



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

## POKROČILÉ METÓDY HODNOTENIA POŠKODZOVANIA TRUBKOVÝCH ZVÄZKOV V KOTLE

ADVANCED METHODS FOR DAMAGE EVALUATION OF BOILER TUBE BUNDLES

### DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Martin Nad'

### ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

BRNO 2019



## **Abstrakt**

Dizertačná práca sa zaoberá aplikáciou pokročilých metód hodnotenia poškodenia trubkových zväzkov v kotloch so zameraním na poškodenie vplyvom teploty. Cieľom je navrhnúť postup riešenia problematiky a ukázať možnosti moderných prístupov.

Práca popisuje rôzne typy poškodenia, ktoré sa môžu objaviť v priemyselných kotloch. Hlavný dôraz je kladený na najexponovanejšie a často aj najviac poškodzované časti, ktorými sú trubkové zväzky, napríklad prehrievače pary. Keďže poškodenie zariadenia je nežiaduce a často vedie k úniku média, poprípade až k odstávke, je nutné rýchlo reagovať a čo najskôr odhaliť príčinu a zabezpečiť nápravu. Jednotlivé typy poškodenia sú rozdelené do piatich základných skupín podľa mechanizmu poškodzovania. Jedným z najvýznamnejších vplyvov na životnosť má teplota zapríčiňujúca krátkodobé alebo dlhodobé prehriatie trubkových zväzkov. Tento typ poškodenia, znižujúci creepovú životnosť, nastane pri prekročení návrhovej teploty. Pre určenie poškodenia vplyvom teploty je však potrebná história reálnej povrchovej teploty zväzku trubiek, ktorá však pri zariadeniach často chýba. Pri hodnotení poškodenia je preto nutné potrebné teploty dopočítať na základe dostupných informácií (vstupné a výstupné teploty a tlaky atď.). To však môže byť zložité z dôvodu kombinácie komplexného prúdenia pracovných látok (najmä spalín) a prenosu tepla.

V práci sú s ohľadom na dostupné dáta navrhnuté postupy a metódy prístupu pre získanie požadovaných informácií pre vyhodnotenie creepovej životnosti kotla. V prvom kroku navrhovaného postupu je vykonaný tepelne-hydraulický výpočet a následne určené teplotné zaťaženia trubiek prehrievača kotla pri spaľovaní zemného plynu s využitím CFD simulácie. V ďalšom kroku je určená povrchová teplota trubiek využitá pre výpočet poškodenia vplyvom teploty so zameraním na odhad creepovej životnosti. Nakoľko životnosť je v značnej miere ovplyvňovaná nedokonalosťami, v závere práce je zhodnotený vplyv oxidovej vrstvy na vnútornej strane trubky, ako aj vrstvy nánosov na strane vonkajšej.

## **Kľúčové slová**

Teplotné zaťaženie, poškodenie vplyvom teploty, creep, životnosť, prehrievač, priemyselný plynový kotol.

## **Abstract**

This thesis is focused on the application of advanced methods for evaluating damage to boiler tubes, specifically temperature related damage. The aim of this work is to develop an improved damage evaluation procedure utilizing capabilities of modern approaches.

This work describes various types of industrial boiler damage. The main focus is on the most exposed and often the most damaged parts of boilers, which are tube bundles (for example, superheaters). Equipment damage is undesirable and often leads to leakages or even to the boiler shutting down. Therefore, it is necessary to find the problem as soon as possible and make the required changes to prevent further damage. The damage types are divided into five categories based on the damage mechanism. Temperature has one of the biggest influences on damage and it may cause short-term or long-term overheating in the tube bundles. This type of damage occurs when the designated temperature is exceeded and results in reduced creep life. It is necessary to know the real surface temperature history of the tube bundle to estimate temperature related damage, however this is often not available. Therefore, it is necessary to calculate those temperatures based on the available data (i.e. inlet and outlet temperatures and pressures). This is real challenge due to the combination of complex flows of the working substances (mainly flue gasses) and heat transfer.

Considering available data, new approach is proposed in order to obtain information required for residual creep life estimation. In the first step, thermal – hydraulic calculation is performed followed by a thermal load estimation of a superheater tube bundle in a natural gas fired boiler, using CFD simulations. In the next step, the surface temperature is evaluated and used to determine the temperature related damage, specifically the creep life estimation. The life expectancy is in some ways influenced by imperfections, and therefore at the end of this thesis the influence of the oxide layer on the inner side of tube and fouling on outer side of tube is described.

## **Key words**

Thermal load, temperature related damage, creep, life expectancy, superheater, industrial natural gas boiler.

## **Bibliografická citácia**

NAĎ, M. *Pokročilé metódy hodnotenia poškodzovania trubkových zväzkov v kotle*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 109 s. Vedúci dizertačnej práce doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

## **Prehlásenie**

Prehlasujem, že som dizertačnú prácu vypracoval samostatne pod vedením školiteľa doc. Ing. Zdeňka Jegly, Ph.D., na základe vlastných poznatkov získaných počas štúdia a po konzultáciách s odborníkmi a všetky literárne a obrazové pramene som správne a úplne citoval.

V Brne dňa 28.01.2019

.....

Ing. Martin Naď

## **Pod'akovanie**

Ďakujem svojmu školiteľovi doc. Ing. Zdeňkovi Jeglovi, Ph.D. za užitočnú metodickú odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej dizertačnej práce. Taktiež by som chcel poďakovať školiteľovi špecialistovi Ing. Pavlovi Lošákovi, Ph.D. a kolegom z Ústavu procesného inženýrství za pomoc a ochotu pri riešení problémov, na ktoré som narazil v priebehu vypracovávania práce. V neposlednej rade by som chcel poďakovať svojej manželke, rodine a blízkym za ich trpezlivosť a hlavne psychickú podporu počas celého štúdia.

## OBSAH

1	Úvod.....	9
1.1	Klasifikácia kotlov.....	9
1.2	Základné súčasti kotlov.....	10
1.3	Prehrievače.....	11
1.4	Ciele práce.....	12
2	Poškodenie kotlov.....	13
2.1	Poškodenie vplyvom teploty.....	14
2.2	Korózne poškodenie.....	15
2.3	Poškodenie vplyvom prúdenia.....	16
2.4	Poškodenie vplyvom prevádzkových podmienok.....	18
2.5	Poškodenie vplyvom výroby.....	19
3	Analýza prehrievaču P2 kotla.....	21
3.1	Základné parametre kotla.....	21
3.2	Prehrievač P2.....	23
3.3	História poškodenia.....	24
3.4	Experimentálne meranie povrchovej teploty.....	25
3.5	Výpočtová analýza.....	25
3.5.1	Teplotné zaťaženie trubiek prehrievača.....	25
3.5.2	Nastavenie výpočtu CFD – simulácia prúdenia v komore.....	26
3.5.3	Výsledky CFD simulácie.....	31
3.6	Rozloženie teploty na povrchu trubiek – 2D analýza.....	33
3.6.1	Výpočtový 2D model.....	34
3.6.2	Okrajové podmienky.....	36
3.6.3	Nastavenie simulácie.....	39
3.6.4	Obmedzenia 2D simulácie.....	40
3.6.5	Výsledky 2D simulácie pre rez X5.....	41
4	Určenie creepovej životnosti a tepelného výkonu trubiek prehrievača.....	47
4.1	Určenie poškodenia krátkodobým a dlhodobým prehriatím.....	47
4.2	Creep.....	47
4.2.1	Spôsoby merania creepu.....	50
4.2.2	Vyhodnocovanie creepu na základe noriem.....	51
4.2.3	Možnosť zanedbania creepu.....	54

4.2.4	Vyhodnotenie creepovej životnosti trubiek prehrievaču.....	55
4.3	Prevenia pred creepom.....	59
5	Rozšírenie o imperfekcie na vonkajšom alebo vnútornom povrchu trubky .....	60
5.1	Oxidová vrstva na vnútornej strane trubky.....	60
5.1.1	Koeficient prestupu tepla na strane pary .....	60
5.1.2	Koeficient prestupu tepla na strane spalín.....	61
5.1.3	Teplotné pole na reze trubkou .....	63
5.1.4	Odhad creepovej životnosti trubky .....	64
5.1.5	Vyhodnotenie .....	65
5.2	Vrstva nánosov na vonkajšej strane trubky .....	65
5.2.1	CFD analýza prúdenia spalín okolo trubiek.....	66
5.2.2	Určenie teplotného poľa pomocou MKP analýzy .....	67
5.2.3	Porovnanie creepovej životnosti .....	68
5.2.4	Porovnanie tepelného výkonu .....	69
5.2.5	Vyhodnotenie .....	70
6	Metodika hodnotenia trubkových zväzkov v kotle.....	71
7	Záver – zhodnotenie výsledkov .....	73
8	Budúca práca.....	75
9	Referencie .....	76
10	Zoznamy.....	80
10.1	Zoznam obrázkov .....	80
10.2	Zoznam tabuliek .....	83
10.3	Zoznam symbolov .....	83
10.4	Zoznam cudzích názvov a skratiek.....	85
10.5	Zoznam chemických prvkov a zlúčenín .....	86
11	Zoznam publikácií.....	87
	Príloha A .....	89
	Príloha B.....	102



# 1 Úvod

Kotol môže byť charakterizovaný ako zariadenie vyrábajúce paru pomocou tepla uvoľneného spaľovaním paliva. Základné prvky každého kotla sa odvíjajú od použitého paliva a jeho veľkosť od požadovaného množstva pary ďalej využitej na turbíne, poprípade v závode, pre ktorý je vyrábaná. Za posledné desaťročia rôznorodosť použitého paliva a veľkosť kotlov neustále narastá, čo robí z kotlov čoraz sofistikovanejšie a komplexnejšie zariadenia. V dnešnej dobe je široké spektrum rôznych druhov kotlov, pričom každý má svoje výhody aj nevýhody. Kotly sa neustále menia a zdokonaľujú, no k najväčším zmenám dochádza napríklad [1]:

- V oblasti zväčšovania veľkosti kotlov
- Používa sa čoraz väčšie spektrum paliva, avšak nižšej kvality
- Narastá potreba spaľovania viacerých palív zároveň s extrémnou efektívnosťou

V súčasnosti sú najviac cenenými vlastnosťami kotlov vysoká účinnosť a spoľahlivosť spolu s optimálnou palivovou a prevádzkovou flexibilitou. Tieto nové požiadavky sa na trhu odzrkadľujú dopytom po kotloch s vyššími štandardmi, vyššími účinnosťami, možnosťou spaľovania rozličných palív a väčšími veľkosťami, avšak s nižším dopadom na životné prostredie.

## 1.1 Klasifikácia kotlov

Kotol je zariadenie, ktoré slúži na ohrev vody alebo výrobu pary. Hlavným produktom je horúca voda alebo obvykle para, a preto sú často nazývané aj ako generátory pary. Dochádza v nich k premene chemickej energie paliva alebo tepelnej energie spalín na tepelnú energiu pary. Hlavné oblasti využitia sú najmä na výrobu procesnej pary a v energetike, pričom práve tá je pre využitie kotlov dominantnou oblasťou. [2]

Najdôležitejším aspektom pri návrhu kotla je palivo, ktoré bude dané zariadenie spaľovať. Veľkosť spaľovacej komory, zariadenie na prípravu a spaľovanie paliva, veľkosť a umiestnenie výhrevných plôch, typ a veľkosť zariadenia na využitie odpadného tepla a zariadenia na čistenie spalín sú všetko súčasťou kotla závislé na palive. Medzi hlavné palivá, spaľované jednak pre priemyselnú potrebu, ale aj pre energetiku, patria hnedé a čierne uhlie, rôzne oleje a plyn. Najväčším rozdielom pri spaľovaní odlišného typu paliva je charakter a zloženie spalín. Zatiaľ čo pri spaľovaní zemného plynu sa v spalinách nenachádza žiadny popol a spaľovaním rôznych olejov len v minimálnej miere, pri spaľovaní tuhého paliva môže spôsobovať značné problémy. Kotly spaľujúce tuhé palivo teda musia mať navyše zariadenie na čistenie spalín a manipuláciu s popolom. Kotly v posledných desaťročiach prechádzajú značnými zmenami, a oproti minulosti sa oveľa viac spaľuje práve spomínané tuhé palivo. Jeho použitie je však ovplyvnené čoraz prísnejšími emisnými limitami. [2, 3]

V normách sa definícia kotlov často líši, avšak vo všeobecnosti je kotol vnímaný ako tlaková nádoba produkujúca paru s tlakom obvykle 2 bary a vyšším [1]. Kotly sú vyrábané v rozličných tvaroch a veľkostiach, pričom spaľujú rôznorodé palivo za účelom výroby pary s rozličnými tlakmi a teplotami. Využívajú sa rozmanité spaľovacie techniky a rozdielne typy obehových systémov. [2]

Hoci rozmanitosť kotlov je značná, možno ich deliť podľa niekoľkých hľadísk, napríklad [2,4]:

- a) Podľa média prúdiaceho v trubkách kotla,
- b) podľa stavu dodávaného média,
- c) podľa účelu využitia,
- d) podľa prevádzkového tlaku,
- e) podľa obehu kvapaliny,
- f) na základe konštrukcie spaľovacej komory.

## 1.2 Základné súčasti kotlov

Hlavným účelom kotla, ako bolo spomenuté, je výroba horúcej vody alebo tlakovej pary pre energetické, vykurovacie alebo technologické účely. Na základe použitia a typu sa preto jednotlivé kotly od seba viac či menej odlišujú svojou zostavou. Na obrázku 1 je možné vidieť kotol s príslušenstvom umiestnený v chemickej prevádzke.



Obr. 1 Vodotrubný kotol umiestnený v chemickej prevádzke.

Kotly však majú niekoľko spoločných kľúčových častí, ktoré sa dajú rozdeliť do troch základných skupín:

- a) Spaľovacie zariadenie s príslušenstvom, ktoré sa skladá najmä z ohniska s horákmi alebo s roštom, kde dochádza k samotnému spaľovaciemu procesu. Na tieto časti nadväzujú pomocné zariadenia, medzi ktoré patrí napríklad zariadenie na prípravu paliva, zariadenie na zachytávanie a odstraňovanie tuhých zvyškov po spaľovaní (v prípade, že sa v spalinách nachádzajú), ohrievače spaľovacieho vzduchu, sacie a vzduchové ventilátory, odlučovače popola a zariadenia na odstránenie škodlivín zo spaľovacieho procesu. [5]
- b) Výmenníková časť, v ktorej sa uskutočňuje samotný ohrev vody, časť kde dochádza k jej odpareniu a časť pre následné prehriatie vzniknutej pary na požadované parametre.
- c) Zariadenia slúžiace na meranie a reguláciu sú neodmysliteľnou súčasťou každého kotla. Ich úlohou je zabezpečenie plynulého, spoľahlivého a bezpečného chodu kotla. Do tejto skupiny je možné zaradiť rôzne termočlánky, ventily, ofukovače, komín a ďalšie. [5]

Táto práca sa zameriava najmä na výmenníkovú časť, konkrétne na prehrievače. Tieto zariadenia sú často vystavené vysokým teplotám, agresívnemu prostrediu a ďalším zaťaženiam po dobu často až desiatky rokov.

### 1.3 Prehrievače

Dôležitou a neodmysliteľnou súčasťou kotlov sú prehrievače, medziprehrievače a ekonomizéry, čo sú časti kotla upravujúce parametre vody a pary. Celý proces úpravy parametrov začína v ekonomizéry, do ktorého je pomocou čerpadla privedená napájacia voda. V ňom sa voda ohrieva na teplotu blízku bodu varu, poprípade sa čiastočne už odparuje. Následne je voda prevedená do výparníku, riešeného často ako membránové steny, v ktorom dochádza k vzniku sýtej pary. Tá je následne dopravovaná buď do bubna, alebo priamo do prehrievačov, kde sa prehrieva na požadovanú teplotu.

Zariadenia výmenníkovej časti bývajú umiestňované v hornej časti spaľovacej komory, prípadne v jednotlivých ťahoch kotla. Pri umiestňovaní týchto zariadení do kotla je nutné zvoliť vhodnú pozíciu a zabezpečiť dostatočný prenos tepla zo spalín do pary, avšak je taktiež potrebné vyhnúť sa miestam, kde by bol materiál trubiek nadmieru zaťažovaný vysokou teplotou. Nutné je taktiež, vzhľadom na možné poškodenie eróznymi účinkami častíc v spalinách, upraviť aj samotnú rýchlosť spalín a určiť rozumné limity. Bežná rýchlosť prúdenia spalín v závislosti na povahe spalín sa odporúča v rozmedzí cca 16–18 m/s. V prípade vysokého obsahu popola v spalinách, napríklad pri spaľovaní uhlia, môže byť táto rýchlosť znížená, napríklad na 15 m/s. Tieto rýchlosti sú však závislé na priemernej teplote spalín pred výmenníkovou sekciou, pri maximálnom výkone kotla s normálnym prebytkom vzduchu. [3]

## 1.4 Ciele práce

Cieľom práce je obecné vyhodnotenie poškodenia trubkového zväzku v kotle vplyvom teploty, s následným odhadom zvyškovej životnosti zariadenia. Nakoľko dáta potrebné pre odhad životnosti takéhoto typu zariadenia v praxi často nie sú merané, pre tento typ vyhodnocovania chýbajú a je nutné ich dopočítať. Zámerom je teda využiť a vhodne skombinovať moderné pokročilé výpočtové metódy pre určenie teplotného zaťaženia zariadenia, odhad jeho zvyškovej životnosti a na základe dosiahnutých výsledkov vykonať návrh obecnej metodiky pre vyhodnocovanie.

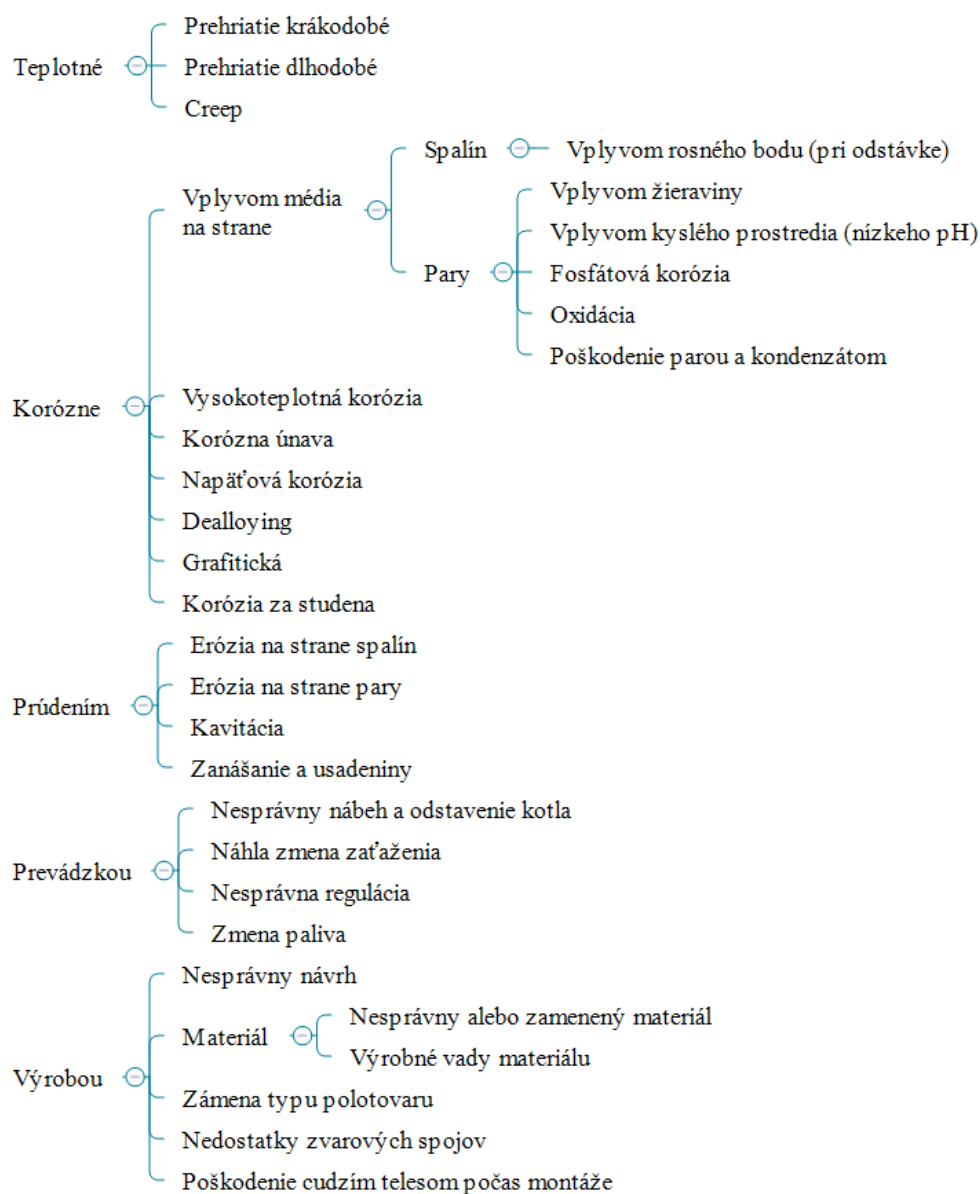
Ciele možno rozdeliť do niekoľkých základných krokov:

- a) *Popis poškodenia vplyvom teploty.* V prvom kroku je nutné rozdeliť typy poškodenia v kotle do niekoľkých skupín z pohľadu mechanizmu poškodzovania, so zameraním na poškodenie vplyvom teploty.
- b) *Určenie teplotného zaťaženia.* Nakoľko bežne dostupné prevádzkové parametre nie sú pre určenie teplotného zaťaženia postačujúce, je nutné vhodnou kombináciou moderných výpočtových softwarov vykonať dôkladnejšiu analýzu zariadenia. Táto kombinácia musí byť vykonaná vzhľadom na presnosť výsledkov ako aj časovú náročnosť jednotlivých výpočtov.
- c) *Určenie zvyškovej creepovej životnosti.* Po získaní teplotného zaťaženia trubkového zväzku je následne cieľom určenie zvyškovej creepovej životnosti na základe súčasných európskych štandardov.
- d) *Kombinácia rôznych typov poškodenia.* V prípade dostatočného množstva vstupných informácií z praxe, predstaviť možnosti rozšírenia prístupu o ďalšie typy poškodenia.
- e) *Návrh obecnej metodiky.* Po overení funkčnosti daného prístupu na reálnom zariadení je hlavným cieľom práce návrh obecnej metodiky pre hodnotenie poškodenia na zväzku trubiek v plášti.

## 2 Poškodenie kotlov

Kotly sú nevyhnutnou súčasťou mnohých priemyselných zariadení, napríklad chemických závodov, tepelných elektrární, zariadení na spracovanie odpadu a ďalších. Vzhľadom na životnosť kotlov, ktorá sa pohybuje v desiatkach rokov (literatúra často uvádza 200 000 hodín), je po istej dobe nutné vykonať celkovú kontrolu jednotlivých častí kotla. Jej úlohou je určenie kritických, resp. nadmerne opotrebovaných miest a určenie prípadných nápravných opatrení.

Každý z typov poškodenia je charakteristický svojim prejavom, závažnosťou a následným vplyvom na životnosť samotného zariadenia. Rozlišuje sa niekoľko mechanizmov poškodzovania, ktoré sú najčastejšie spôsobené prevádzkou kotla, nesprávne použitými materiálmi, vysokými teplotami, koróziou a ďalšími [6]. Hoci sa jednotlivé typy poškodenia často prelínajú, je možné ich rozdeliť do niekoľkých základných skupín z hľadiska mechanizmu poškodzovania vid' obrázok 2. [7–9]



Obr. 2 Rozdelenie poškodenia kotlov.

Trubky s vnútorným tlakom sú kritické komponenty vo vodorúrkových kotloch a parných prehrievačoch. Často sú vystavované vysokým teplotám na strane spalín a vysokým tlakom na strane pary, a preto je typickou príčinou poškodenia práve teplota, ktorá je vyššia ako bola pôvodne navrhovaná. Teplota trubiek môže časom postupne narastať vplyvom rastu oxidových vrstiev na vonkajšom, ale aj vnútornom povrchu trubiek alebo vplyvom značného zníženia rýchlosti toku „chladiaceho média“ vo vnútri trubiek. Takéto podmienky majú vplyv na životnosť trubiek, ktoré sú náchylné na výkyvy teplôt, creepové poškodenie, a taktiež pretrhnutie. Životnosť je taktiež obmedzená vplyvom dlhotrvajúcich vysokých teplôt, napätia, agresívneho prostredia, koróznej degradácie atď. Zmiernenie vplyvov vysokých teplôt a tlakov, a taktiež predĺženie životnosti a odolnosti trubiek je možné vhodnou voľbou materiálu. [6]

V nasledujúcich podkapitolách budú detailnejšie charakterizované jednotlivé typy poškodenia, uvedené na obrázku 2.

## 2.1 Poškodenie vplyvom teploty

Poškodenie vplyvom vysokej teploty je častým problémom, trubkových zväzkov nachádzajúcich sa v kotloch. Teplota môže mať za následok jednak prehriatie materiálu, creep alebo v kombinácii s agresívnymi spalinami aj vysokoteplotnú koróziu. Skúmanie poškodenia vplyvom prehriatia si vyžaduje podrobnú analýzu poškodených komponentov zahŕňajúc analýzy mikroštruktúry a identifikácie iných foriem degradácie spojenej s vystavením vysokej teplote. Poškodenie vplyvom prehriatia materiálu možno vo všeobecnosti rozdeliť na krátkodobé prehriatie a dlhodobé prehrievanie. [9]

*Krátkodobé prehriatie materiálu.* Vyskytuje sa v prípade, že dôjde k značnému nárastu teploty materiálu trubky nad návrhové hodnoty, obvykle na krátku dobu. Krátkodobé prehrievanie je často rozdeľované do troch skupín, na základe teploty v dobe poškodenia, na podkritické (teplota materiálu je pod hranicou spodnej kritickej transformačnej teploty – 727 °C pre uhlíkovú oceľ), stredne kritické (teplota materiálu je medzi hranicami hornej a spodnej kritickej teploty), nadkritické (teplota materiálu je nad hranicou hornej kritickej transformačnej teploty – 843 °C pre uhlíkovú oceľ). Pri zvýšených teplotách sa pevnosť kovu značne znižuje, pričom po prekročení medze klzu dochádza k plastickej deformácii trubky často formou tvorby vypuklín. Je to sprevádzané znižovaním hrúbky steny trubky čo môže viesť k jej náhlemu pretrhnutiu. Pri extrémne vysokých teplotách, nad hornou kritickou teplotou, sa na poškodení trubiek môže vo veľkej miere podieľať aj mechanizmus krátkodobého creepu. Čas do poškodenia sa skraca s narastajúcou teplotou. Nárast teploty pri krátkodobom prehriatí je spojený s nedostatočným tokom chladiaceho média, poprípade nadmerným tepelným zaťažením, s čím je následne spojená aj prevencia vzniku krátkodobého prehriatia. Pri kontrole toku chladiaceho média v trubke je nutnosť kontroly možných nánosov a usadenín aby nedošlo k jej upchatiu. V prípade predikcie nadmerného teplotného zaťažovania je nutnosť kontroly teploty plameňa, ako aj teplotnej distribúcie v spaľovacej komore. [9]

*Dlhodobé prehrievanie materiálu.* K tomuto druhu poškodenia dochádza v prípade prekročenia návrhovej teploty materiálu po dobu dní, týždňov, mesiacov a často aj dlhšie. Dlhodobé prehriatie materiálu je najčastejšou príčinou poškodenia v kotloch, pričom v 90 % prípadov sa jedná o prehrievače. K prasknutiu trubiek, z dôvodu vystavenia materiálu zvýšeným teplotám po dlhšiu dobu, prispieva taktiež creepové poškodenie. Dlhodobé prehriatie sa od krátkodobého

(následok prekročenia medze klzu a medze pevnosti pri zvýšených teplotách), odlišuje najmä tým, že je dôsledkom kombinácie teploty, doby vystavenia zvýšenej teplote, hodnoty napätia a vlastností materiálu trubiek.

Prehriatie je bežným typom poškodenia najmä pre komponenty vyskytujúce sa v oblasti vysokých teplôt, ktorými trubkové zväzky v kotle sú. Degradácia trubiek vplyvom prehriatia narastá s funkciou narastajúcej teploty, napätia a času. Vplyvom neprimeranej kombinácie jednotlivých vplyvov môže pri jednotlivých materiáloch trubiek dôjsť k poškodeniu. Počas návrhu kotlov a tlakových nádob, podľa jednotlivých noriem, je vplyv teploty zohľadnený v hodnote maximálneho dovoleného namáhania, ktoré s narastajúcou teplotou klesá. Správny návrh jednotlivých súčastí zariadenia by mal teda zohľadňovať prehrievanie už pri určovaní životnosti zariadenia. S ohľadom na cenu sa v kotloch ako materiál trubiek, v ktorých sa nachádza voda alebo zmes vody a pary, často volí uhlíková oceľ. Tá však nemá dostatočné vlastnosti pri použití za zvýšených teplôt, a preto sa ako materiál trubiek, v ktorých prúdi para, používajú nízkolegované ocele s malým množstvom chrómu a molybdénu. Tieto dva prvky zvyšujú odolnosť materiálu proti tepelnej degradácii. Chróm sa pridáva v množstve 0,5–2,5 % za účelom spomalenia vysokoteplotnej oxidácie materiálu a pre zvýšenie creepovej odolnosti. Molybdén sa pridáva v množstve 0,25–1,25 % taktiež pre zvýšenie creepovej odolnosti materiálu. [9]

## 2.2 Korózne poškodenie

Korózia v kotloch je zložitou problematikou vzhľadom na ich rozmanitosť druhov a rôznorodosť použitia. Pod samotným pojmom korózia možno chápať deje, ktoré vedú k rozrušovaniu materiálu vplyvom chemických a elektrochemických dejov. Jedná sa teda o poškodzovanie materiálu spôsobené chemickým alebo fyzikálnochemickým pôsobením prostredia. Pri určovaní korózie energetických zariadení sa berú do úvahy tri oblasti [10]:

- Vlastnosti kovových materiálov (napr. zloženie, čistota, štruktúra, stav povrchu)
- Vlastnosti korózneho prostredia (napr. zloženie, chemická povaha)
- Ostatné faktory (napr. teplota, tlak, mechanické namáhanie)

Intenzita a druh korózneho poškodenia sú určené zložením a vlastnosťami konštrukčných materiálov, a tiež chemickým zložením korózneho prostredia. Vo všeobecnosti však možno koróziu v kotloch rozdeliť do dvoch základných skupín na koróziu na strane spalín a koróziu na strane pary/vody.

*Korózia na strane spalín.* Jedná sa o koróziu vznikajúcu na vonkajších výhrevných plochách vplyvom pôsobenia spalín. Na základe teploty možno túto koróziu rozdeliť na nízkoteplotnú a vysokoteplotnú (nad 650 °C). Pri spaľovaní tuhého paliva dochádza k vzniku korózie vplyvom vysokého obsahu síry účinkom  $H_2SO_4$  v spalínach už pri teplotách o 20–40 °C nižších ako je teplota rosného bodu  $H_2SO_4$ . Pri spaľovaní olejov je problém jednak s obsahom sír, ale aj vanádu, pričom sa tu vyskytuje jednak nízkoteplotná, ale aj vysokoteplotná korózia. Vanád pôsobí ako prenášač kyslíka a porušuje ochrannú vrstvu ocele. Vznik korózie je podmienený teplotou mäknutia popolčeka a jej rýchlosť sa zvyšuje s prebytkom spaľovacieho vzduchu. Obmedzovanie tvorby  $SO_3$ , a tým vzniku korózie, je možné minimalizáciou prebytku vzduchu,

poprípade rozprašovaním amoniaku do spalín pri teplotách 300–350 °C. Ďalším spôsobom je zvyšovanie bodu mäknutia popolčeka nad teplotu steny kotla. [10]

*Korózia na strane pary/vody.* Medzi základné typy korózie na strane vody patrí elektrochemická korózia (vo vodnom prostredí) a korózia chemická (v parnom prostredí a v prostredí s teplotou vyššou ako je teplota rosného bodu). Zásadný vplyv na bezporuchovú prevádzku zariadenia má jednak kvalitná ochranná vrstva materiálu, a taktiež kvalita a zloženie kotlovej vody. Nutné je taktiež zabezpečiť dobrý obeh vody, aby nedošlo k prehriatiu steny kotla o viac ako 50 °C, čo môže viesť ku korózii vplyvom rozkladu pary. Pre zachovanie ochrannej vrstvy je potrebné dodržiavanie pH, odstránenie alebo zabezpečenie povoleného obsahu látok vo vode (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, solí, PO<sub>4</sub>, NaOH a SiO<sub>2</sub>). Z látok rozpustených vo vode predstavuje zvýšené nebezpečenstvo najmä NaOH, ktorý rozpúšťa ochrannú vrstvu materiálu za vzniku železitanov a železnatanov. Tieto soli vytvárajú porézne nánosy najmä na tepelne namáhaných miestach, pod ktorými sa následne stena prehrieva a vzniká tu teplovodná korózia pod nánosmi, pre ktorú je kritická teplota v rozmedzí 400–420 °C. Vplyv na porušenie ochrannej vrstvy má taktiež prerušovanie chodu kotla. K jej poškodeniu dochádza pri striedaní teploty steny (prudkou zmenou zaťaženia, častým odstavovaním a nábehom), mechanicky vplyvom rôznej rozťažnosti železa a oxidov a tiež pri nedostatočnom odplynení vody. Počas odstavok trpia koróziou najviac najmä prehrievače, pretože sa len veľmi ťažko vysušujú. V miestach kde ostáva voda, poprípade kde po vychladnutí prehrievača skondenzuje, veľmi rýchlo vzniká bodová korózia s kyslíkovou depolarizáciou. Ako vhodné sa osvedčilo počas odstavok použitie konzervácie, alebo zvýšenie odolnosti už voľbou materiálu (legovaná a austenitická oceľ) pri návrhu zariadenia. Počas chodu sú prehrievače kotla chladené parou, ktorej rýchlosť je približne 15 m/s a vyššia. K problémom dochádza pokiaľ sa táto rýchlosť zníži pod hodnotu 4 m/s, tzv. kritickú rýchlosť, kedy trubky začínajú oxidovať a dochádza tiež k rozkladu pary. [10]

Pre vytvorenie dobrej ochrannej vrstvy materiálu je vhodné dokonalé vyčistenie a pasivácia vnútorného povrchu kotla, a taktiež celého vodného a parného okruhu ešte pred uvedením zariadenia do prevádzky a dobrá úprava napájacej vody. Ďalším zo spôsobov ako zabrániť vzniku korózie, poprípade zmierniť jej vplyv, je použitie tzv. inhibítorov korózie či už fyzikálnych alebo chemických. [10]

### **2.3 Poškodenie vplyvom prúdenia**

Prúdenie média, či už sa jedná o stranu spalín ,alebo strany vody/pary, môže za istých okolností spôsobovať rozličné typy poškodenia. Poškodenie vplyvom prúdenia môže spôsobovať napríklad zanášanie, usadeniny, eróziu, kavitáciu, ale aj vibrácie.

#### **a) Zanášanie a usadeniny.**

Vplyvom prúdenia pracovnej látky v kotle (spaliny, voda/para) môže dôjsť k zanášaniu alebo vzniku usadenín, čo je nežiaduce a môže to viesť k poruche, poprípade k vyvolaniu iného typu poškodenia. Za usadeniny a nánosy sa považujú častice, ktorých pôvod je iný ako miesto na ktorom sa usádzajú, nemožno sem preto radiť častice, ktoré sa v danom mieste vytvorili vplyvom korózie. V kotle môžu byť vytvorené zo spalín, minerálmi obsiahnutými vo vode, spracovávanými chemikáliami, produktami korózie, ktoré vznikli na inom mieste ako je



dotknutá oblasť, alebo inými znečisťujúcimi látkami. Aj relatívne malé usadeniny môžu spôsobiť značný nárast teploty steny trubky. S nárastom teploty však narastá aj tendencia k vzniku parnej vrstvy, ktorá následne znižuje prestup tepla a môže zapríčiniť prehriatie a prasknutie trubky. Zanášanie možno rozdeliť na zanášanie na strane vody a zanášanie na strane spalín. [1, 9]

*Zanášanie na strane vody.* Minimalizovanie rizika zanášania na strane vody je možné jej správnou úpravou. Vplyv na zanášanie má taktiež správna orientácia trubiek. Pre elimináciu zanášania a zaručenia správnej funkcie všetkých súčastí je odporúčané prevádzkovať zariadenie na zaťaženia návrhové, poprípade mierne nižšie. [9]

*Zanášanie na strane spalín.* Vysoký obsah popolčeka a jeho chemické zloženie môže mať za následok rýchlu tvorbu nánosov na vonkajšej výhrevnej ploche kotla a ovplyvňovať tým jeho prevádzku. Tvorba nánosov je pri spaľovaní vo vrstve (v roštových ohniskách), rýchlejšia v porovnaní s tvorbou pri spaľovaní v lete (v práškových ohniskách). Vznik nánosov je spojený s prekročením určitého obsahu chloridov alkalických kovov, prchavej síry a fosforu v popolčeku. Nánosy možno rozdeliť na dva druhy podľa miesta kde vznikajú: a) na nánosy v ohnisku a na prehrievači pary pri vyšších teplotách – tzv. nánosy spekané (slagging), b) a na nánosy na ostatných plochách kotla – tzv. nánosy stmelené (fouling). Proces vzniku spekaných nánosov je vlastne tvorba tavných usadenín na stenách spaľovacej komory, poprípade na iných povrchoch, ktoré sú vystavené sálavému teplu. Najčastejšie sa vyskytuje v spaľovacej komore na deliacich stenách. Vznikajú najmä počas spaľovania tuhého, poprípade kvapalného paliva, kde roztavené časti popolčeku v spalínach tvrdnú pri kontakte s trúbkami, ktorých teplota je nižšia a tvorí sa tak voľne pohyblivá vrstva. Vnútna časť tejto vrstvy sa z času na čas spojí s povrchom zariadenia a narastá na veľkosti až dosiahne kritickú veľkosť a následne vplyvom vlastnej hmotnosti odpadne, čo môže vážne poškodiť zariadenie (napríklad podlahu). Usadzovanie je ovplyvňované lokálnym tepelným vstupom, turbulenciou tekutiny a jej zložením v blízkosti trúbok. Mierne odlišným procesom je však vznik stmelených nánosov, pri ktorom dochádza k tvorbe previazaných nánosov či už spekaním, alebo cementovaním, hlavne v oblasti trúbkových zväzkov, ako sú prehrievače a ohrievače, vplyvom prúdenia tepla. [1, 9, 10]

#### b) Erózia

Pri erózii dochádza k rozrušovaniu materiálu fyzikálnymi vplyvmi. K poškodeniu materiálu môže dôjsť pôsobením pevných častíc, kvapalných častíc alebo pevných častíc v kvapaline. Pri erózii dochádza k poškodzovaniu oddel'ovaním materiálu z povrchu kovu pôsobením častíc obsiahnutých v prúde (napr. vody/pary alebo spalín). Eróziu možno rozdeliť do trochu skupín, a to na eróziu na strane spalín, eróziu na strane vody a na eróziu koróziu.

*Erózia na strane spalín* sa môže objaviť v zariadeniach vystaveným vysokým rýchlostiam a turbulentnému prúdeniu, čo je často spojené s únosom pevných častíc. *Erózia na strane vody* je len ojedinelá, keďže bežné rýchlosti kvapaliny sú príliš nízke (v ekonomizéroch 0,5–1,5 m/s a vo vodnom okruhu kotla 0,5–3,5 m/s), aby poškodili materiál bežne používaný v kotloch. V prehrievačoch je však rýchlosť výrazne vyššia (10–25 m/s) a vzhľadom na možný obsah drobných častíc unášaných v pare je tu isté riziko poškodenia vplyvom erózie, tá však samotná nie je až taká výrazná. Takmer všetky povrchy, ktoré prichádzajú do kontaktu s parou/vodou

majú istú mieru korózie, vrátane tvorby oxidovej vrstvy. Preto má erózia na strane vody väčšinou charakter *eróznej korózie*. Je to jav, pri ktorom dochádza k poškodeniu vplyvom pôsobenia oboch mechanizmov (erózie a korózie zároveň), a tým k urýchleniu úbytku materiálu. Vplyvom korózie vzniknú produkty, ktoré sú následne eróziou odstránené. Umožnia tak vznik nových produktov korózie, ktoré môžu byť opätovne odstránené a proces sa môže opakovať. Minimalizácii alebo úplnému zabráneniu vplyvu erózie možno dosiahnuť elimináciou drobných častíc vyvolávajúcich eróziu, znížením rýchlosti alebo turbulencie prúdiacej látky, ochrannými povlakmi alebo použitím zliatin s vyššou odolnosťou voči eróznemu poškodeniu. [9]

#### c) Kavitácia

Pri kavitácii dochádza k vzniku a následne k náhlemu zániku parnej alebo plynnej bubliny v kvapaline. K vzniku kavitácie dochádza v miestach s nízkym tlakom, kde dochádza k varu vody a tým k vzniku bublín. Pri ich zániku uvoľňujú relatívne veľkú energiu, ktorá vytvára tryskové mikroprúdy (s rýchlosťou približne 100–500 m/s) následne pôsobiace na povrch kovu. Tieto mikroprúdy väčšinou narušujú ochrannú oxidovú vrstvu materiálu, avšak pri vyššej intenzite môžu poškodiť aj samotný kov pod ňou. Celý proces vzniku a zániku bubliny môže trvať rádovo v milisekundách a hoci kolaps jednej bubliny spôsobuje len malé poškodenie, vplyvom tisícok cyklov už poškodenie naberaá na závažnosti. V prípade vzniku nepravidelností na povrchu, napríklad vplyvom kavitácie, jej ďalšie pôsobenie sa koncentruje práve v týchto miestach a spôsobuje hĺbkové poškodenie. Často sa na takto poškodenom povrchu, bez ochrannej oxidovej vrstvy, objavuje aj korózia, ktorá spoločne s kavitáciou prispieva k značnému úbytku materiálu. Kavítácia v kotle najčastejšie poškodzuje odstredivé čerpadlá v okruhu vody/pary. Zabránenie vzniku, alebo zmiernenie vplyvu kavitácie je možné úpravou prevádzkových podmienok (redukcia turbulencie, vibrácií a prudkých zmien tlaku), vhodným dizajnom zariadenia, legovaním, povlakovaním a vhodnou úpravou povrchu (redukcia miest, kde dochádza k tvorbe bublín a absorpcia energie vznikajúcej pri zániku bubliny). [9]

#### d) Vibrácie

Na zvyšovanie efektivity prestupu tepla je kladený čoraz väčší dôraz, avšak má to za následok nárast silovej odozvy tekutiny na geometriu trubiek. Tá môže byť vyvolaná jednak prúdením tekutiny a tiež vírovým buđením v oblasti za trubkou. Zvýšená silová odozva môže byť príčinou vzniku vibrácií, zvýšeného napätia na trubkách, alebo aj vysokocyklickej únavy v mieste koncentrátoru napätia, čo môže viesť k poškodeniu zariadenia. Práve vibrácie, spôsobené interakciou prúdiacej tekutiny a zväzkom trubiek, sa pri rade procesných zariadení bežne vyskytujú. Z dôvodu komplexnosti problematiky však v súčasnosti neexistuje zaručený spôsob ako sa tomuto javu vyhnúť, avšak prevenciou môže byť vhodná voľba prevádzkových podmienok (zabránenie akustických emisií) ako aj správne navrhnutie geometrie a uloženia trubiek (správny návrh nepodporenej dĺžky trubiek, odstránenie trubiek z miest, kde dochádza k otáčaniu toku tekutiny). [11]

## 2.4 Poškodenie vplyvom prevádzkových podmienok

Keďže životnosť kotlov možno počítat' v desiatkach rokov, často dochádza k zmene prevádzkových podmienok, čo má na životnosť zásadný vplyv. V priebehu životnosti kotla

často dochádza k zníženiu kvality alebo k úplnej zmene spaľovaného paliva oproti tomu, na ktoré bol kotol pôvodne navrhovaný. Ďalšími kritickými prevádzkovými úkonmi sú nesprávny nábeh a odstavenie kotla, nesprávna regulácia a náhle zmeny zaťaženia.

Pri nábehu kotla môže byť problém s príliš rýchlym ohrevom alebo vstupnou rýchlosťou paliva, pri odstávke zas nastáva opačný problém s príliš rýchlym ochladením. To môže spôsobiť nerovnomerné ohrievanie, respektíve chladenie zariadenia, čo má za následok tepelné napätie, ktoré môže spôsobovať praskanie trubiek v kotle. [7]

Ďalším z faktorov vplyvujúcich na životnosť je samotná regulácia kotla. Problém môže nastať už pri nastavení zariadenia, napríklad pri nesprávnom nastavení horáku. To môže zapríčiniť odtrhnutie plameňa alebo jeho nesprávny tvar, čo môže vyvolať miestne prehriatie pary v membránových stenách poprípade poškodenie trubiek vplyvom lokálneho prehriatia. Kritickou môže byť taktiež prudká zmena zaťaženia, napríklad v podobe náhle zmeny tlaku, čo môže spomaliť alebo až zastaviť tok vody v membránových stenách alebo v iných tlakových častiach kotla. [7]

## **2.5 Poškodenie vplyvom výroby**

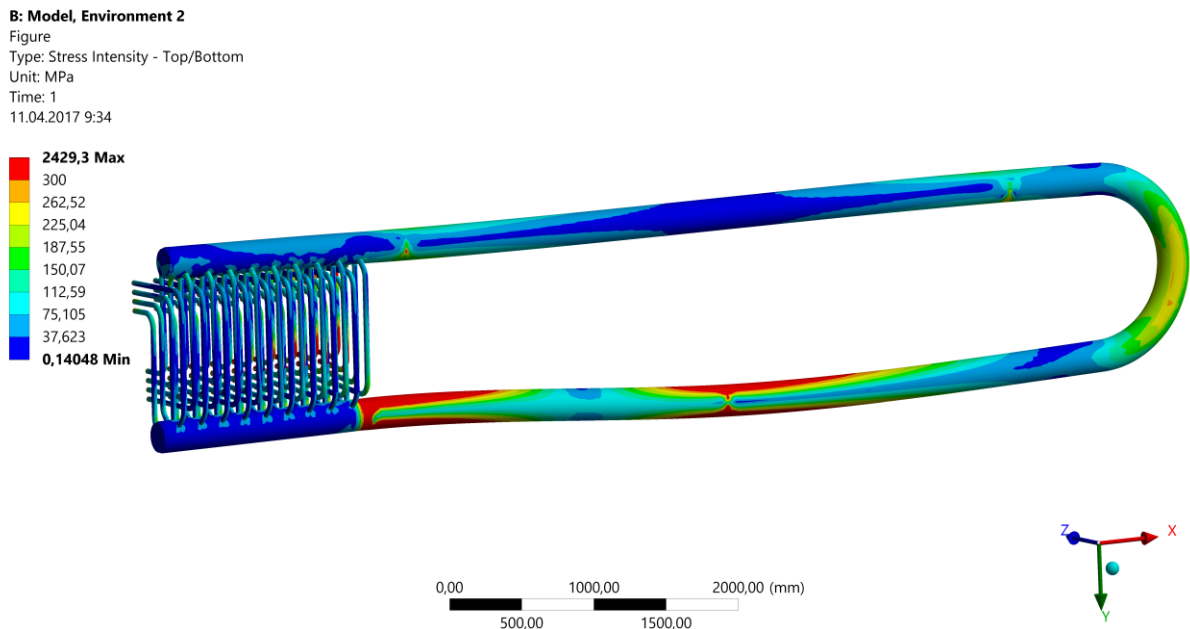
Vplyvy konštrukcie a výroby môžu spôsobiť vážne problémy pri prevádzke kotla. Či sa už jedná o chybu výrobného procesu, chybu návrhovú alebo chybu z nepozornosti a nedbalosti je nutné ju minimalizovať pravidelnou viac násobnou kontrolou. Hlavný vplyv na poškodenie vplyvom výroby má najmä nesprávny návrh zariadenia, voľba a kvalita materiálu, kvalita zvarov, celková precíznosť a kvalita vyhotovenia.

