoří výstup návrhu, a proto se k nim není snadné v této fázi vyjádřit. Stejně tak nelze ani jedno z řešení zvýhodnit z pohledu výsledné spolehlivosti soustavy, protože ta je v obou případech stejná²⁴.

V čem se ale daná koncepční řešení liší, je jejich složitost. Zatímco koncepce B se skládá ze čtyř identických těles, koncepce A obsahuje čtyři fyzikálně různá tělesa (např. různý tlak kondenzace). Tělesa jsou v řešení B funkčně nepojena, kdežto v řešení A je nutné konstrukčně dorešit míšení kondenzátu (falešná dna ve sběračích). Volba koncepce A oproti B by teda měla za následek složitější (a tím dražší):

- výpočty v rovině projektového návrhu (nutno rozdělit tlak kondenzace a propočítávat individuálně jednotlivé stupně kondenzátoru),
- výpočty v rovině konstrukčního návrhu,
- konstrukční řešení a jeho výrobu,
- testování apod.

Je proto volena koncepce B.

3.3 METODA VÝPOČTU

Pro výpočet byla využita numerická metoda prosté iterace. Metoda byla volena proto, že jednodušší lineární výpočet nedokáže zohlednit podchlazenost kondenzátu, tj. nelze řešit rovnice (7), (21), (22) atd. Teplota kondenzátu T_f , která v nich vystupuje, je totiž funkcí zadané teploty páry T_p a teploty vnější stěny trubky T_s , kterou lze určit až v závěrečné fázi výpočtu.

Základní myšlenkou metody je počáteční odhad parametru – v této práci je odhadována teplota vnější stěny trubky T_s – a jeho následné zpřesňování v dalších iteračních krocích, přičemž platí,

²⁴ Pro určení výsledné spolehlivosti soustavy je nutné obě řešení modelovat sériově zapojenými nezávislými prvky. Protože obě řešení fungují jen tehdy, když fungují všechna jednotlivá tělesa. Matematicky:

$$S_A = S_B = S(T_1 \cap T_2 \cap T_3 \cap T_4)$$

že odhadovaná hodnota parametru se shoduje s vypočtenou hodnotou parametru z předchozího kroku, matematicky:

$$T_s^{(k+1)} = T_{s,VYP}^{(k)} \quad (1)$$

Počáteční aproximace teploty vnější stěny trubky T_s byla s ohledem na rovnici (4) volena jako:

$$T_s = 303,15 \text{ K} \quad (2)$$

Přesnost hodnoty na 2 desetinná místa zajistí STOP kritérium:

$$ROZDIL = \left| T_s^{(k)} - T_{s,VYP}^{(k)} \right| < 0,005 \quad (3)$$

Pro případ, že by výpočet nekonvergoval, nebo rychlost konvergence byla nedostatečná, je maximální počet iterací volen 40.

Při sestavování tepelného výpočtu se pracovalo s těmito předpoklady:

1. Provozní parametry jsou stálé.
2. Tepelné ztráty do okolí jsou zanedbatelné.
3. Tloušťka usazenin a jejich tepelný odpor jsou zanedbatelné, protože se předpokládá, že součástí kondenzátoru je i čisticí soustava (např. TAPROGGE).
4. Trubky mají vnitřní povrch hladký.
5. Změny kinetické a potenciální energie obou tekutin jsou zanedbatelné, protože rychlosti i změna výšky proudění jsou v kondenzátorech zanedbatelné a tlaková ztráta bývá velmi malá.
6. Chemické složení obou médií je uvažováno jako čistá voda (H_2O).
7. Proudění tekutin jsou plně rozvinutá.
8. Vedení tepla skrz stěnu trubky je jednodimenzionální.
9. Vlastnosti obou tekutin jsou konstantní.

Iterační tepelný výpočet byl realizován v softwaru EES. První iterace je pro demonstrativní účely plně propočítána a okomentována. Hodnoty byly odečítány přímo z výsledků v EES²⁵, čímž se dosáhlo vyšší přesnosti výsledků.

²⁵ EES pracuje s více desetinnými místy než 2 prezentovanými během výpočtu, proto se ručně vyčíslené hodnoty z jednotlivých rovnic nemusí shodovat s hodnotami uvedenými v této práci.

3.4 PRVNÍ ITERACE VÝPOČTU

3.4.1 ANALÝZA TEPELNÉHO DĚJE V SEKUNDÁRNÍHO OKRUHU

Do kondenzátoru vstupuje pára, jejíž stav je plně definován 2 nezávislými stavovými veličinami ($p_p = 5 \text{ kPa}$, $x = 0,88$). Teplota a entalpie páry mají v tomto stavu hodnotu:

$$T_p = \text{EES}(p_p = 5 \text{ kPa}) = 306,02 \text{ K} \quad (4)$$

$$h_p = \text{EES}(p_p = 5 \text{ kPa}, x = 0,88) = 2\,269,97 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (5)$$

Kondenzát je přítomen ve formě filmu. Jeho teplota a měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku se určí jako:

$$T_f = \frac{T_p + T_s}{2} = \frac{306,02 + 303,15}{2} = 304,59 \text{ K} \quad (6)$$

$$c_{p,f} = \text{EES}(T_f = 304,59 \text{ K}, p_p = 5 \text{ kPa}) = 4\,179,83 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (7)$$

Na rozhraní film-pára se nachází sytá voda, jejíž entalpie je:

$$h_k = \text{EES}(p_p = 5 \text{ kPa}, x = 0) = 137,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (8)$$

Pára během kondenzace odevzdává měrné modifikované skupenské teplo, které Rohsenov vyjádřil jako [35]:

$$\begin{aligned} \Delta h_{\text{mod}} &= h_k - h_p - 0,68c_{p,f}(T_p - T_s) = 137,75 \cdot 10^3 - \\ &2269,97 \cdot 10^3 - 0,68 \cdot 4179,83 \cdot (306,02 - 303,15) = \\ &-2\,140\,387,94 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \end{aligned} \quad (9)$$

Celkový tepelný tok odváděný páře ve všech čtyřech, resp. v jednom tělese kondenzátoru se dle 1. termodynamického zákona rovná:

$$\dot{Q}_p = \dot{m}_p \Delta h_{\text{mod}} = 980 \cdot (-2\,140\,387,94) = -2,10 \cdot 10^9 \text{ W} = -2\,100 \text{ MW} \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{p,1K} = \frac{\dot{Q}_p}{4} = \frac{-2,10 \cdot 10^9}{4} = -5,24 \cdot 10^8 \text{ W} = -524 \text{ MW} \quad (11)$$

Toto teplo vztažené na jednotku času prochází kondenzátorem (\dot{Q}_K , \dot{Q}_{1K}) přes dostatečně velkou teplosměnnou plochu a následně je odevzdáno chladicí vodě v terciárním okruhu (\dot{Q}_v , $\dot{Q}_{v,1K}$), matematicky:

$$|\dot{Q}_p| = \dot{Q}_K = \dot{Q}_v = 2,10 \cdot 10^9 \text{ W} = 2\,100 \text{ MW} \quad (12)$$

$$|\dot{Q}_{p,1K}| = \dot{Q}_{1K} = \dot{Q}_{v,1K} = 5,24 \cdot 10^8 \text{ W} = 524 \text{ MW} \quad (13)$$

