

# PŘÍPRAVA ALGORITMU NESTACIONÁRNÍHO 1D VÝPOČTU PRO VYŠETŘENÍ PRŮBĚHU TEPLoty IZOLOVANÉHO POTRUBÍ PLNÉHO VODY PŘI NAJÍŽDĚNÍ A ODSTAVOVÁNÍ VT REGENERACE

## SVOČ – FST 2019

Bc. Eva Berková,  
Západočeská univerzita v Plzni,  
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň  
Česká republika

### ABSTRAKT

Autor článku 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 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

### ÚVOD

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. 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. 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.

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. Nejvíce kritickým místem je konec potrubní trasy neboli vstup do vysokotlakého ohříváku.

Cílem je 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.

### PROCES NAJÍŽDĚNÍ VYSOKOTLAKÉ REGENERACE

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

**Tabulka 9: Zadání úlohy pro případ najždění 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	$\rho$	7850			$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	tepelná vodivost	$\lambda_W$	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

## PROCES ODSTAVOVÁNÍ VYSOKOTLAKÉ REGENERACE

Při procesu odstavení 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.

Zadání, které je zapotřebí pro řešení úlohy odstavení vysokotlaké regenerace, je přehledně uvedeno v tabulce, viz **Tabulka 10**. Poloha daného potrubí je uvažována jako horizontální. Zadaná délka potrubí je v daném případě pouze 1 m z důvodu snížení počtu prvků výpočetní sítě v rámci numerického výpočtu. Délka potrubí nemá vliv na výsledky výpočtu, jelikož není uvažován vliv čel potrubí.

**Tabulka 10: Zadání úlohy pro případ odstavení 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	$\rho$	7850			$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	tepelná vodivost	$\lambda_W$	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	$\rho$	25			$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	tepelná vodivost	$\lambda_{izol}$	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	$\varepsilon$	0,5			–

napájecí voda	tlak	p	135			bar
	hmotnostní průtok	m	0			$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
	výchozí teplota	$T_F$	100	120	157	$^{\circ}\text{C}$
okolní vzduch	teplota	$T_{\infty}$	20			$^{\circ}\text{C}$
	tlak	$p_{\infty}$	1			bar

## POPIS TVORBY ANALYTICKÉHO VÝPOČTU

Východiskem pro vytvoření algoritmu nestacionárního 1D výpočtu průběhu teplot napájecí vody je znalost základních mechanismů přenosu tepla. Obecně jsou rozlišovány 3 mechanismy přenosu tepla. Jedná se o přenos tepla vedením, prouděním a sáláním.[1]

Základním zákonem pro přenos tepla vedením je Fourierův zákon. Pro přenos tepla prouděním je základním zákonem Newtonův zákon, který je tvořen rozdílem teploty stěny a teploty tekutiny v dostatečné vzdálenosti od stěny a součinitelem přestupu tepla. Součinitel přestupu tepla lze stanovit z kritériální rovnice. Základním zákonem z hlediska sálání je Stefan-Boltzmannův zákon. Vztahy pro přenos tepla a příslušné kritériální rovnice aplikovatelné na zadanou úlohu jsou čerpány literatury [2],[3],[4],[5].

Pro realizaci analytického výpočtu je zvolen program MS Excel. V následující tabulce jsou přehledně uvedeny zjednodušující předpoklady zrealizovaného analytického výpočtu.

**Tabulka 11: Zjednodušující předpoklady analytického výpočtu**

Proces najíždění vysokotlaké regenerace	Proces odstavování vysokotlaké regenerace
vedení tepla materiálem potrubí v podélném směru je zanedbáno	okolní vzduch je suchý
vedení tepla izolací, vedení tepla ochranným plechem a sálání do okolního vzduchu je zanedbáno (tepelný tok z vnější stěny potrubí do okolí je nulový)	není uvažován vliv čel potrubí
	veškeré vysálané teplo je pohlceno okolním vzduchem
	vedení tepla ochranným plechem je zanedbáno
vlastnosti materiálu potrubí a izolace se nemění s teplotou	
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 prostupu tepla vztáženého k vnitřnímu povrchu potrubí. Mimo daných funkcí jsou do MS Excelu přidány funkce – X Steam Tables, které uvádí vlastnosti vody dle IF97.

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. Dále 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.