Pri výrobe kotla s požadovanými parametrami zohráva dôležitú úlohu voľba materiálu s čím sú spojené aj jeho nedostatky. Problémom najčastejšie býva použitie nelegovanej ocele v miestach, kde je požadovaná legovaná oceľ. Zámena ocele má často ekonomické dôvody, keďže uhlíková oceľ je častokrát niekoľkonásobne lacnejšia ako oceľ legovaná. Tento problém sa najčastejšie vyskytuje na zariadeniach, kde dochádza k prenosu tepla do pary ako napríklad v trubkách ohrievačov a prehrievačov. Primárnym problémom, ktorý sa môže pri zamenenom materiáli vyskytnúť, je teplotná degradácia, ktorá sa však môže vyskytnúť jednak pri uhlíkových, ale aj nízkolegovaných oceliach, a preto zaručene nedokazujú zámenu materiálu. Samotná zámena materiálu je ťažko odhaliteľná a je nutné vykonať materiálové rozbory pre odhalenie typu použitej ocele. Preto by na prvom mieste mala byť prevencia, ktorú má na starosti výrobca, konštruktér a v neposlednej rade aj samotný zákazník. [9]

Poškodenia zapríčinené výrobnými vadami polotovarov sú relatívne zriedkavé. Chyby pri výrobe sa najčastejšie nachádzajú na trubkách, ktoré bývajú ohýbané a inak upravované. Poškodenie tohto druhu má za následok menej ako 1 % všetkých poškodení. Toto poškodenie je zapríčinené nedodržiavaním výrobných postupov a kvalitatívnych požiadaviek. Vo všeobecnosti po dokončení celého zariadenia nie je ekonomicky rentabilné prípadné typy poškodenia odhaľovať. Ak sú v zariadení prítomné a tieto nedostatky sú závažné, ich existencia sa prejaví poškodením daného komponentu. V prípade výskytu tohto typu poškodenia sa preto odporúča preveriť aj ostatné zariadenia rovnakého typu, hlavne pomocou nedeštruktívnych testov. [9]

Keďže veľké kotly môžu obsahovať aj 50000 zvarových spojov, je zvýšená pravdepodobnosť nedokonalosti niektorého z nich. Napriek tomu má poškodenie zariadenia vplyvom zlyhania zvarového spoja za následok iba 2,5 % celkových poškodení kotlov. Väčšina z poškodených zvarov sa však nachádza v oblasti prehrievačov a ohrievačov, ktoré sú vystavené relatívne tvrdým okolitým podmienkam. Ideálny zvar by nemal obsahovať póry, nekovové častice, mal by dokonale nadväzovať na spájané plochy a nemalo by sa v ňom nachádzať zvyškové napätie po zváraní. Žiadny zo zvarov však nie je dokonalý a tak k tomu pristupuje aj väčšina noriem, ktorá najmä predpisuje povolené množstvo nedokonalostí pre konkrétne použitie. Dostatočným teda môže byť zvar aj s miernymi nedokonalosťami, ktoré však nemajú zásadný vplyv na funkčnosť a životnosť celého zariadenia. [9]

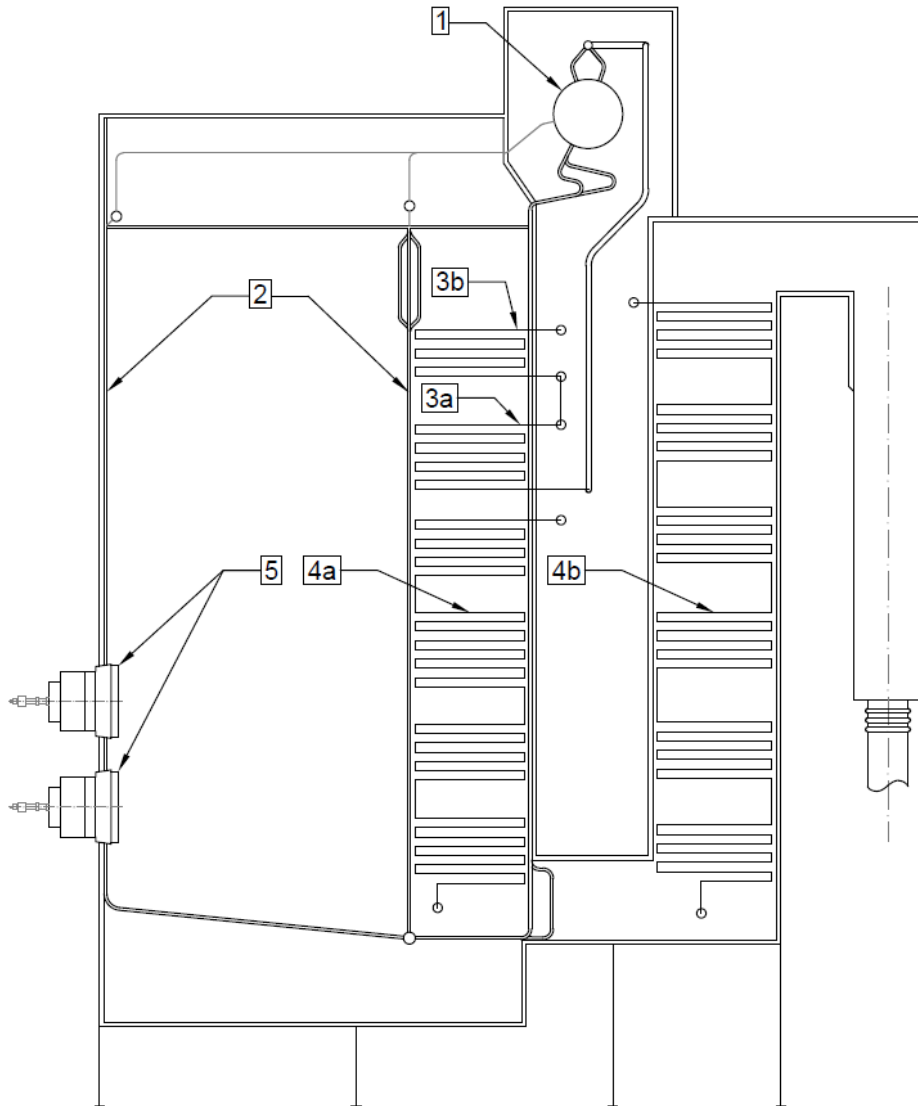
Aj napriek tomu, že zariadenia akými sú kotly, podliehajú prísny normám a limitom, občas dôjde k ich poškodeniu aj vplyvom výroby. Ako bolo popísané napríklad v [12], poškodenie spôsobené nesprávnym návrhom nemusí byť na prvý pohľad vždy zrejmé. V skúmanom zariadení došlo k úniku média v mieste zvarových spojov prevádzacieho potrubia medzi prehrievačmi a na samotných trubkách prehrievača. Rovnaké poškodenie sa tu objavilo už viackrát, a preto bola nutná rozsiahlejšia analýza. Bol vykonaný metalografický rozbor, ale aj celková MKP analýza pre overenie prevádzkových podmienok. Vizualná kontrola a materiálový rozbor odhalili mierne korózne, erózne poškodenie a drobné trhlinky, avšak nič, čo by bolo príčinou úniku média. Na základe MKP analýzy (viď obrázok 3) bolo za hlavnú príčinu určené nesprávne použitie zavesenia, pričom nevyhovovala jednak jeho voľba, ale aj umiestnenie.



Obr. 3 Intenzita napätia na "U" trubke medzi prehrievačmi počas analýzy prasklín.

### 3 Analýza prehrievaču P2 kotla

Analýza jednotlivých procesov vplývajúcich na životnosť je vykonaná na kotle umiestneného v chemickom závode. Tento kotol, s parným výkonom 60 t/hod, bol od svojho spustenia prevádzkovaný rôznymi typmi paliva aj mimo navrhovaných typov. Primárne bol však navrhnutý na spaľovanie ťažkých vykurovacích olejov/TTO (ťažké topné oleje), zemného plynu, a dechtovej zmesi/DTS (dehtová topní smes). Táto práca je zameraná na spaľovanie zemného plynu, ktorý bol v dobe začatia vypracovávania práce v kotle spaľovaný, a teda boli k dispozícii aj aktuálne namerané dáta.



Obr. 4 Zjednodušená schéma analyzovaného kotla (1 – kotlové teleso/bubon, 2 – výparník/membránové steny, 3a – prehrievač P1, 3b – prehrievač P2, 4a – ekonomizér E1, 4b – ekonomizér E2, 5 – horáky). [13]

#### 3.1 Základné parametre kotla

Predmetný kotol je projektovaný ako samonosný, trojt'ahový kotol s prirodzeným obehom. Ako bolo spomenuté vyššie, navrhnutý je na spaľovanie TTO, zemného plynu a DTS. Steny spaľovacej komory (prvý ťah kotla) a bočné steny druhého ťahu sú tvorené membránovou

stenou, ktorá plní funkciu výparníku. Zadná stena druhého ťahu je tvorená zavodňovacími trúbkami, má teda taktiež charakter membránovej steny. V druhom ťahu sú taktiež umiestnené prehrievače P1 a P2, ako aj ohrievač vody/ekonomizér E1. Každý z nich je ležatý, pričom sú zavesené nad sebou na závesných trúbkách. Druhý ohrievač vody/ekonomizér E2 je umiestnený v treťom ťahu kotla, taktiež ako ležatý a podoprený.

Keďže hlavným účelom kotla je výroba pary s požadovanými parametrami, musí dochádzať k jej regulácii. Tá je uskutočňovaná pomocou vstrekovania napájacej vody vo vstrekovacích regulátoroch, ktoré sú umiestnené v spojovacom potrubí medzi prehrievačmi P1 a P2. Voda do vstrekov pre reguláciu je privádzaná samostatným potrubím do vstrekových batérií a následne je rozvádzaná do vstrekových regulátorov V1 a V2.

V dnešnej dobe sa kladie dôraz na znižovanie emisií (hlavne  $\text{NO}_x$ ), čo je v prípade skúmaného kotla riešené pomocou použitia nízko emisných horákov a regulácie spalín. Recirkulované spaliny sú pomocou recirkulačných ventilátorov potrubím privádzané pred horáky. Kotel je osadený štyrmi kusmi nízkoemisných horákov s recirkuláciou spalín. Sú primárne určené na spaľovanie TTO, zemného plynu a DTS pričom sú umiestnené na prednej stene spaľovacej komory v dvoch radoch nad sebou po dvoch.

Medzi ďalšie kľúčové časti patrí kotlové teleso, ktoré je tvorené valcovou časťou s priemerom 1800 mm a dĺžkou 8000 mm zakončenou polguľovými dnami. V kotlovom bubne je vystavaný cyklón a dierkovaný odlučovací plech na zabezpečenie potrebnej čistoty sýtej pary.

Ako bolo spomenuté, výparný systém kotla je tvorený membránovými stenami ohniska a druhého ťahu, pričom zadná stena druhého ťahu je tvorená zavodňovacími trúbkami. Celý tento systém je tvorený z trúbok s priemerom 57 mm navzájom zvarovaných do celokovových plynotesných stien. K tejto časti zariadenia patria taktiež vonkajšie zavodňovacie trúbky, rozdeľovacie a zberné komory výparníku, prepojovacie trúbky zavodňovacieho systému a taktiež prevádzacie trúbky do kotlového bubnu. Všetky hlavné tlakové časti výparníku sú vyrobené z valcovaných trúbok materiálu triedy 12 podľa ČSN.

Dôležitou súčasťou je ohrievač vody alebo ekonomizér, ktorý je v skúmanom kotle dvojestupňový, 12-dielny, ležatý a radený v protiprúde. Štyri diely ekonomizéru sú umiestnené v druhom ťahu kotla za prehrievačom P1. Zvyšných osem dielov je umiestnených mimo kotla v plechovom kanále (tretí ťah). Medzi základné návrhové pracovné parametre ekonomizéru patria:

- Teplota na vstupe: 145 °C
- Teplota na výstupe: 250 °C
- Tlak na vstupe: 4,25 MPa

Medzi dôležité údaje pri analýze poškodenia zariadenia bezpochyby patrí doba prevádzky, ktorá je v prípade skúmaného kotla 62000 h (v dobe získania nameraných dát, ktoré sú následne využívané pri výpočtoch). Parametre kotla možno rozdeliť do dvoch základných skupín

- a) Návrhové parametre kotla:
  - Parný výkon kotla: 60 t/h
  - Teplota prehriatej pary: 375°C (+23 °C, -10 °C)
  - Tlak prehriatej pary: 3,82 MPa

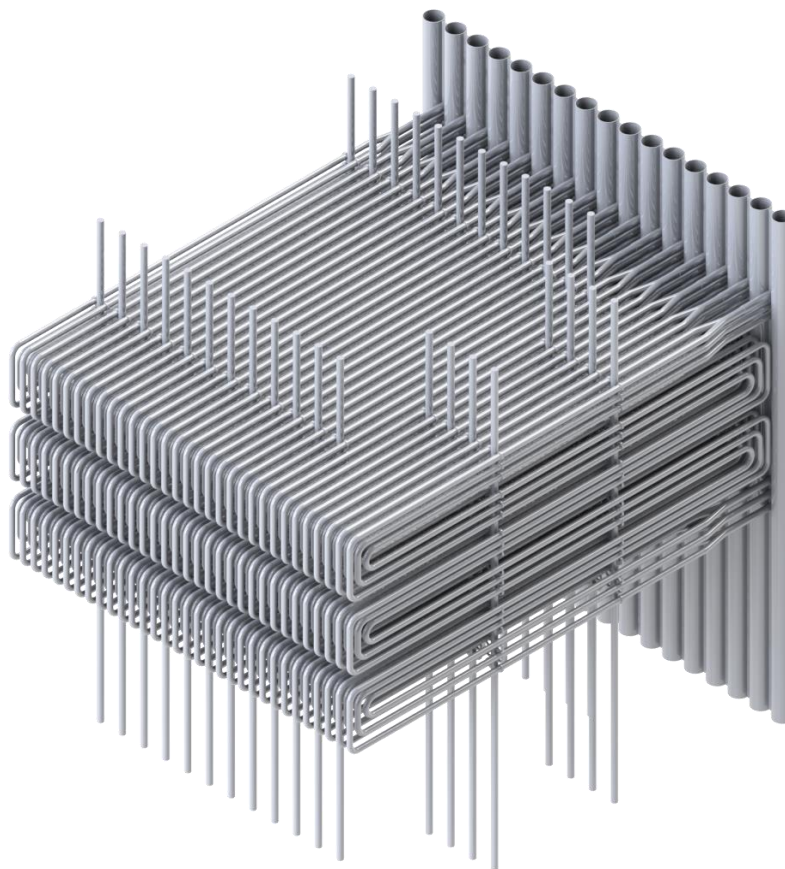
- Teplota napájacej vody: 145 °C
- b) Reálne parametre pri spaľovaní zemného plynu (v závislosti na aktuálnom kolísaní výkonu)
  - Parný výkon kotla: 35–95 t/h
  - Teplota prehriatej pary: 340–385 °C
  - Tlak prehriatej pary: 3,45–3,65 MPa

Reálne zloženie vlhkých spalín (obj. %) z výpočtu spaľovania zemného plynu:  $N_2 = 67,1 \%$ ,  $Ar = 0,8 \%$ ,  $CO_2 = 8,6 \%$ ,  $O_2 = 1,0 \%$ ,  $H_2O = 22,5 \%$ .

### 3.2 Prehrievač P2

Prehrievanie pary je realizované dvomi ležatými prehrievačmi tvorenými zväzkom trubiek v druhom ťahu kotla. Jedná sa o prehrievače P1 a P2 (viď obrázok 4 pozície 3a a 3b), pričom oba sú zaradené v proti prúde. Sú umiestnené nad sebou a uchytané na závesných trubkách ohrievaču vody (na strope tvorenom membránovými stenami).

Práca je detailnejšie zameraná na prehrievač P2, ktorý je v smere toku spalín umiestnený ako prvá výhrevná plocha v druhom ťahu vo výške 19,31 m, je teda teplotne zaťažovaný viac. Na obrázku 5 je daný prehrievač znázornený spolu s časťou membránovej steny a časťou závesov, pričom boli vynechané ďalšie dôležité súčasti ako sú rozdeľovacie komory, podpery a vedenia, ktoré pre účely výpočtu nie sú podstatné.



Obr. 5 3D model časti (32 z 66 rád) analyzovaného prehrievaču P2. [13]

Prehrievač vstupuje z kolektora do priestoru spalín cez membránovú stenu v počte 34 trubiek v 3 radách nad sebou (celkom teda 102 trubiek) s priemerom 38×5,6 mm. Po 495,5 mm dochádza k rozvetveniu každej trubky (okrem krajných trubiek blízko membránových stien, kde dochádza len k odklonu od membránovej steny) pomocou „Y“ trubky. Vzniká tak 66 trubiek v 3 radách nad sebou (celkom 198 trubiek) s priemerom 38×5,6 mm (krajné trubky pri membránovej stene s priemerom 31,8×4,5 mm). Trubky sú následne v druhom ťahu 5-krát otočené, čo zabezpečí šesť chodov pary vo vnútri trubiek. Na konci sú trubky opäť zjednotené pomocou „Y“ trubky a vedené do membránovej steny a následne do kolektora.

Medzi základné pracovné parametre prehrievaču patrí:

- Teplota pary za prehrievačom P1: 327 °C
- Teplota pary za vstrekom: 277 °C
- Teplota pary za prehrievačom P2: 375 °C
- Tlak na vstupe: 3,82 MPa

### 3.3 História poškodenia

V kotle sa počas prevádzky vyskytlo niekoľko problémov spôsobených poškodením zariadenia, ktoré boli postupne riešené. Všeobecne ich možno rozdeliť do dvoch základných skupín na poškodenie spaľovacej komory a poškodenie samotných prehrievačov.

- Spaľovacia komora
  - Silné usadeniny v strednej časti spaľovacej komory
- Prehrievače
  - Prasknuté trubky vo vstupnej časti pri membránovej stene
  - Nesprávne použitý materiál trubiek (namiesto materiálu 15020 bol použitý materiál 12022.1)
  - Problém so zanášaním trubiek
  - Nutnosť odstavenia „Y“ hadov 1 a 3 (na obrázku 5 počítané zo zadnej časti)



Obr. 6 Zoxidované trubky prehrievača P2, časti membránovej steny a závesov. [13]



### 3.4 Experimentálne meranie povrchovej teploty

V dnešnej dobe sa požiadavky na kotly navýšili jednak z pohľadu flexibility prevádzky (častý nábeh a odstávka zariadenia), tak aj z pohľadu špičkových výkonov. To zvyšuje napätie na trubkách, negatívne ovplyvňuje tepelný výkon a prináša nutnosť nepretržitého monitorovania. Okrem toho monitorovanie teploty materiálu v kotloch je dôležité pre zachovanie zvýšenej spoľahlivosti, funkčnosti a výkonu. Jedným z prístupov je experimentálne meranie povrchovej teploty pomocou termočlánkov, ktoré sú navarené na stenu [14]. Tieto termočlánky je možné v závislosti od typu použiť na meranie povrchovej teploty rôznych častí kotla (membránových stien, trubiiek prehrievača, trubiiek ohrievača atď.). Výhodou je nepretržitý monitoring teploty trubky v kotle, čo môže napomôcť pri kontrole, monitoringu a identifikácii problematických oblastí. Využitie je napríklad pri:

- Určovaní bezpečnosti tlakovej časti kotla (úniky, praskliny, zanesenie atď.)
- Detekcii poklesu prenosu tepla z dôvodu zanášania a vzniku usadenín pomocou teplotných rozdielov a gradientov meraných na povrchu trubky (vonkajšom a vnútornom), ako aj na vstupe a výstupe.

Montáž termočlánkov je však často časovo aj finančne náročná a vyžaduje si zásah do zariadenia. Z tohto dôvodu je v tejto práci pristúpené k danej problematike pomocou novodobých výpočtových metód.

### 3.5 Výpočtová analýza

Pre určenie teplotného poľa na trubkách prehrievača bola využitá kombinácia analytických výpočtov vytvorených v jazyku Python spolu s výpočtami pomocou špecializovaných programov HTRI a ANSYS Fluent 17.1 [15].

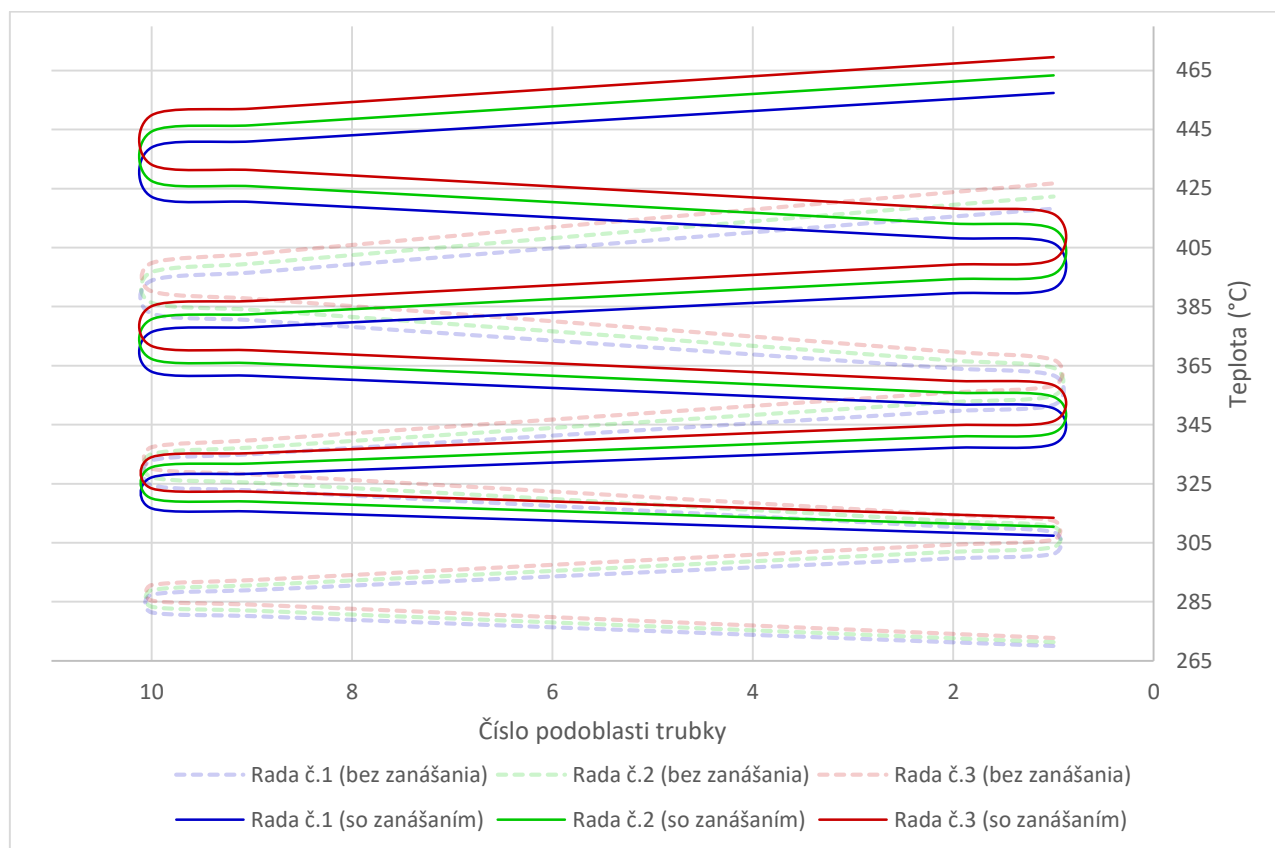
Vykonané výpočty vychádzajú z určitých predpokladov, formulovaných na základe predchádzajúcej analýzy, stavu a prevádzky prehrievača, v dobe vykonávania výpočtu. Jedným z nich bol predpoklad optimálnej frekvencie ofukovania výhrevných plôch a teda zanedbanie zanášania. Aj napriek tomu, že v minulosti boli pri spaľovaní rôznorodých produktov so zanášaním problémy, pri uvažovaní spaľovania zemného plynu je zanášanie aj bez ofukovania minimálne.

#### 3.5.1 Teplotné zaťaženie trubiiek prehrievača

Pre porovnanie návrhových a experimentálnych parametrov bol vykonaný kontrolný tepelno-hydraulický výpočet za účelom zistenia povrchových teplôt trubiiek prehrievača P2. Už pri predbežných výsledkoch však bolo zrejmé, že návrhové a experimentálne získané dáta sú odlišné. Návrhové parametre sa preto zanedbali a celý výpočet sa zamerl najmä na reálne experimentálne dáta. Pre presný výpočet povrchových teplôt na trubkách prehrievača P2 je využitý software HTRI. Vo výpočte zanedbáva vyššie spomínané „Y“ trubky na vstupe a výstupe z prehrievača z membránovej steny, a všetky trubky boli uvažované s konštantným priemerom. Pri určovaní povrchovej teploty boli trubky v každom chode automaticky nadelené na desať podoblastí, pričom dĺžka každej z nich je 294 mm. Z prevádzky boli získané reálne namerané dáta, zo spaľovacieho procesu využité ako vstupné parametre do výpočtov. Medzi základné vstupné parametre patrili reálna teplota spalín za spaľovacou komorou 734 °C a ich

hmotnostný prietok 17,8 kg/s. Ďalšími dôležitými nameranými veličinami bola teplota pary na vstupe do prehrievača P2 248,2 °C a taktiež jej hmotnostný prietok 16,7 kg/s.

Aj napriek spomínaným zjednodušeniam a predpokladom, za účelom dosiahnutia zhody výsledkov tepelno-hydraulického výpočtu s reálnym chovaním prehrievaču v prevádzke, bolo nutné pri tepelne hydraulických výpočtoch nastaviť hodnotu súčiniteľa zanášania na strane spalín s hodnotou  $R_z = 0,0035 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ . Táto hodnota nahrádza, respektíve simuluje, vplyv súčasnej oxidovej vrstvy na prehrievači (viď obrázok 6) na jeho reálne chovanie (tepelný výkon), pričom teplotou na overenie správnosti bola teplota pary na výstupe z prehrievača 369 °C. Na obrázku 7 sú na grafe znázornené povrchové teploty trubiek prehrievača bez a s oxidovou vrstvou (simulované pomocou súčiniteľa zanášania). Je z toho jasne zrejmý vplyv takto nasimulovanej korózie na teplotu. [13]



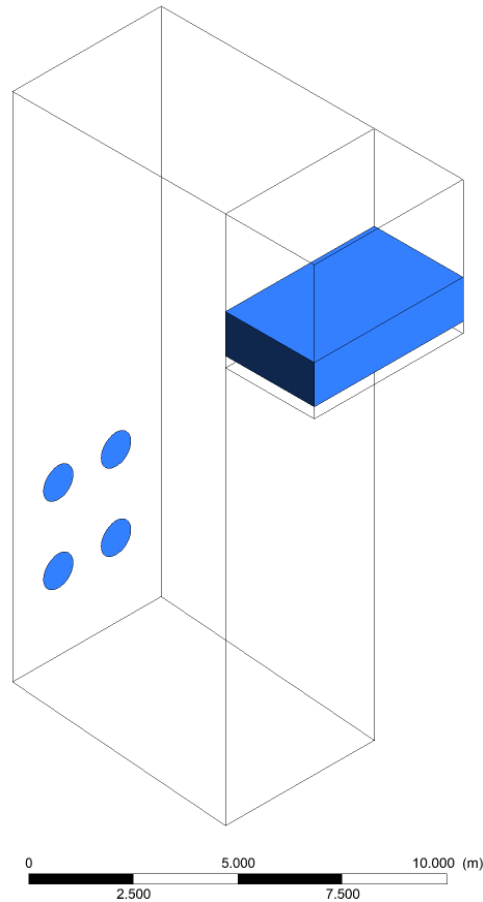
Obr. 7 Graf rozloženia priemerných vonkajších povrchových teplôt na všetkých radoch trubiek prehrievača P2 bez zanášania a so zanášaním (simulovaná oxidová vrstva). [13]

Z grafu na obrázku 7 je zrejmý vplyv zanášania (resp. simulovanej korózie) na povrchovú teplotu trubiek. Rozdiel teplôt v jednotlivých bodoch so zanášaním a bez je v rozmedzí od 35,3 °C do 50,2 °C. Priemerná hodnota rozdielu teplôt na všetkých trubkách je 42 °C čo už má jednak na prevádzku (tepelný výkon) prehrievača, a taktiež na odolnosť voči teplotnému poškodeniu značný vplyv. [13]

### 3.5.2 Nastavenie výpočtu CFD – simulácia prúdenia v komore

Za účelom zistenia rozloženia teplôt na prehrievači P2, bola najprv vykonaná simulácia prúdenia spalín v kotle. Počas simulácie prúdenia spalín v spaľovacej komore a pri vstupe do druhého ťahu bolo nutné použiť niekoľko zjednodušení. [13]

- a) *Zjednodušenie veľkosti modelu.* Pre potreby výpočtu bol vytvorený 3D model v programe SolidWorks znázornený na obrázku 8. Model zahŕňa spaliny v oblasti spaľovacej komory a časti druhého ťahu (po koniec prehrievača P2).



Obr. 8 Zjednodušený 3D model spaľovacej komory a časti druhého ťahu.

- b) *Zjednodušenie geometrie modelu.* Membránové steny boli nahradené rovnými stenami, pričom hrúbka steny bola zohľadnená pri nastavovaní teploty stien kotla za účelom chladenia spalín. Hrúbka steny bola nastavená na 5 mm, čo odpovedá hrúbke steny trubky v membránovej stene. Nutné bolo taktiež zohľadniť istý stupeň korózie, ktorá má značný vplyv na tepelnú vodivosť, čo bolo zohľadnené v hodnote emisivity membránových stien pre skorodovanú oceľ 0,79. [16]

Teplota membránovej steny bola následne dopočítaná pomocou tepelnej bilancie výparníku, kde bola použitá známa teplota napájacej vody 145 °C a teplota paro-kvapalnej zmesi v bubne 245 °C. Membránová stena bola následne rozdelená na tri oblasti. Prvou bola spodná časť membránovej steny, do ktorej bola privádzaná voda z bubny, ktorá bola v kvapalnom skupenstve. Jej teplota je 249,8 °C, čo odpovedá vnútornej povrchovej teplote membránovej steny 265,2 °C a vonkajšej povrchovej teplote membránovej steny 307,3 °C. Druhou bola oblasť, kde dochádza pri tlaku 4,25 MPa k varu vody, čo je vo výške približne 2,5 m nad dnom spaľovacej komory. Teplota média je v tejto oblasti 254 °C, čo odpovedá vnútornej povrchovej teplote membránovej steny 254,2 °C a vonkajšej povrchovej teplote membránovej steny 301,8 °C. Poslednou treťou oblasťou je horná časť spaľovacej komory, kde v trubkách membránovej steny prúdi paro-kvapalná zmes voda – para (s podielom pary 10,2 hm%). Teplota média je v tejto oblasti je taktiež 254 °C, čo však odpovedá vnútornej

povrchovej teplote membránovej steny 255,3 °C a vonkajšej povrchovej teplote membránovej steny 302,3 °C. Rozdiel povrchových teplôt je zapríčinený nižšou hodnotou súčiniteľa prestupu tepla paro-kvapalnej zmesi. Pre CFD výpočty bola následne ako teplota membránových stien zadaná hodnota 255 °C.

- c) *Zjednodušenie spaľovacieho procesu.* Spaľovací proces bol nahradený prúdom horúcich spalín s teplotou reálneho plameňa v mieste horákov. Došlo taktiež k zjednodušeniu horáku, kde došlo k nahradeniu trysiek horáku za štyri vstupy kruhového tvaru s priemerom 1 m (na obrázku 8 znázornené modrou farbou). Teplota plameňa však pochopiteľne nebola meranou veličinou, a preto bolo nutné danú hodnotu dopočítať na základe energetickej bilancie. Známa bola v tomto prípade návrhová teplota v jadre plameňa 1771 °C a teplota spalín za spaľovacou komorou 957 °C. Známa je taktiež reálna teplota spalín za spaľovacou komorou 734 °C. Na základe návrhových teplôt bolo nutné vypočítať hodnotu toku entalpie:

$$\Delta\dot{H} = \int_{\Delta T} c_p \cdot \dot{m} \cdot dT \quad (J/s) \quad (1)$$

kde  $c_p$  (J/(kg·K)) je merná tepelná kapacita,  $\dot{m}$  (kg/s) je hmotnostný prietok spalín a  $\Delta T$  (K) je rozdiel vstupnej a výstupnej teploty v danom prípade rozdiel návrhovej teploty, v jadre plameňa a teploty spalín za spaľovacou komorou. Neznáma však bola aj hodnota  $c_p$ , ktorá bola taktiež nutná aj ako materiálová vlastnosť spalín v CFD simulácii, v závislosti na lokálnej teplote. Hodnota  $c_p$  bola dopočítaná na základe reálneho zloženia spalín (tabuľka 1) a lokálnej teploty, ktorá je zohľadnená pri voľbe koeficientov  $A_i$  a  $B_i$ . Koeficienty boli pre parciálne zložky spalín získané z materiálovej databázy programu ANSYS Fluent 17.1 [15]. Následne sa koeficienty pre spaliny určili váženým priemerom a sú uvedené v tabuľke 2.

Tab. 1 Zloženie spalín v hm%.

Prvok	hm%
N <sub>2</sub>	68,93
Ar	1,18
CO <sub>2</sub>	13,84
O <sub>2</sub>	1,20
H <sub>2</sub> O	14,86

Samotný výpočet  $c_p$  bol vykonaný na základe nasledujúcich vzťahov:

$$\text{pre } 300 \text{ K} < T_s < 1000 \text{ K platí } c_p(T_s) = A_i \cdot T_s^{x_i} \quad (2)$$

$$\text{pre } 1000 \text{ K} < T_s < 3000 \text{ K platí } c_p(T_s) = B_i \cdot T_s^{x_i} \quad (3)$$

kde  $T_s$  (K) je lokálna teplota spalín,  $A_i$  a  $B_i$  sú koeficienty (viď tabuľka 2). Voľba koeficientov je závislá na teplote, pričom  $A_i$  je použité pre rozmedzie teplôt 300–1000 K a  $B_i$  je použité pre rozmedzie teplôt 300–1000 K.

Tab. 2 Hodnoty koeficientov pre výpočet mernej tepelnej kapacity spalín.

Člen i	1	2	3	4	5
$x_i$	0	1	2	3	4
$A_i$	982,7875	0,7894	-0,0015	1,82E-06	-7,30E-10
$B_i$	916,1157	0,598	-0,0002	3,52E-08	-2,26E-12

Po dosadení všetkých návrhových parametrov do rovnice (1) bola dopočítaná hodnota toku entalpie  $\dot{H}_l = 1,194$  MJ/s. Následne bola pomocou reálnej teploty spalín za spaľovacou komorou dopočítaná reálna teplota plameňa  $T_{plam} = 1569$  °C, ktorá bola použitá ako okrajová podmienka na vstupe spalín do spaľovacej komory.

- d) *Zjednodušenie geometrie prehrievača P2.* Prehrievač (na obrázku 8 vyznačený modrou farbou) bol pri zjednodušenej simulácii prúdenia simulovaný ako porézna zóna (porous zone), pre zachovanie vplyvu miestneho odporu na tok spalín. Pre správne definovanie poréznej zóny bolo nutné zohľadnenie zotrvačných strát v poréznych médiách. Pri vysokých rýchlostiach prúdenia je pre korekciu trecích strát prúdiaceho média v poréznej zóne použitý súčiniteľ odporu (alebo aj súčiniteľ odporu v dôsledku zotrvačných síl)  $C_2$ . Tento súčiniteľ je chápaný ako merný stratový koeficient miestneho odporu (ktorý predstavuje porézna zóna), (stratový koeficient vzťahnutý na jednotku dĺžky) v smere toku prúdenia, čím dovoľuje špecifikovať tlakovú stratu bežným spôsobom ako treciu tlakovú stratu prúdiaceho média miestnym odporom. Pre výpočet tejto tlakovej straty potom platí nasledujúci vzťah (prebratý z ANSYS Help 17.1 – vzťah (6-6) [15]):

$$\nabla p = - \sum_{j=1}^3 C_{2j} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_j \cdot |v| \right) \quad (4)$$

kde  $\nabla p$  (Pa/m) je gradient tlaku,  $C_2$  ( $m^{-1}$ ) je merný súčiniteľ miestneho odporu poréznej zóny,  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) je hustota média,  $v_j$  (m/s) je komponent rýchlosti prúdiaceho média pre jeden smer,  $|v|$  (m/s) je absolútna hodnota rýchlosti prúdiaceho média. Pre výpočet merného súčiniteľa miestneho odporu  $C_2$  platí teda vzťah vyjadrený z predchádzajúcej rovnice:

$$C_2 = \frac{2 \cdot \Delta p}{L_{por} \cdot \rho_m \cdot w^2} \quad (5)$$

kde  $C_2$  ( $m^{-1}$ ) je merný súčiniteľ miestneho odporu poréznej prepážky,  $\Delta p$  (Pa) je tlaková strata poréznej prepážky,  $\rho_m = 0,3271$   $kg/m^3$  je stredná hustota spalín,  $L_{por} = 1,3018$  m je dĺžka poréznej prepážky v smere prúdenia a  $w = 3,59$  m/s je rýchlosť spalín pred prehrievačom.

Pre určenie veľkosti tlakovej straty (dosadzovanej do rovnice (5)), ktorú na strane spalín prehrievač spôsobuje, bolo použitých niekoľko postupov na základe rozličnej literatúry, avšak s odlišnými výsledkami. Nakoniec sa ako vhodný ukázal postup podľa VDI Heat Atlas kapitoly L1.4[17]. Je tu podrobný postup pre dopočítanie tlakovej straty pri prúdení média trúbkami umiestnenými v rade za sebou (in-line). Tlaková strata zväzku trúbiek prehrievača je vyjadrená nasledovne:

$$\Delta p = \xi \cdot n_{MR} \cdot \frac{\rho_m \cdot w_e^2}{2} = 39,13 \text{ Pa} \quad (6)$$

kde  $\Delta p$  (Pa) je tlaková strata,  $\xi = 0,1332$  je súčiniteľ miestneho odporu (zahŕňa vplyv režimu prúdenia),  $n_{MR} = 18$  je počet miestnych odporov v smere toku prúdenia (v našom prípade počet radov trubiek),  $\rho_m = 0,3271 \text{ kg/m}^3$  je stredná hustota spalín,  $w_e = 7,27 \text{ m/s}$  je rýchlosť spalín v medzitrubkovom priestore prehrievača.

Po dosadení hodnoty tlakovej straty do rovnice (5) bola získaná hodnota súčiniteľa miestneho odporu poréznej vrstvy  $C_2 = 12,544 \text{ m}^{-1}$ , ktorá bola prvým vstupom pre nastavenie poréznej zóny. Druhou dôležitou veličinou pre úplné definovanie poréznej zóny bola poréznosť média vypočítaná ako:

$$\phi = \frac{V_V}{V_T} = 0,7887 \quad (7)$$

kde  $\phi$  (-) je poréznosť média,  $V_V$  ( $\text{m}^3$ ) je objem trubiek nahradzovaných v poréznej zóne a  $V_T$  ( $\text{m}^3$ ) je celkový objem poréznej zóny.

Porézna zóna bola taktiež definovaná ako zdrojový člen na odoberanie tepla. Na základe výstupu z HTRI bola hodnota odobraného tepla určená na 5,506 MW. Pre potreby vstupných parametrov však musela byť prepočítaná na merné teplo, ktorého hodnota, pri objeme poréznej zóny  $19,62 \text{ m}^3$ , je  $280632 \text{ W/m}^3$ .

- e) *Zjednodušenie výpočtu.* Trubková mreža medzi spaľovacou komorou a 2. ťahom bola taktiež nahradená pomocou poréznej prepážky (porous jump), ktorá má zabezpečiť náhradu vplyvu miestneho odporu. Pri zadávaní sú dôležité tri parametre, ktorými sú hrúbka poréznej prepážky, ktorá je v našom prípade 0,53 m. Druhým z nich je priepustnosť plochy  $\alpha_p$ , dopyčítanej na základe nasledujúceho vzťahu (prebratý z ANSYS Help 17.1 – vzťah (6-6) [15]:

$$\alpha_p = \frac{D_p^2}{150} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} = 0,00064 \text{ m}^2 \quad (8)$$

kde  $D_p = 0,081$  (m) je stredná veľkosť častice,  $\varepsilon = 0,9685$  (-) je pórovitosť prepážky. Posledným dôležitým koeficientom pre plné určenie poréznej prepážky nahradzujúci trubkovú mrežu je koeficient poréznej prepážky  $C_{2,p}$  ( $\text{m}^{-1}$ ), dopyčítaný na základe vzťahu (6-24) prebratého z ANSYS Help 17.1 [15]:

$$C_{2,p} = \frac{3,5}{D_p} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} = 1,5 \frac{1}{\text{m}} \quad (9)$$

Ďalšie nastavenie materiálu a výpočtových modelov:

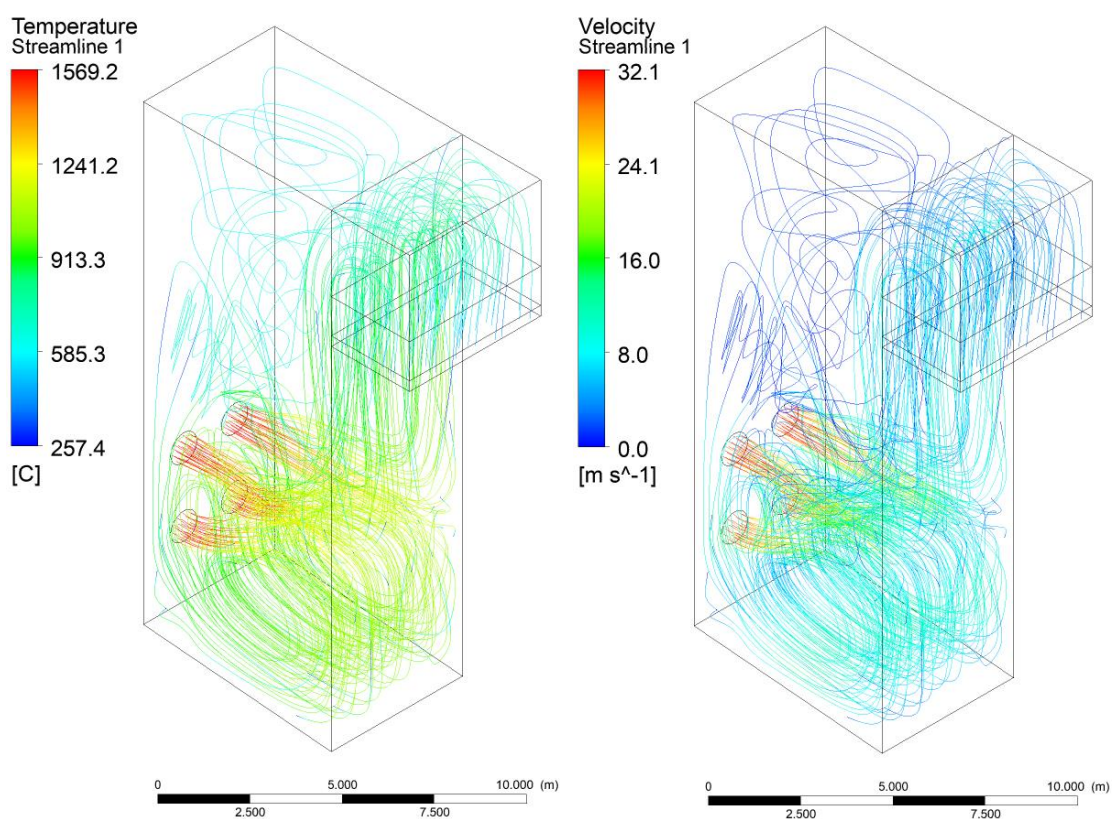
- f) *Viskózný model turbulencie.* Pre simulovanie prúdu spalín bol zvolený model turbulencie K-epsilon realizovateľný so škálovateľnými stenovými funkciami.
- g) *Model radiácie.* Výpočet radiácie bol zapnutý až po stabilizácii simulácie a pre jej výpočet bol zvolený model diskretných smerov (DO – Discrete Ordinates).
- h) *Nastavenie materiálových vlastností.* Počas simulácie sa ako ďalším dôležitým parametrom ukázala hodnota absorpčného koeficientu, na nastavenie ktorej sú výsledky simulácie citlivé. Jej hodnota bola počas niekoľkých simulácií menená v rozmedzí od 0,1 – 0,3  $\text{m}^{-1}$ . Neskôr bola jej hodnota dopyčítaná pomocou UDF, aby hodnota absorpčného koeficientu

zohľadňovala zmenu teploty. Jej hodnota sa v jednotlivých častiach modelu líši, avšak priemerná hodnota je  $0,1544 \text{ m}^{-1}$ .

Výpočet je realizovaný ako ustálená úloha bez časového kroku (steady) a diskretizácia rovníc je schémou Upwind druhého rádu.

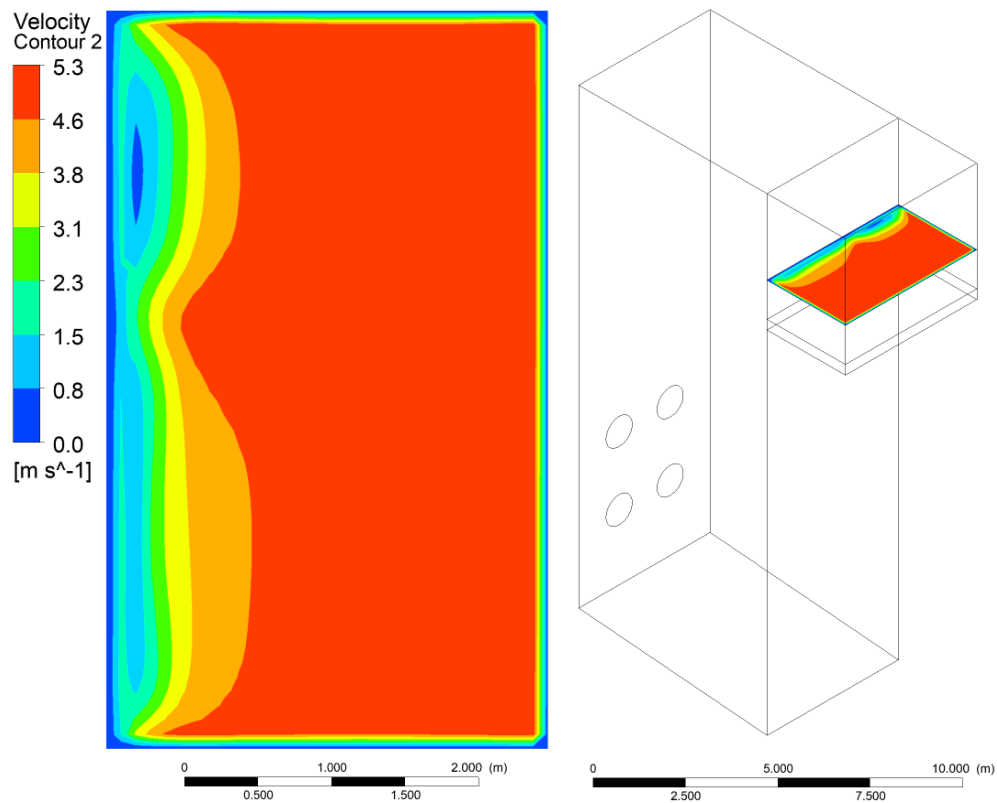
### 3.5.3 Výsledky CFD simulácie

Pre presnejšie vyčíslenie rozloženia teplôt na jednotlivých trúbkách prehrievača P1, je nutné určiť teplotné zaťaženie spalinami. Za týmto účelom bola realizovaná CFD simulácia prúdenia spalín v kotli. Na obrázku 9 sú znázornené prúdnicе spalín v kotli a v časti druhého ťahu, pričom na ľavej strane sú zvýraznené ich teploty v  $^{\circ}\text{C}$  a na pravej strane rýchlosti v  $\text{m/s}$ .



Obr. 9 Prúdnicе spalín so zvýraznenou teplotou (ľavý obrázok) a rýchlosťou (pravý obrázok).

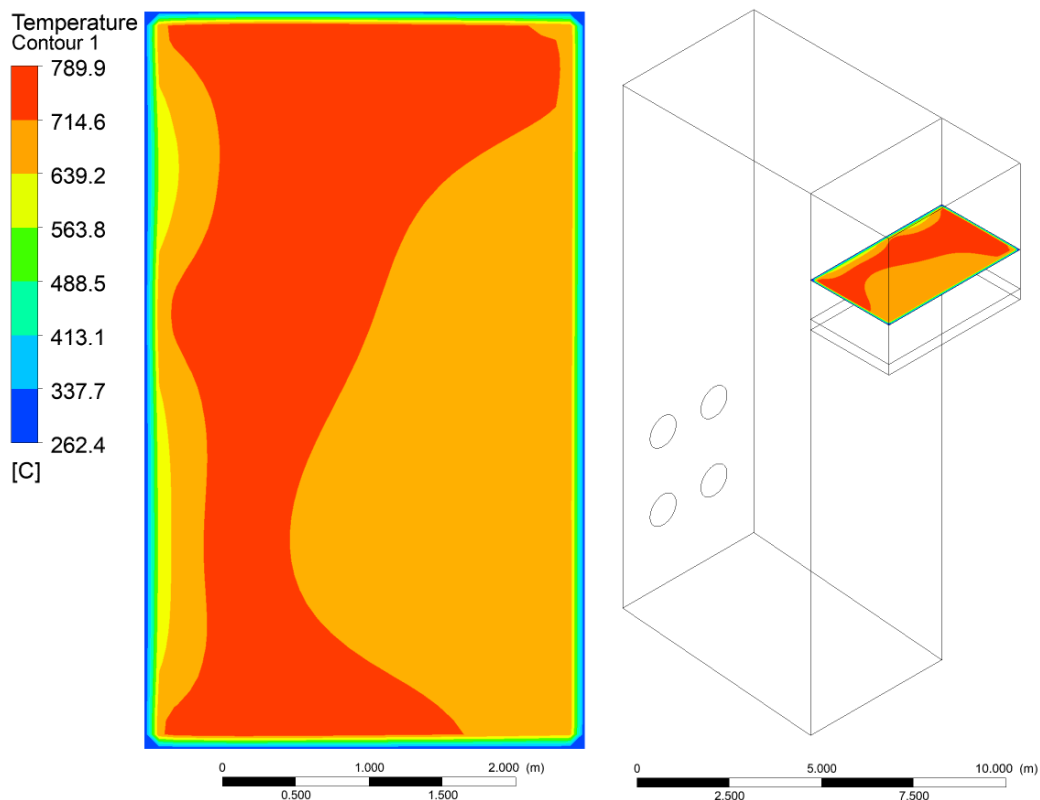
Pre určenie teplotného zaťaženia prehrievača je však nutné určenie rýchlosti a teploty spalín v rovine tesne nad prehrievačom. Z obrázku 10 je zřejmé, že rýchlostný profil nie je v jednotlivých miestach prierezu druhého ťahu konštantný. Priemerná rýchlosť v danej rovine je však  $4,39 \text{ m/s}$ . Je to spôsobené nedostatočným ustálením toku po obrate v hornej časti druhého ťahu.



