

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

**Vojtěch
Vlček**

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Viček** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **466111**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Rizika zanedbané údržby energetických zařízení

Název bakalářské práce anglicky:

Risks of neglected maintenance of energy equipments

Pokyny pro vypracování:

- 1) Souhrn poznatků o problematice:
 - energetická zařízení
 - problémy údržby
 - rizika
- 2) Stanovení důsledků zanedbané údržby
- 3) Zpracování získaných dat
- 4) Vyhodnocení získaných dat
- 5) Návrh opatření

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

doc. RNDr. Danuše Procházková, DrSc., 16123

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá riziky zanedbané údržby energetických zařízení, a především tepelných výměníků. Teoretická část popisuje základní rozdělení tepelných výměníků. Dále vysvětluje, co jsou rizika, co je způsobuje a jak snížit míru rizika. Praktická část je zaměřena na analyzování údajů z čištění tepelného výměníku, určení míry rizika a návrh opatření.

Klíčová slova:

tepelné výměníky, rizika, údržba

Abstract

This bachelor thesis deals with risks of neglected maintenance of energy equipment primarily heat exchangers. The theoretical part describes types of heat exchanger. It explains what risks are, what causes them and how to lower the level of risk. The experimental part focuses on cleaning data analysis, determination of level risk and precautions suggestion.

Keywords:

heat exchangers, risks, maintenance

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Rizika zanedbané údržby energetických zařízení** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Jméno, Příjmení

Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE a paní doc. RNDr. Danuši Procházkové, DrSc. za cenné rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce.

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod..... | 8 |
| 2 | Energetická zařízení..... | 9 |
| 2.1 | Tepelné výměníky | 9 |
| 2.1.1 | Rekuperační tepelné výměníky | 9 |
| 2.1.2 | Rotační regenerační tepelné výměníky | 15 |
| 2.1.3 | Směšovací tepelné výměníky | 16 |
| 3 | Vybraná rizika tepelných výměníků | 17 |
| 3.1 | Zdroje technických rizik tepelných výměníků | 17 |
| 3.1.1 | Koroze | 17 |
| 3.1.2 | Eroze..... | 20 |
| 3.1.3 | Zanášení tepelných výměníků | 21 |
| 3.1.4 | Mechanické poškození tepelných výměníků..... | 25 |
| 4 | Údržba tepelných výměníků | 26 |
| 4.1 | Čištění tepelných výměníků | 26 |
| 4.1.1 | Mechanické čištění | 26 |
| 4.1.2 | Chemické čištění | 28 |
| 4.2 | Monitorování mechanické integrity tepelných výměníků..... | 30 |
| 4.2.1 | Inspekce pomocí vířivých proudů | 32 |
| 4.2.2 | Ultrazvukové metody | 32 |
| 4.2.3 | Termografická inspekce | 33 |
| 4.2.4 | Akustická emise | 33 |
| 4.2.5 | Monitorování vibrací..... | 33 |
| 4.2.6 | Ostatní metody | 34 |
| 5 | Data o dopadech na vybraném zařízení a metoda zpracování dat | 35 |
| 6 | Vyhodnocení získaných dat a návrh opatření | 38 |
| 6.1 | Návrh opatření..... | 40 |

| | |
|--------------------|----|
| 7 Závěr | 41 |
| Bibliografie | 42 |

1 Úvod

Existuje mnoho energetických zařízení jako jsou kotle, turbíny, motory, generátory a mnoho dalších. Každé z těchto zařízení vyžaduje jiný druh údržby, protože má specifická vlastní rizika. Realizace rizika způsobuje škody na technickém zařízení, majetku v okolí, újmy na zdraví a prostředí a také na celém technickém díle [1]. Kvůli tomu je nutné provádět opatření, kterými se škodám předchází. To znamená zabránit stavům zařízení, které vedou ke škodám. Proto se provádí údržba.

Kvůli šíři problematiky jsem se rozhodl zaměřit se pouze na tepelné výměníky, které jsou svými technickými a provozními vlastnostmi velice odlišné od všech jiných zařízení. Předložená práce popisuje a porovnává metody údržby u sledovaných technických zařízení. Fyzikální měření bylo provedeno na tepelném výměníku a vyhodnoceno.