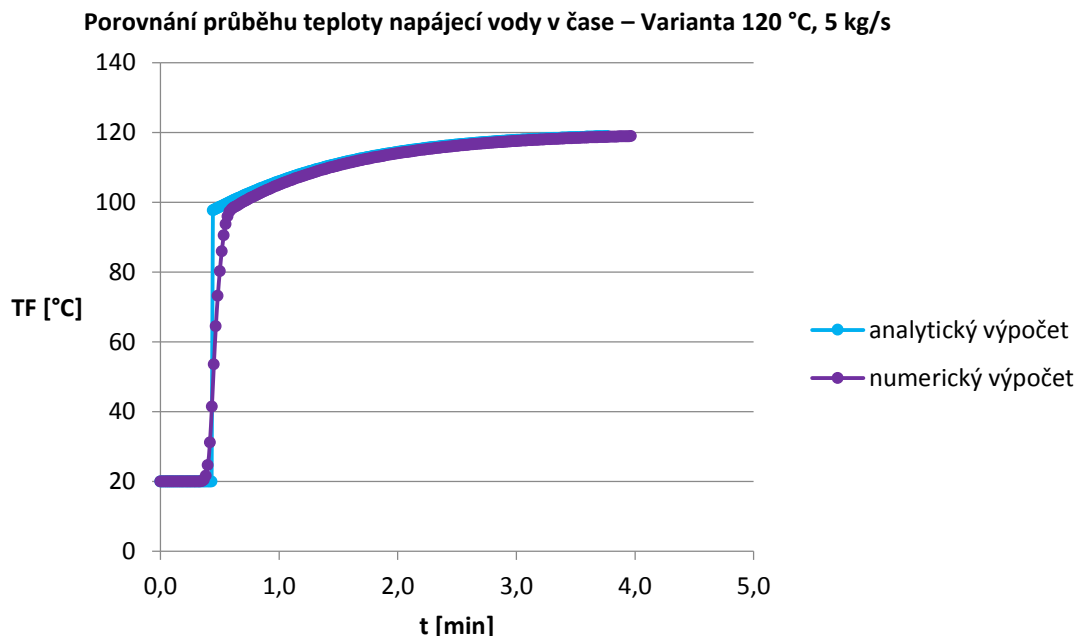
Pro sestavení nestacionárního výpočtu přenosu tepla, tj. výpočtu úlohy, která není časově ustálená a obsahuje iterativní postup výpočtu, je zapotřebí využít možnost tvorby makra v daném programu. Makro je aplikace, kterou lze v programu MS Excel vytvořit v programovacím jazyce Visual Basic for Applications (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. Každý časový krok obsahuje iterativní postup výpočtu, 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 krok. Celý výpočet je ukončen splněním zadané podmínky.

## POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ANALYTICKÉHO VÝPOČTU A NUMERICKÉHO VÝPOČTU

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, verze Ansys R19.0 (Academic). Cílem je porovnání výsledků získaných pomocí analytického výpočtu a pomocí numerického výpočtu. Důležitou otázkou je, zda autorem vytvořený analytický výpočet v programu MS Excel může alespoň částečně nahradit časově náročnou numerickou simulaci.

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 **Tabulka 9**. 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. Jako názorný příklad porovnání obou typů výpočtu je vybrána varianta se vstupní teplotou napájecí vody 120 °C a s hmotnostním průtokem napájecí vody 5 kg/s. Průběh teploty napájecí vody na konci potrubí je pro danou variantu zanesen do grafu, viz **Obrázek 10**.



**Obrázek 10: Porovnání výsledků pro případ najíždění vysokotlaké regenerace – Varianta 120 °C, 5 kg/s**

Na základě výše uvedeného grafu 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 skokové změně, kterou udává analytický výpočet. Teplotní profil, odpovídající vyvinutému rychlostnímu profilu proudění, který zohledňuje numerická simulace, je pro Variantu 120 °C, 5 kg/s znázorněn na obrázku, viz **Obrázek 11**. Na daném obrázku je zobrazeno rozložení teploty napájecí vody na koncové části potrubí v čase 26 s, kdy teplota napájecí vody na konci potrubí je dle numerického výpočtu 41,5 °C a dle analytického výpočtu ještě 20 °C.

