

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2022

**MATYÁŠ
JUNEK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Junek** Jméno: **Matyáš** Osobní číslo: **465389**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Jaderná energetická zařízení**
Studijní obor: **Jaderná energetická zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vývoj programu pro návrh mikrokanálkových výměníků v jazyce Python

Název diplomové práce anglicky:

PCHE design code development in Python programming language

Pokyny pro vypracování:

Práce bude zahrnovat tvorbu výpočetního kódu pro návrh mikrokanálkových výměníků v programovacím jazyce Python za využití knihovny CoolProp. Výstupem programu budou rozměry výměníku, termodynamické parametry a grafické výstupy v podobě grafů a csv souborů, vše pro libovolné kombinace okrajových podmínek. Program bude zaměřen především na výměníky se superkritickým CO₂.

Seznam doporučené literatury:

Klaus Brun, Peter Friedman and Richard Dennis, Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (sCO₂) Based Power Cycles, 2017
Bahman Zohuri, Compact Heat Exchangers - Selection, Application, Design and Evaluation, ISBN 978-3-319-29834-4, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29835-1>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Štěpánek, Ph.D. ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Vývoj programu pro návrh mikrokanálkových výměníků v jazyce Python jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Typ závěrečné práce	Diplomová práce
Autor	Bc. Matyáš Junek
Název	Vývoj programu pro návrh mikrokanálkových výměníků v jazyce Python
Školní rok	2021/2022
Ústav	Ústav energetiky Jaderná energetická zařízení
Vedoucí práce	Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.
Počet stran	69
Počet obrázků	26
Počet tabulek	9
Počet příloh	0

Klíčová slova mikrokanálkový výměník, program, DEMO, nadkritický oxid uhličitý, tepelný oběh

Abstrakt Mikrokanálkové tepelné výměníky (MKTV) jsou slibnou technologií pro uzavřené Braytonovy oběhy s nadkritickým oxidem uhličitým. Ty by mohly být použity i v budoucí fúzní elektrárně DEMO. Účel této práce je pomocí vyvinutého programu v jazyce Python přibližně určit velikost tepelných výměníků v DEMO. Náplní první části dokumentu je rešerše současného stavu fúzní technologie, problematiky Braytonových oběhů a mikrokanálkových výměníků. Následuje popis zmiňovaného programu, jeho validace a výpočet velikosti výměníků v DEMO. Výsledky ukazují, že rozměry závisí na geometrii MKTV.

Abstrakt (Anglicky) The printed circuit heat exchangers (PCHE) are promising technology for indirect Brayton cycles with supercritical carbon dioxide as a working fluid. A Brayton cycle could be used in the future fusion powerplant DEMO. The purpose of this thesis is to determine the dimensions of PCHE in the DEMO by a developed program written in the Python language. The first part of the thesis deals with the research of fusion technology, Brayton cycles, and PCHE. The written program is then described and validated and PCHE dimensions in DEMO are calculated. The results of this thesis describe the relation between PCHE geometry and its dimensions.

Poděkování

Veliké díky patří vedoucímu práce Ing. Janu Štěpánkovi, Ph.D. za četné konzultace v oblasti programovacího jazyka Python, tepelných oběhů a termohydrauliky, dále za poskytnutí okrajových podmínek pro výpočet a za odborné vedení.

Děkuji Ing. Janu Syblíkovi za cenné rady ohledně termohydrauliky.

Také děkuji Ing. Guk Chol Junovi, Ph.D. a Ing. Pavlovi Záchovi, Ph.D. za konzultace v oblasti mikrokanálkových tepelných výměníků.

Obsah

1	DEMO	15
1.1	Úvod do fúzních energetických zařízení	15
1.2	Popis technologií tokamaku ITER	15
1.2.1	Systémy magnetického udržení	16
1.2.2	Jaderné komponenty	17
1.2.3	Systémy ohřevu plazmatu	18
1.2.4	Systémy chlazení a vakuový systém	19
1.3	Primární okruh elektrárny DEMO	20
1.4	Sekundární okruh elektrárny DEMO	22
2	Braytonův oběh s nadkritickým CO₂	24
2.1	Úvod do sekundárních oběhů	24
2.2	Základy Braytonova cyklu	24
2.3	Výhody a nevýhody sCO ₂ oběhů	28
2.3.1	Porovnání Rankin-Clausiova a sCO ₂ Braytonova oběhu	28
2.3.2	Překážky pro využití Braytonova oběhu	28
2.4	Tepelné výměníky	29
2.4.1	Korpusové výměníky	29
2.4.2	Výměníky s mikrotrubkami	29
2.4.3	Deskové výměníky s žebry	30
2.4.4	Mikrokanálkové výměníky	30
2.5	Braytonův sCO ₂ oběh pro DEMO	31
2.5.1	Zdroje tepla pro helium chlazený blanket	31
2.5.2	Výběr sekundárního okruhu pro DEMO	31
2.6	Shrnutí kapitoly	33
3	Mikrokanálkové výměníky	34
3.1	Úvod do problematiky MKTV	34
3.2	Heatric	34
3.3	Výroba mikrokanálkového výměníku	35
3.4	Geometrie mikrokanálkového výměníku	35
3.4.1	Pevnostní výpočet	36
3.4.2	Uspořádání proudů a tvary kanálků	38
3.5	Termohydraulika MKTV	39
3.6	Mikrokanálkové výměníky pro Braytonovy oběhy	43
3.7	Shrnutí kapitoly	44
4	Popis programu pro výpočet mikrokanálkového výměníku	45
4.1	Úvod do kapitoly	45
4.2	Požadavky na program	45
4.3	Popis programu	46

4.3.1	Pevnostní výpočet	46
4.3.2	Základní tepelná bilance	48
4.3.3	Odhad velikosti TV	48
4.3.4	Výpočet velikosti TV	51
4.4	Validace	52
5	Výpočet tepelného výměníku pro elektrárnu DEMO	57
5.1	Úvod do výpočtové části	57
5.2	Okrajové podmínky a volba konfigurace	57
5.3	Výpočet a výsledky	59
5.4	Diskuze	63

Seznam obrázků

1.1	Schéma tokamaku [1]	16
1.2	Jaderné komponenty [2]	18
1.3	Technologie pro ohřev plazmatu neutrálními svazky v tokamaku ITER [2] .	19
1.4	Schéma konceptu HCPB [3]	21
1.5	Schéma konceptu HCLL [3]	21
1.6	Schéma konceptu WCLL [3]	22
1.7	Schéma konceptu DCLL [3]	22
2.1	Základní Braytonův cyklus	25
2.2	Rekuperační cyklus	26
2.3	Rekompresní cyklus	27
2.4	Schéma tepelného výměníku s mikrotrubkami	30
2.5	Deskový výměník s žebry [4]	31
2.6	Zdroje tepla pro HCPB DEMO [5]	32
2.7	Výkon a účinnost sekundárního okruhu DEMO v závislosti na výstupní teplotě z blanketu pro různé varianty sekundárních oběhů [6]	32
2.8	Porovnání schémat Braytonova a RC oběhu [6]	33
3.1	Mikrokanálový výměník [7]	35
3.2	Průřez MKTV	36
3.3	Nahrazení kanálků čtvercovým průřezem při pevnostním výpočtu [8]	36
3.6	Koncovky umístěné vně jádra MKTV	40
3.7	MKTV typu platelet (koncovky umístěné uvnitř jádra)	41
3.8	Vliv koncovek na termohydraulické charakteristiky MKTV [9]	43
4.1	Základní schéma programu pro výpočet velikosti MKTV	54
4.2	Schéma programové funkce pro odhad rozměrů MKTV	55
4.3	Schéma výpočtu pomocí elementů	56
5.1	Závislost objemu jádra MKTV na účinnosti výměníku	64
5.2	Závislost objemu jádra MKTV na maximální přípustné tlakové ztrátě . . .	64

Seznam tabulek

2.1	Charakteristiky zdrojů tepla pro HCPB DEMO.	31
4.1	Seznam vstupních parametrů	47
4.2	Seznam experimentálních hodnot pro validační proces	52
4.3	Porovnání skutečných a vypočítaných rozměrů MKTV	53
5.1	Seznam vstupních parametrů pro výpočet MKTV v DEMO	58
5.2	Výsledky výpočtu pro přímé kanálky	60
5.3	Výsledky výpočtu pro vlnité kanálky s úhlem $32,5^\circ$	61
5.4	Výsledky výpočtu pro vlnité kanálky s úhlem 40°	62
5.5	Porovnání rozměrů výměníků pro různé úhly θ	63

Seznam zkratek

AGR	Advanced Gass-cooled Reactor
BB	Breeding Blanket
DCLL	Double Cooled Lithium Lead
DEMO	Demonstrační fúzní elektrárna
DIV	Divertor
DT	Deuterium-Tritium
HCLL	Helium Cooled Lithium Lead
HCPB	Helium Cooled Pebble Bed
IB	Inner Blanket
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
JET	Joint European Torus
MKTV	Mikrokanálkový tepelný výměník
OB	Outer Blanket
RC	Rankine-Clausiusův
TV	Tepelný výměník
VV	Vacuum Vesel
WCLL	Water Cooled Lithium Lead
sCO ₂	Nadkritický oxid uhličitý

Seznam symbolů

V celé práci platí, že indexy c (jako *cold*) resp. h (jako *hot*) značí ohřívanou resp. ochlazovanou stranu tepelného výměníku. Podobně indexy in a out označují vstup a výstup do tepelného výměníku či do jeho části.

θ	[°]	úhel vnějí MKTV
α	[W/m ² /K]	součinitel přestupu tepla
ρ	[kg/m ³]	hustota
η	[%]	účinnost
λ	[W/m/K]	tepelná vodivost
δ	[%]	odchylka
Δp	[Pa]	tlaková ztráta
Δp_{MAX}	[Pa]	maximální přípustná tlaková ztráta
Δt_{LN}	[°C]	logaritmický teplotní spád
A	[m ²]	teplosměnná plocha
A_p	[m ²]	průtočná plocha
E	[1]	svárový koeficient
F_G	[1]	geometrický faktor
F_{SC}	[1]	serpentinový faktor
I	[kgm ²]	moment setrvačnosti
Nu	[1]	Nusseltovo číslo
O	[m ²]	obvod
P	[W]	výkon
P_{TV}	[1]	počet TV
Pr	[1]	Prandtlovo číslo
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
S_D	[N/m ²]	dovolené napětí
S_m	[N/m ²]	membránové napětí
S_o	[N/m ²]	ohybové napětí
V	[m ³]	objem
a	[m]	výška MKTV
b	[m]	šířka MKTV
c_p	[J/kg/K]	měrná tepelná kapacita
d	[mm]	průměr kanálku
d_h	[m]	hydraoulický průměr
e	[m]	absolutní drsnost povrchu
f	[1]	Darcyho součinitel tření
f_f	[1]	Fanningův součinitel tření
h	[J/kg]	měrná entalpie
h_w	[m]	tloušťka desky
k	[W/m ² /K]	součinitel prostupu tepla
l	[m]	délka TV či jeho úseku
n	[1]	počet desek v MKTV
p	[Pa]	tlak
p_f	[m]	rozteč vlnění
t	[°C]	teplota
t_{kd}	[m]	tloušťka stěny pro konduktivní prostup tepla

z	$[1]$	počet kanálků v jedné vrstvě
\dot{m}	$[kg/s]$	hmotnostní průtok
\dot{Q}	$[W]$	tepelný výkon

Úvod

Jak zajistit dostatečné množství energie, a to navíc šetrně k životnímu prostředí, udržitelně a zároveň s dobrou ekonomickou bilancí? To je otázka, o které se v poslední době vášnivě diskutuje a hledá se na ni odpověď.

Touto odpovědí by mohly v horizontu vyšších desítek let být fúzní elektrárny, které by ve svých reaktorech využívaly slučování jader lehkých prvků stejně jako se to děje ve hvězdách. Nejdosažitelnější fúzní reakce je reakce deuteria s tritiem, což jsou izotopy vodíku. Kromě vysokého energetického zisku nabízí fúzní elektrárny celou další řadu benefitů. Paliva je například prakticky neomezené množství, odpadním produktem je inertní plyn helium a z nutnosti dosahovat pro fúzi velmi vysokých teplot (stovky milionů °C) se jedná o inherentně bezpečnou technologii.

Po světě již bylo zprovozněno mnoho fúzních experimentálních reaktorů. Pozornost vědců i odborné veřejnosti se však nyní upírá směrem k budovanému tokamaku ITER. Bude to největší fúzní reaktor na světě. Jeho účelem je ověřit správnou funkci fúzních technologií a nebude tudíž dodávat energii do sítě. Získání zkušeností z ITER a ověření teoreticky předpovězeného chování plazmatu je předpokladem k vybudování první fúzní elektrárny zvané DEMO. Ta již bude obsahovat sekundární okruh pro výrobu elektrické energie. Bude mít za účel demonstrovat možnost využití fúze v energetice.

Sekundární okruhy prakticky na všech jaderných a uhelných elektrárnách jsou v současnosti založené na Rankine-Clausiově tepelném oběhu (RC oběh), který pracuje se změnou fáze voda-vodní pára. Pro některé aplikace se ovšem nabízí využít Braytonův plynový uzavřený oběh například s oxidem uhličitým jako pracovní látkou. Braytonův oběh v mnoha ohledech překonává Rankine-Clausiovův. Je jednodušší a má menší komponenty, z čehož pramení menší počáteční náklady. Při vysokých vstupních teplotách na turbínu může mít dokonce vyšší účinnost než RC oběh. Jedná se ovšem o novou a v praxi neozkoušenou technologii, která si nejprve musí získat důvěru inženýrů a investorů. Díky relativně vysokým teplotám média vycházejícího z reaktoru budoucí elektrárny DEMO lze uvažovat pro sekundární okruh právě Braytonův oběh s nadkritickým CO₂.

Za největší komponenty sekundární plynové smyčky platí tepelné výměníky (TV), ať už se jedná o ohřívače, ochlazovače nebo regenerační výměníky. Výrazné snížení zastavěné plochy i nákladů by proto mohly přinést kompaktní tepelné výměníky, které mají vysoký poměr teplosměnné plochy a celkového objemu. Jedním z nejvíce skloňovaných typů kompaktních TV v souvislosti s CO₂ oběhy jsou mikrokanálkové TV (MKTV). Díky výborné pevnosti vyvolané výrobním procesem, tzv. difuzivním svařováním, jsou vhodné pro vysoké tlaky a teploty v CO₂ smyčkách.

Účelem této práce je vyvinout program pro výpočet rozměrů MKTV v programovacím

jazyce Python a pomocí tohoto nástroje přibližně určit rozměry MKTV v budoucí fúzní elektrárně DEMO při použití sekundárního okruhu na principu Braytonova uzavřeného cyklu s nadkritickým oxidem uhličitým. Zmiňovaný program bere v potaz několik různých geometrií MKTV. Díky používaným tabulkám stavových veličin CoolProp lze počítat s mnoha tekutinami včetně oxidu uhličitého, helia, vody, vzduchu a řady průmyslových chladiv.

Detailnější přiblížení fúzní technologie, Braytonových sekundárních oběhů a mikrokanálkových výměníků stejně jako popis programu a výsledky studie pro určení rozměrů MKTV v elektrárně DEMO jsou náplní následujících stran.

Kapitola 1

DEMO

1.1 Úvod do fúzních energetických zařízení

Na základě zkušeností z experimentálního fúzního reaktoru ITER, bude vybudována první fúzní elektrárna zvaná DEMO. Ta bude mít za účel demonstrovat připravenost fúzní technologie pro využití v energetice. Stejně jako ITER, i DEMO bude ve svém principu tokamak, což má za následek pulzní režim elektrárny, minimálně do doby, než bude dostupná technologie pro neinduktivní generování proudu v plazmatu. DEMO bude mít několik primárních okruhů, sekundární okruh a pro pulzní režim také systémy pro úschovu tepla a elektrické energie. Popis fúzní technologie, konceptů pro primární okruh DEMO a zvažovaných konceptů sekundárních okruhů je náplní následující kapitoly.

1.2 Popis technologií tokamaku ITER

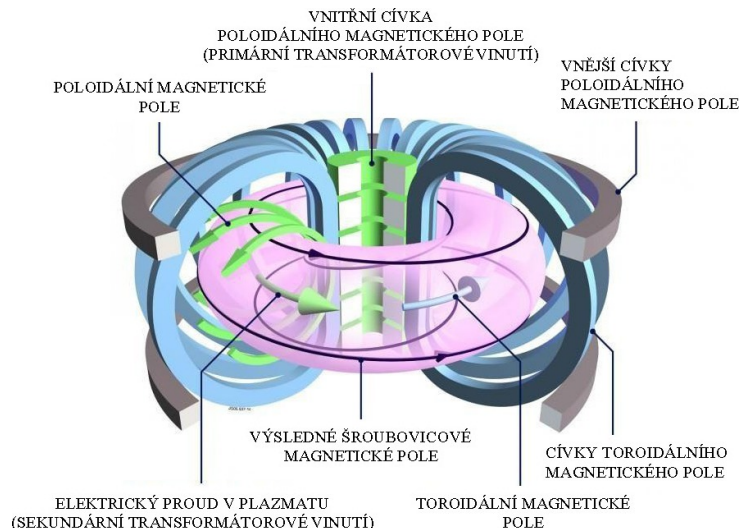
Technologie budoucí fúzní elektrárny bude navazovat na experimentální reaktor ITER. Na následujících stránkách jsou tedy technologie ITERu popsány.

DEMO, stejně jako ITER, bude s největší pravděpodobností ve své podstatě tokamak. Tento typ fúzního reaktoru udržuje plazma o teplotě stovek miliónů stupňů celsia ve vakuové nádobě pomocí magnetického pole. Jeho princip je na obrázku 1.1.

Jelikož se plazma (růžová barva na obr. 1.1) skládá z kladně nabitých iontů a záporně nabitých elektronů, lze na něj působit elektrickým či magnetickým polem a spoutat ho na delší dobu. Udržení plazmatu v tokamacích probíhá díky silnému toroidálnímu magnetickému poli generovaného cívkami toroidálního magnetického pole a díky poloidálnímu magnetickému poli, které je vytvářeno proudem v plazmatu. Součtem těchto polí vznikne pro tokamaky charakteristické helikální magnetické pole. Proud v plazmatu je indukován centrálním solenoidem.

Pro zvýšení četnosti fúzních reakcí je nutno docílit vysokých teplot. Z Lawsnova kritéria vyplývá, že dosažení energetického zisku při DT (deuterium-tritium) reakci je nejsnazší při teplotě paliva zhruba $163 \cdot 10^6$ °C [1]. Velikou výhodou tokamaku je možnost ohřevu plazmatu ohmickým teplem. Plazma má totiž elektrický odpor a proud jím protékající jej tudíž ohřívá. Plazma ale odpor s rostoucí teplotou ztrácí. Proto je nutné při několika desítkách miliónů stupňů zvolit jiné metody ohřevu [1].

Pro fúzní reaktory jsou typické vysoké hodnoty tepelného a neutronového toku. K tomu



Obrázek 1.1: Schéma tokamaku [1]

musí být uzpůsobena zóna v blízkosti plazmatu.

Fúzní reakce musí probíhat za téměř dokonalého vakua. Důležité je také chlazení supravodivých cívek a dalších komponent.

Nejdůležitější technologie tokamaku tedy jsou:

- systémy magnetického udržení,
- jaderné komponenty,
- systémy ohřevu plazmatu,
- systémy chlazení a vakuový systém.

1.2.1 Systémy magnetického udržení

Pro tokamak jsou nezákladnější tři druhy cívek:

- centrální solenoid,
- cívky toroidálního magnetického pole,
- cívky poloidálního magnetického pole.

Centrální solenoid indukuje transformátorovým efektem proud v plazmatu a proud v plazmatu generuje poloidální magnetické pole. Jejich feritická jádra se nyní nahrazují jádry vzduchovými.

Cívky toroidálního pole musí vyvolat velmi intenzivní magnetické pole. Mohou být z mědi či supravodičů a v tokamaku se jich nachází 16 až 32 [10]. Supravodiče mají za nízkých teplot (jednotky Kelvinů) prakticky nulový elektrický odpor a po naproudení, trvající v řádu dnů, generují magnetické pole i měsíce, a to bez nutnosti napájení. Velikých příkonů ale dosahují technologie pro chlazení supravodičů. Měď musí být chlazená na podstatně větší teplotu a měděné cívky mohou téměř okamžitě měnit hodnotu generovaného magnetického pole zvýšením či snížením napájecího příkonu.

Mají však vysoké ohmické ztráty. Hodnoty magnetického pole v tokamaku ITER v ose plazmatu budou díky supravodivým cívkám toroidálního magnetického pole dosahovat 5,3 T [2].

Cívky poloidálního pole jsou umístěny vně toru. Mají několik zásadních funkcí. Vyrovnávají tlak plazmatu v radiálním směru, tvarují plazma do divertorového tvaru a je jejich prostřednictvím reagováno na některé druhy nestabilit. Jelikož popisovaný druh cívek reaguje na nestability v plazmatu, je kladen důraz na jeho dynamičnost a musí mít dostatečný příkon. Díky divertorovému tvaru lze odvádět odpadní helium z plazmatu. Tvar je modelován prostřednictvím X-bodu, ve kterém se protínají poslední uzavřené siločáry. X-bod pak určuje polohu separatrix, což je poslední uzavřená siločára magnetického pole. Pokud nabitá částice separatrix překročí, je navedena na divertorové terče. Zde je ochlazená a odvedena z reaktoru.

1.2.2 Jaderné komponenty

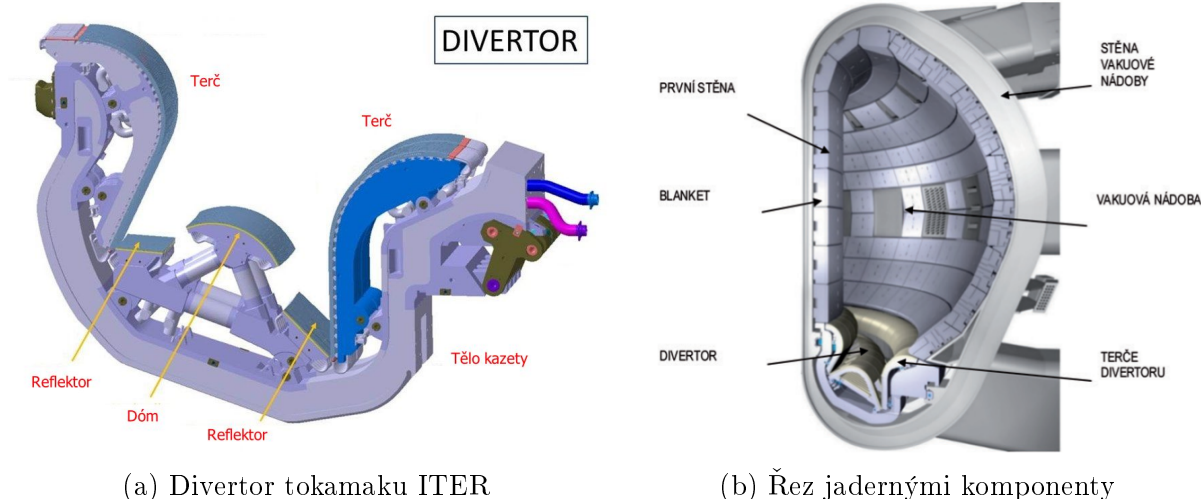
Mezi jaderné komponenty patří:

- první stěna,
- divertor,
- blanket.

