

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: 2302T013 Stavba energetických strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Příprava algoritmu nestacionárního 1D výpočtu pro vyšetření průběhu teploty izolovaného potrubí plného vody při najíždění a odstavování VT regenerace

Autor: **Bc. Eva BERKOVÁ**

Vedoucí práce: **Ing. Pavel ŽITEK**

Odborný konzultant: **Ing. Jiří NĚMEČEK**

Akademický rok 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Eva BERKOVÁ

Osobní číslo: S17N0018P

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: Stavba energetických strojů a zařízení

Název tématu: Příprava algoritmu nestacionárního 1D výpočtu pro vyšetření průběhu teploty izolovaného potrubí plného vody při najíždění a odstavování VT regenerace

Zadávací katedra: Katedra energetických strojů a zařízení

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte teoretický rozbor dané problematiky.
2. Připravte analytický výpočet do MS Excel.
3. Výsledky analytického výpočtu porovnejte s výsledky z numerických výpočtů v zadaném příkladu.
4. Vyhodnoťte průběh teploty napájecí vody.

Rozsah grafických prací: -
Rozsah kvalifikační práce: 50 - 70 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- VDI heat atlas. 2nd ed. New York: Springer, 2010
- Jícha M.: Přenos tepla a látky, Brno: CERM, 2001
- INCROPERA, Frank P. a David P. DEWITT. Fundamentals of heat and mass transfer. 4th ed. New York: John Wiley, 1996

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Žitek**
Katedra energetických strojů a zařízení
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Němeček**
Doosan Škoda Power
Datum zadání diplomové práce: **30. října 2018**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**


Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan




Dr. Ing. Jaroslav Synáč
vedoucí katedry

V Plzni dne 25. října 2018

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: 20.5.2019.....

...*Berková*.....
podpis autora

Poděkování

Chci poděkovat vedoucímu práce, Ing. Žitkovi, a konzultantovi, Ing. Jiřímu Němečkovi, za jejich cenné rady a připomínky. Za numerickou část chci poděkovat panu Ing. Volfovi.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Berková	Jméno Eva		
STUDIJNÍ OBOR	2302T013 „Stavba energetických strojů a zařízení“			
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Žitek		Jméno Pavel	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKE			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Příprava algoritmu nestacionárního 1D výpočtu pro vyšetření průběhu teploty izolovaného potrubí plného vody při najíždění a odstavování VT regenerace			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	64	TEXTOVÁ ČÁST	51	GRAFICKÁ ČÁST	13
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce řeší tepelně izolovanou potrubní trasu napájecí vody během procesu najíždění a odstavování vysokotlaké regenerace. Jedná se o sestavení algoritmu nestacionárního 1D výpočtu přenosu tepla, který vyřeší danou úlohu najíždění i odstavování vysokotlaké regenerace, s porovnáním výsledků pomocí numerické simulace. Motivací diplomové práce je využití získaných výsledků dané práce při řešení rozsáhlejšího úkolu, kterým je nízkocyklová únava vysokotlakých ohříváků.
KLÍČOVÁ SLOVA	napájecí voda, izolované potrubí, vysokotlaká regenerace, přenos tepla, nestacionární 1D výpočet

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Berková	Name Eva	
FIELD OF STUDY	2302T013 „Design of Power Machines and Equipment“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Žitek	Name Pavel	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Algorithm of unsteady 1D calculation for feed water temperature analysis in insulated feed water piping during start up and shut down procedure of HP regenerative heaters		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	64	TEXT PART	51	GRAPHICAL PART	13
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	Diploma's thesis solves insulated feed water piping during start up and shut down procedure of HP regenerative heaters. It consists of algorithm compilation of unsteady 1D heat transfer calculation, which solves this situation with comparing of numeric simulation results. Motivation of diploma's thesis is application of results of this thesis for solution of more extensive problem, which is low cycle fatigue of HP regenerative heaters.
KEY WORDS	feed water, insulated piping, HP regenerative heaters, heat transfer, unsteady 1D calculation

Obsah

Symbolika.....	9
Indexy.....	12
1 Úvod.....	13
2 Teoretická část.....	14
2.1 Mechanismy přenosu tepla.....	14
2.1.1 Přenos tepla vedením.....	14
2.1.2 Přenos tepla prouděním.....	17
2.1.2.1 Tvary kritériální rovnice pro přirozenou konvekci.....	20
2.1.2.2 Tvary kritériální rovnice pro nucenou konvekci.....	21
2.1.3 Přenos tepla sáláním.....	22
2.1.4 Přenos tepla vedením a prouděním.....	22
2.2 Průběh teploty tekutiny po délce potrubí.....	23
2.2.1 Střední objemová teplota tekutiny na výstupu z potrubí.....	24
3 Výpočtová část.....	26
3.1 Proces najíždění vysokotlaké regenerace.....	26
3.1.1 Výpočet Biotova čísla.....	26
3.1.2 Analytický výpočet.....	27
3.1.3 Numerický výpočet.....	28
3.1.4 Porovnání výsledků analytického výpočtu a numerického výpočtu.....	31
3.2 Proces odstavování vysokotlaké regenerace.....	38
3.2.1 Analytický výpočet.....	39
3.2.2 Numerický výpočet.....	40
3.2.3 Porovnání výsledků analytického a numerického výpočtu.....	42
4 Vyhodnocení průběhu teploty napájecí vody.....	49
4.1 Proces najíždění vysokotlaké regenerace.....	49
4.1.1 Průběh teploty napájecí vody a jeho porovnání s průběhem teploty vnější stěny potrubí.....	49
4.1.2 Vliv průtočného množství napájecí vody.....	50
4.1.3 Vliv vstupní teploty napájecí vody.....	53
4.2 Proces odstavování vysokotlaké regenerace.....	55
4.2.1 Vliv výchozí teploty napájecí vody.....	55
5 Závěr.....	59
Seznam použité literatury.....	61
Seznam obrázků.....	62

Seznam tabulek	63
Seznam příloh.....	64

Symbolika

Název veličiny	Značka veličiny	Jednotka veličiny
Biotovo číslo	Bi	$[-]$
čas	t	$[s]$
délka potrubí	L	$[m]$
Grashofovo číslo	Gr	$[-]$
gravitační zrychlení	g	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
hmotnostní průtok	\dot{m}	$\left[\frac{kg}{s}\right]$
hustota	ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
charakteristický rozměr	l	$[m]$
izobarický součinitel objemové roztažnosti	β	$\left[\frac{1}{K}\right]$
kinematická viskozita	ν	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$
maximální měrný tepelný tok přenášený sáláním	E_o	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$

měrná tepelná kapacita	c_p	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
měrný tepelný tok	\dot{q}	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$
Nusseltovo číslo	Nu	$[-]$
poloměr potrubí	r	$[\text{m}]$
poměrná sálavost	ε	$[-]$
Prandtlovo číslo	Pr	$[-]$
průměr potrubí	d	$[\text{m}]$
Rayleigho číslo	Ra	$[-]$
Reynoldsovo číslo	Re	$[-]$
rychlost	w	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
součinitel prostupu tepla	k	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$
součinitel přestupu tepla	α	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$

součinitel tepelné vodivosti	λ	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$
součinitel teplotní vodivosti	a	$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$
součinitel tření	ζ	$[-]$
souřadnice ve směru kolmém na tok	y	$[\text{m}]$
souřadnice ve směru toku	x	$[\text{m}]$
Stefan-Boltzmannova konstanta	σ	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \right]$
tepelný tok	\dot{Q}	$[\text{W}]$
teplota	T	$[^\circ\text{C}]^*$
tlak	p	$[\text{Pa}]$
tloušťka	s	$[\text{m}]$
tloušťka mezní vrstvy	δ	$[\text{m}]$

* Ve vybraných rovnicích je nutné dosazovat teplotu v Kelvinech, viz rovnice 2-22, 2-35, 2-37, 2-38.

Indexy

celkový	<i>celk</i>
čas	<i>t</i>
hodnota v místě x	<i>x</i>
izolace	<i>izol</i>
na vstupu	<i>in</i>
na výstupu	<i>out</i>
okolní vzduch	∞
proměnná	<i>n</i>
při konstantní teplotě	<i>T</i>
sálání	<i>s</i>
stěna	<i>W</i>
střední	<i>stř</i>
tekutina	<i>F</i>
vnější	<i>o</i>
vnitřní	<i>i</i>

1 Úvod

Elektrárna jako zdroj elektrické energie je velmi složité technické dílo. Mezi nejvýznamnější stabilní zdroje elektrické energie patří elektrárna uhelná a jaderná. Jako další zdroj elektrické energie, který obsahuje uzavřený parovodní cyklus, lze uvést elektrárnu paroplynovou, elektrárnu na biomasu a spalovnu odpadu.

V současné době nabývají na významu elektrárny solární a větrné, kde dodávka elektrické energie je velice nestabilní. Nestabilní dodávka elektrické energie plyne ze závislosti solárních a větrných elektráren na počasí, které je obtížně předvídatelné, a souvisí s problémem akumulace tímto způsobem získané energie. Daná nestabilita je velmi nebezpečná pro elektrizační přenosovou soustavu a může ohrozit dodávku elektrické energie k odběratelům. K zabezpečení dodávky elektrické energie dle aktuální potřeby odběratelů slouží regulace. Výkonové změny jako rychlé najíždění a odstavování energetického bloku jsou procesy, které silně zatěžují energetická zařízení a mají dopad do životnosti součástí. V závislosti na provozní teplotě jsou největšími faktory, které snižují životnost součástí, tečení materiálu a nízkocyklová únava. Problematika životnosti součástí je řešena hlavně u parních turbín. Příkladem je odstávka paroplynové elektrárny, která běžně trvá 8 hodin. Doba najetí je pro výše uvedenou odstávku 20 minut. Pro dané podmínky je životnost parní turbíny 6 000 cyklů. Otázkou zůstává, jak se daný jev projeví do životnosti tepelných výměníků. Pro zodpovězení otázky je zapotřebí znát průběh teploty napájecí vody v závislosti na čase při procesech jako je najíždění a odstavování vysokotlaké regenerace. Motivací diplomové práce je využití získaných výsledků dané práce při řešení rozsáhlejšího úkolu, kterým je nízkocyklová únava vysokotlakých ohříváků. Z hlediska podkladů, které jsou zapotřebí pro řešení nízkocyklové únavy vysokotlakých ohříváků, je nejdůležitější znalost teploty napájecí vody na konci potrubní trasy neboli na vstupu do vysokotlakého ohříváku.

Řešenou oblastí je izolovaná potrubní trasa, kterou protéká napájecí voda. Jedná se o vodu na výtlačku napájecího čerpadla, která je vedena ke zdroji tepla k opětovnému ohřevu na mez sytosti, k výparu a k případnému přehřátí. Na dané trase se nachází vysokotlaká regenerace. Vysokotlakou regeneraci lze popsat jako soustavu několika vysokotlakých ohříváků.

Diplomová práce si klade za cíl sestavit analytický výpočet v programu MS Excel a porovnat výsledky s výsledky numerického výpočtu společnosti Ansys. Analytický i numerický výpočet v rámci zadané úlohy rozlišuje dva procesy. Jako první je proces najíždění vysokotlaké regenerace, kdy napájecí voda, která proudí, prohřívá studené potrubí, a jako druhý je proces odstavování vysokotlaké regenerace, kdy je napájecí voda v daném potrubním úseku uzavřena a vlivem okolního vzduchu chladne.

V teoretické části autor popisuje mechanismy přenosu tepla s konkrétními aplikačními vztahy, které jsou součástí algoritmu nestacionárního 1D výpočtu uvedeného ve výpočtové části. Výpočtová část je zaměřena na sestavení analytického výpočtu zadané úlohy v programu MS Excel a porovnání výsledků s výsledky numerického výpočtu. Na závěr je vyhodnocen průběh teploty napájecí vody v závislosti na čase.

2 Teoretická část

V teoretické části je pozornost zaměřena na teplo a jeho sdílení. Teplo je přenášena tepelná energie. Tato tepelná energie je přenášena mikročásticemi. Mikročástice představují molekuly, atomy, ionty a volné elektrony. O molekulách se hovoří v případě kapalin a plynů, o atomech v případě tuhých látek.[1]

Východiskem pro vytvoření algoritmu nestacionárního 1D výpočtu průběhu teploty napájecí vody je znalost základních mechanismů přenosu tepla.

2.1 Mechanismy přenosu tepla

Obecně jsou rozlišovány 3 mechanismy přenosu tepla. Jedná se o přenos tepla:

- vedením (kondukcí),
- prouděním (konvekcí),
- sáláním (radiací).

Dané mechanismy se často vyskytují spolu. Typickým příkladem je přenos tepla v kotli. Zde se projeví sálání plamene, přenos tepla prouděním spalin a přenos tepla vedením přes stěnu trubek. V trubkách kotle proudí kotelní voda. Zde je přenos tepla uskutečňován prouděním a částečně u stěny i vedením.[1]

Nyní je vhodné aplikovat dané mechanismy přenosu tepla na potrubní trasu, ve které proudí napájecí voda. Ještě předtím je však nutné rozlišit dva procesy. Proces najíždění vysokotlaké regenerace a proces jejího odstavování.

Najíždění vysokotlaké regenerace znamená přivedení napájecí vody do trasy vysokotlaké regenerace a následné zahájení neregulovaného odběru páry z turbíny do vysokotlakého ohříváku. Řešená část potrubní trasy je v úseku za trojcestným ventilem až ke vstupu do vysokotlakého ohříváku. Přivedená napájecí voda jako zdroj tepla postupně prohřívá uvedenou potrubní trasu. Napájecí voda zde proudí, tudíž je zde základním mechanismem přenosu tepla proudění, přesněji řečeno nucená konvekce na straně napájecí vody. Dalším důležitým mechanismem přenosu tepla je vedení materiálem potrubí. Vstupní parametry napájecí vody jsou zadány. Vstupní teplota napájecí vody se odvíjí od teploty vody v napájecí nádrži a tlak je dán napájecím čerpadlem.

Při procesu odstavování vysokotlaké regenerace se trojcestný ventil na vstupu a výstupu vysokotlaké regenerace uzavře, a tím se zamezí proudění napájecí vody v dané potrubní trase. Zde se již nucená konvekce uvnitř potrubí neuplatňuje. Dominantními mechanismy přenosu tepla, které se zde uplatňují, jsou vedení, přirozená konvekce uvnitř i vně potrubí a sálání. Uvnitř potrubí se projeví přenos tepla přirozenou konvekcí napájecí vody. Přenos tepla vedením je uskutečňován přes stěnu potrubí, tepelnou izolaci a ochranný plech. Plech je v kontaktu s okolním vzduchem, který proudí přirozeně. To znamená, že přenos tepla je z povrchu plechu uskutečňován přirozenou konvekcí a částečně i sáláním povrchu do okolí.

2.1.1 Přenos tepla vedením

Mechanismus vedení tepla je typický pro pevné látky. U kapalin a případně plynů může nastat pouze v případě, že je tekutina v klidu nebo proudí laminárně. V daném případě je přenos tepla vedením uskutečňován ve směru kolmém na proud prostřednictvím difúze.[1]

Vedení tepla lze definovat jako přenos tepelné energie mezi mikročásticemi tělesa, které jsou více energetické a které jsou méně energetické, přičemž jediný možný směr je vždy od výše energetických mikročástic k méně energetickým mikročásticím. Vyšší teplota znamená vyšší

energii mikročástice. Z výše uvedeného plyne, že přenos tepelné energie probíhá vždy ve směru klesající teploty a je tedy nutný teplotní gradient.[2]

Základním zákonem pro přenos tepla vedením je Fourierův zákon, který formuloval Jean Baptiste Joseph Fourier v roce 1822 a je uveden v rovnici 2-1 v jednorozměrném tvaru.[3]

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad 2-1$$

Fourierův zákon platí pro stacionární teplotní pole a vyjadřuje závislost mezi tepelným tokem a teplotním gradientem. Daný zákon udává, že měrný tepelný tok je přímo úměrný velikosti teplotního gradientu, avšak je opačného znaménka.

V rovnici se nachází součinitel lambda neboli součinitel tepelné vodivosti, který lze stanovit na základě experimentů pro různé materiály v závislosti na teplotě. Jedná se o fyzikální vlastnost daného materiálu. Fyzikální význam součinitele tepelné vodivosti je spjatý s odporem proti přenosu tepla. Čím větší je součinitel tepelné vodivosti tělesa, tím menší je odpor proti přenosu tepla. Ve Fourierově zákoně má význam jako konstanta úměrnosti.[2]

Přenos tepla vedením může být řešen jako 1D, 2D i 3D úloha, která může být stacionárního nebo nestacionárního charakteru. Proto je nutné si danou konkrétní úlohu, která je předmětem diplomové práce, klasifikovat.

Zkoumaným tělesem je potrubí, které má mnohem větší délku než průměr. Jedná se tedy o dlouhé potrubí a lze tak říci, že je možné úlohu řešit jako jednorozměrnou neboli 1D. Jednorozměrné vedení tepla znamená, že se teplota v určitém tělese mění jen ve směru jedné souřadnice. Tepelný tok pro případ dlouhého potrubí je pouze ve směru radiálním. To znamená, že teplota válcové stěny potrubí se mění pouze ve směru poloměru. Ve stěně potrubí není v osovém směru žádný tepelný tok, tudíž není ani teplotní gradient.[2]

Daná úloha je z hlediska povahy najíždění a odstavování vysokotlaké regenerace nestacionárního charakteru. To znamená, že není časově ustálená, tudíž se okrajové podmínky úlohy mění v čase. Okrajové podmínky úlohy udávají vliv okolí na řešené těleso. Pro nestacionární úlohu přenosu tepla je typické vyhodnocení průběhu teploty v závislosti na čase.

Aplikace pro případ najíždění vysokotlaké regenerace

Nejprve je v rámci podkapitoly o přenosu tepla vedením pozornost zaměřena na proces, kterým je najíždění vysokotlaké regenerace. Celou situaci lze rozebrat následovně. Dlouhé potrubí je protékáno napájecí vodou o vysoké teplotě. Na počátku má potrubí teplotu okolí. Po otevření trojcestného ventilu na trase napájecí vody začne proudit napájecí voda do potrubí. Teplota napájecí vody je značně vyšší než teplota potrubí. Potrubí se začne postupně prohřívat. Nejprve se prohřívá vnitřní stěna potrubí a poté postupně i těleso potrubí směrem k vnější stěně potrubí. Výše zmíněná nestacionární úloha, kterou je ohřev potrubí uvnitř protékající napájecí vodou, je ukončena vznikem nového ustáleného stavu. Nový ustálený stav je dán novou rovnoměrnou teplotou potrubí, která je shodná s teplotou napájecí vody. Nejdůležitější otázkou při řešení dané nestacionární úlohy je rychlost ohřevu potrubí napájecí vodou a s tím související teplota napájecí vody na konci potrubí v určitém čase.

Jednou z možných metod použitelných pro řešení dané úlohy je kapacitní metoda. Kapacitní metodu lze použít pro řešení ohřevu či ochlazování tělesa s velmi malým Biotovým číslem. Velmi malé Biotovo číslo lze vysvětlit předpokladem, že se v tělese při ohřevu nebo při ochlazování vyskytují jen velmi malé teplotní gradienty. V aplikaci pro potrubí, kterým proudí napájecí voda, je nutno pro použití dané metody předpokládat, že teplota potrubí, včetně teploty vnitřního i vnějšího povrchu potrubí, je v každém časovém okamžiku stejná.

Z toho vyplývá, že řešená teplota není závislá na polohové souřadnici, ale je závislá pouze na časové proměnné.

$$T = T(r, t) \quad \rightarrow \quad T = T(t) \quad 2-2$$

Ověření použitelnosti dané metody vychází ze stanovení Biotova čísla. Biotovo číslo je bezrozměrná veličina, která charakterizuje závislost mezi teplotním polem tělesa a jeho okrajovými podmínkami. Biotovo číslo udává poměr konvektivního tepelného toku ku tepelnému toku v povrchové vrstvě materiálu. Biotovo číslo je uvedeno v rovnici 2-3.[2]

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_w} \quad 2-3$$

Z daného vztahu plyne, že Biotovo číslo je velmi malé, pokud je malý součinitel přestupu tepla, malý charakteristický rozměr nebo pokud je vysoká tepelná vodivost materiálu. Charakteristickým rozměrem je zde tloušťka stěny potrubí. Prakticky musí platit rovnice 2-4. Daná podmínka velmi malého Biotova čísla je ověřena ve výpočtové části diplomové práce, viz podkapitola 3.1.1.

$$Bi < 0,1 \quad 2-4$$

Aplikace pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

Zásadním rozdílem oproti předchozí úloze najíždění vysokotlaké regenerace je uzavření napájecí vody v potrubí pomocí trojcestných ventilů, čímž se zamezí jejímu proudění. Na počátku má napájecí voda a potrubí vysokou teplotu, která odpovídá teplotě napájecí vody v napájecí nádrži. Tato teplota napájecí vody a potrubí je značně vyšší než teplota okolí. Potrubí začíná chladnout. Nejprve chladne vnější stěna potrubí a poté postupně i těleso potrubí směrem k vnitřní ploše. Daný nestacionární děj je ukončen vznikem nového ustáleného stavu, který je dán novou rovnoměrnou teplotou potrubí, která je shodná s teplotou okolí. Hlavní řešenou otázkou je průběh teploty napájecí vody v závislosti na čase.