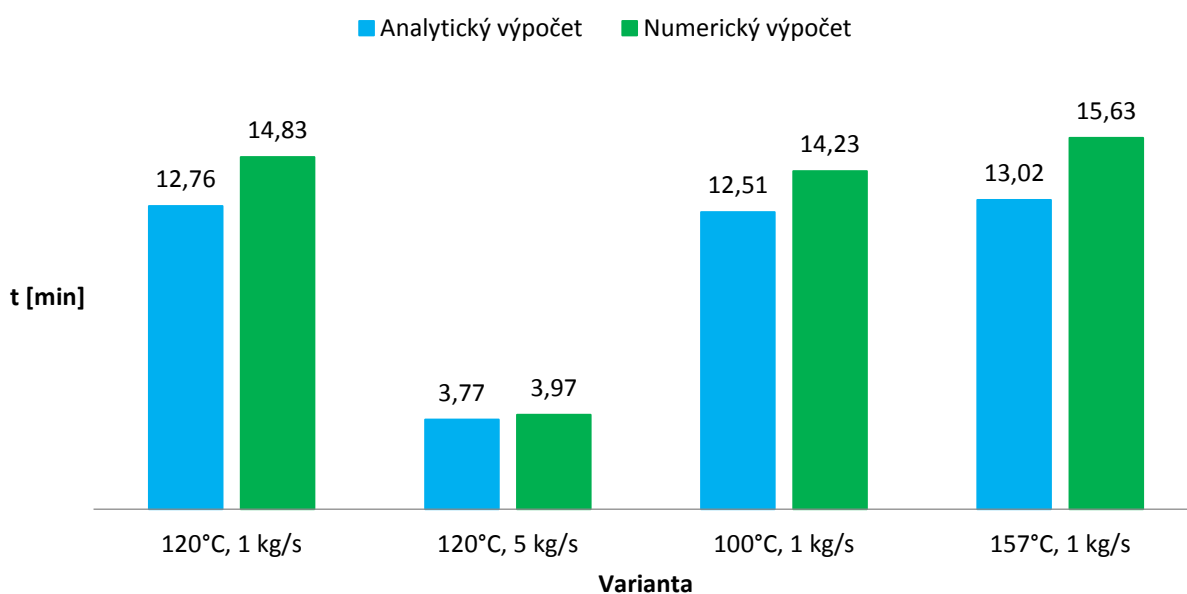


**Obrázek 11: Numerická simulace pro případ najíždění vysokotlaké regenerace v čase 26 s – Varianta 120 °C, 5 kg/s**

Po zanedbání počátečních odchylek, které vznikají z důvodu analytického výpočtu, který na začátku najíždění vysokotlaké regenerace vykresluje skokovou změnu teploty, je teplotní průběh získaný analytickým 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, viz **Obrázek 12**. 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. Největší odchylka daného času je u 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 120 °C, 5 kg/s je vzniklá časová odchylka pouhých 12 sekund.

**Porovnání analytického a numerického výpočtu z hlediska času potřebného k prohřátí potrubí**



Obrázek 12: Porovnání analytického a numerického výpočtu z hlediska času potřebného k prohřátí potrubí

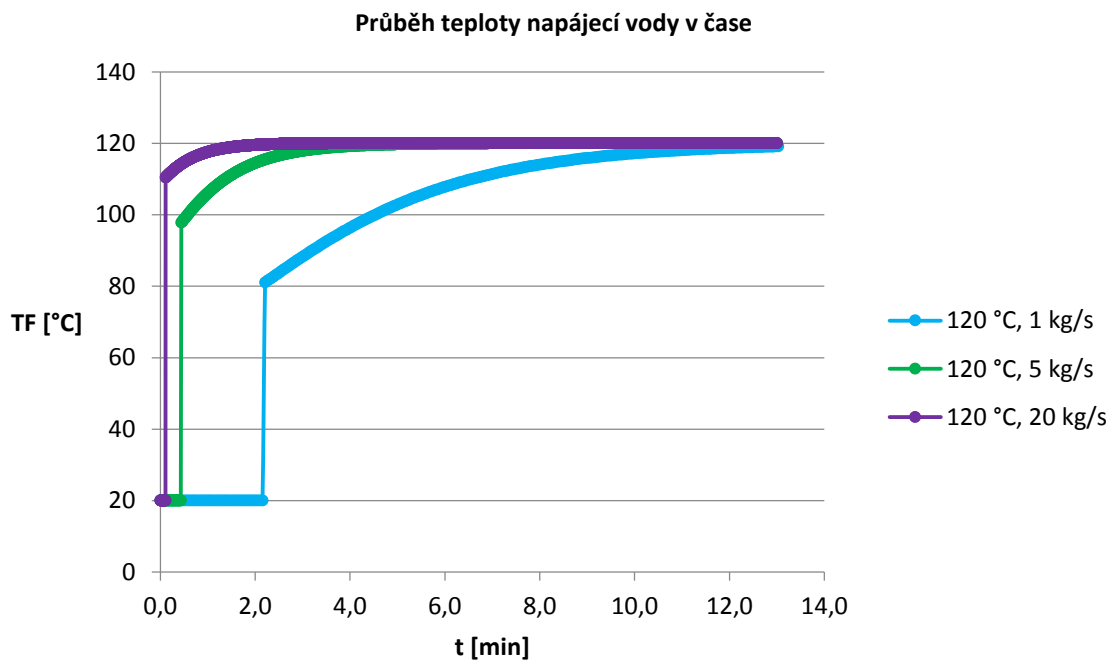
## VYHODNOCENÍ PRŮBĚHU TEPLoty NAPÁJECÍ VODY