Obr. 10 Rýchlosť spalín v rovine nad prehrievačom. [13]

Nerovnomernosť toku má vplyv aj na teplotné pole v rovine nad prehrievačom znázornené na obrázku 11. Rýchlejšie prúdiace spaliny majú krátku dobu zotrvania v komore a nestihnú odovzdať dostatok tepla do výparníku reprezentovaného membránovými stenami. Naopak pomalšie prúdiace spaliny sa stihnú dostatočne ochladiť. Priemerná teplota spalín v tejto rovine je  $710\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



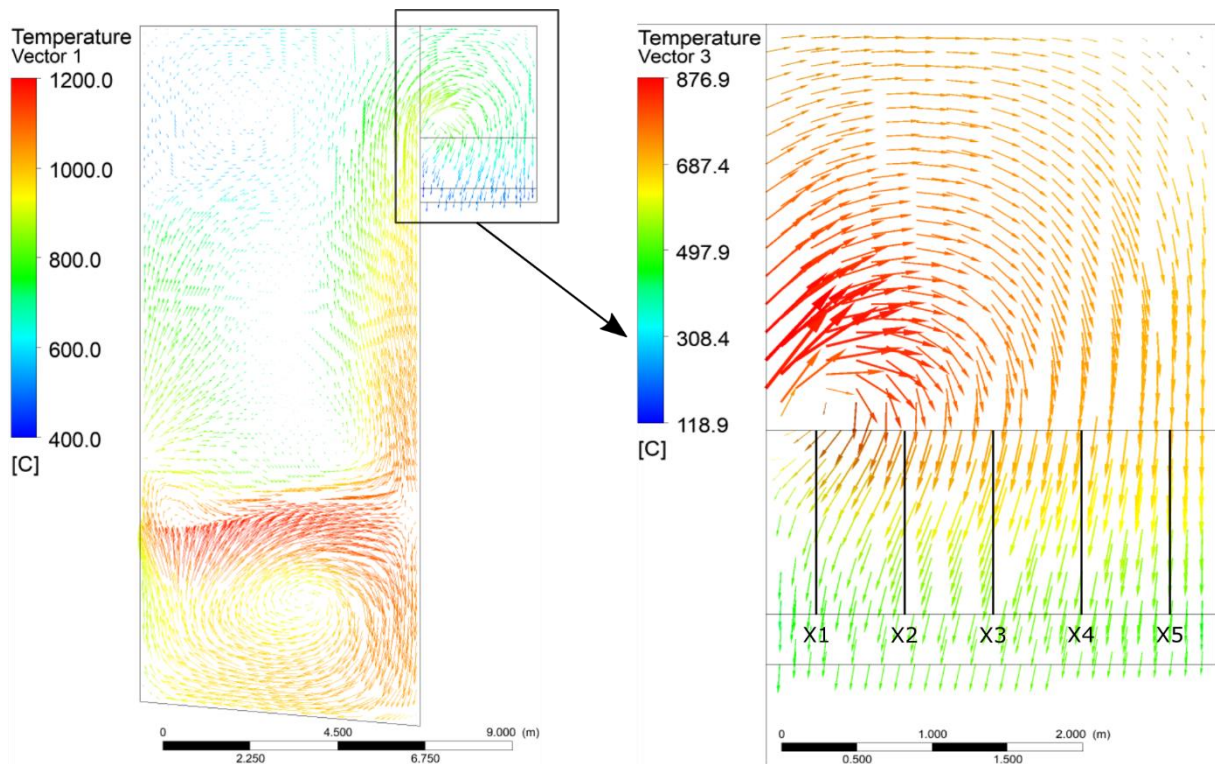


Obr. 11 Teplota spalín v rovine nad prehrievačom. [13]

Nerovnomernosť rýchlosti toku spalín a ich teploty taktiež poukazuje na problém merania týchto veličín, kedy nameraná hodnota je silne závislá od zvoleného miesta merania.

### 3.6 Rozloženie teploty na povrchu trubiek – 2D analýza

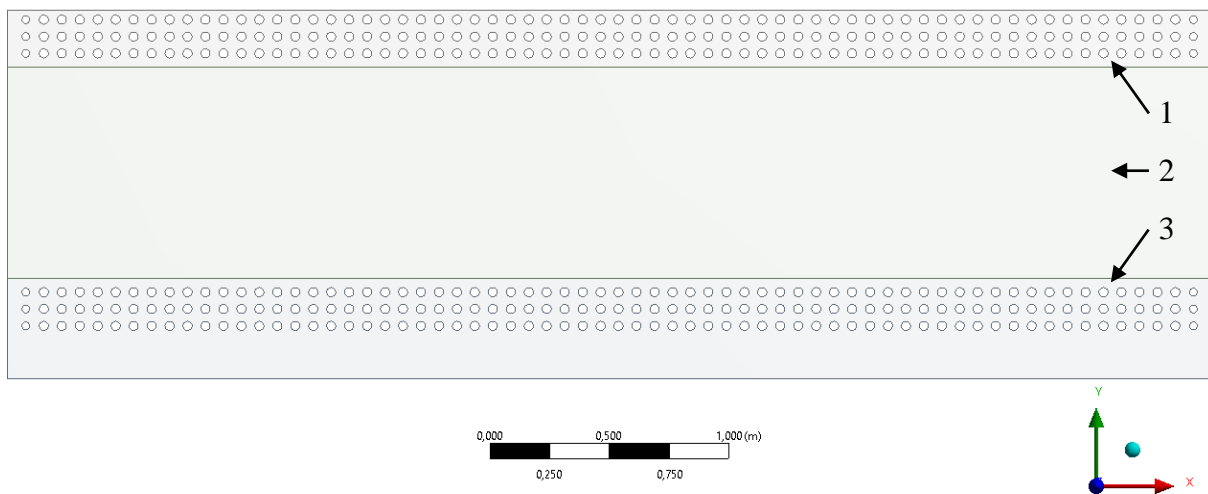
Pre určenie povrchovej teploty trubky je následne nutné simulovať tok spalín okolo trubiek. Nakoľko sa jedná o relatívne veľké množstvo trubiek, ktoré tvoria prehrievač, tvorba výpočtového modelu (siete) by bola časovo náročná. Nehovoriac o časovej náročnosti samotného výpočtu. Z toho dôvodu boli teploty na povrchu trubky simulované pomocou 2D simulácie na piatich rezoch doménou (viď obrázok 12). Rez X1 je od membránovej steny vzdialený 300 mm a následne každý z rezov je od predchádzajúceho vzdialený 600 mm a sú tak rovnomerne rozmiestnené v priestore prehrievača.



Obr. 12 Rezy doménou.

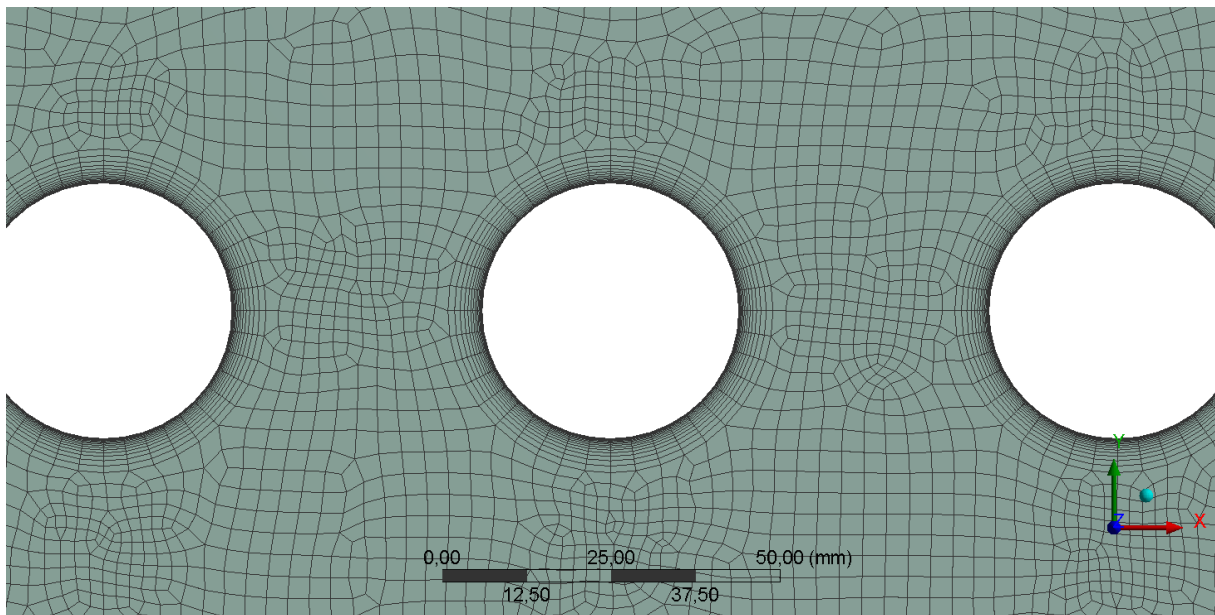
### 3.6.1 Výpočtový 2D model

Pre získanie teplotného poľa na povrchu trubiek bol vytvorený 2D model, ktorý je znázornený na obrázku 13. Jedná sa o doménu s rozmermi  $5030 \times 1530$  mm, ktorá je rozdelená na tri časti. Prvá časť je tvorená trúbkami v troch radoch (prvý chod prehrievača), druhá časť je tvorená poréznou zónou (nahradza štyri chody prehrievača – 12 radov trubiek) a posledná tretia časť je opäť tvorená trúbkami v troch radoch (posledný chod prehrievača). Trubky s priemerom 31,8 mm sa nachádzajú vždy v krajnej rade pri membránových stenách na oboch stranách (celkovo 12 trubiek), zvyšné trubky v prvej a poslednej doméne majú priemer 38 mm (celkovo 384 trubiek).



Obr. 13 Geometria 2D rezu doménou prehrievača.

Následne bola vytvorená výpočtová sieť (tzv. mesh) s takmer 500 000 bunkami. V oblastiach, kde dochádza k prenosu tepla zo spalín do steny trubky, alebo do membránovej steny, došlo k zjemneniu siete pomocou funkcie inflation (znázornené na obrázku 14).

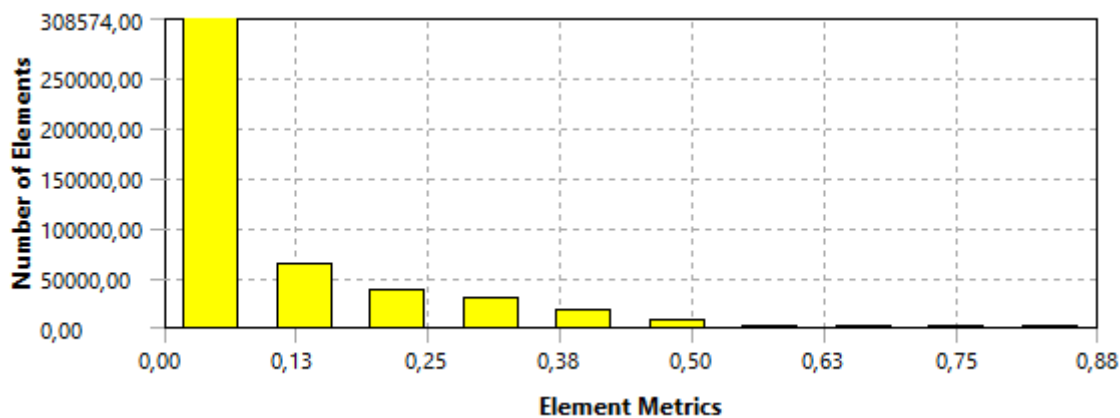


Obr. 14 Detail výpočtovej siete a jej zjemnenia na povrchu trubiek.

Pri tvorbe výpočtovej siete boli kontrolované viaceré parametre hodnotiace jej kvalitu. Prvým z nich bola hodnota skewness alebo skosenie. Hodnota skewness určuje, ako blízko je bunka ideálnemu tvaru (rovnouhľanu alebo rovnostrannému), kde hodnota 0 je najideálnejšia bunka (najlepšia) a 1 je najdegenerovanejšia bunka (najhoršia). Pre 2D úlohu je odporúčaná maximálna hodnota 0,95 a priemerná 0,1 [15]. Hodnoty skewness pre vytvorenú 2D sieť sú znázornené v tabuľke 3 a na obrázku 15.

Tab. 3 Hodnoty skewness koeficientu hodnotiaceho kvalitu buniek výpočtovej siete.

	Min	Average	Max
<i>Skewness</i>	1,31e-10	0,11	0,88



Obr. 15 Hodnoty skewness koeficientu hodnotiaceho kvalitu buniek výpočtovej siete.

Ďalším z parametrov hodnotiacich kvalitu siete bola hodnota  $y+$  faktoru, ktorý pri použití stenových funkcií hodnotí kvalitu siete v medzných vrstvách. Tento parameter závisí od veľkosti buniek v blízkosti steny, vlastností a trecej rýchlosti prúdiaceho média. Odporúčaná hodnota  $y+$  faktora by mala byť  $\sim 1$  [15]. Hodnoty  $y+$  faktora pre vytvorenú 2D sieť pre jednotlivé rezy sú znázornené v tabuľke 4.

Tab. 4 Priemerná hodnota  $y+$  faktoru pre jednotlivé rezy prehrievača.

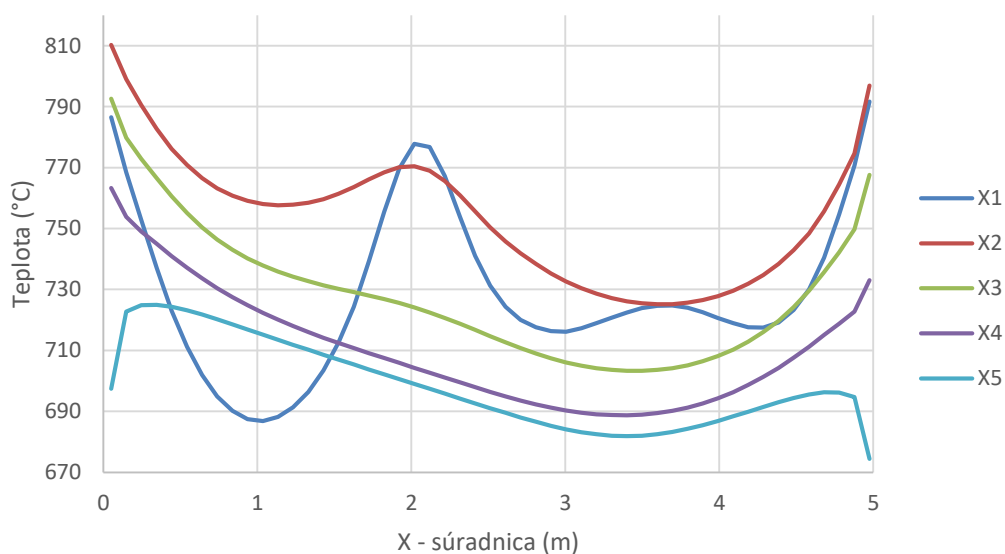
Rez č.	X1	X2	X3	X4	X5
<b><math>y+</math> faktor</b>	1,5795	1,0127	1,4113	1,4956	1,6016

Na základe odporúčaných hodnôt a skutočných hodnôt hodnotených parametrov možno konštatovať, že vytvorená výpočtová sieť je pre potreby výpočtu dostatočná.

### 3.6.2 Okrajové podmienky

Pre simuláciu prúdenia okolo trubiek bolo použitých niekoľko okrajových podmienok:

- a) *Vstupné teploty.* Vstupné teploty boli zadané pomocou importovaného teplotného profilu z predchádzajúcej 3D simulácie. Pre každý z rezov sa jednalo o iný teplotný profil ako je patrné z grafu na obrázku 16. Priemerné a maximálne hodnoty teplotného zaťaženia pre jednotlivé rezy sú v tabuľke 5.

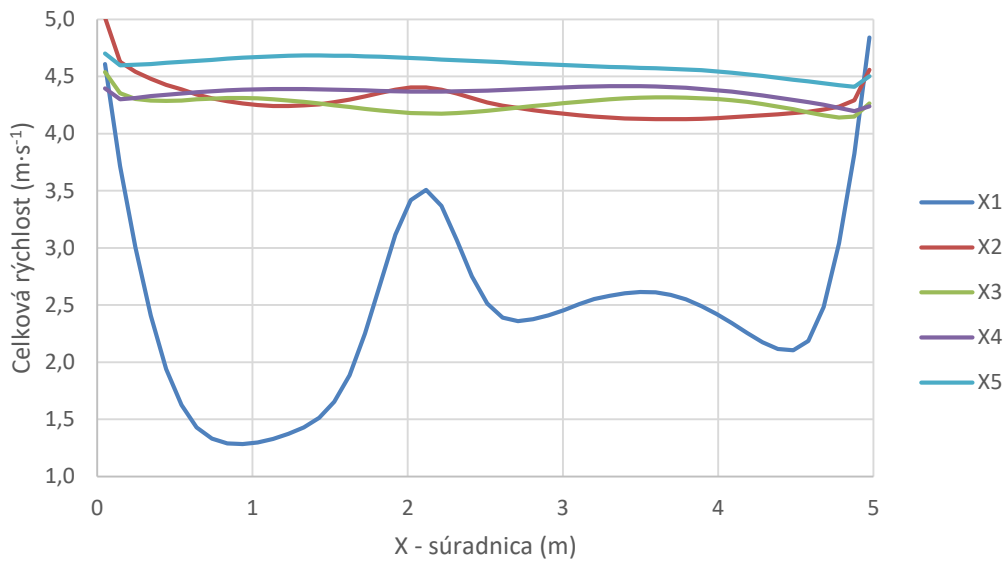


Obr. 16 Teplotné zaťaženie jednotlivých rezov prehrievača.

Tab. 5 Priemerná a maximálna hodnota teplotného zaťaženia pre jednotlivé rezy.

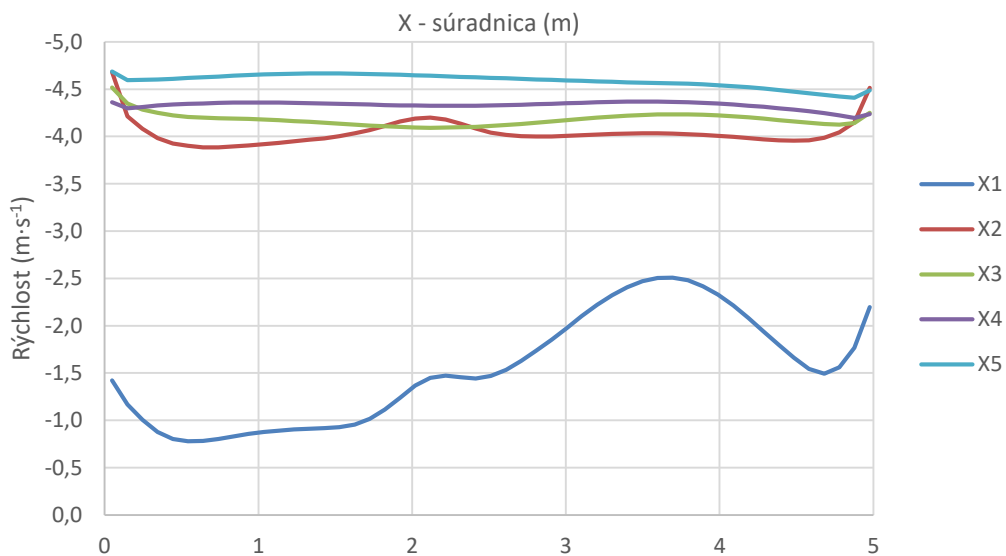
Rez č.		X1	X2	X3	X4	X5
<b><math>T_{\max}</math></b>	(°C)	791,65	810,28	792,56	763,28	724,97
<b><math>T_{\text{priemer}}</math></b>	(°C)	728,76	753,95	728,18	710,15	698,54

- b) *Vstupné rýchlosti.* Vstupné Rýchlosti boli taktiež zadané pomocou importovaného rýchlostného profilu z predchádzajúcej 3D simulácie. Pre každý z rezov sa jednalo o iný rýchlostný profil, pričom celková rýchlosť je patrná z grafu na obrázku 17.



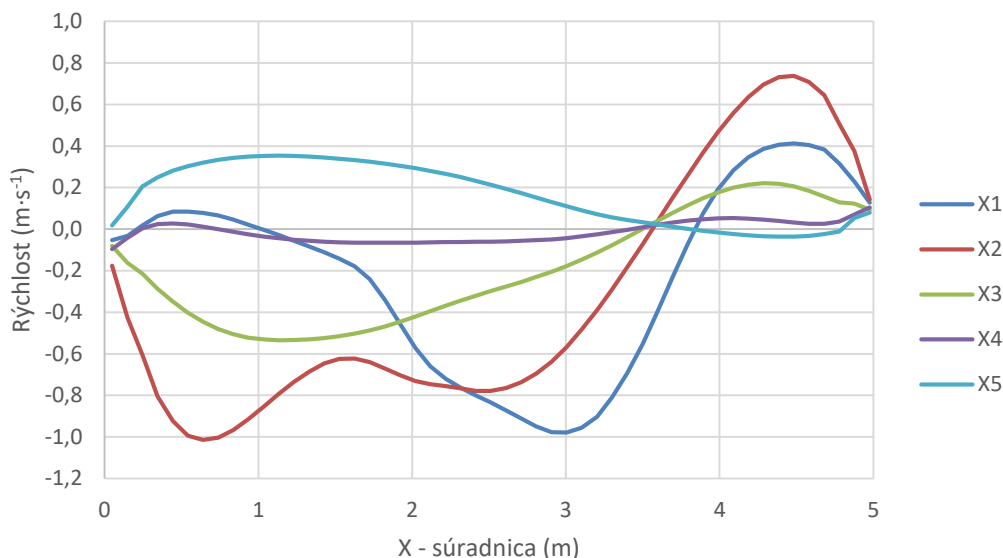
Obr. 17 Celková rýchlosť na vstupe do jednotlivých rezov prehrievača.

Rýchlostný profil bol však zadaný pomocou dvoch hodnôt rýchlosti rozdelenej na X zložku (viď obrázok 19) a Y zložku (viď obrázok 18).



Obr. 18 Y zložka rýchlosti na vstupe do jednotlivých rezov prehrievača.

Pri X zložke rýchlosti v 2D simulácii došlo k importovaniu Z zložky rýchlosti z 3D simulácie z dôvodu odlišnej orientácie 2D a 3D modelu. Y zložka ostala v 2D simulácii orientovaná rovnako ako v 3D.



Obr. 19 Zložka rýchlosti (3D) na vstupe do jednotlivých rezov prehrievača.

- c) *Porézna zóna.* Ako bolo spomínané v predchádzajúcej kapitole, porézna zóna nahrádza štyri chody prehrievača (12 radov trubiek) pre zohľadnenie vplyvu miestneho odporu na tok spalín. Hodnoty pre jej definovanie sú totožné s hodnotami z 3D simulácie, kde hodnota miestneho odporu poréznej vrstvy  $C_2 = 12,544 \text{ m}^{-1}$ , a poréznosť média  $\phi = 0,7887$ . Porézna zóna bola taktiež definovaná ako zdrojový člen na odoberanie tepla, ktoré bolo nastavené pomocou merného tepla  $280632 \text{ W/m}^3$ , obdobne ako pri 3D simulácii.
- d) *Membránové steny.* Ako bolo spomenuté v kapitole 3.5.2 b), membránové steny boli nahradené rovnými stenami, pričom hrúbka steny trubky v membránovej stene 5 mm bola zohľadnená pri nastavovaní teploty stien kotla. Tak ako pri 3D simulácii, aj pri 2D bolo nutné zohľadniť istý stupeň korózie vplývajúcej na tepelnú vodivosť, čo bolo zohľadnené v hodnote emisivity membránových stien pre skorodovanú oceľ 0,79. [16] Samotná teplota membránovej steny bola v 2D simulácii, na základe uvedeného postupu pre výpočet teploty v hornej časti spaľovacej komory, nastavená na hodnotu  $255^\circ\text{C}$ . V trúbkách membránovej steny prúdi paro-kvapalná zmes voda – para (s podielom pary 10,2 hm%). Teplota média je v tejto oblasti taktiež  $254^\circ\text{C}$ , čo však odpovedá vnútornej povrchovej teplote membránovej steny  $255,3^\circ\text{C}$  a vonkajšej povrchovej teplote membránovej steny  $302,3^\circ\text{C}$ . Rozdiel povrchových teplôt je zapríčinený nižšou hodnotou súčiniteľa prestupu tepla paro-kvapalnej zmesi.
- e) *Steny trubiek.* Trubky prehrievača boli simulované obdobne ako membránové steny a síce, že pri modelovaní boli nahradené stenou s nulovou hrúbkou a až pri nastavovaní okrajových podmienok im spolu s teplotou bola priradená hrúbka steny trubky 5,6 mm. Teploty steny pre jednotlivé rady trubiek sú uvedené v tabuľke 6, kde slovom „hore“ sú označované trubky v prvom chode a slovom „dole“ zas trubky v poslednom chode prehrievača. Tieto hodnoty boli získané z kontrolného tepelno-hydraulického výpočtu, ktorý je spomínaný v kapitole 3.5.1.

Tab. 6 Teploty vnútornej steny jednotlivých radov trubiiek prehrievača pre jednotlivé rezy.

Rez č.	Hore 1	Hore 2	Hore 3	Dole 1	Dole 2	Dole 3
<b>X1</b>	378,4	376,4	374,6	281,6	280,0	278,4
<b>X2</b>	384,1	381,9	379,8	278,6	277,2	275,8
<b>X3</b>	389,9	387,4	385,1	275,7	274,3	273,1
<b>X4</b>	395,6	392,9	390,3	272,7	271,5	270,4
<b>X5</b>	401,4	398,4	395,6	269,8	268,7	267,7

### 3.6.3 Nastavenie simulácie

Po zadaní okrajových podmienok boli nastavené vhodné výpočtové modely pre simuláciu:

- Výpočet energie.* Keďže cieľom bola simulácia teploty spalín, výpočet rovnice pre prenos energie bol zapnutý.
- Viskózný model turbulencie.* Pre simulovanie prúdu spalín bol zvolený model turbulencie K-omega SST.
- Model radiácie.* Model radiácie bol zvolený ako model diskretných smerov (DO – Discrete Ordinates). Pre urýchlenie simulácie bol výpočet radiácie počítaný každú tretiu iteráciu energie.
- Nastavenie materiálových vlastností.* Počas simulácie sa ako ďalším dôležitým parametrom ukázala hodnota absorpčného koeficientu, na nastavenie ktorej sú výsledky simulácie citlivé. Jej hodnota bola počas niekoľkých simulácií menená v rozmedzí od 0,1 – 0,3 m<sup>-1</sup>. Neskôr bola jej hodnota dopočítaná pomocou UDF, aby hodnota absorpčného koeficientu zohľadňovala zmenu teploty. Jej hodnota sa v jednotlivých častiach modelu líši, avšak priemerná hodnota je 0,6837 m<sup>-1</sup>.
- Čas simulácie.* Výpočet bol spočiatku realizovaný ako ustálená úloha bez časového kroku (steady) s počtom iterácií 1000, pričom diskretizácia rovníc bola schémou Upwind druhého rádu. Po ustálení reziduí však bola úloha prepnutá do tranzientného režimu. Dĺžka simulácie bola zvolená na základe zádržnej doby spalín (resp. času prechodu spalín doménou), ktorá bola určená pomocou sledovania priemernej zádržnej doby častíc ~0,3 s. Na základe prepočtu energie bola následne táto hodnota použitá na overenie teploty, o ktorú sa stihne materiál trubky ohriať:

$$\dot{Q} \cdot t = Q = \Delta T \cdot cp \cdot \rho \cdot A_{tr} \quad (10)$$

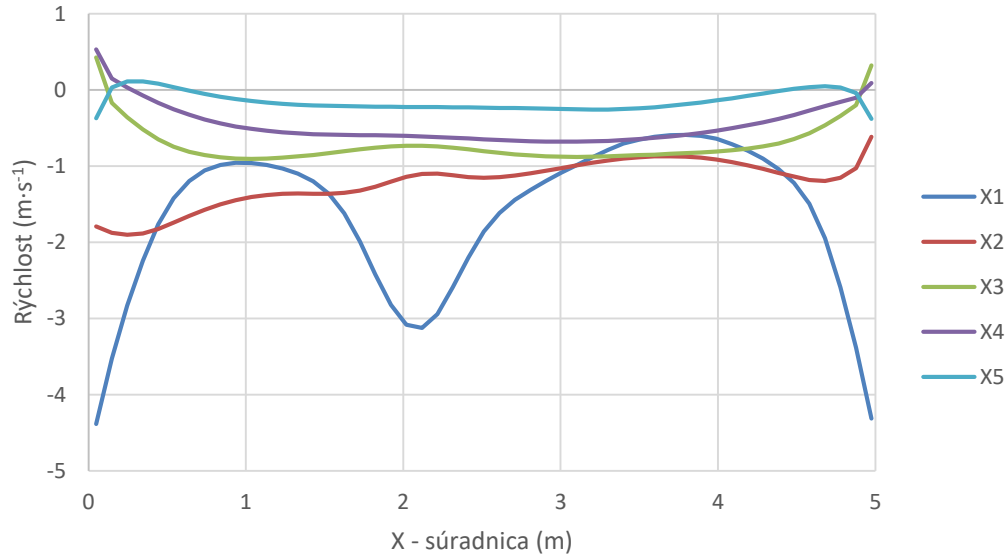
$$\Delta T = \frac{\dot{Q} \cdot t}{cp \cdot \rho \cdot A_{tr}} = 5,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11)$$

kde  $\dot{Q} = 40442 \text{ W/m}$  je merný tepelný výkon na jednotku dĺžky trubky,  $cp = 460 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  je merná tepelná kapacita materiálu trubky,  $\rho = 7870 \text{ kg/m}^3$  je hustota materiálu trubky,  $A_{tr} \text{ (m}^2\text{)}$  je plocha prierezu trubky.

V tranzientnom režime bola úloha simulovaná po dobu 0,9 s, čo je trojnásobná dĺžka zádržnej doby. Následne boli nasimulované ďalšie dve zádržné doby 0,6 s so zapnutým zapisovaním štatistík veličín za účelom ich priemerovania v tejto dobe.

### 3.6.4 Obmedzenia 2D simulácie

Keďže došlo k zjednodušeniu úlohy z 3D na 2D simuláciu, vnáša to do simulácie istú mieru nepresnosti. Pri zadávaní okrajovej podmienky rýchlosti bola, z dôvodu prechodu z 3D prostredia do 2D, zanedbaná X zložka rýchlosti (viď obrázok 20).



Obr. 20 X zložka rýchlosti na vstupe do jednotlivých rezov prehrievača.

Toto zjednodušenie preto vnáša do výpočtu istú mieru nepresnosti, ktorú znázorňuje graf na obrázku 21. Nepresnosť je vyjadrená v percentuálnom pomere zanedbanej rýchlosti voči celkovej rýchlosti. Hodnota odchýlky je v reze X5 (3,6 %), X4 (11,1 %) a X3 (17,3 %) je rádovo v jednotkách percent a je preto považovaná za minimálnu chybu. Pri reze X2 však už chyba narastá na 28,4 % a najväčšia chyba je v reze X1, kde dosahuje hodnotu 66,1 %. Nakoľko je odchýlka v použitej rýchlosti pri rezoch X2 a X1 už značná, bolo nutné overenie jej vplyvu na prestup tepla do trubky. To bolo vykonané na základe porovnania vplyvu rozdielu rýchlosti na koeficient prestupu tepla pomocou Nusseltovho čísla. Výpočet bol vykonaný pomocou Nusseltovho čísla pre trubkový zväzok s pomocou rovníc podľa [17]:

$$Nu_b = f_A \cdot Nu \quad (12)$$

$$Nu = 0,3 + (Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (15)$$

kde  $Nu_b(-)$  je Nusseltovo číslo pre zväzok trubiek,  $Nu(-)$  je Nusseltovo číslo pre jednu radu trubiek,  $f_A(-)$  je faktor zohľadňujúci usporiadanie trubiek v trubkovom zväzku,  $Nu_{lam}(-)$  je Nusseltovo číslo pre laminárne prúdenie,  $Nu_{turb}(-)$  je Nusseltovo číslo pre turbulentné prúdenie,  $Re(-)$  je Reynoldsovo číslo a  $Pr(-)$  je Prandtlovo číslo.



Následne bola pomocou tohto Nusseltovho čísla dopočítaná hodnota koeficientu prestupu tepla a porovnaná s hodnotou koeficientu prestupu tepla po ponížení rýchlosti o zanedbanú hodnotu.

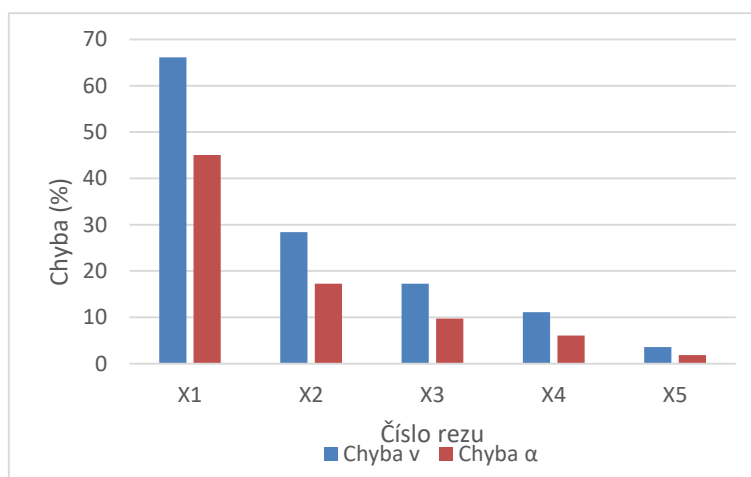
$$\alpha = \frac{Nu_b \cdot \lambda}{L_{char}} \quad (16)$$

kde  $\alpha$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) je koeficient prestupu tepla,  $\lambda$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) je tepelná vodivosť a  $L_{char}$  (m) je charakteristický rozmer ( $L_{char} = d \cdot \pi/2$ )

Ako je zrejmé z tabuľky 7 a grafu na obrázku 21, vplyv zanedbania X zložky rýchlosti na koeficient prestupu tepla (a tým aj na tepelný výkon) pri rezoch X5, X4, X3, a taktiež X2 je minimálny, rádovo v jednotkách percent. V reze X1 sa však chyba pri zanedbaní X zložky rýchlosti značne prejavila aj na koeficiente prestupu tepla. Nakoľko v tejto oblasti nie je predpoklad kritickej oblasti, tento rez nie je simulovaný.

Tab. 7 Vplyv zanedbania X zložky rýchlosti na koeficient prestupu tepla.

Rez č.		X1	X2	X3	X4	X5
<b>Chyba v</b>	(%)	66,1	28,4	17,3	11,1	3,6
<b>Chyba <math>\alpha</math></b>	(%)	45,05	17,25	9,76	6,08	1,85

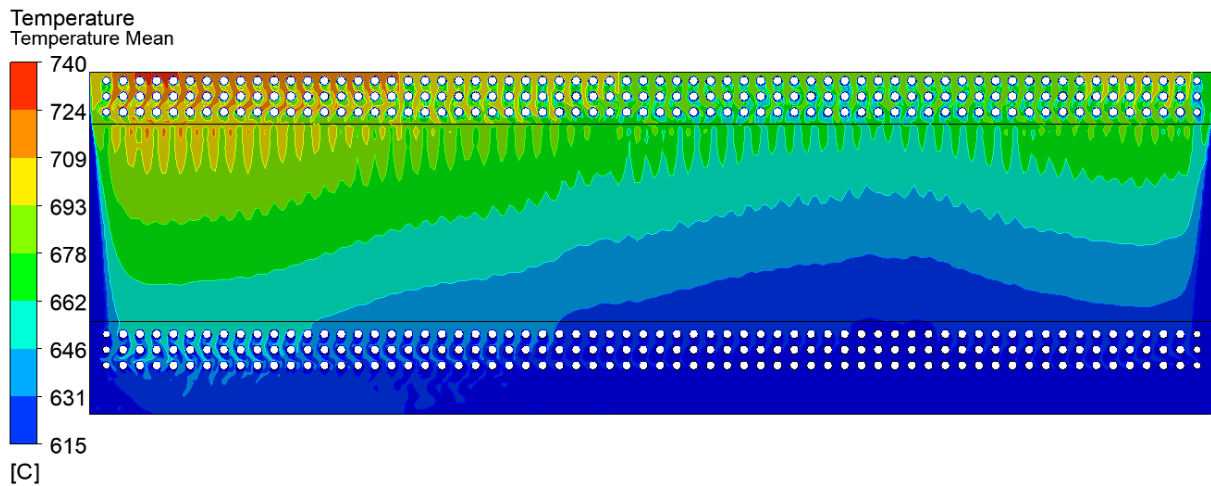


Obr. 21 Graf chyby pri zanedbaní X zložky rýchlosti a jej vplyvu na koeficient prestupu tepla v jednotlivých rezoch.

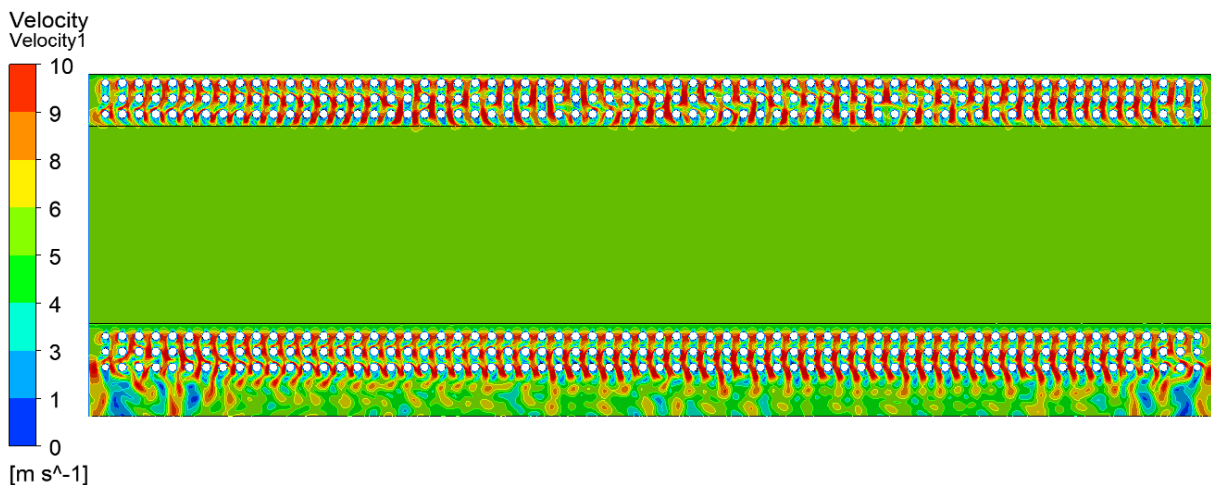
### 3.6.5 Výsledky 2D simulácie pre rez X5

V nasledujúcej kapitole budú popísané výsledky 2D simulácie pre rez X5, ktorý je simulovaný ako prvý. Výsledky zvyšných troch rezov X4, X3 a X2 sú zobrazené v prílohe A.

Pri určovaní teplotného zaťaženia jednotlivých trubiek pomocou 2D simulácie je z obrázkov 22 a 23 zrejmé, že najviac zaťažované sú trubky v ľavej hornej časti, kde je na základe vstupných okrajových podmienok najvyššia teplota a taktiež rýchlosť spalín. Následné ďalšie rady trubiek nie sú už natoľko teplotne namáhané, nakoľko prúd spalín už (z dôvodu odberu tepla parou) nemá takú vysokú teplotu.

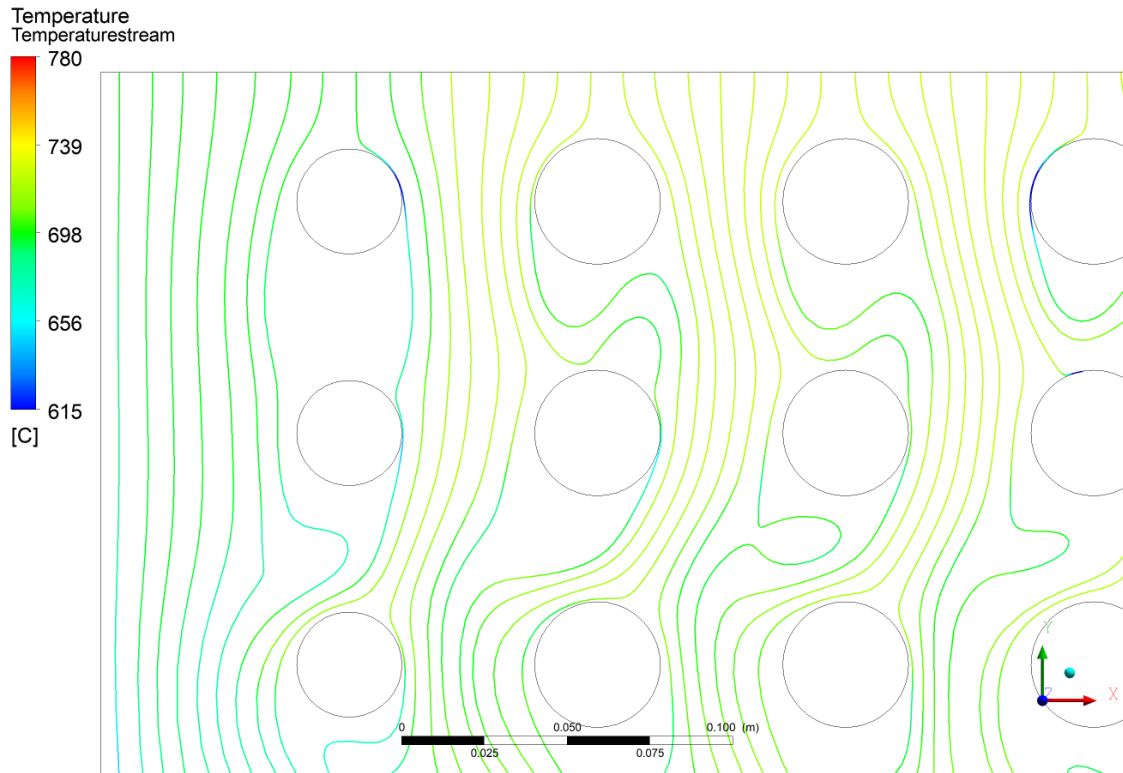


Obr. 22 Výsledné teplotné pole na reze prehrievaču X5. Smer toku spalín zhora.

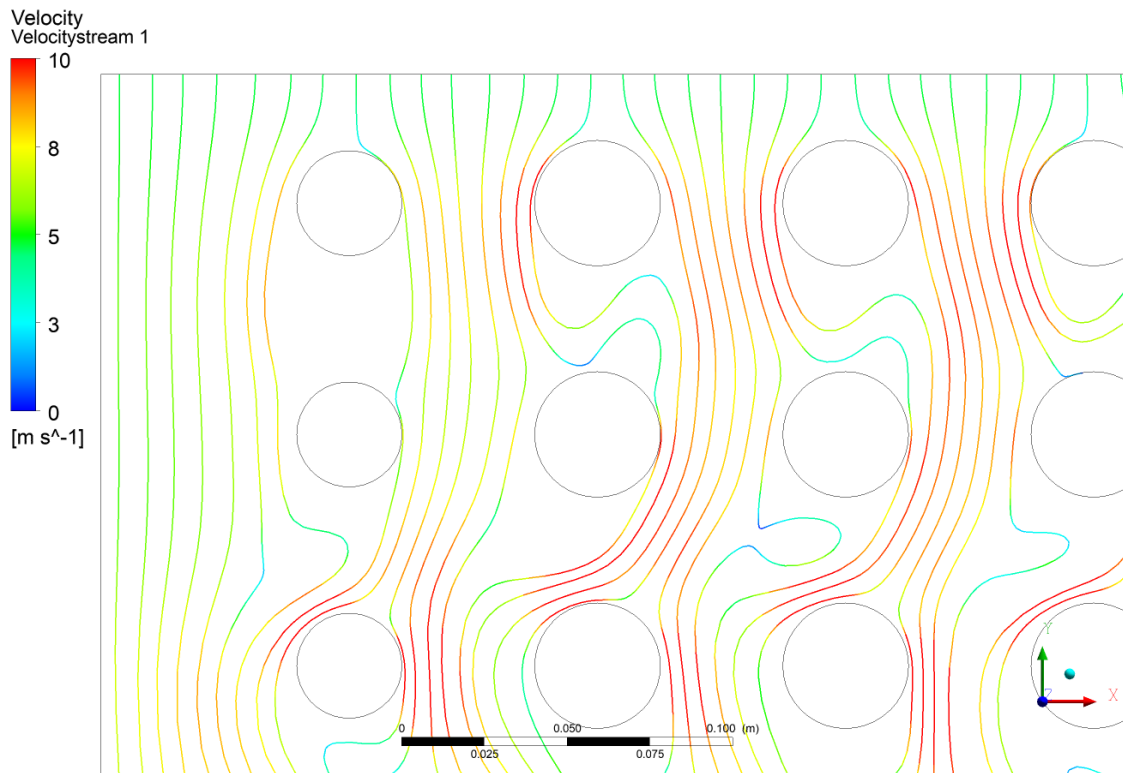


Obr. 23 Výsledné rýchlostné pole na reze prehrievaču X5. Smer toku spalín zhora.

Z obrázkov 22 a 23 je tiež zjavné, že teplotné zaťaženie každej trubky nie je rovnomerné, čo je detailne znázornené prúdniciami na obrázku 24 a obrázku 25. Prúd spalín je jednotlivými trúbkami „rozbíjaný“ a na nasledujúce trubky pôsobí vždy z iného smeru, čo spôsobuje nerovnomernosť toku, turbulencie a vznik vírov za trúbkami.



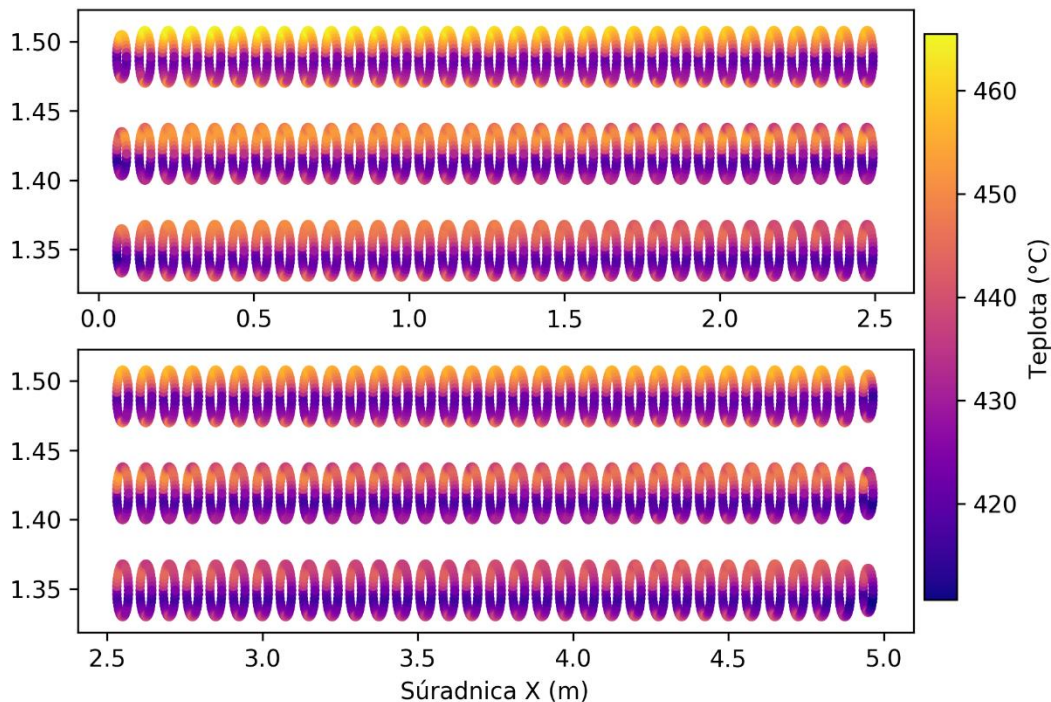
Obr. 24 Prúdnice spalín so zvýraznenou teplotou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X5. Smer toku spalín zhora.