Úlohu odstavování vysokotlaké regenerace má smysl řešit s užitím vztahů pro stacionární neboli časově nezávislou úlohu. Níže jsou uvedeny konkrétní vztahy pro výpočet přenosu tepla vedením pro jednoduchou a pro složenou válcovou stěnu, které jsou čerpány z literatury [3].

Fourierův zákon aplikovaný na válcovou stěnu má tvar uvedený v rovnici 2-5.

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dr} \quad 2-5$$

Tepelný tok, který prochází jednoduchou válcovou stěnou, lze vyjádřit pomocí rovnic níže.

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dT}{dr} \quad 2-6$$

$$\dot{Q} \cdot \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r} = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \int_{T_i}^{T_o} dT \quad 2-7$$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_i - T_o)}{\ln \frac{r_o}{r_i}} \quad 2-8$$

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_o}{r_i}} \quad 2-9$$

Měrný tepelný tok pro případ přenosu tepla vedením jednoduchou válcovou stěnou, který je vztažený k vnitřnímu poloměru, se stanoví dle rovnice 2-10.

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_o}{\frac{r_i}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_o}{r_i}} \quad 2-10$$

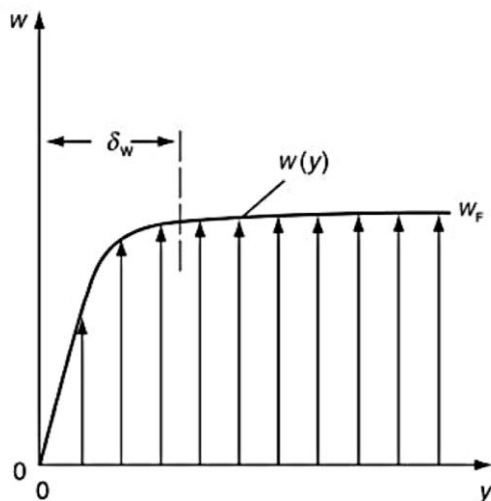
Měrný tepelný tok pro složenou válcovou stěnu, který je vztažený k vnitřnímu poloměru, je vyjádřen rovnicí 2-11.

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_{n+1}}{r_1 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \cdot \ln \frac{r_{n+1}}{r_n} \right)} \quad 2-11$$

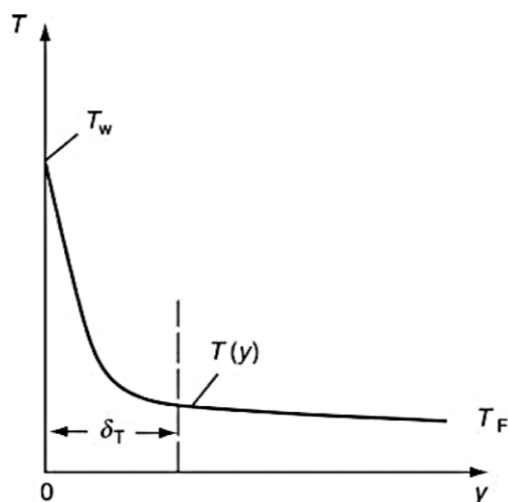
2.1.2 Přenos tepla prouděním

Přenos tepla prouděním se vyskytuje u tekutin. Daný přenos tepla je intenzivní hlavně u turbulentního proudění. V rámci přenosu tepla prouděním se vyskytují dva mechanismy. Jedním mechanismem je difúze neboli náhodný pohyb molekul. Druhým mechanismem je objemový tok molekul. Přenos energie prouděním se vždy vyznačuje oběma mechanismy, jelikož molekuly si v objemovém pohybu tekutiny vždy zachovávají i jejich náhodný pohyb.[2]

Nejčastějším případem je přenos tepla prouděním mezi proudící tekutinou a omezující stěnou, kde musí být opět přítomen teplotní gradient. U dané omezující stěny vzniká vrstva tekutiny, která je nazývána jako rychlostní mezní vrstva. V rychlostní mezní vrstvě se mění rychlost proudu od nuly až po rychlost volného proudu. Nulová rychlost proudu na daném povrchu se označuje jako ulpívání na stěně. Celá situace je znázorněna na Obr. 2.1. Teplotní mezní vrstva vzniká obdobně jako rychlostní mezní vrstva a je znázorněna na Obr. 2.2.[2]



Obr. 2.1: Rychlostní mezní vrstva [3]



Obr. 2.2: Teplotní mezní vrstva [3]

Základním zákonem pro přenos tepla prouděním je Newtonův zákon, který je uveden v rovnici 2-12.

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_W - T_F) \quad 2-12$$

Newtonův zákon je tvořen rozdílem teploty stěny a teploty tekutiny v dostatečné vzdálenosti od stěny a součinitelem přestupu tepla, který je označen řeckým písmenem alfa.[3]

Hodnotu součinitele přestupu tepla zásadně ovlivňují dva následující faktory. Prvním faktorem je způsob, jakým je tekutina uváděna do pohybu, a druhým faktorem je typ proudění.

Z hlediska způsobu, jakým je tekutina uváděna do pohybu, lze rozdělit proudění neboli konvekci na přirozenou a nucenou. Přirozená konvekce je charakterizována pohybem tekutiny, který je způsoben rozdílem hustoty ohřátých a studených mikročástic tekutiny. Studené mikročástice tekutiny klesají a ohřáté mikročástice stoupají. Nucená konvekce je charakteristická pohybem tekutiny, který je způsoben technickým zařízením nebo u kapalin i gravitací.[1]

Z hlediska typu proudění lze rozdělit proudění na laminární, intermitentní a turbulentní. Typ proudění lze stanovit na základě Rayleighova čísla u přirozené konvekce a Reynoldsova čísla u nucené konvekce. Přenos tepelné energie prouděním u laminárního proudění je uskutečňován na základě jednotlivých molekul. U turbulentního proudění je přenos tepelné energie intenzivnější, jelikož hlavními částicemi jsou shluky molekul, které se nazývají molární částice. U intermitentního proudění se střídají úseky s laminárním prouděním a úseky s turbulentním prouděním v čase.[1]

Dále je důležité rozlišovat proudění tekutiny uvnitř uzavřeného prostoru a proudění tekutiny při obtékání těles. Dané případy se liší z hlediska mezní vrstvy. Proudění tekutiny uvnitř uzavřeného prostoru lze chápat jako proudění tekutiny v kanále či v potrubí, kde se kromě vstupního úseku potrubí mezní vrstva nevyskytuje. Z daného důvodu je nutné rozlišovat proudění ve vstupním úseku potrubí a proudění, které je již vyvinuté. U obtékání těles má tvorba mezní vrstvy velký význam.[2]

Běžné hodnoty součinitele přestupu tepla jsou uvedeny v Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Běžné hodnoty součinitele přestupu tepla [4]

Typ proudění	Typ tekutiny	Součinitel přestupu tepla $\alpha \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$
přirozená konvekce	plyn	2 - 25
	kapalina	50 - 1 000
nucená konvekce	plyn	25 - 250
	kapalina	100 - 20 000

Metody stanovení součinitele přestupu tepla jsou přehledně uvedeny v Tab. 2.2.

Tab. 2.2: Metody stanovení součinitele přestupu tepla [1]

VÝPOČTOVÉ METODY	analytické výpočty – pomocí integrálních rovnic rychlostní a teplotní mezní vrstvy
	numerické výpočty – pomocí parciálních diferenciálních rovnic proudění a sdílení tepla
EXPERIMENTÁLNÍ METODY	výsledkem jsou kritériální rovnice

Pro stanovení součinitele přestupu tepla potřebného pro řešení úlohy najíždění a odstavování vysokotlaké regenerace v dané diplomové práci jsou využity vztahy, které byly stanoveny na základě experimentů. Jedná se o konkrétní tvary kritériální rovnice, které mají vždy uvedený rozsah své platnosti. Kritériální rovnice obsahují kritéria podobnosti, které je nutné před provedením samotného experimentu stanovit. Jedním z těchto kritérií podobnosti je Nusseltovo číslo, které je typické pro přirozenou i nucenou konvekci. Stanovením jeho hodnoty lze pak snadno dopočítat hledaný součinitel přestupu tepla.

Kritérium podobnosti lze obecně chápat jako seskupení geometrických, kinematických a fyzikálních veličin do zlomku, který je bezrozměrný a má hlubší fyzikální význam. Všechny kritéria podobnosti, které se při měření uplatní, lze odvodit buď z parciálních diferenciálních rovnic, anebo z dimenzionální analýzy.[1]

V Tab. 2.3 je uveden obecný tvar kritériální rovnice pro přirozenou konvekci a pro nucenou konvekci.

Tab. 2.3: Obecný tvar kritériální rovnice pro přirozenou konvekci a pro nucenou konvekci [1]

přirozená konvekce	$Nu = f(Ra, Pr)$
nucená konvekce	$Nu = f(Re, Pr, Ra)$

Kritéria podobnosti, která se vyskytují ve výše uvedených kritériálních rovnicích, je potřeba uvést a vysvětlit jejich fyzikální význam. Vztahy a definice jsou čerpány z literatury [1].

Nusseltovo číslo udává poměr konvektivního tepelného toku ku molekulárnímu tepelnému toku především ve vazké podvrstvě.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_F} \quad 2-13$$

Reynoldsovo číslo udává poměr setrvačné síly ku třecí síle. Při nižších rychlostech ho lze zanedbat.

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad 2-14$$

Prandtlovo číslo vyjadřuje podobnost mezi rychlostním a teplotním polem.

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad 2-15$$

Dle rovnice 2-16 lze stanovit součinitel teplotní vodivosti, který je zapotřebí pro stanovení Prandtlova čísla.

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad 2-16$$

Grashofovo číslo udává poměr tíhové síly ku třecí síle s vlivem tepelné roztažnosti tekutiny. Při vyšších rychlostech proudění lze Grashofovo číslo zanedbat.

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T \quad 2-17$$

Rayleighovo číslo je definováno jako součin Grashofova čísla a Prandtlova čísla, viz rovnice 2-18.

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot \frac{\nu}{a} = \frac{g \cdot l^3}{\nu \cdot a} \cdot \beta \cdot \Delta T \quad 2-18$$

2.1.2.1 Tvary kritériální rovnice pro přirozenou konvekci

Obecný tvar kritériální rovnice pro přirozenou konvekci je uvedený v rovnici 2-19.

$$Nu = f(Ra, Pr) \quad 2-19$$

U přirozené konvekce je nutné rozlišit, zda je potrubí horizontální nebo vertikální. Charakteristickým rozměrem při obtékání horizontálního izolovaného potrubí tekutinou, který se uplatní v rámci Rayleighova a Nusseltova čísla, je vnější průměr izolace potrubí. Fyzikální vlastnosti tekutiny se stanoví pro střední teplotu filmu tekutiny, viz rovnice 2-20.

$$T_{stř,o} = \frac{T_{izol} + T_{\infty}}{2} \quad 2-20$$

Pro obtékání horizontálního izolovaného potrubí tekutinou lze použít tvar kritériální rovnice, který je uvedený v rovnici 2-21. Uvedená rovnice je čerpána z literatury [5].

$$\text{Pro } 10^{-6} < Ra: \quad Nu = \left\{ 0,6 + 0,387 \cdot \frac{Ra}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{16}{9}}} \right\}^{\frac{1}{6}} \quad 2-21$$

Pro vyjádření Rayleighova čísla je nutné stanovit izobarický součinitel objemové roztažnosti. Pro ideální plyn lze daný součinitel aproximovat dle vztahu 2-22. Zde je nutné dosazovat příslušné teploty v Kelvinech.

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{2} \cdot (T_{izol} + T_{\infty})} \quad 2-22$$

Pro vyšetření přirozené konvekce uvnitř horizontálního izolovaného potrubí, ve kterém je trojcestnými ventily uzavřena chladnoucí tekutina, je použita kritériální rovnice 2-21. Charakteristickým rozměrem, který se uplatní v rámci Rayleigha a Nusseltova čísla, je vnitřní průměr potrubí a fyzikální vlastnosti tekutiny se stanoví pro střední teplotu filmu tekutiny, viz rovnice 2-23.

$$T_{stř,i} = \frac{T_W + T_F}{2} \quad 2-23$$

Izobarický součinitel objemové roztažnosti lze pro vodu o tlaku 100 bar a v rozsahu teplot 0 až 200 °C aproximovat dle rovnice 2-24. Rovnice je vytvořena na základě tabulkovaných vlastností vody, které jsou uvedeny v literatuře [3].

$$\beta = (-1,0069 \cdot T_{stř,i}^4 \cdot 10^{-9} + 5,8626 \cdot 10^{-7} \cdot T_{stř,i}^3 - 1,1414 \cdot 10^{-4} \cdot T_{stř,i}^2 + 1,4168 \cdot 10^{-2} \cdot T_{stř,i} - 2,9322 \cdot 10^{-2}) \cdot 10^{-3} \quad 2-24$$

2.1.2.2 Tvary kritériální rovnice pro nucenou konvekci

Obecný tvar kritériální rovnice, který platí pro nucenou konvekci, je uveden v rovnici 2-25. Uvedená kritériální rovnice uvádí Nusseltovo číslo, které je funkcí Reynoldsova čísla, Prandtlova čísla a Rayleigha čísla.

$$Nu = f(Re, Pr, Ra) \quad 2-25$$

Rayleigha číslo lze pro vyšší rychlosti proudění zanedbat. Obecný tvar kritériální rovnice pro vyšší rychlosti proudění je uvedený v rovnici 2-26.

$$Nu = f(Re, Pr) \quad 2-26$$

Charakteristickým rozměrem pro proudění tekutiny v potrubí, který se uplatní v rámci Reynoldsova a Nusseltova čísla, je vnitřní průměr potrubí. Fyzikální vlastnosti tekutiny se stanoví pro střední teplotu filmu tekutiny, viz rovnice 2-23.

Konkrétní tvary kritériální rovnice, které jsou zde uvedeny, platí pro vyvinuté proudění tekutiny v potrubí a jsou čerpány z literatury [3].

Pro laminární proudění, kdy je Reynoldsovo číslo menší než 2300, platí v případě konstantní teploty stěny ($T_W = konst.$) kritériální rovnice 2-27 až 2-29.

$$\text{Pro malé hodnoty } Re \cdot Pr \cdot \frac{d_i}{x}: \quad Nu_{x,T,1} = 3,66 \quad 2-27$$

$$\text{Pro velké hodnoty } Re \cdot Pr \cdot \frac{d_i}{x}: \quad Nu_{x,T,2} = 1,077 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d_i}{x} \right)^{\frac{1}{3}} \quad 2-28$$

$$\text{Pro } 0 < Re \cdot Pr \cdot \frac{d_i}{x} < \infty: \quad Nu_{x,T} = \left[Nu_{x,T,1}^3 + 0,7^3 + (Nu_{x,T,2} - 0,7)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad 2-29$$

Jedná se o místní Nusseltovo číslo v potrubí neboli Nusseltovo číslo v místě x . Rovnice 2-29 platí s maximální odchylkou 6 % v rozsahu $10 < Re \cdot Pr \cdot \frac{d_i}{x} < 100$. Mimo daný interval dosahuje odchylka mnohem menších hodnot.

Pro vyvinuté turbulentní proudění, kdy je Reynoldsovo číslo větší než 10 000, platí tvar kritériální rovnice v případě konstantní teploty stěny ($T_W = konst.$) i v případě konstantního tepelného toku ($q_W = konst.$) uvedený v rovnici 2-30.

$$Nu_x = \frac{\frac{\zeta}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{8}} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{d_i}{x} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad 2-30$$

$$\zeta = (1,8 \cdot \log_{10} Re - 1,5)^{-2} \quad 2-31$$

Podmínky platnosti jsou uvedeny v rovnicích 2-32 až 2-34.

$$10^4 \leq Re \leq 10^6 \quad 2-32$$

$$0,1 \leq Pr \leq 10^3 \quad 2-33$$

$$\frac{d_i}{x} \leq 1 \quad 2-34$$

2.1.3 Přenos tepla sáláním

Přenos tepla sáláním je mechanismus, který lze popsat jako přenos tepelné energie elektromagnetickým vlněním o vlnových délkách 0,35 až 40 mikrometrů. Mimo dané vlnové délky se tepelná energie nepřenáší. Mechanismus je typický pro povrchy pevných těles, avšak mohou sálat i tři a více atomové plyny. Sálání je nejúčinnější ve směru kolmém na povrch a uskutečňuje se i v naprostém vakuu.[1]

Základním zákonem z hlediska sálání je Stefan-Boltzmannův zákon, který je uveden v rovnici 2-35. Teplotu izolace je nutné do rovnice dosadit v Kelvinech. Daný zákon udává maximální měrný tepelný tok, který může být přenášen sáláním povrchu tělesa. Jedná se o absolutně černé těleso, které má z definice ideální sálání povrchu. Stefan-Boltzmannova konstanta má hodnotu uvedenou v rovnici 2-36.[2]

$$\dot{q}_s \equiv E_o = \sigma \cdot T_{izol}^4 \quad 2-35$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \quad 2-36$$

Pro reálný povrch tělesa je ve vztahu navíc součinitel zvaný jako poměrná sálavost, která udává efektivitu sálání reálného povrchu tělesa vzhledem k absolutně černému tělesu. Poměrná sálavost nabývá hodnot od nuly do jedné.[2]

$$\dot{q}_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{izol}^4 \quad 2-37$$

Měrný tepelný tok při přenosu tepla sáláním reálného povrchu tělesa do okolního vzduchu se stanoví dle rovnice 2-38. Daná rovnice předpokládá, že okolní vzduch pohltí všechnu vysálanou energii tělesa. Zde je opět nutné dosazovat příslušné teploty v Kelvinech.

$$\dot{q}_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{izol}^4 - T_{\infty}^4) \quad 2-38$$

Z výše uvedeného tepelného toku lze stanovit aplikací Newtonova zákona sálavý součinitel přestupu tepla, viz rovnice 2-39.

$$\alpha_s = \frac{\dot{q}_s}{T_{izol} - T_{\infty}} \quad 2-39$$

2.1.4 Přenos tepla vedením a prouděním

V případě přenosu tepla vedením a prouděním se jedná o přenos tepla prostupem, kde vystupuje součinitel prostupu tepla. Do prostupu tepla může být zahrnutý i vliv sálání. Měrný tepelný tok při prostupu tepla izolovaným potrubím lze vyjádřit dle rovnice 2-40. Jedná se o přenosovou rovnici.[1]

$$\dot{q} = k \cdot (T_F - T_\infty) \quad 2-40$$

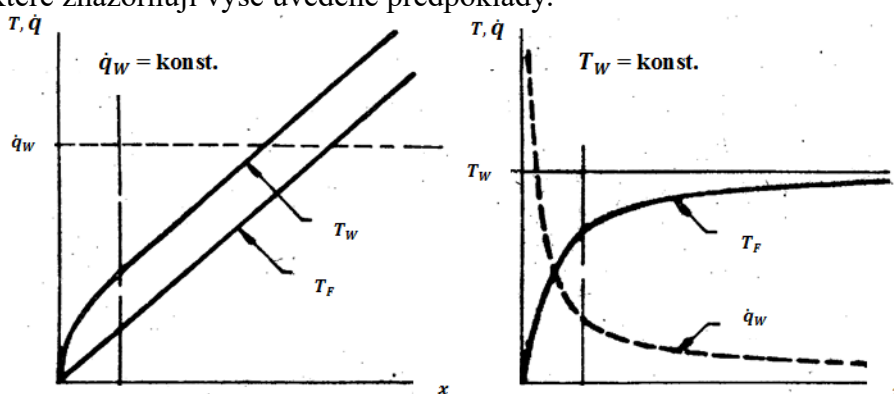
Součinitel prostupu tepla, který je vztažen k vnitřnímu poloměru potrubí, se stanoví pro přenos tepla vedením a prouděním se zahrnutím vlivu sálání pro izolované potrubí dle rovnice 2-41.

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_F} + \frac{r_1}{\lambda_W} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{\lambda_{izol}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_1}{\alpha_{celk} \cdot r_3} \right)^{-1} \quad 2-41$$

$$\alpha_{celk} = \alpha_\infty + \alpha_s \quad 2-42$$

2.2 Průběh teploty tekutiny po délce potrubí

Pro stanovení průběhu teploty tekutiny po délce potrubí lze použít předpoklad konstantního tepelného toku stěnou nebo předpoklad konstantní teploty stěny. Na Obr. 2.3 jsou uvedeny dva grafy, které znázorňují výše uvedené předpoklady.