2 Energetická zařízení

Práce je soustředěna na tepelné výměníky.

2.1 Tepelné výměníky

Tepelné výměníky jsou zařízení, která slouží k efektivnímu předávání tepelné energie mezi dvěma nebo více médii. V závislosti na druhu teplotního výměníku mohou být média oddělená stěnou tak, že se nikdy nepromíchají, nebo jsou v přímém kontaktu [2-4].

V praxi jsou tepelné výměníky děleny na rekuperační, rotační a směšovací.

2.1.1 Rekuperační tepelné výměníky

Rekuperační tepelné výměníky, u kterých nedochází k promíchávání jednotlivých médií. Média jsou oddělena nepropustnou stěnou.

Rekuperační tepelné výměníky jsou děleny dle [5] na:

- trubkové,
- deskové,
- spirálové.

Trubkové výměníky patří mezi nejstarší a nejpoužívanější typy tepelných výměníků. Mají výhodný tvar odolný pevnostnímu namáhání. Jsou složeny z vnějšího pláště a trubek. Mezi trubkami se často umisťují přepážky na zpomalení vnějšího média a prodloužení jeho dráhy proudění [5].

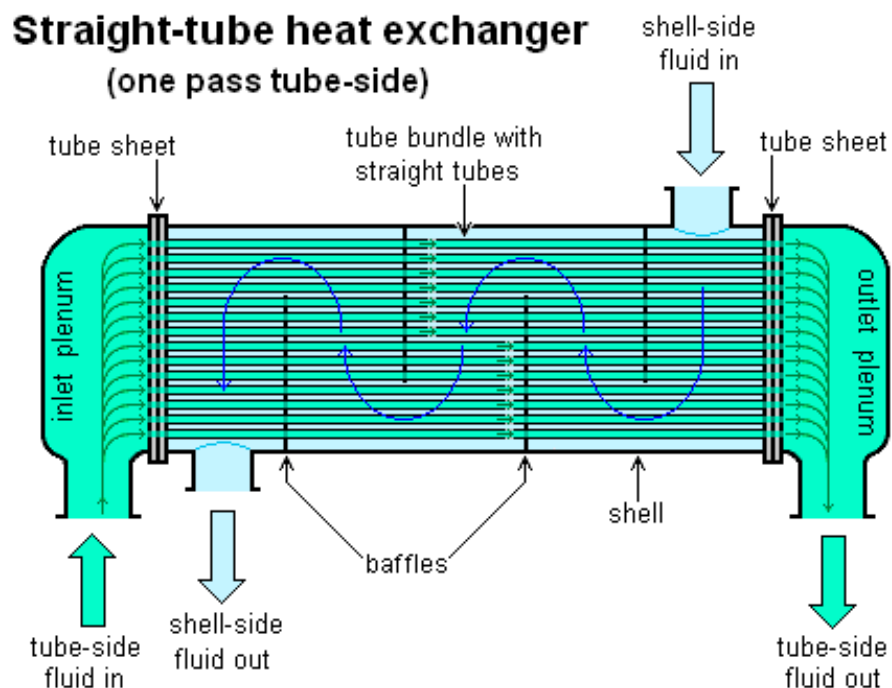
Existuje několik provedení trubkových výměníků dle [5]:

- plášťový tepelný výměník s rovnými trubkami,
- dvoutrubkový tepelný výměník,
- vlásenkový tepelný výměník,
- tepelný výměník se šroubovitě vinutými trubkami,
- trubkový tepelný výměník s žebrováním.

Plášťový tepelný výměník s rovnými trubkami se skládá z několika trubek zaválcovaných do trubkovnic, které jsou přivařené na vnější plášť. Trubky jsou většinou ocelové nebo mosazné a jejich tloušťka stěny se pohybuje mezi 1,5 – 2,5mm. Kapalina, která má být ochlazena, nebo ohřáta prochází trubkami a druhá, která buď poskytuje, nebo přijímá teplo, tak proudí kolem trubek, viz obr. 1 [2,4-5].

Jeho hlavní výhody jsou jednoduchá výroba, možnost použití minimální tloušťky stěny (snížení hmotnosti), možnost výměny vnitřních trubek při poškození a možnost čištění i mechanicky [2,5].