3.4.2 ANALÝZA TEPELNÉHO DĚJE V TERCIÁRNÍM OKRUHU

Chladicí voda na vstupu i na výstupu je rovněž ze zadání plně určena pomocí 2 nezávislých stavových veličin (teplota, tlak). Hodnoty entalpií v jednotlivých stavech dosahují:

$$h_{v1} = \text{EES}(T_{v1} = 293,15 \text{ K}, p_v = 0,35 \text{ MPa}) = 84,24 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (14)$$

$$h_{v2} = \text{EES}(T_{v2} = 303,15 \text{ K}, p_v = 0,35 \text{ MPa}) = 126,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (15)$$

Z 1. termodynamického zákona lze odvodit potřebný hmotnostní průtok chladicí vody celým systémem, resp. jednou větví chladicí vody:

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{Q}_v}{h_{v2} - h_{v1}} = \frac{2,10 \cdot 10^9}{126,05 \cdot 10^3 - 84,24 \cdot 10^3} = 50\,171,75 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{v,1K} = \frac{\dot{m}_v}{4} = \frac{50\,171,75}{4} = 12\,542,94 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (17)$$

3.4.3 TERMOFYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI MÉDIÍ

Termofyzikální vlastnosti páry jsou:

$$\rho_p = \text{EES}(p_p = 5 \text{ kPa}, x = 0,8) = 0,04 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (18)$$

$$l_{23} = \text{EES}(p_p = 5 \text{ kPa}) = 2,42 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (19)$$

$$l_{23}^* = l_{23} + 0,68c_{p,f}(T_p - T_s) = 2,42 \cdot 10^6 + 0,68 \cdot 4179,83 \cdot (306,02 - 303,15) = 2,43 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (20)$$

Termofyzikální vlastnosti kondenzátu (filmu) jsou:

$$\rho_f = \text{EES}(p_p = 5 \text{ kPa}, T_f = 304,59 \text{ K}) = 995,16 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (21)$$

$$\lambda_f = \text{EES}(p_p = 5 \text{ kPa}, T_f = 304,59 \text{ K}) = 0,62 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad (22)$$

$$\mu_f = \text{EES}(p_p = 5 \text{ kPa}, T_f = 304,59 \text{ K}) = 7,74 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (23)$$

Vlastnosti chladicí vody při střední teplotě $T_{v,\text{stř}}$ jsou:

$$T_{v,\text{stř}} = \frac{T_{v1} + T_{v2}}{2} = \frac{293,15 + 303,15}{2} = 298,15 \text{ K} \quad (24)$$

$$\rho_v = \text{EES}(p_v = 0,35 \text{ MPa}, T_{v,\text{stř}} = 298,15 \text{ K}) = 997,16 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (25)$$

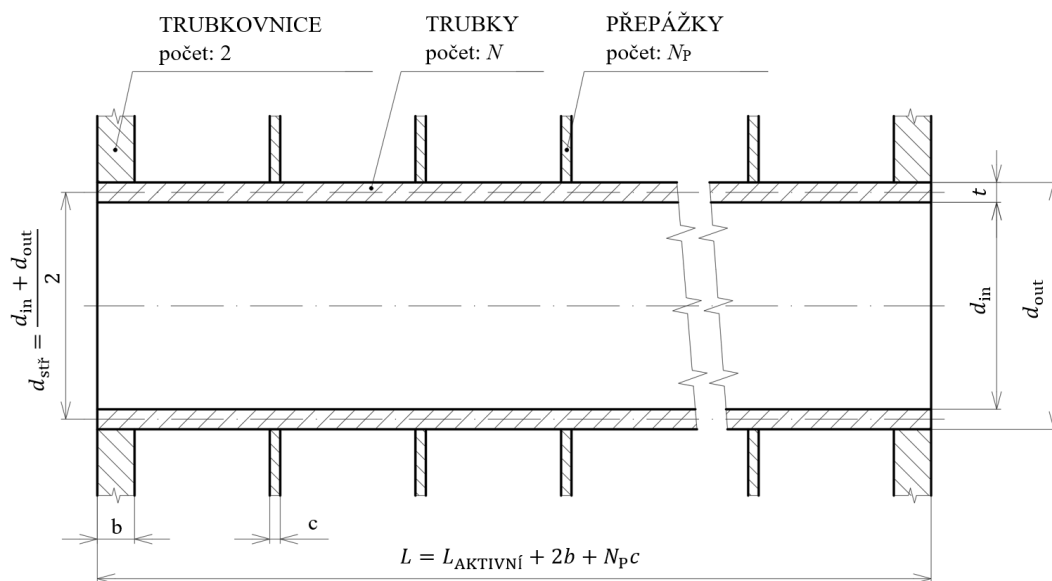
$$\lambda_v = \text{EES}(p_v = 0,35 \text{ MPa}, T_{v,\text{stř}} = 298,15 \text{ K}) = 0,61 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad (26)$$

$$\mu_v = \text{EES}(p_v = 0,35 \text{ MPa}, T_{v,\text{stř}} = 298,15 \text{ K}) = 8,90 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (27)$$

$$\nu_v = \text{EES}(p_v = 0,35 \text{ MPa}, T_{v,\text{stř}} = 298,15 \text{ K}) = 8,93 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (28)$$

$$Pr_v = \text{EES}(p_v = 0,35 \text{ MPa}, T_{v,\text{stř}} = 298,15 \text{ K}) = 6,13 \quad (29)$$

3.4.4 NÁVRH POTŘEBNÝCH ROZMĚRŮ, POČTU A MATERIÁLU KOMPONENT



Obr. 3.3: Rozměry trubek v kondenzátoru

Volba materiálu a rozměrů trubek je inspirována stávajícími kondenzátory v EDU [29].

Materiálem trubek byl zvolen titan. Jeho součinitel tepelné vodivosti nabývá hodnoty:

$$\lambda_{\text{Ti}} = \text{EES}(T_s = 303,15 \text{ K}) = 21,85 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad (30)$$

Počet přepážek a rozměry komponent (až na délku trubek, která bude později dopočítána) byly voleny následovně:

$$N_p = 9 \quad (31)$$

$$c = 20 \text{ mm} \quad (32)$$

$$d_{\text{out}} = 22 \text{ mm} \quad (33)$$

$$t = 0,5 \text{ mm} \quad (34)$$

$$b = 40 \text{ mm} \quad (35)$$

Závislé rozměry trubky jsou potom:

$$d_{\text{in}} = d_{\text{out}} - 2t = 22 - 2 \cdot 0,5 = 21 \text{ mm} \quad (36)$$

$$d_{\text{stř}} = \frac{d_{\text{in}} + d_{\text{out}}}{2} = \frac{21 + 22}{2} = 21,5 \text{ mm} \quad (37)$$

Obsah průřezu trubky, kterým proudí chladicí voda:

$$S_{\text{in}} = \frac{\pi d_{\text{in}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot (21 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 3,46 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (38)$$