Obr. 2.3: Průběh teplot a tepelného toku po délce potrubí [2]

Graf vlevo uvádí případ, kdy je konstantní tepelný tok stěnou. Osa x je rozdělena na část vstupního úseku potrubí a na část potrubí, kde je vyvinuté proudění. Pro vnitřní vyvinuté proudění je součinitel přestupu tepla konstantní. Závislost průběhu teploty stěny a teploty tekutiny lze odvodit z Newtonova zákona, který je uveden v rovnici 2-12. Pokud je konstantní součinitel přestupu tepla i tepelný tok stěnou, musí být konstantní i příslušný teplotní rozdíl, viz rovnice 2-43. To znamená, že při ohřevu roste teplota stěny stejně rychle jako střední teplota tekutiny. Pro vnitřní vyvinuté proudění je průběh obou teplot po délce potrubí lineární. Teplota tekutiny není závislá na radiální poloze.[2]

$$(T_W - T_F) = konst. \quad 2-43$$

Graf vpravo popisuje průběh teploty tekutiny a průběh tepelného toku stěnou po délce potrubí v případě, kdy je konstantní teplota stěny. Osa x je opět rozdělena na část vstupního úseku potrubí a na část potrubí s vyvinutým prouděním. V diplomové práci je pozornost zaměřena pouze na vyvinuté proudění uvnitř potrubí, kde je součinitel přestupu tepla konstantní. Tepelný tok za konstantní teploty stěny po délce potrubí klesá. To je dáno zvyšováním teploty tekutiny, což má za následek snižování rozdílu teploty stěny a teploty tekutiny. Pokud je konstantní součinitel přestupu tepla a konstantní teplota stěny, vliv teploty tekutiny na radiální poloze je značný. Teplota tekutiny u osy potrubí roste pomaleji než teplota tekutiny u stěny potrubí. Z toho plyne, že teplota tekutiny u stěny potrubí dosáhne teploty stěny na kratším úseku.[2]

Na základě předchozího popisu je zřejmé, že pro případ najíždění vysokotlaké regenerace, který je řešen v diplomové práci, je vhodné použít předpoklad konstantní teploty stěny.

2.2.1 Střední objemová teplota tekutiny na výstupu z potrubí

Při najíždění vysokotlaké regenerace je teplota napájecí vody na vstupu do potrubí rovna teplotě vody v napájecí nádrži. Po délce potrubí se teplota napájecí vody snižuje vlivem nízké teploty stěny potrubí, která má teplotu okolí. Teplota napájecí vody na výstupu z potrubí je v daném případě vždy nižší než na vstupu do potrubí, otázkou je však o kolik. Rovnice níže jsou čerpány z literatury [2].

Pro řešení dané úlohy lze využít vztah, který je uveden v rovnici 2-44.

$$d\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot dT_F \quad 2-44$$

Elementární tepelný tok, který je přenášen prouděním, lze rozepsat způsobem uvedeným v rovnici 2-46.

$$d\dot{Q} = \dot{q} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot dx \quad 2-45$$

$$d\dot{Q} = \alpha \cdot (T_W - T_F) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot dx \quad 2-46$$

Rovnici 2-44 lze upravit do vhodnějšího tvaru, viz rovnice 2-47 a 2-48.

$$\alpha \cdot (T_W - T_F) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot dx = \dot{m} \cdot c_p \cdot dT_F \quad 2-47$$

$$\alpha \cdot (T_W - T_F) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_i}{\dot{m} \cdot c_p} = \frac{dT_F}{dx} \quad 2-48$$

Výsledná rovnice, rovnice 2-48, udává závislost teploty tekutiny na délce potrubí. Pro řešení dané rovnice je nutné doplnit okrajovou podmínku na stěně potrubí.

Za předpokladu konstantní teploty stěny ($T_W = konst.$) platí upravená rovnice 2-49.

$$\alpha \cdot \Delta T \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_i}{\dot{m} \cdot c_p} = - \frac{d(\Delta T)}{dx} \quad 2-49$$

Danou rovnici lze integrovat.

$$\int_{\Delta T_{in}}^{\Delta T_{out}} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = - \int_0^L \alpha \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_i}{\dot{m} \cdot c_p} dx \quad 2-50$$

Integrací je získána rovnice 2-51.

$$\ln \frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}} = -\alpha \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot L}{\dot{m} \cdot c_p} \quad 2-51$$

Rovnici je možné upravit, viz rovnice 2-52.

$$\frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}} = e^{-\alpha \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot L}{\dot{m} \cdot c_p}} \quad 2-52$$

Zde jsou již uvedeny konečné rovnice. Rovnice 2-53 slouží pro stanovení střední objemové teploty tekutiny na výstupu z potrubí, které má délku L a rovnice 2-54 slouží ke stanovení střední objemové teploty tekutiny v libovolném místě potrubí x.

$$\frac{T_W - T_{F,out}}{T_W - T_{F,in}} = e^{-\alpha \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot L}{\dot{m} \cdot c_p}} \quad 2-53$$

$$\frac{T_W - T_{F,x}}{T_W - T_{F,in}} = e^{-\alpha \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot x}{\dot{m} \cdot c_p}} \quad 2-54$$

Pro řešení úlohy v diplomové práci se využije rovnice 2-54, kde součinitel přestupu tepla je nahrazen součinitelem prostupu tepla. Součinitel prostupu tepla zahrnuje přenos tepla

prouděním na vnitřní stěně potrubí a přenos tepla vedením, který probíhá ve stěně potrubí. Zmíněný součinitel prostupu tepla je vztažen na vnitřní poloměr potrubí a je vyjádřen rovnicí 2-55.

$$k = \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{r_i}{\lambda_w} \cdot \ln \frac{r_o}{r_i} \right)^{-1} \quad 2-55$$

3 Výpočtová část

V rámci výpočtové části, která řeší zadanou úlohu, je proveden analytický výpočet v programu MS Excel a numerický výpočet v programu od společnosti Ansys, Ansys CFX a Ansys Fluent. Cílem je porovnání výsledků získaných pomocí analytického výpočtu a pomocí numerického výpočtu. Důležitou otázkou celé výpočtové studie je, zda autorem vytvořený analytický výpočet v programu MS Excel může alespoň částečně nahradit časově náročnou numerickou simulaci.

Analytický i numerický výpočet v rámci zadané úlohy rozlišuje dva procesy. Jako první je proces najíždění vysokotlaké regenerace, kdy napájecí voda, která proudí, prohřívá studené potrubí, a jako druhý je proces odstavování vysokotlaké regenerace, kdy je napájecí voda v daném potrubním úseku uzavřena a vlivem okolního vzduchu chladne.

3.1 Proces najíždění vysokotlaké regenerace

Zadání úlohy, která řeší proces najíždění vysokotlaké regenerace, je přehledně uvedeno v následující tabulce. Poloha zadaného potrubí je uvažována v celé délce jako horizontální.

Tab. 3.1: Zadání úlohy pro případ najíždění vysokotlaké regenerace

	Název	Značka	Hodnota			Jednotka
potrubí	vnější průměr	d_o	168,3			mm
	tloušťka	s	17,5			mm
	délka	L	10			m
	materiál	–	16Mo3			–
	hustota	ρ	7 850			$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	tepelná vodivost	λ_W	42,5			$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$
	měrná tepelná kapacita	c_p	482			$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
	výchozí teplota	T_W	20			°C
napájecí voda	tlak	p	135			bar
	vstupní teplota	$T_{F,in}$	100	120	157	°C
	hmotnostní průtok	\dot{m}	1	5	20	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
	výchozí teplota	T_F	20			°C

3.1.1 Výpočet Biotova čísla

Nyní je třeba ověřit, zda je splněna podmínka velmi malého Biotova čísla, která je uvedena v rovnici 2-4. V případě splnění podmínky je možné použít kapacitní metodu pro řešení úlohy najíždění vysokotlaké regenerace uvažované v diplomové práci.

V programu MS Excel je vytvořen výpočet, jehož výsledky jsou uvedeny v Tab. 3.2. Hodnota Biotova čísla je stanovena pro jeden vybraný případ, který nastane. Vybraný případ s ohledem na zadání celé úlohy dává nejnižší hodnotu součinitele přestupu tepla z důvodu zadání

nejnižší hodnoty teploty napájecí vody na vstupu a nejnižší hodnoty hmotnostního průtoku napájecí vody. Součinitel přestupu tepla roste se zvyšující se teplotou napájecí vody na vstupu a se zvyšujícím se hmotnostním průtokem napájecí vody. S rostoucí vzdáleností od vstupu potrubí součinitel přestupu tepla nepatrně klesá, ale v takovém případě Biotovo číslo poklesne zhruba o 0,1.

Tab. 3.2: Výsledky výpočtu Biotova čísla v programu MS Excel

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
vnitřní poloměr potrubí	r_i	0,067	m
tloušťka potrubí	s	0,018	m
číslo úseku potrubí	–	1	–
délka úseku potrubí	x	0,5	m
součinitel tepelné vodivosti materiálu potrubí	λ_w	42,5	$\frac{W}{m \cdot K}$
hmotnostní průtok napájecí vody	\dot{m}	1	$\frac{kg}{s}$
vstupní teplota napájecí vody	$T_{F,in}$	100	°C
tlak napájecí vody	p	135	bar
součinitel přestupu tepla na vnitřní straně potrubí	α	794,65	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
Biotovo číslo	Bi	0,327	–

Závěrem lze říci, že podmínka velmi malého Biotova čísla není splněna. Kapacitní metoda tudíž není aplikovatelná pro řešení úlohy najíždění vysokotlaké regenerace. Úloha najíždění vysokotlaké regenerace je řešena dle rovnic uvedených v podkapitole 2.2.1.

3.1.2 Analytický výpočet

Pro realizaci analytického výpočtu je zvolen program MS Excel. Úkolem je vytvořit algoritmus, který řeší problematiku nestacionárního přenosu tepla.

V rámci analytického výpočtu zadané úlohy najíždění vysokotlaké regenerace jsou uvažovány následující předpoklady:

- vlastnosti materiálu potrubí se nemění s teplotou,
- vedení tepla izolací, vedení tepla ochranným plechem a sálání do okolního vzduchu je zanedbáno (tepelný tok z vnější stěny potrubí do okolí je nulový),
- vedení tepla materiálem potrubí v podélném směru je zanedbáno,
- tlakové ztráty se neuvažují.

Pro přehlednost celého výpočtu jsou v programu MS Excel vytvořeny vnitřní funkce. Pro případ najíždění vysokotlaké regenerace jsou zapotřebí vnitřní funkce, které provádí výpočet součinitele přestupu tepla na straně proudící vody a výpočet součinitele přestupu tepla vztaheného k vnitřnímu poloměru potrubí. Mimo daných funkcí jsou do programu MS Excel přidány funkce – X Steam Tables, které uvádí vlastnosti vody dle IF97.

Pro sestavení nestacionárního výpočtu přenosu tepla, tj. výpočtu úlohy, která není časově ustálená a obsahuje iterativní postup výpočtu, je zapotřebí využít možnost tvorby makra v daném programu. Makro je aplikace, kterou lze v programu MS Excel vytvořit v

programovacím jazyce Visual Basic for Applications (VBA). Celý výpočet pak zjednodušeně řečeno funguje tak, že do konkrétních buněk uživatel zapíše zadávací parametry dané úlohy a spustí vytvořené makro. Makro využije zadání a zapíše ho do příslušných buněk. Ve zbylých buňkách, ve kterých jsou zapsány rovnice pro přenos tepla a vnitřní funkce, se vypočítá první časový krok pro všechny délkové úseky, na které je rozděleno potrubí z hlediska výpočtu. Každý časový krok obsahuje iterativní postup výpočtu střední teploty vnější stěny potrubí daného úseku, který je snadno proveditelný díky vytvořenému makru. Po prvním časovém kroku se výsledky zapíší do jiného listu a vstupují společně se vstupním zadáním do dalšího časového kroku. Celý výpočet je ukončen splněním zadaného počtu časových kroků. Vývojový diagram pro případ najíždění vysokotlaké regenerace je uveden v příloze, viz PŘÍLOHA č. 1.

ZADÁNÍ - NAJÍŽDĚNÍ			
vstupní teplota vody	TF	°C	120,00
výchozí teplota stěny potrubí a výchozí teplota napájecí vody v potrubí	Tw	°C	20,00
hmotnostní průtok napájecí vody	m	kg/s	5
vnitřní poloměr potrubí	ri	m	0,067
tloušťka potrubí	s	m	0,018
tlak vody	p	bar	135
délka potrubí	l	m	10
počet úseků	pů	-	40
délka úseku	x	m	0,25
součinitel tepelné vodivosti materiálu 16Mo3	λW	W/mK	42,5
měrná tepelná kapacita materiálu 16Mo3	c	J/kgK	482
hustota materiálu 16Mo3	ρ	kg/m³	7850
hmotnost trubky v daném úseku	m	kg	16,27
rychlost proudění v prvním úseku	w	m/s	0,377
časový krok	t	s	0,66
počet časových kroků	pč	-	1178,00
doba najíždění	t	s	780,58
			13,01 min

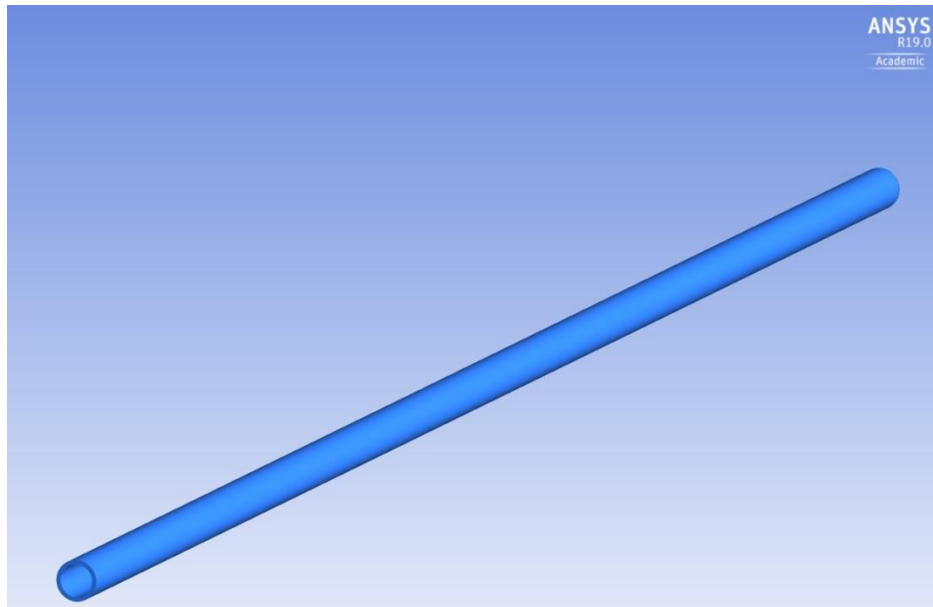
	úsek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
teplota vody na vstupu	TF_in	°C	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
teplota vody na výstupu	TF_out	°C	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
výpočtová teplota vnější stěny potrubí	Tw_o_stf	°C	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
měrná tepelná kapacita vody	cp	J/kgK	4213,84	4213,84	4213,83	4213,83	4213,83	4213,83	4213,83	4213,83	4213,83	4213,83
součinitel přestupu tepla na vnitřní straně potrubí	α	W/m²K	4187,52	3572,82	3324,95	3185,58	3094,45	3029,43	2980,30	2941,63	2910,27	2884,23
součinitel prostupu tepla	k	W/m²K	1654,44	1549,14	1500,64	1471,58	1451,83	1437,35	1426,20	1417,28	1409,96	1403,82
předané teplo - voda	Q	J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
stará teplota vnější stěny potrubí	Tw_o	°C	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
nová teplota vnější stěny potrubí	Tw_o	°C	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
střední teplota vnější stěny potrubí	Tw_o_stf	°C	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
rozdíl iterované teploty		°C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
stará teplota vnitřní stěny potrubí na vstupu	Tw_i_in	°C	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
střední teplota filmu na vstupu (pro výpočet fyzikálních vlastností)	T_film	°C	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
nová teplota vnitřní stěny potrubí na vstupu	Tw_i_in	°C	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00

Obr. 3.1: Ukázka vytvořeného analytického výpočtu v programu MS Excel pro případ najíždění vysokotlaké regenerace

3.1.3 Numerický výpočet

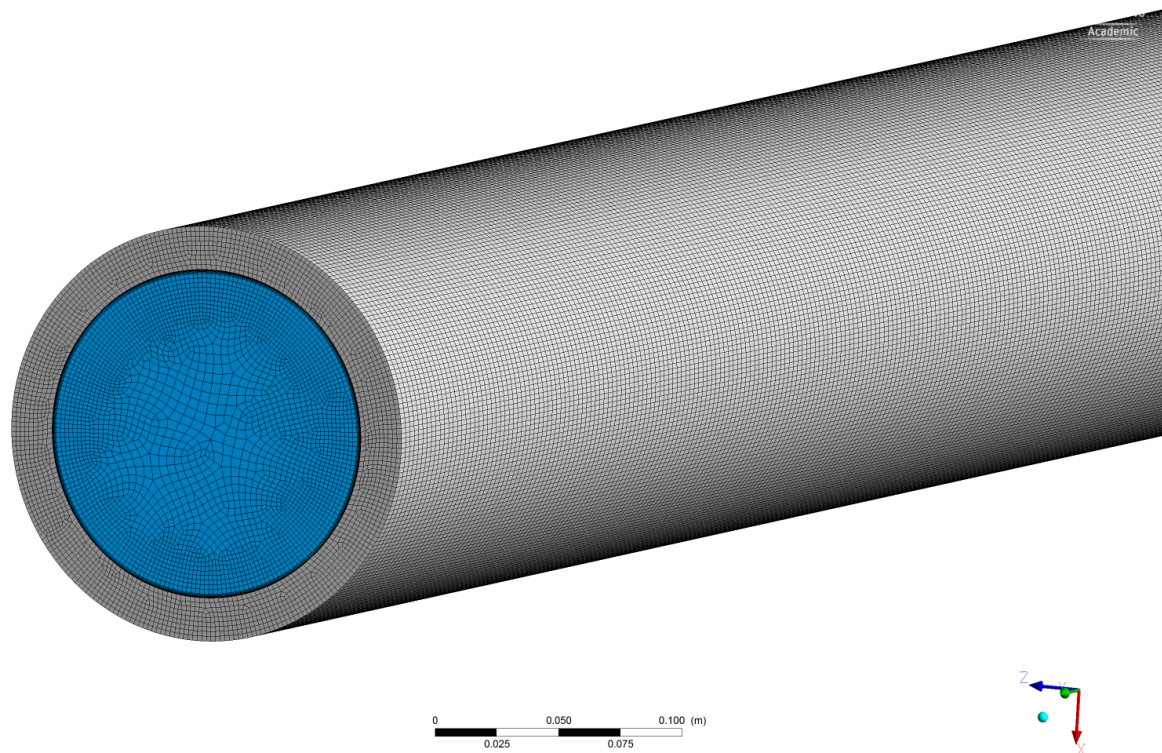
Numerický výpočet zadané úlohy najíždění vysokotlaké regenerace je proveden na základě řešiče Ansys CFX. Cílem je vyřešit úlohu, která je zadaná v Tab. 3.1, pomocí daného komerčního programu společnosti Ansys a výsledky porovnat s výsledky analytického výpočtu.

Geometrie potřebná pro numerický výpočet obsahuje pro případ najíždění vysokotlaké regenerace potrubí včetně domény představující napájecí vodu. Geometrie potrubí vytvořená pro numerický výpočet je uvedena na Obr. 3.2. Jedná se o potrubí DN 150, které je dlouhé 10 metrů.

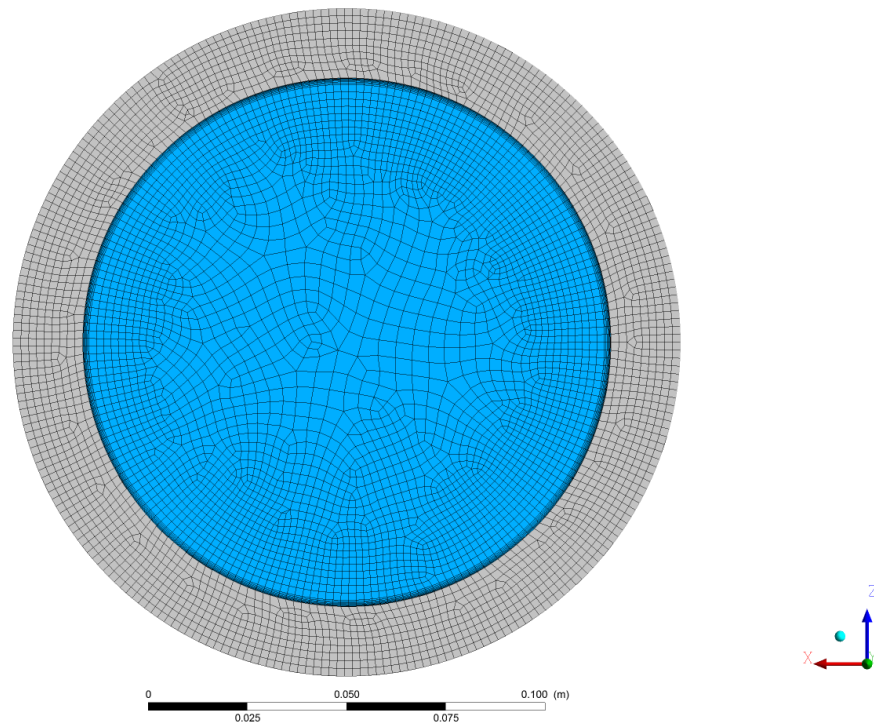


Obr. 3.2: Geometrie pro případ najíždění vysokotlaké regenerace

Pro zadanou úlohu najíždění vysokotlaké regenerace je vytvořena výpočetní síť v programu Workbench Meshing. Daná výpočetní síť je převážně hexahedrální. Mezní vrstva na straně vody je vytvořena tak, aby globální parametr y^+ nepřekročil hodnotu 1. Výpočetní síť pro případ najíždění vysokotlaké regenerace je zobrazena na Obr. 3.3 a na Obr. 3.4.