Obr. 25 Prúdnice spalín so zvýraznenou rýchlosťou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X5. Smer toku spalín zhora.

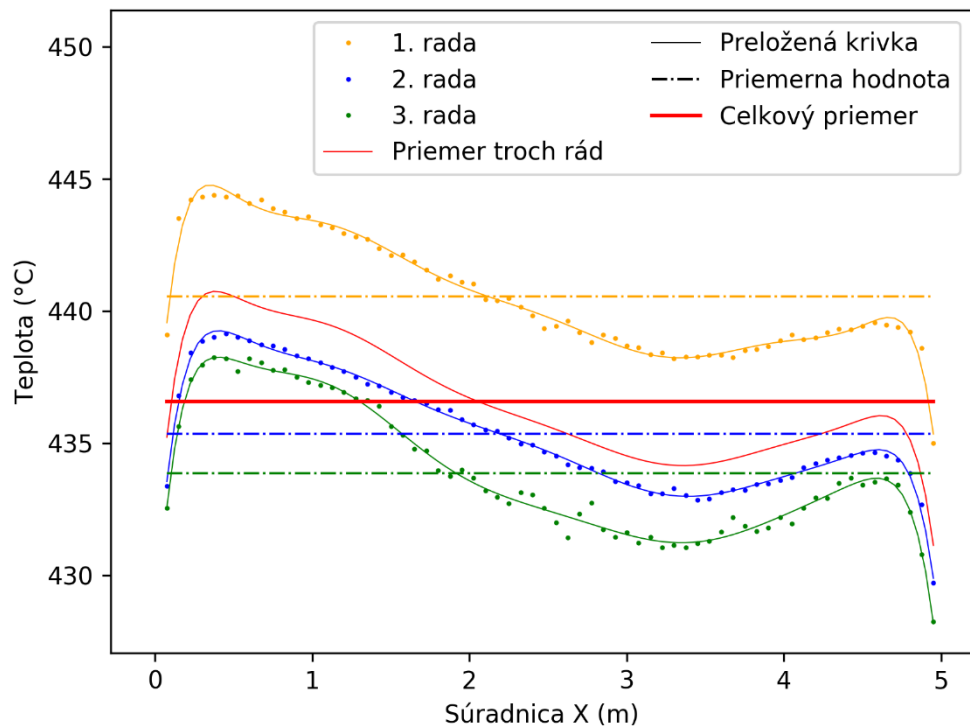
Z obrázkov 22 a 23 je taktiež evidentné, že horné tri rady trubiek prehrievača sú teplotne zaťažované oveľa viac ako spodné tri rady, čo je spôsobené smerom toku horúcich spalín a faktom, že v dolnej časti prehrievača sú už spaliny čiastočne ochladené. Z tohto dôvodu sú následné hodnoty povrchových teplôt hodnotené pre horné tri rady trubiek.

Teplota na vonkajšom povrchu jednotlivých trubiek je znázornená na obrázku 26, čo len dokazuje nerovnomerné zaťaženie trubiek. Prvý rad trubiek má, z dôvodu priameho pôsobenia spalín, najteplejšiu hornú časť trubiek, avšak pri trubkách v ďalších radoch sa už najteplejšie miesto presúva. Má nato vplyv nerovnomerný tok spalín, ako aj spomínané vírivé prúdy v úplave za trubkami.



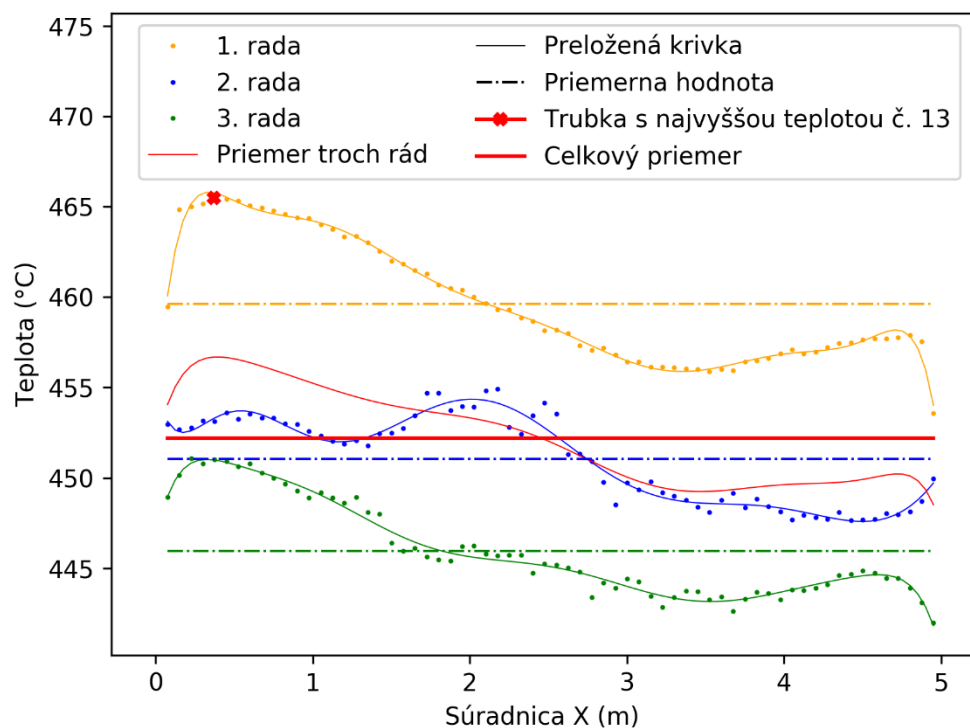
Obr. 26 Povrchové teploty na troch horných radoch trubiek prehrievača v reze X5 (pre prehľadnosť rozdelené na ľavú polovicu – hore a pravú polovicu – dole). Smer toku spalín zhora.

Keďže každá z trubiek je zaťažovaná rozdielne, bola teplota po obvode trubky prepočítaná na priemernú hodnotu teplotného zaťaženia pre každú z trubiek. Tieto hodnoty znázorňuje graf na obrázku 27. Graf taktiež znázorňuje priemernú hodnotu v horných troch radoch trubiek (tenká plná červená čiara), priemer priemerných hodnôt pre jednotlivé rady trubiek (bodkočiarkovaná čiara) a celkovú priemernú teplotu v horných troch radoch trubiek prehrievača (hrubá plná červená čiara).



Obr. 27 Graf priemerných povrchových teplôt na každej trubke prvých troch rád zväzku, ako aj priemerná teplota trubiek v jednotlivých radoch rezu X5.

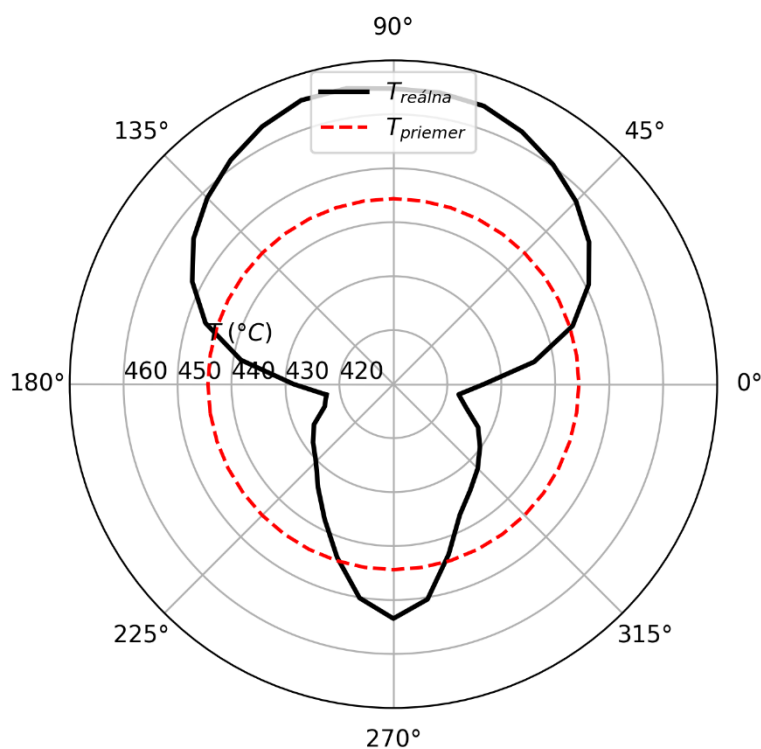
Pre konzervatívnejšie hodnotenie trubiek prehrievača však boli vyjadrené maximálne hodnoty na každej z trubiek a sú znázornené grafom na obrázku 28. Pre každú z trubiek bola táto hodnota vyjadrená ako maximálna teplota po obvode bez ohľadu na obvodovú súradnicu.



Obr. 28 Graf maximálnych povrchových teplôt trubiek prvých troch rád zväzku, priemerné maximálne teploty trubiek v jednotlivých radoch rezu X5, ako aj zvýraznená najteplejšia trubka.

Graf taktiež znázorňuje maximálnu hodnotu v horných troch radoch trubiek (tenká plná červená čiara), priemer maximálnych hodnôt pre jednotlivé rady trubiek (bodkočiarkovaná čiara), celkovú priemernú hodnotu maximálnych teplôt v horných troch radoch trubiek prehrievača (hrubá plná červená čiara), ako aj najteplejšiu trubku (symbol „X“). V prípade rezu X5 je najviac zaťažovaná trubka číslo 13 nachádzajúca sa v prvom rade na piatej pozícii zľava.

Pre konzervatívne hodnotenie životnosti prehrievača sa práca následne zameriava práve na túto najviac zaťažujúcu trubku. Graf znázornený na obrázku 29 znázorňuje teplotu po obvode trubky (čierna hrubá čiara). Je zrejmé, že teplota na hornej strane trubky, kde majú spaliny najväčšiu intenzitu, je najväčšia a maximum tu dosahuje 465,5 °C. Po rozbití prúdu spalín však ich intenzita po bokoch trubky je nižšia, čo dokazuje aj pokles teploty o takmer 50 °C. V spodnej časti teplota trubky opäť narastá z dôvodov zmieňovaných vyššie.



Obr. 29 Graf znázorňujúci vonkajšiu povrchovú teplotu najviac zaťažovanej trubky č.13 v reze X5, ako aj jej priemernú hodnotu. Smer toku spalín zhora.

Teplotné zaťaženie pre rezy X4, X3 a X2, ako aj obvodové teploty pre najviac zaťažované trubky v týchto rezoch sú znázornené v prílohe A. Najviac zaťažovaná trubka v reze X4, je to trubka číslo 1, nachádzajúca sa v prvom rade na prvej pozícii zľava s teplotou 466,6 °C, v reze X3 je to taktiež trubka číslo 1, nachádzajúca sa v prvom rade na prvej pozícii zľava s teplotou 469,6 °C a v reze X2 je to trubka číslo 1, nachádzajúca sa v prvom rade na prvej pozícii zľava s teplotou 470,3°C. Z týchto hodnôt vyplýva, že najviac zaťažovaná trubka je prvá trubka v prvom rade s najvyššou povrchovou teplotou dosiahnutou v reze X2.

## 4 Určenie creepovej životnosti a tepelného výkonu trubiek prehrievača

Pri zariadeniach ako sú prehrievače nie je poškodenie vplyvom zvýšenej teploty vôbec výnimočné. Ako bolo spomenuté v kapitole 2.1, poškodenie vplyvom teploty je možné ďalej rozdeliť na poškodenie krátkodobým, poprípade dlhodobým prehriatím a creep.

### 4.1 Určenie poškodenia krátkodobým a dlhodobým prehriatím

Krátkodobé prehrievanie je rozdeľované do troch skupín na základe teploty v dobe poškodenia na podkritické, stredne kritické a nadkritické. Keďže použitým materiálom je oceľ 12022.1, hodnoty kritickej transformačnej teploty sú 727 °C (dolná hranica) a 843 °C (horná hranica) [18]. Nakoľko najvyššia dopočítaná teplota 470,3 °C (trubka číslo 1 rez X2) je oveľa nižšia ako dolná hranica kritickej transformačnej teploty, je možné predpokladať, že k poškodeniu krátkodobým prehriatím nedôjde za predpokladu zachovania prevádzkových podmienok.

K dlhodobému prehrievaniu dochádza v prípade prekročenia návrhovej teploty materiálu po dobu dní, mesiacov až rokov. Návrhovú teplotu materiálu možno dohľadať napríklad v štandarde API Std 530 [19]. Použitý materiál 12022 je približne zrovnateľný s oceľou A 106B a na základe vyššie uvedenej normy spadá tento materiál do kategórie ocelí so stredným obsahom uhlíka (Medium-carbon steel). Následne sú materiály spadajúce do tejto kategórie typovo zaradené do triedy „B“, pre ktoré je limitná návrhová teplota materiálu 540 °C. V prípade výsledných dopočítaných povrchových teplôt však v súčasnosti nemožno predpokladať poškodenie ani dlhodobým prehriatím, nakoľko maximálna povrchová teplota, ako bolo spomenuté, dosahuje teploty len 470,3 °C, pričom návrhová teplota materiálu je 540 °C. K poškodeniu vplyvom dlhodobého prehriatia by však mohlo dôjsť v prípade vzniku nánosov na vnútornej strane trubky prehrievača, čo by malo za následok nedostatočné chladenie steny trubky, a teda aj zvýšenie teploty materiálu.

### 4.2 Creep

Creep, niekedy nazývaný aj tečenie materiálu, možno charakterizovať ako časovo závislé plastické pretvorenie materiálu pri konštantnom tlaku za zvýšenej teploty. Jedná sa v podstate o sklon tuhého materiálu k pomalému pohybu a následne trvalej deformácii pri pôsobení namáhania za zvýšených teplôt. Creep je dôsledkom dlhodobého vystavenia materiálu zvýšenému napätiu, ktoré je však stále pod hodnotou medze klzu, pričom k väčšiemu poškodeniu creepom dochádza v prípade vystaveniu materiálu zvýšeným teplotám.

Miera poškodenia materiálu je závislá na niekoľkých faktoroch, ktorými sú hlavne samotné materiálové vlastnosti, čas, teplota a napätie, ktorému je materiál vystavený. K samotnému poškodeniu creepom neprichádza okamžite po začiatku pôsobenia napätia, ale práve naopak. Pretvorenie sa prejaví až po jeho dlhodobom pôsobení. Creep preto možno považovať za časovo závislé poškodenie materiálu. Všeobecne sa uvádza, že ku creepu začne dochádzať pri dosiahnutí 35 % teploty tavenia materiálu. Pri niektorých materiáloch však môže dôjsť ku creepu aj pri nižších teplotách. Skvelým príkladom je napríklad tečenie ľadovca v horských oblastiach, kde vlastne dochádza ku creepu ľadu. [20]

Creep možno popísať pomocou creepovej krivky, ktorá znázorňuje závislosť pomerného predĺženia na čase pri danej teplote (viď obrázok 30). Možno ju rozdeliť na tri časti [21, 22]:

*Primárny creep* – tiež známy ako prechodový creep. Rýchlosť creepovej deformácie je v tejto fáze pomerne vysoká, avšak s rastúcim časom a deformáciou klesá v dôsledku deformačného spevnenia, obdobného procesu akým je vytvrdzovanie pri nižších teplotách.

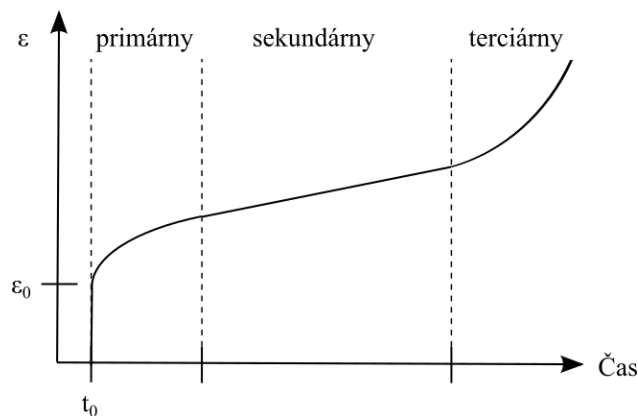
*Sekundárny creep* – tiež známy ako ustálený creep. V tejto fáze sa rýchlosť creepovej deformácie zníži na minimum a je takmer konštantná, čo je spôsobené relatívnou rovnováhou medzi deformačným spevnením a zmäkčovaním. Konštantná rýchlosť je typicky charakterizovaná pomocou tzv. rýchlosti creepového predĺženia. Na jej popis sa bežne používa model odvodený pánom Baileyom a Nortonom [23, 24].

$$\varepsilon_{cr} = A \cdot \sigma^n \cdot t^m \quad (17)$$

kde  $A$  ( $\text{MPa}^{-n} \text{h}^{-m}$ ) je súčiniteľ deformačného spevňovania pri creepe,  $n$  (-) a  $m$  (-) sú teplotne závislé materiálové konštanty,  $\sigma$  (MPa) je napätie a  $t$  (h) je čas.

V oboch vyššie spomínaných štádiách creepu nedochádza k strate pevnosti materiálu.

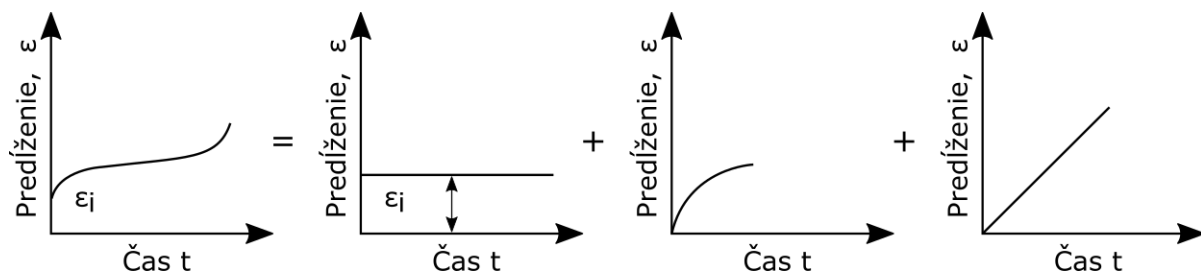
*Terciárny creep* – v poslednej fáze dochádza k exponenciálnemu nárastu rýchlosti creepovej deformácie. Je zapríčinená mikroštruktúrnymi zmenami a mechanickou nestabilitou, pričom značný vplyv majú aj lokálne poruchy. Následne sa začne zmenšovať plocha prierezu (dochádza k tvorbe tzv. krčku), pričom taktiež dochádza k nárastu napätia v tomto reze. Ako dôsledok straty pevnosti materiálu dochádza v tejto fáze creepu k trvalej deformácii, čo často vedie až k lomu.



Obr. 30 Graf znázorňujúci fázy creepového mechanizmu.

Vyššie uvedenú creepovú krivku je možné vytvoriť superpozíciou (viď tiež obrázok 31):

Celkové pretvorenie = počiatočné pretvorenie + prechodový creep + ustálený creep



Obr. 31 Graf superpozície creepovej krivky [25].

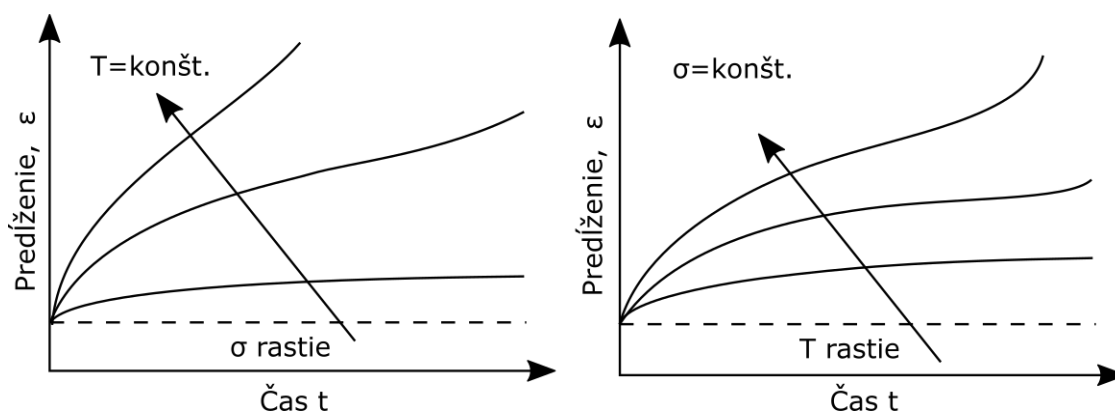


Celkové pretvorenie je možné vyjadriť taktiež pomocou vzťahu:

$$\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_t \cdot (1 - \exp(-r \cdot t)) + t \cdot \dot{\varepsilon}_{ss} \quad (18)$$

kde  $\varepsilon_i$  (-) je počiatočné pomerné predĺženie,  $\varepsilon_t$  (-) je pomerné predĺženie pri prechode z primárneho do sekundárneho creepu,  $r$  ( $s^{-1}$ ) je konštanta pre prechodový creep,  $\dot{\varepsilon}_{ss}$  ( $s^{-1}$ ) je rýchlosť pretvorenia ustáleného creepu a  $t$  (s) je čas.

Tvar creepovej krivky a dĺžka trvania jednotlivých fáz sú silne závislé od hodnôt napätia a teploty, čo je znázornené na obrázku 32. Je zrejmé, že s rastúcim napätím a teplotou rastie význam tretieho štádia creepu, avšak primárne a sekundárne sa zmenšujú, až takmer eliminujú. Naopak, pri poklese napätia a teploty klesá význam terciárnej fázy, avšak narastá význam primárnej a sekundárnej fázy. [26]

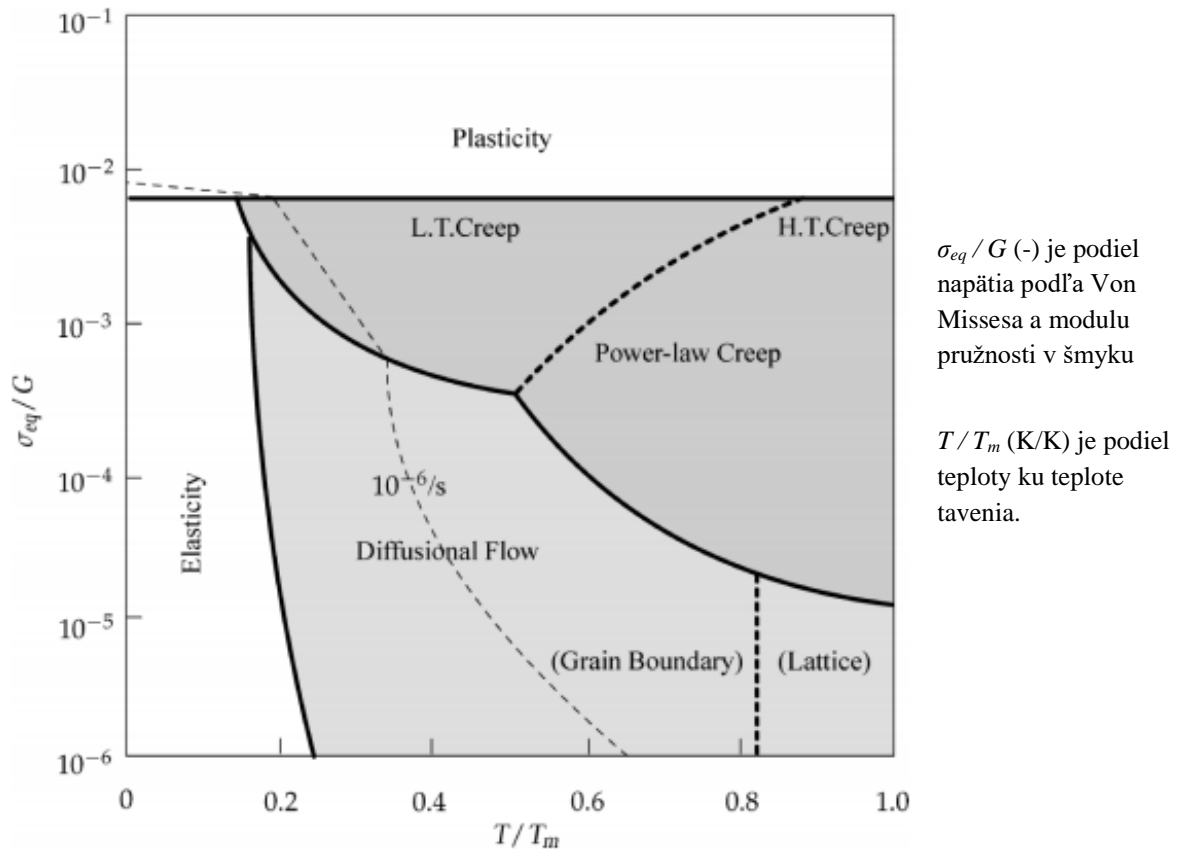


Obr. 32 Vplyv rastúceho napätia (vľavo) a teploty (vpravo) na tvar creepovej krivky [26].

Pri kovových materiáloch s kryštalickou mriežkou môžeme deformačné mechanizmy rozdeliť do niekoľkých skupín [27]:

- Dislokačný sklz bez zotavenia* (pri malých rýchlostiach);
- Dislokačný creep* – creep riadený zotavením, difúzia dislokácií;
- Difúzny creep* – difúzia bez účasti mriežkových dislokácií;
- Iné.*

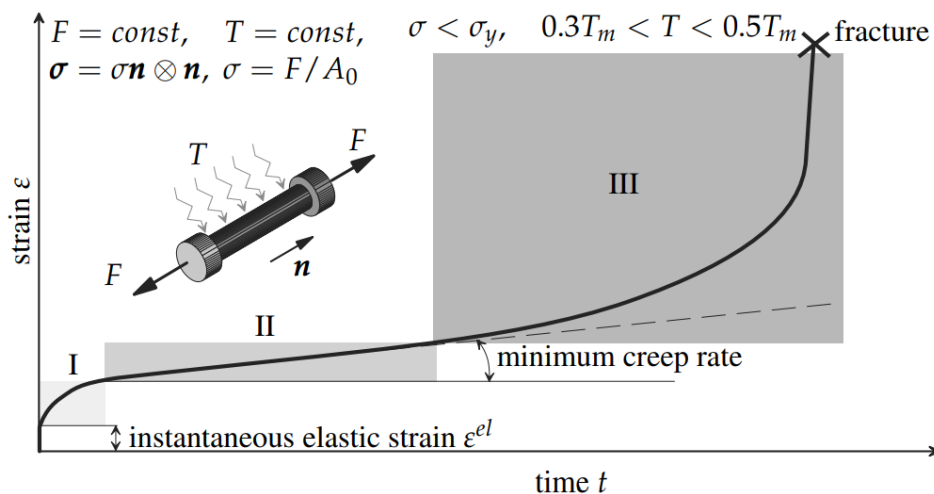
Zaradenie do skupiny je možné na základe deformačnej mapy (takzvanej Ashbyho mapy – viď obrázok 33), ktorej konštrukcia predpokladá vzájomnú nezávislosť jednotlivých deformačných mechanizmov. Každá z oblastí mapy teda reprezentuje jeden z deformačných mechanizmov, pričom na hraniciach sú prítomné oba mechanizmy súčasne. [27]



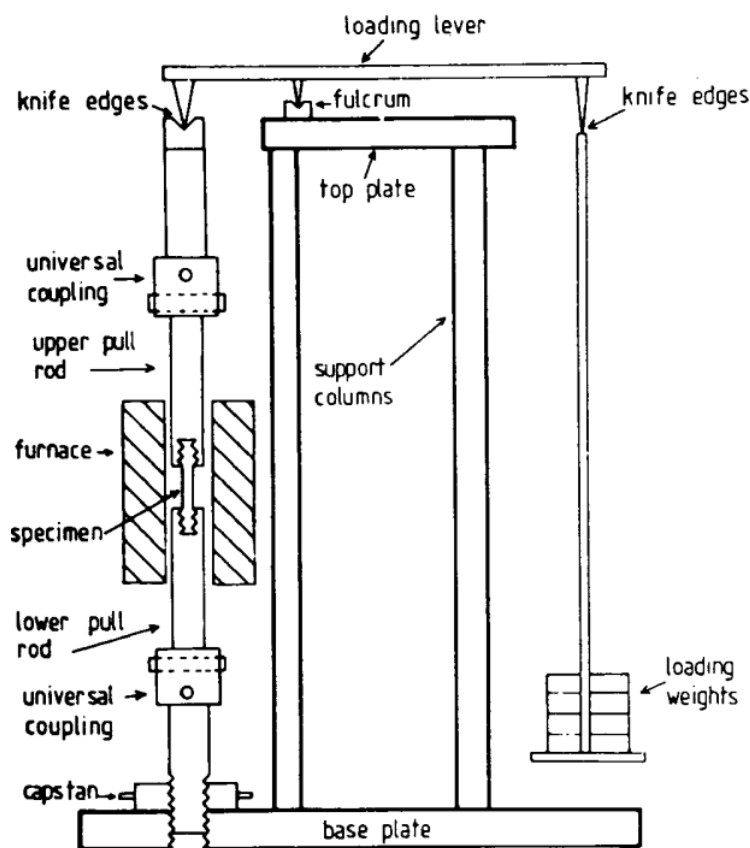
Obr. 33 Zjednodušená mapa deformačných mechanizmov (takzvaná Ashbyho mapa) [26].

#### 4.2.1 Spôsoby merania creepu

Pri získavaní kompletých pevnostných vlastností materiálu patrí creepová skúška (nazývaná tiež skúška tečenia) medzi základné testy. Obvykle je vykonávaná pri konštantnej teplote a následne buď pri konštantnom zaťažení, alebo pri konštantnom napätí. V praxi je rozšírenejšia metóda, pri ktorej je konštantné zaťaženie, ktoré je dosiahnuté pomocou závažia, ktoré na skúmanú vzorku pôsobí cez páku. Schéma tohto zariadenia je znázornená na obrázku 35.



Obr. 34 Graf získavania krivky predĺženia v závislosti na čase pri konštantnej teplote a konštantnom zaťažení silou podľa [26].



Obr. 35 Schéma typického zariadenia pre creepovú skúšku podľa [25].

Na túto skúšku je použitá valcová vzorka materiálu ohriata na konštantnú teplotu, ktorej hodnota je 0,3 – 0,5 násobok teploty tavenia materiálu. Následne je vzorka zaťažená konštantnou silou  $F$ . Hodnota normálového napätia je obvykle oveľa nižšia ako je hodnota medze klzu a z toho dôvodu je chovanie materiálu elastické. Vzorka je zaťažovaná po určitú dobu a predĺženie je následne vynášané do spomínaného grafu v závislosti na čase (viď obrázok 34). [26]

Test obvykle trvá 10 % požadovanej doby (obvykle 2 000 – 10 000 hod) čo znamená, že pri teste pre 100 000 h je vzorka za zvýšenej teploty zaťažovaná 10 000 hod, následné hodnoty sú získané pomocou extrapolácie. Výsledkom creepovej skúšky je presný tvar creepovej krivky, z ktorej možno odčítať niekoľko dôležitých materiálových vlastností, ktorými sú napríklad doba trvania každej z troch fáz, minimálna rýchlosť tečenia, čas do lomu a hodnota deformácie pred lomom. Pri teste tečenia nemusí vždy dôjsť k lomu skúmanej vzorky. [26]

#### 4.2.2 Vyhodnocovanie creepu na základe noriem

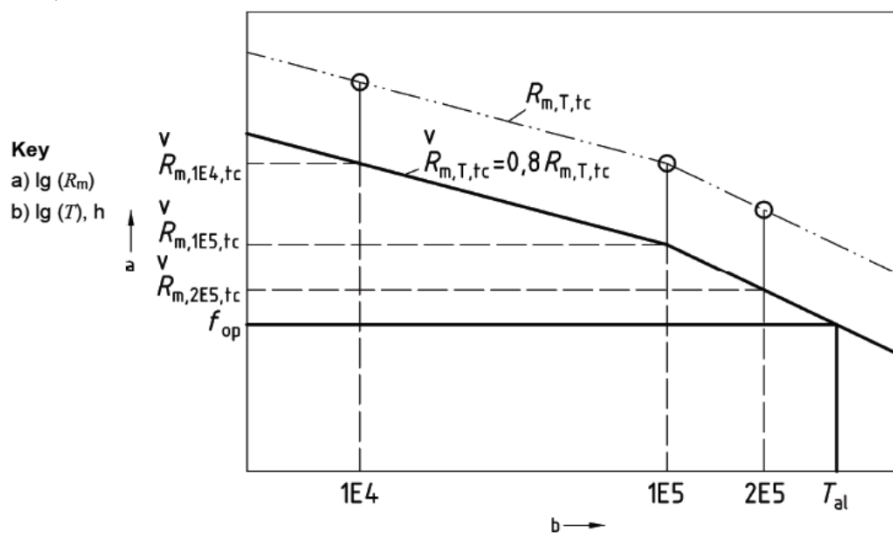
Pre vyhodnocovanie creepu existuje niekoľko rôznych noriem, z ktorých má každá svoj vlastný prístup k tejto problematike. Jednou z rozšírených noriem pre vyhodnocovanie creepu je norma EN 13 445-3[28], ktorá je však určená pre netopené tlakové nádoby. Ďalšími normami pre skúmanie creepu je napríklad britská norma BS 7910 [28] a API 579 [29]. Nakoľko práca je zameraná na skúmanie časti vodotrubného parného kotla, na vyhodnocovanie creepu v ňom sa vzťahuje európska norma EN 12 952-4 [29]. Obdobnou normou s porovnateľným prístupom je tiež nemecká norma TRD 508 [31]. Prístupy oboch noriem budú preto teraz porovnané.

a) *Vyhodnocovanie creepu na základe normy EN 12952-4* [30]. Daná norma sa tečením materiálu zaoberá vo svojej prílohe A, v ktorej popisuje postup výpočtu poškodenia kotla a jeho hlavných súčastí creepom počas prevádzky. Výpočet je založený na nameraných hodnotách teploty a tlaku, ktoré sú použité pre výpočet primárneho napätia a následne očakávanej doby života. Pri určovaní poškodenia vplyvom creepu sa používa súčiniteľ využitia vplyvom tečenia materiálu, ktorý berie do úvahy históriu prevádzky. Jeho výpočet sa realizuje pri značne namáhaných súčastiach na základe nameraných teplôt a manometrických tlakov. Pre jednoznačnejšiu reprezentáciu výsledkov a minimalizáciu počtu požadovaných výpočtov sú tieto teploty a tlaky rozdelené do niekoľkých tried hodnotenia. Pre výpočet celkového prevádzkového poškodenia tečením materiálu sa využívajú:

- Trieda hodnotenia
- Prevádzková teplota na výstupe súčasti;
- Výpočtový tlak;
- Výpočtová teplota;
- Teoretická creepová životnosť vzhľadom k priemernej teplote steny;
- Uplynulá prevádzková doba;
- Poškodenie tečením materiálu pre danú triedu za vyhodnocované obdobie.

Výpočet membránového napätia  $f_{op}$  v najzaťaženejšom mieste súčasti je následne počítaný z priemerného tlaku každej z tried. V prípade, že prevádzkový tlak nie je priebežne meraný, nie je nutné rozdeľovať ho do tried a je možné použiť prevádzkový tlak pre 100 % zaťaženia, čím sa dosiahne konzervatívnejších výsledkov.

Teoretická doba života  $T_{al}$  sa počíta pre každú triedu zvlášť. Jej hodnota sa stanovuje z priesečníku priamky  $f_{op}$  a dolnej medznej krivky medze pevnosti pri tečení materiálu (viď obrázok 36).



Obr. 36 Diagram stanovenia teoretickej doby života materiálu  $T_{al}$  podľa [30].

Podiel poškodenia vplyvom tečenia materiálu pre každú z tried sa určí ako:

$$\Delta D_{cik} = \frac{T_{op}}{T_{al}} \quad (19)$$

kde  $\Delta D_{ci k}$  (-) je podiel poškodenia materiálu tečením,  $T_{op}$  (h) je doba prevádzky pri prevádzkových podmienkach a  $T_{al}$  (h) je doba do dosiahnutia teoretického porušenia materiálu tečením.

Celkové poškodenie tečením materiálu v priebehu hodnoteného obdobia  $D_c$  sa stanoví na základe pravidla lineárneho poškodenia súčtom pre všetky triedy teplôt a tlakov ako:

$$D_c = \sum_i \sum_k \Delta D_{ci k} \quad (20)$$

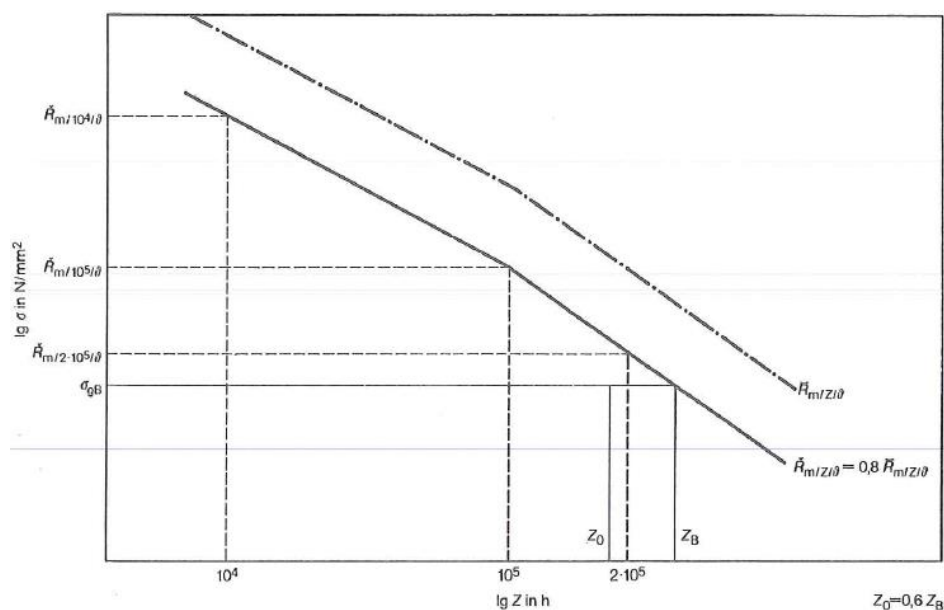
- b) *Vyhodnocovanie creepu na základe normy TRD 508* [31]. Postup výpočtu creepovej životnosti podľa tejto normy je totožný s predchádzajúcim prístupom na základe normy EN 12952-4 [30]. Mierne odlišne však pristupuje k výpočtu prírastku poškodenia creepom:

$$e_{z,k} = \frac{Z_{\vartheta/p}}{Z_B/\vartheta/p} \cdot 100 \quad (21)$$

kde  $e_{z,k}$  (%) je percento poškodenia materiálu tečením za hodnotený časový úsek,  $Z_{\vartheta/p}$  (h) je doba prevádzky pri určitej teplote a tlaku a  $Z_B/\vartheta/p$  (h) je návrhová životnosť pri určitej teplote a tlaku. Následne sa celkové percentuálne poškodenie creepom  $e_z$  (%) určí:

$$e_z = \sum_k e_{z,k} \quad (22)$$

Graf na obrázku 37 znázorňuje stanovenie hodnoty  $Z_0$  (h), čo je doba prevádzky do začatia špeciálnych kontrolných meraní, a taktiež stanovenie hodnoty  $Z_B$  (h), čo je návrhová životnosť komponentu.

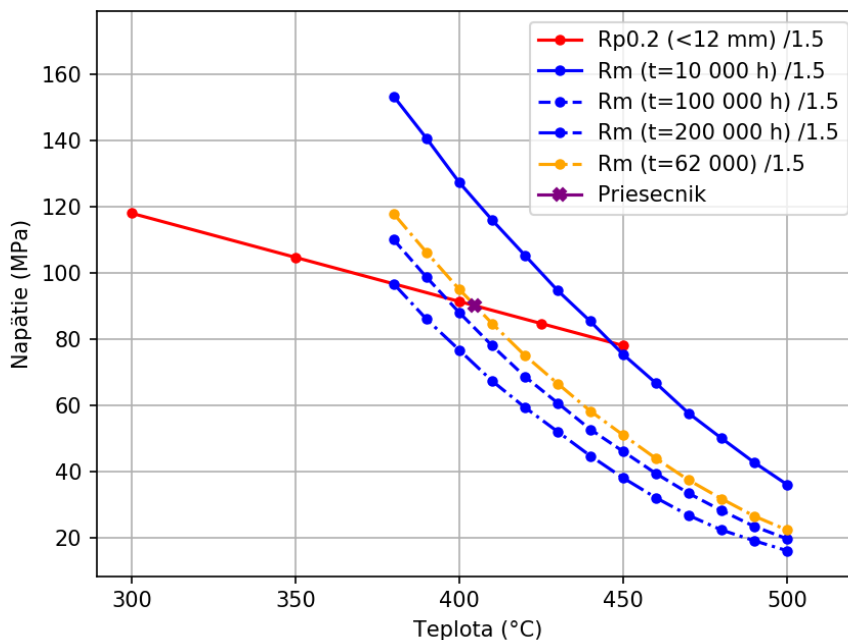


Obr. 37 Diagram stanovenia  $Z_0$  a  $Z_B$ . [31]

### 4.2.3 Možnosť zanedbania creepu

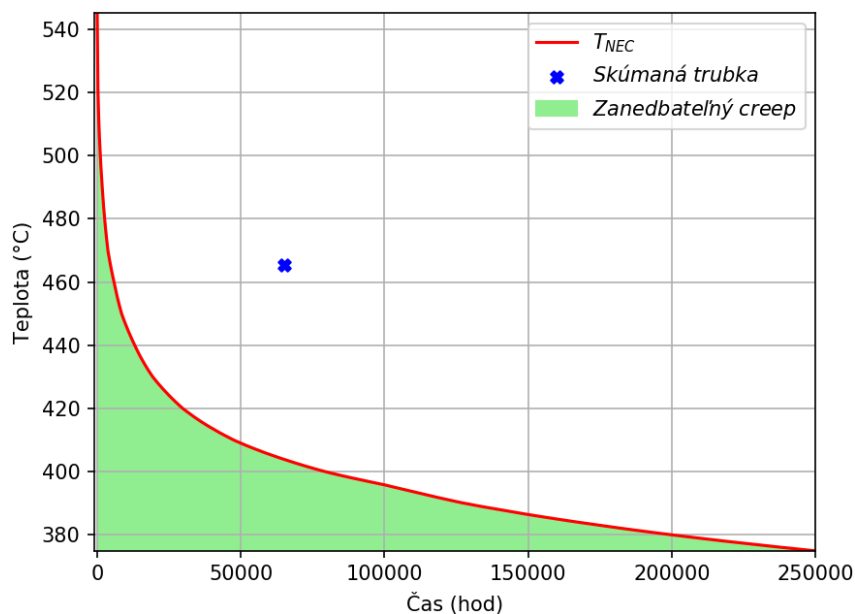
Pri návrhu alebo hodnotení zariadenia v oblasti creepu je za určitých podmienok, na základe priemyselnej praxe, možné creep zanedbať. Pravidlo ako určiť oblasť, v ktorej je možné creep zanedbať, však nie je spomínané ani v norme EN 12952-4 [29], ani v TRD 508 [31]. Prístup pre určenie oblasti pre zanedbanie je však popísaný v dokumente CEN/TC 54/WG 59 [32, 33].

Metóda popísaná v tomto dokumente, ktorá je ďalej využitá aj v tejto práci, je graficko-analytická metóda. Jej cieľom je určenie krivky hraničnej teploty, pri ktorej môže dôjsť k zanedbaniu creepu  $T_{NEC}$ . Hodnoty medze klzu  $R_{p0,2}$  a medze pevnosti  $R_{m/t/T}$  pri 10 000, 100 000 a 200 000 h sú v prvom kroku podelené bezpečnosťou 1,5 a následne vynesené do grafu. V našom konkrétnom prípade boli dopočítané a následne vynesené do grafu aj hodnoty medze pevnosti pri 62 000 h (taktiež podelené hodnotou bezpečnosti 1,5), čo je reálna doba prevádzky skúmaného zariadenia. Priesečník krivky medze klzu a medze pevnosti pri reálnej dobe prevádzky (viď graf na obrázku 38) určuje hraničnú teplotu, pod ktorou je možné creep zanedbať. Pre skúmanú dobu prevádzky 62 000 h je  $T_{NEC} = 404,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Keďže v skúmanom prípade je trubka číslo 13 (v reze X5) zaťažovaná teplotou až  $465,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nie je možné creep zanedbať a je nutné sa creepovou životnosťou zaoberať.



Obr. 38 Graf stanovenia hraničnej teploty zanedbateľného creepu pre použitý materiál 12022.1 po 62 000 h prevádzky.

Pri určovaní  $T_{NEC}$  pre jednotlivé materiály sa postupuje tak, že získané priesečníky medze klzu  $R_{p0,2}$  a medza pevnosti  $R_{m/t/T}$  pri 10 000, 100 000 a 200 000 h sú použité pre vytvorenie krivky závislosti teploty  $T_{NEC}$  a času. Pre skúmaný materiál 12022.1 však bolo pre získanie presnejšej krivky vytvorených 1000 priesečníkov a tie boli následne vynesené do grafu znázorneného na obrázku 39.



Obr. 39 Krivka hraničnej teploty  $T_{NEC}$  vymedzujúca oblasť s možnosťou zanedbania creepu počas doby prevádzky pre materiál 12022.1.

Pri hodnotení, či je možné creep pre daný materiál zanedbať, treba postupovať tak, že pre danú teplotu a čas sa vynesie do grafu príslušný bod. V prípade, že sa bod nachádza pod krivkou (v zelenej vyznačenej časti), je možné creep zanedbať a naopak, pokiaľ sa nachádza nad krivkou (mimo zelenej vyznačenej časti) je nevyhnutné kontrolu na poškodenie creepom vykonať. Umiestnenie skúmanej trubky č. 13 je na grafe znázornené modrým bodom.

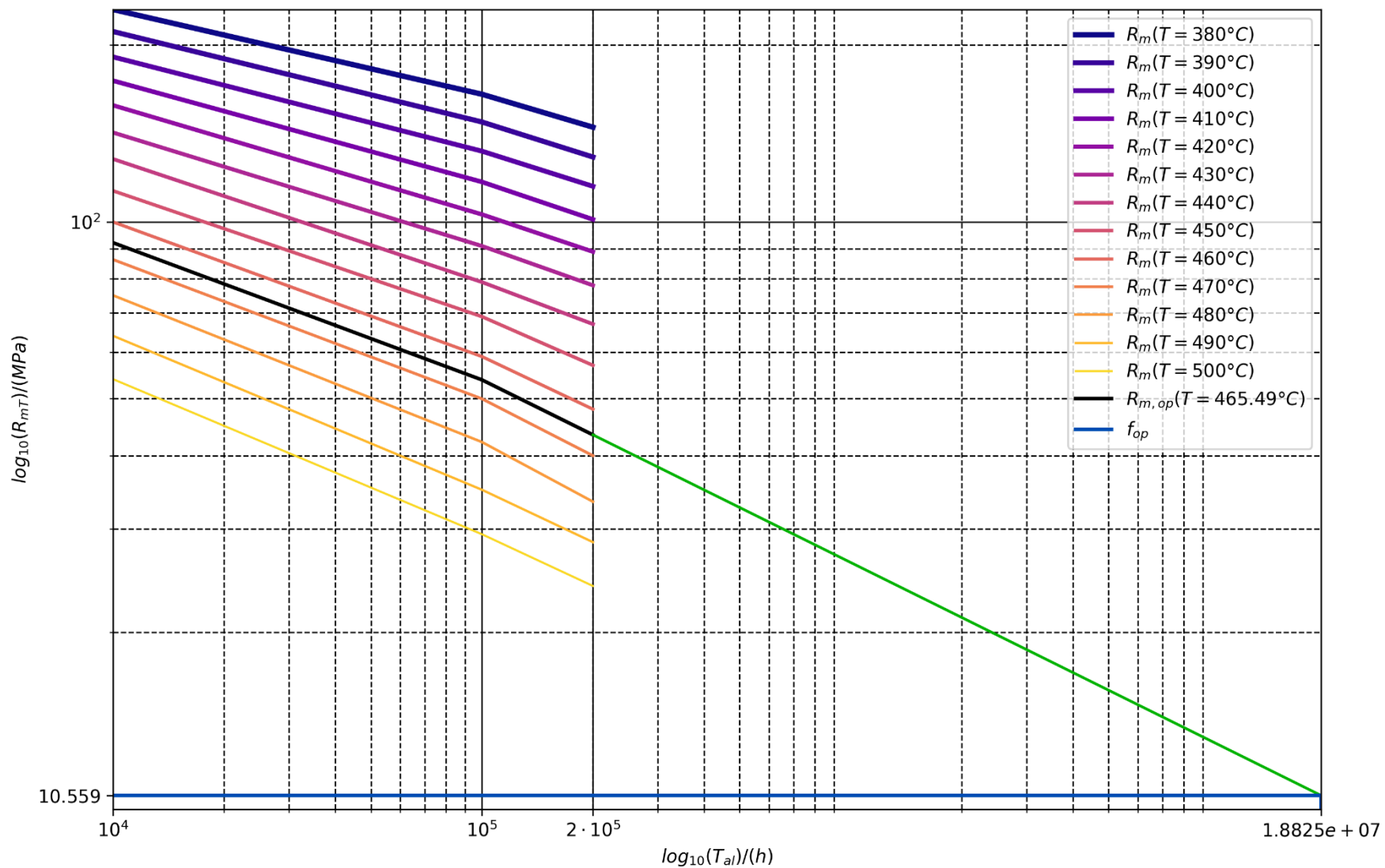
#### 4.2.4 Vyhodnotenie creepovej životnosti trubiek prehrievaču

Nakoľko sa skúmaná trubka prehrievača nachádzala nad krivkou zanedbania creepu, bolo nevyhnutné vykonať kontrolu creepovej životnosti. Kontrola bola vykonaná na základe normy ČSN EN 12952-4 [30], ktorej hodnotenie bolo realizované pomocou programovacieho jazyka Python. Ako bolo spomínané, výpočet odhadovanej zvyškovej životnosti vplyvom tečenia materiálu bol v reze X5 vykonaný pre najviac zaťaženuú trubku č. 13 vyrobenú z materiálu 12022.1.