Počet trubek ovlivňuje střední rychlost proudění chladicí vody v trubkách. Ta by se v případě titanu měla pohybovat v intervalu 1–2,6 m/s [37]. Příliš nízké rychlosti jsou spojeny s rizikem zanášení trubek [37], neschopnosti protlačit čisticí pěnové kuličky [37] a rapidním poklesem součinitele přestupu tepla na vodní straně (vysoké hodnoty součinitele přestupu tepla jsou spojeny s vysoce turbulentním prouděním) [35]. Naopak při příliš velkých rychlostech turbulentní proudění způsobuje vysoké tlakové ztráty chladicí vody [37] a vzniká riziko rázové koroze, vibrační a nadměrného hluku [35]. I s uvažováním ekonomických dopadů (menší náklady při vyšším počtu trubek) byla předběžně volena střední rychlost proudění chladicí vody:

$$w'_v = 2,55 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (39)$$

Výsledný počet trubek v jednom modulu (jedné polovině tělesa) kondenzátoru a skutečná střední rychlost proudění vody v trubkách se pro splnění rovnice kontinuity musí rovnat:

$$N' = \frac{\dot{m}_{v,1K}}{\rho_v S_{\text{in}} w'_v} = \frac{12\,542,94}{997,16 \cdot (3,46 \cdot 10^{-4}) \cdot 2,55} = 14\,241,83 \quad (40)$$

$$\rightarrow \text{Voleno } N = 14\,242$$

$$w_v = \frac{\dot{m}_{v,1K}}{\rho_v S_{\text{in}} N} = \frac{12\,542,94}{997,16 \cdot (3,46 \cdot 10^{-4}) \cdot 14\,242} = 2,55 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (41)$$

Celkový počet trubek v jednom tělese je dvojnásobný, tj. 28 484.

Počet trubek umístěných pod sebou je další volenou veličinou. Jedná se o úlohu hledání technicko-rozměrového optima. Z hlediska přenosu tepla je nepřipustné, aby vzniklý kondenzát při stékání interagoval s vysokým počtem trubek, zvětšoval tak svou tloušťku a tepelný odpor a snižoval součinitele přestupu tepla na parní straně. Z rozměrového hlediska je preferován naopak vyšší počet, aby byl trubkový svazek kompaktní. S přihlédnutím k těmto skutečnostem se předpokládá počet trubek pod sebou jako:

$$N_{\text{TPS}} = 40 \quad (42)$$

3.4.5 STANOVENÍ TEPELNÉHO ODPORU KONDENZÁTORU

Celkový tepelný odpor kondenzátoru lze při zavedených předpokladech zapsat pomocí metody analogie pro přenos tepla ve tvaru:

$$R_T = \frac{1}{\pi d_{\text{out}} \alpha_{\text{out}}} + \frac{1}{2\pi \lambda_{Ti}} \ln\left(\frac{d_{\text{out}}}{d_{\text{in}}}\right) + \frac{1}{\pi d_{\text{in}} \alpha_{\text{in}}} \quad (43)$$

kde jednotlivé složky představují sériově zapojené tepelné odpory vyjadřující přestup tepla na parní straně R_{out} , vedení tepla stěnou trubky R_{tr} a přestup tepla na vodní straně R_{in} .

Vztah pro **součinitele přestupu tepla na parní straně** pro kondenzující páru se odvodil z vedení tepla filmem kondenzátu [35]:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{out}} &= 0,729 \left(\frac{g \rho_f (\rho_f - \rho_p) l_{23}^* \lambda_f^3}{\mu_f (T_p - T_s) N_{TPS} d_{\text{out}}} \right)^{\frac{1}{4}} = \\ &0,729 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot 995,16 \cdot (995,16 - 0,04) \cdot (2,43 \cdot 10^6) \cdot 0,62^3}{(7,74 \cdot 10^{-4}) \cdot (306,02 - 303,15) \cdot 40 \cdot (22 \cdot 10^{-3})} \right)^{\frac{1}{4}} = \\ &5\,316,32 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \end{aligned} \quad (44)$$

Ke stanovení **součinitele přestupu tepla na vodní straně** je nutné znát Reynoldsovo číslo a režim proudění. Charakteristický rozměr odpovídá vnitřnímu průměru trubky:

$$Re_v = \frac{w_v d_{\text{in}}}{\nu_v} = \frac{2,55 \cdot (21 \cdot 10^{-3})}{8,93 \cdot 10^{-7}} = 59\,995,33 \quad (45)$$

$Re_v > 10\,000$ [35], což znamená, že chladicí voda proudí v trubkách turbulentně. Součinitel tření pro hladké trubky a turbulentní proudění popisuje první Petukhova rovnice [35]:

$$f = (0,790 \ln(Re_v) - 1,64)^{-2} = (0,790 \ln(59\,995,33) - 1,64)^{-2} = 0,02 \quad (46)$$

Nusseltovo číslo se stanoví z kritériální rovnice. K dispozici je několik možných vyjádření. V této práci se použil Gnielinskiho vztah, jehož chyba se pohybuje pod 10 %, což znamená výrazně vyšší přesnost výsledku oproti jednodušším vztahům [35].

$$\begin{aligned} Nu_v &= \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_v - 1\,000) Pr_v}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr_v^{\frac{2}{3}} - 1\right)} = \\ &\frac{\left(\frac{0,02}{8}\right) \cdot (59\,995,33 - 1\,000) \cdot 6,13}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{0,02}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (6,13^{\frac{2}{3}} - 1)} = 364,31 \end{aligned} \quad (47)$$

Potom součinitel přestupu tepla na vodní straně:

$$\alpha_{in} = \frac{Nu_v \lambda_v}{d_{in}} = \frac{364,31 \cdot 0,61}{(21 \cdot 10^{-3})} = 10\,524,23 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (48)$$

Po dosazení do vztahu (43) se získá hodnota **tepelného odporu kondenzátoru**:

$$R_T = \frac{1}{\pi \cdot (22 \cdot 10^{-3}) \cdot 5316,32} + \frac{1}{2\pi \cdot 21,85} \cdot \ln\left(\frac{22 \cdot 10^{-3}}{21 \cdot 10^{-3}}\right) + \frac{1}{\pi \cdot (21 \cdot 10^{-3}) \cdot 10\,524,23} = 4,50 \cdot 10^{-3} \frac{m \cdot K}{W} \quad (49)$$

3.4.6 STANOVENÍ DÉLKY TRUBEK A TEPLOSMĚNNÉ PLOCHY KONDENZÁTORU

Pro úspěšný přenos tepla mezi sekundárním a terciárním okruhem musí být splněna relace:

$$Q_{1K} = \frac{1}{R_T} \cdot \Delta T_{ln,CF} \cdot F \cdot L_{TOTAL,1K} \quad (50)$$

Hledisko teplot. Nekonstantní rozdíl teplot po délkové souřadnici kondenzátoru zohledňuje termodynamická veličina střední logaritmický teplotní spád, která je funkcí koncových rozdílů teplot mezi tekutinami a která nabývá v tomto případě hodnoty:

$$\Delta T_1 = T_f - T_{v1} = 304,59 - 293,15 = 11,44 \text{ K} \quad (51)$$

$$\Delta T_2 = T_p - T_{v2} = 306,02 - 303,15 = 2,87 \text{ K} \quad (52)$$

$$\Delta T_{ln,CF} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{11,44 - 2,87}{\ln\left(\frac{11,44}{2,87}\right)} = 6,20 \text{ K} \quad (53)$$

Hledisko geometrie výměníku. Korekční součinitel zohledňující geometrii je v případě tepelného výměníku se změnou skupenství roven:

$$F = 1 \quad (54)$$

Hledisko dostatečně velké teplosměnné plochy. Celkový součet teplosměnných délek všech trubek v jednom tělese kondenzátoru:

$$L_{TOTAL,1K} = \frac{Q_{1K} R_T}{F \Delta T_{ln,CF}} = \frac{(5,24 \cdot 10^8) \cdot (4,50 \cdot 10^{-3})}{1 \cdot 6,20} = 380\,650,60 \text{ m} \quad (55)$$