Obr. 3.3: Výpočetní síť pro případ najíždění vysokotlaké regenerace



Obr. 3.4: Detail výpočetní sítě pro případ najíždění vysokotlaké regenerace

V rámci numerického výpočtu zadané úlohy najíždění vysokotlaké regenerace jsou uvažovány následující předpoklady:

- vlastnosti materiálu potrubí se nemění s teplotou,
- vedení tepla izolací, vedení tepla ochranným plechem a sálání do okolního vzduchu je zanedbáno (tepelný tok z vnější stěny potrubí do okolí je nulový).

Všechny důležité parametry nastavení numerického výpočtu jsou uvedeny v Tab. 3.3.

Tab. 3.3: Nastavení numerického výpočtu pro případ najíždění vysokotlaké regenerace

File Report	File Type	CFX5	
	File Version	19.0	
Mesh Report	Nodes	14 910 000	
	Elements	14 266 863	
Physics Report	Heat Transfer Model	Total Energy	
	Turbulence Model	SST	
	Turbulent Wall Functions	Automatic	
Boundaries	Potrubí_Wall	Heat Transfer	Adiabatic
	Tekutina_Inlet	Total Temperature	T [°C]
		Relative Pressure	135 bar
Tekutina_Outlet	Mass Flow Rate	\dot{m} $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$	

3.1.4 Porovnání výsledků analytického výpočtu a numerického výpočtu

Výsledky analytického výpočtu a numerického výpočtu jsou pro proces najíždění vysokotlaké regenerace porovnány na základě celkem pěti variant, které se liší zadanou vstupní teplotou a zadaným hmotnostním průtokem napájecí vody, viz Tab. 3.4. Varianty jsou zvoleny s ohledem na pozdější vyhodnocení průběhu teploty napájecí vody. Výslednou vyhodnocovanou veličinou je teplota napájecí vody na konci potrubí vždy v určitém čase. Výpočtový časový krok je u každé varianty nadefinován s ohledem na rychlost proudění. Časový krok pro vyhodnocovací tabulky je kromě Varianty 2 a 3 zvolen v délce 1 minuty. U Varianty 2 a 3 se vlivem zvýšení hmotnostního průtoku napájecí vody prohřeje potrubí mnohem rychleji, tudíž je pro porovnání zvolen menší časový krok. U Varianty 2 je časový krok 0,5 minuty a u Varianty 3 dokonce 0,25 minuty neboli 15 sekund.

Tab. 3.4: Varianty výpočtu k porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace

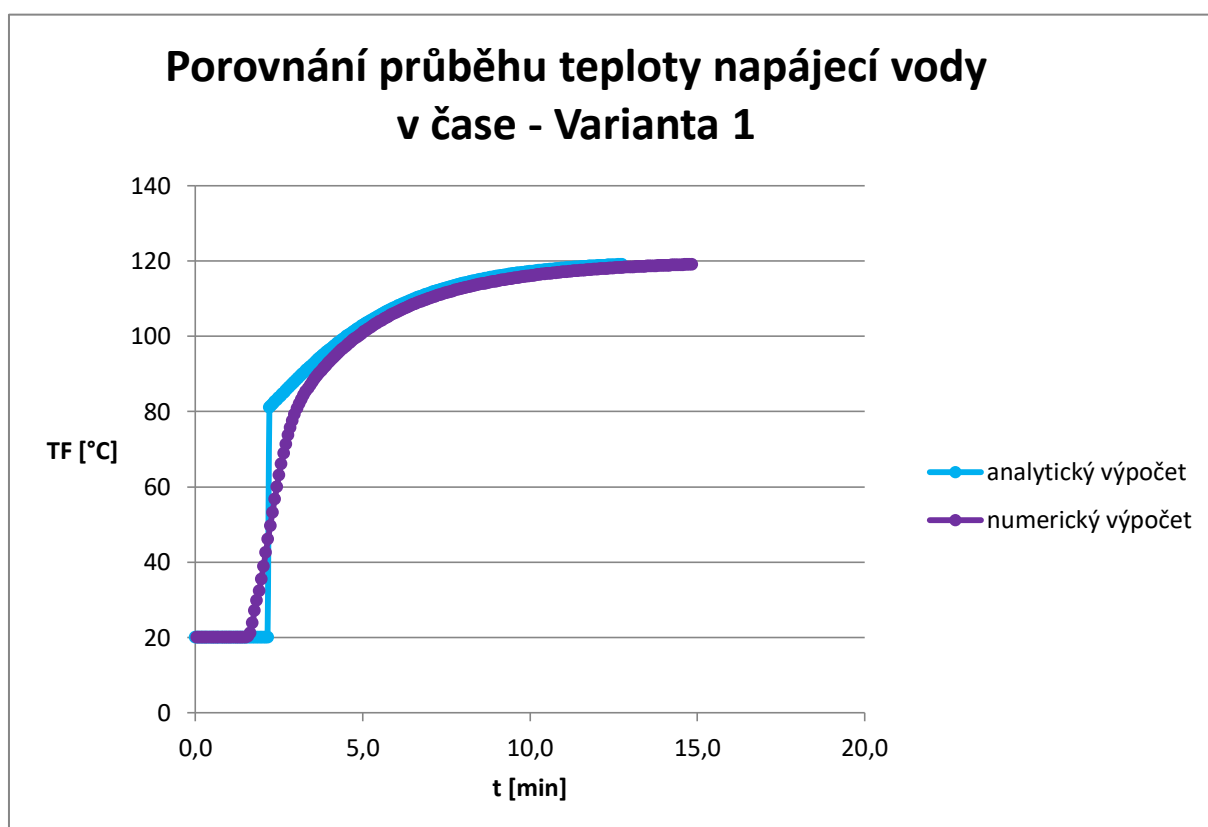
	Teplota napájecí vody $T_{F,in}$ [°C]	Hmotnostní průtok napájecí vody \dot{m} $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
Varianta 1	120	1
Varianta 2		5
Varianta 3		20
Varianta 4	100	1
Varianta 5	157	

Na následujících stránkách je uvedeno pět tabulek, kde každá tabulka je zaměřena na jednu variantu výpočtu. V prvním sloupci jsou uvedeny hodnoty, které jsou získány analytickým výpočtem a v druhém sloupci jsou uvedeny hodnoty získané numerickým výpočtem. Zbýlý sloupec dané hodnoty porovnává a vyčísluje vzniklou odchylku. Odchylka je stanovena jako absolutní hodnota rozdílu teploty napájecí vody získané analytickým výpočtem a teploty napájecí vody získané numerickým výpočtem. Průběh teploty napájecí vody na konci potrubí je pro každou variantu zanesen do grafu. Grafy znázorňují výsledky získané analytickým výpočtem a výsledky získané numerickým výpočtem.

Tab. 3.5: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 1

Varianta 1			
Čas t [min]	Teplota napájecí vody T_F [°C]		Odchylka $ \Delta T_F $ [°C]
	Analytický výpočet	Numerický výpočet	
0	20,00	20,00	0,00
1	20,00	20,00	0,00
2	20,00	35,41	15,41
3	88,06	79,23	8,84
4	96,15	92,81	3,34
5	102,97	100,67	2,30

6	107,84	106,12	1,72
7	111,42	109,93	1,49
8	114,00	112,62	1,38
9	115,84	114,55	1,29
10	117,12	115,95	1,17
11	118,02	116,98	1,04
12	118,64	117,74	0,90
13	119,07	118,30	0,77
14	-	118,72	-
15	-	119,04	-

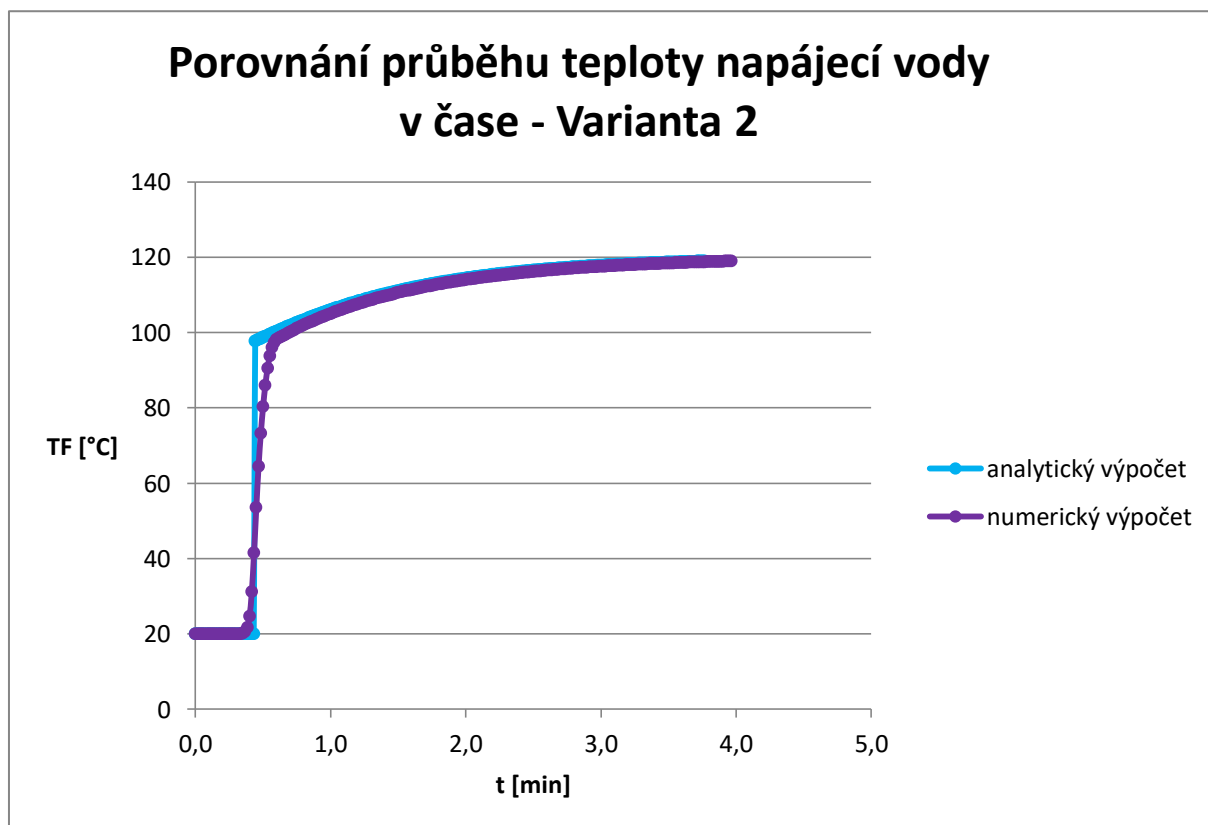


Obr. 3.5: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 1

Tab. 3.6: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 2

Varianta 2			
Čas t [min]	Teplota napájecí vody T_F [°C]		Odchylka $ \Delta T_F $ [°C]
	Analytický výpočet	Numerický výpočet	
0,0	20,00	20,00	0,00
0,5	98,70	80,29	18,41

1,0	106,09	105,05	1,04
1,5	111,14	110,59	0,54
2,0	114,44	114,05	0,40
2,5	116,55	116,22	0,33
3,0	117,89	117,59	0,30
3,5	118,70	118,46	0,23
4,0	119,20	119,02	0,18

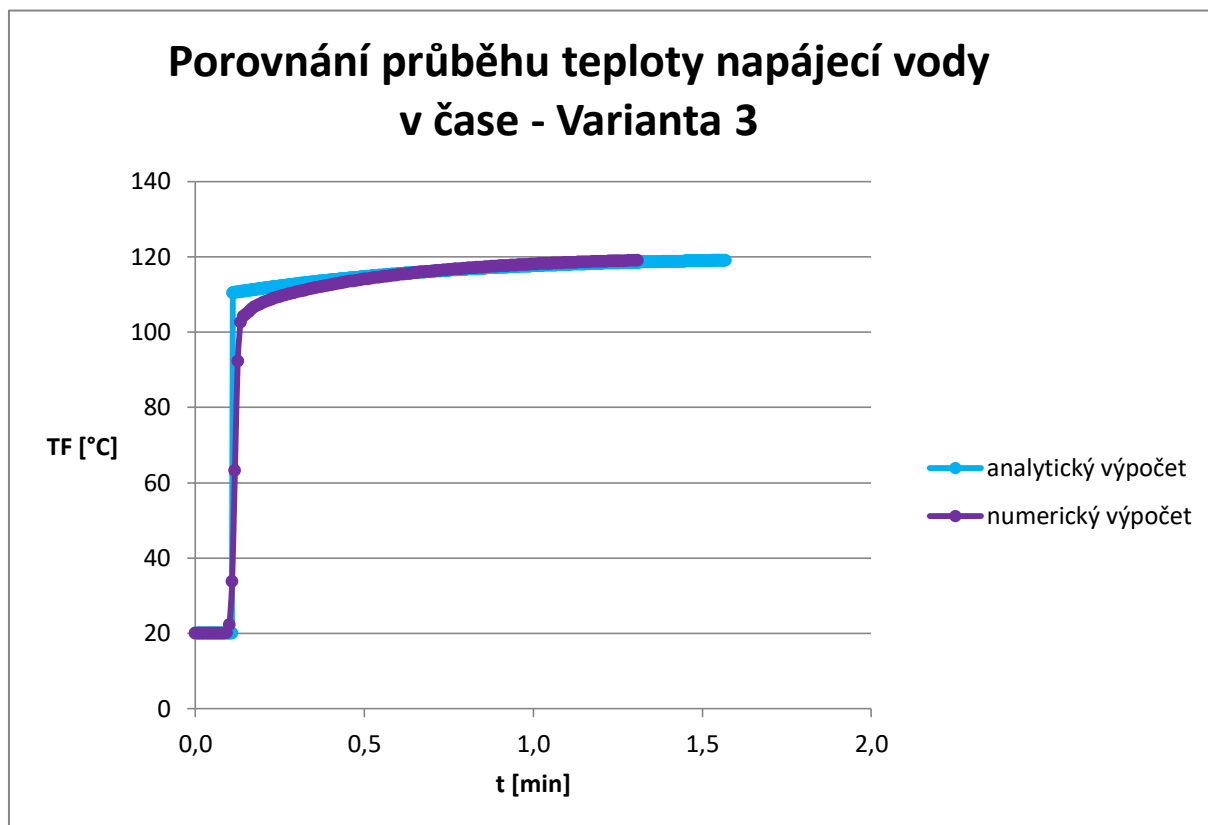


Obr. 3.6: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 2

Tab. 3.7: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 3

Varianta 3			
Čas t [min]	Teplota napájecí vody T_F [°C]		Odchylka $ \Delta T_F $ [°C]
	Analytický výpočet	Numerický výpočet	
0,00	20,00	20,00	0,00
0,25	112,20	109,43	2,77
0,50	114,65	114,00	0,66
0,75	116,38	116,55	0,17
1,00	117,55	118,02	0,47

1,25	118,35	118,86	0,51
1,50	118,89	119,35	0,46

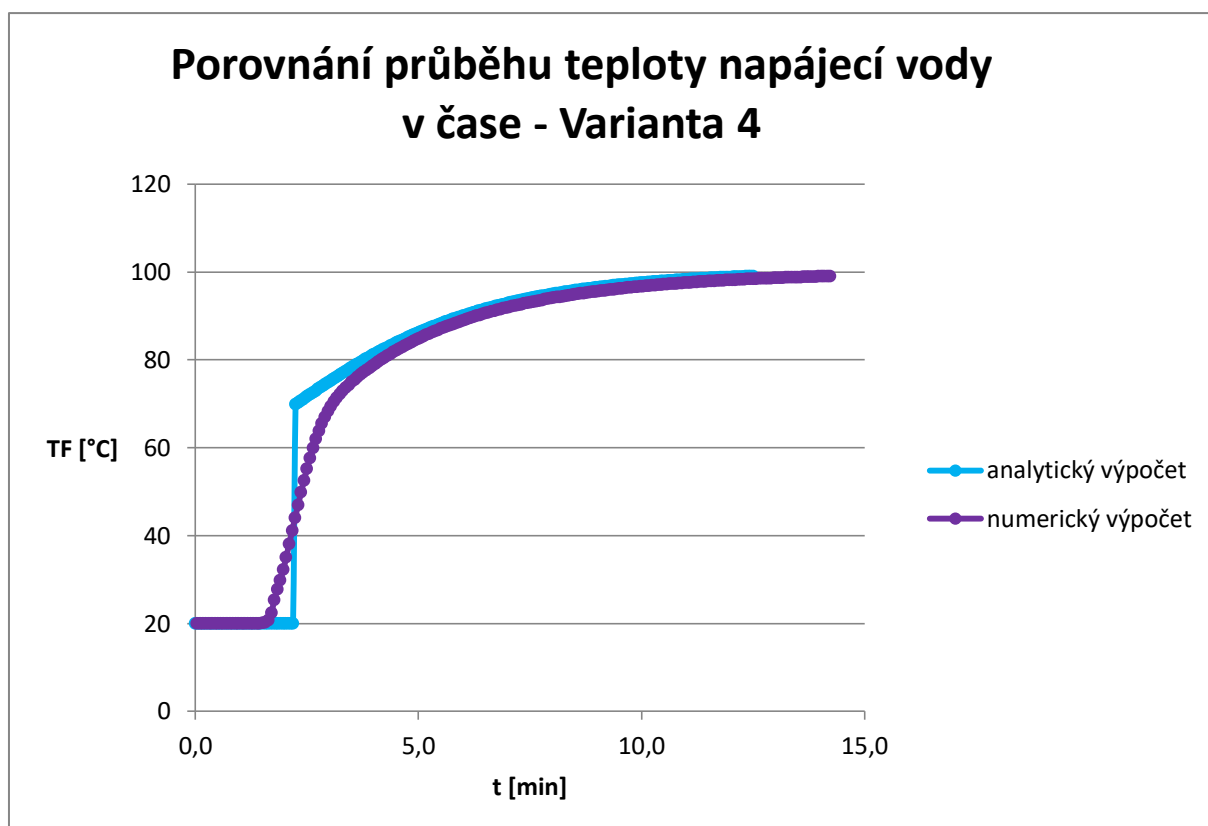


Obr. 3.7: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 3

Tab. 3.8: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 4

Varianta 4			
Čas t [min]	Teplota napájecí vody T_F [°C]		Odchylka $ \Delta T_F $ [°C]
	Analytický výpočet	Numerický výpočet	
0	20,00	20,00	0,00
1	20,00	20,00	0,00
2	20,00	32,18	12,18
3	74,84	68,23	6,61
4	81,08	78,63	2,45
5	86,11	84,62	1,49
6	89,97	88,83	1,14
7	92,85	91,81	1,04
8	94,95	93,95	1,00
9	96,38	95,50	0,88

10	97,47	96,64	0,83
11	98,24	97,48	0,76
12	98,78	98,10	0,68
13	99,16	98,57	0,59
14	-	98,92	-
15	-	99,18	-

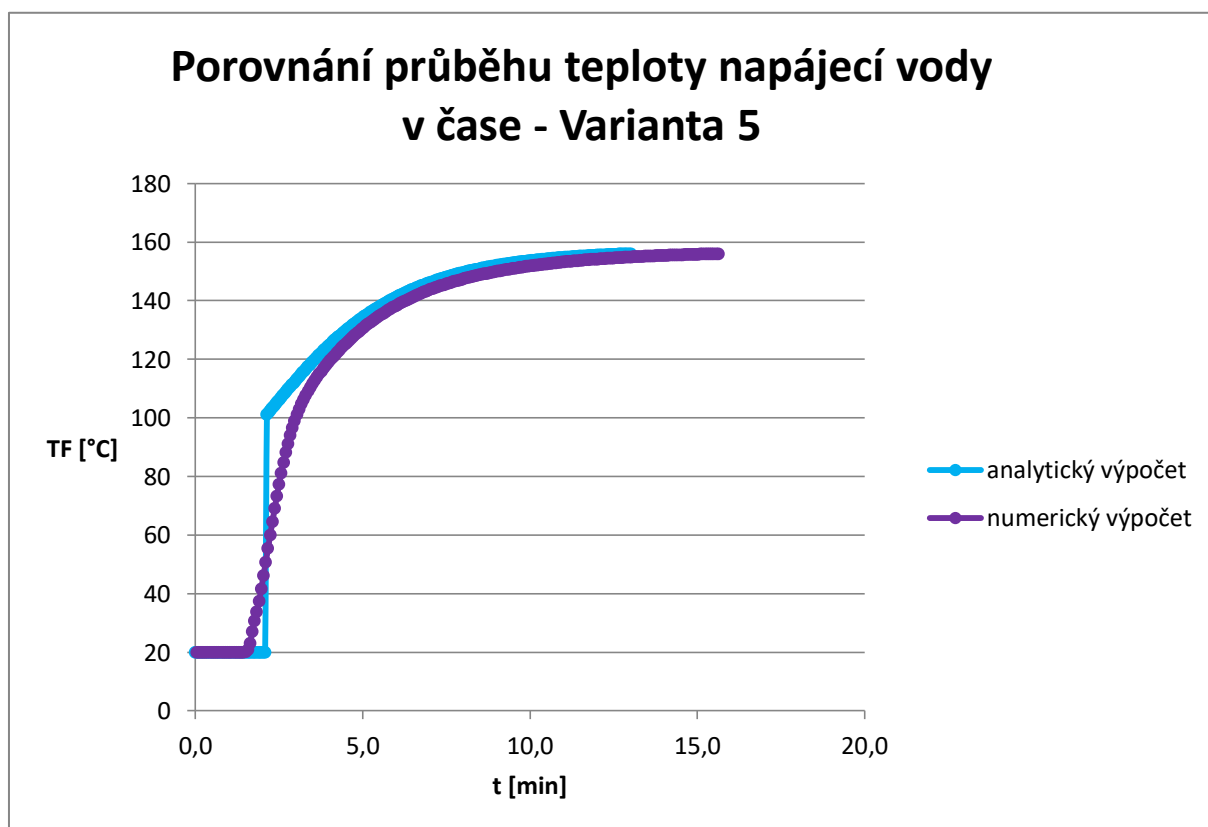


Obr. 3.8: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 4

Tab. 3.9: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 5

Varianta 5			
Čas t [min]	Teplota napájecí vody T_F [°C]		Odchylka $ \Delta T_F $ [°C]
	Analytický výpočet	Numerický výpočet	
0	20,00	20,00	0,00
1	20,00	20,00	0,00
2	20,00	41,66	21,66
3	112,65	98,93	13,72
4	124,85	118,77	6,08
5	134,36	130,24	4,12