Účelem první stěny je chránit zbytek zařízení před vysokým tepelným tokem. V tokamaku ITER bude hodnota tepelného toku na zmiňovaný prvek průměrně $0,5 \text{ MW/m}^2$, ale lokálně až 7 MW/m^2 [2]. První stěna může být obecně vyrobena z lehkých nebo těžkých prvků. Těžké prvky jako wolfram, molybden či cín mají výhodu ve vysoké teplotě tavení. Když fúzní částice s takovým prvkem interaguje, je nepravděpodobné, že těžký atom vytrhne z atomové mřížky. Na druhou stranu stačí malé množství těchto látek pro výrazné znečištění a ochlazení plazmatu, což může vést až k zastavení reakce. Lehčí prvky jako beryllium se naopak uvolňují z povrchu ve větším množství, ale plazma "snese" jejich větší koncentraci. Právě z berylia budou kostky navařené na měděných chladičích v první stěně reaktoru ITER. Chladiči bude protékat chladicí voda o teplotě 70 až 110°C při tlaku 4 MPa [1].

Divertor (obr. 1.2a) se skládá z divertorových terčů, nosné konstrukce a u některých reaktorů také z magnetických cívek. Na divertorové terče dopadají částice z okrajové vrstvy plazmatu, tedy především odpadní helium a nečistoty, které by jinak zpomalovaly fúzní reakci. Protože terče interagují přímo s plazmatem, jedná se o tepelně nejzatíženější součást celého tokamaku. Průměrný tepelný tok v tokamaku ITER bude na diskutovanou část 50 MW/m^2 a při nestabilitách může maximální hodnota dosáhnout dokonce až 20 GW/m^2 [3]. Divertorové terče se budou skládat z wolframových kostek navlečených na měděných trubkách, ve kterých bude proudit voda o teplotě 70 až 200°C [1].

Blanket, nacházející se mezi první stěnou a vnitřní částí vakuové nádoby, transformuje energii fúzních fotonů a neutronů na teplo, které následně může být využito na výrobu elektrické energie. V budoucích fúzních elektrárnách s DT palivem blanket také sehraje důležitou roli při výrobě tritia. Budou v něm totiž umístěny keramické kuličky s lithiem z Li_4SiO_4 či Li_2TiO_3 , nebo jím bude pomalu cirkulovat eutektická slitina LiPb. V obou případech je zásadní přítomnost lithia, jelikož při interakci s fúzním neutronem



Obrázek 1.2: Jaderné komponenty [2]

exotermicky reaguje za vzniku tritia. Tritium je v přírodě téměř nevyskytující se surovina, proto se bude vyrábět přímo v blanketech fúzních reaktorů.

1.2.3 Systémy ohřevu plazmatu

Nejsnadněji se fúzní reakce dosahuje při teplotě 163 °C . Na tuto teplotu je potřeba plazma ohřát. Ohřev plazmatu u současných reaktorů probíhá čtyřmi mechanismy:

- ohmickým odporem plazmatu,
- svazkem neutrálních atomů,
- elektromagnetickými vlnami,
- samoohřevem.

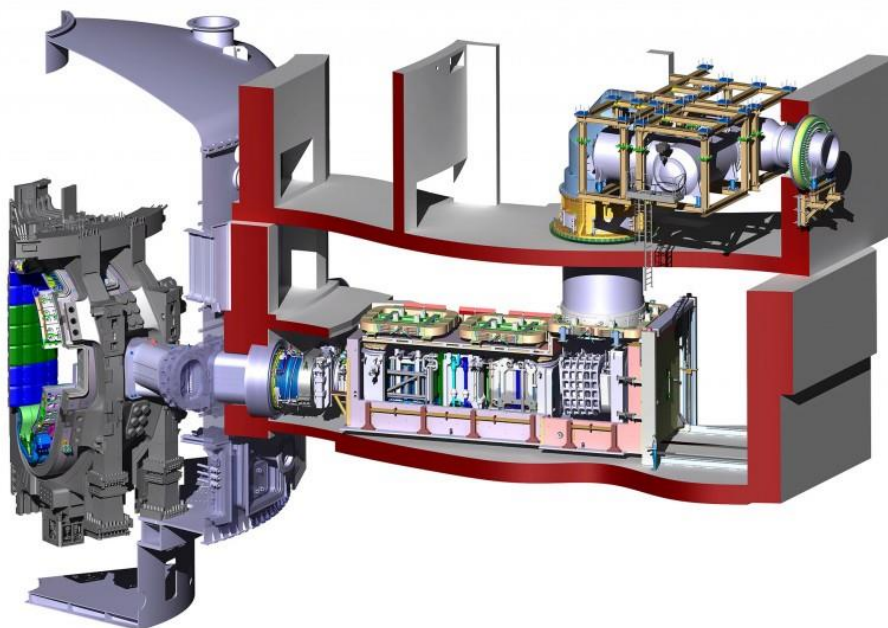
Ohřev ohmickým odporem je jednou z největších výhod tokamaků a stojí za jejich rozvojem v minulém století. Plazma má totiž elektrický odpor a v tokamaku jím protéká elektrický proud. Pokud vodičem s odporem protéká proud, část energie se přemění na teplo. Jinak tomu není ani v plazmatu. Ohmický ohřev umožní dosáhnout několik desítek miliónů °C . S rostoucí teplotou však odpor plazmatu klesá a je třeba využít jiné metody ohřevu [1].

Jednou z nich je ohřev pomocí svazků neutrálních atomů. Nejprve se deuteriový plyn ionizuje. Ionty deuteria se proto následně mohou urychlit v elektrickém poli. Urychlené ionty se proženou elektronovým plynem, ve kterém se neutralizují. Díky nulovému náboji pak mohou projít silným magnetickým polem až do centra plazmatu, kde se ionizují a předají svou energii palivu. Deuterium, které se při průchodu elektronovým plynem nezneutralizuje, končí v tzv. magnetické pasti. Kromě tepla se díky svazkům neutrálních atomů do komory dostává i nové palivo. Pro velká zařízení se budou urychlovat záporné ionty a ty budou následně neutralizovány odebráním příslušných elektronů. Účinnost neutralizace kladných iontů totiž s velikostí zařízení klesá. Technologie ohřevu pomocí svazků neutrálních atomů tokamaku ITER je na obrázku 1.3.

Pokud se ve správném směru do plazmatu vysílají elektromagnetické vlny o stejné

frekvenci jako je frekvence gyračního pohybu elektronů resp. iontů (rezonanční frekvence), předá se těmto částicím část energie zmiňovaného vlnění a plazma se tím pádem ohřeje. Rezonanční frekvence elektronů je přibližně 100 GHz a iontů v desítkách MHz. Pro větší reaktory se využívá spíše ohřev elektronů, jelikož elektrony se neúčastní fúzní reakce. Stejně jako systémy pro ohřev svazky neutrálních atomů, i systémy pro ohřev elektromagnetických vln budou přítomny v tokamaku ITER.

Fúzní reakce produkuje energii a část z této energie plazma ohřívá. Tento jev se nazývá samoohřev plazmatu. Samoohřev má však významnější vliv jen u větších tokamaků. Například v zařízení JET nahrazoval samoohřev 13 % celkového ztrátového výkonu. Předpokládá se, že v ITER již bude samoohřev hrát výraznou roli a dosahovat 2/3 ztrátového výkonu. Účinnost ohřevu hraje velkou roli v celkové účinnosti zařízení a je důležitým parametrem vstupujícím do Lawsonova kritéria inženýrské rovnováhy.



Obrázek 1.3: Technologie pro ohřev plazmatu neutrálními svazky v tokamaku ITER [2]

1.2.4 Systémy chlazení a vakuový systém

Jak již bylo zmíněno, fúzní palivo musí být téměř dokonale čisté (až na odpadní helium). Všechny látky v komoře kromě vodíku musí mít parciální tlak 10^{-7} Pa (hluboké vakuum) [1]. Zajištění požadovaného tlaku má na starosti celkem 8 kryovývěv [2]. V každé kryovývěvě je na nerezovém panelu, chlazeném heliem o teplotě 4,5 K, nanesen kryosorbent z aktivního uhlí. Jakákoliv částice, která se dotkne kryosorbentu v podstatě přimrzne na jeho povrchu. To je důvod, proč se používá pórovité aktivní uhlí; pro zvětšení povrchu a tím i zvětšení šance záchytu částice. V každé chvíli budou v tokamaku ITER pracovat pouze 2 kryovývěvy a to vždy 150 s. Po této době se totiž aktivní uhlí nasýtí a zařízení musí 450 s procházet regenerací, při níž se zvyšuje teplota a nahromaděný plyn se tak uvolní a následně odčerpá.

Pro chlazení kryovývěv, ale i supravodivých cívek se bude používat helium o teplotě 4,5 K [2]. Jeho produkci bude zastávat kryostanice.

Mezi komorou a supravodiči se bude nacházet postříbřený tepelný štít, aby se zabránilo přenosu tepla radiací.

Celá vakuová komora bude umístěna v kryostatu. Kryostat musí udržovat tlak na hodnotě 10^{-4} Pa, aby se zabránilo výměně tepla kondukcí [10].

1.3 Primární okruh elektrárny DEMO

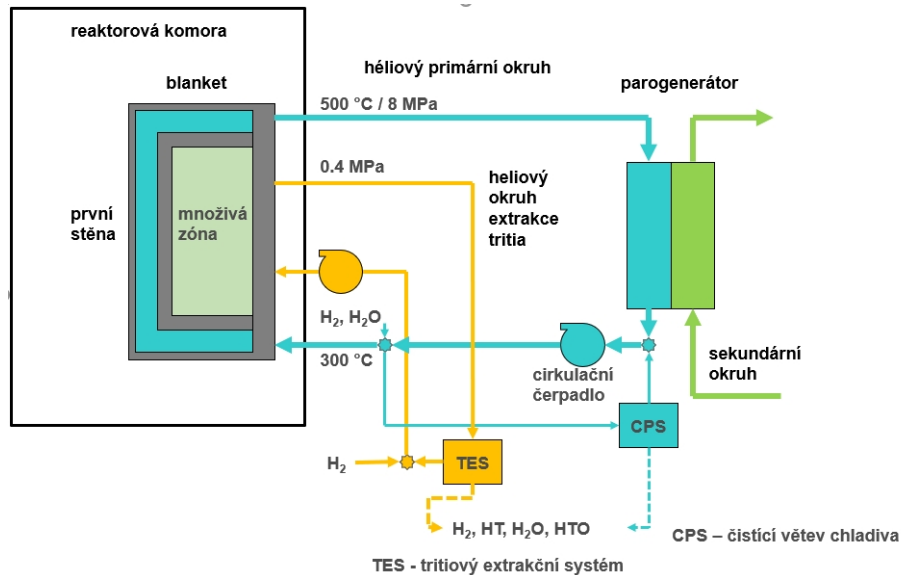
Ve elektrárně DEMO se počítá s několika primárními okruhy pro chlazení různých částí reaktoru. Samostatný okruh pravděpodobně bude pro blanket, divertor a vakuovou komoru [11]. Jako primární chladivo může být použito buď voda nebo helium.

První jmenovaná látka má dobré chladicí vlastnosti, ale nevyhovuje z provozního hlediska. Jedná se o korozivní kapalinu, což má dopad na životnost potrubí. Produkty koroze, stejně jako kyslík, se mohou vlivem neutronového toku rozpadnout na radioaktivní látky. Při poškození potrubí by se voda mohla dostat do kontaktu s lithiem, které bude v blanketu přítomno pro výrobu tritia. Při úniku chladiva do vakuové komory by se muselo celé odčerpát, jelikož jaderná fúze musí probíhat za téměř dokonalého vakua a molekuly vody by plazma ochlazovaly. Tento proces by vyžadoval dlouhou odstávku.

Helium je inertní plyn, který nezpůsobuje korozi a vlivem neutronů se neaktivuje. V případě úniku do vakuové komory se snadno a rychle odčerpá. Má ale horší teplotnické vlastnosti než voda, a protože se jedná o plyn, kompresory musí mít vysoké příkony.

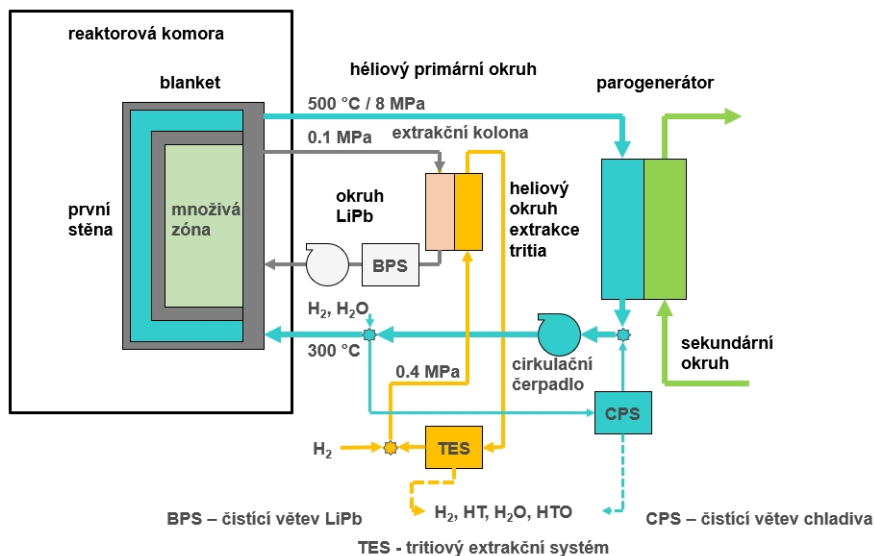
Pro DEMO byly navrženy čtyři koncepty primárních okruhů, a to především podle typu primárního chladiva, chlazení blanketu a způsobu extrakce tritia [12].

První z nich je HCPB (*Helium Cooled Pebble Bed*). Jedná se o blanket s keramickými kuličkami s lithiem pro produkci tritia. Schéma tohoto konceptu je na obrázku 1.4. Pro chlazení je použito helium stejně jako pro extrakci tritia. Tlak helia má být 8 MPa, vstupní teplota do blanketu 300°C a výstupní teplota 520°C .



Obrázek 1.4: Schéma konceptu HCPB [3]

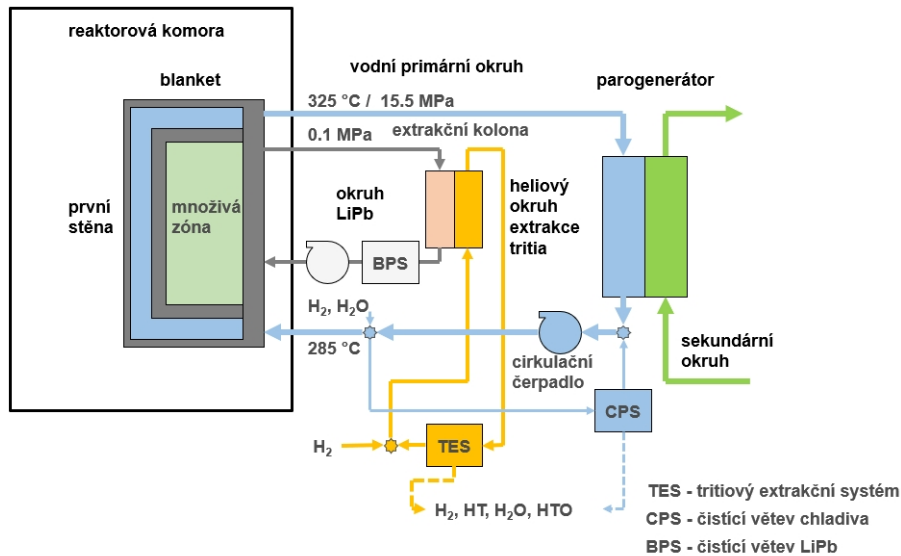
Na obrázku 1.5 je znázorněn koncept HCLL (*Helium Cooled Lithium Lead*). V tomto případě, stejně jako v předchozím, se jedná o blanket chlazený heliem. Pro produkci tritia je ale použita eutektická slitina LiPb, která má proudit potrubím o tlaku 0,1 MPa. V extrakční koloně se LiPb profukuje heliem. Helium potom unáší tritium do extrakčního systému. Zde probíhá kolekce tritia. Tlak helia v primárním okruhu je 8 MPa, vstupní teplota 300 °C a výstupní teplota 520 °C [12].



Obrázek 1.5: Schéma konceptu HCLL [3]

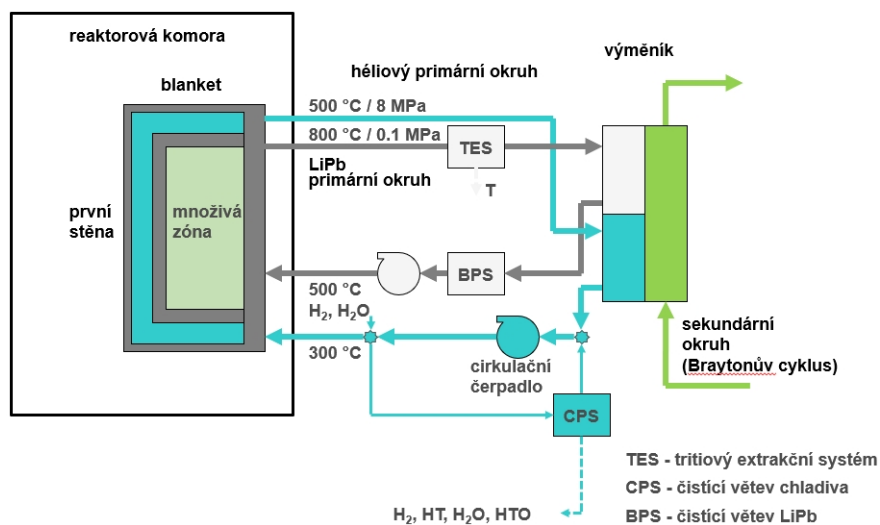
Ve třetím konceptu znázorněném na obrázku 1.6 se počítá s vodou o teplotě 285/325 °C a tlaku 15,5 MPa jako s primárním chladivem [13]. Jedná se o WCLL (*Water Cooled Lithium Lead*). Pro extrakci tritia byl zvolen systém stejný jako v předchozím případě. Pro přeměnu tepla na práci turbíny by byl použit parní oběh.

Poslední koncept (obr. 1.7) má zkratku DCLL (*Double Cooled Lithium Lead*). Eutektická slitina LiPb je zde použita nejen pro produkci tritia, ale rovněž jako chladivo. Blanket je však chlazen zároveň heliem. LiPb lze ohřát na vysokou teplotu (až



Obrázek 1.6: Schéma konceptu WCLL [3]

800°C). To by umožňovalo použít na sekundární straně Braytonův plynový oběh se superkritickým CO₂ či Heliem a výrazně tím zvýšit účinnost celé elektrárny. V současné chvíli ale nejsou dostupné vysokoteplotní materiály pro LiPb a zároveň je nedostatečná zkušenost s uzavřenými Braytonovými oběhy se superkritickým CO₂ v technické praxi. V DCLL se proto zatím počítá s teplotou eutektické slitiny maximálně do 550°C. Výhodou při použití LiPb by byl nízký tlak v okruhu 0,1 MPa a relativně nízké tlakové ztráty[14].



Obrázek 1.7: Schéma konceptu DCLL [3]

1.4 Sekundární okruh elektrárny DEMO

V případě DEMO lze uvažovat o Rankin-Clausiově (RC) parním oběhu, či Braytonově uzavřeném plynovém oběhu. Hlavní výhodou RC cyklu je bohatá zkušenost s jeho aplikacemi v jaderných a uhelných elektrárnách a také vyšší účinnost. Použití Braytonova (zejména s nadkritickým CO₂) oběhu nabízí výrazné snížení počátečních

nákladů, jednoduchost a menší zastavěnou plochu. Sekundárním oběhům se detailněji věnuje následující kapitola.

Kapitola 2

Braytonův oběh s nadkritickým CO₂

2.1 Úvod do sekundárních oběhů

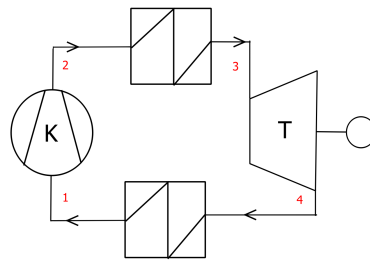
V elektrárně DEMO lze jako typ tepelného sekundárního oběhu zvolit Rankine-Clausiový parní cyklus nebo Braytonův plynový cyklus. Druhý jmenovaný dosahuje relevantních účinností za předpokladu vyšších teplot na turbínu. Proto se o něm v případě elektrárny DEMO uvažuje v souvislosti s heliem jako chladivem blanketu, protože z reaktoru bude vycházet o poměrně vysoké teplotě cca 520°C.

Braytonův cyklus se dělí na otevřený oběh spalovací turbíny a uzavřený oběh plynové turbíny. V prvním případě se pracovní látka ohřívá chemickou reakcí a odpadní produkty jsou vypouštěny do atmosféry. Tento postup je běžný u elektráren na zemní plyn. V druhém případě se teplo pracovnímu mediu předává pomocí tepelného výměníku a po expanzi na plynové turbíně toto medium znovu putuje do kompresoru. Pro využití ve fúzní elektrárně připadá v úvahu pouze uzavřený Braytonův cyklus. Následující kapitola tedy pojednává o něm.

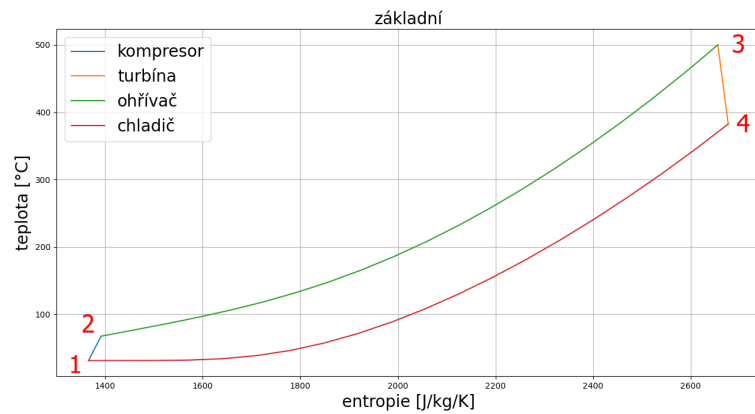
2.2 Základy Braytonova cyklu

Jednoduchý Braytonův cyklus je schématicky vyobrazen na obrázku č. 2.1a. Základní technologické prvky jsou kompresor (K), turbína (T) a tepelné výměníky. Pracovní látka nejprve vstupuje do kompresoru, kde se zvýší tlak z hodnoty p_{min} na hodnotu p_{max} . Tato změna je znázorněna v T-s diagramu (obr. 2.1b) mezi stavy 1 a 2. Mezi stavy 2 a 3 se plyn ohřívá v tepelném výměníku a mezi 3 a 4 probíhá expanze na turbíně. Pracovní medium je následně přivedeno do tepelného výměníku, kde se z něj odvádí odpadní teplo (stav 4-1) a oběh se tak uzavře.