Podělením počtem trubek v celém tělese se získá aktivní délka trubky:

$$L_{\text{AKTIVNÍ}} = \frac{L_{\text{TOTAL,1K}}}{2N} = \frac{380\,650,60}{2 \cdot 14\,242} = 13,364 \text{ m} \quad (56)$$

Při této délce trubek bude splněna relace (50). K ní je nutno ještě přičíst šířky trubkovic a přepážek:

$$L = L_{\text{AKTIVNÍ}} + 2b + N_p c = 13,364 + 2 \cdot (40 \cdot 10^{-3}) + 9 \cdot (20 \cdot 10^{-3}) = 13,624 \text{ m} \quad (57)$$

Výsledná teplosměnná plocha ve všech 4 tělesech kondenzátoru:

$$S_{\text{TS}} = 4\pi d_{\text{str}} L_{\text{TOTAL,1K}} = 4\pi \cdot (21,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 380\,650,60 = 102\,843,03 \text{ m}^2 \quad (58)$$

3.4.7 SROVNÁNÍ DOPOČÍTANÉ A ODHADOVANÉ TEPLoty VNĚJŠÍ STĚNY TRUBKY

Dopočítaná teplota stěny:

$$T_{s,\text{VYP}} = T_p - \frac{\dot{Q}_{1K}}{L_{\text{TOTAL,1K}} \pi d_{\text{out}} \alpha_{\text{out}}} = 306,02 - \frac{5,24 \cdot 10^8}{380\,6050,60 \pi \cdot (22 \cdot 10^{-3}) \cdot 5\,316,32} = 302,27 \text{ K} \quad (59)$$

Rozdíl mezi odhadovanou a dopočítanou teplotou vnější stěny trubky:

$$\text{ROZDIL} = |T_s - T_{s,\text{VYP}}| = |303,15 - 302,27| = 0,88 \text{ K} \quad (60)$$

$\text{ROZDIL} \ll 0,005$, což implikuje další iteraci, ve které bude odhadovaná teplota stěny rovna:

$$T_s^{(2)} = T_{s,\text{VYP}}^{(1)} = 302,27 \text{ K} \quad (61)$$

3.5 VÝSLEDKY V JEDNOTLIVÝCH ITERACÍCH VÝPOČTU

Řešení s požadovanou přesností bylo dosaženo po třech iteračních krocích. Záznamy hodnot vybraných klíčových veličin během jednotlivých iterací jsou prezentovány níže v tab. 3.2.

Tab. 3.2: Hodnoty vybraných veličin během iterací

Iterace	1	2	3
T_s (K)	303,15	302,27	302,26
T_p (K)	306,02	306,02	306,02
T_f (K)	304,59	304,15	304,14
\dot{Q}_K (J)	$2,10 \cdot 10^9$	$2,10 \cdot 10^9$	$2,10 \cdot 10^9$
α_{out} (W/(m ² · K))	5 316,32	4 959,14	4 955,69
α_{in} (W/(m ² · K))	10 524,23	10 524,64	10 524,76
\dot{m}_v (kg/s)	50 171,75	50 230,39	50 231,05
w_v (m/s)	2,55	2,55	2,55
Re (–)	59 995,33	59 998,04	59 998,84
N' (–)	14 241,83	14 258,48	14 258,67
N (–)	14 242	14 258	14 258
$L_{AKTIVNÍ}$ (m)	13,364	14,283	14,294
L (m)	13,624	14,543	14,554
S_{TS} (m ²)	102 843,03	110 044,25	110 123,39
$T_{s,VYP}$ (K)	302,27	302,26	302,26
<i>ROZDIL</i> (K)	0,875	0,006	0,004

3.6 ZAVEDENÍ BEZPEČNOSTI VŮČI MS ZTRÁTY FUNKCE

Teplosměnná plocha $S_{TS} = 102\,843,03\text{ m}^2$ je schopna plnit svou funkci v uvažovaném návrhovém stavu. Problémem je, že zadané veličiny v sobě zahrnují nejistoty – vliv fluktuační veličin, usazenin, koroze, opotřebení, míry platnosti předpokladů výpočtového modelu apod. Už při mírném vychýlení provozního stavu oproti návrhovému by tak mohlo dojít ke ztrátě funkce kondenzátoru.

Pro zajištění bezporuchového provozu je nutné zavést do výpočtu bezpečnost vůči MS (mezínímu stavu) ztráty funkce – navýšením teplosměnné plochy kondenzátoru o 10–15 %. V technické praxi se toto běžně řeší zvýšením počtu trubek. Důvodem je to, že při případné poruše trubky lze danou trubku z obou stran zazátkovat (obr. 3.4) a vyřadit ji tak z provozu. Zbylé trubky dotvoří dostatečnou plochu pro přenos tepla.



Obr. 3.4: Kovová/dubová (vlevo) a pryžová (vpravo) zátka [37]

Počet trubek v polovině kondenzátoru se zohledněním nejistot veličin:

$$N_{110\%} = 1,1N = 1,1 \cdot 14\,258 = 15\,683,8 \doteq 15\,700 \quad (62)$$

Teplosměnná plocha je potom:

$$S_{TS,110\%} = \frac{8\pi d_{\text{stř}} L_{\text{AKTIVNÍ}} N_{110\%}}{121\,263,96 \text{ m}^2} = \frac{8\pi \cdot (21,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 14,294 \cdot 15\,700}{121\,263,96 \text{ m}^2} = \quad (63)$$

4 DISKUZE NÁVRHU

V příložené výkresové dokumentaci je prezentován rozměrový výkres krajního tělesa kondenzátoru. Ostatní tělesa jsou v podstatě stejná.

Výchozím bodem při stanovování rozměrů konstrukce byly parametry popisující svazek trubek, které se určily v předchozí části práce.

Parametry teplosměnné plochy jsou nastaveny takovým způsobem, aby bylo zajištěno zkonduzování páry (požadavek č. 1) a nepřekročení dovoleného ohřátí chladicí vody (požadavek č. 2) i při mírném vychýlení provozního stavu oproti návrhovému. Je nutno upozornit na některé rozdíly mezi modelovou a skutečnou situací. Zásadním rozdílem je, že ve skutečnosti jsou na parní straně přítomny kromě páry i nekondenzovatelné plyny, které snižují kvalitu kondenzace. Další nezanedbatelné zkreslení přináší hydraulické ztráty způsobené třením či místními prvky (ztráta na vtoku do trubek, ztráta na výtoku z trubek, kolenové (kanálové) víry u kolen, případné oblasti recirkulací při malých poloměrech zakřivení apod.). Ani konfigurace uspořádání svazku trubek nebyla přímo zohledněna ve výpočtu teplosměnné plochy. Právě z těchto důvodů je vhodné provést simulaci či testování zařízení v následných fázích procesu návrhu a sledovat míru jejich ovlivnění.

Ke stanovení požadované teplosměnné plochy, a tím délky trubek, bylo třeba pracovat s teplotou na stěně trubky. Teplota byla v prvním iteračním kroku nejprve odhadnuta na základě teoretické teploty kondenzace páry, a následně dalšími iteračními kroky zpřesňována. Některé závěrečné práce to řeší tím způsobem, že ji pouze odhadnou a dále nezpřesňují. Takovýto přístup je dle průběžných výsledků numerického výpočtu silně zkreslující. Délka trubek se v průběhu iterací výrazně měnila – z 13 624 mm (při odhadnuté teplotě) na 14 554 mm (při zpřesněné teplotě). Je nutno podotknout, že rozdíl mezi teplotou stěny v prvním iteračním kroku a posledním kroku byl pouze 0,89 K.