6	141,03	138,11	2,92
7	146,09	143,53	2,55
8	149,61	147,26	2,34
9	152,02	149,89	2,13
10	153,60	151,77	1,82
11	154,73	153,14	1,59
12	155,49	154,13	1,36
13	156,00	154,86	1,14
14	-	155,40	-
15	-	155,79	-
16	-	156,09	-

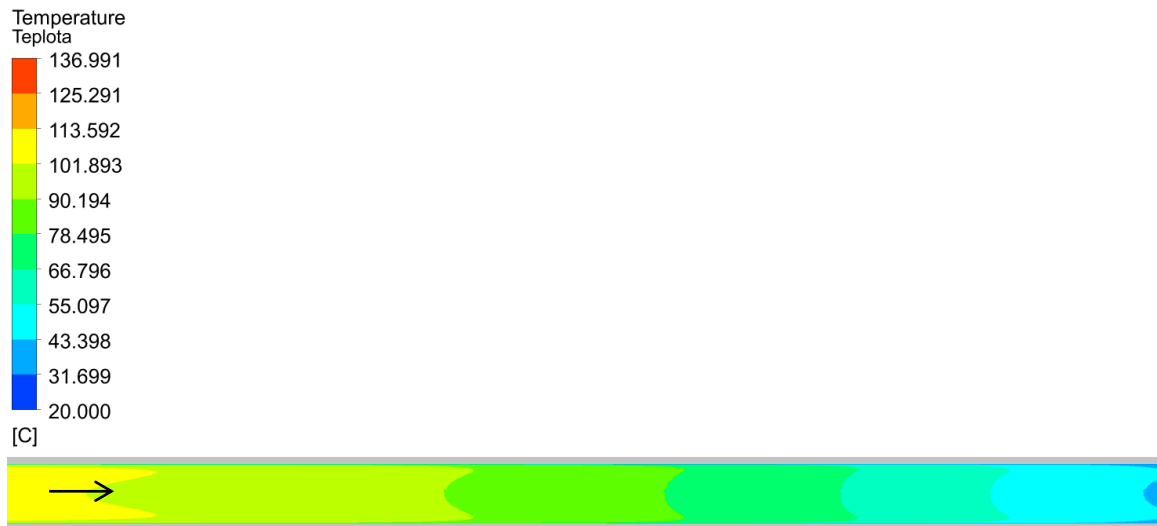


Obr. 3.9: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 5

Na základě výše uvedených tabulek a grafů je patrné, že největší odchylky mezi analytickým a numerickým výpočtem vznikají na začátku procesu najíždění vysokotlaké regenerace. Odchylky jsou způsobeny nedostatkem analytického výpočtu, který nezohledňuje promíchávání teplejšího a studenějšího proudu na začátku procesu najíždění.

Po porovnání všech variant vyplývá, že čím je vyšší hmotnostní průtok napájecí vody, přibližuje se výrazná změna teploty za krátký časový úsek u numerického výpočtu ke skokové změně, kterou udává analytický výpočet. Teplotní profil, odpovídající vyvinutému rychlostnímu profilu proudění, který zohledňuje numerická simulace, je pro Variantu 2 znázorněn na obrázku, viz Obr. 3.10. Na daném obrázku je zobrazeno rozložení teploty

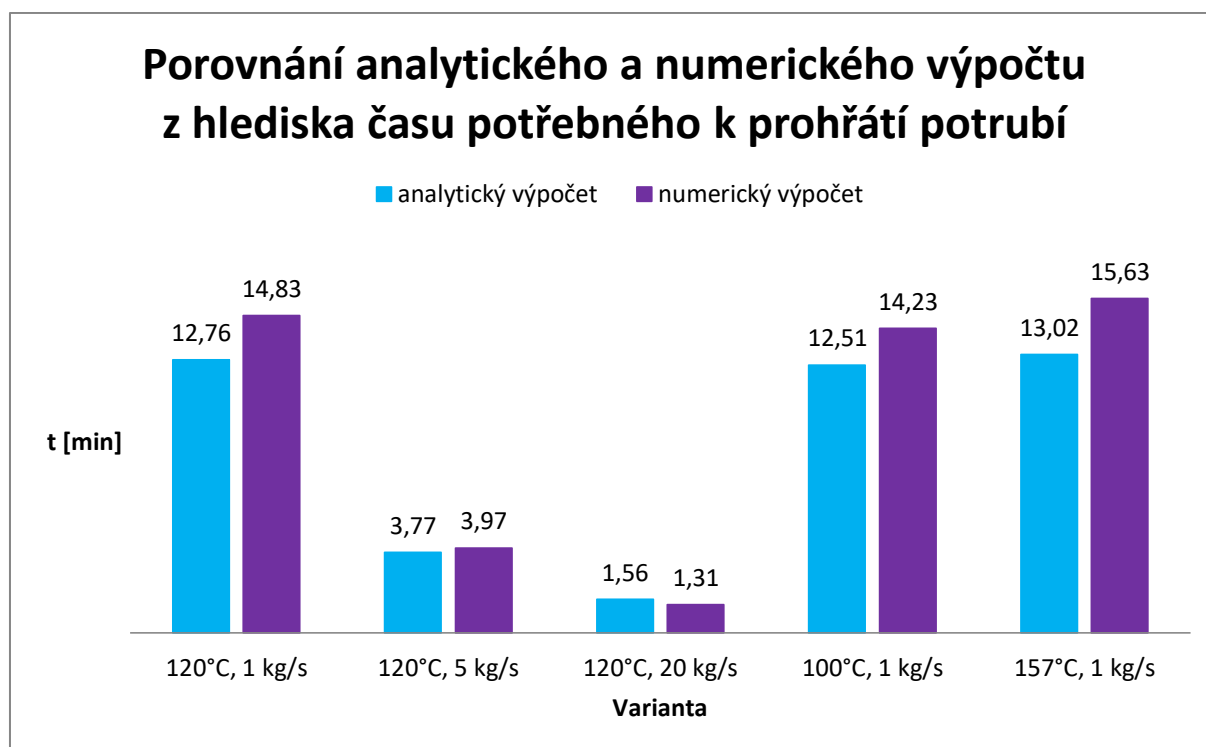
napájecí vody na koncové části potrubí v čase 26 sekund, kdy teplota napájecí vody na konci potrubí je dle numerického výpočtu 41,5 °C a dle analytického výpočtu ještě 20 °C.



Obr. 3.10: Numerická simulace pro případ najíždění vysokotlaké regenerace v čase 26 s
– Varianta 2

Po zanedbání počátečních odchylek, které vznikají z důvodu nedostatku analytického výpočtu, který na začátku najíždění vysokotlaké regenerace vykresluje skokovou změnu teploty, je teplotní průběh získaný analytickým výpočtem a numerickým výpočtem u všech variant velmi podobný. Nejlepší shody je dosaženo pro hmotnostní průtoky napájecí vody, které jsou vyšší než 1 kg/s.

Další odchylky lze pozorovat na veličině, kterou je čas potřebný k prohřátí potrubí. Porovnání daného času je pro analytický a numerický výpočet s ohledem na všechny řešené varianty zobrazeno na Obr. 3.11. Největší odchylka je u Varianty 5, varianty s nejnižším hmotnostním průtokem a s nejvyšší teplotou napájecí vody. Zde činí odchylka zhruba 2,5 minuty. Oproti tomu se nejlepších výsledků dosahuje u variant s vyšším hmotnostním průtokem. U Varianty 2 je vzniklá časová odchylka pouhých 12 sekund.



Obr. 3.11: Porovnání analytického a numerického výpočtu z hlediska času potřebného k prohřátí potrubí

Na základě výše uvedených závěrů je patrné, že výsledky analytického a numerického výpočtu se liší pro praxi v přijatelných mezích. To znamená, že analytický výpočet vytvořený v programu MS Excel pro případ najíždění vysokotlaké regenerace lze používat pro vytvoření první představy o průběhu teploty napájecí vody v závislosti na čase během daného procesu najíždění.

3.2 Proces odstavování vysokotlaké regenerace

Zadání, které je zapotřebí pro řešení úlohy odstavování vysokotlaké regenerace, je přehledně uvedeno v Tab. 3.10. Poloha daného potrubí je uvažována jako horizontální. Zadaná délka potrubí je v daném případě pouze 1 metr z důvodu snížení počtu prvků výpočetní sítě v rámci numerického výpočtu. Délka potrubí nemá vliv na výsledky výpočtu, jelikož není uvažován vliv čel potrubí.

Tab. 3.10: Zadání úlohy pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

Název	Značka	Hodnota	Jednotka	
potrubí	vnější průměr	d_o	168,3	mm
	tloušťka	s	17,5	mm
	délka	L	1	m
	materiál	—	16Mo3	—
	hustota	ρ	7 850	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	tepelná vodivost	λ_w	42,5	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

	měrná tepelná kapacita	c_p	482			$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
	výchozí teplota	T_W	100	120	157	°C
izolace	tloušťka	s	80			mm
	materiál	–	lamelový skružovatelný pás Isover ML-3 ze skelné vlny			–
	hustota	ρ	25			$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	tepelná vodivost	λ_{izol}	0,043			$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$
	měrná tepelná kapacita	c_p	840			$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
ochranný plech	poměrná sálavost	ε	0,5			–
napájecí voda	tlak	p	135			bar
	hmotnostní průtok	\dot{m}	0			$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
	výchozí teplota	T_F	100	120	157	°C
okolní vzduch	teplota	T_∞	20			°C
	tlak	p_∞	1			bar

3.2.1 Analytický výpočet

V rámci analytického výpočtu zadané úlohy odstavování vysokotlaké regenerace jsou uvažovány následující předpoklady:

- vlastnosti materiálu potrubí a izolace se nemění s teplotou,
- vedení tepla ochranným plechem je zanedbáno,
- veškeré vysálané teplo je pohlceno okolním vzduchem,
- okolní vzduch je suchý,
- tlakové ztráty se neuvažují,
- není uvažován vliv čel potrubí (potrubí o teoreticky nekonečné délce).

Pro vyšetření procesu odstavování vysokotlaké regenerace jsou do programu MS Excel přidány funkce, pomocí kterých lze stanovit vlastnosti suchého vzduchu. Dané funkce jsou součástí interní dokumentace společnosti Doosan Škoda Power. Pro lepší přehlednost celého výpočtu jsou vytvořeny a přidány další vnitřní funkce, které slouží pro stanovení součinitele přestupu tepla na straně vody, součinitele přestupu tepla na straně vzduchu, sálavého součinitele přestupu tepla a součinitele prostupu tepla, který využívá všechny výše uvedené vnitřní funkce.

Pro sestavení výpočtu v programu MS Excel je opět využita možnost tvorby makra v daném programu. Celý výpočet funguje na stejném principu jako výpočet, který řeší případ najíždění vysokotlaké regenerace. Do konkrétních buněk uživatel zapíše zadání úlohy a spustí autorem vytvořené makro. Makro využije zadání a zapíše ho do příslušných buněk. Po prvním časovém kroku se výsledky zapíší do jiného listu a vstupují společně se vstupním zadáním do

dalšího časového kroku. Celý výpočet je ukončen splněním zadaného počtu časových kroků. Vývojový diagram pro případ odstavování vysokotlaké regenerace je uveden v příloze, viz PŘÍLOHA č. 2.

ZADÁNÍ - ODSTAVOVÁNÍ			
teplota vzduchu	T_V	°C	20
tlak vzduchu	p_V	bar	1
teplota vody - výchozí	TF	°C	100,00
hmotnostní průtok napájecí vody	m	kg/s	0
vnitřní poloměr potrubí	ri	m	0,067
tloušťka potrubí	s	m	0,018
délka potrubí	l	m	1
časový krok - zvolený	t	s	30,00
doba chladnutí	t	s	86400,00
počet časových kroků	pč	-	2880,00
tlak vody	p	bar	135
objem vody v potrubí	V	m3	0,01
součinitel tepelné vodivosti materiálu 16Mo3	λW	W/mK	42,5
tloušťka izolace	sizol	m	0,08
součinitel tepelné vodivosti izolace	λizol	W/mK	0,043
poměrná sálavost	eps	-	0,5

0,5 min
24 hod

VÝPOČET			
teplota vody - počátek	TF_start	°C	65,21
teplota vnitřní stěny potrubí - počátek ODHAD	Tw_i_start	°C	65,04
teplota vnější stěny izolace - počátek ODHAD	Tizol_o_start	°C	23,18
součinitel přestupu tepla na straně vzduchu	α_vzduch	W/m2K	2,262
sálavý součinitel přestupu tepla na straně vzduchu	α_s	W/m2K	2,904
součinitel přestupu tepla na straně vody	α_voda	W/m2K	229,925
součinitel prostupu tepla s vlivem sálání	k	W/m2K	0,89
tepelný tok - prostup tepla s vlivem sálání	Q	J/s	16,92
teplota vnější stěny izolace - počátek VYPOČTENO	Tizol_o_start	°C	23,18
PODMÍNKY ITERACE	NULA		0
teplota vnitřní stěny potrubí - počátek VYPOČTENO	Tw_i_start	°C	65,04
PODMÍNKY ITERACE	NULA		0
teplota vnější stěny potrubí - počátek	Tw_o_start		65,02
teplota vody - konec	TF_end	°C	65,20

výsledek

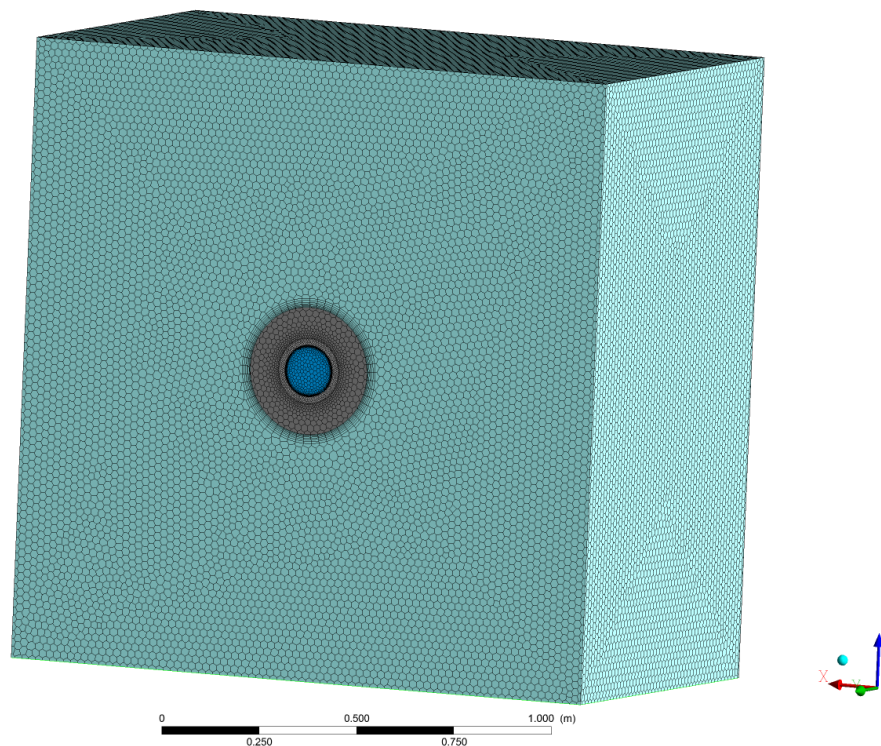
Obr. 3.12: Ukázka vytvořeného analytického výpočtu v programu MS Excel pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

3.2.2 Numerický výpočet

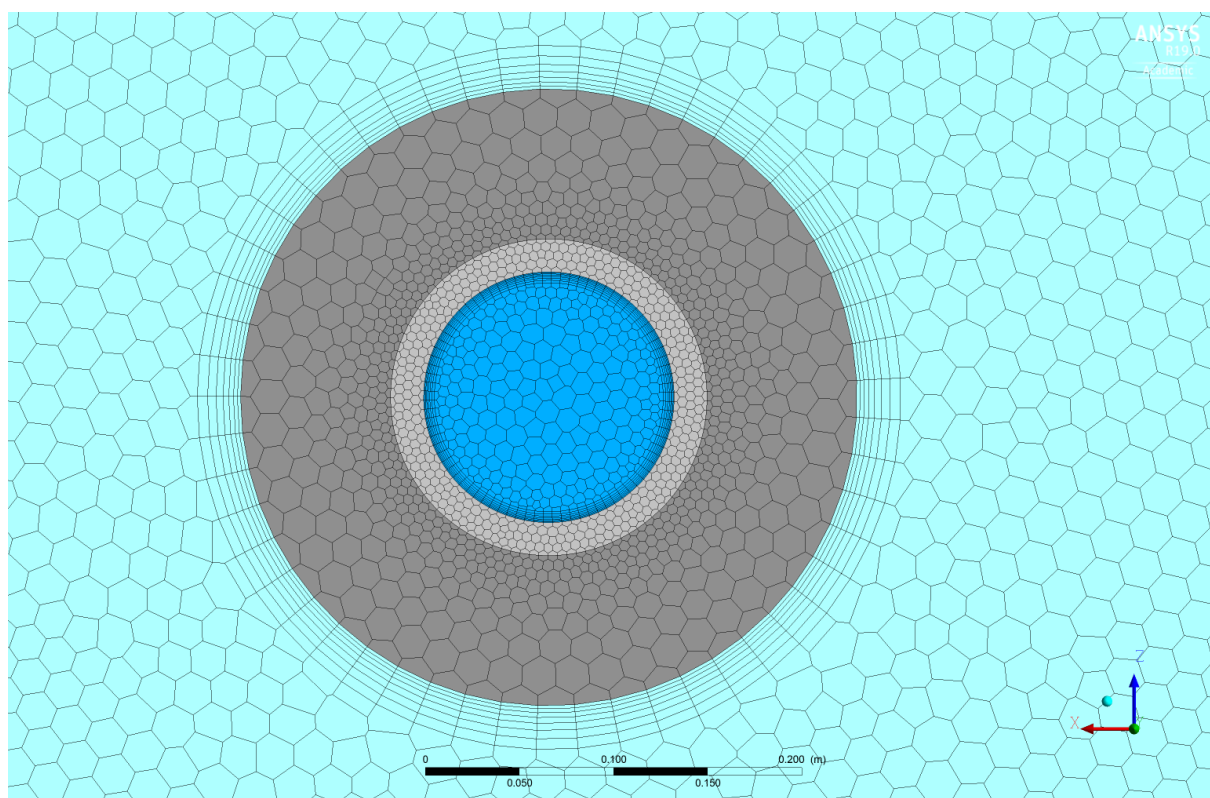
Numerický výpočet pro případ odstavování vysokotlaké regenerace je proveden na základě řešiče Ansys Fluent. Cílem je vyřešit úlohu zadanou v Tab. 3.10 a porovnat získané výsledky s výsledky analytického výpočtu.

Geometrie vytvořená pro numerický výpočet úlohy odstavování vysokotlaké regenerace obsahuje izolované potrubí DN 150, které je dlouhé 1 metr a mimo domény představující napájecí vodu uvnitř potrubí i doménu představující okolní vzduch.

Pro zadanou úlohu je vytvořena výpočetní síť přímo v programu Fluent. Vytvořená výpočetní síť je polyhedrální s prizmatickou mezní vrstvou. Mezní vrstva na straně vody a na straně vzduchu je vytvořena tak, aby globální parametr y^+ nepřekročil hodnotu 1. Výpočetní síť pro případ odstavování vysokotlaké regenerace je zobrazena na Obr. 3.13 a na Obr. 3.14.



Obr. 3.13: Výpočetní síť pro případ odstavení vysokotlaké regenerace



Obr. 3.14: Detail výpočetní sítě pro případ odstavení vysokotlaké regenerace

V rámci numerického výpočtu zadané úlohy odstavování vysokotlaké regenerace jsou uvažovány následující předpoklady:

- vlastnosti materiálu potrubí a izolace se nemění s teplotou,
- vedení tepla ochranným plechem je zanedbáno,
- není uvažován vliv čel potrubí (potrubí o teoreticky nekonečné délce).

Všechny důležité parametry nastavení numerického výpočtu jsou uvedeny v Tab. 3.11.