Pro zvýšení účinnosti se využívá Braytonova oběhu s regenerací, také označovaného jako rekuperační cyklus. Jeho schéma a T-s diagram jsou na obrázku 2.2a a 2.2b. Plyn v kompresoru (K), stejně jako v předchozím případě, zvýší svůj tlak na maximální hodnotu (změna 1-2). Následně se tomuto plynu dodá teplo v rekuperačním výměníku (REK). To je znázorněno mezi stavy 2 a 6. Mezi 6 a 3 se do oběhu dodává teplo ze zdroje tepla. Na turbíně potom pracovní látka expanduje a odvádí se práce (3-4). Protože má plyn po expanzi stále vysokou teplotu, odvede se do rekuperačního výměníku. Zde předá zbytkové teplo, které by se jinak bez užitku odvedlo, studené pracovní látce vystupující z kompresoru (4-5). Mezi stavy 5 a 1 následuje dochlazování plynu. Díky regeneračnímu ohřevu v rekuperačních výměnících se sníží množství odvedeného tepla a tím se zvýší

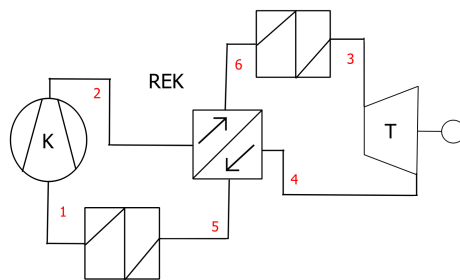


(a) Schéma zapojení základního Braytonova cyklu

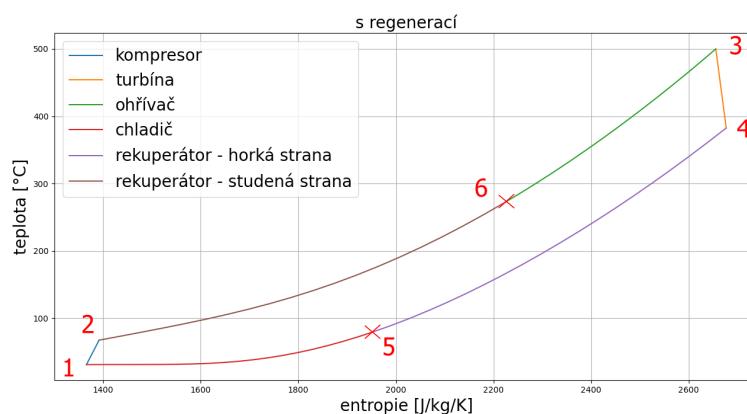


(b) Ts diagram základního Braytonova cyklu

Obrázek 2.1: Základní Braytonův cyklus



(a) Schéma rekuperačního Braytonova cyklu



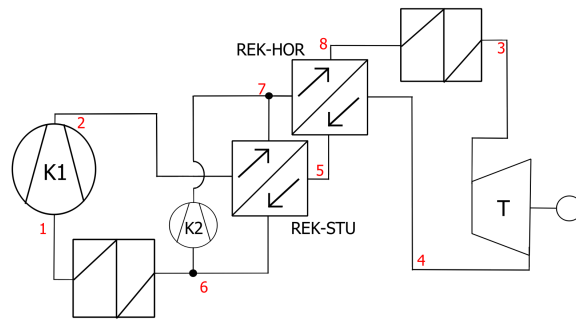
(b) Ts diagram rekuperačního Braytonova cyklu

Obrázek 2.2: Rekuperační cyklus

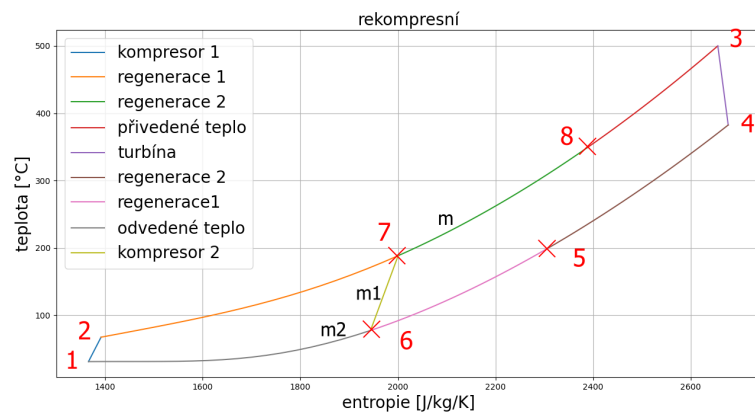
účinnost oběhu. Na druhé straně se cyklus komplikuje a zvyšují se tlakové ztráty.

Rekompresní oběh je další modifikace Braytonova cyklu. Ten obsahuje (viz. obr. 2.3a) hlavní kompresor (K1), sekundární kompresor (K2), studený rekuperátor (REK-STU), horký rekuperátor (REK-HOR), turbínu (T) a tepelné výměníky pro přívod a odvod tepla. Jak je zřejmé z T-s diagramu (2.3b), mezi stavy 1 a 2 se v kompresoru zvýší tlak plynu. Následuje ohřev plynu ve studeném a horkém rekuperátoru (2-7-8) a poté ohřev od zdroje tepla (8-3). Mezi stavy 3 a 4 probíhá expanze na turbíně. Při změně 4 a 5 předává pracovní látka v horkém rekuperátoru teplo pracovní látce mezi stavy 7 a 8. Podobně při změně 5 a 6 předává pracovní látka ve studeném rekuperátoru teplo pracovní látce mezi stavy 2 a 7. Poté se však od hmotnostního toku m oddělí hmotnostní tok m_1 , kterému se pomocí sekundárního kompresoru zvýší tlak na maximální hodnotu a následně se smísí s hlavním hmotnostním tokem ve stavu 7. Z bodu 6 pokračuje hmotnostní tok m_2 do bodu 1 a je z něj odváděno teplo. Využití rekuperačního cyklu znamená více komplikovaný oběh, ale zvýšení účinnosti.

Kromě zmiňovaných podtypů Braytonova cyklu existuje ještě celá řada jiných uspořádání. Ty se ale většinou vážou ke konkrétním aplikacím. Za zmínku ještě stojí takzvaný prekompresní oběh. Ten využívá dělené komprese s mezichlazením a tedy jednoho kompresoru navíc.



(a) Schéma rekompresního cyklu



(b) Ts diagram rekompresního cyklu

Obrázek 2.3: Rekompresní cyklus

2.3 Výhody a nevýhody sCO₂ oběhů

2.3.1 Porovnání Rankin-Clausiova a sCO₂ Braytonova oběhu

Rozdílnosti, výhody a nevýhody plynového a parního oběhu vychází z jejich samotné podstaty, a to že parní oběh pracuje se změnou fáze, zatímco plynový nikoliv.

Díky čerpání téměř nestlačitelné kapaliny je příkon čerpadel při RC cyklu obvykle zanedbatelný. Což ale nelze tvrdit o příkonu kompresorů stlačující plyn na vysoký tlak při Braytonově oběhu. CO₂ má oproti jiným plynům výhodu v pozici kritického bodu přibližně na teplotě 31°C. V okolí kritického bodu lze zvýšit tlak CO₂ při menším ohřátí plynu Δt , než kdyby proces probíhal při vyšších teplotách, což umožňuje menší práci kompresoru. I přes to je však příkon kompresorů mnohonásobně větší než čerpadel u parního oběhu.

Hustota oxidu uhličitého při expanzi na turbíně je větší než hustota páry. Proto turbíny pracující s CO₂ budou výrazně menší a lehčí než turbíny parní o stejném výkonu.

Odvod tepla z RC oběhu probíhá v kondenzátoru. Pro dosažení co nejmenšího tlaku se musí chladit na co nejmenší možnou teplotu. Proto je důležité mít k dispozici co největší množství chladicí vody o co nejmenší teplotě. Oxid uhličitý při Braytonově cyklu neprochází fázovou změnou. Limitní dochlazovací teplota je dána především maximální přípustnou teplosměnnou plochou ochlazovacího výměníku. Ve většině aplikacích se pohybuje kolem 30°C, což je teplota blízká kritickému bodu CO₂. Proto připadá v úvahu i chlazení vzduchem v oblastech bez přístupu k vodě [15].

Pro optimalizaci RC oběhu se využívá mezipříhřevu páry a předehřevu napájecí vody. Ačkoliv tyto systémy zvyšují účinnost, značně komplikují celou smyčku, zvyšují celkovou délku potrubí a zvyšují počáteční náklady. Pro Braytonův oběh je potřeba menší počet hlavních komponent jako jsou kompresory, turbíny či výměníky. Braytonův sCO₂ oběh je tedy obecně jednodušší a má menší počáteční náklady.

RC cyklus obecně překonává Braytonův oběh z hlediska účinnosti při menších vstupních teplotách na turbínu, při vyšších teplotách je však výhodnější Braytonův [15].

2.3.2 Překážky pro využití Braytonova oběhu

Jak již bylo zmíněno, Braytonův oběh začíná vynikat při vyšších maximálních teplotách, které se pro některé aplikace uvažují až 750°C (max. teploty u RC oběhu jsou cca 620°C). Vysoké by byly také maximální tlaky, a to 20 – 30 MPa. Nadkritické CO₂ o vyšších teplotách je navíc erozivní a má vysokou difuzivitu, což souvisí s jeho poměrně vysokou korozivitou. Oxid uhličitý je také velmi dobré rozpouštědlo, takže je obtížné tuto látku udržet čistou. Právě kombinace vysokých teplot, tlaků a vlastností CO₂ kladou vysoké nároky na konstrukční materiály. Materiály odolávající vysokým teplotám a zároveň vlastnostem sCO₂ jsou velmi drahé a zkušeností z provozu není mnoho. CO₂ bylo například použito jako chladivo aktivní zóny o teplotě přibližně 640°C v jaderných elektrárnách typu AGR (Advanced Gas-cooled Reactor). Látka zde ale nebyla přítomna v nadkritickém stavu.

Dalším problémem jsou dynamicky se měnící vlastnosti oxidu uhličitého v okolí kritického bodu. Prudké změny mohou neblaze působit na kompresor a způsobovat v

něm nestability.

Pro dosažení vysokých účinností je nutný vysoký stupeň rekuperačního ohřevu. Kvůli tomu se potom teplo od tepelného zdroje musí předávat jen v poměrně úzkém rozmezí teplot. Je tedy možné, že by se část tepla zdroje bez užitku odvedla.

Braytonův uzavřený okruh s $s\text{CO}_2$ by mohl být z ekonomického hlediska výhodnější než okruh parní, nicméně je to v praxi neozkoušená technologie. Naproti tomu technologie parního okruhu je dobře známá, optimalizovaná a používaná desítky let. Proto zatím neexistují komerční sekundární okruhy na bázi $s\text{CO}_2$.

2.4 Tepelné výměníky

Tepelné výměníky (TV) pro Braytonův cyklus s $s\text{CO}_2$ mají vliv na celkovou účinnost systému, jeho rozměry a cenu. Oběh bude obsahovat tři typy TV. Ohříváky pro ohřev pracovního media, rekuperátory pro regenerační ohřev a chladiče pro odvod tepla z oběhu.

Ohříváky budou předávat energii tepelného zdroje oxidu uhličitému. Materiály, které by odolaly vlastnostem $s\text{CO}_2$ při vysokém tlaku a při teplotách tekutin proudících výměníkem nad 600°C jsou velmi drahé. Pro tento účel by mohly být použity například niklové slitiny s vysokým obsahem niklu.

Rekuperátory jsou také vystaveny vysoké teplotě a navíc velikým rozdílům tlaků mezi jednotlivými stranami. Je výhodné jejich rozdělení na vysokoteplotní a nízkoteplotní výměníky, při čemž drahé vysokoteplotní konstrukční materiály by byly použity jen na vysokoteplotní rekuperátor. Nízkoteplotní rekuperátor by odváděl největší část práce a nacházel by se v něm nejmenší rozdíl teplot mezi horkou a studenou tekutinou.

Účelem chladičů je odvádět teplo pryč z oběhu. Jejich konstrukce závisí na typu chladiva (voda či vzduch). Tyto výměníky budou pracovat s CO_2 velmi blízko kritickému bodu, kde se rychle mění jeho vlastnosti. Na to musí být TV navržen [16].

Pro $s\text{CO}_2$ Braytonův cyklus přicházejí v úvahu TV korpusové, kanálkové, deskové s žebry nebo s mikrotrubkami [16].

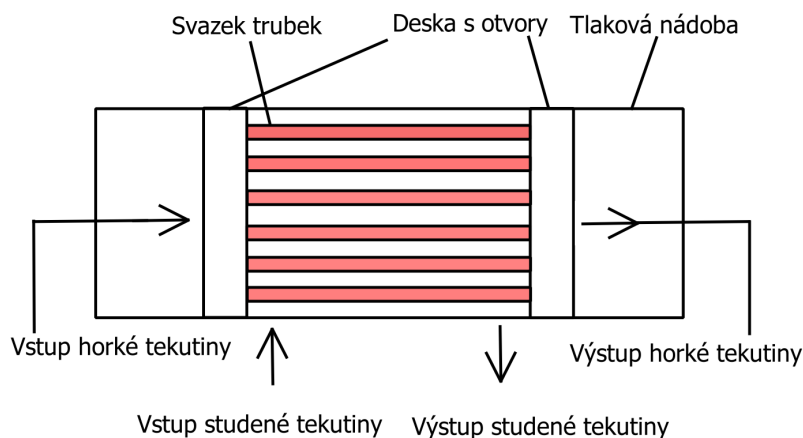
2.4.1 Korpusové výměníky

Korpusové TV jsou běžnou součástí průmyslových aplikací. V korpusu jsou umístěné svazky trubek, kterými proudí teplejší tekutina. Studenější tekutina proudí vně trubek. Pro zvýšení přestupu tepla se do TV instalují překážky, které usměrňují tok vně trubek na křížový a zesilují turbulence. Také však zvyšují tlakové ztráty [16].

2.4.2 Výměníky s mikrotrubkami

Výměníky s mikrotrubkami (obr. 2.4) se od klasických korpusových TV liší malým průměrem trubek (1 mm) a nevyužíváním překážek pro usměrnění proudu. Trubičky, kterými proudí horká tekutina, jsou uspořádány do svazků. Svazky se umístí do dvou desek s otvory. Studená tekutina protéká mezi trubičkami ve svazku. Jedná se o téměř dokonalé protiproudé uspořádání. To je zde možno využít díky velké teplosměnné ploše

zajišťované mikrotrubičkami a tím i vysokým přestupem tepla. Díky absenci překážek pro usměrňování proudu na křížový se snižují tlakové ztráty a díky lepšímu přestupu tepla se zmenšují celkové rozměry zařízení [16].



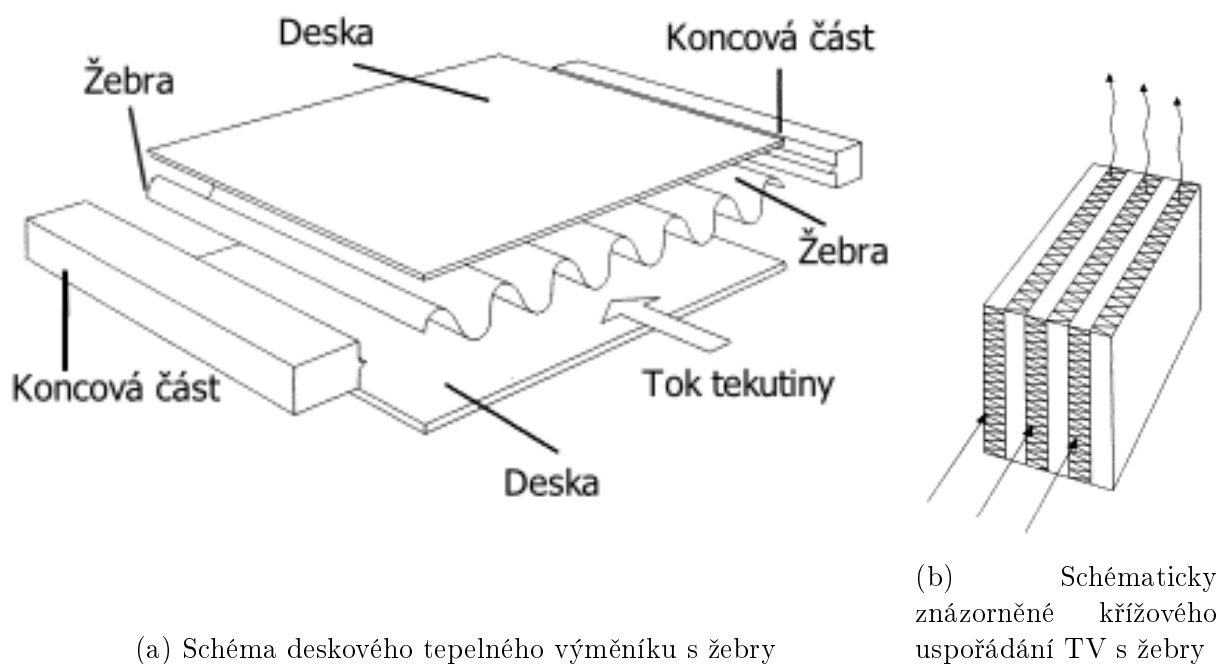
Obrázek 2.4: Schéma tepelného výměníku s mikrotrubičkami

2.4.3 Deskové výměníky s žebry

Schéma deskového výměníku s žebry je na obrázku č. 2.5. Základní části tohoto TV jsou desky, žebrování a koncové části. Tekutina protéká žebrováním, které je sevřeno dvěma deskami a ze stran zajištěno koncovými částmi. Dvě desky, žebrování a dvě koncové části tvoří blok. Bloky se následně nanášejí na sebe, při čemž ve dvou sousedních blocích protéká vždy studená a horká látka. Uspořádání může být jak protiproudé, tak křížové. Výhody tohoto typu TV jsou vysoká účinnost, vysoká životnost i při vysokých teplotách, tlacích a přechodových stavech, vysoká teplosměnná plocha na jednotku objemu a s tím související malé rozměry a hmotnost. I proto se používaly pro Braytonovy oběhy se vzduchem jako pracovním médiem [4][16].

2.4.4 Mikrokanálkové výměníky

Mikrokanálkový typ tepelných výměníků (MKTV) se používá jako rekuperátory a chladiče pro výzkumné oběhy s sCO_2 [16]. Do kovové desky se chemicky vyleptají nebo mechanicky vytvoří kanálky. V podstatě libovolný počet těchto desek se potom spojí dohromady pomocí difuzivního svařování. Touto technikou může být spojena celá řada materiálů včetně niklových slitin. Kanálkové TV nelze rozebrat a není snadný přístup ke kanálkům, což komplikuje jejich údržbu a čištění. To je nutno volit chemické či vodou při vysokých tlacích. TV lze uspořádat jako protiproud nebo do kříže. Právě díky difuzivnímu svařování MKTV vynikají výbornými pevnostními charakteristikami a lze je použít za vysokých tlaků a teplot při nepřekročení maximální přípustné tlakové ztráty. Jedná se o TV s velkým potenciálem pro využití v sCO_2 smyčkách.



Obrázek 2.5: Deskový výměník s žebry [4]

Zdroj	Chladivo	Výkon [MW]	Výstupní teplota [°C]	Tlak [MPa]	Průtok [kg/s]
BB	He	2389.1	500	8	2303.8
DIV-cas	H2O	115.2	210	3.5	861
DIV-pfu	H2O	136	140	5	136
VV	H2O	86	200	3.2	1928.9

Tabulka 2.1: Charakteristiky zdrojů tepla pro HCPB DEMO.

2.5 Braytonův sCO₂ oběh pro DEMO

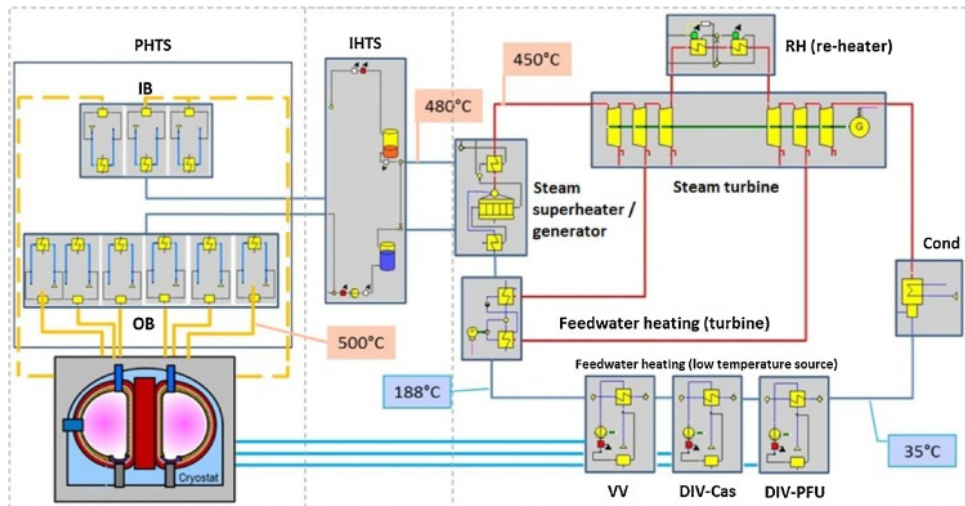
Jak již bylo zmíněno, Braytonův cyklus má relevantní hodnoty účinností jen v případě, že je použito helium jako chladivo blanketu a to především kvůli relativně vysoké výstupní teplotě.

2.5.1 Zdroje tepla pro helium chlazený blanket

Bubelis a kol. [5] navrhl napojení zdrojů tepla primárního okruhu elektrárny DEMO pro koncept HCPB do sekundárního RC oběhu přes systémy uchování energie. Napojení je schématicky znázorněno na obrázku 2.6. Pro chlazení blanketu (BB) je uvažováno 9 smyček s výstupní teplotou 500°C. Tři smyčky jsou uvažovány pro vnitřní blanket (IB) a 6 pro vnější blanket (OB). Další zdroje tepla jsou divertorové kazety (DIV-cas), divertorové terče (DIV-pfu) a vakouová nádoba tokamaku (VV). Poslední zmiňované zdroje jsou chlazené vodou a jsou nízkopotenciální, jelikož mají nízkou výstupní teplotu. Souhrn všech výstupních teplot ze všech zdrojů tepla je v tabulce 2.1.