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

### Proces najíždění vysokotlaké regenerace

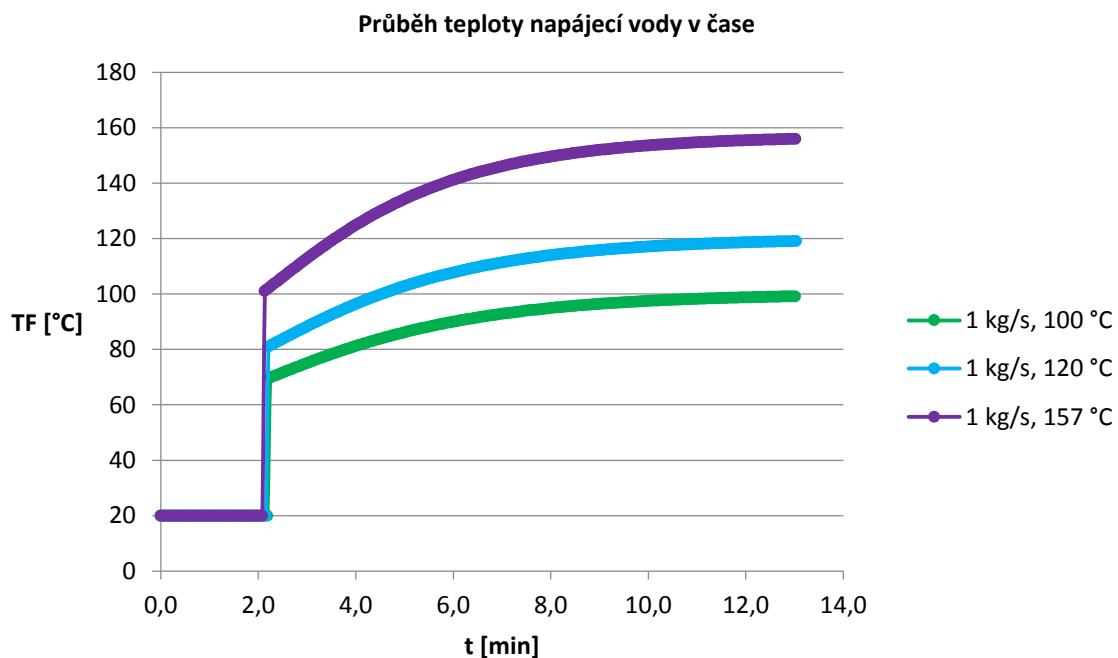
V rámci vyhodnocení je pozornost zaměřena na teplotu napájecí vody na konci potrubí v závislosti na čase s cílem analyzovat vliv průtočného množství napájecí vody a vliv vstupní teploty napájecí vody.

Na grafu, **Obrázek 13**, je vykreslen průběh teploty napájecí vody na konci potrubí v čase pro tři různé varianty hmotnostního průtoku. Nejrychlejší nárůst teploty napájecí vody na konci potrubí nastává u nejvyššího hmotnostního průtoku napájecí vody, kde je sdílení tepla nejintenzivnější. Zásadní vliv má vysoká rychlost proudění, pomocí které se rychle šíří vysoká teplota napájecí vody, která je na vstupu do potrubí.