Tab. 3.11: Nastavení numerického výpočtu pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

File Report	File Type	FLUENT	
	File Version	19.3	
Mesh Report	Nodes	3 206 091	
	Elements	694 806	
Boundaries	Foam_inlet	Type	SYMMETRY
	Foam_outlet	Type	SYMMETRY
	Izolace_potrubí	Type	WALL
	Izolace_vzduch	Type	WALL
	Potrubí_tekutina	Type	WALL
	Wall_inlet	Type	SYMMETRY
	Wall_outlet	Type	SYMMETRY
	Inlet	Type	SYMMETRY
	Outlet	Type	SYMMETRY
	Vzduch_in	Type	PRESSURE-INLET
	Vzduch_opening	Type	WALL
	Vzduch_out	Type	PRESSURE-OUTLET
	Vzduch_symmetry	Type	SYMMETRY

3.2.3 Porovnání výsledků analytického a numerického výpočtu

Výsledky analytického výpočtu a numerického výpočtu jsou zde srovnány pro tři varianty, které se liší zadanou výchozí teplotou napájecí vody, viz Tab. 3.12. Vyhodnocovanou veličinou je průběh teploty napájecí vody v čase. Pro Variantu 1 je zvolen výpočtový časový krok 5 sekund a pro zbylé dvě varianty 30 sekund. Zvolený časový krok pro vyhodnocení je 1 hodina. Celkový čas pro vyhodnocení je zvolen pro všechny tři varianty 24 hodin. Celková doba chladnutí na původních 20 °C, která trvá několik dní, je vzhledem k elektrárenskému provozu nedůležitá.

Tab. 3.12: Varianty výpočtu k porovnání výsledků pro případ odstavení vysokotlaké regenerace

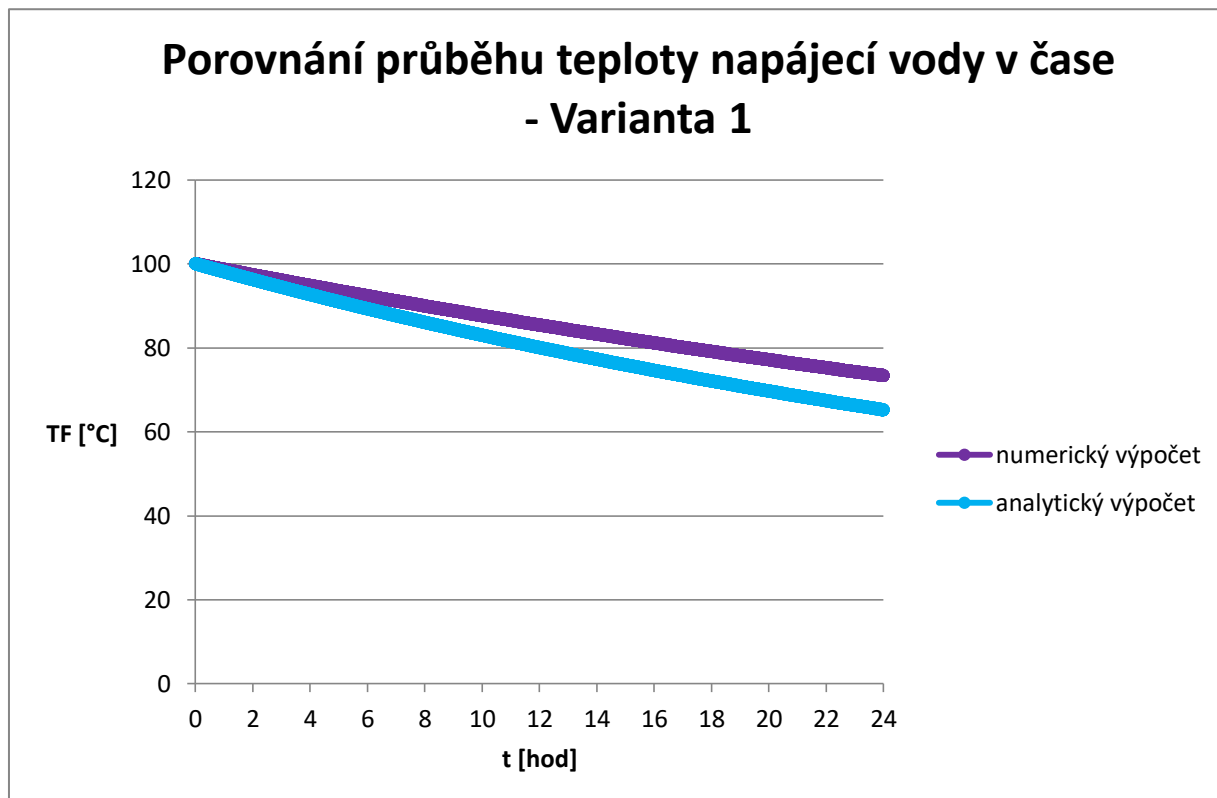
	Teplota napájecí vody T_F [°C]	Hmotnostní průtok napájecí vody \dot{m} $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
Varianta 1	100	0
Varianta 2	120	
Varianta 3	157	

Níže jsou uvedeny tři tabulky, kde každá tabulka uvádí výsledky pro jednu variantu výpočtu. V prvním sloupci jsou uvedeny hodnoty získané analytickým výpočtem a v druhém sloupci jsou uvedeny hodnoty získané numerickým výpočtem. V dalším sloupci je uvedena odchylka, která je stanovena jako absolutní hodnota rozdílu teploty napájecí vody získané analytickým výpočtem a teploty napájecí vody získané numerickým výpočtem.

Tab. 3.13: Porovnání výsledků pro případ odstavení vysokotlaké regenerace – Varianta 1

Varianta 1			
Čas t [hod]	Teplota napájecí vody T_F [°C]		Odchylka $ \Delta T_F $ [°C]
	Analytický výpočet	Numerický výpočet	
0	100,00	100,00	0,00
1	98,10	98,69	0,59
2	96,25	97,38	1,14
3	94,44	96,10	1,66
4	92,68	94,83	2,15
5	90,96	93,59	2,63
6	89,28	92,36	3,08
7	87,65	91,16	3,51
8	86,05	89,97	3,92
9	84,50	88,81	4,31
10	82,98	87,66	4,68
11	81,50	86,53	5,03
12	80,05	85,42	5,37
13	78,64	84,33	5,68
14	77,27	83,25	5,98
15	75,93	82,19	6,26
16	74,62	81,15	6,53
17	73,34	80,12	6,78

18	72,09	79,11	7,02
19	70,87	78,12	7,25
20	69,69	77,14	7,46
21	68,53	76,18	7,65
22	67,40	75,23	7,84
23	66,29	74,30	8,01
24	65,21	73,39	8,17

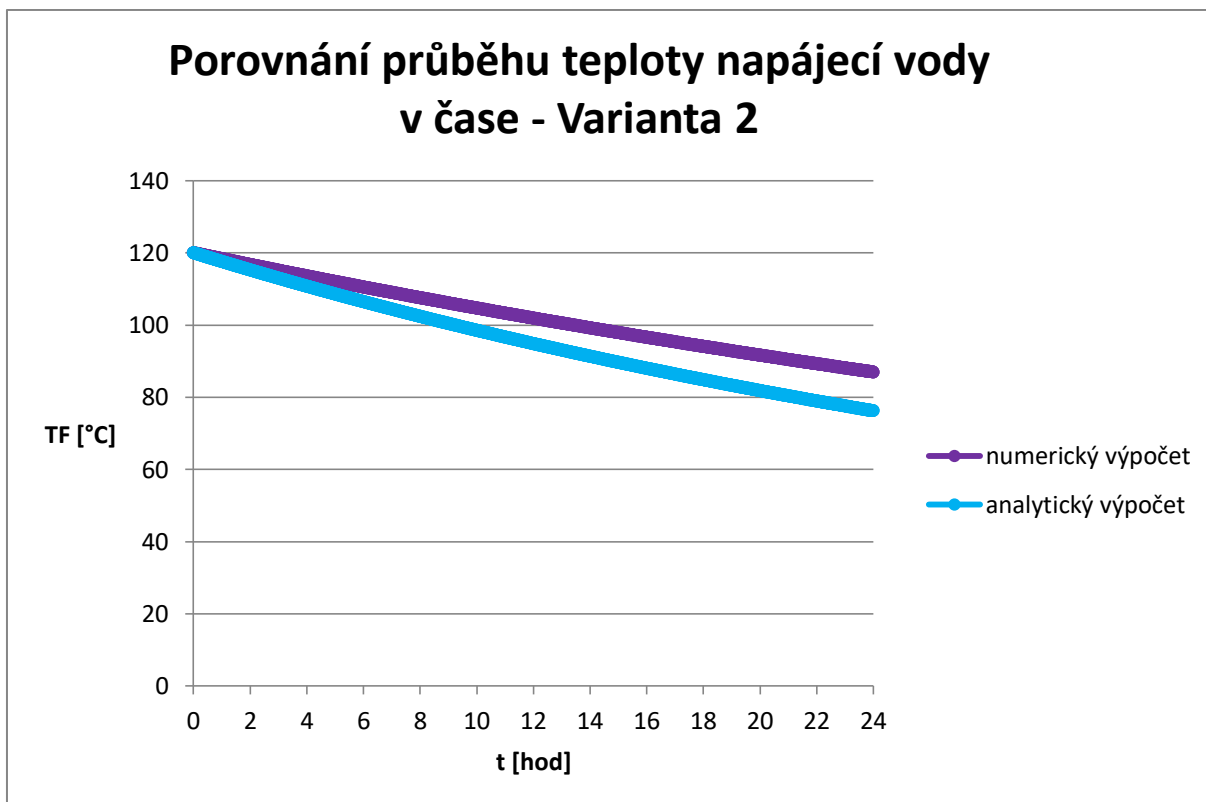


Obr. 3.15: Porovnání výsledků pro případ odstavování vysokotlaké regenerace – Varianta 1

Tab. 3.14: Porovnání výsledků pro případ odstavování vysokotlaké regenerace – Varianta 2

Varianta 2			
Čas t [hod]	Teplota napájecí vody T_F [°C]		Odchylka $ \Delta T_F $ [°C]
	Analytický výpočet	Numerický výpočet	
0	120,00	120,00	0,00
1	117,60	118,37	0,77
2	115,26	116,75	1,50
3	112,98	115,16	2,18
4	110,75	113,59	2,84

5	108,58	112,05	3,46
6	106,47	110,53	4,06
7	104,41	109,03	4,62
8	102,40	107,56	5,16
9	100,44	106,11	5,67
10	98,53	104,69	6,16
11	96,66	103,29	6,62
12	94,85	101,91	7,06
13	93,07	100,55	7,48
14	91,35	99,22	7,87
15	89,66	97,90	8,24
16	88,02	96,61	8,59
17	86,41	95,34	8,92
18	84,85	94,08	9,24
19	83,32	92,85	9,53
20	81,83	91,64	9,81
21	80,38	90,45	10,07
22	78,96	89,27	10,31
23	77,58	88,12	10,54
24	76,23	86,98	10,75

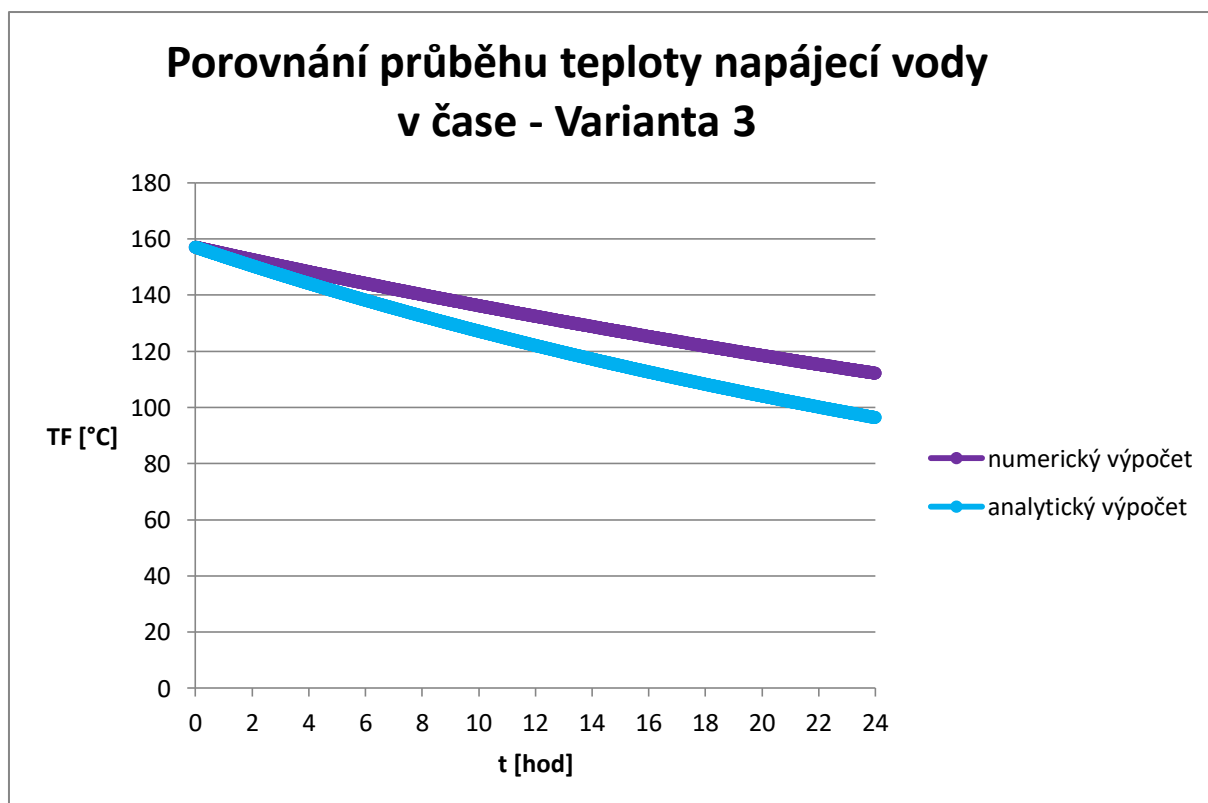


Obr. 3.16: Porovnání výsledků pro případ odstavování vysokotlaké regenerace – Varianta 2

Tab. 3.15: Porovnání výsledků pro případ odstavování vysokotlaké regenerace – Varianta 3

Varianta 3			
Čas t [hod]	Teplota napájecí vody T_F [°C]		Odchylka $ \Delta T_F $ [°C]
	Analytický výpočet	Numerický výpočet	
0	157,00	157,00	0,00
1	153,64	154,79	1,14
2	150,38	152,59	2,21
3	147,19	150,42	3,23
4	144,09	148,29	4,19
5	141,07	146,19	5,11
6	138,13	144,12	5,99
7	135,27	142,09	6,82
8	132,48	140,09	7,62
9	129,76	138,13	8,37
10	127,11	136,19	9,08
11	124,52	134,28	9,76

12	122,01	132,41	10,40
13	119,55	130,57	11,01
14	117,16	128,75	11,59
15	114,83	126,96	12,13
16	112,56	125,21	12,64
17	110,35	123,48	13,13
18	108,19	121,78	13,58
19	106,09	120,10	14,01
20	104,04	118,45	14,42
21	102,03	116,83	14,80
22	100,08	115,23	15,15
23	98,18	113,66	15,48
24	96,33	112,12	15,79



Obr. 3.17: Porovnání výsledků pro případ odstavování vysokotlaké regenerace – Varianta 3

Z výše uvedených tabulek a grafů vyplývá, že při porovnání analytického a numerického výpočtu vzniká pro případ odstavování vysokotlaké regenerace určitá odchylka, která se zvětšuje v čase. Po vyšetřovaných 24 hodinách se odchylka pohybuje řádově v desítkách stupňů Celsia. Vliv výchozí teploty je zřejmý. Čím je vyšší výchozí teplota napájecí vody, tím se odchylka mezi výsledky analytického výpočtu a výsledky numerického výpočtu zvětšuje. Vzniklé odchylky se pohybují v rámci využití pro praktické účely v přijatelných mezích. To znamená, že analytický výpočet vytvořený v programu MS Excel pro případ odstavování

vysokotlaké regenerace lze využít pro vytvoření hrubé představy o chladnutí napájecí vody v izolovaném potrubí během procesu odstavování vysokotlaké regenerace.

4 Vyhodnocení průběhu teploty napájecí vody

Cílem je vyhodnotit teplotu napájecí vody a její průběh v čase při dvou základních nestacionárních procesech. Jedná se o již výše zmíněný a popsany proces najíždění vysokotlaké regenerace a proces odstavování vysokotlaké regenerace.

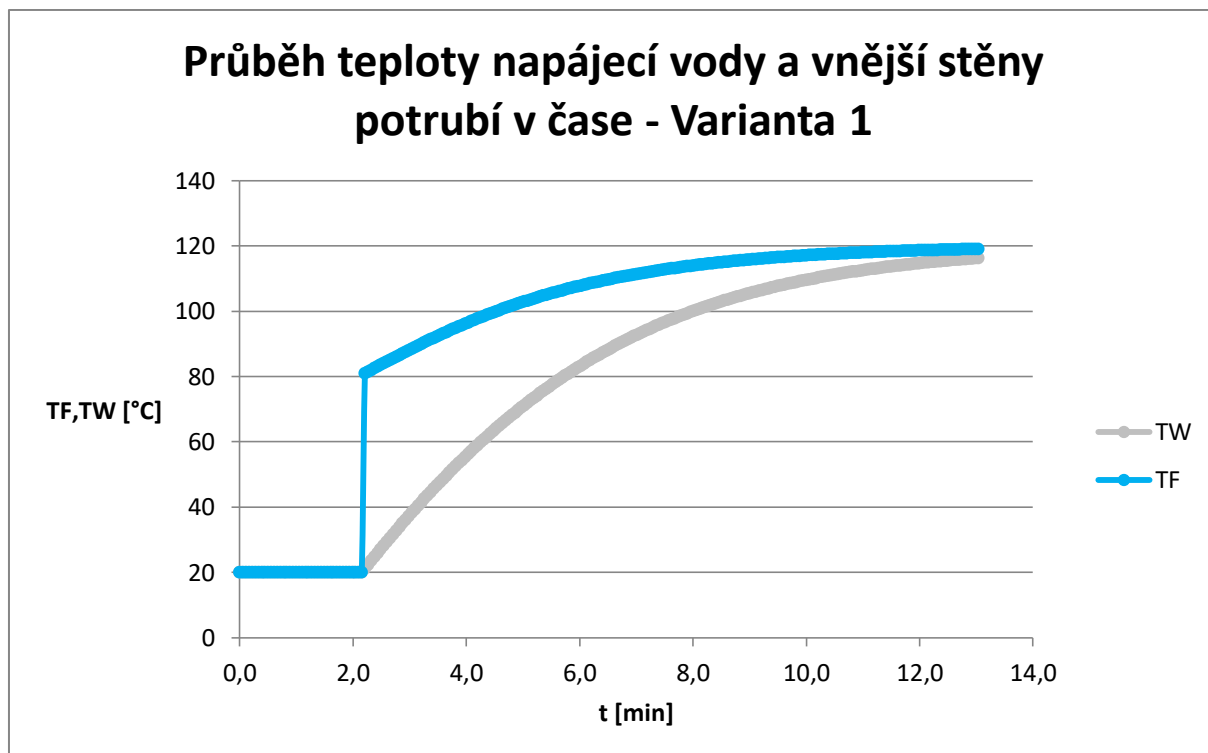
4.1 Proces najíždění vysokotlaké regenerace

V rámci vyhodnocení zadané úlohy najíždění vysokotlaké regenerace je pozornost zaměřena na teplotu napájecí vody na konci potrubí v závislosti na čase s cílem analyzovat vliv průtočného množství napájecí vody a vliv vstupní teploty napájecí vody. Z dané závislosti vyplyne čas potřebný k prohřátí potrubí při najíždění vysokotlaké regenerace. Čas potřebný k prohřátí potrubí znamená čas, za který je teplota napájecí vody na konci potrubí o 1 °C nižší než teplota napájecí vody na vstupu do potrubí. Daný předpoklad je zaveden z důvodu limitního přibližování daných teplot, které má za následek ohromné zvýšení času prohřátí potrubí s malým vzrůstem teploty směrem k požadovanému vyrovnání teplot.

Vedlejší vyhodnocovanou veličinou je teplota vnější stěny potrubí a její změna v čase z důvodu porovnání daného průběhu s průběhem teploty napájecí vody.

4.1.1 Průběh teploty napájecí vody a jeho porovnání s průběhem teploty vnější stěny potrubí

Průběh teploty napájecí vody a průběh teploty vnější stěny potrubí na konci potrubí je uveden pro Variantu 1 na Obr. 4.1. Varianta 1 představuje vstupní teplotu napájecí vody 120 °C a hmotnostní průtok napájecí vody 1 kg/s. Průběh teploty napájecí vody obsahuje skokovou změnu z teploty 20 °C na teplotu zhruba 80 °C. Skoková změna je dána tím, že před najížděním vysokotlaké regenerace je v potrubí napájecí voda o výchozí teplotě 20 °C. Daný předpoklad je stejný u všech variant pro najíždění vysokotlaké regenerace. Z daného grafu je patrné, že od doby, kdy začne do potrubí proudit napájecí voda o teplotě 120 °C, teplota napájecí vody na konci potrubí vzrůstá od teploty zhruba 80 °C na 119 °C po dobu cca 10 minut. Teplota vnější stěny potrubí se plynule prohřívá vlivem proudění napájecí vody se zpožděním za danou teplotou napájecí vody dle vykresleného trendu. Teplotní rozdíl se v každém dalším časovém úseku snižuje.