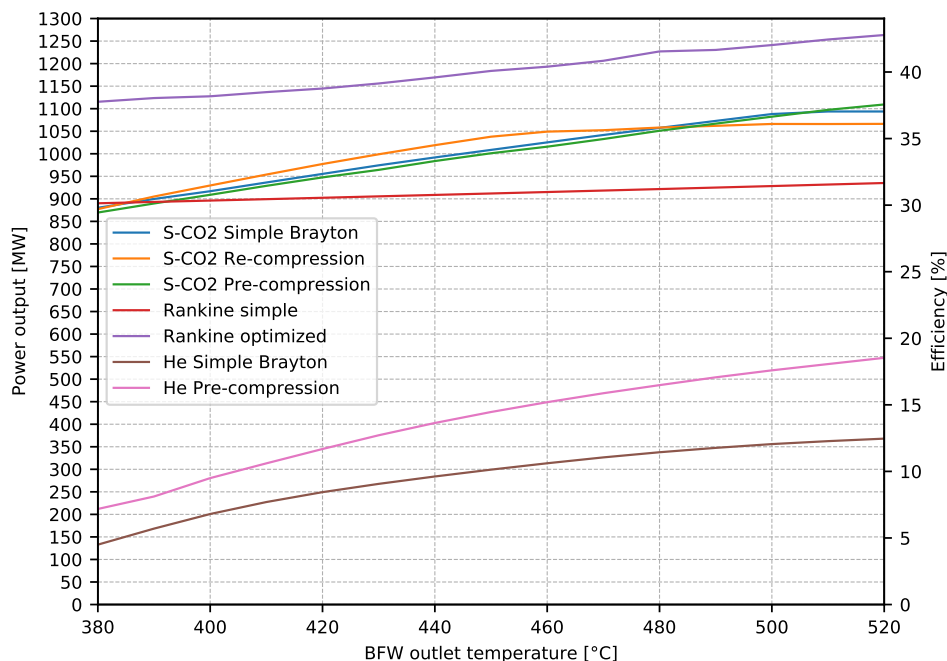
2.5.2 Výběr sekundárního okruhu pro DEMO

Volba mezi parním a plynovým oběhem pro fúzní elektrárnu DEMO není snadná. Podle parametrické studie publikované Štěpánkem a kol.[6] by největší účinnosti dosahoval RC

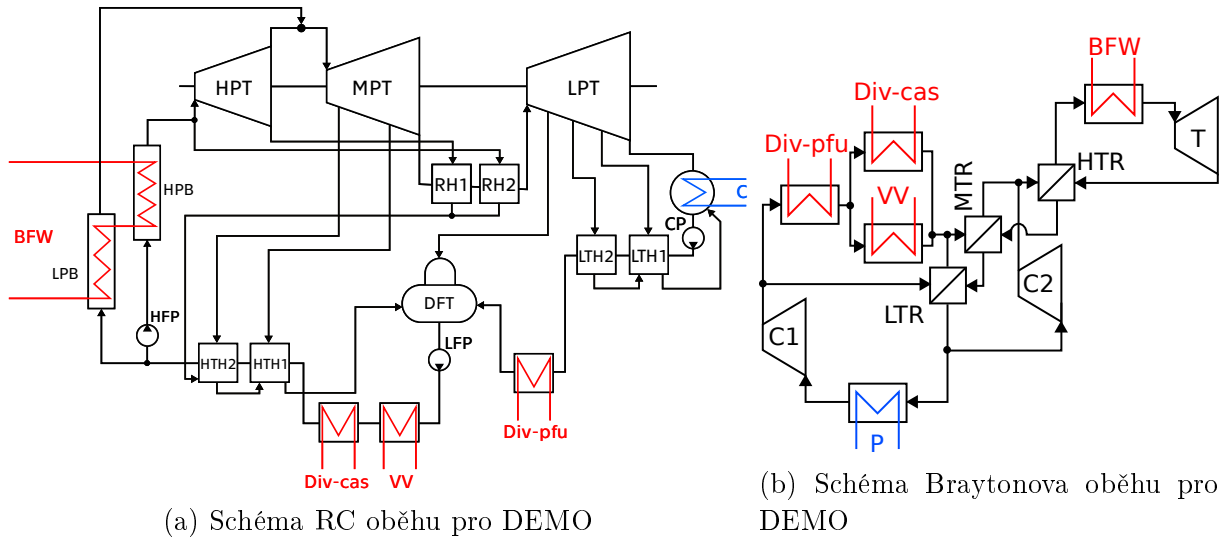


Obrázek 2.6: Zdroje tepla pro HCPB DEMO [5]

cyklus. Autoři uvažovali několik variant Braytonova oběhu s sCO₂ (regenerační, rekompresní, prekompresní), Braytonova oběhu s heliem (regenerační, prekompresní), jednoduchý RC oběh a optimalizovaný RC oběh. Graf výkonu a účinností jednotlivých variant je na obr. č.2.7. Jak je z něj patrné, nejlepších výsledků dosahuje RC oběh. Všechny 3 diskutované varianty s sCO₂ vykazují podobné hodnoty výkonu pro všechny sledované teploty. Helium se jeví jako neperspektivní pro sekundární okruh DEMO. Použití Braytonova oběhu by však přineslo řadu benefitů, a to především v jednoduchosti a menší potřeby prostoru. Na obrázku 2.8 je porovnání schémat pro rekompresní a optimalizovaný RC oběh. Je z něj patrný menší počet komponent a větší jednoduchost u rekompresního cyklu. Tato skutečnost vyplývá z nutnosti meziohřevu páry a přehřevu napájecí vody u optimalizace RC cyklu, což ho značně komplikuje. Schémata byla převzata z práce Štěpánka a kol. [6].



Obrázek 2.7: Výkon a účinnost sekundárního okruhu DEMO v závislosti na výstupní teplotě z blanketu pro různé varianty sekundárních oběhů [6]



Obrázek 2.8: Porovnání schémat Braytonova a RC oběhu [6]

2.6 Shrnutí kapitoly

Sekundární oběhy pro energetické využití na bázi nadkritického oxidu uhličitého jsou v praxi neozkoušené. Mají však potenciál zlepšit ekonomiku elektráren snížením počátečních nákladů a v některých aplikacích i zvýšením účinnosti. V elektrárně DEMO se sCO₂ oběh jeví jako alternativa k parnímu cyklu, která by přinesla jednoduchost, snížení počátečních nákladů a menší zastavěnou plochu za cenu menší účinnosti. Jako výměník mezi primárním a sekundárním okruhem by mohl být použit mikrokanálový výměník. A to především díky jeho schopnosti zvládnout vysoké teploty i tlaky při požadované tlakové ztrátě a při malém rozdílu výstupních teplot. Tento typ výměníky je používán desítky let, i když jen ve speciálních aplikacích, kde je zásadní nedostatek prostoru. Detailnější informace o mikrokanálových výměnících se nachází v následující kapitole.

Kapitola 3

Mikrokanálové výměníky

3.1 Úvod do problematiky MKTV

Mikrokanálový tepelný výměník (MKTV) se skládá z kovových desek (obr. 3.1b). Do každé je chemicky vyleptáno několik kanálků ve tvaru půlkruhu, obvykle s průměrem 2 mm. Desky na ochlazovanou a ohřívanou tekutinu se střídavě pokládají na sebe a jsou spojeny pomocí difuzivního svařování. Díky této technologii dochází k růstu zrn přes hranice jednotlivých desek, a tudíž ke spojení materiálu v jeden celek (obr.3.1a). To vyústí ve velmi dobré pevnostní charakteristiky a umožní výrazně zredukovat rozměry a hmotnost výměníku při vysoké účinnosti a nízkých tlakových ztrátách. Díky leptání kanálků lze volit jakékoliv uspořádání proudů.

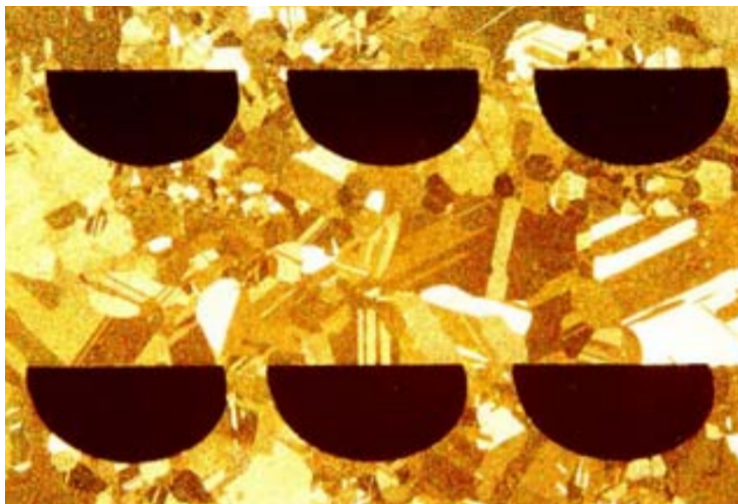
Společnost Heatric [7] je dominantní na trhu v oblasti MKTV s více než třiceti lety zkušeností s jejich návrhem, konstrukcí, instalací a servisem. Zmiňovaná společnost původně dodávala své výměníky firmám na těžení ropy či plynu na moři, kde je přirozeně nedostatek prostoru. Dnes se ale MKTV používají i v jiných oblastech jako například v solárních elektrárnách, chemickém průmyslu nebo při výrobě plynů (kryogenní separace vzduchu). Do budoucna se uvažuje o jejich využití např. v jaderných elektrárnách 4. generace či v uzavřených Braytonových tepelných obězích.

3.2 Heatric

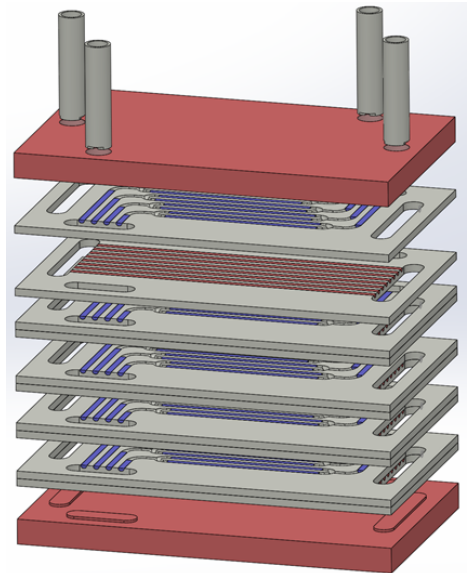
Společnost Heatric na svých webových stránkách [7] uvádí, že jejich MKTV mohou dosahovat až o 85 % menších rozměrů a hmotnosti než klasické korpusové výměníky, což kromě ušetřeného místa přináší řadu dalších benefitů. V danou chvíli protéká výměníkem malé množství tekutiny, což snižuje celkovou hmotnost média nacházejícího se v systému. To má za následek menší průměr potrubí, menší čerpadla či kompresory, nebo menší opěrné konstrukce. MKTV mají také výhodu v logistice.

Maximální rozměry desek, ze kterých se MKTV skládá, jsou omezeny výrobním procesem na rozměry 1500 x 600 mm [7]. Desky na sebe mohou být naskládány do výšky až 1 m a následně difuzivně svařeny. Takto vytvořené "kostky" je ještě možno vertikálně svařit do bloků o maximální výšce 8 m [7]. Bloky potom mohou být řazeny paralelně či sériově, aby vytvořily jednotku MKTV. Jednotka MKTV může mít maximální hmotnost až 60 tun, přičemž největší vyrobená měla hmotnost dokonce 100 tun [7].

Výměníky společnosti Heatric mohou pracovat při maximálním tlaku 900 barů, v



(a) Znárodnění rŭstu zrn pŕes hranice dvou desek po difuzivnĭm svařovánĭ



(b) Schéma mikrokanávkovĕho vĕmĕnĭku

Obrázek 3.1: Mikrokanávkovĕ vĕmĕnĭk [7]

rozmezĭ teplot od -197 do 982 °C a to pŕi ůčinnostech až 99 % [7]. Materiály pro MKTV jsou omezeny možnostmi difuzivnĭho svařovánĭ. Nejčastĕji se využívá austenitickĕch nerezovĕch ocelĭ. Mohou bĕt takĕ použitĕ nĕkterĕ slitiny jako napŕíklad slitina N06617 (slitina s vysokĕm podĭlem niklu a chromu), která vyniká svou odolností za vysokĕch teplot. Feritickĕ oceli nejsou pro difuzivnĭ svařovánĭ vhodnĕ.

3.3 Výroba mikrokanávkovĕho vĕmĕnĭku

Vĕrobnĭ proces začíná pŕesným chemickĕm vyleptánĭm, tedy oxidací kanávkŭ do desek. Nejprve se na desku nanese tzv. fotorezistant. Ten se následnĕ aktivuje UV svĕtlem a chránĭ povrch pŕed působenĭm kyseliny. V místech, kde fotorezistant chybĭ, ŕĭravina vyleptá kanálky. Reakce nenarušuje zrna kovu, nezvĕtšuje drsnost povrchu, ani nezhoršuje vlastnosti materiálu. Pŕůřez takto vytvořenĕho kanávkŭ má tvar pŭlkruhu s pŕůmĕry od 0,2 do 5 mm. Kanálky mohou bĕt po desce vedeny libovolnĕ. Nejčastĕji jsou však vlnitĕ nebo pŕímĕ, a to v závislosti na konkrĕtnĭch parametrech protĕkajĭcích tekutin a konkrĕtnĭm použitĭ TV [17].

Upravenĕ kovovĕ desky se velmi pŕesně naskládají na sebe, a to v čistĕm pŕostředĭ za konkrĕtnĭho tlaku a teploty. Následuje proces difuzivnĭho svařovánĭ v komoŕe za vysokĕho tlaku. Pŕi teplotĕ dosahujĭcí 0,6 až 0,7 teploty tavenĭ materiálu se desky na krystalickĕ úrovni spojí a vznikne tak jeden monolitickĕ blok, což zaručuje dobrĕ mechanickĕ vlastnosti i za vysokĕch tlakŭ [17]. Nakonec pŕichází finálnĭ úpravy vĕmĕnĭku jako navařenĭ vstupnĭch a vĕstupnĭch koncovek.

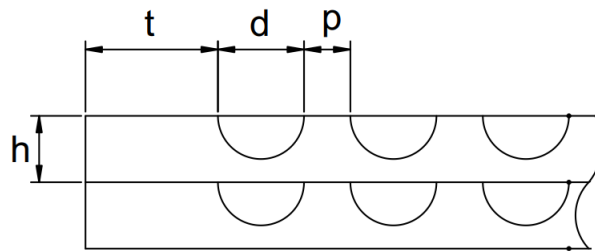
3.4 Geometrie mikrokanávkovĕho vĕmĕnĭku

MKTV nejsou sĕriovĕ vyrábĕny. Každĕ kus MKTV je vytvořen pro specifickĕho zákaznĭka a pro specifickĕ provoz. Jejich geometrie se vĕrazně liší v závislosti na typu tekutiny proudĭcí vĕmĕnĭkem, na parametrech této tekutiny, na požadovanĕ ůčinnosti,

na maximální přípustné tlakové ztrátě, na tom zda probíhá změna fáze atd. Díky leptání kanálek a difuzivnímu svařování lze docílit mnoha různých tvarů kanálek a tím i různých uspořádání proudů. Volba optimální geometrie je zásadní pro ekonomii a správnou funkci MKTV.

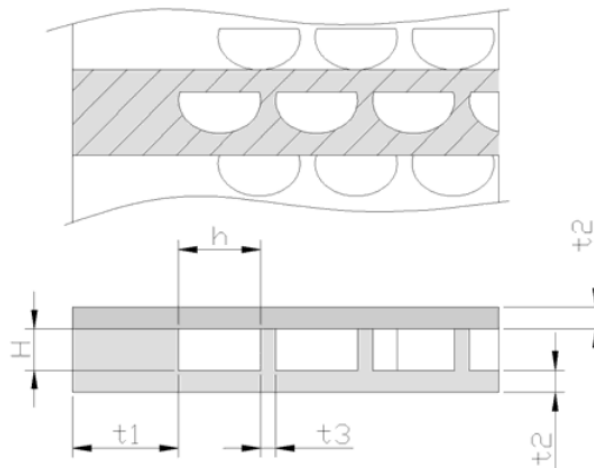
3.4.1 Pevnostní výpočet

Průřez dvěma deskami MKTV je na obrázku 3.2. Kanálek má průměr (rozměr d) od 0,2 do 5 mm, přičemž nejčastěji 2 mm [7]. Výška plátu h , materiál mezi kanálky o tloušťce p (hřbet) a rozměr t (volné okraje) jsou dány pevnostním výpočtem podle normy ASME (13-9). Čím je větší průměr kanálku, tím větší musí být tloušťka p a MKTV má proto větší rozměry. Na druhou stranu čím kanálek menší, tím větší hrozí riziko ucpání, a tudíž se zvyšuje nárok na čistotu proudícího media.



Obrázek 3.2: Průřez MKTV

Při pevnostním výpočtu se nahrazuje kanálek s průřezem půlkruhu kanálkem obdélníkového průřezu viz obr. 3.3. Výpočet ve svém článku shrnul Renaud Le Pierres a kol. [8]. Vychází se z kontroly membránového napětí S_m a ohybového napětí S_o .



Obrázek 3.3: Nahrazení kanálek čtvercovým průřezem při pevnostním výpočtu [8]

Musí platit:

$$S_m < S_D E \quad \text{a} \quad S_m + S_o < 1,5 S_D E, \quad (3.1)$$

kde S_D je dovolené napětí v materiálu a E je svárový koeficient, který má pro difuzivní svařování hodnotu 0,7.

Pro rozměr t_1 platí:

$$S_m = \frac{Ph}{2t_1},$$

$$(S_o)_N = \left(\frac{Pc}{24I_1} \right) (2h^2 - 3H^3),$$

$$(S_o)_Q = \frac{Ph^2}{12I_1},$$

kde P je projektový tlak, h šířka kanálku, H výška kanálku, I moment setrvačnosti:

$$I_1 = \frac{t_1^3}{12} \quad \text{a} \quad c = \frac{t_1}{2}.$$

Pro rozměr t_2 platí:

$$S_m = \frac{PH}{2t_2},$$

$$S_o = \frac{Ph^2c}{12I_2},$$

kde

$$I_2 = \frac{t_2^3}{12} \quad \text{a} \quad c = \frac{t_2}{2}.$$

Po dosazení do rovnic 3.1 a následné úpravě dostaneme vztahy pro minimální přípustný rozměr t_2 :

$$(t_{2min})_m = \frac{PH}{2S_D E}, \quad (3.2)$$

$$3S_D E (t_{2min})_o - PH (t_{2min})_o - Ph^2 = 0, \quad (3.3)$$

$$t_{2min} = \max((t_{2min})_o, (t_{2min})_b). \quad (3.4)$$

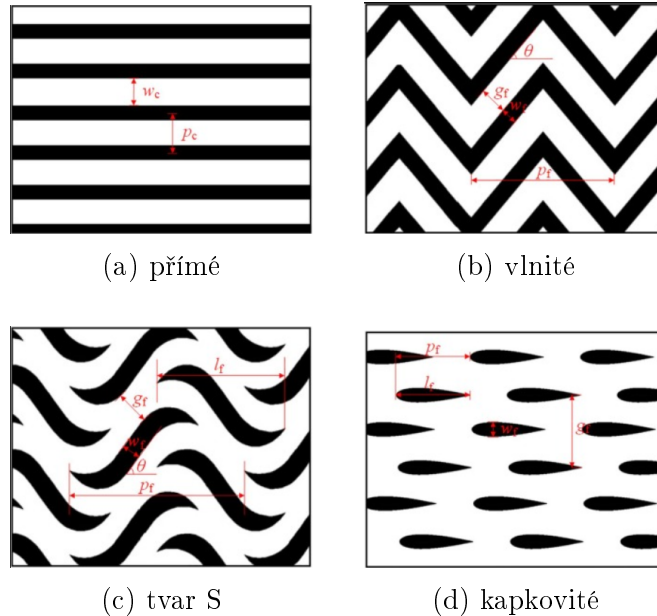
Pro rozměr t_3 je kvůli stejným tlakům v sousedních kanálcích $S_o = 0$. Pro S_m platí následující vztah:

$$S_m = \frac{Ph}{t_3}.$$

A proto:

$$t_{3min} = \frac{Ph}{S_D E}. \quad (3.5)$$

Z výše uvedených vztahů je patrné, že rozměry t_1 , t_2 i t_3 se zvětšují s rostoucím průměrem kanálku. Proto není vhodné zvyšovat průtočnou plochu výměníku zvětšením průřezu kanálku. Tento postup by vedl k silnějším deskám, hřbetům a volným okrajům, a tedy ke zmenšení hustoty teplosměnné plochy a také ke zmenšení průtočné plochy vzhledem k celkové ploše výměníku. Průměr kanálku je omezen i z druhé strany - moc malý kanálek se snadno ucpe a čištění MKTV není snadné (i když možné a v praxi používané) [7], jelikož se nejedná o rozebíratelný prvek. Nejčastěji používané d je 2mm.



Obrázek 3.4: Tvary kanálek [18]

3.4.2 Uspořádání proudů a tvary kanálek

Díky chemickému leptání kanálek lze docílit téměř jakýchkoliv tvarů a tím i uspořádání proudů. Používají se 4 základní tvary kanálek, a to přímé, vlnité, s tvarem S a kapkovité (viz obr. 3.4 [18] (pohled shora)). Bílá místa na obrázcích jsou části desky, kde protéká médium. Černě je znázorněn materiál, který je difuzivně svařen s další deskou. Za kanálky v pravém slova smyslu lze tedy označit pouze případ (a) a (b), zatímco pro případ (c) a (d) se vžilo označení žebra (S-žebra, či kapkovitá žebra). Každý ze zmiňovaných tvarů má určité přednosti a nevýhody. Obecně platí, že vlnité kanálky dosahují vyššího přestupu tepla, ale dochází v nich k větší tlakové ztrátě. To je důsledek změny směru proudění za každým ohybem; tekutina se zde zavíří, a tudíž se promíchá její studená část ve středu kanálku s teplou částí u stěn (v případě ohřivaného media naopak) a tím se zvýší přestup tepla. Zavířením však zároveň dochází k disipaci energie a tedy i k navýšení třecích tlakových ztrát.