Trubkový svazek je uspořádán v konfiguraci Balcke-Dürr, čímž je kvalitativně splněn i požadavek č. 3. Zeng aj. [52] sice ve své studii ohodnotili danou konfiguraci ve srovnání s ostatními jako nejvýhodnější, jejich závěr se ovšem opírá o matematický model. Zůstává tedy otázkou, jak konfigurace obstojí v provozních podmínkách zahrnující i znečištění vodní strany. O správnosti této volby by rozhodly až výsledky po dlouhodobějším provozování zařízení. Dále měl být v rámci tohoto požadavku dořešen optimální úhel natočení obrazce spojující středy trubek. Při jeho hledání byl svazek trubek natáčen pod různými úhly s cílem posoudit výslednou interakci kondenzátu s povrchem trubek. Jako nejvýhodnější se ukázal úhel 19°.

Trubky mají délku 14,554 m. To je velmi příznivý výsledek, neboť společnost GE Steam Power [45] (požadavek č. 4) má v kondenzátorech pro 1 200MW elektrárny trubky o délce 15 m. Trubky v rámci tohoto návrhu mají podobné nároky na dopravu, náročnost montáže a prostorovou zástavbu s nároky, které se vyskytují u konkurenčního řešení.

Dále se při návrhu pracovalo s normami ČSN EN ISO 6708 pro návrh světlosti potrubí a ČSN EN 1092-1 pro návrh rozměrů přírub. V návrhu je také zohledněno doporučení Heat Exchange Institutu [46], dle kterého musí být kondenzátor pružně uložen nebo musí být přítomen kompenzátor na vstupním hrdle páry. Byla volena první varianta.

Na základě této diskuze lze jednoznačně prohlásit, že všechny požadavky kladené na výsledný návrh kondenzátoru, se kterými lze v dané fázi pracovat, byly plně splněny.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo uvést jadernou energetiku a vytvořit návrh vodou chlazeného kondenzátoru jaderné elektrárny s elektrickým výkonem 1 200 MW. Kondenzátory obecně představují nezbytnou součást nejen jaderných, ale i uhelných, solárních a geotermálních elektráren. Je to součást, která uzavírá sekundární okruh s finančně nákladnou demineralizovanou vodou a která zásadním způsobem ovlivňuje efektivitu výroby elektrické energie. Tato práce se zaměřila na návrh uzlu pro zajištění kondenzace páry v sekundárním okruhu jaderné elektrárny.

V rámci rešeršní kapitoly je studována fyzikální podstata zařízení a kondenzačního procesu. Samotná kondenzace může probíhat jedním ze dvou režimů – ve formě filmu či kapek. Současné kondenzátory pracují v režimu filmové kondenzace, protože značně efektivnější kapkovou kondenzaci se nedaří dlouhodobě udržet. Nicméně pokud by se podařilo tento režim dostatečně zmapovat, představoval by v budoucnu možnost, jak zlepšit efektivitu všech kondenzačních zařízení. Součástí rešerše je i popis konstrukčních možností kondenzátoru.

Návrh kondenzátoru je nemyslitelný bez jeho matematického popisu. Jeho chování je modelováno zkombinováním tepelných bilancí na parní a vodní straně a úlohy o přestupu tepla. Pro stanovení tepla, které pára během kondenzace odevzdává, se použil Rohsenův vztah pro modifikované skupenské teplo kondenzace.

Výpočet se řešil numerickou metodou prosté iterace sestavené ve výpočetním softwaru EES. Iterační výpočet byl volen proto, že pro běžný lineární výpočet je nutné znát teplotu stěny trubky T_s . Zvolená metoda se v tomto případě ukázala jako velmi výhodná, neboť, dle výsledků výpočtu, i velmi malý rozdíl mezi odhadnutou a zpřesněnou teplotou stěny způsobí výraznou změnu potřebné délky trubek. Konkrétně, rozdíl 0,89 K zapříčinil, že délku trubek bylo nutné upravit z 13 624 mm (při odhadnuté teplotě) na 14 554 mm (při zpřesněné teplotě). Danou metodu lze proto jednoznačně doporučit.

Přestože byl výpočet sestaven a řešen pro možné řešení Dukovan II od firmy EDF Group, lze jej snadno adaptovat na libovolný trubkový kondenzátor pouhou úpravou parametrů.

Na základě zadaných a vypočtených parametrů teplosměnné plochy byl návrh rozpracován do projektové výkresové dokumentace. Následně byl v poslední kapitole diskutován. Bylo shledáno, že všechny kladené požadavky byly zcela splněny. Návrh je tak v aktuální fázi plně připraven na další fáze procesu návrhu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Tendr na dostavbu JE Dukovany. In: *Události*. TV, ČT1, 30. 11. 2022, 19:23. Dostupné z: <https://www.ceskatelevize.cz/porady/1097181328-udalosti/222411000101130/cast/949427/>
- [2] Nový jaderný zdroj v lokalitě Dukovany. In: *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, ©2023 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobnizdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/nove-jadernozdroje/nove-dukovany>
- [3] České Budějovice chtějí od příštího roku využívat teplo z Temelína. In: *ČT24* [online]. Praha: Česká televize, 19. 10. 2022 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/regiony/3537512-ceske-budejovice-chteji-od-pristihoroku-vyuzivat-teplo-z-temelina>
- [4] Charakteristika zdroje: Fyzikální základy. In: *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Simopt, ©2020 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderna-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/fyzikalni-zaklady>
- [5] Řízení štěpné reakce - Ing. Václav Havlíček. In: *Youtube* [online]. 11. 1. 2021 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=4_HK5QLpTaE&t=1865s&ab_channel=SkupinaCEZ. Kanál uživatele Skupina ČEZ.
- [6] Bezpečnost jaderných elektráren. In: *Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni: Katedra energetických strojů a zařízení* [online]. Plzeň: ZČU, ©1991–2023 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~novakm42/clovek_a_energie-KKE-CE_2019_2020/CE_9_cviceni_podklady.pdf
- [7] World Statistics. *Power Reactor Information System* [online]. Vienna: IAEA, last update on 2023-01-24 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>
- [8] KANOGLU, Mehmet, Yunus A. ÇENGEL a John M. CIMBALA. *Fundamentals and applications of renewable energy*. New York: McGraw-Hill Education, [2020]. ISBN 978-1260455304.
- [9] ATTIA, Sami I. The influence of condenser cooling water temperature on the thermal efficiency of a nuclear power plant. *Annals of Nuclear Energy* [online]. 2015, **80**, 371–378 [cit. 2023-01-25]. ISSN 03064549. Dostupné z: doi:10.1016/j.anucene.2015.02.023
- [10] LUSPENZIA. Steam turbine generator 3D model. In: *TurboSquid* [online]. New Orleans: Shutterstock, 2021 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.turbosquid.com/3d-models/steam-turbine-generator-3d-model-1818753>
- [11] Outline History of Nuclear Energy. In: *World Nuclear Association* [online]. London: World Nuclear Association, November 2021 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z:

- <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>
- [12] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Zdroje a využití energie*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2007. ISBN 978-80-213-1647-8.
- [13] Základní typy jaderných reaktorů. In: *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, ©2023 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>
- [14] Generace jaderných reaktorů – jaké generace máme, čím se navzájem liší. In: *Atominfo.cz* [online]. 28. 3. 2016 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2016/03/generace-jadernych-reaktoru-jake-generace-mame-cim-se-navzajem-lisi/>
- [15] Jaslovské Bohunice A1. In: *Atominfo.cz: Aktuálně o jádru* [online]. 30. 4. 2015 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2015/04/jaslovske-bohunice-a1/>
- [16] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠŤASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTSCHEIDER. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [17] Charakteristika zdroje: Typy reaktorů. In: *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Simopt, ©2020 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/typy-reaktoru>
- [18] Budoucnost jaderných technologií (projekty 4. generace, malé reaktory, fúze). In: *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, ©2023 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/budoucnost-jadernych-technologii>
- [19] Podpora rozvoje jaderné energie v ČR dál stoupla, vyslovilo ji 72 procent lidí. In: *OEnergetice.cz* [online]. Třebíč, 28. 11. 2022 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/podpora-rozvoje-jaderne-energie-v-cr-dal-stoupla-vyslovalo-ji-72-procent-lidi>
- [20] Top 10 českých jaderných událostí 2022. In: *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 28.12.2022 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/udrzitelnost-energetika/cs/novinky/top-10-ceskych-jadernych-udalosti-2022-170271>
- [21] LIBRA, Martin, Jan MLYNÁŘ a Vladislav POULEK. *Jaderná energie*. Praha: Ilsa, 2012. ISBN 978-80-904311-6-4.
- [22] OBSCURA, Atlas. Zwentendorf: The Power Plant Completed Just in Time to Be Abandoned. In: *Slate* [online]. The Slate Group, March 4 2015 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: http://www.slate.com/blogs/atlas_obscura/2015/03/04/zwentendorf_nuclear_power_plant_in_austria.html?via=gdpr-consent&via=gdpr-consent

- [23] Management of high enriched uranium for peaceful purposes: Status and trends. In: *International Atomic Energy Agency*. Vienna: IAEA, 2005. Dostupné také z: https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1452_web.pdf
- [24] CNBC. Why Nuclear Energy Is On The Verge Of A Renaissance. In: *Youtube* [online]. 7. 6. 2022 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=NfNgRc4sJt8&ab_channel=CNBC
- [25] Energy consumption by source. In: *Our World in Data* [online]. England and Wales: Our World in Data [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/grapher/energy-consumption-by-source-and-country?stackMode=absolute>
- [26] Electricity production by source, World. In: *Our World in Data* [online]. England and Wales: Our World in Data [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>
- [27] Share of electricity production from nuclear. In: *Our World in Data* [online]. England and Wales: Our World in Data [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-nuclear?tab=table>
- [28] Electricity production by source, Czechia. In: *Our World in Data* [online]. England and Wales: Our World in Data [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked?country=~CZE>
- [29] Kondenzátor: Parametry. In: *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Simopt, ©2020 [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrany/jaderna-elektrarna-podrobne/kondenzator/parametry>
- [30] *EDU_SEK_KONDENZÁTOR, SYSTÉM KONDENZDACE*. Skupina ČEZ, 35 s. Firemní zdroj.
- [31] Kondenzátor: Výklad. In: *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Simopt, ©2020 [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrany/jaderna-elektrarna-podrobne/kondenzator/vyklad>
- [32] Vzduchem chlazené kondenzátory (ACC) a vzduchové chladiče (AC). In: *FANS* [online]. Praha: FANS, ©2016 [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: [https://www.fansct.com/cz/vzduchem-chlazene-kondenzatory-\(acc\)-a-vzduchove-chladice-\(ac\)/](https://www.fansct.com/cz/vzduchem-chlazene-kondenzatory-(acc)-a-vzduchove-chladice-(ac)/)
- [33] K, Mahesh, Lasheer Shareef MOHAMMAD a Krishna MYLAPALLI. A Case Study on Thermal Efficiency Analysis of Hybrid Steam Condenser with Corrugated tubes in Thermal Power Plant. *International Journal of Engineering Research & Technology* [online]. 2020, 9(2) [cit. 2022-12-17]. ISSN 2278-0181. Dostupné z: doi:10.17577/IJERTV9IS020018

- [34] *Water Use for Electric Power Generation*. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2008. Dostupné také z: <https://www.epri.com/research/products/1014026>
- [35] ÇENGEL, Yunus A. a Afshin J. GHAJAR. *Heat and mass transfer: Fundamentals & Applications*. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-339818-1.
- [36] GONG, Meijie, Minjun PENG a Haishan ZHU. Research of parameter distributing simulation and modeling for the condenser in nuclear power plant. *Annals of Nuclear Energy* [online]. 2019, **133**, 313–326 [cit. 2023-01-26]. ISSN 03064549. Dostupné z: doi:10.1016/j.anucene.2019.05.030
- [37] LOUTHAN, Jindřich. Parní turbíny a kondenzátory. In: *DocPlayer* [online]. 17. 10. 2018 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/104943501-Parni-turbiny-a-kondenzatory.html>
- [38] ÇENGEL, Yunus A. a Michael A. BOLES. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-339817-4.
- [39] PRESTON, Daniel J., Daniela L. MAFRA, Nenad MILJKOVIC, Jing KONG a Evelyn N. WANG. Scalable Graphene Coatings for Enhanced Condensation Heat Transfer. *Nano Letters* [online]. 2015, **15**(5), 2902–2909 [cit. 2023-04-15]. ISSN 1530-6984. Dostupné z: doi:10.1021/nl504628s
- [40] MILJKOVIC, Nenad, Ryan ENRIGHT, Youngsuk NAM, Ken LOPEZ, Nicholas DOU, Jean SACK a Evelyn N. WANG. Jumping-Droplet-Enhanced Condensation on Scalable Superhydrophobic Nanostructured Surfaces. *Nano Letters* [online]. 2013, **13**(1), 179–187 [cit. 2023-01-27]. ISSN 1530-6984. Dostupné z: doi:10.1021/nl303835d
- [41] EL FIL, Bachir, Girish KINI a Srinivas GARIMELLA. A review of dropwise condensation: Theory, modeling, experiments, and applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2020, **160**, 120712 [cit. 2023-01-27]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120172
- [42] ZHAO, Guanlei, Guisheng ZOU, Wengan WANG, et al. Competing Effects between Condensation and Self-Removal of Water Droplets Determine Antifrosting Performance of Superhydrophobic Surfaces. *ACS Applied Materials & Interfaces* [online]. 2020, **12**(6), 7805–7814 [cit. 2023-01-27]. ISSN 1944-8244. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.9b21704
- [43] SCHMIDT, E., W. SCHURIG a W. SELLSCHOPP. Versuche über die Kondensation von Wasserdampf in Film- und Tropfenform. *Technische Mechanik und Thermodynamik* [online]. 1930, **1**(2), 53–63 [cit. 2023-01-27]. ISSN 0015-7899. Dostupné z: doi:10.1007/BF02641051
- [44] ZHANG, Lenan, Zhenyuan XU, Zhengmao LU, Jianyi DU a Evelyn N. WANG. Size distribution theory for jumping-droplet condensation. *Applied Physics Letters*