Obrázek 13: Průběh teploty napájecí vody v čase za účelem ukázání vlivu průtočného množství napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace

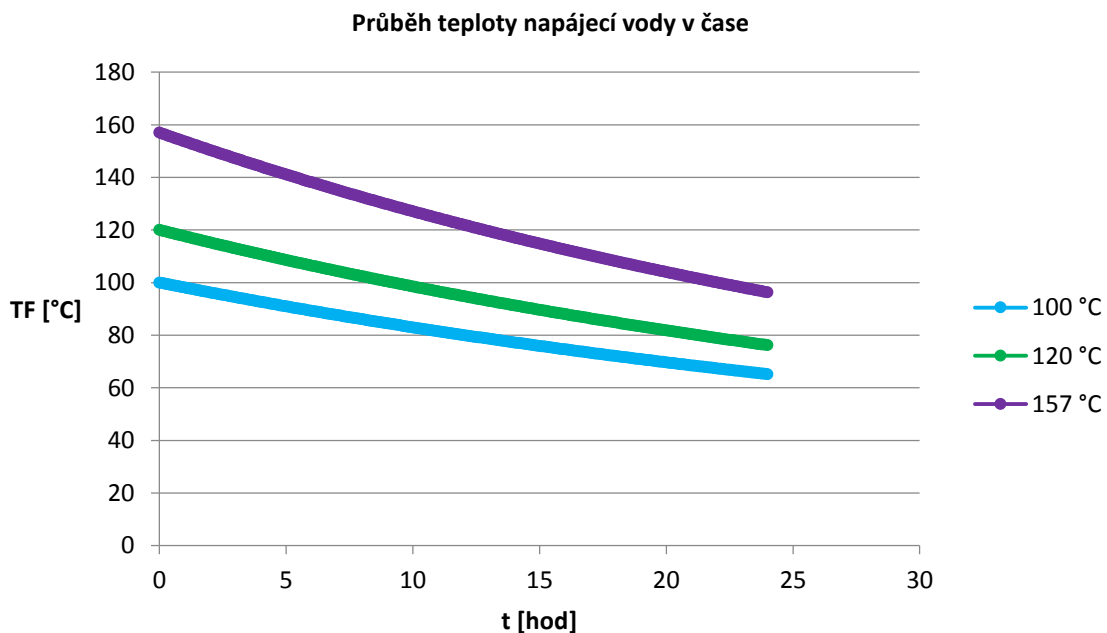
Na grafu, **Obrázek 14**, je přehledně ukázán vliv vstupní teploty napájecí vody na průběh teploty napájecí vody na konci potrubí v čase. Závěr plyne ze sklonu jednotlivých křivek. Čím je vyšší vstupní teplota napájecí vody, tím je větší sklon, který odpovídá rychlejšímu nárůstu teploty napájecí vody. To znamená, že dochází k intenzivnějšímu přenosu tepla vlivem většího tepelného rozdílu, který se v průběhu času najíždění vysokotlaké regenerace zmenšuje.



Obrázek 14: Průběh teploty napájecí vody v čase za účelem ukázání vlivu vstupní teploty napájecí vody - najíždění vysokotlaké regenerace

#### Proces odstavování vysokotlaké regenerace

V rámci vyhodnocení 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. Hodnoty získané výpočtem jsou pro všechny tři varianty zaneseny do grafu, viz **Obrázek 15**.



Obrázek 15: Průběh teploty napájecí vody v čase pro případ odstavování vysokotlaké regenerace

Z výše uvedeného grafu je patrné, že čím je výchozí teplota napájecí vody za stejných okolních podmínek vyšší, tím je patrný intenzivnější průběh tepla a tedy intenzivnější chlazení napájecí vody. Výchozí teplota napájecí vody u jednotlivých variant má tudíž velký vliv na míru ochlazení.

## ZÁVĚR

V rámci řešení dané problematiky nestacionárního přenosu tepla 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.

Výsledky obou analytických výpočtů naprogramovaných v MS Excel jsou porovnány s numerickou metodou využívanou komerčním programem od společnosti Ansys, Ansys CFX a Ansys Fluent. Pro znalost průběhu teploty napájecí vody potřebné pro praxi jsou dané odchylky vyhovující a lze říci, že daný analytický 1D nestacionární výpočet průběhu teploty napájecí vody může částečně zastoupit složitou a zdlouhavou numerickou simulaci, kterou provádí komerční program. Výsledky získané autorem jsou použity jako součást zadání pro grant vypsaný firmou Doosan Škoda Power za účelem analýzy nízkocyklové únavy vysokotlakých ohříváků. 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.

## 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.

## LITERATURA

- [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