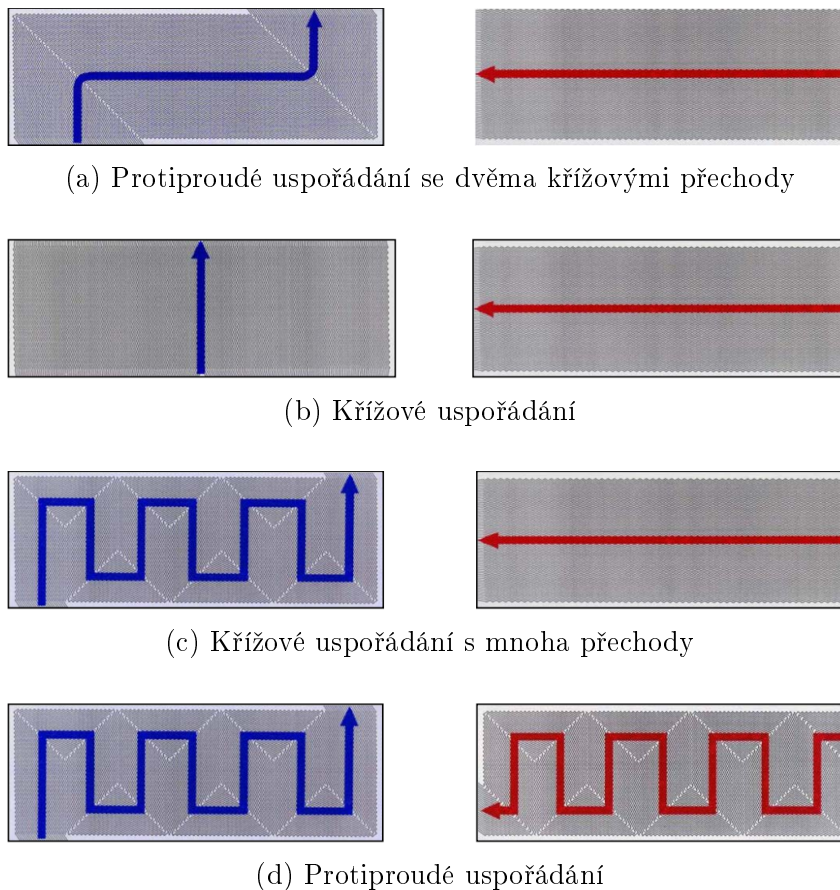
Díky volnosti ve výrobě kanálku lze docílit v podstatě jakéhokoliv uspořádání proudů včetně téměř dokonale protiproudého. Na obrázku č. 3.5 [19] je několik příkladů uspořádání proudů. Jedno z nejznámějších a nejpoužívanějších je verze 3.5a, kdy jedna z tekutin proudí přímými kanálky a druhá z nich taktéž přímými kanálky, které jsou ale ve vstupní a výstupní oblasti ohnuty do pravého úhlu, aby do nich mohlo být přivedeno médium, resp. z nich odvedeno.

To ovšem vede k rozdělení výměníku na část s čistým protiproudem v jeho střední části a na část s křížovým uspořádáním. Výměna tepla probíhá v obou těchto částech, ale v protiproudě intenzivněji. Tento fenomén se zohledňuje při návrhu výměníku geometrickým faktorem F_G :

$$\dot{Q} = F_{SC} F_G k A \Delta t_{LN},$$

kde \dot{Q} je tepelný výkon TV, k je součinitel prostupu tepla pro protiproudou část, A teplosměnná plocha a Δt_{LN} logaritmičtý teplotní spád.

F_{SC} je další korekční faktor zvaný serpentinový, který do rovnice vnáší vliv některých geometrií (např. 3.5d), kdy se část tepla předává z kanálku do kanálku ve stejné desce, a



Obrázek 3.5: Příklady uspořádání proudů v MKTV [19]

tudíž zmenšuje množství tepla přeneseného do vrstvy tomu určené. V jakých případech je nutné zahrnout při výpočtech geometrický faktor F_G či faktor F_{SC} uvádí ve svém článku David Southall [20].

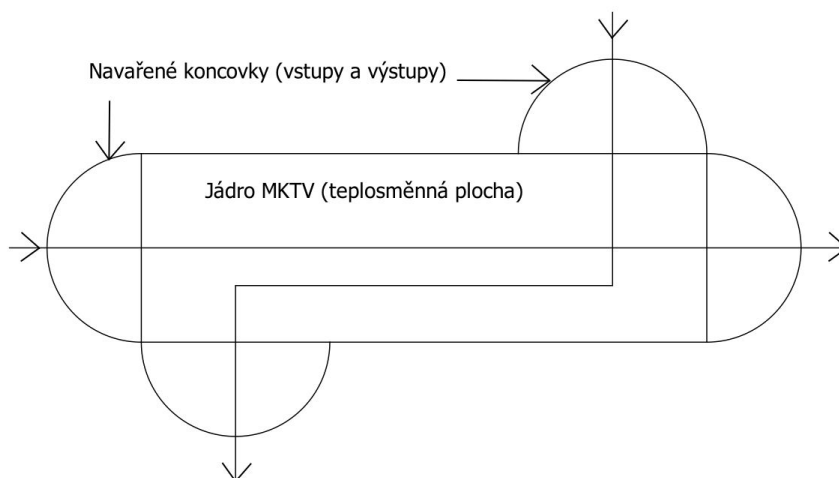
Další důležitou částí MKTV jsou vstupy a výstupy pro tekutinu. Mohou být navařeny na výměník (viz. obrázek 3.6), nebo v případě vysokých tlaků mohou být přímo součástí jádra TV, což ovšem zvyšuje cenu. Příkladem vstupů a výstupů zabudovaných přímo do jádra TV může být tzv. "platelet" konfigurace (viz. obr. č. 3.7) [8].

Kromě dobrých pevnostních charakteristik koncovek v důsledku nepřítomnosti svarů je další výhodou této konfigurace čisté protiproudé uspořádání (geometrický faktor $F_G = 0$), což je důležitý aspekt pro uvažované aplikace v sCO₂ smyčkách. Při takovéto konstrukci koncovek se v nich vyměňuje mezi ohřívanou a ochlazovanou tekutinou teplo přes společnou stěnu, což promlouvá do celkové tepelné bilance TV (narozdíl od koncovek vně MKTV).

3.5 Termohydraulika MKTV

Heatric ani jiné společnosti z pochopitelných důvodů nezveřejňují korelace pro Nusseltova čísla a součinitele tření, nicméně s MKTV byla provedena řada experimentů, především na půdě univerzit. Kvůli velikému rozdílu v geometriích MKTV nelze hovořit o jediné univerzální korelaci a při jejím výběru pro výpočet je na místě postupovat obezřetně.

Souhrn experimentů a numerických studií s MKTV do roku 2020 provedli Chai a



Obrázek 3.6: Koncovky umístěné vně jádra MKTV

Tassou [18].

Mylavarapu a kol. [21] [22] [23] experimentálně i numericky zkoumal termohydraulické vlastnosti MKTV s přímými kanálky, vyrobený ze slitiny 617 ve vysokoteplotní heliové smyčce s maximální teplotou 900°C a maximálním tlakem 3MPa . Autor doporučuje pro laminární proudění následující korelace:

$$Nu = 4,089, \quad (3.6)$$

$$fRe = 63,068. \quad (3.7)$$

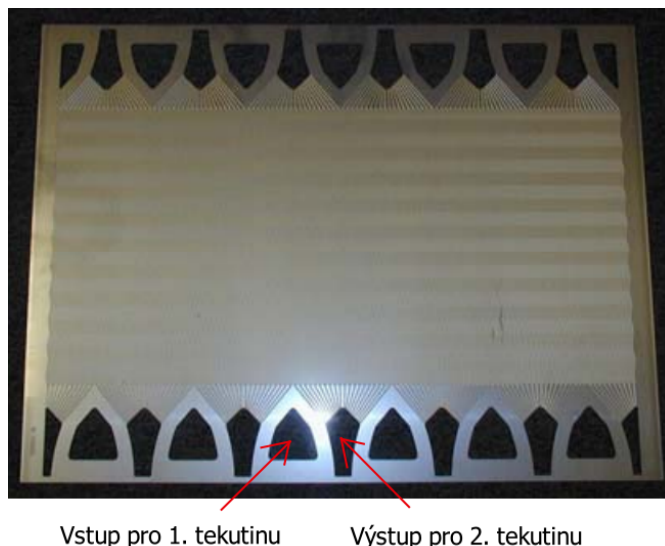
A pro turbulentní proudění Gnielinského korelaci:

$$Nu = \frac{2f(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7(Pr^{2/3} - 1)\sqrt{2f}} \quad (3.8)$$

$$f = \left(\frac{1}{1,82\log Re - 1,64} \right)^2. \quad (3.9)$$

O Gnielinského korelaci se mnoho autorů vyjadřuje jako o funkci pro MKTV. Mylavarapu [23] uvádí, že v oblastech Reynoldsových čísel $Re \in (1700; 3000)$ nastává v MKTV přechodové proudění a hodnoty Nu a f se výrazně liší od korelací jak pro laminární, tak pro turbulentní proudění. Abraham a kol. [24] doporučuje pro tuto oblast použít následující aproximaci:

$$Nu = 3,529 \left(\frac{Re}{1000} \right)^4 - 45,148 \left(\frac{Re}{1000} \right)^3 + 212,13 \left(\frac{Re}{1000} \right)^2 - 427,45 \left(\frac{Re}{1000} \right) + 316,08. \quad (3.10)$$



Obrázek 3.7: MKTV typu platelet (koncovky umístěné uvnitř jádra)

Pro jiné než přímé kanálky je situace složitější. Přestup tepla i třecí ztráty jsou totiž závislé na geometrických faktorech jako např. na úhlu θ (obr. 3.4b, 3.4c), na rozteči p_f (obr. 3.4b, 3.4c, 3.4d) atd. Platnost experimentálně získaných korelací se tudíž vztahuje jen na MKTV s velmi pobodnou geometrií jako v daném pokusu.

Výsledky experimentů s sCO₂ pro MKTV vydal v roce 2006 Nikitin a kol. [25]. Pro ochlazovanou tekutinu $Re \in (2800; 5800)$ a $\theta = 32, 5^\circ$ uvádí následující vztahy:

$$\alpha = 2,52Re^{0,681}, \quad (3.11)$$

$$f = -1,402 \times 10^{-6}Re + 0,04495. \quad (3.12)$$

A pro ohřívanou tekutinu $Re \in (6200; 12100)$ a $\theta = 40^\circ$:

$$\alpha = 5,49Re^{0,625}, \quad (3.13)$$

$$f = -1,545 \times 10^{-6}Re + 0,09318, \quad (3.14)$$

kde α je součinitel přestupu tepla.

Kim [26] prováděl rozsáhlou CFD analýzu s cílem rozšířit platnost experimentálně zjištěných korelací několika autorů [27] [28] i pro vyšší Reynoldsova čísla. Rozšířené korelace pro úhel vlnění $\theta = 32, 5^\circ$ v intervalu $Re \in (2000; 58000)$ jsou následující:

$$Nu = 0,0292Re^{0,8138}, \quad (3.15)$$

$$f_f = 0.2515Re^{-0,2031}. \quad (3.16)$$

Pro $\theta = 40^\circ$ a $Re \in (2000; 55000)$ platí:

$$Nu = 0,0188Re^{0,8742}, \quad (3.17)$$

$$f_f = 0.2881Re^{-0,1322}. \quad (3.18)$$

Zajímavý přístup pro získání korelací TV s vlnitými kanálky zvolila Jiang a kol. [29].

Zmiňovaná autorka počítala velikost regeneračního MKTV v budoucím uzavřeném Braytonově 10MWe oběhu s nadkritickým oxidem uhličitým a zabývala se nestacionárními jevy. Korelace získala ze zdroje [8], ve kterém se mimo jiné graficky porovnávají korelace Nga [30] a korelace přímo od výrobce MKTV Heatric. Vztahy od Heatric pro f , ani pro Nu v článku [8] nejsou uvedeny, ale Jiang je určila graficky ze zmiňovaných grafů. Přesnost takto získaných vztahů ze záměrně ne příliš kvalitního grafického zobrazení je diskutabilní, na druhou stranu se jedná o jediné dostupné korelace přímo od výrobce. Ve zdroji ze kterého Jiangová čerpala však nejsou uvedeny ani hodnoty úhlu vlnění a není jasné proč jsou k získaným korelacím přiřazeny zrovna úhly $\theta = 30^\circ$ a $\theta = 40^\circ$. Pro $Re \in (3000; 20600)$ a $\theta = 40^\circ$ zmiňovaná autorka uvádí následující vzorce:

$$Nu = 0,0845Re^{0,721}Pr^{1/3}, \quad (3.19)$$

$$f = 1,336Re^{-0,1268}. \quad (3.20)$$

A pro $Re \in (3000; 20600)$ a $\theta = 30^\circ$:

$$Nu = 0,0176Re^{0,809}Pr^{1/3} \quad (3.21)$$

$$f = 0,3095Re^{-0,0355} \quad (3.22)$$

Vlnité MKTV a MKTV s S-žebry porovnával Ngo a kol. [30] z Institutu technologie v Tokiu (T.I.T.). Pro oba typy byl úhel $\theta = 52^\circ$. Z naměřených dat vyplývá, že Nusseltovo číslo je pro vlnité kanálky o 24% - 34% větší, ale tlaková ztráta až 5x větší. Mohlo by se tedy zdát, že díky výrazně menšímu součiniteli tření bude výhodnější používat MKTV s S-žebry. Pierres [8] ovšem připomíná, že Heatric nepoužívá vlnité kanálky s tak velkým úhlem θ (Heatric obvykle $25^\circ - 40^\circ$) jako Ngo [30] a ukazuje, že součinitel tření pro MKTV od Heatric je o mnoho menší než ve studii z T.I.T., zatímco Nu dosahuje větších hodnot.

Experimenty s vlnitým TV He/CO2 s úhlem $\theta = 37^\circ$ prováděl Katz a kol. [9]. Pro helium byla Reynoldsova čísla v oblasti (300; 3000) a pro CO2 v (500; 16000). Nalezené vztahy pro helium:

$$Nu = 0,8072Re^{0,4359}Pr^{1/3}, \quad (3.23)$$

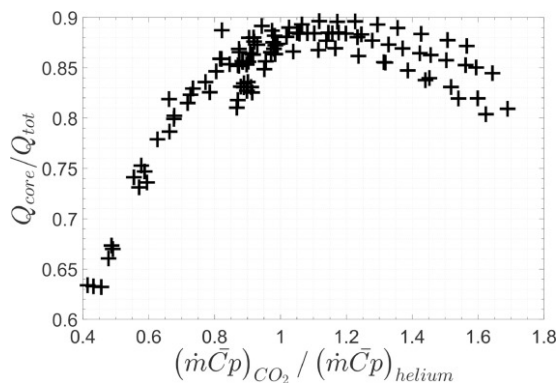
$$f_f = 0,34Re - 0,229 + \frac{5,532}{Re}. \quad (3.24)$$

A pro CO2:

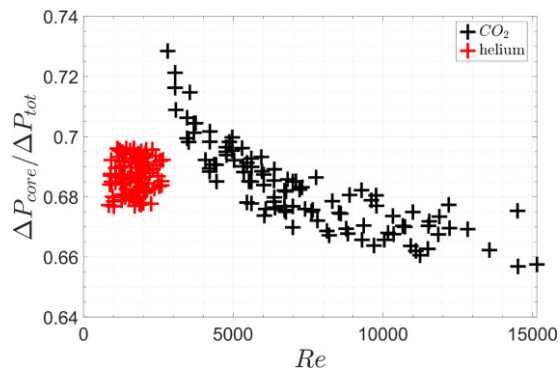
$$Nu = 0,02609Re^{0,8765}Pr^{1/3}, \quad (3.25)$$

$$f_f = 0,09Re - 0,103 + \frac{28,593}{Re}. \quad (3.26)$$

Katz pracoval s MKTV se vstupy a výstupy zabudovanými přímo v jádře (typ platelet) a zabýval se tlakovými ztrátami a přestupem tepla i v těchto částech TV. Poměr přeneseného tepla v jádře ku celkovému přenesenému teplu Q_{CORE}/Q_{TOT} závisí na poměru součinů měrné tepelné kapacity a hmotnostního průtoku ohříváné a ochlazované tekutiny $\frac{\dot{m}_{cold}c_{p,cold}}{\dot{m}_{hot}c_{p,hot}}$ viz obr. 3.8a. Pokud $\frac{\dot{m}_{cold}c_{p,cold}}{\dot{m}_{hot}c_{p,hot}} \approx 1$, ve vstupech a výstupech se vymění pouze 10 % z celkové tepla. Při $\frac{\dot{m}_{cold}c_{p,cold}}{\dot{m}_{hot}c_{p,hot}} \approx 0,6$ je ve zmiňovaných částech vyměněno cca 25 %. Poměr tlakové ztráty v jádře a celkové ztráty $\frac{\Delta P_{CORE}}{\Delta P_{TOT}}$ je závislý na Reynoldsově čísle. Z obrázku 3.8b je patrné, že pro CO2 se ve vstupech a výstupech tvoří 28 - 34 % celkové tlakové ztráty. Čím větší Re , tím větší vliv koncovek mají. Helium bylo měřeno v relativně úzkém rozmezí Re , trend příspěvku koncovek na ΔP_{TOT} tedy nelze pro tuto látku určit. $\frac{\Delta P_{CORE}}{\Delta P_{TOT}}$ se pohybuje kolem 68 %. Katz neuvádí



(a) Poměr tepla vyměněného v jádře MKTV a celkového vyměněného tepla



(b) Poměr tlakové ztráty v jádře MKTV a celkové tlakové ztráty

Obrázek 3.8: Vliv koncovek na termohydraulické charakteristiky MKTV [9]

geometrické rozměry a specifikace vstupů a výstupů.

Pokud je autorovi známo, byla publikována pouze jedna další studie věnující se příspěvku koncovek na celkové tlakové ztrátě, a to Záchou, Junem a Železným [31]. Ti prováděli simulace MKTV helium/helium s koncovkami vně jádra TV pro laminární proudění v softwaru FLUENT na základě experimentů. Jednalo se o protiproudý TV s dvěma křížovými přechody na vstupu a výstupu (viz obr. 3.5a). Kanálky na ochlazované straně měly tedy tvar písmene Z a na ohříváné straně byly čistě přímé. Analýza ukázala malý vliv koncovek na celkové tlakové ztrátě. Pro stranu s kanálky do Z tvořil celkový příspěvek obou koncovek na celkové tlakové ztrátě 11,7 % a pro čistě přímé kanálky 15,6 %. Výsledky Záchy a Katze je prakticky nemožné dát do souvislosti, protože se v obou případech jednalo o naprosto odlišnou geometrii kanálků i koncovek a také o odlišné podmínky obou experimentů.

V jiných studiích buď není uvedeno, zda je korelace pro součinitel tření určena z celkové tlakové ztráty včetně vstupů a výstupů, anebo se jejich vliv zanedbává. Jak je ale patrné z předchozího textu, zanedbání vlivu koncovek může vést ke vnesení chyby do korelace. Protože vstupy a výstupy mohou nabývat různých tvarů a každý typ má jiné hydraulické charakteristiky, nelze brát Katzovy či Záchovy výsledky za univerzální. Mohou ovšem posloužit pro hrubý odhad při výpočtu, nebo jako reference pro další experimenty.

3.6 Mikrokanálkové výměníky pro Braytonovy oběhy

Mikrokanálkové výměníky jsou uvažovány pro sekundární Braytonovy oběhy budoucích fúzních i štěpných jaderných elektráren z několika důvodů. Především jsou schopny provozu za vysokých teplot a tlaků. Dále umožňují nízký koncový rozdíl teplot při zachování přiměřené tlakové ztráty a mají nízkou hmotnost a rozměry. Mikrokanálkové výměníky jsou kvůli složité výrobě a nutnosti použít dražší materiály, které se dají difuzivně svařit nákladnější než korpusové výměníky. V některých aplikacích, kde je nutné použít tyto materiály tak jako tak, mohou být díky své kompaktnosti a tím i díky menší spotřebě drahého materiálu levnější. To je pravděpodobně případ i pro nadkritické CO₂ ve fúzní elektrárně, kde se musí použít materiály odolávající vysokým teplotám, vysokým tlakům a vlastnostem sCO₂ jako například niklové slitiny.

3.7 Shrnutí kapitoly

Mikrokanálové výměníky jsou vysoce kompaktní díky technologii difuzivního svařování a dosahují vysoké účinnosti při nepřekročení maximální dovolené tlakové ztráty. I díky těmto vlastnostem jsou uvažovány pro použití v uzavřených Braytonových obězích s nadkritickým oxidem uhličitým či v reaktorech 4. generace. Chemické leptání kanálek umožňuje svobodu v jejich tvarování, a tím i v uspořádání proudů. Důsledkem geometrické rozmanitosti MKTV jsou jejich rozdílné termohydraulické vlastnosti. Nejlépe zmapované je chování MKTV s přímými kanálky, kde lze s uspokojivou přesností pro turbulentní proudění použít Gnielinského korelaci (viz rce. 3.8, 3.9). Pro vlnité kanálky se z geometrických faktorů musí brát v potaz především úhel skosení vln θ . Z literatury lze pro tento typ získat některé korelace (rce. 3.11 - 3.26). Jejich platnost je však omezena na podobnou geometrii a Reynoldsova čísla jako v daných experimentech. V budoucí fúzní elektrárně by MKTV mohly sehrát svou roli v sekundárním oběhu, zejména pokud by bylo rozhodnuto pro sekundární smyčky s CO₂ a reaktor chlazený heliem.

Kapitola 4

Popis programu pro výpočet mikrokanálového výměníku

4.1 Úvod do kapitoly

Výhoda uzavřených Braytonových oběhů s $s\text{CO}_2$ spočívá mimo jiné v malé ploše potřebné pro jejich technologii, a to především díky malým rozměrům turbíny, kompresoru a jednoduchosti celého systému. Tepelné výměníky, ať už regenerační, pro odvod tepla nebo pro přívod tepla, budou nejrozměrnějšími prvky $s\text{CO}_2$ smyček. Určení jejich velikosti je důležitý krok pro odhad celkové zastavěné plochy a pro odhad ekonomiky projektu. Je tedy výhodné disponovat nástrojem schopným vypočítat rozměry MKTV pro různé vstupní parametry. Pro tento účel se nabízí vytvoření kódu v programovacím jazyce, například v Pythonu. Hlavním účelem této práce bylo vytvoření takového programu. Jeho popis se nachází na následujících stranách.

4.2 Požadavky na program

Hlavním účelem programu je vypočítat rozměry mikrokanálového výměníku pro určité vstupní parametry, a to pro:

- vstupní a výstupní teploty na ochlazované i ohřívané straně TV,
- hmotnostní průtoky na ochlazované i ohřívané straně TV,
- tepelný výkon TV,
- účinnost TV.