Mezi nevýhody pak patří problém s tepelnou roztažností trubek, která se ale dá řešit konstrukčními úpravami [5].

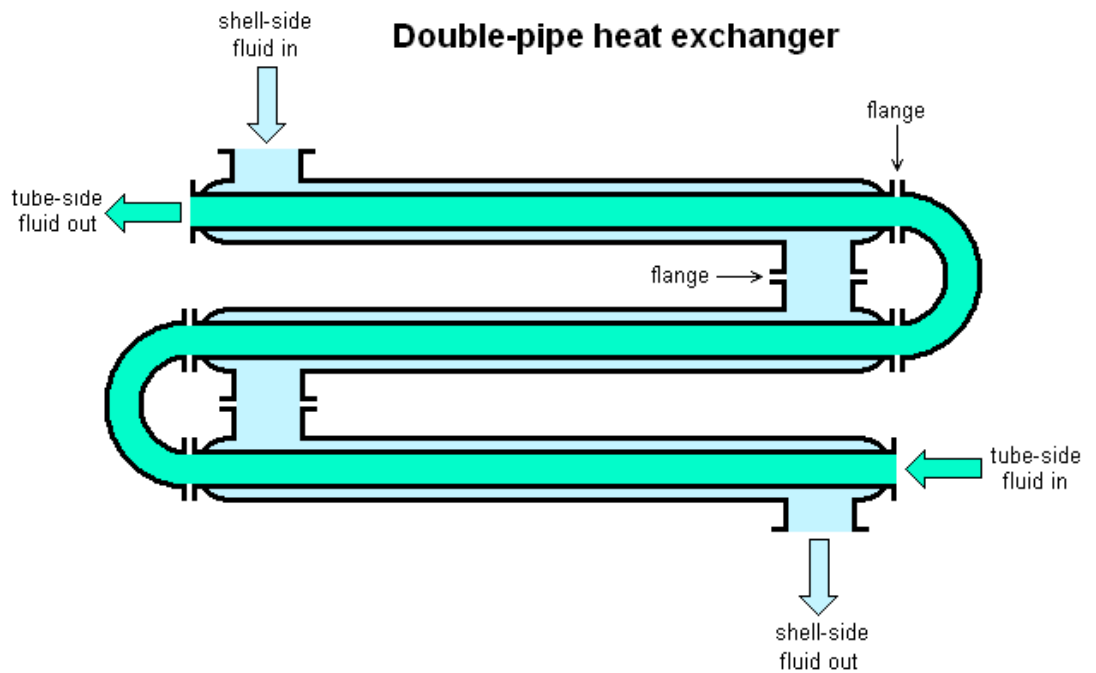


Obr. 1 - Schéma plášťového výměníku [6]

překlad: straight-tube heat exchanger – plášťový tepelný výměník s rovnými trubkami, shell-side fluid in – vstup média do pláště výměníku, tube sheet – podpěra trubek, tube bundle with straight tubes – soubor rovných trubek, inlet plenum – vstupní komora, outlet plenum – výstupní komora, baffles – přepážky, shell – plášť, tube-side fluid in - vstup média do potrubí, shell-side fluid out - výstup média z pláště výměníku, tube-side fluid out – výstup média z potrubí

Dvoutrubkový tepelný výměník je používán hlavně na malé teplotní rozdíly mezi médii, malé tlaky a malý průtok [5].

Na rozdíl od plášťového výměníku je jednodušší dosáhnout protiproudu a díky vyšším rychlostem proudění je účinnější a zároveň méně náchylný na tvorbu usazenin [7]. Na druhou stranu mají malou teplosměnnou plochu, proto jsou značně větší. Schéma dvoutrubkového výměníku je vidět na obr.2.