Obr. 4.1: Průběh teploty napájecí vody a vnější stěny potrubí na konci potrubí v čase pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 1 (120 °C, 1 kg/s)

4.1.2 Vliv průtočného množství napájecí vody

Vliv průtočného množství napájecí vody na intenzitu prostupu tepla při najíždění vysokotlaké regenerace je zjišťován na základě Varianty 1, 2 a 3. Zadání jednotlivých variant je uvedeno v Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Zadání variant výpočtu pro zjištění vlivu průtočného množství napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace

	Teplota napájecí vody $T_{F,in}$ [°C]	Hmotnostní průtok napájecí vody \dot{m} $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
Varianta 1	120	1
Varianta 2		5
Varianta 3		20

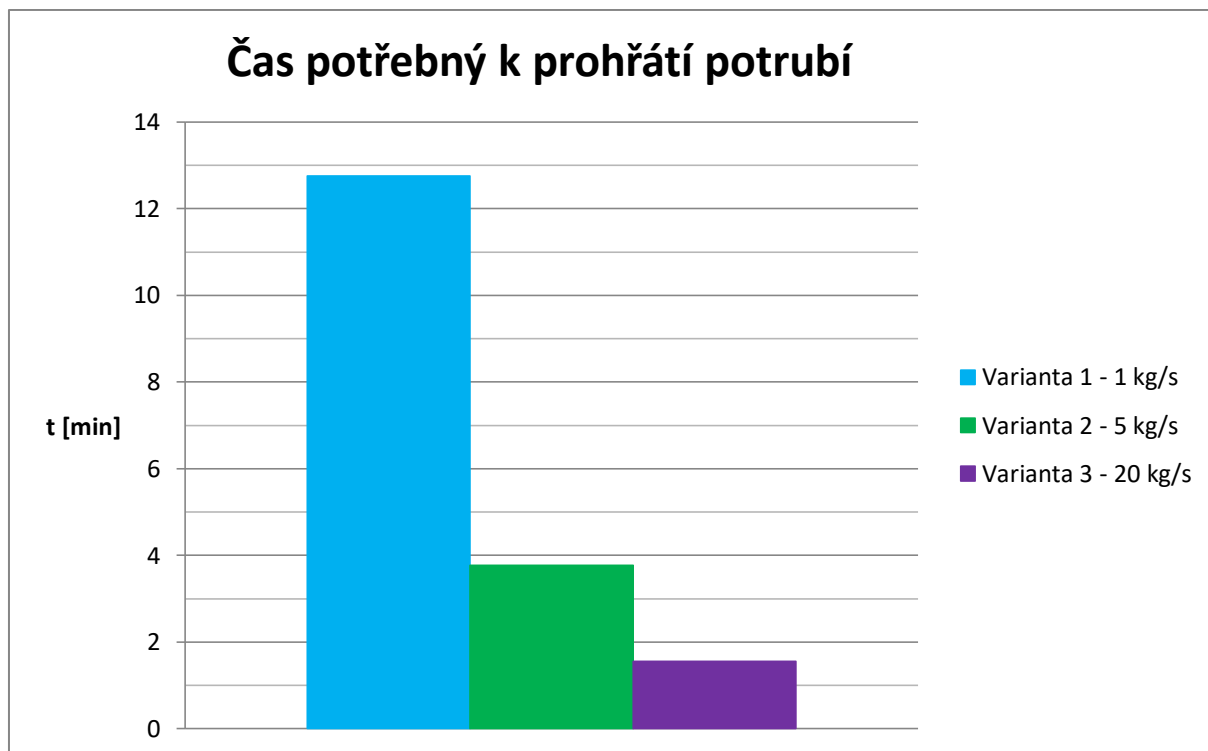
Základními vyhodnocovacími parametry je teplota napájecí vody na konci potrubí po prvním průtoku napájecí vody potrubím a čas potřebný k prohřátí potrubí. Dané parametry jsou uvedeny v Tab. 4.2.

Tab. 4.2: Srovnání důležitých hodnot se zaměřením na vliv průtočného množství - najíždění vysokotlaké regenerace

	Teplota napájecí vody na konci potrubí po prvním průtoku potrubím T_F [°C]	Míra ochlazení napájecí vody po prvním průtoku potrubím ΔT_F [°C]	Čas potřebný k prohřátí potrubí t [min]
Varianta 1	81,02	38,98	12,76
Varianta 2	97,77	22,23	3,77
Varianta 3	110,41	9,59	1,56

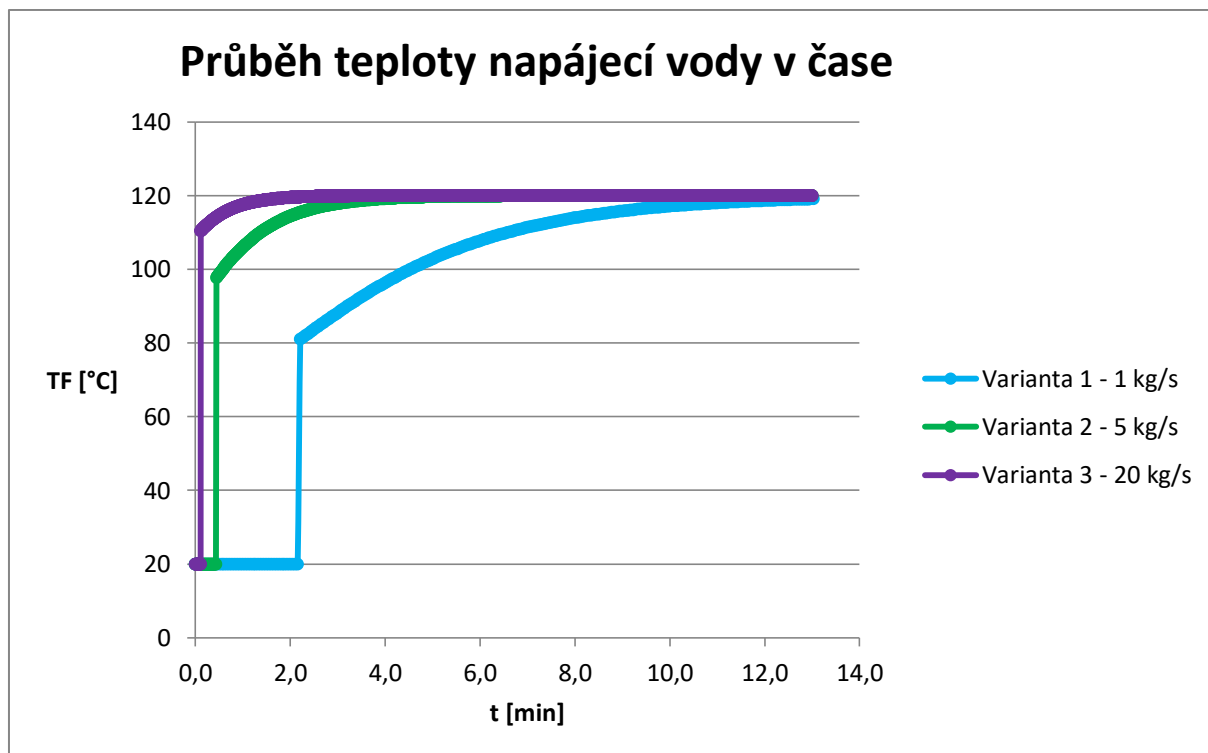
Teplota napájecí vody na konci potrubí po prvním průtoku napájecí vody potrubím je důležitá z hlediska vysokoteplotního ohříváku a jeho namáhání. Na základě porovnání s numerickým výpočtem, které je provedeno v kapitole 3, je zřejmé, že teplota napájecí vody se na začátku procesu najíždění vysokotlaké regenerace nemění čistě skokově, jak uvádí analytický výpočet. Z Obr. 3.6 je však patrné, že na začátku procesu najíždění vysokotlaké regenerace ke značnému nárůstu teploty za malý časový úsek dojde. Z Tab. 4.2 vyplývá, že čím je vyšší hmotnostní průtok napájecí vody, tím je výrazně nižší míra ochlazení napájecí vody po prvním průtoku potrubím.

Čas, který je zapotřebí k prohřátí potrubí, je pro názornost zanesen do grafu, viz Obr. 4.2. Z grafu je patrná silná závislost času potřebného k prohřátí potrubí na velikosti hmotnostního průtoku napájecí vody. Pro hmotnostní průtok 1 kg/s je doba prohřátí skoro 13 minut, avšak pro hmotnostní průtok 5 kg/s trvá celý proces pouze necelé 4 minuty. To znamená, že pro danou vstupní teplotu napájecí vody 120 °C orientačně platí, že pětinašobné navýšení hmotnostního průtoku má za následek třetinovou dobu prohřátí potrubí a další čtyřnásobné navýšení hmotnostního průtoku má za následek zkrácení doby prohřátí potrubí ještě na poloviční čas.



Obr. 4.2: Čas potřebný k prohřátí potrubí pro různé průtočné množství napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace

Na Obr. 4.3 je vykreslen průběh teploty napájecí vody na konci potrubí v čase pro tři různé varianty hmotnostního průtoku. Průběhy teploty napájecí vody v čase odpovídají závislosti plynoucí z výše uvedených časů prohřátí pro jednotlivé varianty. Nejrychlejší nárůst teploty napájecí vody na konci potrubí nastává u nejvyššího hmotnostního průtoku napájecí vody, kde je sdílení tepla nejintenzivnější. Zásadní vliv má však vysoká rychlost proudění, pomocí které se rychle šíří vysoká teplota napájecí vody, která je na vstupu do potrubí.



Obr. 4.3: Průběh teploty napájecí vody v závislosti na čase za účelem ukázaní vlivu průtočného množství napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace

4.1.3 Vliv vstupní teploty napájecí vody

Zde je porovnávána varianta 4, 1 a 5. Porovnání variant si klade za cíl zjištění vlivu vstupní teploty napájecí vody pro případ najíždění vysokotlaké regenerace. Varianty jsou uvedeny v Tab. 4.3.

Tab. 4.3: Zadání variant výpočtu pro zjištění vlivu vstupní teploty napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace

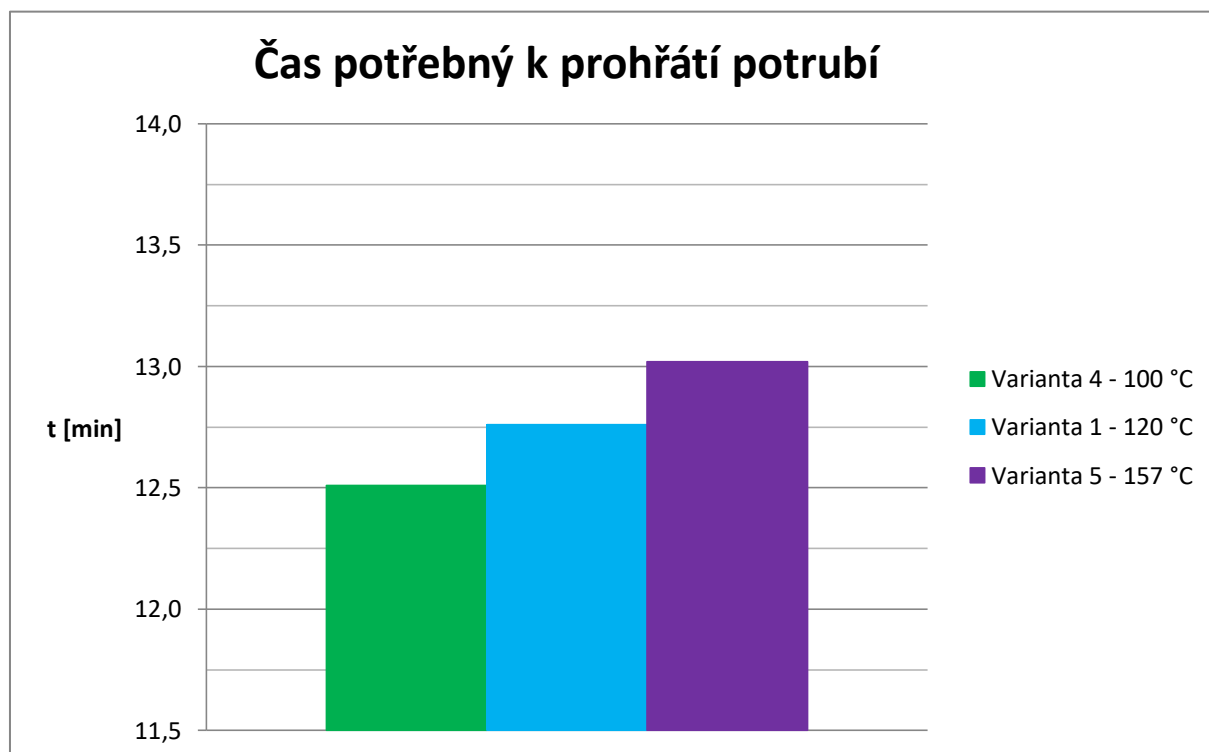
	Teplota napájecí vody $T_{F,in}$ [°C]	Hmotnostní průtok napájecí vody \dot{m} $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
Varianta 4	100	1
Varianta 1	120	
Varianta 5	157	

První důležitou vyhodnocovanou veličinou je teplota napájecí vody na konci potrubí po prvním průtoku. Daná míra ochlazení napájecí vody po prvním průtoku potrubím je uvedena ve vedlejším sloupci tabulky. Třetí důležitou hodnotou v tabulce je čas, který je zapotřebí k prohřátí potrubí. Jedná se o čas, kdy se teplota napájecí vody na výstupu z potrubí přiblíží teplotě napájecí vody na vstupu do potrubí.

Tab. 4.4: Srovnání důležitých hodnot se zaměřením na vliv vstupní teploty napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace

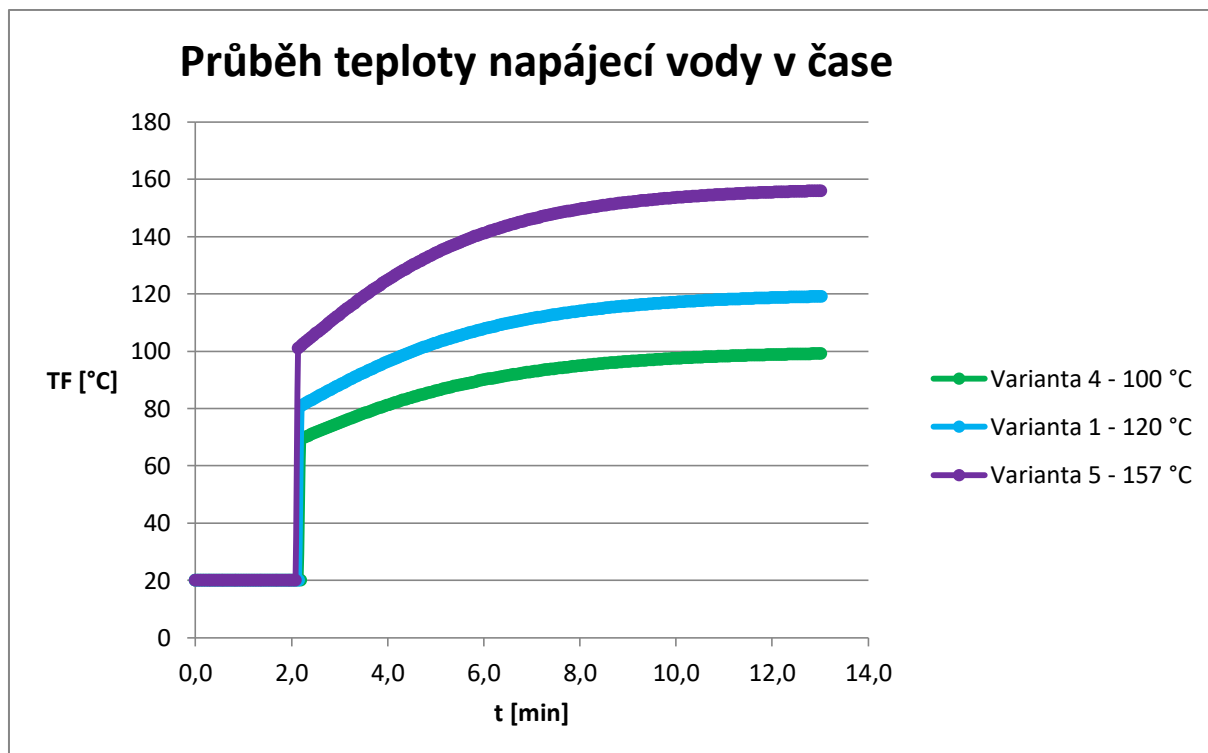
	Teplota napájecí vody na konci potrubí po prvním průtoku potrubím T_F [°C]	Míra ochlazení napájecí vody po prvním průtoku potrubím ΔT_F [°C]	Čas potřebný k prohřátí potrubí t [min]
Varianta 4	69,79	30,21	12,51
Varianta 1	81,02	38,98	12,76
Varianta 5	101,04	55,96	13,02

Z Tab. 4.4 plynou následující závěry. Teplota napájecí vody na konci potrubí po prvním průtoku napájecí vody je významně ovlivněna velikostí teploty napájecí vody na vstupu. Pro nejnižší vstupní teplotu napájecí vody je míra ochlazení napájecí vody po prvním průtoku potrubím nejmenší. Při zvýšení vstupní teploty napájecí vody o 20 °C se zvýší míra ochlazení napájecí vody o necelých 9 °C. Se změnou teploty napájecí vody na vstupu do potrubí se čas, který je zapotřebí k prohřátí potrubí příliš neliší. Změny času prohřátí potrubí jsou v rozsahu půl minuty, viz Obr. 4.4. Zde je vidět trend, který říká, že čím je vyšší vstupní teplota napájecí vody, tím je delší čas potřebný k prohřátí potrubí na zadanou (vyšší) teplotu napájecí vody.



Obr. 4.4: Čas potřebný k prohřátí potrubí pro různé vstupní teploty napájecí vody- najíždění vysokotlaké regenerace

Na Obr. 4.5 je přehledně ukázán vliv vstupní teploty napájecí vody na průběh teploty napájecí vody na konci potrubí v čase. Závěr plyne ze sklonu jednotlivých křivek. Čím je vyšší vstupní teplota napájecí vody, tím je větší sklon, který odpovídá rychlejšímu nárůstu teploty napájecí vody. To znamená, že dochází k intenzivnějšímu přenosu tepla vlivem většího teplotního rozdílu, který se v průběhu najíždění vysokotlaké regenerace zmenšuje.



Obr. 4.5: Průběh teploty napájecí vody v závislosti na čase za účelem ukázání vlivu vstupní teploty napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace

4.2 Proces odstavování vysokotlaké regenerace

V rámci vyhodnocení zadané úlohy odstavování vysokotlaké regenerace je pozornost zaměřena na teplotu napájecí vody a její změnu v čase. Na základě zvoleného předpokladu, který zanedbává vliv čel potrubí, se napočtená teplota napájecí vody nemění po délce potrubí.

Pro případ odstavování vysokotlaké regenerace jsou vyšetřovány celkem tři varianty, na kterých je zkoumán vliv výchozí teploty napájecí vody v potrubí.

4.2.1 Vliv výchozí teploty napájecí vody

Prezentované výsledky analytického výpočtu nestacionární úlohy odstavování vysokotlaké regenerace jsou získány na základě zvoleného časového kroku 5 min, který je vzhledem k době výpočtu a přesnosti výsledků přijatelný. Doba chladnutí napájecí vody je zvolena 24 hod.

V Tab. 4.5 jsou přehledně uvedeny všechny tři varianty výpočtu, které jsou porovnány za účelem zjištění vlivu výchozí teploty napájecí vody.

Tab. 4.5: Zadání variant výpočtu pro zjištění vlivu výchozí teploty napájecí vody - odstavování vysokotlaké regenerace

	Teplota napájecí vody T_F [°C]	Hmotnostní průtok napájecí vody \dot{m} $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
Varianta 1	100	0
Varianta 2	120	
Varianta 3	157	

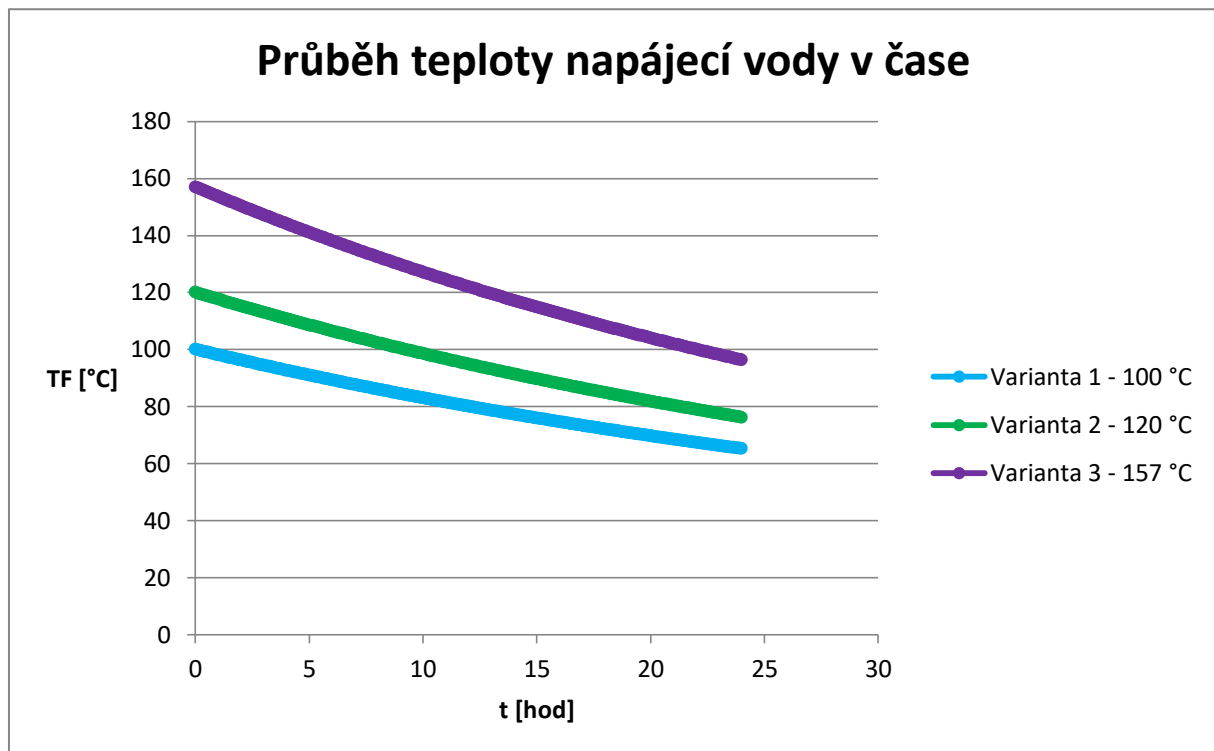
Výsledné průběhy teploty napájecí vody získané analytickým výpočtem jsou přehledně uvedeny v Tab. 4.6. Zvolený časový krok pro vyhodnocení je 1 hod.