Navíc nesmí být překročena maximální přípustná tlaková ztráta. Další důležitou funkcí je zapisování dat do souborů pro následnou analýzu a jejich grafické zobrazení. Samozřejmostí musí být schopnost čtení dat pro získání vstupních parametrů v případě parametrické studie. Program by měl zahrnovat různou geometrii TV, a to především různé tvary kanálků a případ zdvojené desky. Výpočet s různými typy tekutin lze provádět díky knihovně CoolProp [32]. Tato knihovna obsahuje údaje se stavovými veličinami tekutin a lze ji využít téměř ve všech programovacích jazycích včetně Pythonu. Pomocí programu lze tedy počítat MKTV s jakoukoliv proudící látkou, jejíž data jsou součástí CoolProp. To je například oxid uhličitý, helium, vzduch, voda, různé druhy průmyslových chladiv a mnoho dalších.

4.3 Popis programu

Zjednodušené schéma programu je na obrázku 4.1. Po iniciaci a vstupu dat je možné provést pevnostní výpočet a to v případě, že nejsou známy velikosti hřbetů, okrajů a výšky desky TV. V opačném případě může být funkce vynechána. Následuje základní tepelná bilance, díky které lze určit vstupní a výstupní entalpie. Ty se používají jako vstupy pro další části kódu.

Aby se zamezilo vysoké době výpočtu, tak se nejprve odhadnou rozměry TV, tlaková ztráta a součinitel prostupu tepla. Jedná se o iterační proces založený na počátečním odhadu teplosměnné plochy. V této fázi nedochází k diskretizaci a počítá se se středními hodnotami všech veličin po celé délce TV. Pomocí logaritmického teplotního spádu se určí teplosměnná plocha. Dále se v závislosti na požadované tlakové ztrátě přibližně určí průtočná plocha. Právě odhadnutá průtočná plocha platí za nejdůležitější výstup.

Následuje výpočet samotný. Díky diskretizaci podle entalpického spádu se jedná o poměrně přesný, ale zároveň náročný proces. Celkový entalpický spád se rozdělí na n elementů. Výpočet všech veličin probíhá v každém z elementů, přičemž výstupní hodnoty z i -tého elementu slouží jako vstupní pro element $i + 1$. V situaci, kdy je výměník celý spočítaný, porovná se požadovaná tlaková ztráta se ztrátou vypočtenou. Pokud jsou obě hodnoty v uspokojivé shodě, data se zapíše do csv souborů a program se ukončí. V opačném případě se na základě odchylky tlakové ztráty vypočtené a požadované upraví průtočná plocha a celý výpočet proběhne znovu. Tato smyčka pracuje tak dlouho, dokud není tlaková podmínka splněna.

Seznam vstupních parametrů je v tabulce 4.1. Veličiny na vstupu do TV jsou označeny indexem *in* a na výstupu indexem *out*. Podobně parametry, které se vážou k ochlazované straně TV mají index *h* a k ohřívání *c*. Pokud je zadávání určitého parametru volitelné, je v tabulce 4.1 písmeno A (Ano), v opačném případě N (Ne). Ve speciálních případech se může jednat o povinně volitelnou položku (PV). Povinně volitelná položka je například tloušťka desky a velikost hřbetu kanálku. Obě veličiny jsou pro celkový výpočet nutné, každopádně nemusí být zadány přímo, ale lze je získat z pevnostního výpočtu. V takovém případě však musí být zadána jiná veličina, kterou je dovolené napětí v materiálu. PV parametr je tedy takový parametr, který je potřebný pro celkový výpočet, ale lze jej získat i nepřímo, zadáním a zpracováním jiných volitelných parametrů.

4.3.1 Pevnostní výpočet

Před začátkem samotného výpočtu lze pomocí volitelné funkce provést pevnostní výpočet a určit tak velikost okrajů, hřbetů a výšku desky MKTV, a to podle rovnic 3.2 - 3.5 v sekci 3.4.1. Pro výpočet je tedy nutné znát průměr kanálku, tlak na ochlazované i ohřívání straně a také materiál, resp. maximální dovolený tlak v daném materiálu při pracovní teplotě. Nejmenší možný průměr kanálku závisí především na čistotě tekutiny a na jejím typu. Je totiž potřeba zabránit částečnému ucpávání kanálku. Obvyklý průměr je 2 mm [7], ale může být od 0,2 do 5 mm. Čím větší je ale průměr kanálku, tím větší jsou rozměry hřbetů, okrajů a výšky desky a tím je TV těžší a objemnější. Pokud je geometrie TV úplně známa, lze tuto funkci vynechat. Odhad minimálního přípustného průměru kanálku je bohužel složitá záležitost a výrobci MKTV nejsou v tomto ohledu z pochopitelných důvodů sdílní. Autor proto ve většině případech volí typickou hodnotu 2 mm.

Parametr	Jednotka	Volitelná
p_{hin}	Pa	N
p_{cin}	Pa	N
Typ tekutiny (hot)	-	N
Typ tekutiny	-	N
t_{hin}	K	PV
t_{cin}	K	PV
t_{hout}	K	PV
t_{cout}	K	PV
Tepelný výkon \dot{Q}	W	PV
m_h	kg/s	PV
m_c	kg/s	PV
Účinnost výměníku η	1	A
Odhadnutá teplosměnná plocha A_{est}	$W/(m^2K)$	N
Tloušťka desky h_w	m	PV
Tepelná vodivost materiálu TV λ_w	$W/(m^2K)$	N
Průměr kanálku d	m	N
Hřbet kanálku p_{ch}	m	PV
Maximální přípustná šířka TV b	m	N
Odhad délky TV c	m	N
Maximální poměr výšky a šířky TV $(\frac{c}{b})_{max}$	1	N
Maximální přípustná relativní (absolutní) tlaková ztráta Δp_{max}	$1(Pa)$	N
Minimální přípustná relativní tlaková ztráta Δp_{min}	1	A
Přesnost výpočtu	-	A
Typ proudění	-	A
Dvojitý plát	-	A
Metoda výpočtu	-	A
Dovolené napětí v materiálu S_D	Pa	A

Tabulka 4.1: Seznam vstupních parametrů

4.3.2 Základní tepelná bilance

Po volitelném pevnostním výpočtu a získání geometrie TV následuje výpočet základní tepelné bilance a určení vstupních a výstupních entalpií, popřípadě určení neznámých parametrů vystupujících v této bilanci. Vychází se z předpokladu, že teplo odejmuté ochlazované látce \dot{Q}_h za jednotku času musí být stejné jako teplo přijaté ohřívanou látkou \dot{Q}_c :

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_c = P, \quad (4.1)$$

kde P je výkon TV. Jelikož se jedná o izobarický děj lze tuto rovnici přepsat do tvaru:

$$\dot{m}_h(\Delta h_h) = \dot{m}_c(\Delta h_c), \quad (4.2)$$

$$\dot{m}_h(h_{h_{in}} - h_{h_{out}}) = \dot{m}_c(h_{c_{out}} - h_{c_{in}}), \quad (4.3)$$

kde \dot{m}_c resp. \dot{m}_h je hmotnostní průtok na ohřívané resp. ochlazované straně TV. Vstupní a výstupní entalpie na ochlazované a ohřívané straně h_h a h_c jsou stavové veličiny a dají se určit pomocí tabulek CoolProp z tlaků a ze vstupních a výstupních teplot. Např.: $h_{h_{in}} = f(t_{h_{in}}, p_h)$ a obdobné závislosti platí pro $h_{h_{out}}$, $h_{c_{in}}$, $h_{c_{out}}$. Rovnice 4.3 se tedy dá zapsat následovně:

$$\dot{m}_h(h_{h_{in}}(p_h, t_{h_{in}}) - h_{h_{out}}(p_{hot}, t_{h_{out}})) = \dot{m}_c(h_{c_{out}}(p_c, t_{c_{out}}) - h_{c_{in}}(p_c, t_{c_{in}})). \quad (4.4)$$

Pro určení každé ze 4 zmiňovaných entalpií postačí 5 z následujících parametrů: P , \dot{m}_h , \dot{m}_c , $t_{h_{in}}$, $t_{h_{out}}$, $t_{c_{in}}$, $t_{c_{out}}$, za nutného předpokladu známých tlaků. Přičemž na každé straně TV musí být zadány alespoň 2 parametry. Popisovaná programová funkce tedy musí postihnout 29 různých kombinací zadaných veličin.

Po výpočtu tepelné bilance lze také zohlednit vliv požadované účinnosti výměníku η , která je definovaná jako:

$$\eta = \frac{P}{\dot{C}_{p_{min}}(t_{h_{in}} - t_{c_{in}})}. \quad (4.5)$$

Po dosazení vztahu 4.4 do rovnice 4.5 dostáváme následující formulaci:

$$\eta = \frac{\dot{m}_h(h_{h_{in}}(p_h, t_{h_{in}}) - h_{h_{out}}(p_{hot}, t_{h_{out}}))}{\dot{C}_{p_{min}}(t_{h_{in}} - t_{c_{in}})} = \frac{\dot{m}_c(h_{c_{out}}(p_c, t_{c_{out}}) - h_{c_{in}}(p_c, t_{c_{in}}))}{\dot{C}_{p_{min}}(t_{h_{in}} - t_{c_{in}})}, \quad (4.6)$$

kde $\dot{C}_{p_{min}} = \min(\dot{m}_h c_{p_h}, \dot{m}_c c_{p_c})$ a c_p je měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku. Účinnost je tedy definována jako poměr výkonu TV a výkonu, který by byl dosažen při nulovém koncovém teplotním rozdílu. Při respektování η se získává výstupní hodnota entalpie na ochlazované straně či výstupní hodnota entalpie na ohřívané straně z rovnice 4.6.

Výstupem z popisované části kódu jsou především všechny 4 vstupní a výstupní hodnoty entalpie a dále následující veličiny: P , \dot{m}_h , \dot{m}_c , $t_{h_{in}}$, $t_{h_{out}}$, $t_{c_{in}}$, $t_{c_{out}}$, η .

4.3.3 Odhad velikosti TV

Další důležitou částí programu je odhad velikosti TV. Díky odhadu se lze výrazně přiblížit k výsledku bez větší zátěže na výpočetní techniku. Jako vstupy poslouží hodnoty entalpie vypočítané v předchozím kroku z tepelné bilance a další přímo zadané

parametry. Schéma této programové funkce je na obrázku 4.2.

V této části kódu se určuje přibližná velikost TV (teplosměnná a průtočná plocha ohřívané strany) pomocí logaritmického teplotního spádu přes celý výměník:

$$\dot{Q} = kA_c\Delta t_{LN}, \quad (4.7)$$

po úpravě:

$$A_c = \frac{\dot{Q}}{k\Delta t_{LN}}, \quad (4.8)$$

$$\Delta t_{LN} = \frac{\Delta t_h - \Delta t_c}{\ln \frac{\Delta t_h}{\Delta t_c}}. \quad (4.9)$$

Celkový tepelný tok, stejně jako teploty na vstupu a výstupu z TV, je známý díky provedené tepelné bilanci v předchozím kroku (viz kap. 4.3.2). Střední hodnoty stavových veličin lze určit pomocí tabulek CoolProp. Pro získání teplosměnné plochy A_c je ještě nutné určit součinitel prostupu tepla k :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_c} + \frac{t_{kd}}{\lambda_m} + \frac{A_c}{\alpha_h A_h}}, \quad (4.10)$$

kde α je součinitel přestupu tepla, t_{kd} tloušťka stěny pro konduktivní přestup tepla, λ_m tepelná vodivost materiálu TV, A_c teplosměnná plocha ohřívané strany a A_h teplosměnná plocha ochlazované strany t_{kd} je definováno následovně [29]:

$$t_{kd} = \frac{(d + t_3)(d/2 + t_2) - \pi d^2/8}{d + t_3}. \quad (4.11)$$

Pokud je nutné dosáhnout větší intenzity přestupu tepla na jedné straně výměníku, zpravidla se postupuje zvětšením teplosměnné plochy na této straně [7]. Jedním ze způsobů je použití dvojité desky (např. 2 ochlazované na 1 ohřívanou). Lze také na jedné straně TV zvětšit úhel vln θ . Jiné způsoby (zvětšení průměru kanálku na jedné straně TV atd.) se využívají jen výjimečně ve speciálních případech [7]. Poměr A_c/A_h lze tedy určit následovně:

$$\frac{A_c}{A_h} = R \frac{\theta_h}{\theta_c}, \quad (4.12)$$

kde R je koeficient vyjadřující počet desek pro ohřívanou tekutinu na jednu desku s ochlazovanou tekutinou. R tedy může nabývat hodnot 2 (2 ohřívané na 1 ochlazovanou), 1 (1 ohřívána na 1 ochlazovanou), nebo 0,5 (1 ohřívána na 2 ochlazované).

Součinitele přestupu tepla pro ohřívanou resp. ochlazovanou tekutinu α_c resp. α_h se získávají pomocí definice Nusseltova čísla Nu :

$$Nu = \frac{\alpha d_h}{\lambda}, \quad (4.13)$$

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{d_h}, \quad (4.14)$$

$$d_h = 4 \frac{A_s}{O_s} = \frac{\pi d}{\frac{\pi}{2} + 1}, \quad (4.15)$$

kde λ je tepelná vodivost tekutiny, d_h je hydraulický průměr kanálku, tedy čtyřnásobek poměru průtočné plochy A_s a smočeného obvodu O_s , což pro kanálek půlkruhového

průřezu nabývá tvaru 4.15.

V současné chvíli lze pomocí programu vypočítat výměník se čtyřmi různými úhly vlnění θ , a to pro:

- $\theta = 0^\circ$ (přímé kanálky),
- $\theta = 32,5^\circ$,
- $\theta = 37^\circ$,
- $\theta = 40^\circ$.

Pro každý z úhlů se používá odpovídající korelace. Pro přímé kanálky Gnielinského korelace 3.8 (turbulentní proudění), vztah doporučený Mylavarapem 3.10 (přechodové proudění) a rovnici 3.6 (laminární proudění). Dále pro $\theta = 32,5^\circ$ resp. $\theta = 40^\circ$ vztahy dané Kimem [26] viz rovnice 3.15 resp. 3.17 a konečně pro $\theta = 37^\circ$ závislost zjištěná Katzem [9] (rovnice 3.23 a 3.25).

Nusseltovo číslo je závislé na Reynoldsově čísle a tím pádem i na rychlosti proudění. Střední rychlost proudění v lze vyjádřit z rovnice kontinuity následujícím způsobem:

$$v_s = \frac{\dot{m}}{A_p \rho_s}. \quad (4.16)$$

A_p je průtočná plocha a ρ_s střední hustota tekutiny.

Na rozměry TV má také vliv maximální přípustná tlaková ztráta, která ovlivňuje délku a určuje průtočnou plochu:

$$\Delta P_t = 0,5 \frac{l}{d_h} \rho_s v_s^2 f, \quad (4.17)$$

kde l je délka kanálku, v_s střední rychlost proudění a f Darcyho součinitel tření. Pro součinitele tření jsou podobně jako pro Nusseltova čísla použity korelace respektující různé úhly. Pro přímé kanálky je použita korelace 3.9 (turbulentní proudění) a rovnice 3.7 (laminární proudění). Pro $\theta = 32,5^\circ$ resp. $\theta = 40^\circ$ vztahy dané Kimem [26] viz rovnice 3.16 resp. 3.18 a pro $\theta = 37^\circ$ závislost zjištěná Katzem [9] (rovnice 3.24 a 3.26).

Obrázek 4.2 znázorňuje princip popisované části kódu. Do programové funkce musí kromě dalších parametrů vstoupit odhad teplosměnné plochy, délky a šířky jádra TV. Díky takovému odhadu lze určit průtočnou plochu a tedy i střední rychlost proudění viz 4.16. Následuje výpočet středního součinitele prostupu tepla k_s a poté výpočet teplosměnné plochy. V dalším kroku se porovnává velikost odhadnuté a vypočtené teplosměnné plochy. Pokud obě hodnoty nejsou v uspokojivé shodě, celý výpočet proběhne znovu. Na místo původně odhadnuté teplosměnné plochy se v další iteraci počítá s poslední vypočtenou plochou. Proběhne n iterací dokud není splněna podmínka $(A_c)_n \approx (A_c)_{n-1}$.

Díky výše popisované smyčce lze určit velikost teplosměnné plochy. Kromě přestupu tepla však do velikosti a tvaru TV promlouvá ještě maximální přípustná tlaková ztráta. Iterační smyčce pro výpočet teplosměnné plochy je proto nadřazena smyčkou pro výpočet tlakové ztráty. V té se určuje tlaková ztráta podle rovnice 4.17, která se porovnává s maximální přípustnou tlakovou ztrátou. Pokud je vypočítaná ztráta větší než maximální

přípustná, zvětší se průtočná plocha TV a tím se sníží střední rychlost proudění (viz rce. 4.16). Tlaková ztráta klesá s druhou mocninou rychlosti (rovnice 4.17). Proběhne tolik iterací dokud vypočítaná tlaková ztráta není menší než maximální.

Z této části programu je důležitou výstupní veličinou především přibližná velikost průtočné plochy A_p . Pro další výpočet však poslouží i přibližná tlaková ztráta na obou stranách výměníku.

4.3.4 Výpočet velikosti TV

V další části programu probíhá samotný výpočet. Celkový entalpický spád na ohřívané straně TV Δh_c je vydělen koeficientem, jehož velikost se odvíjí od požadované přesnosti a dostáváme se tak k hodnotě jednoho entalpického elementu (= výpočetní buňka) dh_c . Rozdělení celkového entalpického spádu na elementy a znázornění průběhu procesu je na obr. 4.3. Za použití rovnice 4.2 lze určit entalpický spád jednoho elementu pro ochlazovanou stranu:

$$dh_h = dh_c \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_h}. \quad (4.18)$$

Díky předchozímu odhadu je známá přibližná hodnota průtočné plochy A_p . Nic proto nebrání ve výpočtu teplosměnné plochy nutné k přenesení tepla o velikosti $dQ = \dot{m}_c dh_c$ podle logaritmického teplotního spádu v daném elementu (rce. 4.8). Jelikož známe průtočnou plochu, velikost teplosměnné plochy prakticky udává délku úseku výměníku l_i nutnou pro přenos diskutovaného tepla dQ . Ze znalosti délky úseku pak lze podle rovnice 4.17 určit tlakovou ztrátu v úseku $\Delta(P_c)_i$ a $\Delta(P_h)_i$.

Následuje výpočet dalšího elementu o velikosti dh_c , přičemž výstupní hodnoty veličin z buňky $i - 1$ poslouží jako vstupní hodnoty do buňky i .

Proces začíná na vstupu ohřívané veličiny do TV a pokračuje ve výpočtu buněk o velikost dh_c , dokud vypočtená vstupní teplota ochlazovaného media do dané buňky nepřekročí svou velikostí vstupní teplotu do TV na ochlazované straně: $(t_{h_{in}})_i > (t_{h_{in}})_{TV}$. Po jejím překročení proces končí. Celý výměník je tedy nakonec rozdělen na n elementů, přičemž v každém z nich je přeneseno $dQ = \dot{m}_c dh_c$ W tepla.

Délka výměníku L se následně určí jako:

$$L = \sum_{i=1}^n l_i, \quad (4.19)$$

podobně jako celková tlaková ztráta na ohřívané resp. ochlazované straně TV:

$$\Delta P_c = \sum_{i=1}^n (P_c)_i \quad \text{resp.} \quad \Delta P_h = \sum_{i=1}^n (P_h)_i. \quad (4.20)$$

Další krok spočívá v porovnání ΔP_c a ΔP_h s maximální přípustnou tlakovou ztrátou. Pokud je spočtená ztráta větší než je ztráta přípustná, zvětší se průtočná plocha a tím se sníží rychlost proudící tekutiny (v konečném důsledku tedy i tlaková ztráta podle rce. 4.17) a celý proces se opakuje. Jelikož součinitel přestupu tepla α (viz rce. 4.14 a 4.13), stejně jako tlaková ztráta, závisí na rychlosti proudění, zvětšením průtočné plochy se zároveň zhorší přestup tepla v TV a zvětší se tedy potřebná teplosměnná plocha. Platí tedy: čím menší má být tlaková ztráta \Rightarrow větší průtočná plocha \Rightarrow menší rychlosti

č.e.	\dot{m} [kg/s]	P [bar]	$\Delta P_{c_{MAX}}$ [Pa]	$\Delta P_{h_{MAX}}$ [Pa]	$t_{c_{in}}$ [° C]	$t_{h_{in}}$ [° C]	\dot{Q} [W]
1	0,00065	6,2	2842	2613	32,2	102	183
2	0,00095	6,2	4482	4063	31,77	100,01	252,2
3	0,0012	6,2	6142	5932	34,77	99,83	311,5
4	0,0015	6,2	-	9455	40,91	101,00	365,5
5A	0,0007	6	1697	1577	31,08	100,3	205,5
5B	0,0005	6	1536	1429	31,95	98,82	147
6	0,0009	6,1	4611	4329	33,18	199,16	597
7	0,0008	6,1	4631	4391	33,84	256,88	725,5
8	0,0008	6,1	4663	4440	33,9	302,68	888,5
9	0,0003	2	1740	1704	26,56	102,76	105,5
10	0,00055	4	3208	2985	28,22	101,6	171,5
11	0,0013	8	5098	4850	29,62	100,56	376
13	0,00886	6	-	25681	55,28	201,58	1024
14	0,00851	6	-	25681	51,38	100,93	331
15	0,00780	6	-	25681	54,89	249,18	1215,5
16	0,00760	6	-	25681	56,37	292,36	1454

Tabulka 4.2: Seznam experimentálních hodnot pro validační proces

proudění \Rightarrow horší přestup tepla \Rightarrow větší potřebná teplosměnná plocha \Rightarrow větší celkový objem a hmotnost TV. Pro co nejmenší objem TV je proto nutné, aby nebylo ΔP_{MAX} překročeno, ale zároveň aby se hodnota vypočítané tlakové ztráty blížila k ΔP_{MAX} . Proto pokud platí $\Delta P_{VYPOCTENO} < R_P \Delta P_{MAX}$ (R_P defaultně nastaveno na 0,9), průtočná plocha se naopak zredukuje. Celý výpočet tedy končí pokud platí $\Delta P_{MAX} > \Delta P_{VYPOCTENO} > R_P \Delta P_{MAX}$. Následuje zápis dat.

4.4 Validace

Validace výpočetního programu probíhala porovnáním experimentálních dat naměřených na experimentální smyčce s MKTV [31] s výstupy z programu. Jedná se o regenerační výměník s hmotnostními průtoky od 0,65 do 7,6 g/s a s laminárním či přechodovým prouděním.

Jako vstupy do programu byly použity naměřené veličiny. Jedná se o vstupní teploty na obou stranách TV $t_{h_{in}}$, $t_{c_{in}}$, tepelný výkon \dot{Q} a naměřené tlakové ztráty na obou stranách TV $\Delta P_{h_{MAX}}$, $\Delta P_{c_{MAX}}$ (viz tabulka 4.2). Pro prvních 12 experimentů bylo proudící tekutinou helium. Pro poslední 4 vzduch.