V prvom kroku bol na základe materiálových charakteristík vytvorený graf creepovej životnosti. Následne by mala nasledovať interpolácia medzi známymi krivkami. Nakoľko však zaťaženie síce bolo v creepovej teplote ale napätie bolo príliš nízke, hodnotené miesto (doba prevádzky 62 000 hod, teplota 465,5 °C a tlak 3,65 MPa) sa nachádzalo mimo známych creepových charakteristík materiálu. Pomocou interpolácie bolo teda nutné vytvoriť krivku reprezentujúcu logaritmickú závislosť napätia na čase do konca životnosti pri skúmanej teplote a následne, na základe posledných dvoch známych hodnôt, ju pomocou extrapolácie predĺžiť. V ďalšom kroku bola vypočítaná hodnota pôsobiaceho napätia v materiáli  $f_{op}$  (MPa) na základe vzťahu:

$$f_{op} = p_{in} \cdot \frac{d_{in} + e_{mat}}{2 \cdot e_{mat}} \quad (23)$$

kde  $p_{in}$  (MPa) je vnútorný tlak v trubke,  $d_{in}$  (m) je vnútorný priemer trubky a  $e_{mat}$  (m) je hrúbka materiálu (hrúbka steny trubky). Výsledná hodnota napätia  $f_{op}$  je 10,56 MPa.



Obr. 40 Graf hodnotenia creepovej životnosti pre materiál 12022 a rez X5.

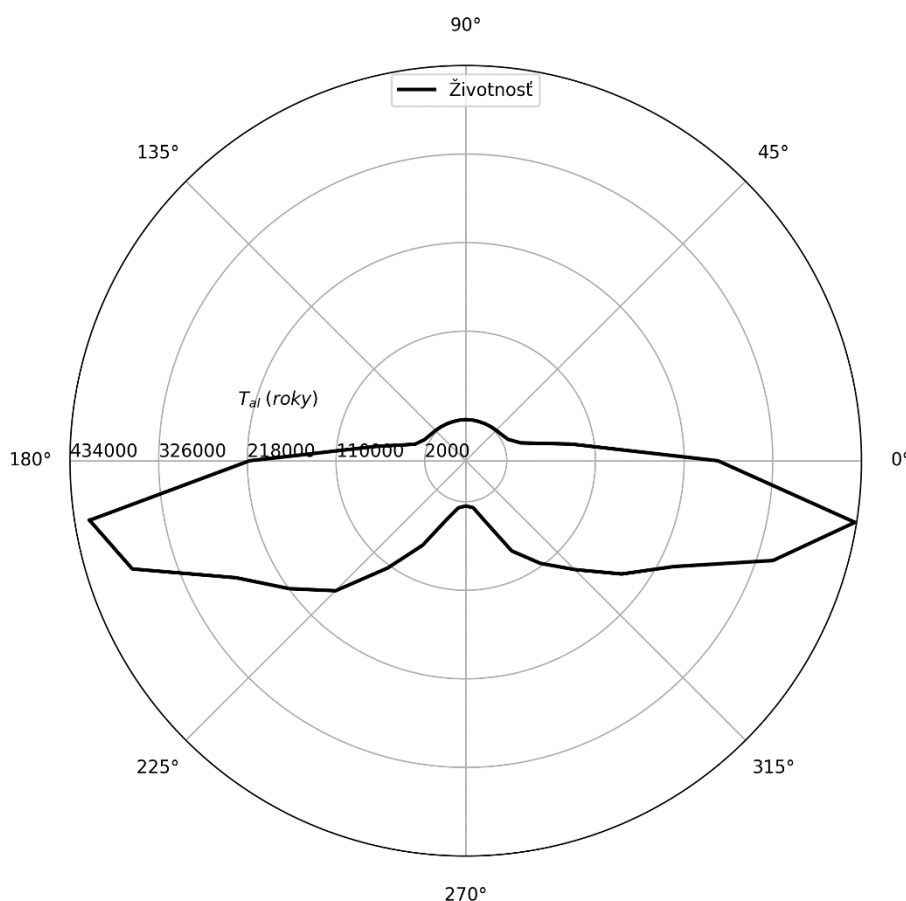


Výsledná životnosť bola následne určená na základe priesečníku novovytvorenej krivky reprezentujúcej logaritmickú závislosť napätia na čase do konca životnosti pri skúmanej teplote  $R_{m,op}$  a priamky pôsobiaceho napätia  $f_{op}$ , znázornených na obrázku 40. Na základe priesečníku je zrejmé, že životnosť kontrolovanej trubky č. 13 v reze X5 je  $1,88 \cdot 10^7$  h (cca 2148 rokov), čo je viac ako postačujúce a poškodenie vplyvom creepu tak v tomto prípade nebude limitujúcim faktorom.

Grafy pre určenie životnosti najviac zaťažených trubiek pre zvyšné rezy sú následne znázornené v prílohe B. Vypočítaná životnosť najviac zaťažených trubiek pre jednotlivé rezy je následne znázornená v tabuľke 8. Z daných hodnôt je zrejmé, že ani v prípade rezov X4, X3 a X2 nie je poškodenie vplyvom creepu problémom a životnosť je v porovnaní s rezom X5 obdobná.

Tab. 8 Creepová životnosť najviac zaťažených trubiek prehrievača pre jednotlivé rezy.

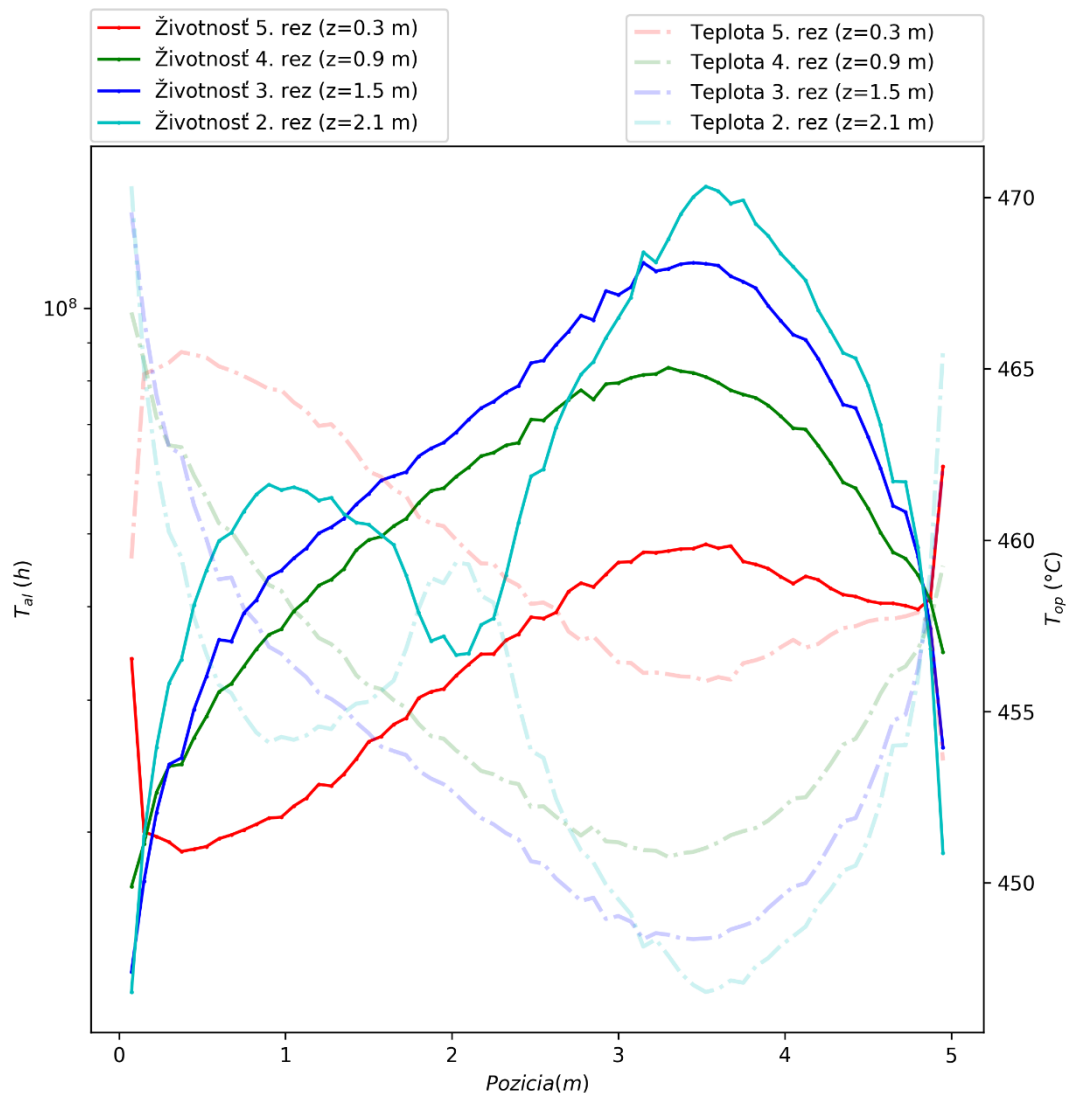
Rez č.		X2	X3	X4	X5
Trubka č.		1	1	1	13
Životnosť	(h)	$1,22 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^7$	$1,69 \cdot 10^7$	$1,88 \cdot 10^7$
Životnosť	(rokov)	1394	1484	1929	2148



Obr. 41 Graf znázorňujúci zvyškovú creepovú životnosť po obvodu najviac zaťažovanej trubky č.13 v reze X5. Smer toku spalín zhora.

Pre detailnejšie určenie životnosti najviac zaťaženej trubky boli na základe predchádzajúceho postupu dopočítané hodnoty zvyškovej životnosti v jednotlivých bodoch po obvode. Z grafu na obrázku 41 je zrejmé, že predpokladaná creepová životnosť trubky č. 13 v reze X5 bude v ostatných bodoch po obvode, z dôvodu nižšej teploty zaťaženia, značne väčšia. V prípade zvyšných rezov X2, X3 a X4 sú výsledky obdobné a sú znázornené v grafoch v prílohe B.

Následne pre určenie životnosti všetkých trubiiek prehrievača boli dopočítané creepové životnosti v najviac zaťažovaných bodoch pre každú trubku. V grafe na obrázku 42 je znázornené porovnanie zvyškovej životnosti (plnou čiarou) prvej rady trubiiek pre jednotlivé rezy. V grafe je taktiež znázornené teplotné zaťaženie pre prvú radu trubiiek v jednotlivých rezoch (bodkočiarkovaná čiara). Je zjavné, že celkovo je životnosť v reze X5 najnižšia, nakoľko sú trubky najviac teplotne zaťažované. Niektoré trubky z rezov X2, X3 a X4 sú však teplotne zaťažované viac, a preto ich životnosť je nižšia. Najvyššia životnosť prvého radu trubiiek je v reze X2, ktorý je ako celok teplotne najmenej zaťažovaný. Rovnaké porovnanie bolo vykonané aj pre druhý a tretí rad trubiiek s obdobnými výsledkami, ktoré sú znázornené v grafoch v prílohe B.



Obr. 42 Graf porovnávajúci zvyškovú creepovú životnosť a maximálnu teplotu pre jednotlivé trubky prvej rady (rezy X2, X3, X4 a X5).

### 4.3 Prevencia pred creepom

Vo svojej podstate existujú tri základné spôsoby prevencie pred creepom [21]:

- *Použitie materiálu s vyššou teplotou tavenia.* Pre prevenciu pred creepom je nutné znížiť rýchlosť difúzie materiálu, čo je jedným z hlavných mechanizmov zmeny štruktúry ku ktorému dochádza. Voľba materiálu s vyššou teplotou tavenia je dôsledok toho, že teplota tavenia je priamoúmerná aktivačnej energii difúzie.
- *Použitie materiálu s väčšou veľkosťou zrna.* V prípade, že dominantným creepovým deformačným mechanizmom je difúzia, nárast veľkosti zrna značne znižuje rýchlosť creepu, nakoľko je rýchlosť creepu nepriamoúmerná druhej mocnine (popríklad tretej, v závislosti na type creepu) priemeru zrna.
- *Pomocou legovania materiálu.* V prípade, že hlavným creepovým deformačným mechanizmom je dislokácia, zohráva dôležitú úlohu modul pružnosti v šmyku. Čím vyššia je hodnota modulu pružnosti v šmyku, tým je materiál ťažšie deformovateľný a bude mať väčšiu creepovú odolnosť. Tento spôsob prevencie však vzhľadom na nižší vplyv dislokačného mechanizmu v porovnaní s difúznym nie je až taký efektívny.

## 5 Rozšírenie o imperfekcie na vonkajšom alebo vnútornom povrchu trubky

Počas prevádzky môže pri teplotnom zaťažení trubky dôjsť k dvom extrémnym prípadom, a síce, že na vnútornej strane vznikne oxidová vrstva, poprípade drobná vrstva nánosov, ktorá zabráni správne mu chladeniu trubky a dôjde k jej prehriatiu. Druhým prípadom je naopak oxidová vrstva, poprípade vrstva nánosu na vonkajšej strane trubky (na strane spalín), ktorá naopak pôsobí ako izolant a zabraňuje správne mu prenosu tepla do pary a znižuje tak tepelný výkon.

### 5.1 Oxidová vrstva na vnútornej strane trubky

Vplyvom imperfekcie, konkrétne oxidovej vrstvy na vnútornej strane trubky, sa s využitím pokročilých metód hodnotenia zaoberal článok [34], ktorý je v tejto kapitole popísaný. Pozornosť bola zameraná na skúmanie creepovej životnosti trubky rovnakého prehrievača, akému sa venuje táto práca. Článok bol obmedzený na jednu zvolenú trubku v prvom rade prehrievača.

Keďže creepová životnosť ocelí je silne ovplyvňovaná teplotou, bola realizovaná celková teplotná analýza trubky vyrobenej z ocele 12022.1. Bola hodnotená trubka z prvej rady prehrievača, patriaca medzi najviac exponované. Jedná sa o trubku TR38×5,6, ktorej rozmery pre výpočtový model boli korigované na základe tolerancií z normy ČSN 426710 [35].

Teplota na reze trubkou sa nachádza v rozmedzí teploty spalín na vonkajšej strane a teploty pary na vnútornej strane trubky, pričom závisí na niekoľkých faktoroch, najmä:

- Tepelnej vodivosti a hrúbke použitej ocele;
- Tepelnej vodivosti a hrúbke oxidovej vrstvy;
- Teploty, rýchlosti spalín v okolí trubky a ich ďalších vlastností;
- Teploty a rýchlosti pary vo vnútri trubky.

Teplotné pole bolo skúmané pomocou 2D modelu rezu trubky, ktorá bola následne teplotne zaťažená. Pomocou 2D CFD analýzy boli získané koeficienty prestupu tepla na strane spalín a pomocou empirických výpočtov aj na strane pary.

#### 5.1.1 Koeficient prestupu tepla na strane pary

Koeficient prestupu tepla na vnútornej strane trubky (strana pary) je na výpočtový model aplikovaný ako konštantná hodnota po obvode. V skúmanej oblasti trubky prúdi prehriata para s teplotou 369 °C a tlakom 3,56 MPa. Rýchlosť pary je 11,7 m/s, pričom charakter prúdenia je turbulentný ( $Re \sim 170\,000$ ).

Koeficient prestupu tepla je vypočítaný na základe vzťahu pre výpočet Nusseltovho čísla (viď rovnica (16)), pričom  $L_{char}$  je v tomto prípade vnútorný priemer trubky  $d_{in}$ . Samotné Nusseltovo číslo je dopočítané na základe Gnielinského vzťahu pre vnútornú stranu trubky [17]:

$$Nu = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{in}}{l_{tr}}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \quad (24)$$

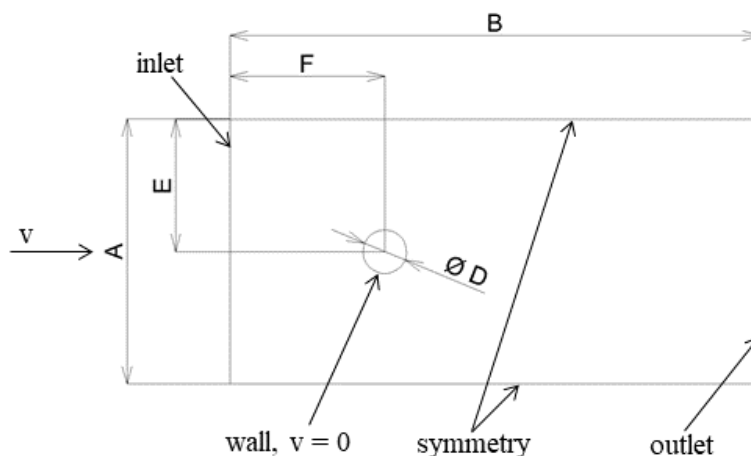
$$\xi = (1.8 \cdot \log_{10} Re - 1.5)^{-2}$$

kde  $Nu$  (-) je Nusseltovo číslo,  $Re$  (-) je Reynoldsovo číslo,  $Pr$  (-) je Prandtlovo číslo,  $d_{in}$  (m) je vnútorný priemer trubky a  $l_{tr}$  (m) je dĺžka trubky.

Výsledná hodnota koeficientu prestupu tepla vypočítaná zo vzťahu (24) a aplikovaná na vnútornom povrchu trubky má hodnotu 709,7 W/(m<sup>2</sup>·K).

### 5.1.2 Koeficient prestupu tepla na strane spalín

Koeficient prestupu tepla na strane spalín je v pokročilých výpočtových metódach považovaný za funkciu uhlu po obvodu trubky. Rozloženie tohto koeficientu je získané na základe zjednodušenej 2D CFD analýzy nastavenej tak, aby presne popísala von Karmanove víry v oblasti za trúbkou.



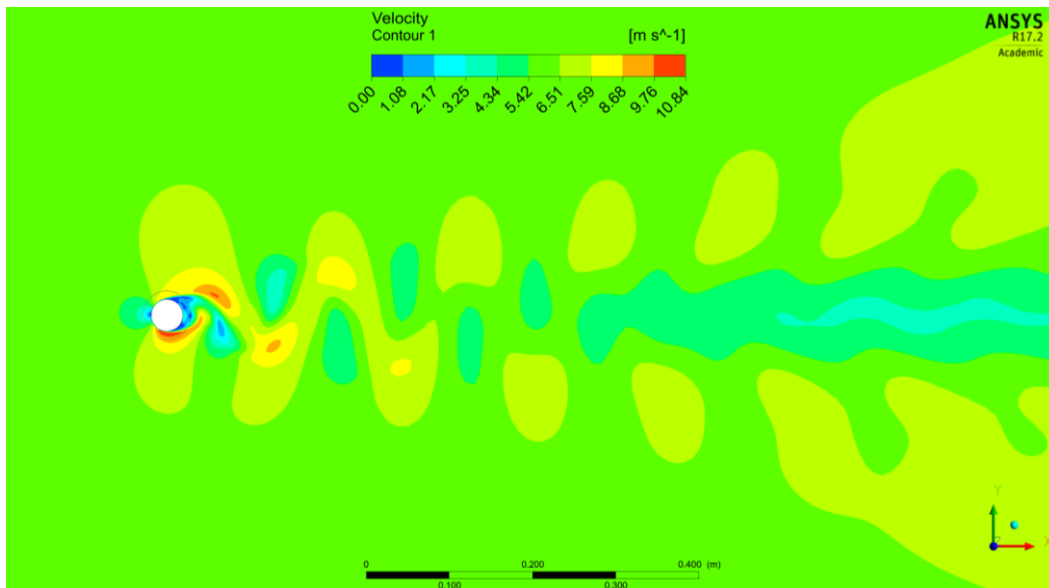
Obr. 43 Okrajové podmienky pre CFD analýzu prúdenia spalín okolo trubky ( $A = 20 \cdot D$ ,  $B = 30 \cdot D$ ,  $E = 10 \cdot D$ ,  $F = 12,5 \cdot D$ ). [34]

Na obrázku 43 sú znázornené odporúčané rozmery simulovanej domény, ako aj umiestnenie použitých okrajových podmienok [11]. Následne vytvorená výpočtová sieť pozostáva z 41 302 buniek a jej kvalita je znázornená v tabuľke 9. Je tu hodnotená kvalita bunky (element quality), miera pretiahnutia bunky (aspect ratio), skosenie (skewness) a ortogonálna kvalita (orthogonal quality).

Tab. 9 Koeficienty hodnotiace kvalitu výpočtovej siete.

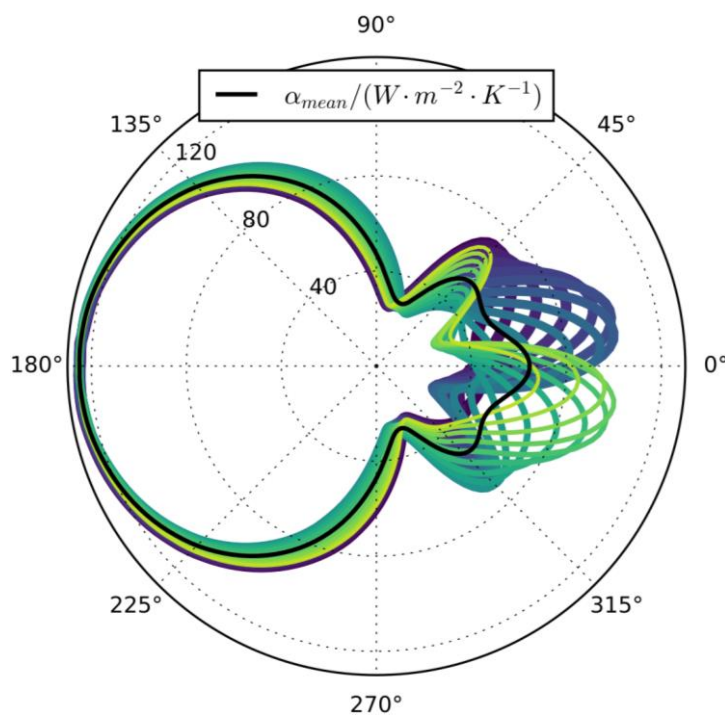
	Min	Max	Priemer
<b>Element quality</b>	0,47	1	0,99
<b>Aspect ratio</b>	1	1,95	1,03
<b>Skewness</b>	1,31e-10	0,56	1,49e-2
<b>Orthogonal quality</b>	0,68	1	0,99

Výsledkom CFD analýzy je potom koeficient prestupu tepla, ktorý však zohľadňuje len príspevok od konvekcie. V tomto prípade však hrá dôležitú úlohu taktiež radiácia [36]. Vplyv radiácie bol dopočítaný na základe tepelne-hydraulického výpočtu (kapitola 3.5.1) a konštantná hodnota po obvodu 15,9 W/(m<sup>2</sup>·K) bola pripočítaná k výsledkom z CFD simulácie.



Obr. 44 Rýchlosť spalín v okolí skúmanej trubky. Smer toku spalín zľava. [34]

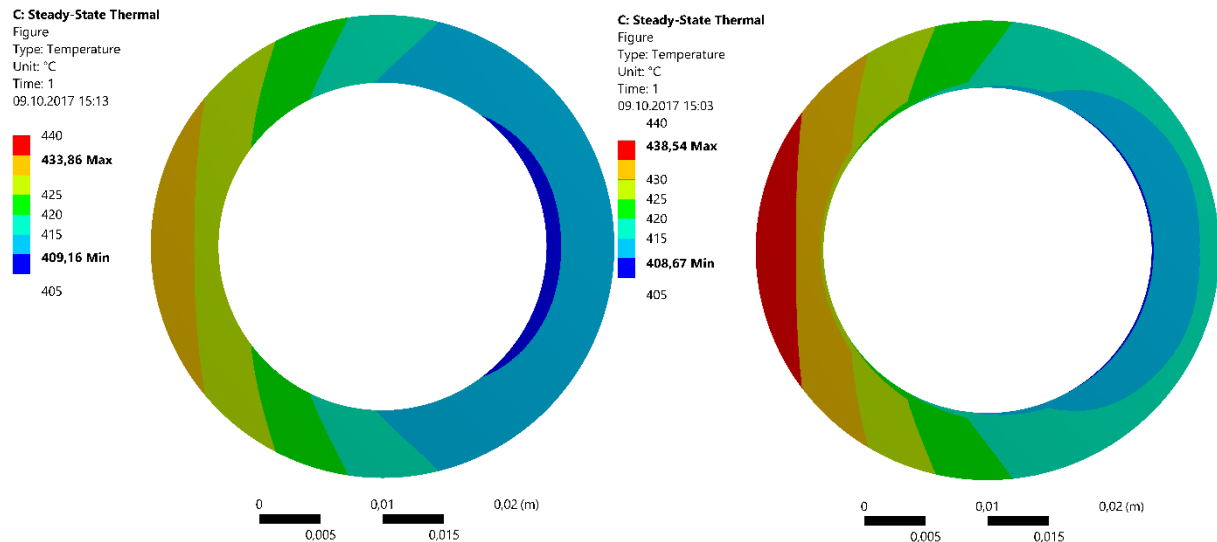
Na obrázku 44 sú znázornené vírivé prúdy v oblasti za skúmanou trubkou. Výpočet tranzientnej CFD simulácie trval do doby získania ustálenej tvorby vírov. Výstupom simulácie sú hodnoty koeficientu prestupu tepla pre životnosť jedného víru 0,0272 s. Celková hodnota koeficientu prestupu tepla, ako aj priemerná hodnota za jednotlivé časové kroky je znázornená na obrázku 45. Z obrázku je zrejmé, že najväčšia priemerná hodnota koeficientu prestupu tepla je na ľavej strane trubky, kde majú horúce spaliny najväčšiu intenzitu. Na druhej strane je hodnota koeficientu naopak podstatne nižšia, čo je spôsobené tvorbou vírov.



Obr. 45 Celkové rozloženie koeficientu prestupu tepla po obvode trubky v jednotlivých časových krokoch (farebne) a ich priemerná hodnota (čiernou farbou). Smer toku spalín zľava. [34]

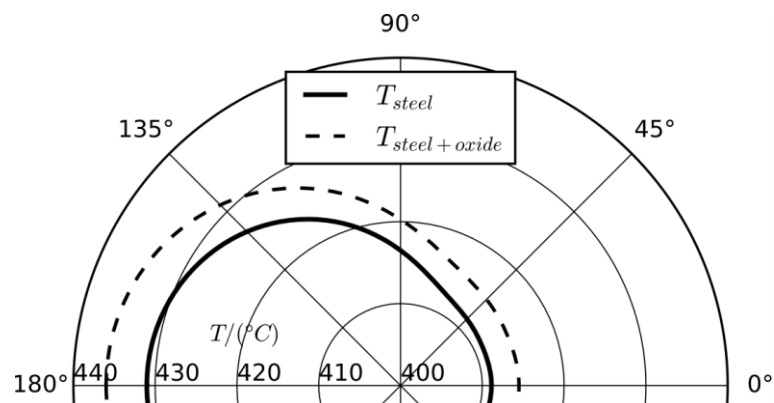
### 5.1.3 Teplotné pole na reze trubkou

Z dôvodu zámény materiálu (namiesto materiálu 15020 bol pri trubkách prehrievača použitý materiál 12022.1), je na strane pary už po 62 000 h prevádzky vyvinutá oxidová vrstva, čo bolo zistené na základe materiálového rozboru [37]. Keďže oxidová vrstva má nižšiu tepelnú vodivosť ako oceľ, je možné predpokladať vyššie priemerné teploty ocele zapríčínujúce pokles creepovej životnosti trubky.



Obr. 46 Porovnanie teplotného poľa na reze trubkou bez oxidovej vrstvy (vľavo) a s oxidovou vrstvou na vnútornej strane trubky (vpravo). Smer toku spalín zľava. [34]

Oxidová vrstva zložená z  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  s hrúbkou 0,5 mm bola simulovaná spolu s materiálom trubky v MKP analýze, pričom boli použité materiálové vlastnosti špecifické pre tento oxid [38, 39]. Výsledné teplotné polia pre prípad čistej trubky, ako aj trubky so simulovanou vrstvou oxidu, sú znázornené na obrázku 46. Je zrejmé, že teplota materiálu je na trubke so simulovanou oxidovou vrstvou (vpravo) mierne vyššia (o necelých 5 °C), čo môže ovplyvniť životnosť trubky. Pre určenie creepovej životnosti boli pre oba prípady zvolené najvyššie dosiahnuté teploty po obvode. Porovnanie maximálnych obvodových teplôt je znázornené na obrázku 47.



Obr. 47 Maximálna teplota steny trubky po obvode čistej trubky (plná čiara) a trubky s oxidovou vrstvou (prerušovaná čiara). Smer toku spalín zľava. [34]

### 5.1.4 Odhad creepovej životnosti trubky

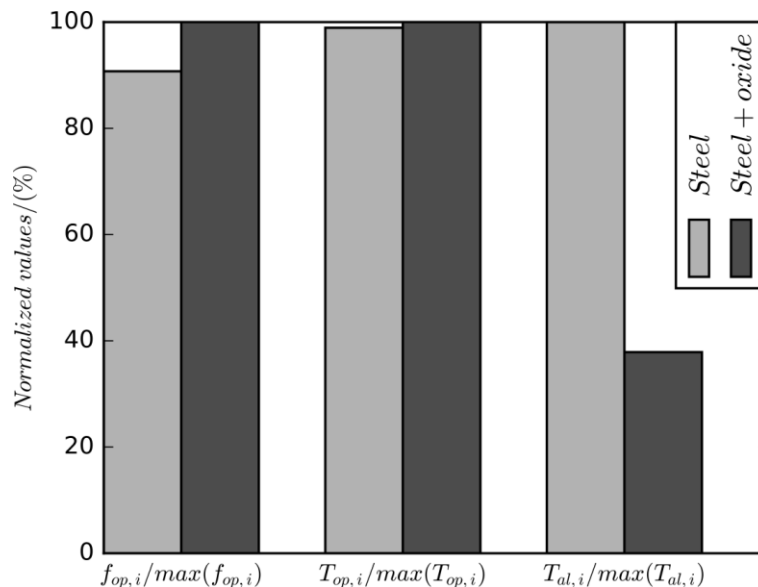
Vplyvom procesu tečenia materiálu môže dôjsť k zrovnomeniu rozloženia napätia. Preto je membránové napätie v tomto prípade považované za najvýznamnejšie z napätí ovplyvňujúcich creepovú životnosť. Teplotné zaťaženie reprezentuje (z predchádzajúcich výsledkov konzervatívne stanovená) najvyššia teplota 433,86 °C pre trubku bez oxidovej vrstvy a 438,54 °C pre trubku s oxidovou vrstvou (viď obrázok 47).

- *Určenie napätia.* Intenzita membránového napätia v stene trubky je závislá na pôsobiacom tlaku a môže byť vypočítaná podobným postupom ako v rovnici (23), konkrétne zo vzťahu:

$$f_{op} = p_c \cdot \frac{d_{os} - 2 \cdot e_{cs} + v \cdot e_{cs}}{2 \cdot v \cdot e_{cs}} \quad (25)$$

kde  $p_c$  (MPa) je výpočtový tlak (vnútorný tlak v trubke),  $d_{os}$  (m) je vonkajší priemer trubky,  $e_{cs}$  (m) je hrúbka materiálu (hrúbka steny trubky) a  $v$  (-) je koeficient stenčovania. Výsledná hodnota intenzity membránového napätia podľa vzťahu (25) je 10,605 MPa.

- *Vplyv materiálových vlastností.* Z obrázku 47 je zjavné, že maximá teplôt sú v rozmedzí 412-434 °C pre čistý materiál a 415-438 °C pre materiál s oxidovou vrstvou. Pre materiál 15020 začína teplotný rozsah pre určovanie creepovej životnosti na hranici 450 °C, čo by v prípade použitia správneho materiálu umožnilo zanedbať creep. Avšak v prípade použitého materiálu 12022.1 je táto hranica 380 °C, preto je nutné sa creepom zaoberať.
- *Odhad zvyškovej creepovej životnosti materiálu trubky.* Odhad zvyškovej creepovej životnosti je vykonaný na základe postupu z normy EN 12952-4 [29]. Výsledky relatívne porovnáva graf na obrázku 48. Z dôvodu nižšej intenzity napätia je creepová životnosť pre čistú trubku 9,64e8 h a pre trubku s oxidovou vrstvou 3,65e8 h. Obe tieto predpokladané životnosti ďaleko prevyšujú návrhovú životnosť kotla. Avšak vplyvom zistenej korózie a erózie je možné predpokladať, že po znížení hrúbky steny narastie intenzita napätia, čo povedie k značnej redukcii creepovej životnosti.



Obr. 48 Relatívne porovnanie intenzity napätia, teploty a creepovej životnosti pre čistú oceľ a oceľ s oxidovou vrstvou ( $f_{op}$  – membránové napätie pri operačných podmienkach,  $T_{op}$  – priemerná teplota,  $T_{al}$  – čas do teoretického poškodenia vplyvom creepu). [34]



### 5.1.5 Vyhodnotenie

Trubky určené na prenos tepla vo vodotrubných kotloch sú vystavené vysokým teplotám a tlakom. Oxidové vrstvy na vnútornej strane trubky prehrievača môžu teploty trubky ešte navýšiť z dôvodu nedostatočného chladenia. Taktiež môžu zapríčiniť zmenšovanie hrúbky steny trubky, čo následne vedie k nárastu membránového napätia indukovaného tlakom. Aj v prípade, že sú tieto zmeny minimálne, ich kombinácia môže mať na životnosť trubky značný vplyv, čo je zrejmé aj z grafu na obrázku 48.

### 5.2 Vrstva nánosov na vonkajšej strane trubky

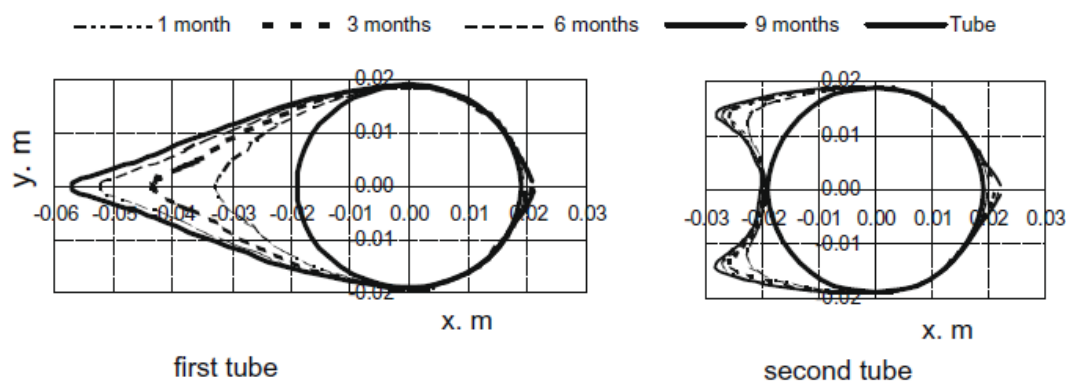
Vplyvu imperfekcie, konkrétne vrstvy nánosov na vonkajšej strane trubky, som sa venoval ako vedúci diplomovej práce Ing. K. Volnej [40]. Tvorba nánosov je spojená s nárastom nákladov na údržbu a prevádzku, z toho dôvodu je nutné tvorbu nánosov minimalizovať. Cieľom práce bolo určenie vplyvu nánosov na vonkajšej strane zväzku trubiek prehrievača na ich životnosť a tepelný výkon v kotle určenom na spaľovanie čierneho uhlia s využitím pokročilých metód hodnotenia.

Modelovanie zanášania bolo inšpirované článkom [41], odkiaľ boli čiastočne prevzaté aj parametre zariadenia a spalín. V prvom kroku boli dopočítané materiálové vlastnosti čiernouhoľných spalín s teplotou 1600 °C a tlakom 102 kPa. Bolo použité zloženie 13,5 % CO<sub>2</sub>, 4,7 % O<sub>2</sub>, 77,2 % N<sub>2</sub> a 4,6 % H<sub>2</sub>O (zjednodušené zanedbaním minimálneho množstva alkalických solí). Z výpočtu pomocou softwaru CHEMCAD boli získané základné termofyzikálne charakteristiky spalín znázornené v tabuľke 10.

Tab. 10 Základné termofyzikálne charakteristiky spalín [40]

	Hodnota	Jednotky
<b>Hustota</b>	0,1959	kg/m <sup>3</sup>
<b>Merná tepelná kapacita</b>	1,3302	kJ/(kg·K)
<b>Viskozita</b>	6,25e-5	N·s/m <sup>2</sup>
<b>Tepelná vodivosť</b>	0,1139	W/(m·K)

Z analýzy nánosov vyplýva, že samotný nános je zložený z oxidov (oxid hlinitý, kremičitý, železitý), jeho hustota je 2200 kg/m<sup>3</sup>, merná tepelná kapacita je 2000 J/(kg·K) a tepelná vodivosť je 2,1 W/(m·K). [41]

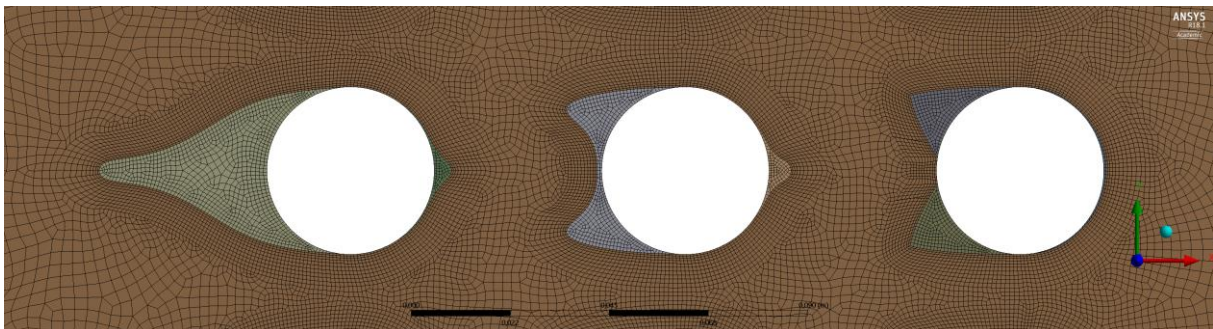


Obr. 49 Tvar nánosov na prvých dvoch trubkách prehrievača. Smer toku spalín zľava. [41]

Model zanášania je aplikovaný na 3 trubky v rade za sebou (v smere toku prúdenia spalín) v prvom chode prehrievača. Jednalo sa o trubky TR38×5,6 vyrobené zo žiarupeznej ocele 17 341. Tvar nánosov vytvorený po deviatich mesiacoch nepretržitej prevádzky a znázornený podľa [41] na obrázku 49 plnou čiarou, bol použitý pre tvorbu výpočtového CFD modelu

### 5.2.1 CFD analýza prúdenia spalín okolo trubiek

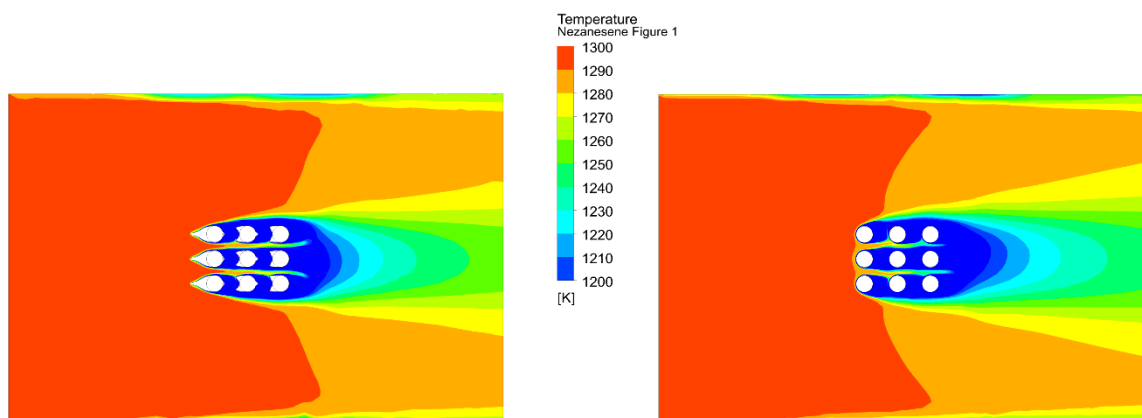
Simulácie prúdenia v okolí skúmaných trubiek prehrievača boli vykonané za účelom určenia teplotného zaťaženia trubiek a súčiniteľov prestupu tepla. V prvom kroku boli vytvorené dva modely spolu s výpočtovou sieťou (jeden pre zanesené a jeden pre nezanesené trubky). Simulovaná doména obsahovala deväť trubiek (tri trubky v troch radoch). Na obrázku 50 je znázornená výpočtová sieť pre strednú radu domény so zanesenými trubkami.



Obr. 50 Detail siete na strednej časti modelu so zanesenými trubkami. Smer toku spalín zľava. [40]

Pri simulácii zaneseného aj nezaneseného modelu bolo predpokladané stacionárne prúdenie spalín. Prúdenie je turbulentné, a preto bol zvolený dvoj rovnicový model  $k-\epsilon$  so stenovou funkciou „Enhanced Wall Treatment“, pre presnejšie popísanie v blízkosti steny trubky a nánosov. Boli taktiež využité modely pre výpočet radiácie a prenosu energie umožňujúce nastavenie parametrov súvisiacich s prenosom tepla.

Výsledné hodnoty teplotného poľa v oboch modeloch sú znázornené na obrázku 51. Z obrázku je zrejmé, že spaliny sú viac ochladzované trubkami bez nánosov a dochádza teda k efektívnejšiemu prenosu tepla v porovnaní so zanesenými trubkami.



Obr. 51 Teplotné pole spalín v modeli s nánosmi (vľavo) a bez nánosov (vpravo). Smer toku spalín zľava. [40]

V nasledujúcej tabuľke 11 sú uvedené priemerné teploty na jednotlivých trubkách predikované modelom s nánosmi a bez nich. Z hodnôt vyplýva, že trubky s nánosom sú ohrievané menej ako trubky bez nánosu, čo má za následok zníženie účinnosti prenosu tepla.

Tab. 11 Základné materiálové charakteristiky spalín [40]

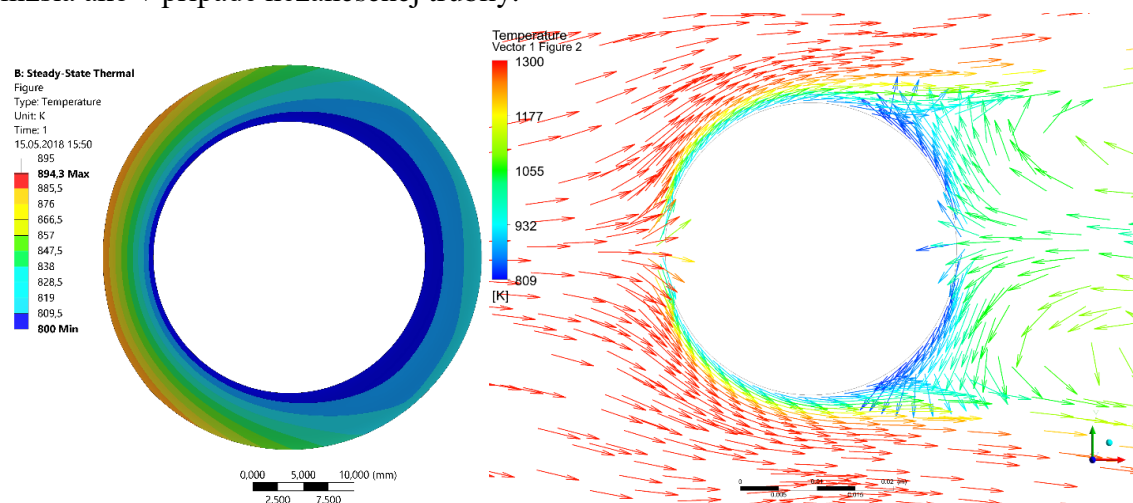
Trubka	Priemerná teplota (K)		
	Prvá	Druhá	Tretia
Nezanesená	853	840	840
Zanesená	820	822	817

Následne exportované teplotné pole, ako aj koeficienty prestupu tepla po obvode trubky boli ďalej použité ako okrajové podmienky pre určenie teplotného poľa rezom trubky pomocou MKP analýzy.

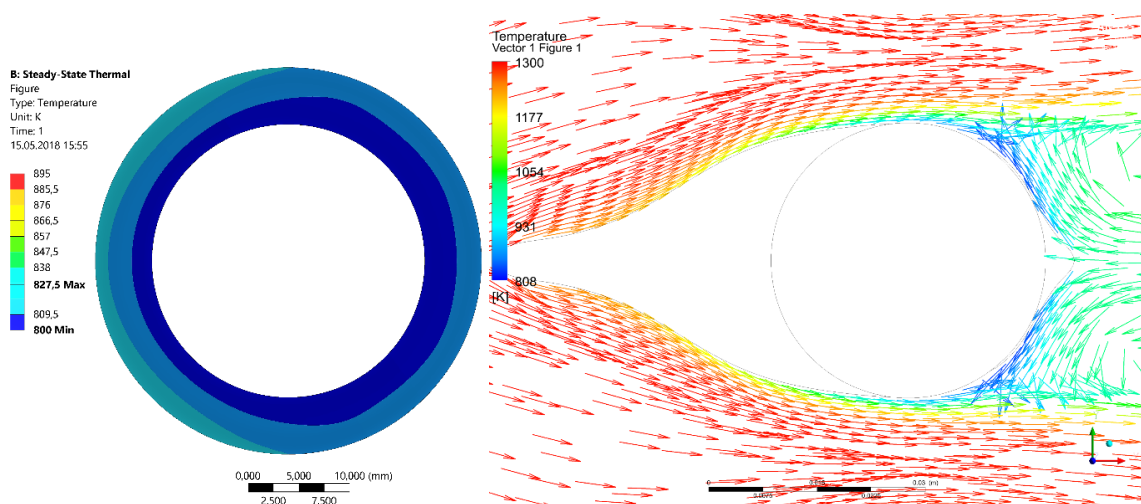
### 5.2.2 Určenie teplotného poľa pomocou MKP analýzy

Pre výpočet kritických oblastí na reze trubkou bol vykonaný MKP výpočet. Vytvorený 2D model rezom trubky bol použitý pre všetkých 6 skúmaných trubiek a líšil sa len v použitých okrajových podmienkach. Tými boli teplotné pole a koeficient prestupu tepla na vonkajšej strane trubky získaný z predchádzajúcej CFD simulácie. Na vnútornej strane boli okrajové podmienky charakterizované konštantnou teplotou 800 K a konštantným súčiniteľom prestupu tepla 1600 W/(m<sup>2</sup>·K) (pri tlaku 11 MPa) pre simulovanie „chladenia“ steny parou. Bola vykonaná „Steady-state thermal“ analýza, ktorá slúži pre výpočet teplôt, teplotných gradientov a tepelných tokov v ustálenom stave.

Pre názornú ukážku je na tomto mieste uvedené len porovnanie prvých trubiek. Z výsledkov na obrázkoch 52 a 53 je zrejmé, že nezanesené trubky sú spalínami ohrievané oveľa viac ako trubky zanesené. Nezanesená trubka je spalínami ohrievaná na maximálnu teplotu 894 K na prednej strane trubky (v smere toku prúdenia spalín). Zanesená trubka je však v tomto mieste pokrytá nánosom, ktorý pôsobí ako izolant, a preto je jej maximálna teplota 827,5 K o 66,5 °C nižšia ako v prípade nezanesenej trubky.

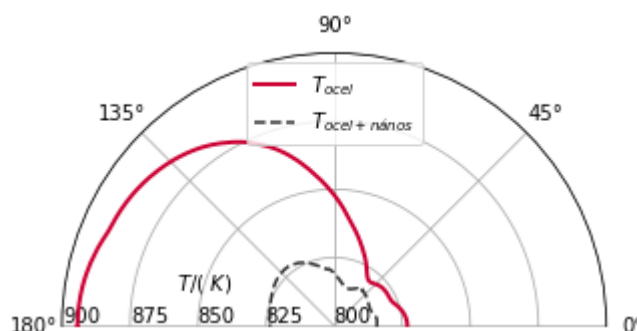


Obr. 52 Teplotné pole rezom nezanesenej trubky (vľavo) a teplota spalín v jej okolí (vpravo). Smer toku spalín zľava. [40]



Obr. 53 Teplotné pole rezom zanesenej trubky (vľavo) a teplota spalín v jej okolí (vpravo).  
Smer toku spalín zľava. [40]

Rozdiely sú zrejme aj z priemerných teplôt na reze, kde v prípade nezanesenej trubky je priemerná teplota 826 K, zatiaľ čo pri zanesenej je to o 16 K nižšia teplota 810 K. Z výsledkov je možné vidieť, že trubky sú zo zadnej strany teplotne zaťažované oveľa menej ako zo strany prednej. Je to spôsobené tým, že spaliny v tejto oblasti prúdia pomalšie a majú nižšiu intenzitu.