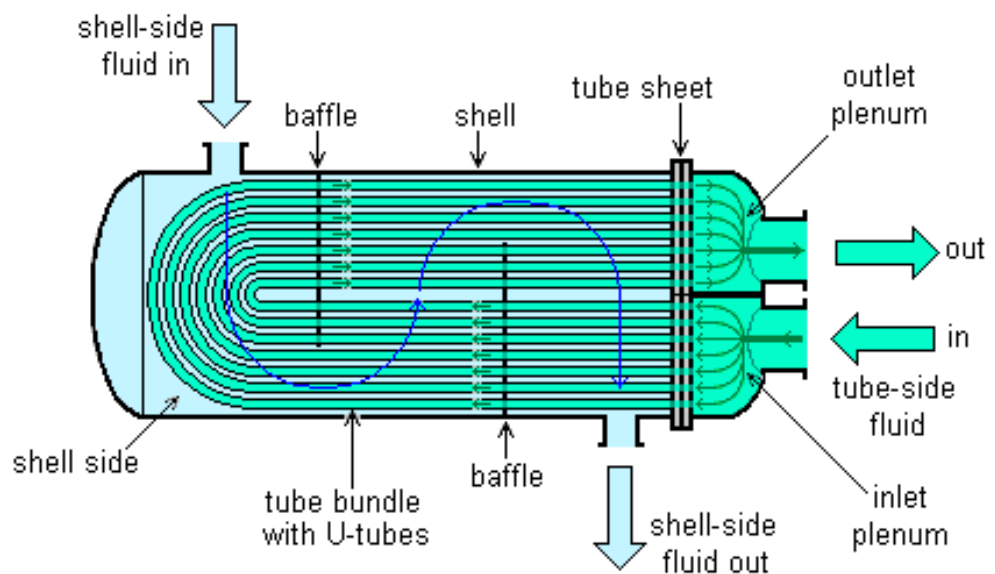


Obr. 2 - Schéma dvoutrubkového výměníku [8]

překlad: double-pipe heat exchanger – dvoutrubkový tepelný výměník shell-side fluid in – vstup média do pláště výměníku, tube-side fluid out – výstup média z potrubí, flange – příruba, tube-side fluid in - vstup média do potrubí, shell-side fluid out - výstup média z pláště výměníku

Vlásenkový tepelný výměník má uvnitř pláště trubky umístěny do tvaru „U“ [5]. Konstrukce je oproti plášťovému výměníku s rovnými trubkami značně zjednodušena, protože je zde pouze polovina spojů trubek a o jednu vodní komoru méně, jak je vidět na obr. 3. Mezi výhody patří lepší využití prostoru pláště a nižší hmotnost. Díky možnosti volného pohybu vnitřních trubek odpadají problémy s roztažností trubek. Na druhé straně se vnitřní povrch trubek nedá mechanicky čistit a při poškození se trubky nedají vyměnit.

U-tube heat exchanger

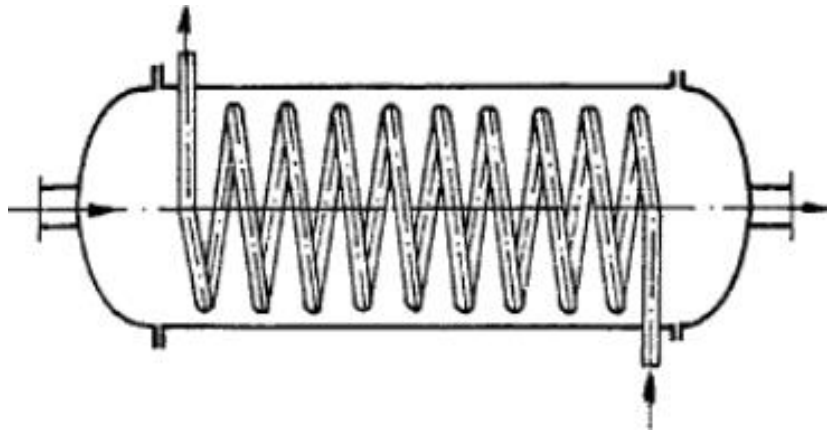


Obr. 3 - Schéma vlásenkového výměníku [6]

překlad: U-tube heat exchanger – vlásenkový tepelný výměník, shell-side fluid in – vstup média do pláště výměníku, baffle – přepážka, shell – plášť, tube sheet – podpora trubek, outlet plenum – výstupní komora, shell side – stěna pláště, tube bundle with U-tubes – soubor trubek do tvaru „U“, shell-side fluid out - výstup média z pláště výměníku, tube-side fluid out – výstup média z potrubí, tube-side fluid in - vstup média do potrubí

Tepelný výměník se šroubovitě vinutými trubkami se skládá z jedné, nebo více trubek šroubovitě vinutých uvnitř pláště, jak je vidět na obr. 4 [5].