Průměr kanálku, hřbety, tloušťka desky a tepelná vodivost materiálu byly pro validaci voleny shodně se zmiňovaným TV. Výstup z programu, tedy výška jádra TV H_P , šířka B_P jádra TV, délka jádra TV L_P a jeho objem V_P byl pro každý experiment porovnán se skutečnou výškou jádra TV H_S , šířkou B_S jádra TV, Délkou jádra TV L_S a objem V_S . Dále je vyhodnocen rozdíl mezi skutečným a vypočítaným objemem, vztažený na skutečný průměr kanálku:

$$\delta = \frac{|V_S - V_P|}{V_S}. \quad (4.21)$$

Porovnání rozměrů TV vypočítaných a skutečných naleznete v tabulce 4.3.

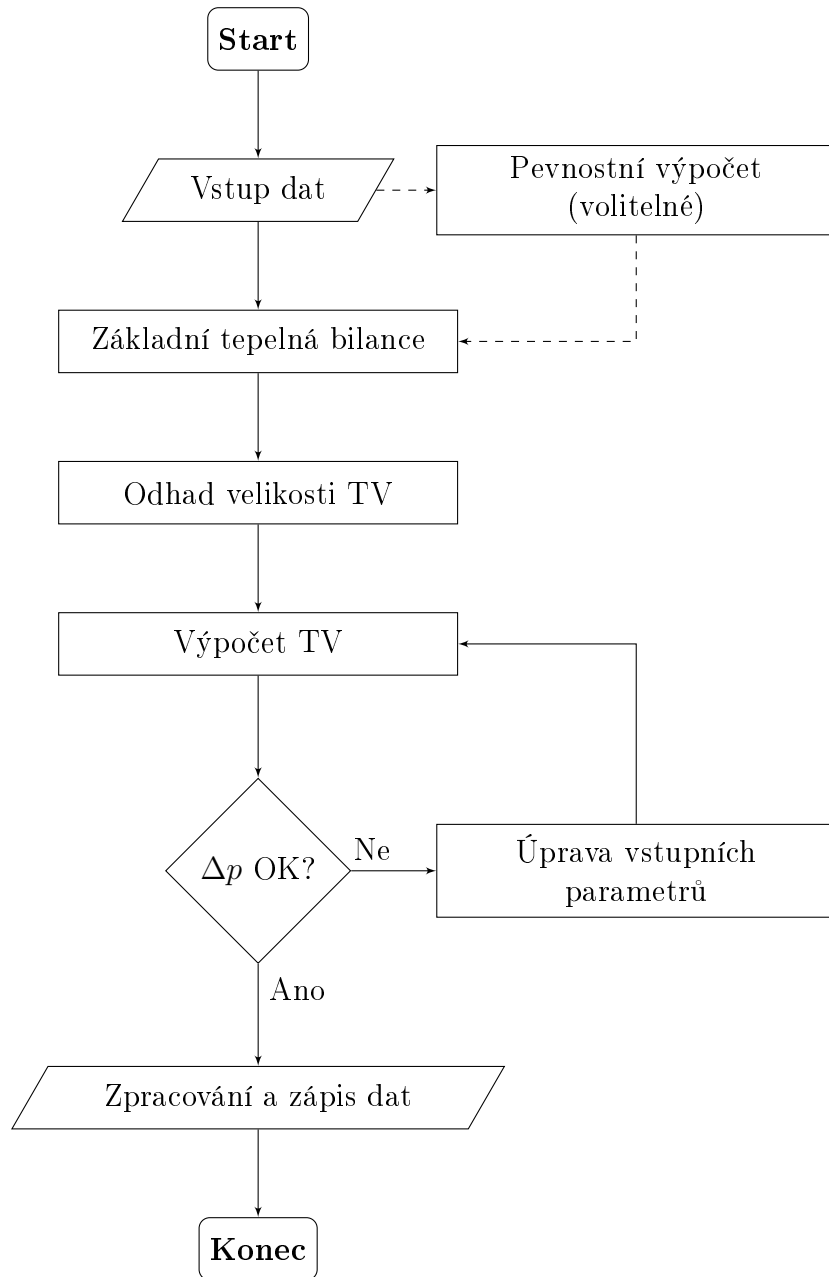
č.e.	H_S [mm]	B_S [mm]	L_S [mm]	H_P [mm]	B_P [mm]	L_P [mm]	δ [%]
1	24	17	250	24	17	252,4	0,96
2	24	17	250	24	17	247,2	1,12
3	24	17	250	24	17	253,3	1,32
4	24	17	250	24	17	246,8	1,28
5A	24	17	250	24	17	253	1,20
5A	24	17	250	24	17	253,6	1,44
6	24	17	250	24	17	251,8	0,72
7	24	17	250	24	17	248,4	0,64
8	24	17	250	24	17	249,8	0,08
9	24	17	250	24	17	253,3	1,32
10	24	17	250	24	17	252,3	0,92
11	24	17	250	24	17	255,1	2,04
13	24	17	250	24	17	245	2,00
14	24	17	250	24	17	253,3	1,32
15	24	17	250	24	17	246,1	1,56
16	24	17	250	24	17	256	2,4

Tabulka 4.3: Porovnání skutečných a vypočítaných rozměrů MKTV

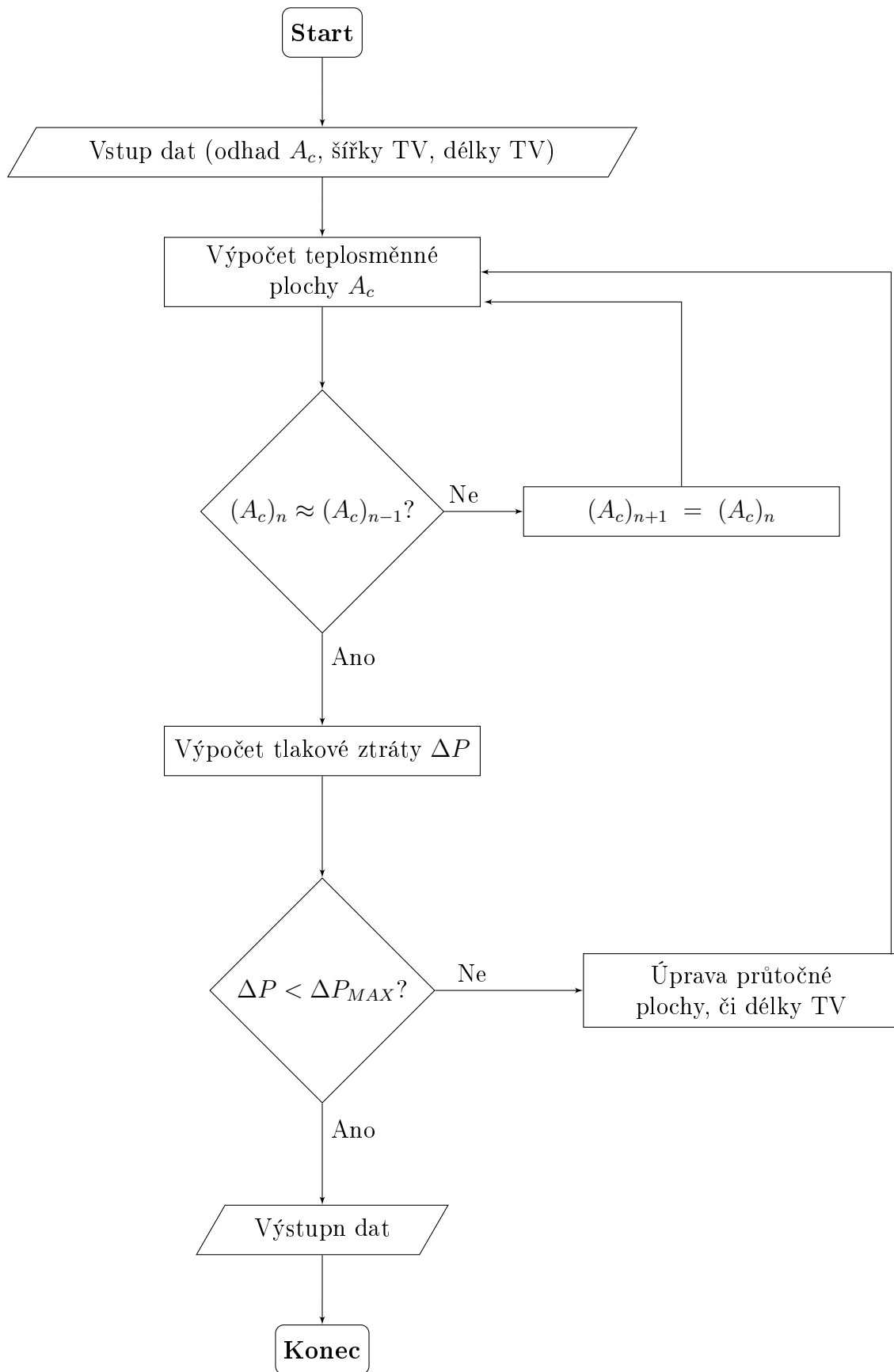
Pro každý výpočet byly použity součinitele tření a Nusseltova čísla získaná přímo z naměřených hodnot, aby se zamezilo vnesení chyby do programu prostřednictvím chybné korelace.

Z tabulky 4.3 je patrné, že maximální odchylka v objemu vypočteného a skutečného TV δ je 2,4 % s průměrnou odchylkou 1,27 %. Lze tedy konstatovat, že program při použití správných korelací plní svou funkci a správně určí rozměry MKTV.

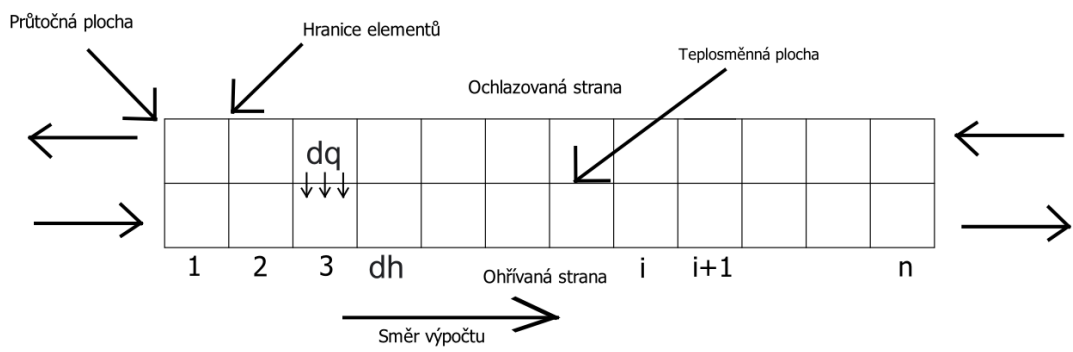
Mírná odchylka od skutečných rozměrů TV může být způsobena nepřesným výpočtem Nusseltova čísla a součinitele tření. Zmiňované charakteristiky byly určovány pomocí středních hodnot příslušných naměřených veličin. Měřicí přístroje byly umístěny pouze na vstupu a na výstupu z TV a střední hodnota veličin je proto získána pouze prostřednictvím vstupní a výstupní hodnoty. Program však pracuje s entalpickými elementy a celý TV je tak rozdělen do n částí (viz předchozí kapitola). Střední hodnota veličin přes n elementů se proto může lišit od střední hodnoty určené v experimentu.



Obrázek 4.1: Základní schéma programu pro výpočet velikosti MKTV



Obrázek 4.2: Schéma programové funkce pro odhad rozměrů MKTV



Obrázek 4.3: Schéma výpočtu pomocí elementů

Kapitola 5

Výpočet tepelného výměníku pro elektrárnu DEMO

5.1 Úvod do výpočtové části

Pro budoucí elektrárnu DEMO s heliem jako primárním médiem lze pro sekundární okruh díky poměrně vysoké výstupní teplotě z reaktoru (520°C) uvažovat Braytonův uzavřený oběh s nadkritickým CO₂. Jak ukázal Štěpánek a kol. [6] (viz kapitola 2.5.2), Braytonův oběh by v elektrárně DEMO měl sice mírně menší účinnost než R-C cyklus, ale plynový okruh by byl výrazně jednodušší při menší zastavěné ploše, obsahoval by méně hlavních komponent jako jsou turbíny či výměníky a tím by se výrazně zredukovaly počáteční náklady na výstavbu.

Nejrozměrnějšími součástmi sekundárního oběhu s sCO₂ by byly tepelné výměníky. Jejich velikost by pomohlo zredukovat použitím kompaktních TV jako například mikrokanálkových.

V sekci 2.5.1 jsou uvedeny všechny předpokládané zdroje tepla z reaktoru DEMO. MKTV by bylo pravděpodobně nutné použít především pro výměnu tepla přivedeného heliem z blanketu. Ostatní tepelné zdroje jsou nízkopotenciální (mají nízkou výstupní teplotu) a používá se pro ně voda jako chladicí tekutina. V těchto případech (nižší teploty) by bylo možno použít levnější oceli, které však nejsou vhodné pro difuzivní svařování a bylo by tedy vhodnější využít jiných typů tepelných výměníků.

Určení přibližné velikosti MKTV pro výměnu tepla z blanketu do sekundárního okruhu budoucí elektrárny DEMO pomocí vyvinutého softwaru je náplní následujících stránek.

5.2 Okrajové podmínky a volba konfigurace

Průměr kanálku byl zvolen 2 mm, protože se podle výrobce Heatric [7] jedná o nejtypičtější hodnotu a v literatuře nelze dohledat způsob určení minimálního průměru kanálku pro dané tekutiny, konstrukční materiály a provozní podmínky. Podle několika zdrojů [8][33][34][35] je nejvhodnějším materiálem pro MKTV operující s sCO₂ o vysokém tlaku a teplotě slitina 617. Ta vyniká skvělými mechanickými vlastnostmi při náročných provozních podmínkách a odolává korozi způsobené sCO₂. Pro teplotu 550°C je podle normy ASME maximální přípustné napětí S_D ve slitině 617 144 MPa [33].

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Průměr kanálku	d	2	mm
Dovolené napětí v materiálu	S_D	144	MPa
Tepelný výkon blanketu	\dot{Q}	2197,8(-0,9)(/8)	MW
Vstupní teplota na ochlazované straně	$t_{h_{in}}$	520	$^{\circ}C$
Výstupní teplota na ohřívané straně	$t_{c_{out}}$	510	$^{\circ}C$
Hmotnostní průtok na ochlazované straně	\dot{m}_h	1842(/8)	kg/s
Hmotnostní průtok na ohřívané straně	\dot{m}_c	7354(/8)	kg/s
Vstupní tlak na ochlazované straně	p_h	8,160	MPa
Vstupní tlak na ohřívané straně	p_c	34,07	MPa
Maximální tlaková ztráta na ochlazované straně	$\Delta p_{h_{MAX}}$	0,3(-0,69)	MPa
Maximální tlaková ztráta na ohřívané straně	$\Delta p_{c_{MAX}}$	0,681(-0,66)	MPa

Tabulka 5.1: Seznam vstupních parametrů pro výpočet MKTV v DEMO

Přesné termohydraulické okrajové podmínky byly poskytnuty Štěpánkem a Syblíkem z jejich parametrické studie [6]. Jedná se o výkon přiváděný z blanketu a také o tlaky, hmotnostní průtoky, vstupní teploty a maximální tlakové ztráty na obou stranách TV. Souhrn okrajových podmínek se nachází v tabulce 5.1.

Při vysokých teplotách a vysokém výkonu je důležité, aby byl MKTV co nejvíce protiproudý. Křížové uspořádání např. ve vstupních a výstupních oblastech (viz část 3.4.2), které je pro MKTV typické, totiž způsobuje nelineární rozložení teplot po šířce výměníku a tím lokální napětí v materiálu [35]. Čím jsou teploty a výkon větší, tím je tento jev zásadnější. Pro počítaný ohřívač v elektrárně DEMO je proto vhodné použít konfiguraci "platelet" (více v části 3.4.2). Jedná se o téměř dokonalé protiproudé uspořádání s koncovkami integrovanými uvnitř jádra MKTV. Společnost Heatric zmiňovanou konfiguraci vyvinula právě pro plyny o vysoké teplotě.

V předchozí části práce (3.5) byl zmiňován Katzův experiment [9], který byl prováděn s MKTV typu platelet. Výsledky experimentu mimojiné hovoří o nezanedbatelném vlivu koncovek na celkové tlakové ztrátě, který roste s Reynoldsovým číslem. Koncovky mohou být až z třetiny zodpovědné za celkovou tlakovou ztrátu. Maximální povolené ztráty v tabulce 5.1 pro CO₂ proto byly v tabulce 5.1 sníženy na 66 % původní hodnoty. Helium výměníkem proudí o nižších Re . Hodnota $\Delta p_{h_{MAX}}$ proto byla v tabulce 5.1 snížena na 69% původní hodnoty. Ve vstupech a výstupech také probíhá výměna tepla. Čím větší je na obou stranách TV rozdíl mezi \dot{m}_c , tím více tepla se vymění v koncovkách vůči celkovému vyměněnému teplu. V řešeném případě je rozdíl \dot{m}_c na obou stranách nevýrazný, proto autor předpokládá, že se ve vstupech a výstupech vymění 10 % z celkového tepelného výkonu (úprava hodnoty \dot{Q} v tabulce 5.1).

Ztráty tepla do okolí se zanedbávají a předpokládá se rovnoměrné rozložení hmotnostního průtoku v kanálcích.

Elektrárna DEMO bude mít pravděpodobně blanket rozdělený do 8 stejných chladicích segmentů s výměníkem pro každý z nich. Celkový výkon a hmotnostní průtoky byly proto vyděleny 8 a program tudíž vypočetl 1 z 8 stejných MKTV zodpovědných za odvod tepla z reaktoru do sekundárního okruhu.

5.3 Výpočet a výsledky

Výpočet začíná určením volných okrajů, hřbetů a výšky desky. Velikost volných okrajů MKTV typu platelet závisí především na geometrii a provedení koncovek [8]. Návrh a výpočet koncovek svou komplexností a především nedostatkem dostupných informací převyšuje náplň této práce, a velikost volných okrajů proto také nebyla určena a byla zvolena konzervativní hodnota 20 mm. V případě nenulového úhlu θ se k volným okrajům musí přičíst polovina šíře vlny. Výška desky H pro dané dovolené napětí a provozní tlak a teplotu má hodnotu 1,8 mm a hřbet desky P 1 mm. Z několika důvodů se jedná o konzervativní hodnoty na straně bezpečnosti. Je počítáno s dovoleným napětím v materiálu pro teploty 550°C, přestože maximální teplota v TV by neměla přesáhnout 520°C. Při pevnostním výpočtu se také zjednodušuje situace náhradou kanálku půlkruhového průřezu kanálkem s obdélníkovým průřezem. Ten má ovšem horší pevnostní charakteristiky než půlkruh. Dále byl použit bezpečnostní koeficient $k = 1,4$.

Celkové rozměry jádra MKTV a střední hodnoty termohydraulických charakteristik jsou uvedeny v tabulkách 5.2, 5.3, 5.4. Celková výška jádra TV nese označení a , šířka b , délka l a objem V . Symbol z značí počet kanálků v jedné desce, n počet desek, c je rychlost proudění, ρ hustota tekutiny, Re Reynoldsovo číslo, f Darcyho součinitel tření, Δp tlaková ztráta, α součinitel přestupu tepla, A teplosměnná plocha, k součinitel prostupu tepla a η je účinnost výměníku. Jak už bylo zmíněno, pokud se hodnota proměnné mění s délkou TV je uvedena její střední hodnota. Jako v celé práci i zde indexy c resp. h značí ohřívanou (CO₂) resp. ochlazovanou (He) stranu TV. Výpočet byl prováděn pro přímé kanálky a pro vlnité kanálky s úhlem θ 32,5° a 40°. Pro všechny zmiňované varianty úhlů byla počítána varianta jedné ochlazované desky na jednu desku ohřívanou (jednoduchá deska - JD) a dvou ochlazovaných na jednu ohřívanou (zdvojená deska - ZDD).

Z výsledků je patrné, že v případě jednoduché desky s přímými kanálky tlaková ztráta dosahuje maximální přípustné hodnoty na ochlazované straně. To je způsobeno nízkou hustotou helia oproti CO₂ a z toho pramenící až téměř 12x vyšší rychlost proudění helia. Ztráty rostou s druhou mocninou rychlosti, a proto je tlaková ztráta na ochlazované straně o tolik výraznější než na ohřívané.

Při použití zdvojené desky se 2x zvětší průtočná plocha na straně helia a jeho rychlost proudění už je tedy pouze bezmála 6x větší než při použití jednoduché desky. Z toho vyplývá zvýšení rychlosti proudění CO₂ a tedy větší intenzita přestupu i prostupu tepla, nutnost menší teplosměnné plochy a v konečném důsledku i menší celkový objem jádra MKTV. Ačkoli se tlaková ztráta na ohřívané straně výrazně zvýšila, maximální přípustné ztráty je stále dosaženo na ochlazované straně. Stejných souvislostí si lze povšimnout také u MKTV s vlnitými kanálky.

Pokud se nyní zaměříme na variantu s vlnitými kanálky s úhlem 32,5°, lze si povšimnout menšího objemu, než v předchozí variantě. V důsledku disipace energie za ohyby jednotlivých vln je součinitel tření pro ochlazovanou stranu přibližně 5x větší než u přímých kanálků. Pro splnění podmínky maximální tlakové ztráty tedy musí být velká průtočná plocha, aby se docílilo menší rychlosti proudění a vyrušil se efekt vysokého součinitele tření. Výhoda vlnitých kanálků tkví ve vyšší hustotě teplosměnné plochy a v intenzivnějším přestupu tepla díky zavření proudu za ohybem vlny. Přínos těchto efektů pro geometrii MKTV s úhlem 32,5° převyšuje snížení přestupu tepla

Veličina	Jednotka	Hodnota JD	Hodnota ZDD
a	[m]	18.08	14.39
b	[m]	0.56	0.56
l	[m]	2.83	3.13
V	[m ³]	28.633	25.221
z	[1]	187	187
n_h	[1]	4758	5050
n_c	[1]	4758	2525
c_h	[m/s]	29.25	27.56
c_c	[m/s]	2.51	4.73
ρ_h	[kg/m ³]	5.67	5.67
ρ_c	[kg/m ³]	265.7	265.37
Re_h	[1]	5741	5409
Re_c	[1]	21940	41359
f_h	[1]	0.037	0.0377
f_c	[1]	0.0255	0.0219
Δp_h	[MPa]	0.207	0.207
Δp_c	[MPa]	0.049	0.165
α_h	[W/m ² /K]	4139.6	3929.8
α_c	[W/m ² /K]	2832.4	4646.2
A_h	[m ²]	12937	15194
A_c	[m ²]	12937	7597
k	[W/m ² /K]	1630.1	2767.9
η	[%]	96	96

Tabulka 5.2: Výsledky výpočtu pro přímé kanálky

způsobeného zmenšením rychlosti proudění (a tím i Re a Nu).