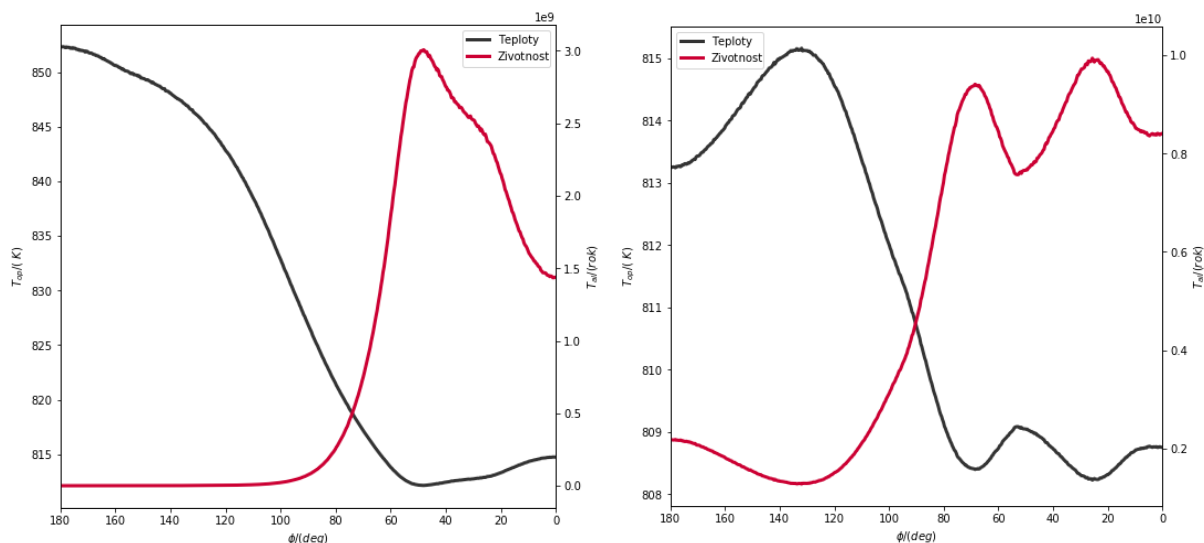
Obr. 54 Porovnanie maximálneho teplotného zaťaženia prvej nezanesenej a zanesenej trubky.  
Smer toku spalín zľava. [40]

Maximálne teplotné zaťaženie je znázornené na obrázku 54, kde možno vidieť, že nezanesená trubka je v prednej časti zaťažovaná oveľa viac ako trubka zanesená, ktorá je pokrytá silnou vrstvou nános. Pri zanesených trubkách možno sledovať, že teplotné pole kopíruje nános a v mieste, kde sa nachádza, je značný pokles teploty. Je teda možné konštatovať, že nános pôsobí ako izolant. Po vyhodnotení všetkých skúmaných trubiek vyplýva, že malá vrstva nános má na teplotné pole steny len minimálny vplyv.

### 5.2.3 Porovnanie creepovej životnosti

Výsledky teplotného zaťaženia boli následne použité pre určenie creepovej životnosti trubky, ako aj jej tepelného výkonu. Creepová životnosť aj tepelný výkon sú silne závislé od teplotného poľa, ktoré je pre jednotlivé trubky ovplyvňované ich postavením v prúde spalín (trubky v zákryte sú teplotne zaťažované menej ako trubky usporiadané striedavo). Značný vplyv má taktiež prítomnosť vonkajšieho nános. Trubky bez nános sú teplotne zaťažované oveľa viac, ako v prípade silného nános, kedy sú teplotné rozdiely na trubkách značné a povrch je

zahrievaný veľmi neefektívne. V prípade malej vrstvy nánosu sa teplotné zaťaženie líši len minimálne.



Obr. 55 Grafy teplotného zaťaženia prvej trubky v porovnaní s creepovou životnosťou nezanesenej trubky (vľavo) a zanesenej trubky (vpravo) [40]

Pre názornosť je taktiež uvedené porovnanie prvých (najviac zaťažených) trubiek (obdobne ako v predchádzajúcej kapitole). Grafy na obrázku 55 znázorňujú vplyv teplotného zaťaženia po obvode na creepovú životnosť po obvode. Pri nezanesenej trubke je v prednej časti najvyššia teplota, a preto životnosť najnižšia a naopak životnosť s klesajúcim teplotným zaťažením narastá na zadnej strane trubky. Pri zanesenej trubke je však tento priebeh mierne odlišný, nakoľko na prednej strane je silná vrstva nánosu. Teplota v mieste za nánosom ešte narastá a tým klesá životnosť. Zadná časť trubky je však obdobne, ako v prípade nezanesenej trubky, menej teplotne zaťažovaná, a preto aj životnosť opäť rastie.

Tab. 12 Doba do dosiahnutia teoretického porušenia materiálu tečením [40]

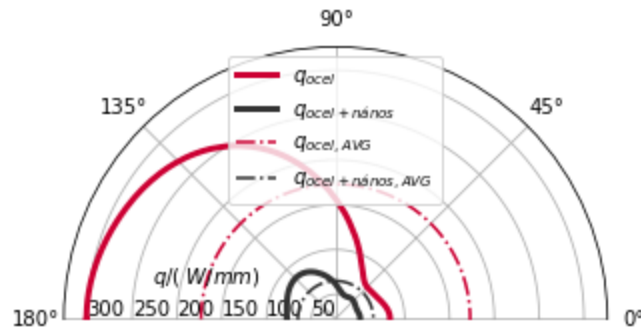
Trubka	T <sub>al</sub> (h)		
	Prvá	Druhá	Tretia
Nezanesená	8,54E+06	3,69E+09	3,05E+09
Zanesená	5,83E+11	7,23E+11	2,53E+10

Tabuľka 12 porovnáva creepové životnosti zvonku zanesenej a nezanesenej trubky. Životnosť pri zanesenej trubke je pri všetkých trubkách niekoľkonásobne vyššia ako v prípade nezanesenej (ich životnosť je však dostatočne vysoká). To len potvrdzuje fakt, že aj mierne odchýlky v teplote môžu mať značný vplyv na životnosť zariadenia. V tomto prípade však v prospech životnosti prispieva vhodná voľba materiálu, pri ktorom v tomto prípade nie je v dohľadnom časovom horizonte predpokladané poškodenie vplyvom tečenia materiálu.

#### 5.2.4 Porovnanie tepelného výkonu

Výsledky porovnania tepelných výkonov pre prvú trubku v prípade s vonkajšími nánosmi a bez nich sú znázornené na obrázku 56. Je zjavné, že zanášanie veľmi negatívne ovplyvňuje tepelný

tok do trubky a tepelný výkon je preto na nezanesenej trubke oveľa vyšší. Priemerná hodnota obvodového tepelného výkonu nezanesenej trubky je 173 W/mm , čo je 2,7 násobne viac ako v prípade trubky zanesenej, kde je priemerná hodnota iba 65 W/mm. Najvyšší tepelný výkon je evidentne v prednej časti nezanesenej trubky, kde intenzita spalín dosahuje maxima. Pri zanesenej trubke je to opäť až v oblasti, kde nános nemá takú vrstvu. V oboch prípadoch následne v zadnej časti trubky výkon klesá.



Obr. 56 Graf tepelných výkonov po obvodu prvej nezanesenej a zanesenej trubky a ich priemerné hodnoty. Smer toku spalín zľava. [40]

### 5.2.5 Vyhodnotenie

Nánosy na vonkajšej strane trubiiek majú značný vplyv na teplotné pole na trubke. V prípade malej vrstvy nánosov je tento vplyv minimálny, avšak pri väčšej hrúbke nánosu je už vplyv na povrchovú teplotu trubky a následne na teplotné pole rezom trubky značný. Nižšie teploty na zanesenej trubke majú na jednej strane „pozitívny“ vplyv na hodnoty creepovej životnosti materiálu, avšak veľmi negatívne ovplyvňujú tepelný výkon zariadenia. V reálnej prevádzke by pokles tepelného výkonu musel byť dorovnaný miernou úpravou prevádzkových podmienok, ktoré by mohli mať nepriaznivý vplyv na životnosť zariadenia. V prípade príliš veľkých nánosov a radikálneho poklesu tepelného výkonu by muselo v krajnom prípade dôjsť k odstávke zariadenia a k jeho údržbe, čo je spojené s ekonomickými stratami.

## 6 Metodika hodnotenia trubkových zväzkov v kotle

Keďže nedostatok, prípadne obmedzené množstvo, informácií o zariadení je bežným javom, aplikujú sa v praxi vhodné zovšeobecnenia, a to aj v návrhu postupu pri analýze poškodenia.

**Pre všeobecné vyhodnotenie životnosti prehrievača bola navrhnutá nasledujúca metodika.** Umožňuje vyhodnotenie poškodenia vplyvom teploty pomocou moderných výpočtových nástrojov. Má tri základné časti:

- 1) Zabezpečenie vstupných parametrov:
  - Návrhové parametre
  - Geometria
  - Namerané hodnoty
  - Materiálové vlastnosti
- 2) Realizácia výpočtov a analýz:
  - Tepelná bilancia
  - Tepelne – hydraulický výpočet
  - Prúdenie spalín (CFD)
  - Teplotné pole na zväzku trubiek
  - Pevnostný výpočet (MKP)
- 3) Spracovanie a vyhodnotenie výsledkov:
  - Určenie poškodenia trubiek
  - Odhad životnosti zariadenia

Výsledky výskumu zahrnuté vo vyššie uvedenom prehľade sú obsiahnuté v jednotlivých kapitolách tejto dizertačnej práce. V nich popísaný prístup pre určenie životnosti trubkového zväzku na základe navrhovanej metodiky je teraz súhrnne uvedený.

V prvom kroku je nutné zabezpečiť potrebné vstupné informácie. Nevyhnutná je geometria zariadenia spolu s materiálovými charakteristikami použitých ocelí. Následne je nutné poznať zloženie paliva, teploty, tlaky, prietoky jednak spalín, ale aj pary (resp. vody).

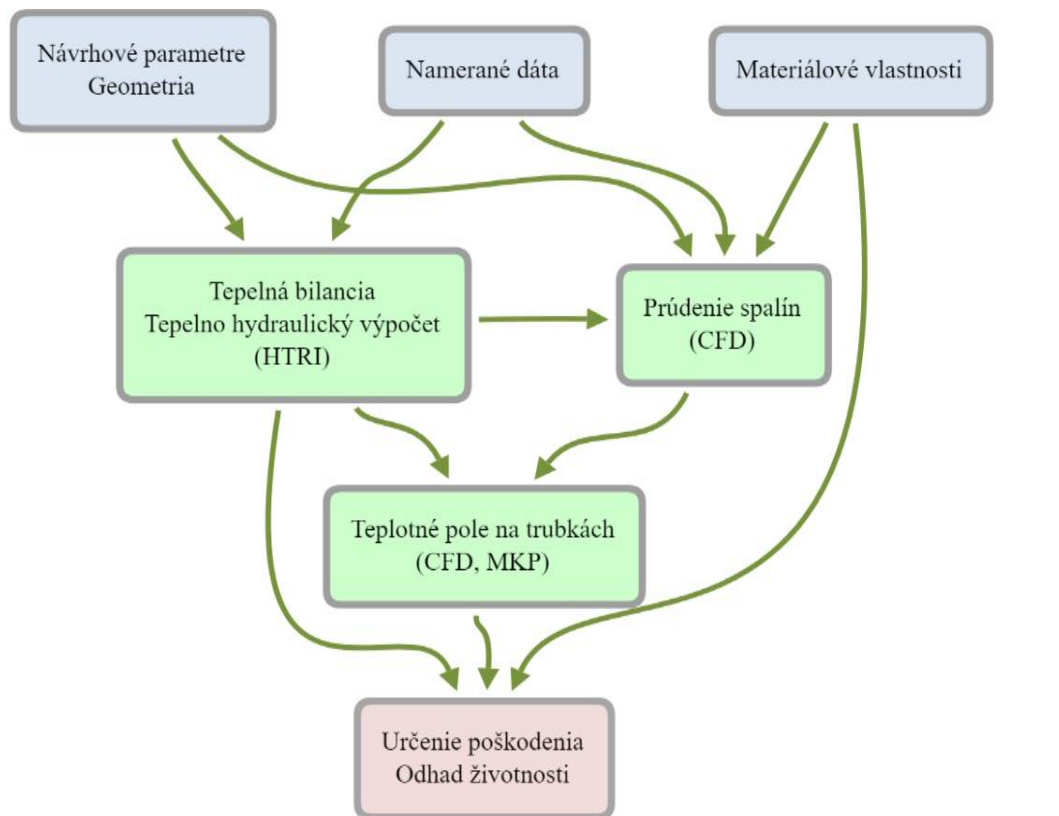
V ďalšom kroku je nutné dopočítať kľúčové neznáme parametre. V prípade danej práce so zameraním na zväzok trubiek bolo nutné dopočítanie teploty pary v celom zväzku. To je zabezpečené pomocou tepelno-hydraulického výpočtu (viď kapitola 3.5.1), ktorý však priemeruje hodnoty iba na jeden rad trubiek (napr. v prípade HTRI), preto pre detailné vyhodnotenie teplotného poľa na trubkách prehrievača nie je postačujúci.

Pre určenie detailného teplotného poľa na trubkách prehrievača je vhodné využiť moderné simulačné nástroje, ktoré je pre časovú úsporu nutné skombinovať a vhodne použiť istú mieru zjednodušenia. Táto metodika navrhuje vytvorenie zjednodušenej CFD simulácie (3D) prúdenia spalín v kotle (viď kapitola 3.5.2), v ktorom je samotný skúmaný prehrievač zjednodušený na poréznu zónu pre simuláciu miestneho odporu a odberu tepla. Je tu nutné taktiež zohľadniť odber tepla membránovými stenami. Výsledky poskytnú presné informácie o teplotnom zaťažení zväzku trubiek v rovine tesne nad ním. Následne je nutné zväzok rozdeliť na požadovaný počet rezov, pre určenie teplotného poľa priamo na povrchu trubiek. Čím je týchto rezov viac, tým presnejšie výsledky po dĺžke trubky je možné dosiahnuť. V každom z týchto rezov je následne nutné vykonať CFD 2D simuláciu (viď kapitola 3.6). Simulovanie

samotných trubiek je pre väčšiu časovú úsporu možné kombinovať spolu s poréznu zónou v strednej časti trubkového zväzku, kde však opäť musí byť zohľadnený vplyv miestneho odporu a odoberania tepla parou. Teplota pary v jednotlivých rezoch je získaná z vyššie spomínaného tepelno-hydraulického výpočtu. Výstupom je následne teplotné pole na povrchu namodelovaných trubiek prehrievača. Tieto simulácie, v prípade potreby kombinácie teplotného zaťaženia spolu s nánosmi (viď kapitola 5.2), respektíve oxidovou vrstvou (viď kapitola 5.1), je možné doplniť o simuláciu prúdenia okolo trubky s nánosmi. V prípade potreby teplôt na reze trubkou je však nevyhnutné vytvorenie MKP výpočtového modelu, kde je taktiež možné zohľadniť nánosy či oxidovú vrstvu.

Dopočítané hodnoty povrchových teplôt následne slúžia ako vstupy pre vyhodnotenie zvyškovej životnosti trubky pri poškodení vplyvom teploty. Keďže životnosť zväzku je určená životnosťou najkritickejšej trubky, je pre konzervatívne výsledky nutné zvoliť teplotne najviac zaťažovanú trubku a následne ju vyhodnotiť na základe zvoleného prístupu z normy (viď kapitola 4.2.4). Obdobným prístupom je možné vyhodnotenie zvyškovej životnosti všetkých trubiek zväzku a dané dáta využiť pre určenie doporučených kontrolných miest v prípade odstávky zariadenia.

Navrhnuté prepojenie a kombinácia jednotlivých krokov sú blokovo znázornené na obrázku 57.



Obr. 57 Navrhnutý postup pre reálne určenie poškodenia trubiek vplyvom teploty.



## 7 Záver – zhodnotenie výsledkov

Dizertačná práca je zameraná na využitie pokročilých metód a výpočtových programov pre vyhodnotenie poškodenia trubkových zväzkov v kotle. V úvode je vykonané rozdelenie poškodenia kotlov do niekoľkých skupín z pohľadu mechanizmu poškodzovania, pričom na niektoré vybrané nadväzujú príklady z praxe a taktiež publikácie. Práca je ďalej hlbšie zameraná na prvý mechanizmus poškodenia z tohto rozdelenia – na poškodenie vplyvom teploty a je orientovaná na konkrétny typ kotlového zariadenia – trubkové zväzky.

Pre hodnotenie poškodenia zväzku trubiek vplyvom teploty je nevyhnutné poznať povrchovú teplotu trubiek. Z dostupných bežne meraných prevádzkových parametrov riešeného trubkového zväzku (predstavujúceho konkrétny a typický prípad z priemyslu), to však nie je možné, a preto je nutné vykonať dôkladnejšiu výpočtovú analýzu problému. Nevyhnutným krokom bolo preto dopočítanie reálnych priebehov teplôt na povrchu jednotlivých trubiek, čo je však možné na dostupnej sofistikovanej úrovni realizovať iba kombináciou niekoľkých pokročilých výpočtových metód. V práci je preto navrhnutá metodika hodnotenia takéhoto typu zariadenia pri nedostatku vstupných informácií, ktorá je následne v druhej časti práce aplikovaná na reálne zariadenie prehrievača pary .

V prvom kroku bol vykonaný detailný tepelno-hydraulický výpočet, ktorý však poskytuje len priebehy priemerných teplôt na povrchu jednotlivých radov trubiek (viď kapitola 3.5.1). Tento výpočet pomocou moderných projekčných nástrojov nie je schopný zohľadniť nerovnomernú distribúciu pary do jednotlivých trubiek, ani nerovnomernosť prúdenia spalín a (nereálne) predpokladá ideálnu distribúciu oboch spomínaných pracovných látok. Navyše vplyv oxidovej vrstvy je možné realizovať iba formou náhradnej simulácie virtuálneho zanášania. Tento výpočet však poskytol dostatočne presné rozloženie teploty pary v zariadení, ktorá bola využitá v nasledujúcich simulačných výpočtoch.

Pokročilé výpočtové CFD nástroje pre analýzu prúdenia umožňujú veľmi reálne vystihnúť nerovnomernosť prúdenia (viď výsledky prúdenia spalín v kapitole 3.5.3 a 3.6.5). Ich nasadenie je však časovo veľmi náročné, a preto vyžadujú nasadenie náhradných modelov (viď kapitola 3.5.2 a 3.6.3). Je tiež vhodné ich navzájom kombinovať a prepojením 3D globálnej analýzy prúdenia spalín v kotle na 2D detailnejšiu analýzu prúdenia spalín okolo samotných trubiek tak zredukovať výpočtové a časové nároky simulácie. Výsledkom 3D analýzy bolo pole teplôt a rýchlostí v rovine tesne nad prehrievačom, čím bolo v podstate definované teplotné zaťaženie prehrievača. Priemerná teplota spalín v tejto rovine je 710 °C a priemerná rýchlosť je 4,39 m/s.

V ďalšom kroku došlo k rozdeleniu prehrievača piatimi rezmi v ktorých bola vykonaná 2D simulácia pre určenie reálneho priebehu teplôt na vonkajšom povrchu jednotlivých trubiek. Pre každý z rezov bola určená najteplejšia trubka, pričom teploty sú v rozmedzí od 465 °C do 470 °C. V každej z týchto trubiek došlo k následnému vyhodnoteniu creepovej životnosti, ktorá sa pohybuje rádovo v tisíckach rokov. Je teda zrejmé, že creepová životnosť pravdepodobne nebude limitujúcim faktorom pre dĺžku prevádzky daného zariadenia.

S ohľadom na náročnosť nasadenia a obsluhy súčasných pokročilých výpočtových metód (implementovaných v moderných komerčných softwaroch pre CFD, MKP, ale aj pre detailné tepelno-hydraulické výpočty), aj vzhľadom na množstvo potenciálnych mechanizmov

poškodzovania, je však pri určovaní poškodenia zariadenia vhodné zamerať sa na konkrétny typ poškodenia. V závere práce je taktiež poukávané na možnosti rozšírenia navrhovaného prístupu o vyhodnotenie a porovnanie poškodenia vplyvom teploty v kombinácii s poškodením vplyvom oxidovej vrstvy popríklad vplyvom nánosov.

## 8 Budúca práca

Problematika poškodzovania trubkových zväzkov v kotle je aktuálna a veľmi široká. V práci je navrhnutý konkrétny postup ako s využitím súčasných pokročilých metód pristupovať k poškodeniu vplyvom teploty. Tento postup je možné v budúcej práci ďalej rozšíriť napríklad o nasledujúce činnosti:

- Zohľadnenie nerovnomernosti odberu tepla poréznu prepážkou v CFD simulácii.
- Tvorba globálneho 3D modelu prehrievača pre určenie povrchovej teploty zväzku trubiek.
- Rozšírenie celkového modelu o imperfekcie na všetkých trubkách.
- Porovnanie tepelných výkonov v jednotlivých trubkách.
- Pre návrhovú životnosť dopočítať, pri akom napätí a teplote by došlo k poškodeniu creepom.
- Rozšírenie výpočtu zanášania z poslednej kapitoly o prepočet na teplotu, pri ktorej by bol tepelný výkon zachovaný.

Keďže problematika poškodzovania rôznych častí kotlov je rozsiahla, na prácu možno v budúcnosti nadväzovať napríklad:

- Analýzou iného typu zariadenia často poškodzovaného (napríklad membránové steny a pod.).
- Analýzou iného typu poškodenia a ich vzájomná kombinácia.
- Ekonomickou bilanciou prevencie pred poškodením a rentability vypracovávania podobných štúdií.

## 9 Referencie

- [1] RAYAPROLU, Kumar. *Boilers for power and process*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. ISBN 978-1-4200-7537-3.
- [2] RAYAPROLU, Kumar. *Boilers: a practical reference* [online]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013 [vid. 2017-03-20]. ISBN 978-1-4665-0054-9. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1201/b12977>
- [3] SINGER, Joseph L. *Combustion: Fossil Power Systems*. Windsor CT: Combustion Engineering, 1981. ISBN 978-0-9605974-0-6.
- [4] KUČERKA, Martin. *Vybrané kapitoly zo strojov a zariadení* [online]. 2013 [vid. 2017-03-22]. ISBN 978-80-557-0619-1. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/292953286\\_Vybrane\\_kapitoly\\_zo\\_strojov\\_a\\_zariadeni](https://www.researchgate.net/publication/292953286_Vybrane_kapitoly_zo_strojov_a_zariadeni)
- [5] ČERNÝ, V., B. JANEBA a J. TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1983.
- [6] RAHMAN, M. M., J. PURBOLAKSONO a J. AHMAD. Root cause failure analysis of a division wall superheater tube of a coal-fired power station. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2010, **17**(6), 1490–1494. ISSN 1350-6307. Dostupné z: [doi:10.1016/j.engfailanal.2010.05.005](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.05.005)
- [7] LUO, Xiaoling a Zhi ZHANG. Leakage Failure Analysis in a Power Plant Boiler. *IERI Procedia* [online]. 2013, **5**, 2013 International Conference on Agricultural and Natural Resources Engineering (ICANRE 2013), 107–111. ISSN 2212-6678. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ieri.2013.11.078](https://doi.org/10.1016/j.ieri.2013.11.078)
- [8] ASGARYAN, M., N. SIMMS a S. M. WU. Prediction of the Remaining Service Life of Superheater and Reheater Tubes in Coal-Biomass Fired Power Plants. *Advanced Materials Research* [online]. 2014, **856**, 343–348. ISSN 1662-8985. Dostupné z: [doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.856.343](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.856.343)
- [9] NALCO COMPANY. *The nalco guide to boiler failure analysis*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-174300-6.
- [10] VOŠTA, J., Z. MATĚJKA a J. MACÁK. *Energetika*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 978-80-7080-358-5.
- [11] BUZÍK, Jiří a Tomáš LÉTAL. Porovnání silových odezev u trubkového svazku za odlišných okrajových podmínek. In: *CHISA 2015*. B.m.: Česká společnost chemického inženýrství, 2015.
- [12] NAĎ, M., J. BUZÍK, T. LÉTAL a P. LOŠÁK. Root cause analysis of superheater tubes failure. *Materials and Technology* [online]. 2017, **2017**(51/3). ISSN 1580-2949. Dostupné z: <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit173/nad.pdf>
- [13] NAĎ, M., JEGLA, Z., LÉTAL, T., LOŠÁK, P. a BUZÍK, J. Thermal load non-uniformity estimation for superheater tube bundle damage evaluation. *MATEC Web Conferences*

- [online]. 2017, **157**, 30–39. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201815702033
- [14] HONEYWELL. *HC900 Boiler Tube Temperature Measurement* [online]. B.m.: Honeywell. 2018. Dostupné z: [https://www.hanang-instrument.com/images/stories/pdf/Boiler/hc900\\_boiler\\_tube.pdf](https://www.hanang-instrument.com/images/stories/pdf/Boiler/hc900_boiler_tube.pdf)
- [15] ANSYS, INC. *ANSYS® Help 17.1.0*. Canonsburg: SAS IP, Inc., 2016.
- [16] MIKRON INSTRUMENT COMPANY, INC. *Table of emissivity of various surfaces* [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z: [http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229\\_LHC\\_detector\\_analysis/calculations/emissivity2.pdf](http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf)
- [17] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, ed. *VDI heat atlas. 2.* ed. Heidelberg: Springer, 2010. Springer reference. ISBN 978-3-540-79999-3.
- [18] ČSN 41 2022- Ocel 12 022. Praha: Český normalizační institut, 1985.
- [19] *Calculation of Heater-tube Thickness in Petroleum Refineries, Sixth Edition (ISO 13704:2007)* [online]. 6th vyd. B.m.: American Petroleum Institute, 2007 [vid. 2018-10-15]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13704:ed-2:v1:en>
- [20] ASHBY, M.F., H. SHERCLIFF a D. CEBON. *Materials: engineering, science, processing and design.* 3. ed. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-08-097773-7.
- [21] COURTNEY, Thomas H. *Mechanical behavior of materials.* Long Grove, Illinois: Waveland, 2000. ISBN 978-1-57766-425-3.
- [22] BOYER, Howard E. a ASM INTERNATIONAL, ed. *Atlas of creep and stress-rupture curves.* Metals Park, Ohio: ASM International, 1988. ISBN 978-0-87170-322-4.
- [23] BETTEN, Josef. *Creep mechanics: with 16 tables.* 3. ed. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-85050-2.
- [24] MAY, D. L., A. P. GORDON a D. S. SEGLETES. *The Application of the Norton-Bailey Law for Creep Prediction Through Power Law Regression* [online]. 2013, V07AT26A005. Dostupné z: doi:10.1115/GT2013-96008
- [25] JENKINS, Michael G. Time dependent behaviour: Creep. In: *Mechanics of Materials Laboratory* [online]. 2001, s. 9. Dostupné z: <http://courses.washington.edu/me354a/chap8.pdf>
- [26] NAUMENKO, Konstantin D. a Holm ALTENBACH. *Modeling of creep for structural analysis.* Berlin ; New York: Springer, 2007. Foundations of engineering mechanics. ISBN 978-3-540-70834-6.
- [27] ČADEK, Josef. *Creep kovových materiálů.* B.m.: Academia, 1984.
- [28] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *BS 7910 Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.* London: BSI, 2007. ISBN 978-0-580-60108-8.

- [29] BERTINI, L. a E. MANFREDI. *Study of damage approaches for life assessment in the creep-fatigue range: final report*. Luxembourg: Office for Official Publ. of the European Communities, 1995. EUR, 15761. ISBN 978-92-826-8357-6.
- [30] ČSN EN 12952-4 *Vodotrubné kotle a pomocná zařízení - Část 4: Provozní výpočty očekávané doby života kotle*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [31] *TRD 508 Annex 1; Technical Rules for Steam Boilers (TRD); Additional tests on components - Methods for the calculation of components having time dependent design strength values*. B.m.: Vereinigung der Technischen Überwachungsvereine e.V., Postfach 103834, 45038 Essen, nedatováno.
- [32] HOLMSTRÖM, Stefan a INSTITUTE FOR REFERENCE MATERIALS AND MEASUREMENTS. *A study of negligible creep criteria based on EN-10028 standard creep strength and yield properties: contribution to CEN/TC 54/WG 59 CREEP MaCoSyMA project deliverable*. [online]. Luxembourg: Publications Office, 2016 [vid. 2018-09-26]. Dostupné z: <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:LDNA27783:EN:HTML>
- [33] HOLMSTRÖM, Stefan. *Negligible creep temperature curves for EN-13445, EUR 28564 EN* [online]. Luxembourg: Publications Office, 2017. ISBN 978-92-79-68046-5. Dostupné z: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC106159>
- [34] NAŘ, M., LÉTAL, T., LOŠÁK, P. a BUZÍK, J. Influence of Steam-Side Oxid Scales on Creep Life of Boiler Superheater Tube. In: *25th International Conference on Materials and Technology: Program and book of abstracts*. Ljubljana: Institute of Metals and Technology, 2017, s. 135–135. ISBN 978-961-94088-1-0.
- [35] ČSN 42 6710 - *Trubky bezešvé tvářené za studena s běžnými úchylkami z ocelí tříd 11 až 16. Rozměry*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1979.
- [36] JEGLA, Z., J. VONDÁL a J. HÁJEK. Standards for fired heater design: An assessment based on computational modelling. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2015, **89**(Supplement C), 1068–1078. ISSN 1359-4311. Dostupné z: [doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.05.012](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.012)
- [37] ŠTEMBERK, Jiří a Milan HALAŠ. *Diagnostická kontrola tlakového systému kotle K4*. Zpráva. NDT/419/2011. B.m.: NDT servis s.r.o. 2011.
- [38] TAKEDA, M., T. ONISHI, S. NAKAKUBO a S. FUJIMOTO. Physical Properties of Iron-Oxide Scales on Si-Containing Steels at High Temperature. *MATERIALS TRANSACTIONS* [online]. 2009, **50**(9), 2242–2246. ISSN 1345-9678, 1347-5320. Dostupné z: [doi:10.2320/matertrans.M2009097](https://doi.org/10.2320/matertrans.M2009097)
- [39] CHICOT, D., J. MENDOZA, A. ZAOUI, G. LOUIS, V. LEPINGLE, F. ROUDET a J. LESAGE. Mechanical properties of magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), hematite (α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and goethite (α-FeO·OH) by instrumented indentation and molecular dynamics analysis. *Materials Chemistry and Physics* [online]. 2011, **129**(3), 862–870. ISSN 0254-0584. Dostupné z: [doi:10.1016/j.matchemphys.2011.05.056](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.05.056)

- [40] VOLNÁ, Kateřina. *Vliv zanášení svazku trubek v kotli na jeho životnost*. B.m.: Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2018. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Nad'.
- [41] TOMECZEK, Jerzy a Krzysztof WACŁAWIAK. Two-dimensional modelling of deposits formation on platen superheaters in pulverized coal boilers. *Fuel* [online]. 2009, **88**(8), 1466–1471. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2009.02.023

## 10 Zoznamy

### 10.1 Zoznam obrázkov

Obr. 1 Vodotrubný kotol umiestnený v chemickej prevádzke. ....	10
Obr. 2 Rozdelenie poškodenia kotlov. ....	13
Obr. 3 Intenzita napätia na "U" trubke medzi prehrievačmi počas analýzy prasklín. ....	20
Obr. 4 Zjednodušená schéma analyzovaného kotla (1 – kotlové teleso/bubon, 2 – výparník/membránové steny, 3a – prehrievač P1, 3b – prehrievač P2, 4a – ekonomizér E1, 4b – ekonomizér E2, 5 – horáky). [13] .....	21
Obr. 5 3D model časti (32 z 66 rád) analyzovaného prehrievaču P2. [13] .....	23
Obr. 6 Zoxidované trubky prehrievača P2, časti membránovej steny a závesov. [13] .....	24
Obr. 7 Graf rozloženia priemerných vonkajších povrchových teplôt na všetkých radoch trubiek prehrievača P2 bez zanášania a so zanášaním (simulovaná oxidová vrstva). [13] .....	26
Obr. 8 Zjednodušený 3D model spaľovacej komory a časti druhého ťahu. ....	27
Obr. 9 Prúdnice spalín so zvýraznenou teplotou (ľavý obrázok) a rýchlosťou (pravý obrázok). .....	31
Obr. 10 Rýchlosť spalín v rovine nad prehrievačom. [13] .....	32
Obr. 11 Teplota spalín v rovine nad prehrievačom. [13] .....	33
Obr. 12 Rezy doménou. ....	34
Obr. 13 Geometria 2D rezu doménou prehrievača. ....	34
Obr. 14 Detail výpočtovej siete a jej zjemnenia na povrchu trubiek. ....	35
Obr. 15 Hodnoty skewness koeficientu hodnotiaceho kvalitu buniek výpočtovej siete. ....	35
Obr. 16 Teplotné zaťaženie jednotlivých rezov prehrievača. ....	36
Obr. 17 Celková rýchlosť na vstupe do jednotlivých rezov prehrievača. ....	37
Obr. 18 Y zložka rýchlosti na vstupe do jednotlivých rezov prehrievača. ....	37
Obr. 19 Z zložka rýchlosti (3D) na vstupe do jednotlivých rezov prehrievača. ....	38
Obr. 20 X zložka rýchlosti na vstupe do jednotlivých rezov prehrievača. ....	40
Obr. 21 Graf chyby pri zanedbaní X zložky rýchlosti a jej vplyvu na koeficient prestupu tepla v jednotlivých rezoch. ....	41
Obr. 22 Výsledné teplotné pole na reze prehrievaču X5. Smer toku spalín zhora. ....	42
Obr. 23 Výsledné rýchlostné pole na reze prehrievaču X5. Smer toku spalín zhora. ....	42
Obr. 24 Prúdnice spalín so zvýraznenou teplotou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X5. Smer toku spalín zhora. ....	43
Obr. 25 Prúdnice spalín so zvýraznenou rýchlosťou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X5. Smer toku spalín zhora. ....	43
Obr. 26 Povrchové teploty na troch horných radoch trubiek prehrievača v reze X5 (pre prehľadnosť rozdelené na ľavú polovicu – hore a pravú polovicu – dole). Smer toku spalín zhora. ....	44
Obr. 27 Graf priemerných povrchových teplôt na každej trubke prvých troch rád zväzku, ako aj priemerná teplota trubiek v jednotlivých radoch rezu X5. ....	45
Obr. 28 Graf maximálnych povrchových teplôt trubiek prvých troch rád zväzku, priemerné maximálne teploty trubiek v jednotlivých radoch rezu X5, ako aj zvýraznená najteplejšia trubka. ....	45



Obr. 29 Graf znázorňujúci vonkajšiu povrchovú teplotu najviac zaťažovanej trubky č.13 v reze X5, ako aj jej priemernú hodnotu. Smer toku spalín zhora.....	46
Obr. 30 Graf znázorňujúci fázy creepového mechanizmu.....	48
Obr. 31 Graf superpozície creepovej krivky [25]. .....	48
Obr. 32 Vplyv rastúceho napätia (vľavo) a teploty (vpravo) na tvar creepovej krivky [26]. ..	49
Obr. 33 Zjednodušená mapa deformačných mechanizmov (takzvaná Ashbyho mapa) [26]...	50
Obr. 34 Graf získavania krivky predĺženia v závislosti na čase pri konštantnej teplote a konštantnom zaťažení silou podľa [26].....	50
Obr. 35 Schéma typického zariadenia pre creepovú skúšku podľa [25].....	51
Obr. 36 Diagram stanovenia teoretickej doby života materiálu $T_{al}$ podľa [30]. .....	52
Obr. 37 Diagram stanovenia $Z_0$ a $Z_B$ . [31] .....	53
Obr. 38 Graf stanovenia hraničnej teploty zanedbateľného creepu pre použitý materiál 12022.1 po 62 000 h prevádzky. ....	54
Obr. 39 Krivka hraničnej teploty $T_{NEC}$ vymedzujúca oblasť s možnosťou zanedbania creepu počas doby prevádzky pre materiál 12022.1.....	55
Obr. 40 Graf hodnotenia creepovej životnosti pre materiál 12022 a rez X5.....	56
Obr. 41 Graf znázorňujúci zvyškovú creepovú životnosť po obvode najviac zaťažovanej trubky č.13 v reze X5. Smer toku spalín zhora.....	57
Obr. 42 Graf porovnávajúci zvyškovú creepovú životnosť a maximálnu teplotu pre jednotlivé trubky prvej rady (rezy X2, X3, X4 a X5). .....	58
Obr. 43 Okrajové podmienky pre CFD analýzu prúdenia spalín okolo trubky ( $A = 20 \cdot D$ , $B = 30 \cdot D$ , $E = 10 \cdot D$ , $F = 12,5 \cdot D$ ). [34].....	61
Obr. 44 Rýchlosť spalín v okolí skúmanej trubky. Smer toku spalín zľava. [34].....	62
Obr. 45 Celkové rozloženie koeficientu prestupu tepla po obvode trubky v jednotlivých časových krokoch (farebne) a ich priemerná hodnota (čiernou farbou). Smer toku spalín zľava. [34] .....	62
Obr. 46 Porovnanie teplotného poľa na reze trúbkou bez oxidovej vrstvy (vľavo) a s oxidovou vrstvou na vnútornej strane trubky (vpravo). Smer toku spalín zľava. [34] .....	63
Obr. 47 Maximálna teplota steny trubky po obvode čistej trubky (plná čiara) a trubky s oxidovou vrstvou (prerušovaná čiara). Smer toku spalín zľava. [34].....	63
Obr. 48 Relatívne porovnanie intenzity napätia, teploty a creepovej životnosti pre čistú oceľ a oceľ s oxidovou vrstvou ( $f_{op}$ – membránové napätie pri operačných podmienkach, $T_{op}$ – priemerná teplota, $T_{al}$ – čas do teoretického poškodenia vplyvom creepu). [34].....	64
Obr. 49 Tvar nánosov na prvých dvoch trúbkach prehrievača. Smer toku spalín zľava. [41].	65
Obr. 50 Detail siete na strednej časti modelu so zanesenými trúbkami. Smer toku spalín zľava. [40] .....	66
Obr. 51 Teplotné pole spalín v modely s nánosmi (vľavo) a bez nánosov (vpravo). Smer toku spalín zľava. [40].....	66
Obr. 52 Teplotné pole rezom nezanesenej trubky (vľavo) a teplota spalín v jej okolí (vpravo). Smer toku spalín zľava. [40] .....	67
Obr. 53 Teplotné pole rezom zanesenej trubky (vľavo) a teplota spalín v jej okolí (vpravo). Smer toku spalín zľava. [40] .....	68
Obr. 54 Porovnanie maximálneho teplotného zaťaženia prvej nezanesenej a zanesenej trubky. Smer toku spalín zľava. [40] .....	68

Obr. 55 Grafy teplotného zaťaženia prvej trubky v porovnaní s creepovou životnosťou nezanesenej trubky (vľavo) a zanesenej trubky (vpravo) [40].....	69
Obr. 56 Graf tepelných výkonov po obvode prvej nezanesenej a zanesenej trubky a ich priemerné hodnoty. Smer toku spalín zľava. [40].....	70
Obr. 57 Navrhnutý postup pre reálne určenie poškodenia trubiek vplyvom teploty. ....	72
Obr. 58 Výsledné teplotné pole na reze prehrievaču X2. Smer toku spalín zhora.....	90
Obr. 59 Výsledné rýchlostné pole na reze prehrievaču X2. Smer toku spalín zhora. ....	90
Obr. 60 Prúdnice spalín so zvýraznenou teplotou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X2. Smer toku spalín zhora. ....	91
Obr. 61 Prúdnice spalín so zvýraznenou rýchlosťou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X2. Smer toku spalín zhora. ....	91
Obr. 62 Povrchové teploty na troch horných radoch trubiek prehrievača v reze X2 (pre prehľadnosť rozdelené na ľavú polovicu – hore a pravú polovicu – dole). Smer toku spalín zhora. ....	92
Obr. 63 Graf priemerných povrchových teplôt na každej trubke ako aj priemerná teplota trubiek v jednotlivých radoch rezu X2. ....	92
Obr. 64 Graf maximálnych povrchových teplôt trubiek, priemerné maximálne teploty trubiek v jednotlivých radoch rezu X2, ako aj zvýraznená najteplejšia trubka. ....	93
Obr. 65 Graf znázorňujúci vonkajšiu povrchovú teplotu najviac zaťažovanej trubky č.1 v reze X2, ako aj jej priemernú hodnotu. Smer toku spalín zhora. ....	93
Obr. 66 Výsledné teplotné pole na reze prehrievaču X3. Smer toku spalín zhora.....	94
Obr. 67 Výsledné rýchlostné pole na reze prehrievaču X3. Smer toku spalín zhora. ....	94
Obr. 68 Prúdnice spalín so zvýraznenou teplotou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X3. Smer toku spalín zhora. ....	95
Obr. 69 Prúdnice spalín so zvýraznenou rýchlosťou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X3. Smer toku spalín zhora. ....	95
Obr. 70 Povrchové teploty na troch horných radoch trubiek prehrievača v reze X3 (pre prehľadnosť rozdelené na ľavú polovicu – hore a pravú polovicu – dole). Smer toku spalín zhora. ....	96
Obr. 71 Graf priemerných povrchových teplôt na každej trubke ako aj priemerná teplota trubiek v jednotlivých radoch rezu X3. ....	96
Obr. 72 Graf maximálnych povrchových teplôt trubiek, priemerné maximálne teploty trubiek v jednotlivých radoch rezu X3, ako aj zvýraznená najteplejšia trubka. ....	97
Obr. 73 Graf znázorňujúci vonkajšiu povrchovú teplotu najviac zaťažovanej trubky č.1 v reze X3, ako aj jej priemernú hodnotu. Smer toku spalín zhora. ....	97
Obr. 74 Výsledné teplotné pole na reze prehrievaču X4. Smer toku spalín zhora.....	98
Obr. 75 Výsledné rýchlostné pole na reze prehrievaču X4. Smer toku spalín zhora. ....	98
Obr. 76 Prúdnice spalín so zvýraznenou teplotou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X4. Smer toku spalín zhora. ....	99
Obr. 77 Prúdnice spalín so zvýraznenou rýchlosťou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X4. Smer toku spalín zhora. ....	99
Obr. 78 Povrchové teploty na troch horných radoch trubiek prehrievača v reze X4 (pre prehľadnosť rozdelené na ľavú polovicu – hore a pravú polovicu – dole). Smer toku spalín zhora. ....	100

Obr. 79 Graf priemerných povrchových teplôt na každej trubke ako aj priemerná teplota trubiek v jednotlivých radoch rezu X4. ....	100
Obr. 80 Graf maximálnych povrchových teplôt trubiek, priemerné maximálne teploty trubiek v jednotlivých radoch rezu X4, ako aj zvýraznená najteplejšia trubka. ....	101
Obr. 81 Graf znázorňujúci vonkajšiu povrchovú teplotu najviac zaťažovanej trubky č.1 v reze X4, ako aj jej priemernú hodnotu. Smer toku spalín zhora. ....	101
Obr. 82 Graf hodnotenia creepovej životnosti pre materiál 12022 a rez X2. ....	103
Obr. 83 Graf hodnotenia creepovej životnosti pre materiál 12022 a rez X3. ....	103
Obr. 84 Graf hodnotenia creepovej životnosti pre materiál 12022 a rez X4. ....	104
Obr. 85 Graf znázorňujúci zvyškovú životnosť po obvode najviac zaťažovanej trubky č.1 v reze X2. ....	105
Obr. 86 Graf znázorňujúci zvyškovú životnosť po obvode najviac zaťažovanej trubky č.1 v reze X3. ....	106
Obr. 87 Graf znázorňujúci zvyškovú životnosť po obvode najviac zaťažovanej trubky č.1 v reze X4. ....	107
Obr. 88 Graf porovnávajúci zvyškovú životnosť a maximálnu teplotu pre jednotlivé trubky druhej rady (rezy X2, X3, X4 a X5). ....	108
Obr. 89 Graf porovnávajúci zvyškovú životnosť a maximálnu teplotu pre jednotlivé trubky tretej rady (rezy X2, X3, X4 a X5). ....	109

## 10.2 Zoznam tabuliek

Tab. 1 Zloženie spalín v hm%. ....	28
Tab. 2 Hodnoty koeficientov pre výpočet mernej tepelnej kapacity spalín. ....	29
Tab. 3 Hodnoty skewness koeficientu hodnotiaceho kvalitu buniek výpočtovej siete. ....	35
Tab. 4 Priemerná hodnota $y^+$ faktoru pre jednotlivé rezy prehrievaču. ....	36
Tab. 5 Priemerná a maximálna hodnota teplotného zaťaženia pre jednotlivé rezy. ....	36
Tab. 6 Teploty vnútornej steny jednotlivých radov trubiek prehrievača pre jednotlivé rezy. .	39
Tab. 7 Vplyv zanedbania X zložky rýchlosti na koeficient prestupu tepla. ....	41
Tab. 8 Creepová životnosť najviac zaťažených trubiek prehrievača pre jednotlivé rezy. ....	57
Tab. 9 Koeficienty hodnotiace kvalitu výpočtovej siete. ....	61
Tab. 10 Základné termofyzikálne charakteristiky spalín [40]. ....	65
Tab. 11 Základné materiálové charakteristiky spalín [40] ....	67
Tab. 12 Doba do dosiahnutia teoretického porušenia materiálu tečením [40]. ....	69

## 10.3 Zoznam symbolov

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Význam</i>
$A$	(MPa <sup>-n</sup> h <sup>-m</sup> )	súčiniteľ deformačného spevňovania pri creepe
$A_i$	(-)	koeficient pre výpočet $c_p$ pri teplote v rozmedzí 300–1000 K
$A_{tr}$	(m <sup>2</sup> )	plocha prierezu trubky
$B_i$	(-)	koeficient pre výpočet $c_p$ pri teplote v rozmedzí 1000–3000 K
$C_2$	(m <sup>-1</sup> )	merný súčiniteľ miestneho odporu poréznej zóny
$C_{2,p}$	(m <sup>-1</sup> )	koeficient poréznej prepážky
$c_p$	(J/(kg·K))	merná tepelná kapacita

$D_c$	(h)	celkové poškodenie tečením materiálu v priebehu hodnoteného obdobia
$d_{in}$	(m)	vnútorný priemer trubky
$d_{os}$	(m)	vonkajší priemer trubky
$D_p$	(m)	stredná veľkosť častice
$e_{cs}$	(m)	hrúbka materiálu (hrúbka steny trubky)
$e_{mat}$	(m)	hrúbka materiálu (hrúbka steny trubky)
$e_z$	(%)	celkové poškodenie creepom
$e_{z,k}$	(%)	podiel poškodenia materiálu tečením za hodnotený časový úsek
$f_A$	(-)	faktor zohľadňujúci usporiadanie trubiek v trubkovom zväzku
$f_{op}$	(MPa)	membránové napätie pri operačných podmienkach
$\dot{H}_1$	(MJ/s)	tok entalpie reálnych spalín
$L_{char}$	(m)	charakteristická dĺžka
$L_{por}$	(m)	dĺžka poréznej prepážky v smere prúdenia
$l_{tr}$	(m)	dĺžka trubky
$\dot{m}$	(kg/s)	hmotnostný tok spalín
$m, n$	(-)	teplotne závislé materiálové konštanty
$n_{MR}$	(-)	počet miestnych odporov v smere toku prúdenia
$Nu$	(-)	Nusseltovo číslo
$Nu_b$	(-)	Nusseltovo číslo pre zväzok trubiek
$Nu_{lam}$	(-)	Nusseltovo číslo pre laminárne prúdenie
$Nu_{turb}$	(-)	Nusseltovo číslo pre turbulentné prúdenie
$p_c$	(MPa)	výpočtový tlak (vnútorný tlak v trubke)
$p_{in}$	(MPa)	vnútorný tlak v trubke
$Pr$	(-)	Prandtlovo číslo
$\dot{Q}$	(W/m)	merný tepelný výkon na jednotku dĺžky trubky
$q_{ocel}$	(W/mm)	merný tepelný výkon nezanesenej trubky
$q_{ocel,AVG}$	(W/mm)	priemerný tepelný výkon nezanesenej trubky
$q_{ocel+nános}$	(W/mm)	merný tepelný výkon zanesenej trubky
$q_{ocel+nános,AVG}$	(W/mm)	priemerný tepelný výkon zanesenej trubky
$r$	(s <sup>-1</sup> )	konštanta pre prechodový creep
$Re$	(-)	Reynoldsovo číslo
$R_{m,op}$	(MPa)	medza pevnosti pri skúmanej teplote a čase
$R_{m/t/T}$	(MPa)	medza pevnosti pri určitej teplote v určitom čase
$R_{p0,2}$	(MPa)	medza klzu materiálu
$R_z$	(m <sup>2</sup> ·K/W)	súčiniteľ a zanášania
$t$	(s)	čas
$T_{al}$	(h)	čas do teoretického poškodenia vplyvom creep
$T_{al}$	(h)	doba do dosiahnutia teoretického porušenia materiálu tečením
$T_{NEC}$	(°C)	teplota, pri ktorej môže dôjsť k zanedbaniu creepu
$T_{op}$	(°C)	priemerná teplota
$T_{op}$	(h)	doba prevádzky pri prevádzkových podmienkach
$T_{plam}$	(°C)	reálna teplota plameňa
$T_s$	(K)	je lokálna teplota spalín

$v$	(-)	koeficient stenčovania
$ v $	(m/s)	absolútna hodnota rýchlosti prúdiaceho média
$V_T$	(m <sup>3</sup> )	celkový objem poréznej zóny
$V_V$	(m <sup>3</sup> )	objem trubiek nahradzovaných v poréznej zóne
$w$	(m/s)	rýchlosť spalín pred prehrievačom.
$w_e$	(m/s)	rýchlosť spalín v medzitrubkovom priestore prehrievača
$Z_0$	(h)	doba prevádzky do začatia špeciálnych kontrolných meraní
$Z_{\theta/p}$	(h)	doba prevádzky pri určitej teplote a tlaku
$Z_B$	(h)	návrhová životnosť komponenty
$Z_{B/\theta/p}$	(h)	návrhová životnosť pri určitej teplote a tlaku
$\alpha$	(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	koeficient prestupu tepla
$\alpha_p$	(m <sup>2</sup> )	priepustnosť plochy
$\Delta D_{cik}$	(-)	podiel poškodenia materiálu tečením
$\Delta \dot{H}$	(MJ/s)	tok entalpie
$\Delta p$	(Pa)	tlaková strata
$\nabla p$	(Pa/m)	gradient tlaku
$\Delta T$	(K)	rozdiel vstupnej a výstupnej teploty
$\varepsilon$	(-)	pórovitosť prepážky
$\varepsilon_{cr}$	(-)	creepové predĺženie
$\varepsilon_i$	(-)	počiatočné pomerné predĺženie
$\varepsilon_{\dot{\varepsilon}}$	(s <sup>-1</sup> )	je rýchlosť pretvorenia ustáleného creepu
$\varepsilon_T$	(-)	celkové pretvorenie
$\varepsilon_t$	(-)	pomerné predĺženie pri prechode z primárneho do sekundárneho creepu
$\lambda$	(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	tepelná vodivosť
$v_j$	(m/s)	komponent rýchlosti prúdiaceho média pre jeden smer
$\zeta$	(-)	súčiniteľ miestneho odporu
$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	hustota média
$\rho_m$	(kg/m <sup>3</sup> )	stredná hustota spalín
$\phi$	(-)	poréznosť média

#### 10.4 Zoznam cudzích názvov a skratiek

CFD	Computational Fluid Dynamics
ČSN	česká technická norma
DO	Discrete-Ordinates Radiation Model
DTS	dehtová zmes (dehtová topná smes)
fouling	stmelené nánosy
hm%	hmotnostné percentá
inlet	vstup
in-line	umiestnenie trubiek v rade za sebou
MKP	metóda konečných prvkov
Outlet	výstup

porous jump	porézná prepážka
porous zone	porézná zóna
slagging	spekané nánosy
symmetry	symetria
TTO	ťažké vykurovacie oleje (ťažké topné oleje)
UDF	užívateľsky definovaná funkcia (user defined function)
Wall	stena

### 10.5 Zoznam chemických prvkov a zlúčenín

Ar	argón
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	oxid železnato-železitý
H <sub>2</sub> O	voda
N <sub>2</sub>	dusík
NaOH	hydroxid sodný
NO <sub>x</sub>	emisie oxidu dusíku
O <sub>2</sub>	kyslík
PO <sub>4</sub>	fosforečnan
SiO <sub>2</sub>	oxid kremičitý

## 11 Zoznam publikácií

### 2018

LOŠÁK, P.; LÉTAL, T.; BUZÍK, J.; NAĎ, M. Leakage cause analysis of a flange joint designed according to standards. *Materiali in tehnologije*, 2018, vol. 52, no. 3, p. 295-298. ISSN: 1580-2949.