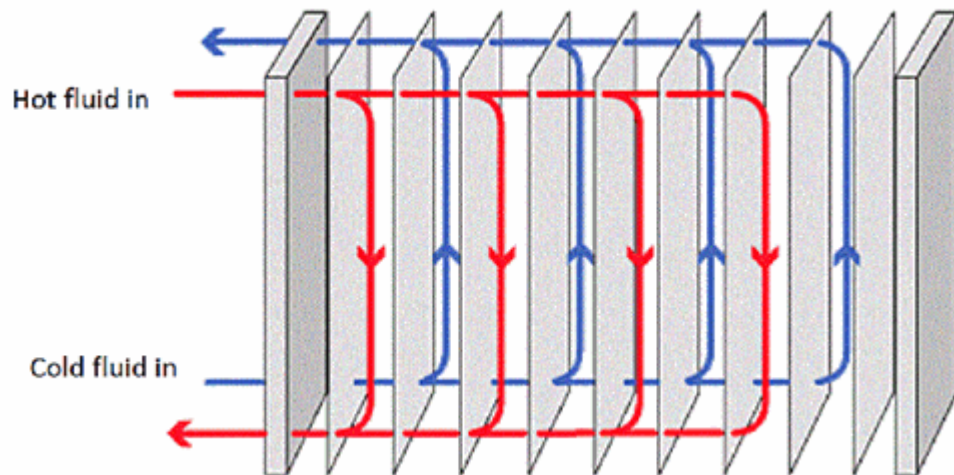
Hlavní výhody jsou jednoduchá výroba, využití protiproudu při zachování příčného obtékání trubek média na vnější straně, lepší prostup tepla a menší teplosměnná plocha [2,5]. Hlavní nevýhody jsou menší využití prostoru nádoby výměníku a nutnost výměny celé trubky při opravě.



Obr. 4 - Schéma výměníku se šroubovitě vinutými trubkami [2]

Trubkové výměníky s žebrováním jsou využívány kvůli rozšíření teplosměnné plochy. Žebrování může být jak uvnitř, tak vně trubek. Žebra mohou být podélná, příčná nebo šroubovitě vinutá. Z hlediska výroby mohou být na trubku navinuta ve formě pásku, vyválcována z materiálu trubky, nebo odlita [2].

Deskové tepelné výměníky se skládají z tenkých kovových desek, pevně přitisknutých k sobě [2]. V profilu desek jsou vylisovány kanálky, ve kterých proudí médium. Druhé médium proudí v bezprostředně přilehlých kanálcích, jak je vidět na obr. 5.



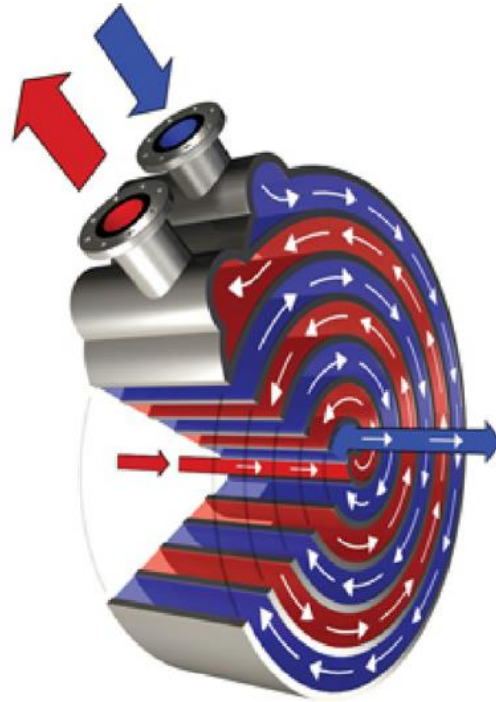
Obr. 5- Schéma deskového výměníku [9]

překlad: hot fluid in – vstup horkého média, cold fluid in – vstup chladného média

Tloušťka plechů se pohybuje mezi 0,4–1 mm a jsou vyráběny z různých materiálů od uhlíkových ocelí až po nerezové, nikl a titan [2]. Těsnění jsou vyráběna ze speciálních pryží, nitrilu, silikonu nebo azbestových vláken. Mezera mezi jednotlivými deskami se pohybuje mezi 3–5 mm a rychlosti proudění médií mezi 0,2–1 m/s. Desky mají díky malé tloušťce také malý tepelný odpor.