- [online]. 2019, **114**(16) [cit. 2023-01-27]. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.5081053
- [45] Condensers. In: *GE Steam Power* [online]. General Electric, ©2023 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://www.ge.com/steam-power/products/heat-exchange/condenser>
- [46] *Standards for steam surface condensers*. 10th ed. Cleveland (Ohio): HEAT EXCHANGE INSTITUTE, 2006.
- [47] Process requirements of heat exchanging equipment (project standards and specifications). In: *KLM Technology Group* [online]. Revision 01. Johor Bahru (Malaysia): KLM Technology Group, June 2011 [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: https://www.klmtechgroup.com/PDF/ess/PROJECT_STANDARDS_AND_SPECIFICATIONS_process_requirements_heat_exchangers_Rev01.pdf
- [48] WEBB, Ralph L. Enhanced Condenser Tubes in a Nuclear Power Plant for Heat Rate Improvement. *Heat Transfer Engineering* [online]. 2011, **32**(10), 905–913 [cit. 2022-12-28]. ISSN 0145-7632. Dostupné z: doi:10.1080/01457632.2011.562756
- [49] MOUSA, Mohamed H., Nenad MILJKOVIC a Kashif NAWAZ. Review of heat transfer enhancement techniques for single phase flows. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2021, **137** [cit. 2022-12-28]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2020.110566
- [50] VUT BRNO. Fakulta strojního inženýrství. TECHNOLOGIE ZAVÁLCOVÁNÍ. TRUBEK [TECHNOLOGIE ZAVÁLCOVÁNÍ TRUBEK]. In: *DocPlayer* [online]. 2016 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/13624393-Technologie-zavalcovani-trubek-cvieni-1-1-technologie-zavalcovani-trubek-uvod.html>
- [51] SATO, Kenji, Akihiro TANIGUCHI, Takafumi KAMADA, Ryoji YOSHIMURA a Yoshio MOCHIDA. New Tube Arrangement of Condenser for Power Stations. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering* [online]. 1998, **41**(3), 752–758 [cit. 2022-12-29]. ISSN 1340-8054. Dostupné z: doi:10.1299/jsmeb.41.752
- [52] ZENG, Hui, Ji'an MENG a Zhixin LI. Numerical study of a power plant condenser tube arrangement. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2012, **40**, 294–303 [cit. 2022-12-29]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.02.028
- [53] Steam turbine condensers. In: *Plant Automation Technology* [online]. [Telangana]: Ochre Media Pvt, ©2023 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://www.plantautomation-technology.com/products/balcke-duerr-polska-spz-oo/steam-turbine-condensers>
- [54] SOUČEK, Ondřej. Většina hodnoty dukovanské zakázky může zůstat v Česku, říká viceprezident EDF. In: *E15.cz* [online]. CZECH NEWS CENTER, 25.11.2022 [cit.

2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/rozhovory/vetsina-hodnoty-dukovanske-zakazky-muze-zustat-v-cesku-rika-viceprezident-edf-1395073>

- [55] ASMOLOV, V.G., I.N. GUSEV, V.R. KAZANSKIY, V.P. POVAROV a D.B. STATSURA. New generation first-of-the kind unit – VVER-1200 design features. *Nuclear Energy and Technology* [online]. 2017, 3(4), 260-269 [cit. 2022-12-28]. ISSN 24523038. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucet.2017.10.003
- [56] MIR.1200 UNIKÁTNÍ KNOW-HOW PRO ČESKOU ENERGETIKU. In: *Tretiruka.cz* [online]. Praha: České ekologické manažerské centrum, 13.07.2012 [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: [https://www.tretiruka.cz/news/mir-1200-unikatni-know-how-pro-ceskou-energetiku-/](https://www.tretiruka.cz/news/mir-1200-unikatni-know-how-pro-ceskou-energetiku/)

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Význam
BWR	varný reaktor chlazený a moderovaný lehkou vodou
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
INES	mezinárodní stupnice jaderných událostí
JE	jaderná elektrárna
MS	mezní stav
PHWR	tlakovodní reaktor chlazený a moderovaný těžkou vodou
PWR	tlakovodní reaktor chlazený a moderovaný lehkou vodou
VVER	tlakovodní reaktor chlazený a moderovaný lehkou vodou

Symbol	Jednotka	Veličina
b	mm	šířka trubkovnice
c	mm	šířka přepážky
$c_{p,f}$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	měrná tepelná kapacita filmu za konstantního tlaku
d_{in}	mm	vnitřní průměr trubky
d_{out}	mm	vnější průměr trubky
$d_{stř}$	mm	střední průměr trubky
f	–	součinitel tření na vnitřním průměru trubky
F	–	korekční součinitel zohledňující geometrii výměníku
g	$m \cdot s^{-2}$	gravitační zrychlení
h_k	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie syté vody
h_p	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie páry
h_{v1}	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie vstupující chladicí vody
h_{v2}	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie vystupující chladicí vody
i	–	průběžný index
k	–	průběžný index
L	m	délka trubky v 1 kondenzátoru
l_{23}	$J \cdot kg^{-1}$	měrné skupenské teplo kondenzace (mezi sytou párou a sytou vodou)
l_{23}^*	$J \cdot kg^{-1}$	modifikované měrné skupenské teplo kondenzace (mezi sytou párou a podchlazeným filmem)
$L_{AKTIVNÍ}$	m	teposměnná délka trubky v 1 kondenzátoru
$L_{TOTAL,1K}$	m	celkový součet teplosměnných délek všech trubek v 1 tělese kondenzátoru

\dot{m}_p	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	celkový hmotnostní průtok páry
\dot{m}_v	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	celkový hmotnostní průtok chladicí vody
$\dot{m}_{v,1V}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	hmotnostní průtok chladicí vody procházející 1 větví
$\dot{m}_{v,2K}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	hmotnostní průtok chladicí vody procházející 2 kondenzátory
N	–	počet trubek v 1 tělese kondenzátoru
N'	–	počet trubek v 1 tělese kondenzátoru
$N_{110 \%}$	–	počet trubek se zohledněním nejistot veličin
N_p	–	počet přepážek
N_{TPS}	–	počet trubek umístěných pod sebou
Nu_v	–	Nusseltovo číslo pro chladicí vodu
p_p	kPa	kondenzační tlak
p_v	MPa	tlak chladicí vody
Pr_v	–	Prandtlovo číslo pro chladicí vodu
\dot{Q}_{1K}	W	tepelný tok prostupující 1 kondenzátorem
\dot{Q}_K	W	celkový tepelný tok prostupující všemi kondenzátory
\dot{Q}_p	W	celkový tepelný tok odváděný páře
$\dot{Q}_{p,1K}$	W	tepelný tok odváděný páře v 1 kondenzátoru
\dot{Q}_v	W	celkový tepelný tok absorbovaný chladicí vodou
$\dot{Q}_{v,1K}$	W	tepelný tok absorbovaný chladicí vodou z 1 kondenzátoru
R_{in}	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$	tepelný odpor na vnitřní straně trubky
R_{out}	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$	tepelný odpor na vnější straně trubky
R_T	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$	tepelný odpor kondenzátoru
R_{tr}	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$	tepelný odpor stěny trubky
R_{us}	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$	tepelný odpor usazenin
Re_v	–	Reynoldsovo číslo pro chladicí vody
<i>ROZDIL</i>	K	rozdíl mezi odhadovanou a vypočtenou teplotou vnější stěny trubky
S	–	spolehlivost
S_A	–	spolehlivost koncepčního řešení A
S_B	–	spolehlivost koncepčního řešení B
S_{in}	m^2	obsah vnitřního průřezu trubky
S_{TS}	m^2	teplosměnná plocha kondenzátoru
$S_{TS,110 \%}$	m^2	teplosměnná plocha kondenzátoru po zohlednění nejistot veličin
t	mm	tloušťka trubky