NAĎ, M.; JEGLA, Z.; LÉTAL, T.; LOŠÁK, P.; BUZÍK, J. Thermal load non-uniformity estimation for superheater tube bundle damage evaluation. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 157, no. 1, p. 1-10. ISSN: 2261-236X.

LOŠÁK, P.; LÉTAL, T.; BUZÍK, J.; NAĎ, M. Evaluation of the technical condition of medium-sized boilers. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 157, no. 1, p. 20-28. ISSN: 2261-236X.

BUZÍK, J.; LÉTAL, T.; NAĎ, M.; LOŠÁK, P.; PERNICA, M. Srovnání přístupů pro stanovení akustické rezonance. In *Sborník konference Kotle a energetická zařízení 2018. Kotle a energetická zařízení*. Brno: Moravská energetická, a.s., 2018. s. 111-123. ISSN: 1804-6673.

NAĎ, M., LÉTAL, T.; BUZÍK, J.; LOŠÁK, P.; Influence of Steam-Side Oxid Scales on Creep Life of Boiler Superheater Tube. *Materiali in tehnologije*, 2018, vol. 52, no. 1, p. 43-46. ISSN: 1580-2949.

### 2017

LÉTAL, T.; LOŠÁK, P.; BUZÍK, J.; NAĎ, M.: V012 - ESCAKEE; Vyhodnocovací software pro řízení stárnutí klíčových energetických zařízení. web Ústavu procesního inženýrství. URL: <http://www.upi.fme.vutbr.cz/veda-vyzkum/ESCAKEE>. (software)

LOŠÁK, P.; LÉTAL, T.; BUZÍK, J.; NAĎ, M. *Leakage cause analysis of a flange joint designed according to standards*. 25th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND TECHNOLOGY. Ljubljana: Institute of Metals and Technology, Ljubljana, Slovenia, 2017. p. 123-123. ISBN: 978-961-94088-1-0.

NAĎ, M.; JEGLA, Z.; LÉTAL, T.; LOŠÁK, P.; BUZÍK, J. *Thermal load non-uniformity estimation for superheater tube bundle damage evaluation*. Machine Modeling And Simulations MMS 2017. Žilina: EDIS (Editing Centre of University of Žilina), 2017. p. 30-30. ISBN: 9788055413600.

NAĎ, M., LÉTAL, T.; BUZÍK, J.; LOŠÁK, P.; *Influence of Steam-Side Oxid Scales on Creep Life of Boiler Superheater Tube*. Ljubljana: Institute of Metals and Technology, Ljubljana, Slovenia, 2017. p. 135-135. ISBN: 978-961-94088-1-0.

LOŠÁK, P.; LÉTAL, T.; BUZÍK, J.; NAĎ, M. *Evaluation of the technical condition of medium-sized boilers*. Machine Modeling And Simulations MMS 2017. Žilina: EDIS (Editing Centre of University of Žilina), 2017. p. 27-27. ISBN: 9788055413600.

NAŘ, M.; BUZÍK, J.; LÉTAL, T.; LOŠÁK, P. ROOT-CAUSE ANALYSIS OF SUPERHEATER-TUBE FAILURE. *Materiali in tehnologije*, 2017, vol. 3, no. 51, p. 503-507. ISSN: 1580-2949.

BUZÍK, J.; LÉTAL, T.; JEGLA, Z.; LOŠÁK, P.; NAŘ, M. Možnosti aplikace výsledků experimentů pro verifikaci a validaci numerických modelů při výpočtech vibrací vyvolaných prouděním. In *Sborník konference Kotle a energetická zařízení 2017. Kotle a energetická zařízení*. 2017. s. 270-278. ISSN: 1804-6673.

## 2016

LÉTAL, T.; SUK, L.; LOŠÁK, P.; BUZÍK, J.; NAŘ, M. *Fatigue Analysis of Electric Heating Element*. Program in knjiga povzetkov / Program and book of abstracts. 2016. p. 131-131. ISBN: 9789619408803.

NAŘ, M.; LÉTAL, T.; LOŠÁK, P.; BUZÍK, J. *Root Cause Analysis of Superheater Tubes Failure*. Program in knjiga povzetkov / Program and book of abstracts. 2016. p. 161-161. ISBN: 9789619408803.

LOŠÁK, P.; LÉTAL, T.; BUZÍK, J.; NAŘ, M. *Oxide Scales Damaging Evaluation*. Program in knjiga povzetkov / Program and book of abstracts. 2016. p. 136-136. ISBN: 9789619408803.

BUZÍK, J.; LÉTAL, T.; LOŠÁK, P.; NAŘ, M. *Verification and Validation of Tube Bundle Cross Flow CFD Analysis by Means of Reynolds and Strouhal Numbers*. Program in knjiga povzetkov / Program and book of abstracts. 2016. p. 50-50. ISBN: 9789619408803.

## 2015

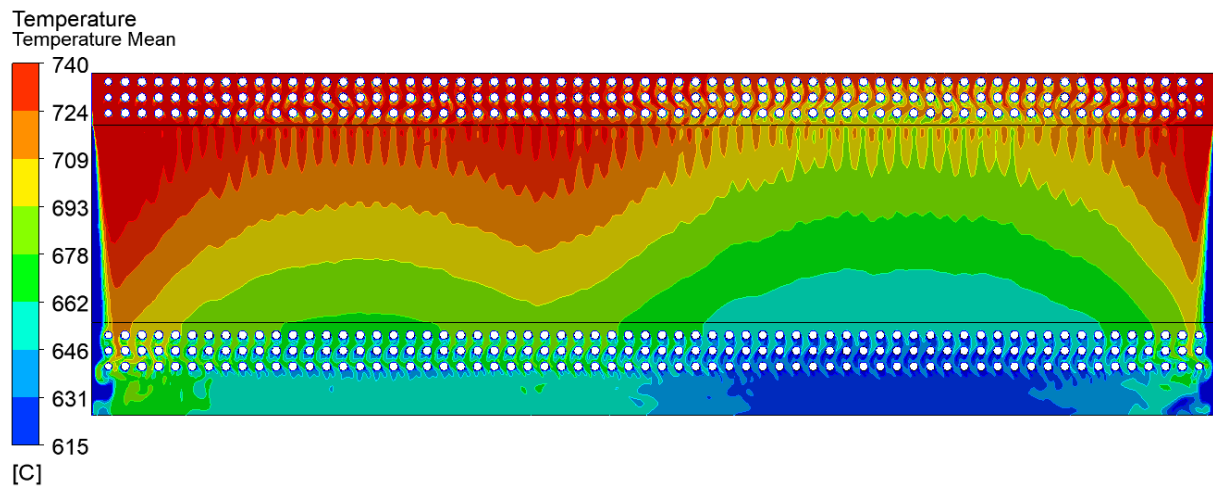
NAŘ, M.; NEKVASIL, R. *Analýza příčin vzniku trhlin na trubkách při zvarovom spoji prehrievača kotla*. Česká společnost chemického inženýrství, 2015. s. 1-9.



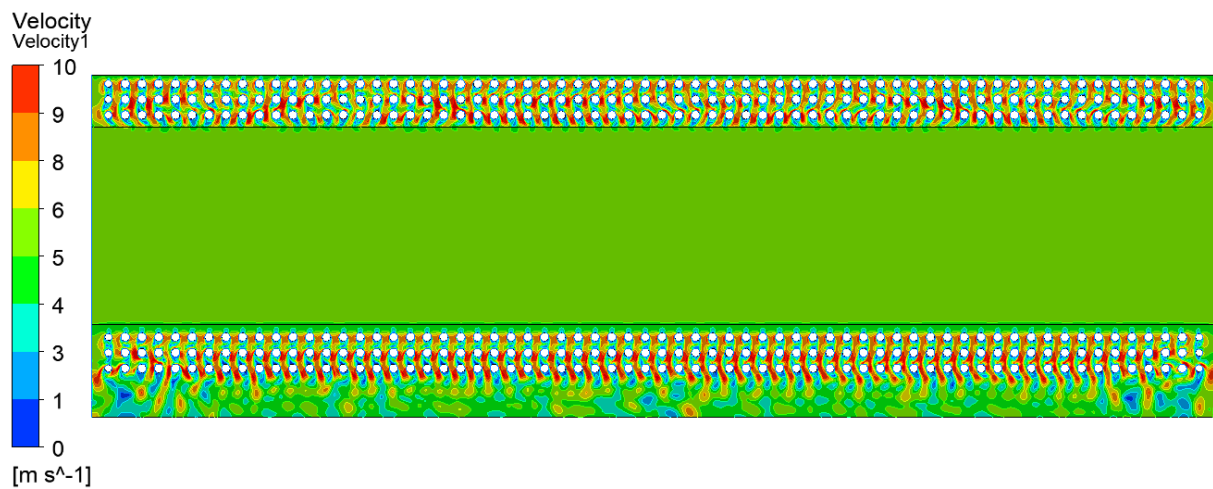
## **Príloha A**

Výsledky 2D simulácie teplotného zaťaženia trubiiek pre rezy X2, X3 a X4.

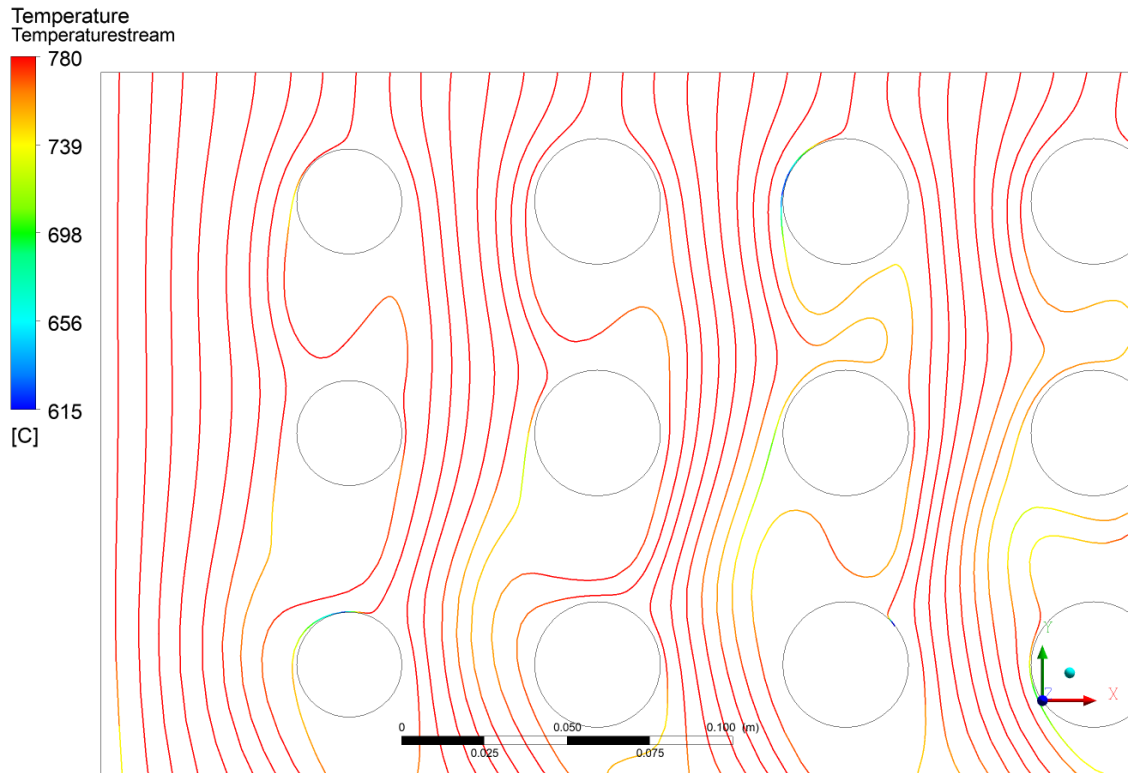
## A1 – Výsledné teplotné zaťaženie trubiek rezu X2



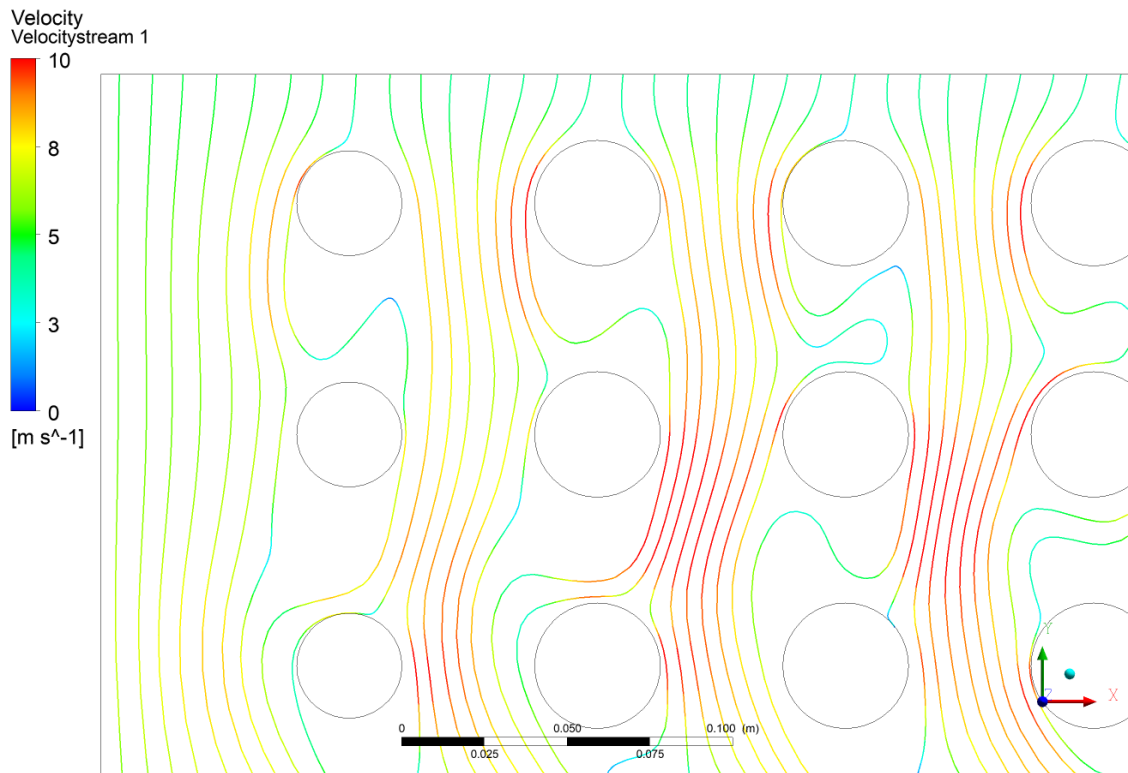
Obr. 58 Výsledné teplotné pole na reze prehrievaču X2. Smer toku spalín zhora.



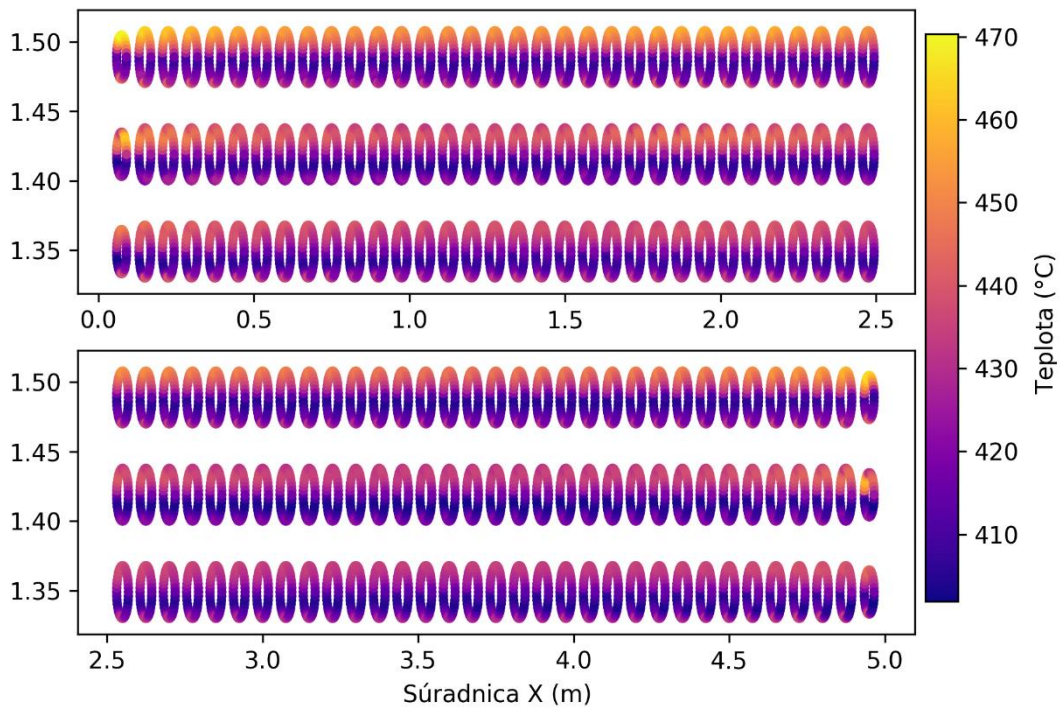
Obr. 59 Výsledné rýchlostné pole pole na reze prehrievaču X2. Smer toku spalín zhora.



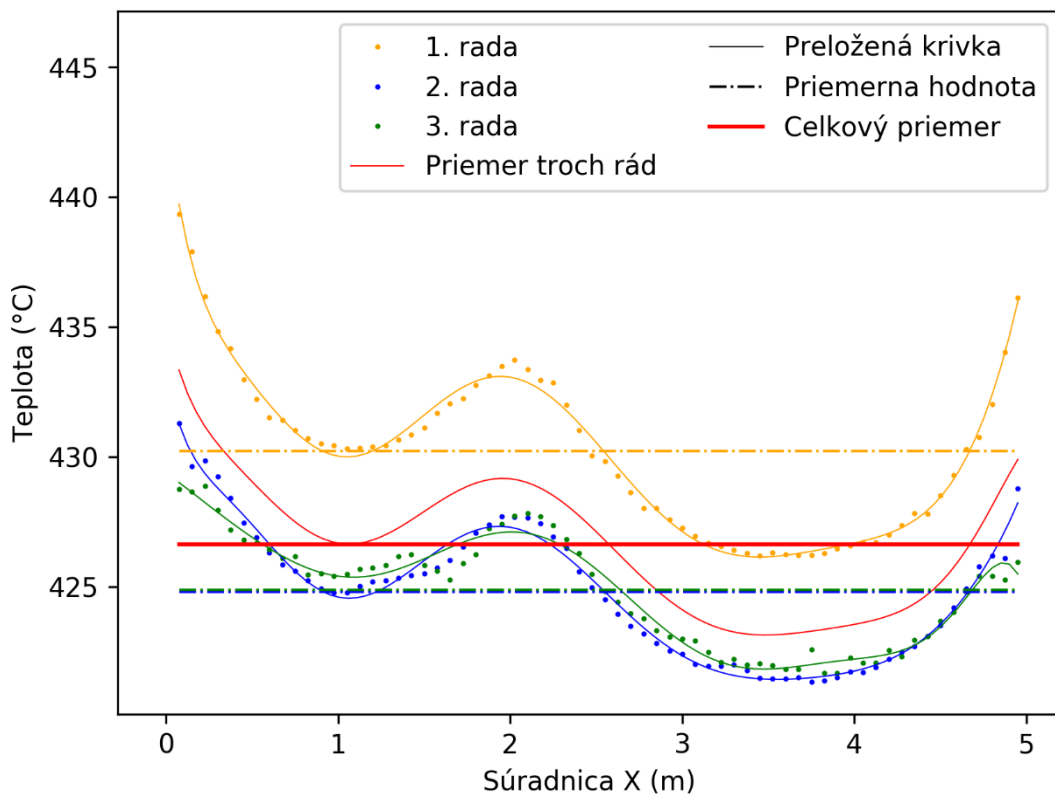
Obr. 60 Prúdnice spalín so zvýraznenou teplotou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X2. Smer toku spalín zhora.



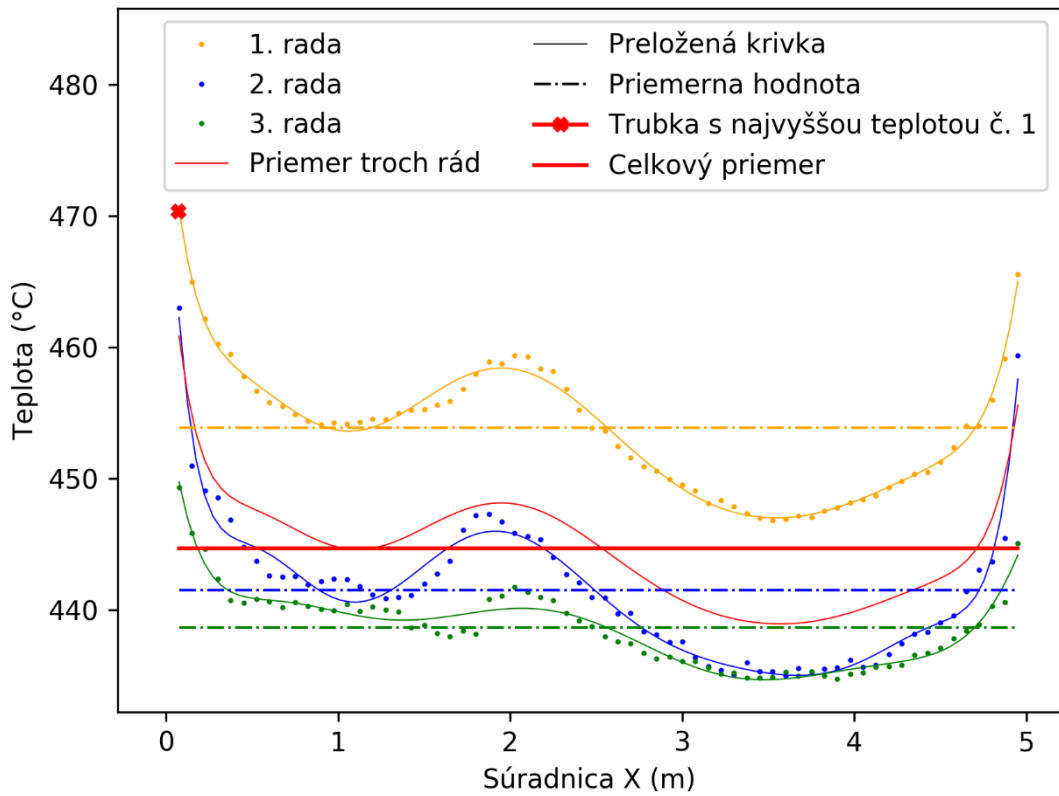
Obr. 61 Prúdnice spalín so zvýraznenou rýchlosťou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X2. Smer toku spalín zhora.



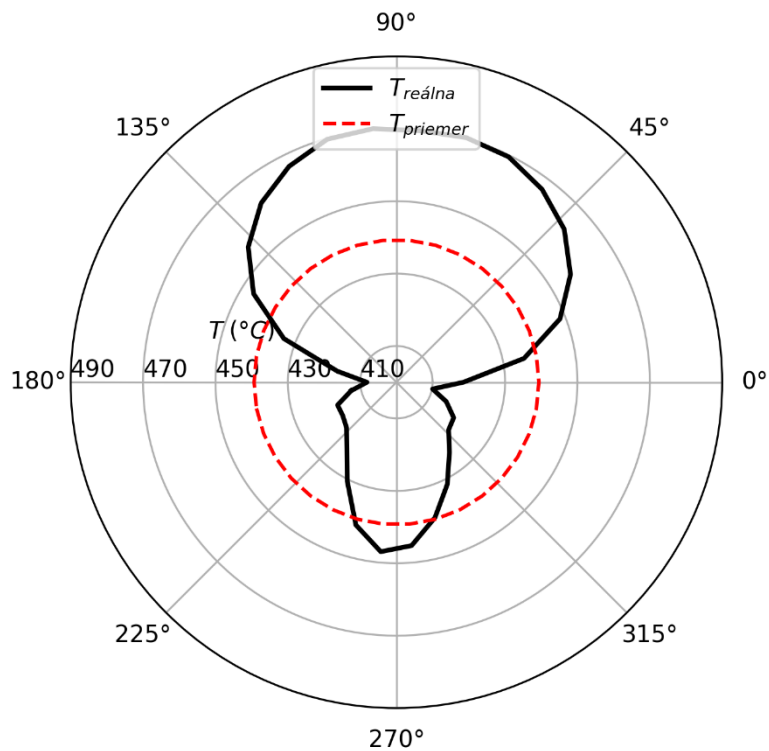
Obr. 62 Povrchové teploty na troch horných radoch trubiek prehrievača v reze X2 (pre prehľadnosť rozdelené na ľavú polovicu – hore a pravú polovicu – dole). Smer toku spalín zhora.



Obr. 63 Graf priemerných povrchových teplôt na každej trubke ako aj priemerná teplota trubiek v jednotlivých radoch rezu X2.

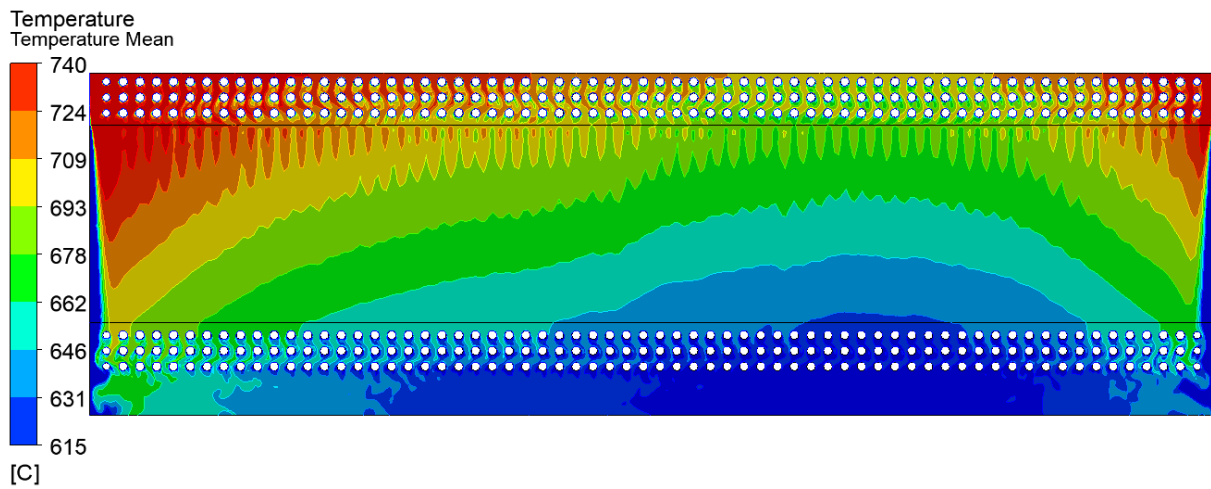


Obr. 64 Graf maximálnych povrchovej teplot trubiek, priemerné maximálne teploty trubiek v jednotlivých radoch rezu X2, ako aj zvýraznená najteplejšia trubka.

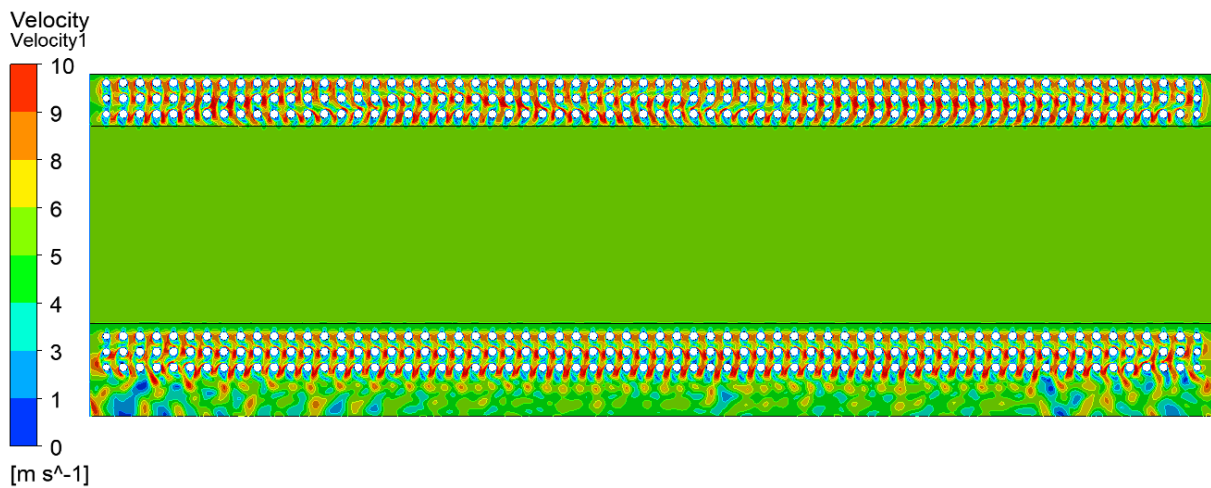


Obr. 65 Graf znázorňujúci vonkajšiu povrchovú teplotu najviac zaťažovanej trubky č.1 v reze X2, ako aj jej priemernú hodnotu. Smer toku spalín zhora.

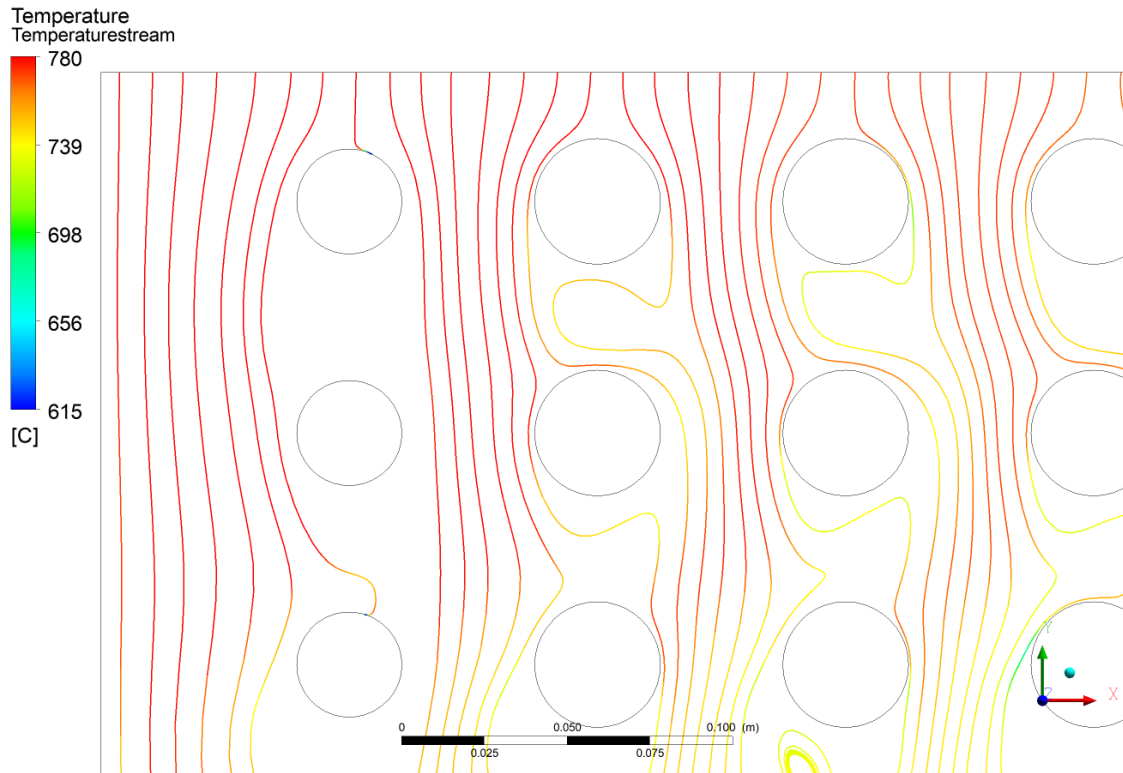
## A2 – Výsledné teplotné zaťaženie trubiek rezu X3



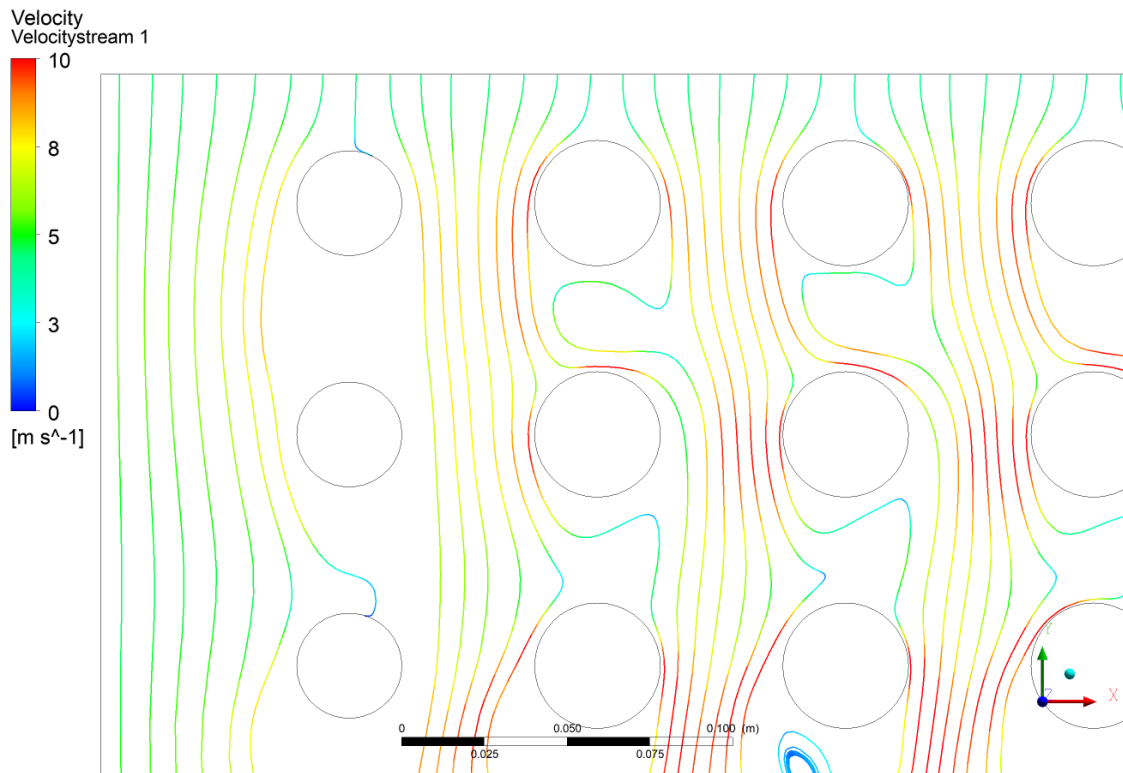
Obr. 66 Výsledné teplotné pole na reze prehrievaču X3. Smer toku spalín zhora.



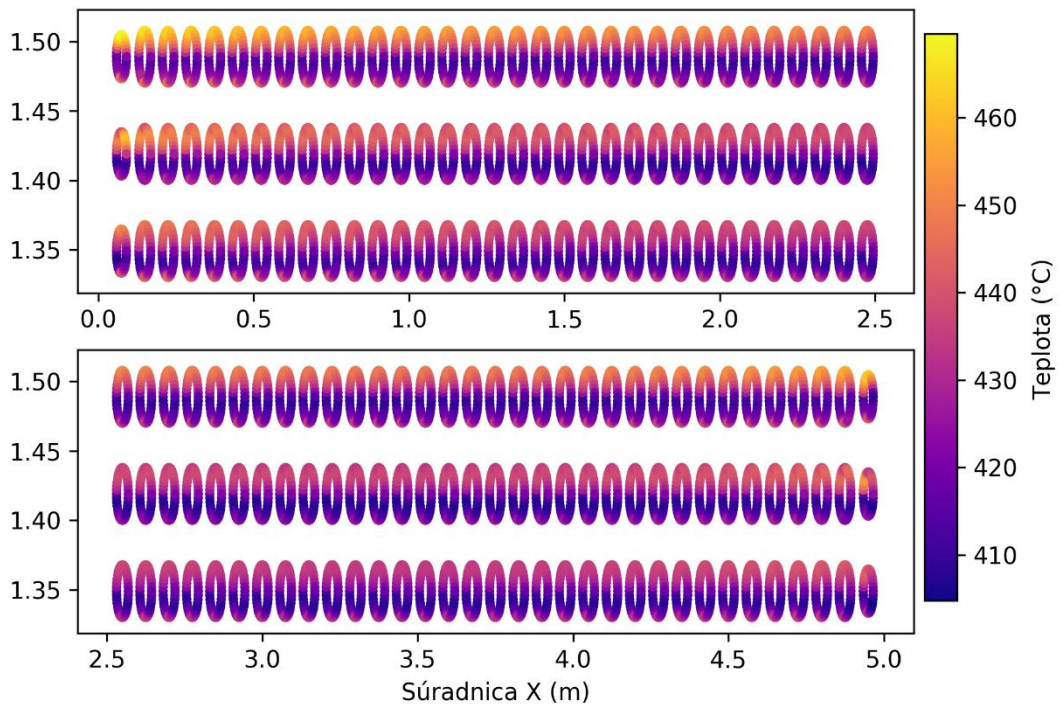
Obr. 67 Výsledné rýchlostné pole na reze prehrievaču X3. Smer toku spalín zhora.



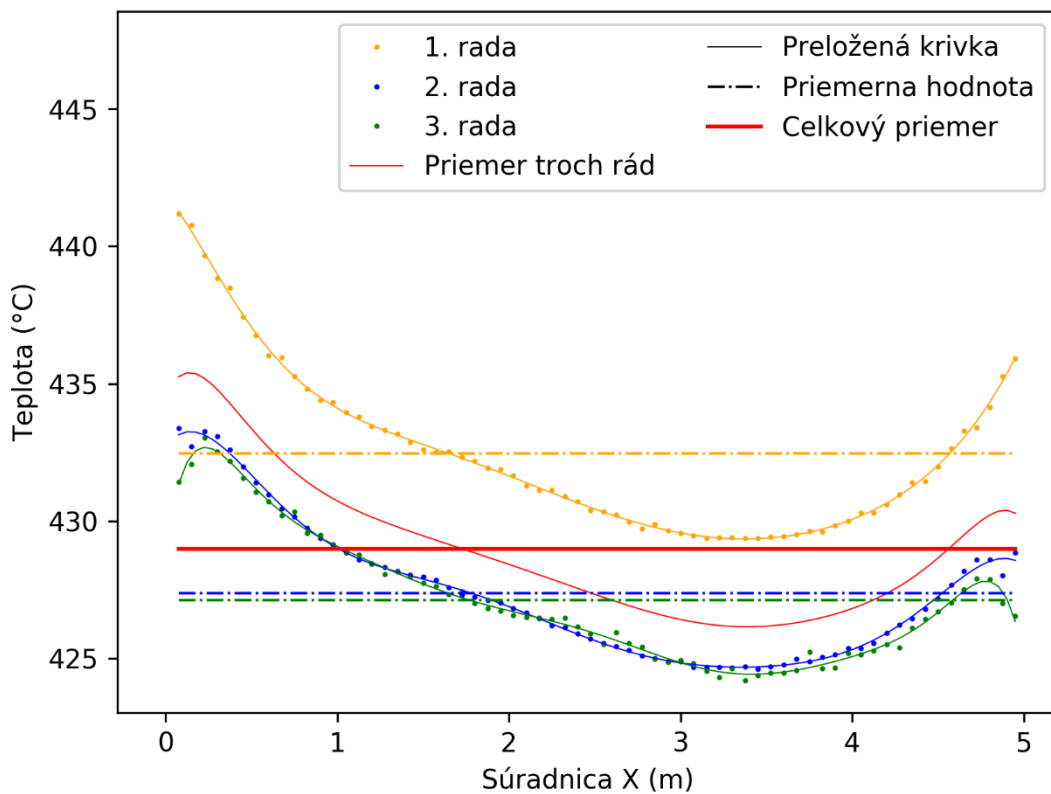
Obr. 68 Prúdnice spalín so zvýraznenou teplotou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X3. Smer toku spalín zhora.



Obr. 69 Prúdnice spalín so zvýraznenou rýchlosťou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X3. Smer toku spalín zhora.

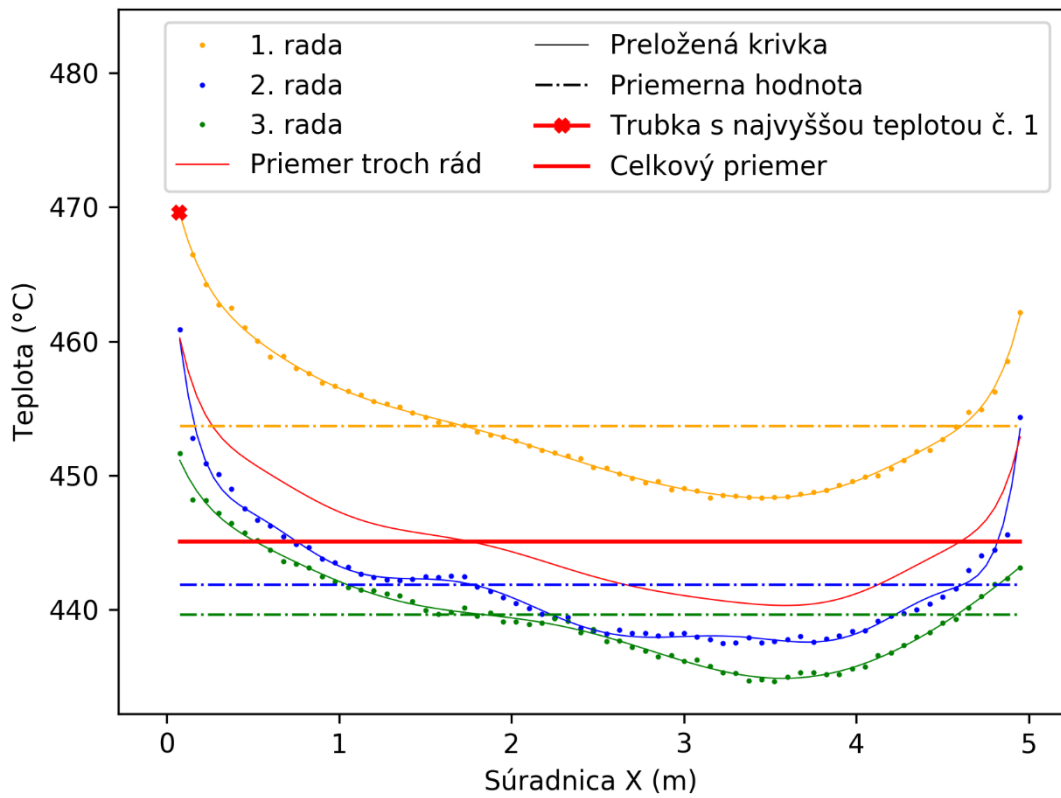


Obr. 70 Povrchové teploty na troch horných radoch trubiek prehrievača v reze X3 (pre prehľadnosť rozdelené na ľavú polovicu – hore a pravú polovicu – dole). Smer toku spalín zhora.

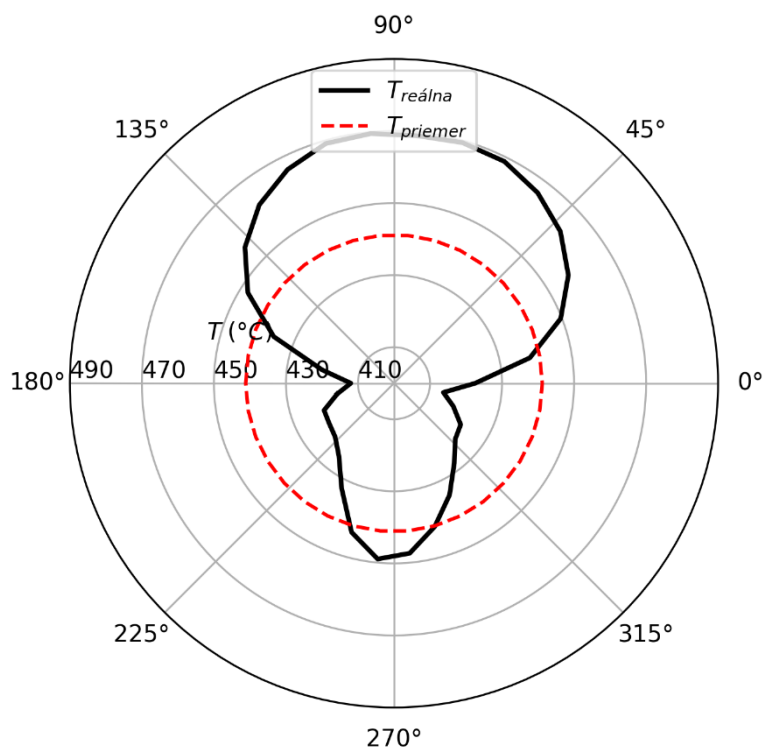


Obr. 71 Graf priemerných povrchových teplôt na každej trubke ako aj priemerná teplota trubiek v jednotlivých radoch rezu X3.