Mezi výhody deskových výměníků patří kompaktnost řešení, malé rozměry, malé hmotnosti a možnost jednoduše zvětšovat výkon přidáním dalších desek [2]. Mezi nevýhody patří hlavně problémy s netěsností při větším tlaku.

Spirálové tepelné výměníky se vyrábí rolováním dvou dlouhých železných pásů kolem jádra, aby došlo k vytvoření dvou spirál pro dvě média, viz obr. 6 [10]. Hrany jsou poté zavařeny, aby každé médium zůstalo ve svém prostoru a nedošlo k promíchání.



Obr. 6 - Schéma spirálového výměníku [11]

červená barva – horké médium, modrá barva – chladné médium

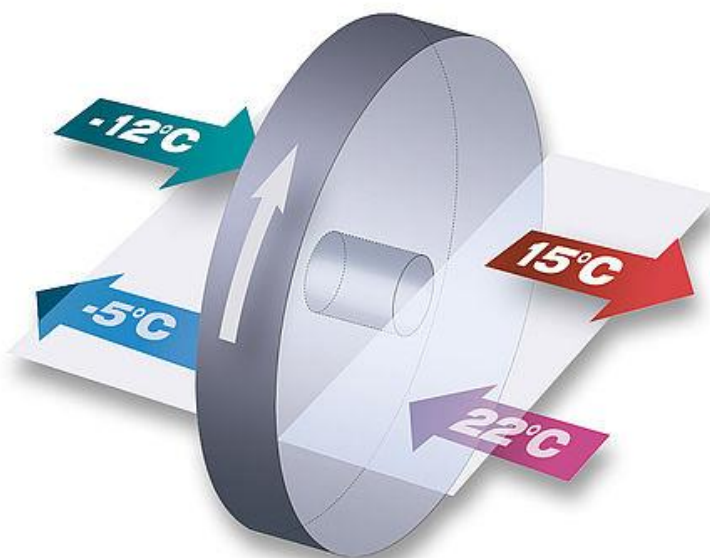
Výhody spirálového tepelného výměníku jsou vysoká tepelná účinnost a kompaktní rozměry. Díky vysokému průtoku a tvaru se v něm téměř netvoří usazeniny [10-11].

Nevýhody jsou vysoké nároky na kvalitu svarů a obtížná údržba [12].

2.1.2 Rotační regenerační tepelné výměníky

Rotační regenerační tepelné výměníky jsou určeny k přenosu tepla nebo přenosu vlhkosti při zachování vlastností přenosu tepla ze vzduchu odváděného do vzduchu přiváděného [13].

Na rozdíl od rekuperačních výměníků, kde dochází k přenosu tepla ihned a přímo přes stěnu, tak při provozu rotačního regeneračního výměníku se energie (teplo, vlhkost) dočasně skladuje uvnitř výměníku na rotoru [13-14]. Díky cyklickému otáčení rotoru se teplosměnná plocha nachází střídavě v priváděném i odváděném proudu vzduchu, viz obr. 7.



Obr. 7 - Schéma funkce rotoru v rotačním regeneračním tepelném výměníku [15]

Mezi hlavní výhody rotačních regeneračních výměníků patří vysoká účinnost přenosu tepla (až 80 %), schopnost přenášet vlhkost, malé rozměry v porovnání s deskovými a trubkovými výměníky a menší riziko namrzání [13]. Nevýhody jsou jeho netěsnost a nutnost pohonu na otáčení rotoru.

2.1.3 Směšovací tepelné výměníky

Směšovací tepelné výměníky jsou na rozdíl od trubkových a deskových výměníků určeny na sdílení tepla přímým stykem pracovních látek [7]. Takto směšovat lze pouze takové látky, které spolu nijak nereagují, nemísí se a lze je od sebe jednoduše oddělit. Tohoto lze docílit například při ochlazovací krystalizaci, kdy se roztok chladí nemísitelnou kapalinou nebo plynem. Výjimkou je mísení stejných proudů o různých teplotách, jako například při ohřívání vody parou.