Podobná situace platí pro úhel 40°. Ikdyž je součinitel tření v tomto případě téměř 11x větší než pro přímé kanálky, celkový objem TV lze také zmenšit díky převaze výše zmíněných efektů nad snížením přestupu tepla v důsledku snížením rychlosti proudění. Celkový objem jádra TV při úhlu 40° dosahuje mírně větších hodnot, než u varianty 32,5°.

Výsledky naznačují, že objem jádra MKTV závisí na úhlu vlnění θ . Kvůli nedostatku dostupných korelací pro Nu a f však nelze tuto závislost a najít její minimum. Z toho důvodu se autor domnívá, že vhodnou optimalizací geometrie MKTV by se dalo dosáhnout ještě menších rozměrů. Pro hlubší analýzu a optimalizaci geometrie MKTV však bohužel nejsou dostupné zdroje, jelikož se jedná o "know-how" výrobců MKTV.

Jak je zmíněno v části 3.2, maximální šířka desky pro MKV je 0,6 m a její délka 1,5 m. Šířky jader MKTV pro různé úhly (rozměr b) jsou v tabulkách uvedeny bez volných okrajů. Po jejich započtení bude mít každý výměník šířku 0,6 m. Autor odhaduje, že pro vstupy a výstupy do a z TV je zapotřebí na začátku a na konci desky prostor 10 cm. Pro jádro tak zbývá maximální délka 1,3 m. Některé geometrie však mají délku l větší než zmiňovaných 1,3 m, a je proto potřeba je rozdělit na více sériově řazených výměníků. Podobně tomu je i u výšky. Maximální výška činí 8 m. Pokud má MKTV rozměr b vyšší než 8 m, je rozdělen na odpovídající počet paralelně řazených TV. Tabulka 5.5 obsahuje pro každou z počítaných variant rozměry MKTV včetně volných okrajů a koncovek a_{TV} ,

Veličina	Jednotka	Hodnota JD	Hodnota ZDD
a	[m]	31.0	24.57
b	[m]	0.55	0.55
l	[m]	1.32	1.45
V	[m ³]	22.323	19.51
z	[1]	154	154
n_h	[1]	8159	8620
n_c	[1]	8159	4310
c_h	[m/s]	20.7	19.59
c_c	[m/s]	1.78	3.37
ρ_h	[kg/m ³]	5.67	5.67
ρ_c	[kg/m ³]	265.53	265.15
Re_h	[1]	4064	3846
Re_c	[1]	15534	29420
f_h	[1]	0.1861	0.1882
f_c	[1]	0.1417	0.1245
Δp_h	[MPa]	0.205	0.205
Δp_c	[MPa]	0.053	0.186
α_h	[W/m ² /K]	5745.2	5493.9
α_c	[W/m ² /K]	3525.8	5926.6
A_h	[m ²]	10090	11758
A_c	[m ²]	10090	5879
k	[W/m ² /K]	2098.4	3589.5
η	[%]	96	96

Tabulka 5.3: Výsledky výpočtu pro vlnité kanálky s úhlem 32,5°

Veličina	Jednotka	Hodnota JD	Hodnota ZDD
a	[m]	42.36	33.04
b	[m]	0.54	0.54
l	[m]	1.04	1.12
V	[m ³]	23.922	20.104
z	[1]	139	139
n_h	[1]	11147	11594
n_c	[1]	11147	5797
c_h	[m/s]	16.79	16.14
c_c	[m/s]	1.44	2.78
ρ_h	[kg/m ³]	5.67	5.67
ρ_c	[kg/m ³]	265.52	265.06
Re_h	[1]	3295	3168
Re_c	[1]	12597	24236
f_h	[1]	0.3951	0.3971
f_c	[1]	0.3308	0.3034
Δp_h	[MPa]	0.205	0.205
Δp_c	[MPa]	0.059	0.215
α_h	[W/m ² /K]	5086.6	4914.7
α_c	[W/m ² /K]	3385.2	5995.7
A_h	[m ²]	10815	12118
A_c	[m ²]	10815	6059
k	[W/m ² /K]	1957.4	3479.8
η	[%]	96	96

Tabulka 5.4: Výsledky výpočtu pro vlnité kanálky s úhlem 40°

Veličina	Jednotka	0°	32,5°	40°
a_{TV}	m	7,2	6,14	6,61
b_{TV}	m	0,6	0,6	0,6
l_{TV}	m	1,24	0,925	1,32
PP	1	2	4	5
PS	1	3	2	1
P_{TV}	1	6	10	5
V_{TOT}	m^3	32,1	27,3	26,2

Tabulka 5.5: Porovnání rozměrů výměníků pro různé úhly θ

b_{TV} , l_{TV} , počet paralelně a sériově řazených výměníků PP a PS , celkový počet TV P_{TV} a jejich celkový objem V_{TOT} . Jsou uvedeny pouze varianty se zdvojenou deskou, protože pro všechny úhly kanálek dosahují menších rozměrů.

Z tabulky je zřejmé, že nejmenšího celkového objemu dosahuje varianta s úhlem $\theta = 40^\circ$. Pro jeden z chladicích okruhů v elektrárně DEMO by tedy bylo zapotřebí použít 5 paralelně řazených MKTV s rozměry 6,61 x 0,6 x 1,32 m. Pro celou elektrárnu by bylo nutno 40 těchto výměníků. Není bez zajímavosti, že ačkoliv je objem jádra pro variantu $\theta = 32,5^\circ$ nejmenší ze všech zkoumaných případů, po započtení rozměrů koncovek a volných okrajů se pořadí změní a nejmenších rozměrů dosahuje MKTV s úhlem $\theta = 40^\circ$.

5.4 Diskuze

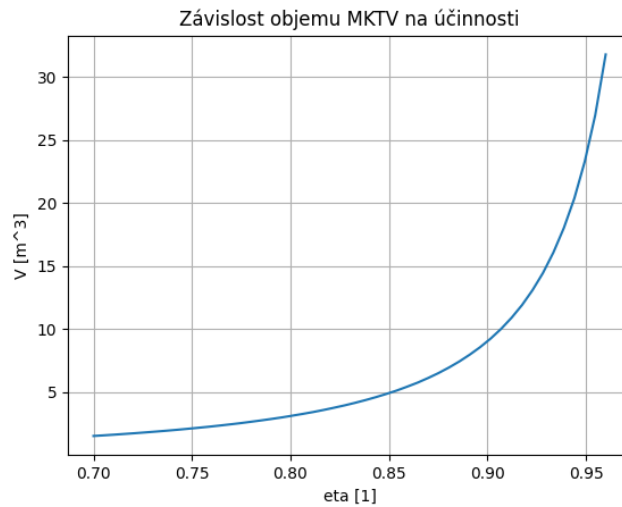
Výsledky z předchozí části práce hovoří o využití celkem 40 MKTV s rozměry 6,61 x 0,6 x 1,32 m jako ohřivačů pro elektrárnu DEMO. Ačkoli se jedná o poměrně přesný výpočet zvalidovaným programem, je třeba mít na paměti, že skutečné rozměry mohou být po vhodné optimalizaci geometrie ještě menší. Společnost Heatric [7] například uvádí, že je možné pro ochlazovanou a ohřivanou stranu použít různé úhly vlnění θ . Tento fakt společně s nedostupností korelací pro různé geometrie kanálek ponechává pro případnou optimalizaci prostor.

Do výpočtu také mohla být vnesena chyba několika zjednodušujícími předpoklady a odhady:

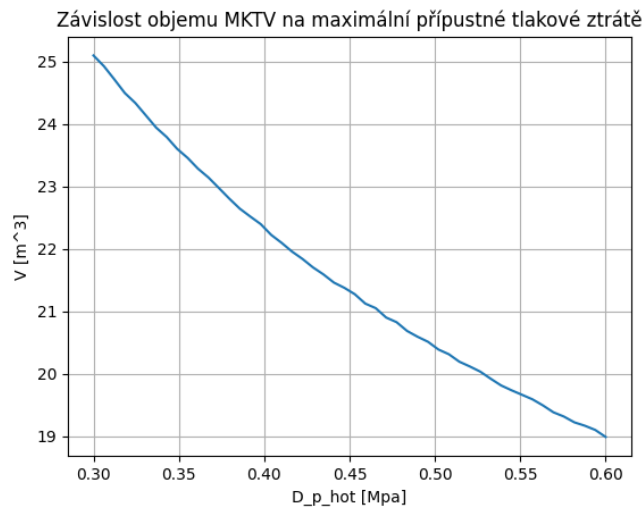
- zanedbáním úniku tepla z TV do okolí,
- předpokladem rovnoměrného rozložení hmotnostního průtoku v kanálcích,
- odhadem tlakové ztráty a vyměněného tepla v koncovkách,
- odhadem rozměrů koncovek,
- odhadem rozměrů volných okrajů.

Odhad tlakové ztráty a odhad vyměněného tepla v koncovkách se zakládá pouze na jediném experimentu [9], ve kterém byl pozorován vliv koncovek při vyšších Reynoldsových číslech. V tomto článku však ani není blíže specifikována geometrie koncovek.

Velikost jádra TV závisí na maximální přípustné tlakové ztrátě a na požadované účinnosti TV. Čím větší je přípustná tlaková ztráta, tím větší rychlosti proudění lze připustit a tím se zintenzivní přestup tepla. Nižší požadovaná účinnost znamená menší potřebnou teplosměnnou plochu. Skutečné rozměry MKTV by se odvíjely od ekonomických úvah. Pokud by měl TV menší rozměry a tedy i menší cenu díky větší povolené tlakové ztrátě, znamenalo by to větší rozměry kompresoru a jeho větší příkon. Zmenšení objemu TV (a jeho ceny) zmenšením účinnosti TV zase znamená zhoršení účinnosti tepelného oběhu kvůli nižší vstupní teplotě na turbínu. Závislost objemu jádra MKTV s přímými kanálky a s jednoduchou deskou na účinnosti výměníku resp. na maximální přípustné tlakové ztrátě je pro názornost na obr. 5.1 resp. 5.2 (okrajové podmínky pro DEMO). Optimální velikost MKTV v DEMO by tedy byla dána až hlubokou ekonomicko-technickou analýzou.



Obrázek 5.1: Závislost objemu jádra MKTV na účinnosti výměníku



Obrázek 5.2: Závislost objemu jádra MKTV na maximální přípustné tlakové ztrátě

Závěr

Díky pokrokům ve fúzním výzkumu je možné, že budoucnost energetiky bude patřit fúzním elektrárnám. Mezi jejich největší přednosti patří vysoká hustota vyprodukované energie na jednotku zastavěné plochy, inherentní bezpečnost, šetrnost k životnímu prostředí a v horizontu délky života Slunce nevyčerpatelné množství paliva. Demonstrační fúzní elektrárna DEMO, která bude navazovat na experimentální tokamak ITER, bude mít za účel ukázat možnost komerčního využití jaderné fúze v energetice.

Pokud by byl blanket DEMO chlazený heliem, bylo by možné využít další novou technologii pro sekundární okruh. Tou je Braytonův uzavřený oběh s nadkritickým CO₂. Jeho výhody oproti v současnosti používanému R-C cyklu jsou menší zastavěná plocha, jednoduchost a nižší počáteční náklady. Při vyšších teplotách na turbínu či vhodném využití nízkopotenciálních zdrojů tepla má Braytonův oběh dokonce větší účinnost, což ale není případ elektrárny DEMO. Sekundární sCO₂ okruhy zatím nejsou aplikovány v technické praxi, i když mají potenciál zlepšit ekonomickou bilanci mnoha energetických zařízení. Nejprve si však musí získat důvěru investorů.

Nejrozměrnějšími komponenty v sCO₂ smyčkách by byly tepelné výměníky. Je proto výhodné použít kompaktní TV s vysokým poměrem teplosměnné plochy vůči svému objemu. V souvislosti s Braytonovými okruhy jsou skloňovány mikrokanálkové tepelné výměníky. Ty mají díky unikátnímu výrobnímu procesu tzv. difuzivnímu svařování výborné pevnostní charakteristiky a dokáží odolat korozivitě sCO₂ i za vysokých tlaků a teplot. Díky volnosti v leptání kanálek lze docílit skoro jakéhokoliv uspořádání proudů včetně téměř dokonale protiproudého.

Pro výpočet velikosti MKTV byl vyvinut program v programovacím jazyku Python za použití tabulek stavových veličin CoolProp. Návrh výměníku program řeší pomocí iteračních smyček a rozdělení celkového entalpického spádu na n kontrolních objemů. Validace probíhala zadáním hodnot měřených na experimentální smyčce s MKTV helium/helium do programu jako vstupních parametrů. Pro výpočet byly použity Nu a f vypočítané přímo z experimentálně naměřených hodnot, aby se zabránilo vnesení chyby do výpočtu prostřednictvím chybné korelace. Následně byly porovnány rozměry skutečného MKTV s rozměry vypočítaného MKTV. Validace ukazuje, že při použití správných korelací lze dosáhnout poměrně přesných rozměrů MKTV se střední odchylkou 1,2 % a maximální odchylkou 2,4 %. Nástroj byl následně použit k určení velikosti ohřívače v elektrárně DEMO s blanketem chlazeným heliem a se sekundárním plynovým okruhem s sCO₂.

Výpočet probíhal pro 6 variant MKTV. Pro úhly vlnění $\theta = 0^\circ$, $\theta = 32,5^\circ$, $\theta = 40^\circ$ a pro každý z úhlů navíc pro jednoduchou desku a pro zdvojenou desku na ochlazované straně. Pro konkrétní uvažovanou aplikaci by bylo nejvýhodnější použít MKTV se zdvojenou deskou s úhlem $\theta = 40^\circ$. Jak naznačují výsledky, celkový objem TV závisí na geometrii

MKTV. Pro úhel $\theta = 40^\circ$ dosahuje objem V_{TOT} hodnoty $26,2 \text{ m}^3$, pro $\theta = 30^\circ$ $27,3 \text{ m}^3$ a pro přímé kanálky $32,1 \text{ m}^3$. Při použití vlnitých kanálek se za ohyby vln proud tekutiny zavíří. Zavíření znamená disipaci energie a tedy výrazný růst součinitele tření. Tento efekt na druhou stranu zlepšuje přestup tepla. Veliká výhoda vlnitých kanálek také tkví ve větší hustotě teplosměnné plochy. Při vhodné optimalizaci geometrie MKTV by šlo docílit dalšího zmenšení rozměrů. Pro všechny zkoumané úhly platí, že použití zdvojené desky na straně ochlazovaného helia přináší zredukování celkového objemu TV. Uplatnění zdvojené desky má za následek výrazné zvýšení rychlosti proudění CO₂ a tedy intenzivnější přestup tepla.

Výsledky ukazují, že by na každou z 8 smyček bylo nutno využít 5 paralelně řazených MKTV s rozměry $6,61 \times 0,6 \times 1,32 \text{ m}$. Pro celou elektrárnu DEMO by tedy bylo zapotřebí 40 kusů těchto mikrokanákových tepelných výměníků.

Reference

- [1] S. Entler, “Budoucnost energetiky: jaderná fúze,” vol. Praha : Středisko společných činností AV ČR, ISBN 978-80-200-3007-8, 2019.
- [2] ITER, ITER - the way to new energy [online]. Copyright © 2022, ITER Organization [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: <https://www.iter.org/>.
- [3] S. Entler, “Demonstrational fusion power plant.” Přednáška. Praha: ČVUT v Praze, květen 2020.
- [4] M. Picon-Nuñez, G. Polley, E. Torres-Reyes, and A. Gallegos-Muñoz, “Surface selection and design of plate–fin heat exchangers,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 19, no. 9, pp. 917–931, 1999.
- [5] E. Bubelis, W. Hering, and S. Perez-Martin, “Conceptual designs of phts, ess and pcs for demo bop with helium cooled bb concept,” *Fusion Engineering and Design*, vol. 136, pp. 367–371, 2018. Special Issue: Proceedings of the 13th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-13).
- [6] J. Stepanek, S. Entler, J. Syblik, L. Vesely, V. Dostal, and P. Zacha, “Comprehensive comparison of various working media and corresponding power cycle layouts for the helium-cooled demo reactor,” *Fusion Engineering and Design*, vol. 166, p. 112287, 2021.
- [7] Heatric, Home - Diffusion Bonded Heat Exchangers and Support | Heatric [online]. Copyright © [cit. 12.10.2021]. Dostupné z: <https://www.heatric.com/>.
- [8] R. L. Pierres, D. Southall, and S. Osborne, “Impact of mechanical design issues on printed circuit heat exchangers,” *Proceedings of SCO2 Power Cycle Symposium 2011, Universita Colorádo*, 2011.
- [9] A. Katz, S. R. Aakre, M. H. Anderson, and D. Ranjan, “Experimental investigation of pressure drop and heat transfer in high temperature supercritical co2 and helium in a printed-circuit heat exchanger,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 171, p. 121089, 2021.
- [10] J. M. S. Entler, “Spoutání slunce,” vol. Výzvy a otázky. Věda kolem nás, Sv. L, ISSN 12031, 2016.
- [11] E. Bubelis, W. Hering, and S. Perez-Martin, “Conceptual designs of phts, ess and pcs for demo bop with helium cooled bb concept,” *Fusion Engineering and Design*, vol. 136, pp. 367–371, 2018. Special Issue: Proceedings of the 13th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-13).

- [12] G. Federici, L. Boccaccini, F. Cismondi, M. Gasparotto, Y. Poitevin, and I. Ricapito, “An overview of the eu breeding blanket design strategy as an integral part of the demo design effort,” *Fusion Engineering and Design*, vol. 141, pp. 30–42, 2019.
- [13] L. Boccaccini, G. Aiello, J. Aubert, C. Bachmann, T. Barrett, A. Del Nevo, D. Demange, L. Forest, F. Hernandez, P. Norajitra, G. Porempovic, D. Rapisarda, P. Sardain, M. Utili, and L. Vala, “Objectives and status of eurofusion demo blanket studies,” *Fusion Engineering and Design*, vol. 109-111, pp. 1199–1206, 2016. Proceedings of the 12th International Symposium on Fusion Nuclear Technology-12 (ISFNT-12).
- [14] P. Norajitra, L. Bühler, U. Fischer, S. Gordeev, S. Malang, and G. Reimann, “Conceptual design of the dual-coolant blanket in the frame of the eu power plant conceptual study,” *Fusion Engineering and Design*, vol. 69, no. 1, pp. 669–673, 2003. 22nd Symposium on Fusion Technology.
- [15] G. Musgrove and S. Wright, “1 - introduction and background,” in *Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (sCO₂) Based Power Cycles* (K. Brun, P. Friedman, and R. Dennis, eds.), pp. 1–22, Woodhead Publishing, 2017.
- [16] G. Musgrove, S. Sullivan, D. Shiferaw, P. Fourspring, and L. Chordia, “8 - heat exchangers,” in *Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (sCO₂) Based Power Cycles* (K. Brun, P. Friedman, and R. Dennis, eds.), pp. 217–244, Woodhead Publishing, 2017.
- [17] L. Chai and S. A. Tassou, “A review of printed circuit heat exchangers for helium and supercritical co₂ brayton cycles,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 18, p. 100543, 2020.
- [18] L. Chai and S. A. Tassou, “A review of printed circuit heat exchangers for helium and supercritical co₂ brayton cycles,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 18, p. 100543, 2020.
- [19] D. Shiferaw, J. M. Carrero, and R. L. Pierres, “Economic analysis of sco₂ cycles with pche recuperator design optimisation,” 2016.
- [20] S. D. a Le Pierres R. a Dewson S. J., “Design considerations for compact heat exchangers. united states: American nuclear society - ans.,” 2008.
- [21] S. K. Mylavarapu, X. Sun, R. N. Christensen, R. R. Unocic, R. E. Glosup, and M. W. Patterson, “Fabrication and design aspects of high-temperature compact diffusion bonded heat exchangers,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 249, pp. 49–56, 2012. The 8th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-8).
- [22] S. Mylavarapu, X. Sun, J. Figley, N. Needler, and R. Christensen, “Investigation of High-Temperature Printed Circuit Heat Exchangers for Very High Temperature Reactors,” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 131, 07 2009. 062905.
- [23] S. K. Mylavarapu, X. Sun, R. E. Glosup, R. N. Christensen, and M. W. Patterson, “Thermal hydraulic performance testing of printed circuit heat exchangers in a high-temperature helium test facility,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 65, no. 1, pp. 605–614, 2014.

- [24] J. Abraham, E. Sparrow, and J. Tong, “Heat transfer in all pipe flow regimes: laminar, transitional/intermittent, and turbulent,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 3, pp. 557–563, 2009.
- [25] K. Nikitin, Y. Kato, and L. Ngo, “Printed circuit heat exchanger thermal–hydraulic performance in supercritical co₂ experimental loop,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, no. 5, pp. 807–814, 2006.
- [26] S. G. Kim, Y. Lee, Y. Ahn, and J. I. Lee, “Cfd aided approach to design printed circuit heat exchangers for supercritical co₂ brayton cycle application,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 92, pp. 175–185, 2016.
- [27] T. Ishizuka, “Thermal-hydraulic characteristics of a printed circuit heat exchanger in a supercritical co₂ loop,” in *The 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, 2005*, 2005.
- [28] E. H. John, “Compact heat exchangers. selection, design, and operation/john e. hesselgreaves,” 2001.
- [29] Y. Jiang, E. Liese, S. E. Zitney, and D. Bhattacharyya, “Design and dynamic modeling of printed circuit heat exchangers for supercritical carbon dioxide brayton power cycles,” *Applied Energy*, vol. 231, pp. 1019–1032, 2018.
- [30] T. L. Ngo, Y. Kato, K. Nikitin, and T. Ishizuka, “Heat transfer and pressure drop correlations of microchannel heat exchangers with s-shaped and zigzag fins for carbon dioxide cycles,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 32, no. 2, pp. 560–570, 2007.
- [31] Z. P. a Jun Guk Chol a Železný Václav, “Cfd simulace proudění pracovního média v průtočných částech mikro-výměníku ateko,” 2021.
- [32] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, and V. Lemort, “Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 6, pp. 2498–2508, 2014.
- [33] L. X. a Smith Tim a Kininmont David a Dewson Stephen John, “Materials for nuclear diffusion-bonded compact heat exchangers,” *Proceedings of ICAPP’09*, p. 9, 2009.
- [34] X. Li, D. Kininmont, R. Le Pierres, and S. J. Dewson, “Alloy 617 for the high temperature diffusion-bonded compact heat exchangers,” in *Proceedings of ICAPP*, vol. 8, pp. 282–288, ICAPP Anaheim, CA, 2008.
- [35] S. Dewson and X. Li, “Selection criteria for the high temperature reactor intermediate heat exchanger,” *Proceedings of the American Nuclear Society - International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2005, ICAPP’05*, vol. 3, pp. 1712–1719, 01 2005.