Tab. 4.6: Průběh teploty napájecí vody pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

Čas t [hod]	Teplota napájecí vody T_F [°C]		
	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
0	100,00	120,00	157,00
1	98,10	117,60	153,64
2	96,24	115,25	150,37
3	94,44	112,97	147,18
4	92,67	110,74	144,08
5	90,95	108,57	141,06
6	89,27	106,46	138,12
7	87,64	104,39	135,25
8	86,04	102,38	132,45
9	84,48	100,42	129,73
10	82,96	98,51	127,08
11	81,48	96,65	124,50
12	80,04	94,83	121,98
13	78,62	93,05	119,52
14	77,25	91,32	117,13
15	75,91	89,64	114,80
16	74,59	87,99	112,53
17	73,32	86,39	110,31
18	72,07	84,82	108,15
19	70,85	83,29	106,05
20	69,66	81,80	104,00

21	68,50	80,35	101,99
22	67,37	78,93	100,04
23	66,27	77,55	98,14
24	65,19	76,20	96,28

Hodnoty získané výpočtem jsou pro všechny tři varianty zaneseny do grafu, viz Obr. 4.6. Na daném grafu jsou patrné rozdíly v míře ochlazení napájecí vody u jednotlivých variant. Vyčíslení daných rozdílů je názorně uvedeno v Tab. 4.7.

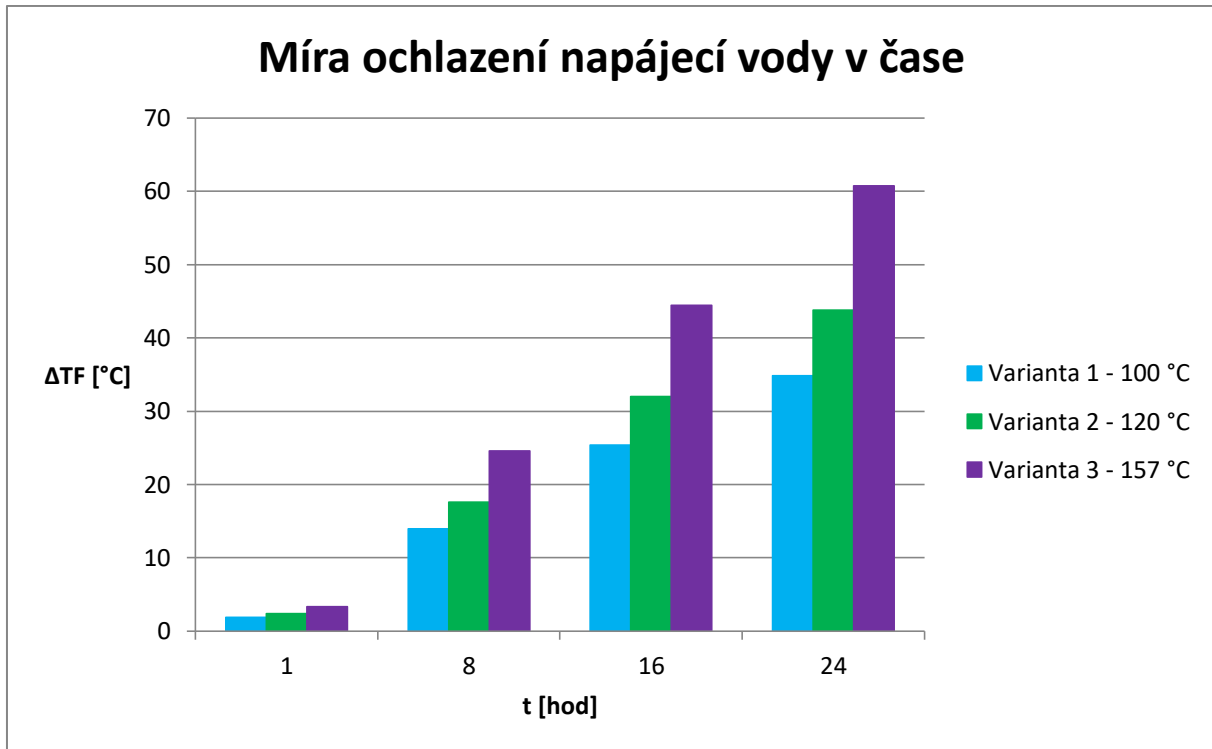


Obr. 4.6: Průběh teploty napájecí vody v čase pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

Tab. 4.7: Míra ochlazení napájecí vody pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

Čas t [hod]	Míra ochlazení napájecí vody $T_{F,t=0} - T_{F,t}$ [°C]		
	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
1	1,90	2,40	3,36
8	13,96	17,62	24,55
16	25,41	32,01	44,47
24	34,81	43,80	60,72

Hodnoty z Tab. 4.7 jsou vyneseny do grafu, který názorně ukazuje rozdíly v míře ochlazení napájecí vody u jednotlivých variant.



Obr. 4.7: Míra ochlazení napájecí vody v čase pro případ odstavení vysokotlaké regenerace

Z výše uvedených tabulek a grafů je patrné, že čím je výchozí teplota napájecí vody za stejných okolních podmínek vyšší, tím je patrný intenzivnější prostup tepla a tedy intenzivnější chladnutí napájecí vody. Výchozí teplota napájecí vody u jednotlivých variant má tudíž velký vliv na míru ochlazení.

5 Závěr

Diplomová práce je zaměřena na tvorbu algoritmu nestacionárního 1D výpočtu přenosu tepla, který řeší úlohu najíždění i odstavování vysokotlaké regenerace. V rámci teoretické části jsou popsány mechanismy přenosu tepla a uvedeny příslušné rovnice, které jsou nezbytnou součástí celého výpočtového modelu. Z hlediska tvorby výpočetního algoritmu jsou v této práci řešeny dva nezávislé případy. Prvním případem je proces najíždění vysokotlaké regenerace a druhým případem je proces odstavování vysokotlaké regenerace. V rámci teoretické části je pro proces odstavování vysokotlaké regenerace, kdy je napájecí voda uzavřena trojcestnými ventily v potrubí, problém s nalezením vhodného tvaru kritériální rovnice pro přirozenou konvekci tekutiny uvnitř horizontálního potrubí. Dostupná literatura v oblasti popisu a řešení přirozené konvekce tekutiny, která je v daném případě uvažována, uvádí pouze velmi specifické případy. V rámci horizontálního potrubí je pro vnitřní proudění v odborné literatuře řešena pouze nucená konvekce. Po konzultaci s akademickým odborníkem, prof. Jiřím Linhartem, je použita kritériální rovnice pro případ přirozené konvekce na vnějším povrchu horizontálního válce s tím, že do dané kritériální rovnice je za charakteristický rozměr dosazen vnitřní průměr potrubí.

V rámci praktické části jsou vytvořeny dva algoritmy výpočtu v programu MS Excel, které poskytují průběh teploty napájecí vody v závislosti na čase během procesu najíždění vysokotlaké regenerace a během procesu odstavování vysokotlaké regenerace. Pro danou problematiku je nejdůležitější znalost průběhu teploty napájecí vody v závislosti na čase na konci potrubí napájecí vody neboli na vstupu do vysokotlakého ohříváku.

Vyhodnocení průběhu teploty napájecí vody je pro vybrané varianty součástí diplomové práce. Pro případ najíždění vysokotlaké regenerace je porovnán průběh teploty napájecí vody s průběhem teploty vnější stěny potrubí na konci potrubí a je zkoumán vliv hmotnostního průtoku napájecí vody a vstupní teploty napájecí vody na teplotu napájecí vody na konci 10 metrů dlouhého potrubí. Pro případ odstavování vysokotlaké regenerace je vyhodnocen průběh teploty napájecí vody a vliv výchozí teploty napájecí vody na průběh ochlazování.

Výsledky obou analytických výpočtů naprogramovaných v prostředí VBA jsou porovnány s numerickou metodou využívanou komerčním programem od společnosti Ansys, Ansys CFX a Ansys Fluent. Průběh teploty napájecí vody v závislosti na čase získaný analytickým výpočtem odpovídá závislosti, která je dána výsledky získanými numerickým výpočtem. Pro proces najíždění vysokotlaké regenerace vznikají největší odchylky na začátku procesu, jelikož analytický výpočet nezahrnuje promíchávání teplejšího a studenějšího proudu. U odstavování vysokotlaké regenerace se odchylka zvyšuje v čase, což vyplývá z charakteru exponenciální funkce. Pro znalost průběhu teploty napájecí vody potřebné pro praxi jsou dané odchylky vyhovující a lze říci, že navržený analytický 1D nestacionární výpočet průběhu teploty napájecí vody může částečně zastoupit složitou a časově náročnou numerickou simulaci, kterou provádí komerční program. Časovou náročností se rozumí výpočetní čas. Pro případ najíždění vysokotlaké regenerace je jedna varianta počítána na výpočetním serveru s využitím 32 výpočetních jader zhruba 35 hodin. Pro případ odstavování vysokotlaké regenerace je výpočetní čas jedné varianty s využitím 8 výpočetních jader zhruba 18 hodin. Mimo to má sestavení algoritmu nestacionárního výpočtu v programu MS Excel další nespornou výhodu, kterou je široká uživatelská přístupnost. Ta plyne z dostupnějších a levnějších licencí MS Office a zcela otevřeného modelu včetně přístupného kódu ve VBA umožňujícího případný další vývoj 1D nestacionárního výpočtu. Vytvoření analytického výpočtu v programu MS Excel je požadavkem zadavatele diplomové práce, společnosti Doosan Škoda Power.

Daná rychlá možnost výpočtu nestacionárního průběhu teploty napájecí vody v potrubí může dobře sloužit pro první představu o chování teploty napájecí vody při procesu najíždění vysokotlaké regenerace a odstavování vysokotlaké regenerace. Dané výpočty jsou dobře použitelné pro elektrárenský provoz, ve kterém dochází k častým najížděním a odstavováním vysokotlaké regenerace.

Vytvořené výpočty v programu MS Excel mají svá zjednodušení. Pro proces najíždění vysokotlaké regenerace je v této práci uvažováno potrubí v celé své délce jako horizontální o zvolené délce 10 metrů. Ve skutečnosti může být potrubí napájecí vody delší a může být tvořeno nejen horizontálními, ale i vertikálními úseky a koleny popřípadě i armaturami. Diplomová práce nabízí podnět pro realizaci experimentu, při kterém lze naměřit skutečné hodnoty teploty napájecí vody v potrubí při nestacionárním procesu, za účelem ověření připraveného 1D nestacionárního modelu. Výsledky dané diplomové práce jsou použity jako součást zadání pro grant vypsaný firmou Doosan Škoda Power za účelem analýzy nízkocyklové únavy vysokotlakých ohříváků.

Seznam použité literatury

- [1] LINHART, Jiří. *Poznámky z předmětu: Přenos tepla a hmoty*. ZČU v Plzni, 2017.
- [2] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2029-4.
- [3] *VDI heat atlas*. 2nd ed. New York: Springer, 2010. ISBN 3540778764.
- [4] INCROPERA, Frank P a David P DEWITT. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4th ed. New York: John Wiley, c1996. ISBN 0-471-30460-3.
- [5] LIENHARD, John H. IV a John H. V LIENHARD. *A Heat Transfer Textbook*. 3rd ed. Cambridge, Massachusetts, USA: Phlogiston Press, 2003.

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Rychlostní mezní vrstva [3]

Obr. 2.2: Teplotní mezní vrstva [3]

Obr. 2.3: Průběh teplot a tepelného toku po délce potrubí [2]

Obr. 3.1: Ukázka vytvořeného analytického výpočtu v programu MS Excel pro případ najíždění vysokotlaké regenerace

Obr. 3.2: Geometrie pro případ najíždění vysokotlaké regenerace

Obr. 3.3: Výpočetní síť pro případ najíždění vysokotlaké regenerace

Obr. 3.4: Detail výpočetní sítě pro případ najíždění vysokotlaké regenerace

Obr. 3.5: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 1

Obr. 3.6: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 2

Obr. 3.7: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 3

Obr. 3.8: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 4

Obr. 3.9: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 5

Obr. 3.10: Numerická simulace pro případ najíždění vysokotlaké regenerace v čase 26 s – Varianta 2

Obr. 3.11: Porovnání analytického a numerického výpočtu z hlediska času potřebného k prohřátí potrubí

Obr. 3.12: Ukázka vytvořeného analytického výpočtu v programu MS Excel pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

Obr. 3.13: Výpočetní síť pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

Obr. 3.14: Detail výpočetní sítě pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

Obr. 3.15: Porovnání výsledků pro případ odstavování vysokotlaké regenerace – Varianta 1

Obr. 3.16: Porovnání výsledků pro případ odstavování vysokotlaké regenerace – Varianta 2

Obr. 3.17: Porovnání výsledků pro případ odstavování vysokotlaké regenerace – Varianta 3

Obr. 4.1: Průběh teploty napájecí vody a vnější stěny potrubí na konci potrubí v čase pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 1 (120 °C, 1 kg/s)

Obr. 4.2: Čas potřebný k prohřátí potrubí pro různé průtočné množství napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace

Obr. 4.3: Průběh teploty napájecí vody v závislosti na čase za účelem ukázání vlivu průtočného množství napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace

Obr. 4.4: Čas potřebný k prohřátí potrubí pro různé vstupní teploty napájecí vody

Obr. 4.5: Průběh teploty napájecí vody v závislosti na čase za účelem ukázání vlivu vstupní teploty napájecí vody

Obr. 4.6: Průběh teploty napájecí vody v čase pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

Obr. 4.7: Míra ochlazení napájecí vody v čase pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

Seznam tabulek

- Tab. 2.1: Běžné hodnoty součinitele přestupu tepla [4]
- Tab. 2.2: Metody stanovení součinitele přestupu tepla [1]
- Tab. 2.3: Obecný tvar kritériální rovnice pro přirozenou konvekci a pro nucenou konvekci [1]
- Tab. 3.1: Zadání úlohy pro případ najíždění vysokotlaké regenerace
- Tab. 3.2: Výsledky výpočtu Biotova čísla v programu MS Excel
- Tab. 3.3: Nastavení numerického výpočtu pro případ najíždění vysokotlaké regenerace
- Tab. 3.4: Varianty výpočtu k porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace
- Tab. 3.5: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 1
- Tab. 3.6: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 2
- Tab. 3.7: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 3
- Tab. 3.8: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 4
- Tab. 3.9: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 5
- Tab. 3.10: Zadání úlohy pro případ odstavování vysokotlaké regenerace
- Tab. 3.11: Nastavení numerického výpočtu pro případ odstavování vysokotlaké regenerace
- Tab. 3.12: Varianty výpočtu k porovnání výsledků pro případ odstavování vysokotlaké regenerace
- Tab. 3.13: Porovnání výsledků pro případ odstavování vysokotlaké regenerace – Varianta 1
- Tab. 3.14: Porovnání výsledků pro případ odstavování vysokotlaké regenerace – Varianta 2
- Tab. 3.15: Porovnání výsledků pro případ odstavování vysokotlaké regenerace – Varianta 3
- Tab. 4.1: Zadání variant výpočtu pro zjištění vlivu průtočného množství napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace
- Tab. 4.2: Srovnání důležitých hodnot se zaměřením na vliv průtočného množství - najíždění vysokotlaké regenerace
- Tab. 4.3: Zadání variant výpočtu pro zjištění vlivu vstupní teploty napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace
- Tab. 4.4: Srovnání důležitých hodnot se zaměřením na vliv vstupní teploty napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace
- Tab. 4.5: Zadání variant výpočtu pro zjištění vlivu výchozí teploty napájecí vody - odstavování vysokotlaké regenerace
- Tab. 4.6: Průběh teploty napájecí vody pro případ odstavování vysokotlaké regenerace
- Tab. 4.7: Míra ochlazení napájecí vody pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

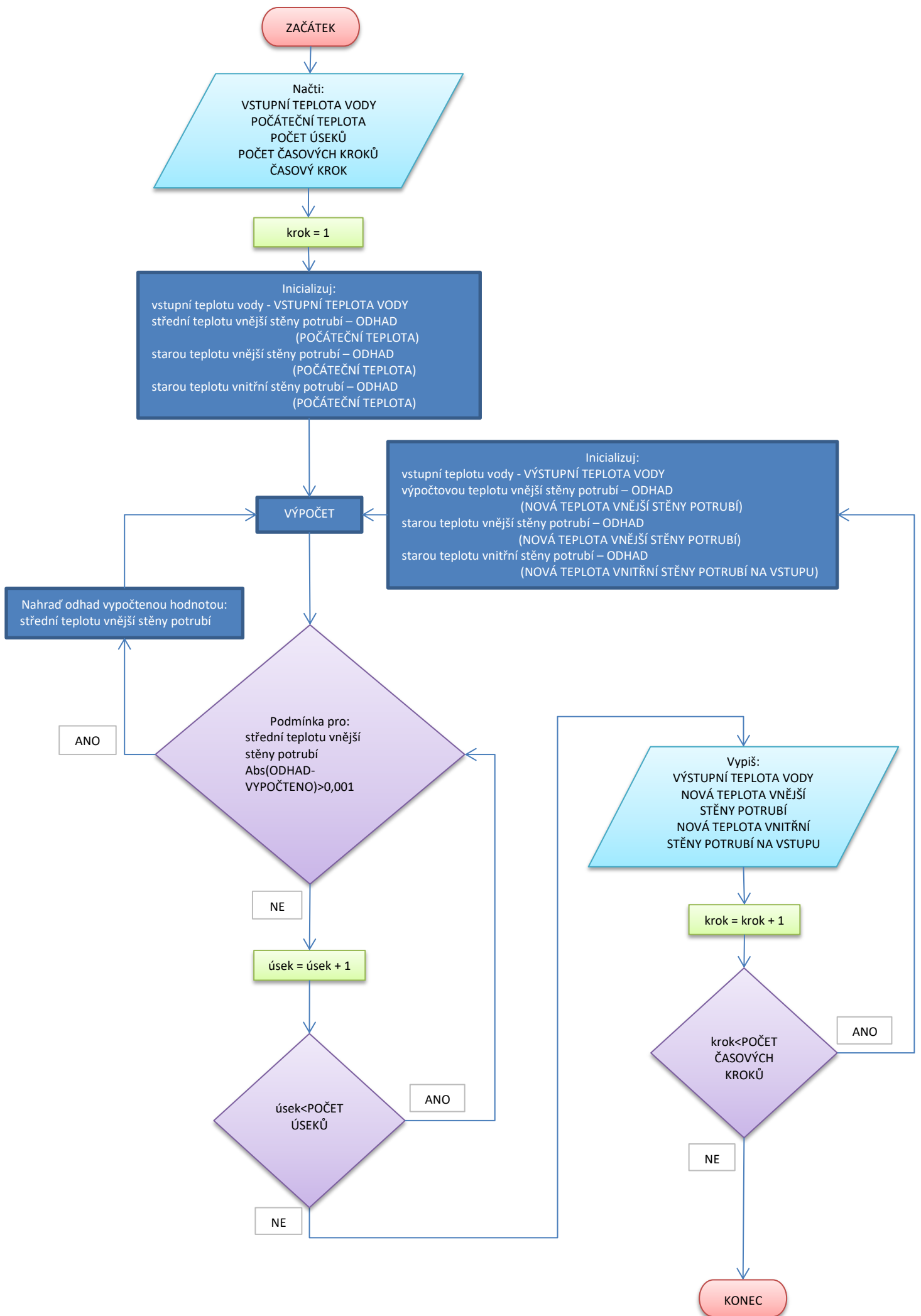
Seznam příloh

PŘÍLOHA č. 1 - Vývojový diagram pro případ najíždění vysokotlaké regenerace

PŘÍLOHA č. 2 - Vývojový diagram pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

PŘÍLOHA č. 1

Vývojový diagram pro případ najíždění vysokotlaké regenerace



PŘÍLOHA č. 2

Vývojový diagram pro případ odstavování vysokotlakové regenerace