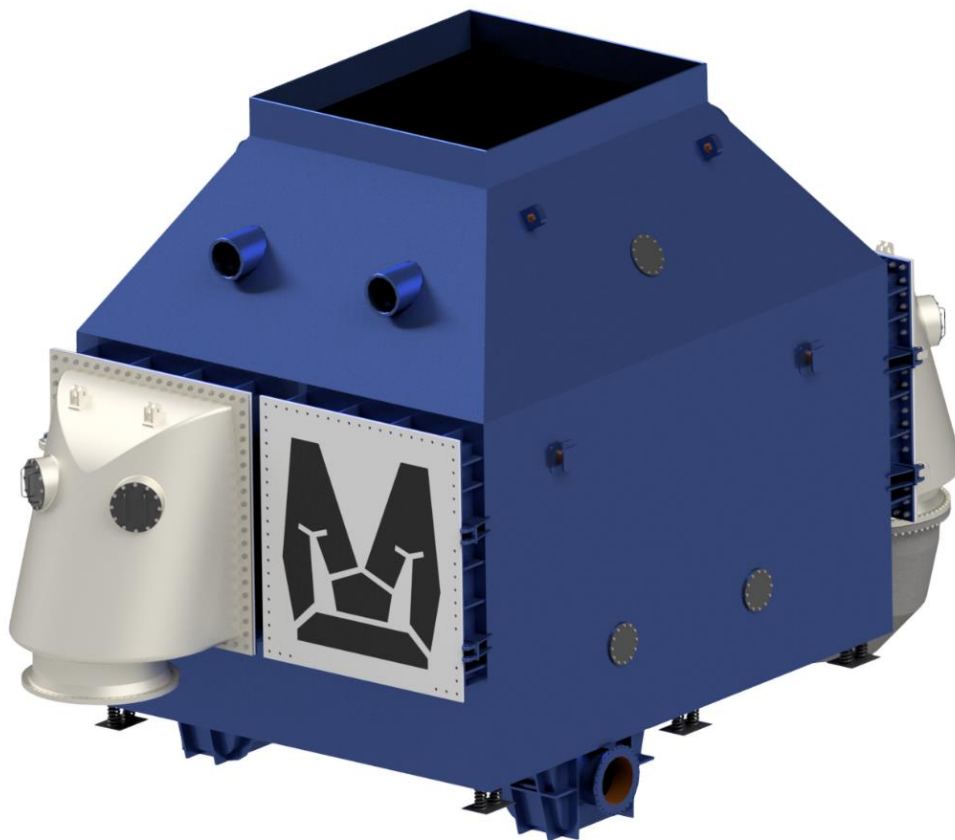
T	K	teplota
T_1	–	těleso 1
T_2	–	těleso 2
T_3	–	těleso 3
T_4	–	těleso 4
T_f	K	teplota kondenzátu (filmu)
T_p	K	teplota páry, teplota kondenzace
T_s	K	odhad teploty vnější stěny trubky
$T_{s,VYP}$	K	vypočtená teplota stěny trubky
T_{v1}	K	vstupní teplota chladicí vody
T_{v2}	K	výstupní teplota chladicí vody
$T_{v,stř}$	K	střední teplota chladicí vody
v_f	$m \cdot s^{-1}$	rychlost filmu
v_p	$m \cdot s^{-1}$	rychlost páry
w_v	$m \cdot s^{-1}$	skutečná střední rychlost chladicí vody
w'_v	$m \cdot s^{-1}$	předběžná střední rychlost chladicí vody
x	–	suchost páry
y	m	souřadnice y
z	m	souřadnice z
α_{in}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla na vodní straně
α_{out}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla na parní straně
δ	m	tloušťka filmu
Δh_{mod}	$J \cdot kg^{-1}$	měrné modifikované skupenské teplo kondenzace (mezi mokrou párou o suchosti x a podchlazeným kondenzátem)
ΔT_1	K	rozdíl koncových teplot kondenzátoru
ΔT_2	K	rozdíl koncových teplot kondenzátoru
$\Delta T_{ln,CF}$	K	střední logaritmický teplotní spád s uvažováním uspořádání jako v případě protiproudého výměníku tepla
λ_f	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti kondenzátu
λ_{Ti}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti titanu
λ_v	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti chladicí vody
μ_f	$Pa \cdot s$	dynamická viskozita kondenzátu
μ_v	$Pa \cdot s$	dynamická viskozita chladicí vody
ν_v	$m^2 \cdot s^{-1}$	kinematická viskozita chladicí vody
ρ_f	$kg \cdot m^{-3}$	hustota kondenzátu

ρ_p	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota páry
ρ_v	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota chladicí vody

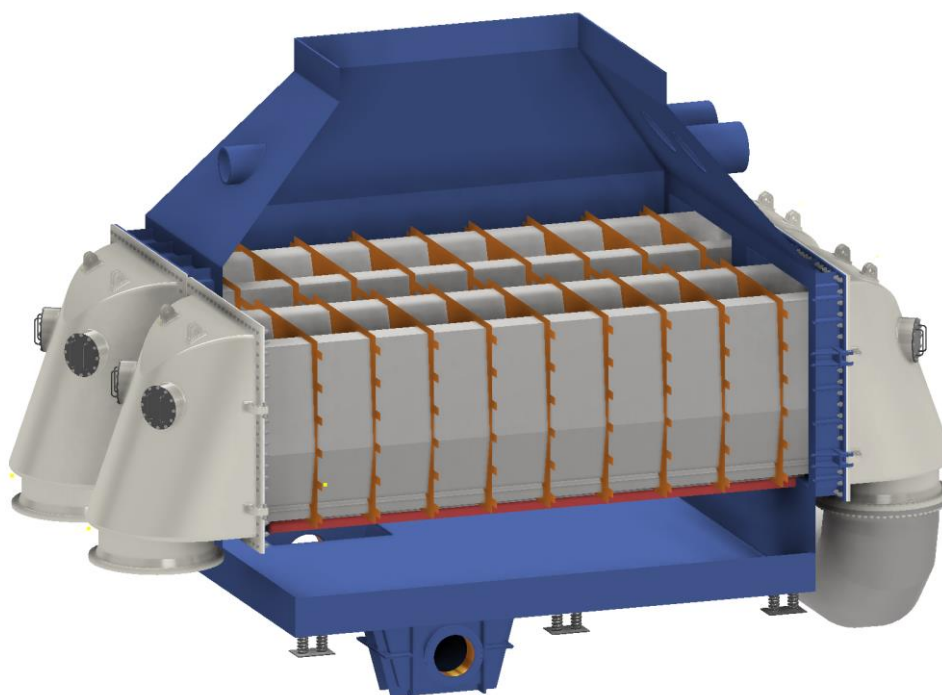
SEZNAM PŘÍLOH

Označení	Název
Příloha A	3D model kondenzátoru
BP-01-00	Kondenzátor

PŘÍLOHA A: 3D MODEL KONDENZÁTORU



Obr. A.1: Axonometrický pohled na těleso kondenzátoru



Obr. A.2: Těleso kondenzátoru v řezu