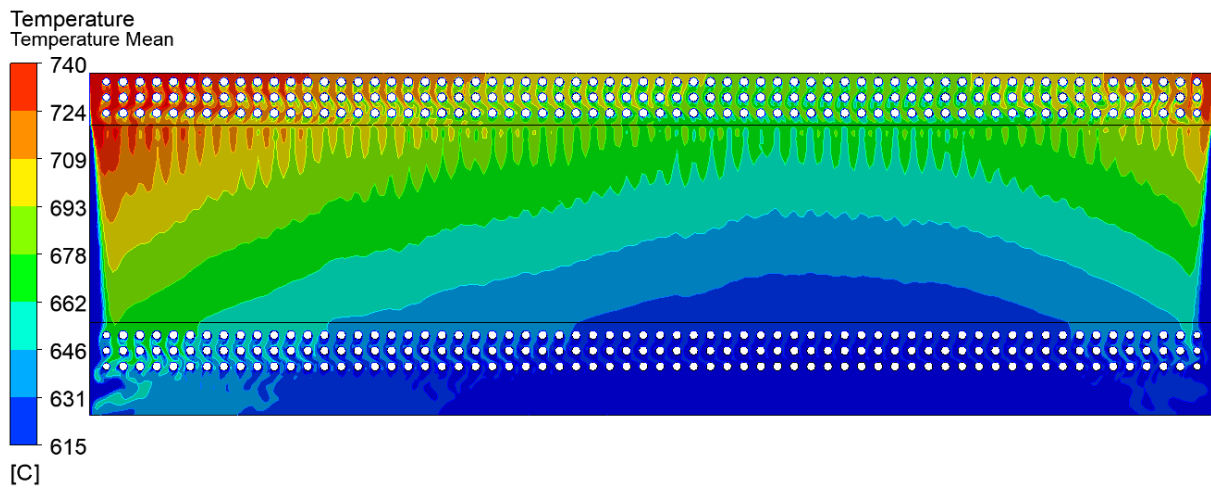


Obr. 72 Graf maximálnych povrchových teplôt trubiek, priemerné maximálne teploty trubiek v jednotlivých radoch rezu X3, ako aj zvýraznená najteplejšia trubka.

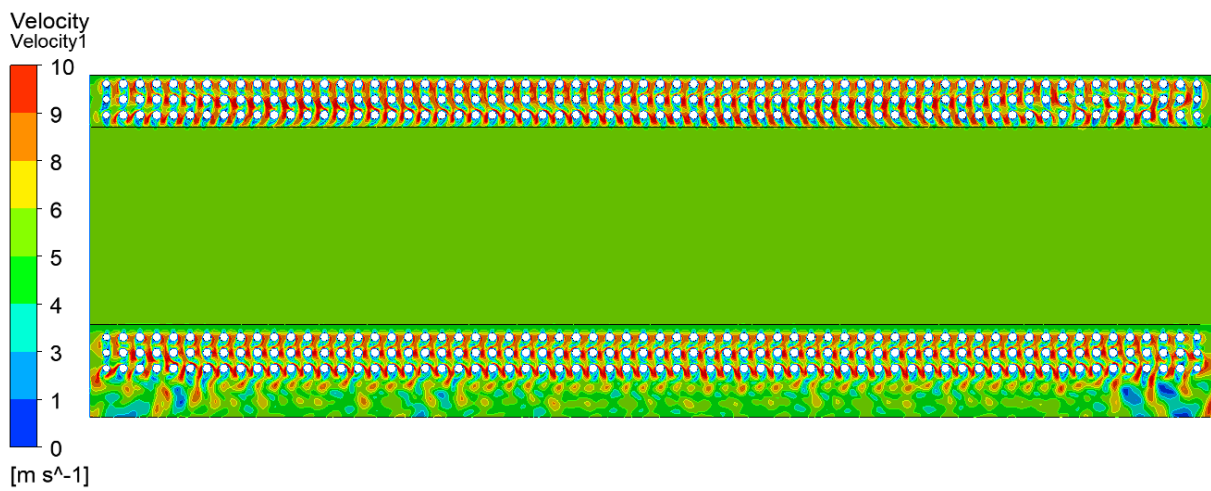


Obr. 73 Graf znázorňujúci vonkajšiu povrchovú teplotu najviac zaťažovanej trubky č.1 v reze X3, ako aj jej priemernú hodnotu. Smer toku spalín zhora.

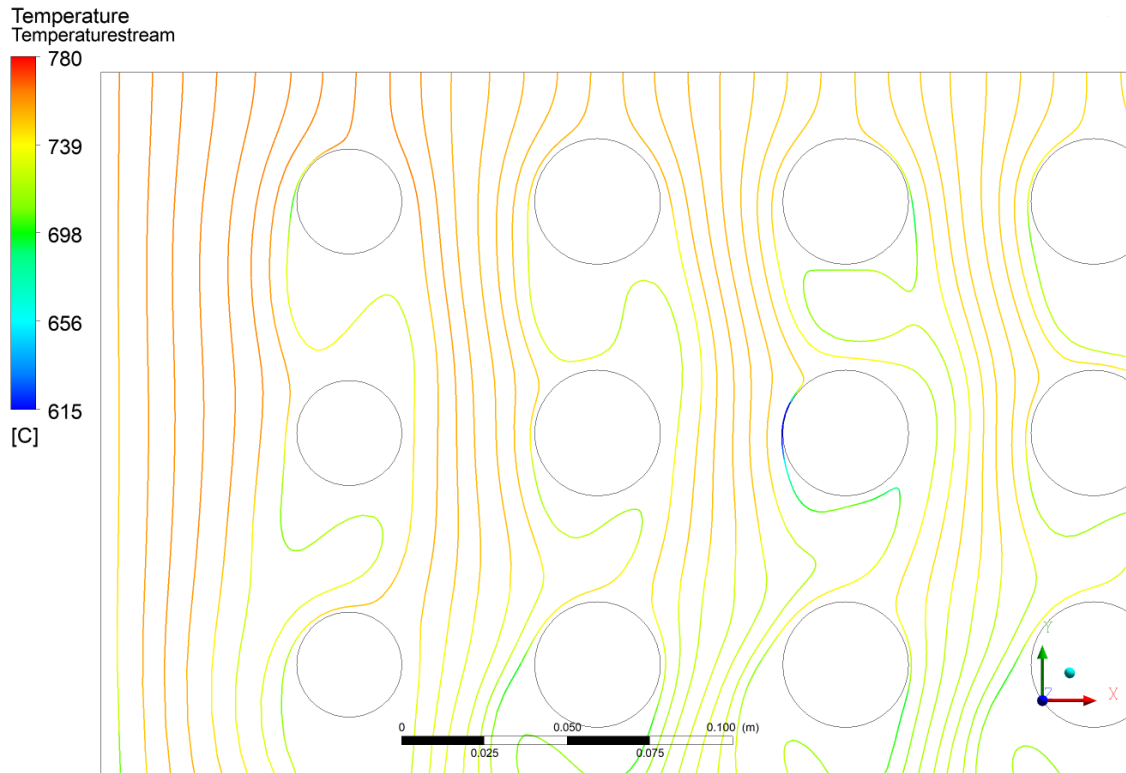
### A3 – Výsledné teplotné zaťaženie trubiek rezu X4



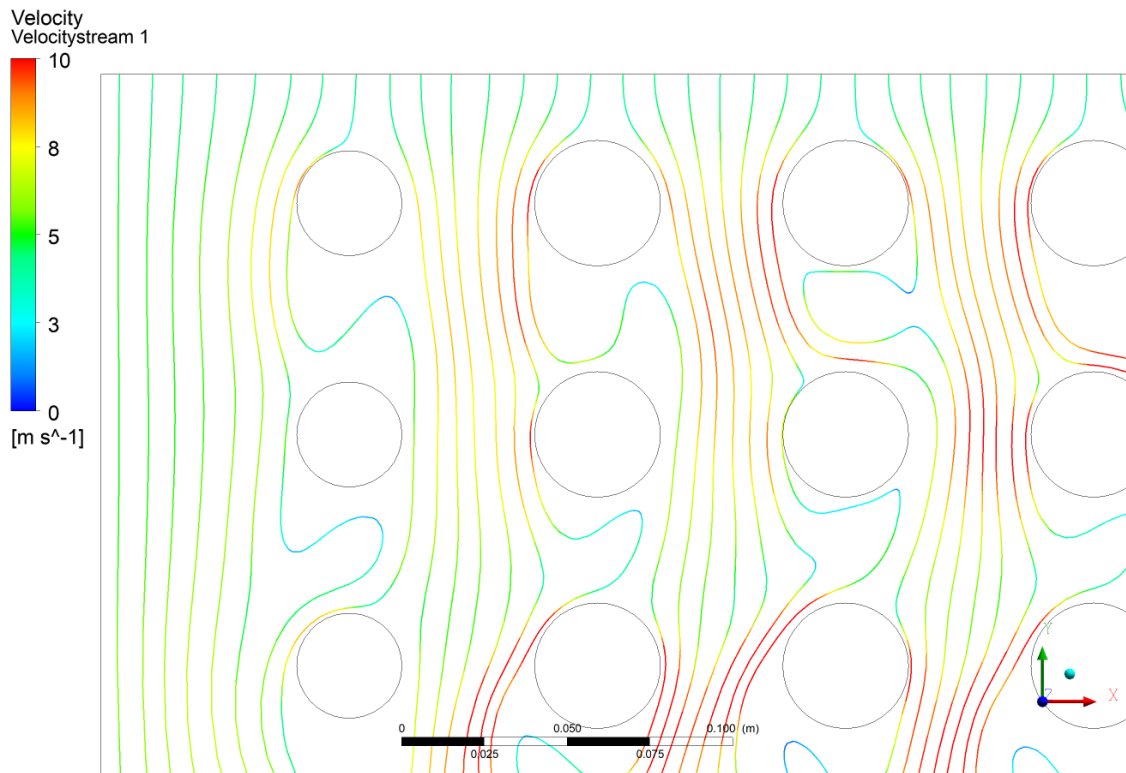
Obr. 74 Výsledné teplotné pole na reze prehrievaču X4. Smer toku spalín zhora.



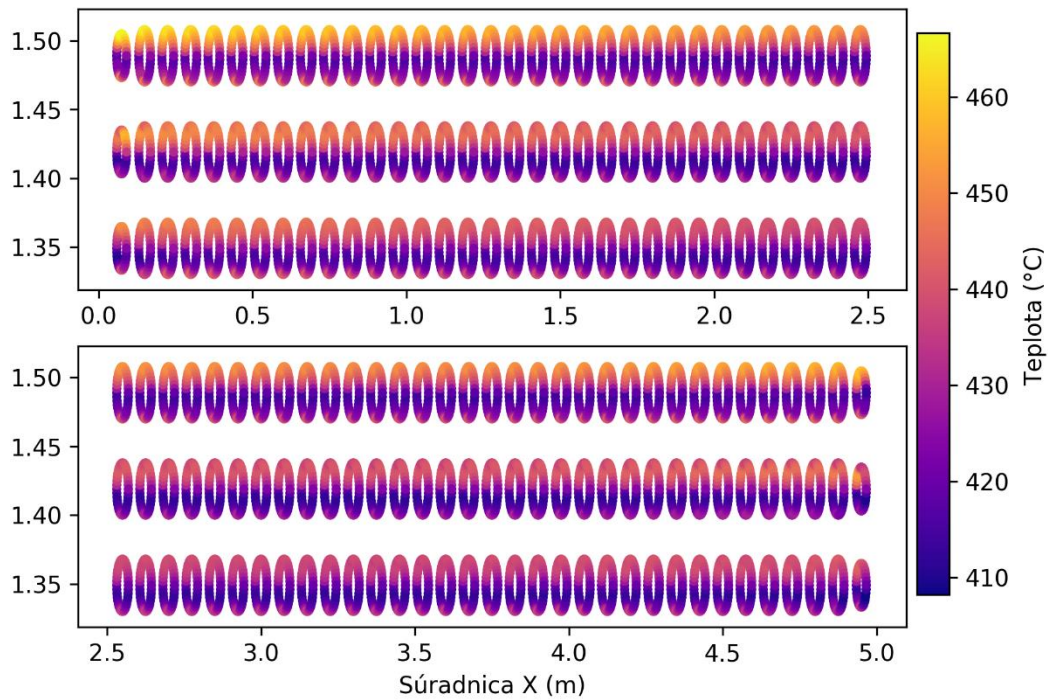
Obr. 75 Výsledné rýchlostné pole pole na reze prehrievaču X4. Smer toku spalín zhora.



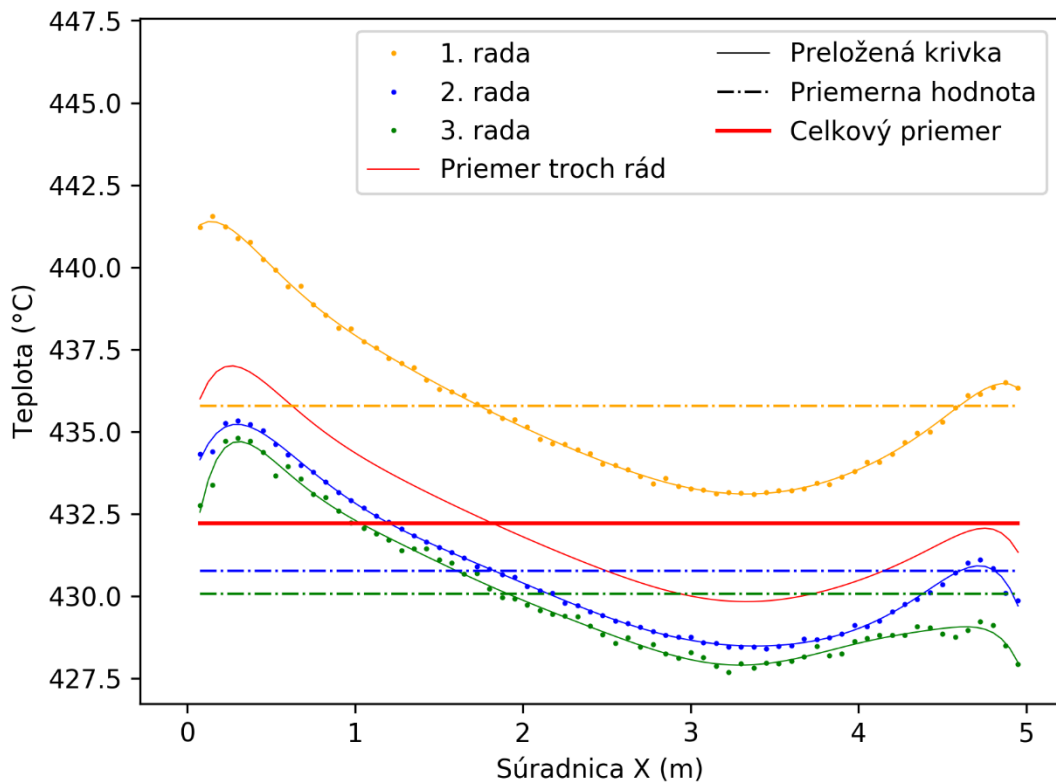
Obr. 76 Prúdnice spalín so zvýraznenou teplotou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X4. Smer toku spalín zhora.



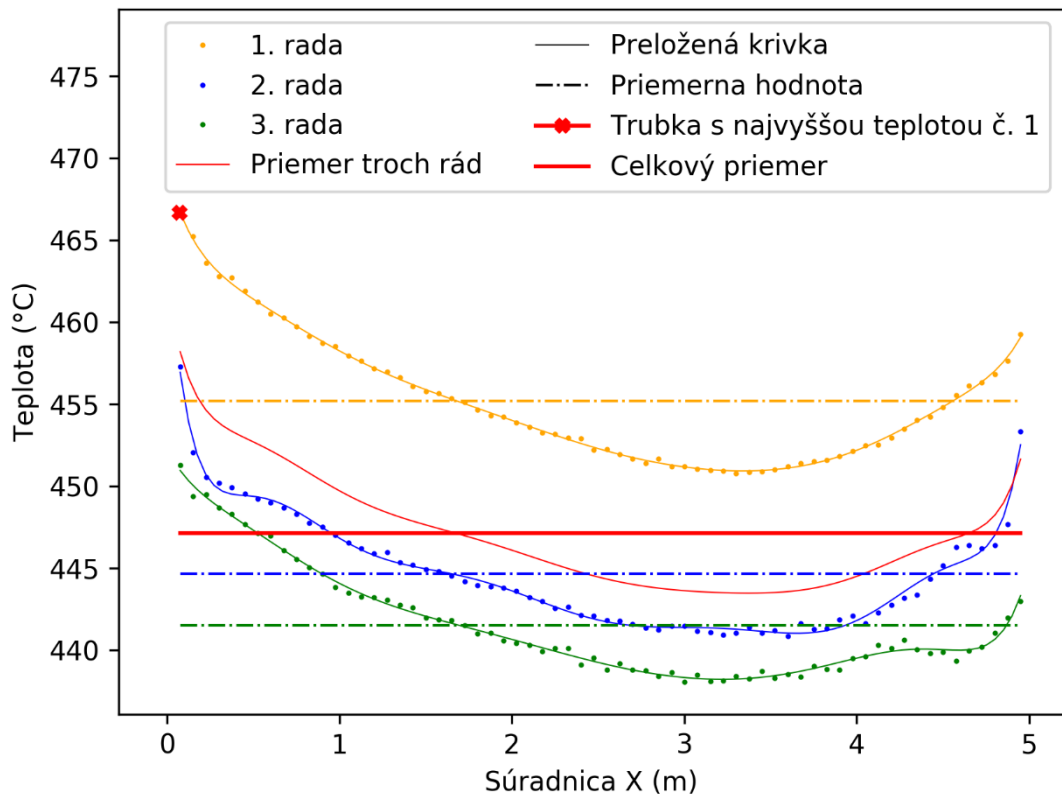
Obr. 77 Prúdnice spalín so zvýraznenou rýchlosťou v ľavej hornej oblasti rezu prehrievaču X4. Smer toku spalín zhora.



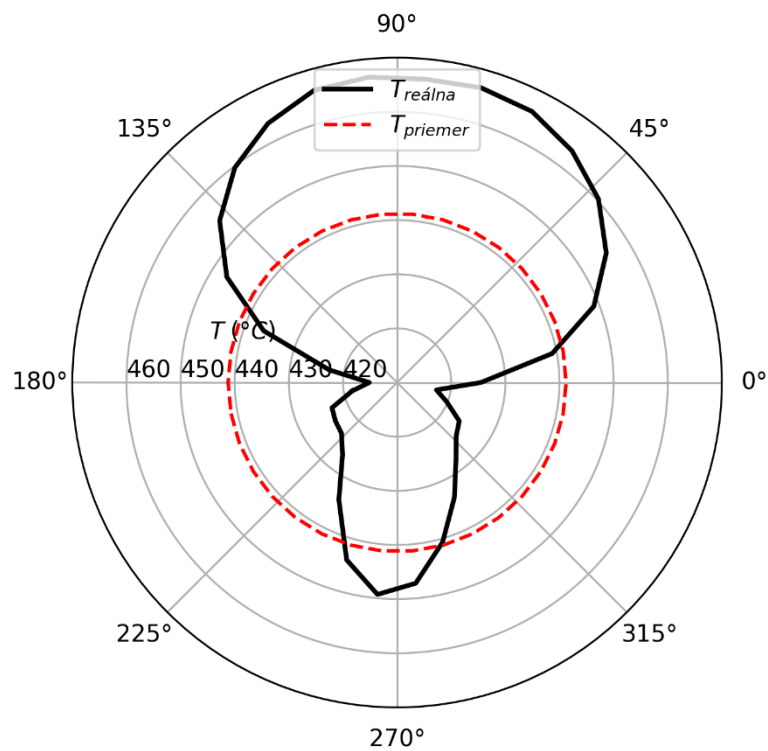
Obr. 78 Povrchové teploty na troch horných radoch trubiek prehrievača v reze X4 (pre prehľadnosť rozdelené na ľavú polovicu – hore a pravú polovicu – dole). Smer toku spalín zhora.



Obr. 79 Graf priemerných povrchových teplôt na každej trubke ako aj priemerná teplota trubiek v jednotlivých radoch rezu X4.



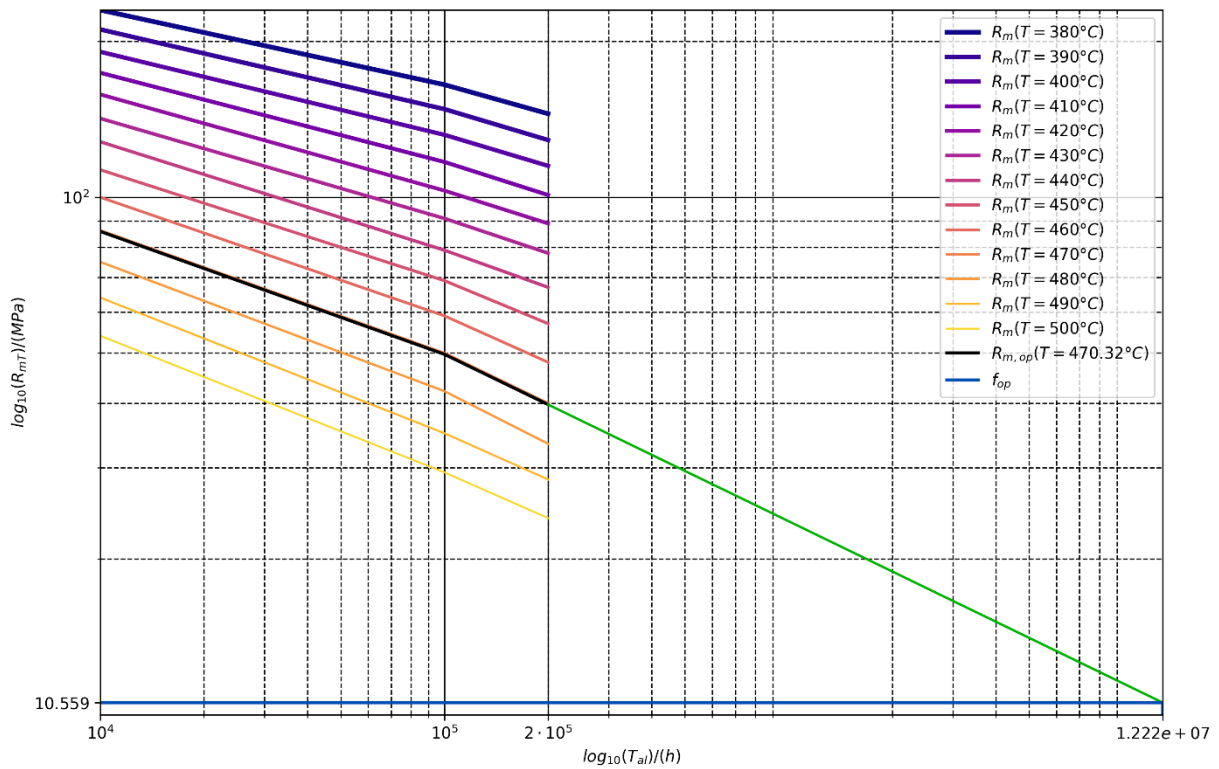
Obr. 80 Graf maximálnych povrchových teplôt trubiek, priemerné maximálne teploty trubiek v jednotlivých radoch rezu X4, ako aj zvýraznená najteplejšia trubka.



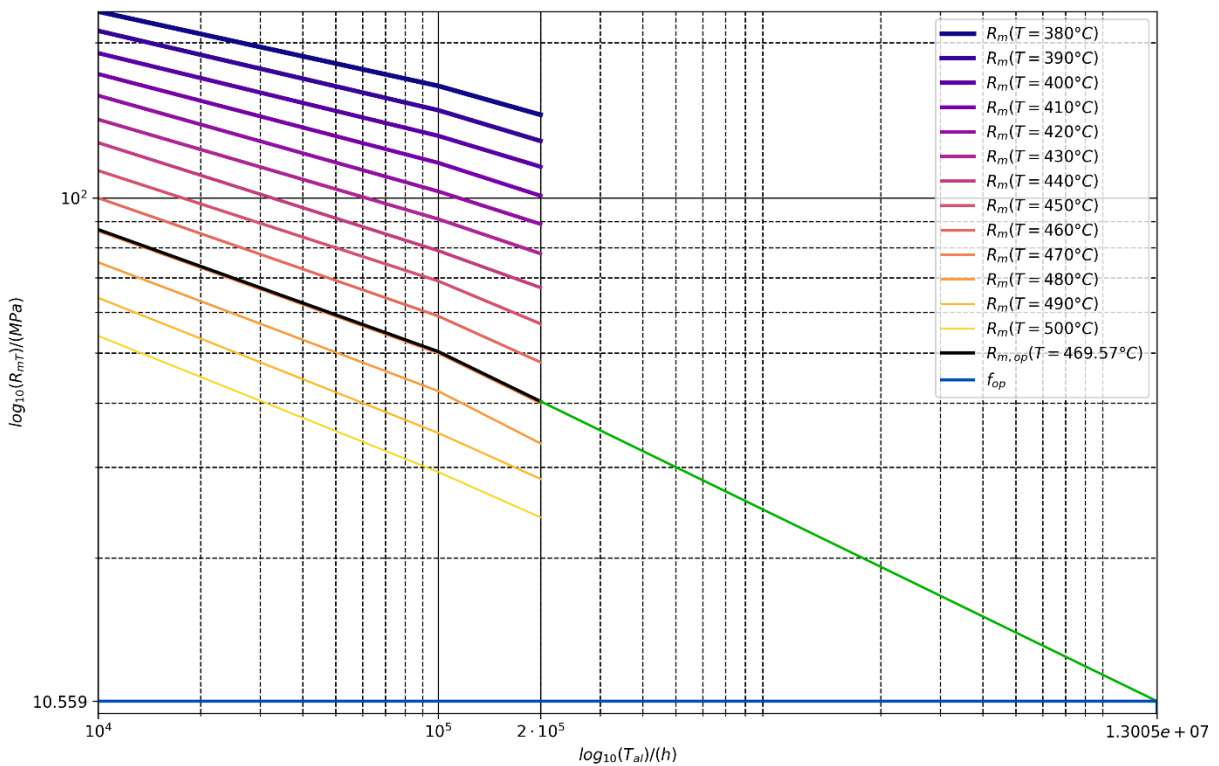
Obr. 81 Graf znázorňujúci vonkajšiu povrchovú teplotu najviac zaťažovanej trubky č.1 v reze X4, ako aj jej priemernú hodnotu. Smer toku spalín zhora.

## **Príloha B**

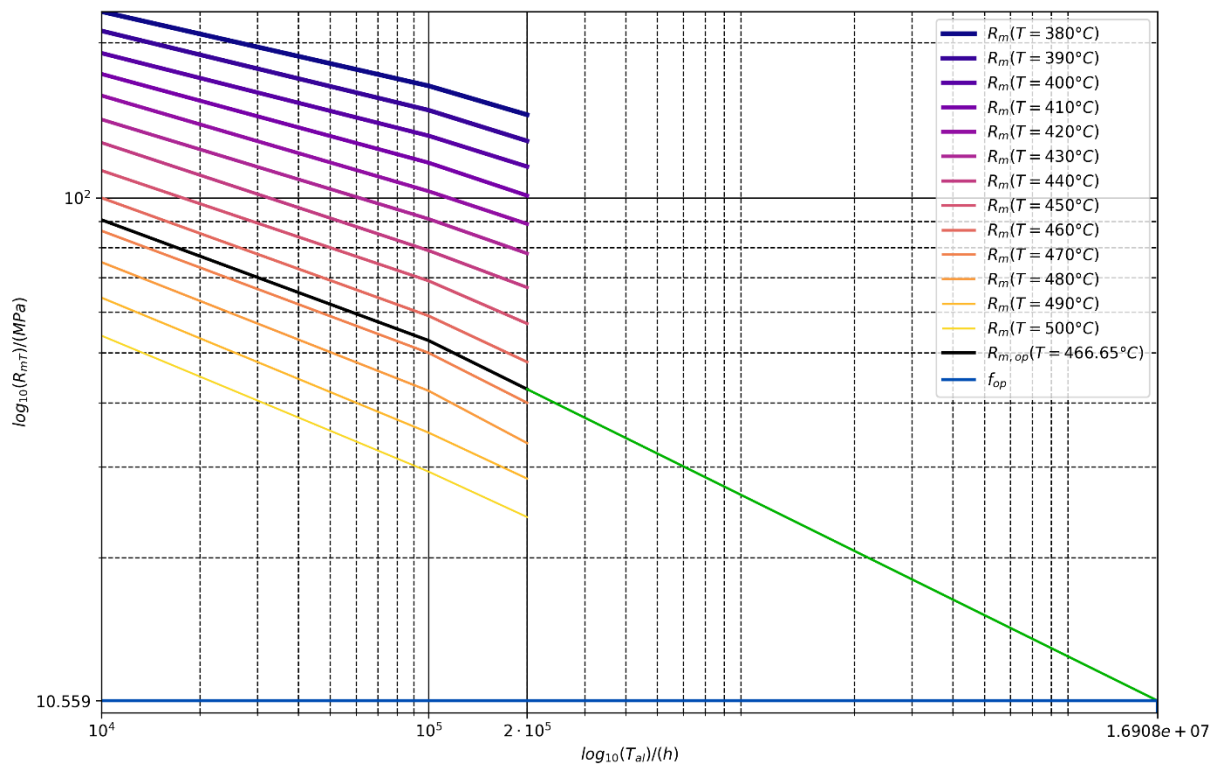
Grafy creepovej životnosti trubiek pre rezy X2, X3 a X4.



Obr. 82 Graf hodnotenia creepovej životnosti pre materiál 12022 a rez X2.

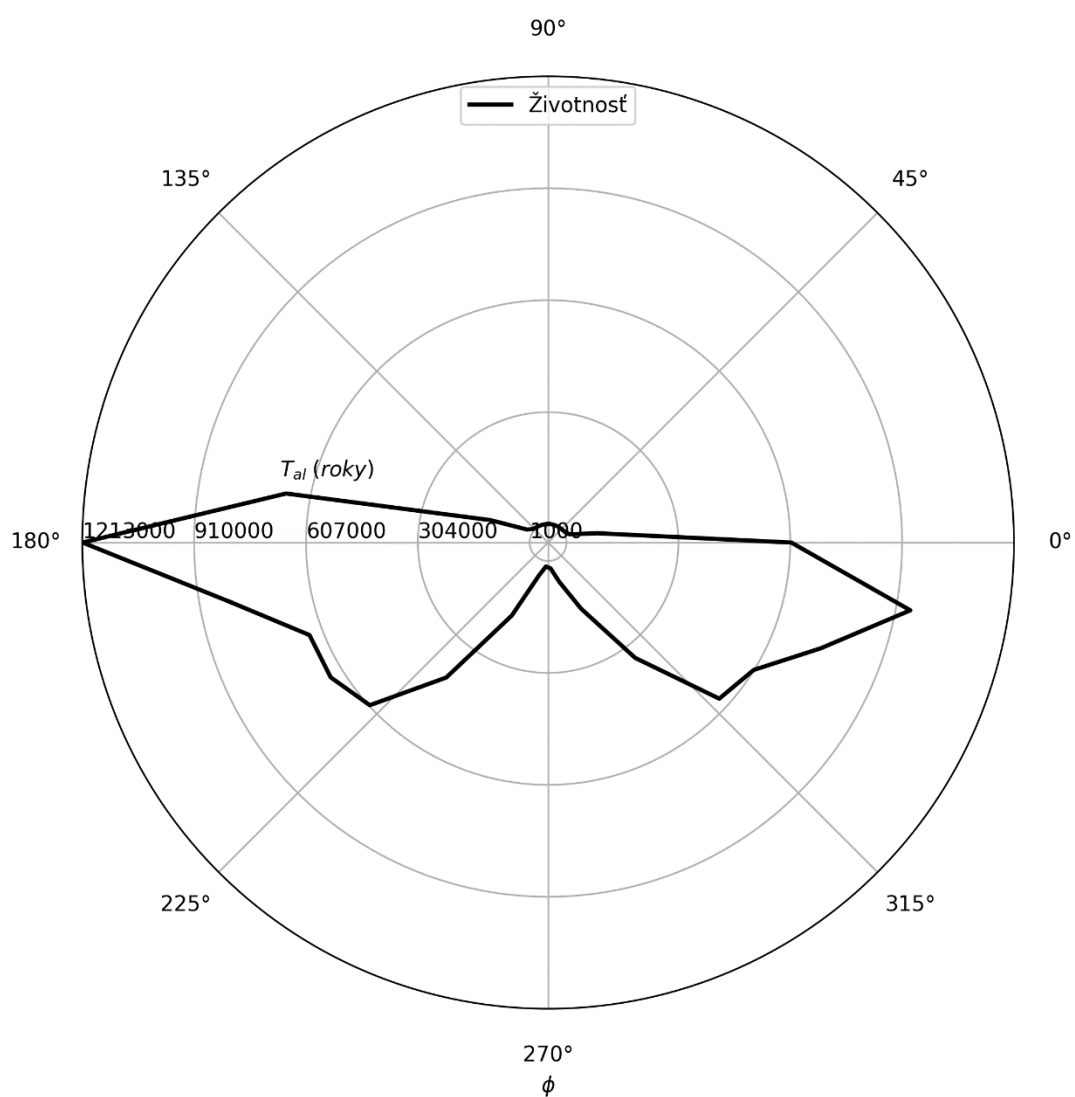


Obr. 83 Graf hodnotenia creepovej životnosti pre materiál 12022 a rez X3.

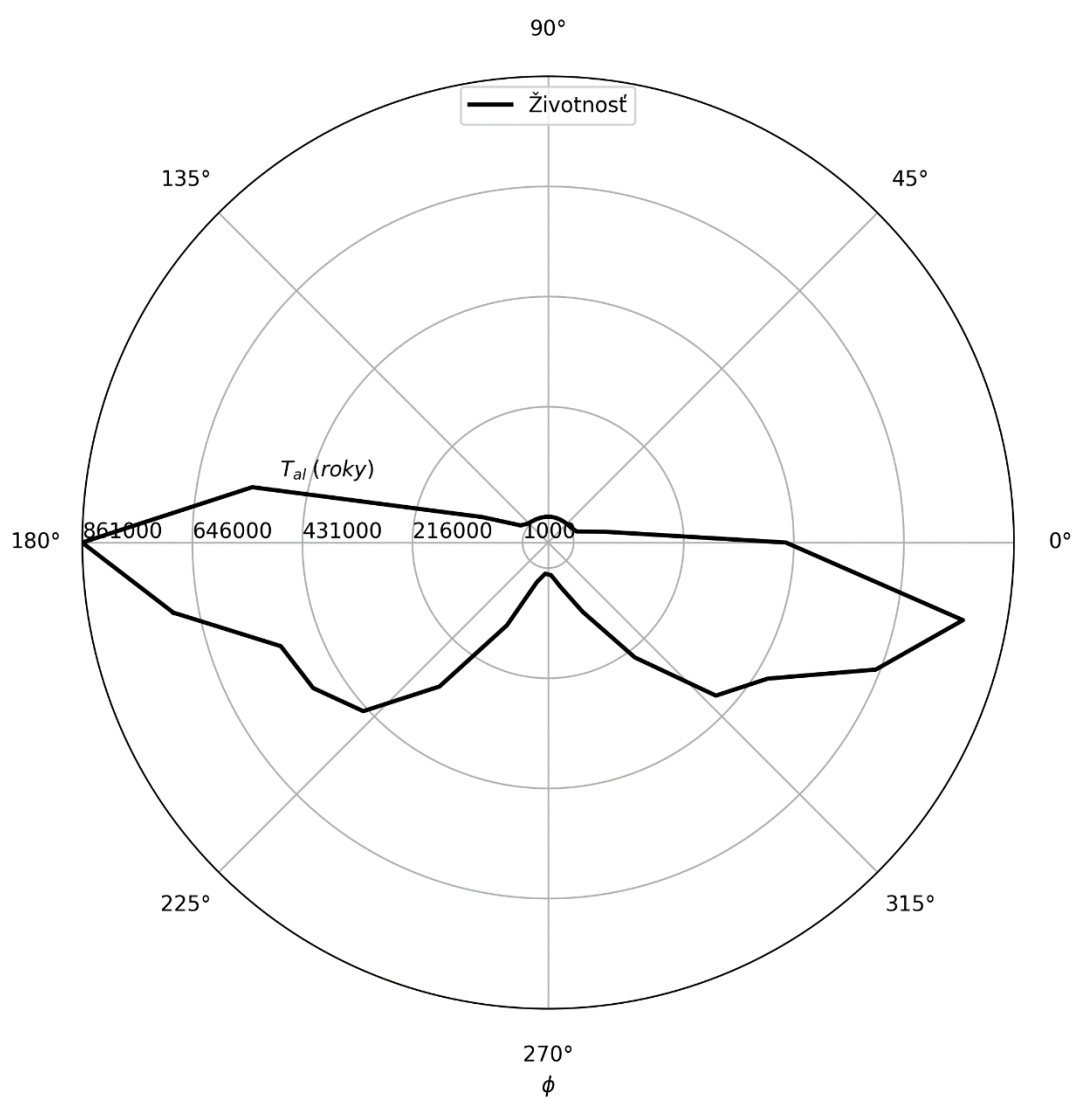


Obr. 84 Graf hodnotenia creepovej životnosti pre materiál 12022 a rez X4.

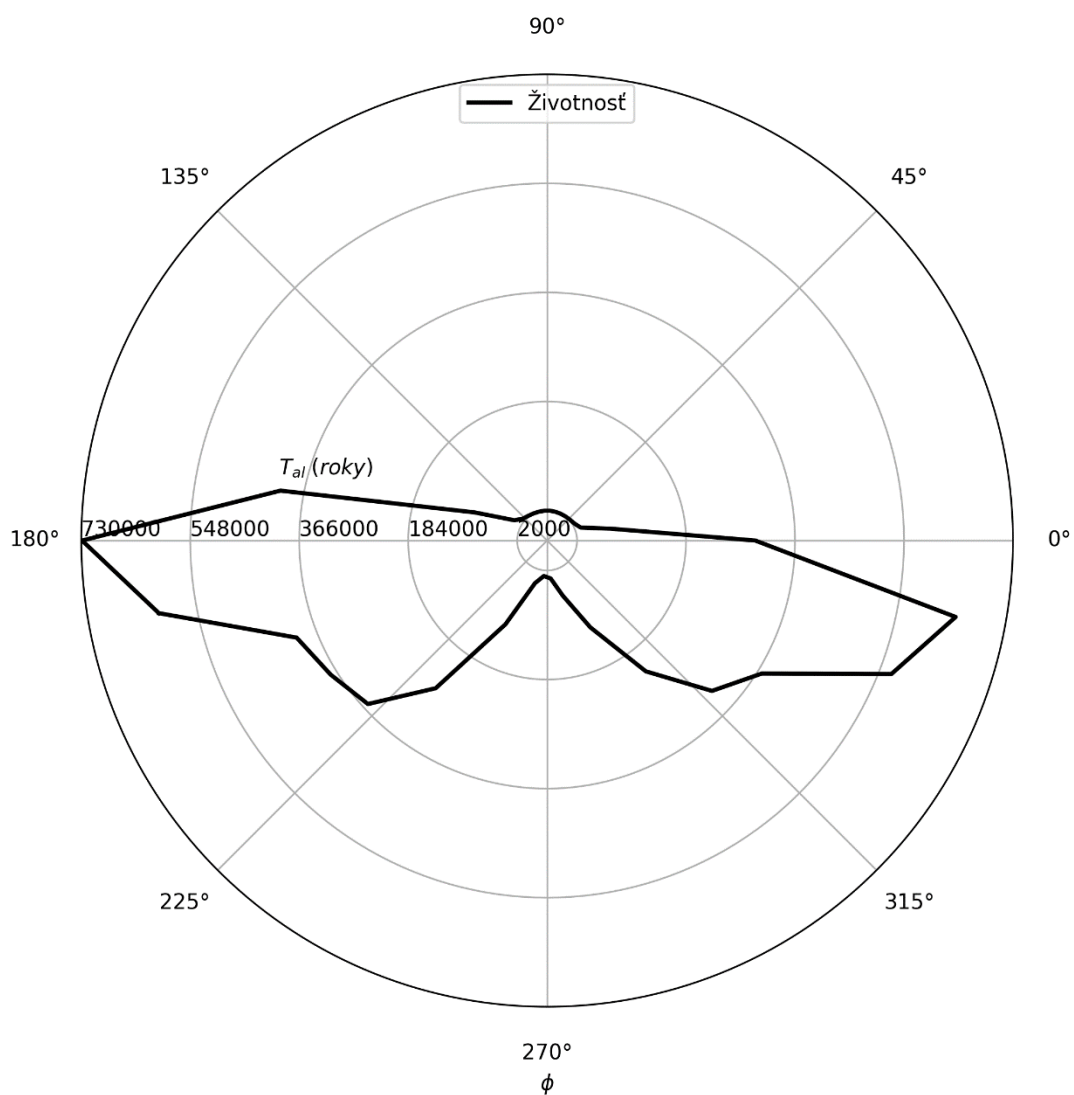




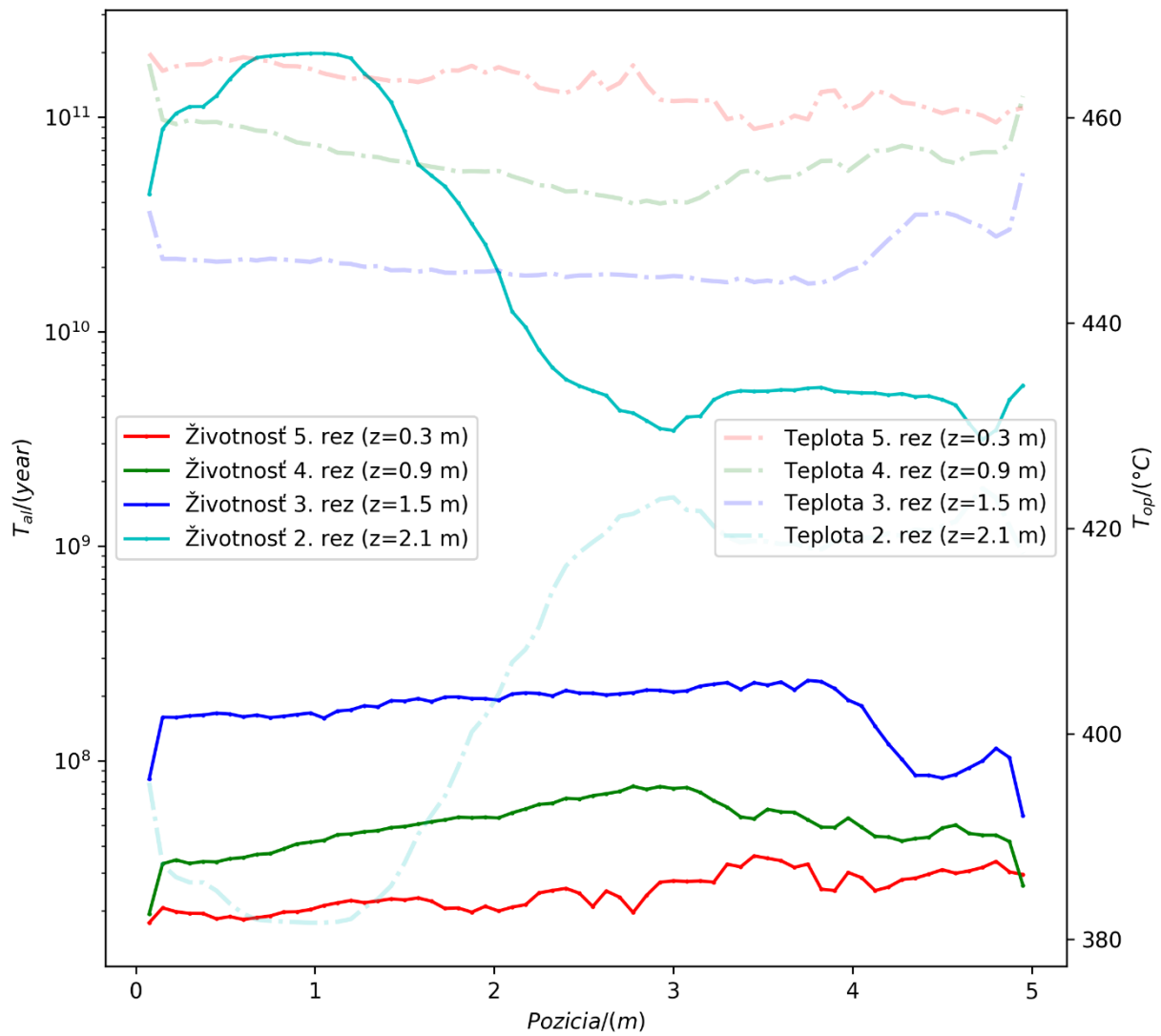
Obr. 85 Graf znázorňujúci zvyškovú životnosť po obvode najviac zaťažovanej trubky č.1 v reze X2.



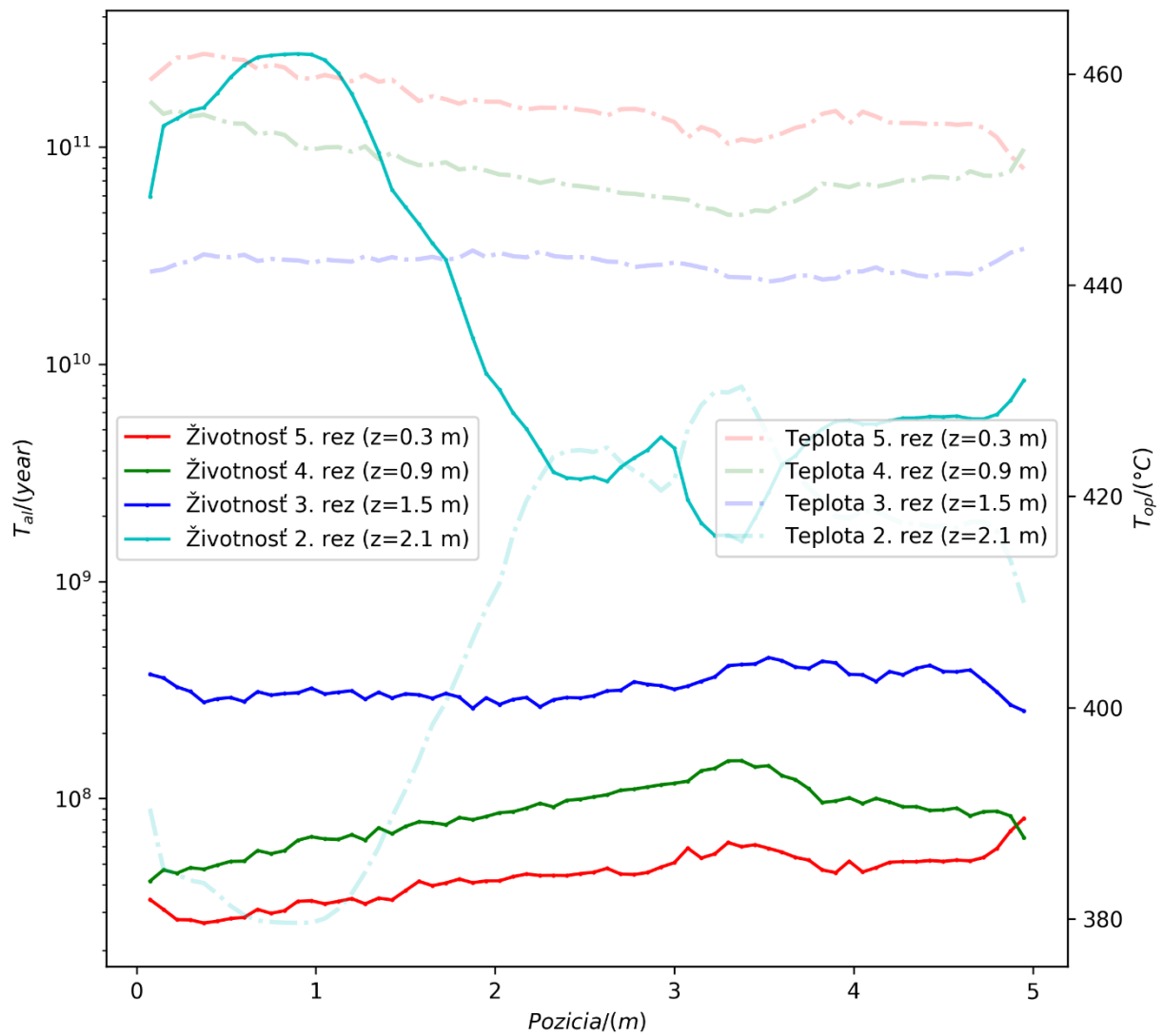
Obr. 86 Graf znázorňujúci zvyškovú životnosť po obvode najviac zaťažovanej trubky č.1 v reze X3.



Obr. 87 Graf znázorňujúci zvyškovú životnosť po obvode najviac zaťažovanej trubky č.1 v reze X4.



Obr. 88 Graf porovnávajúci zvyškovú životnosť a maximálnu teplotu pre jednotlivé trubky druhej rady (rezy X2, X3, X4 a X5).



Obr. 89 Graf porovnávajúci zvyškovú životnosť a maximálnu teplotu pre jednotlivé trubky tretej rady (rezy X2, X3, X4 a X5).