3 Vybraná rizika tepelných výměníků

Riziko spojené s technickým zařízením je chápáno jako míra ztrát, škod a újm na technickém zařízení, obslužném personálu, celém technickém díle nebo veřejných aktivech v okolí (majetku, veřejném blahu, životním prostředí a kritických infrastrukturách). Proto je nutné provádět opatření, aby byly ztráty, škody a újmy na sledovaných položkách co nejmenší [16]. To znamená zabránit stavům technického zařízení, které vedou ke škodám. Jedním z nástrojů je například údržba [16-17].

3.1 Zdroje technických rizik tepelných výměníků

Hlavními zdroji technických rizik tepelných výměníků jsou koroze, eroze, zanášení a mechanická poškození.

3.1.1 Koroze

Koroze je samovolně probíhající nevratný proces postupného narušování a znehodnocování materiálu chemickými a fyzikálně-chemickými vlivy prostředí [18]. Korozní systém se pak skládá z materiálu, prostředí a jejich vzájemného působení.

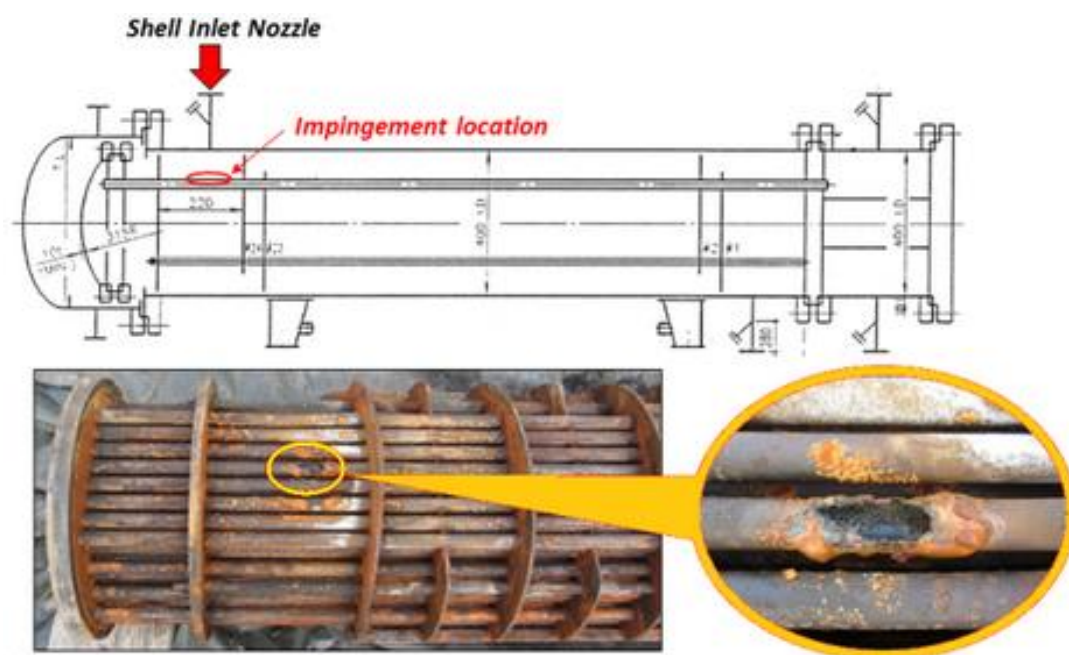
Korozi v tepelných výměnících způsobují 4 hlavní faktory, a to jsou dle [19]:

- teplota,
- vibrace,
- rychlost proudění,
- změna směru proudění.

Proto je potřeba se při inspekci tepelného výměníku zaměřit především na uvažovaná místa [19].

Prvním z míst, kde se koroze objeví dříve než jinde, je část trubky, která prochází skrz přepážku v plášti [19]. To je způsobené tím, že při vibraci trubky se může povrchem třít o přepážku.

Dalším místem je povrch proti vstupním tryskám pláště, jak ukazuje obr. 8, kvůli narážení média přímo proti stěně, což způsobuje erozi [19]. Z tohoto důvodu se také někdy používají desky, viz obr. 9, které jsou umístěné přesně na daném místě a chrání povrch trubek.



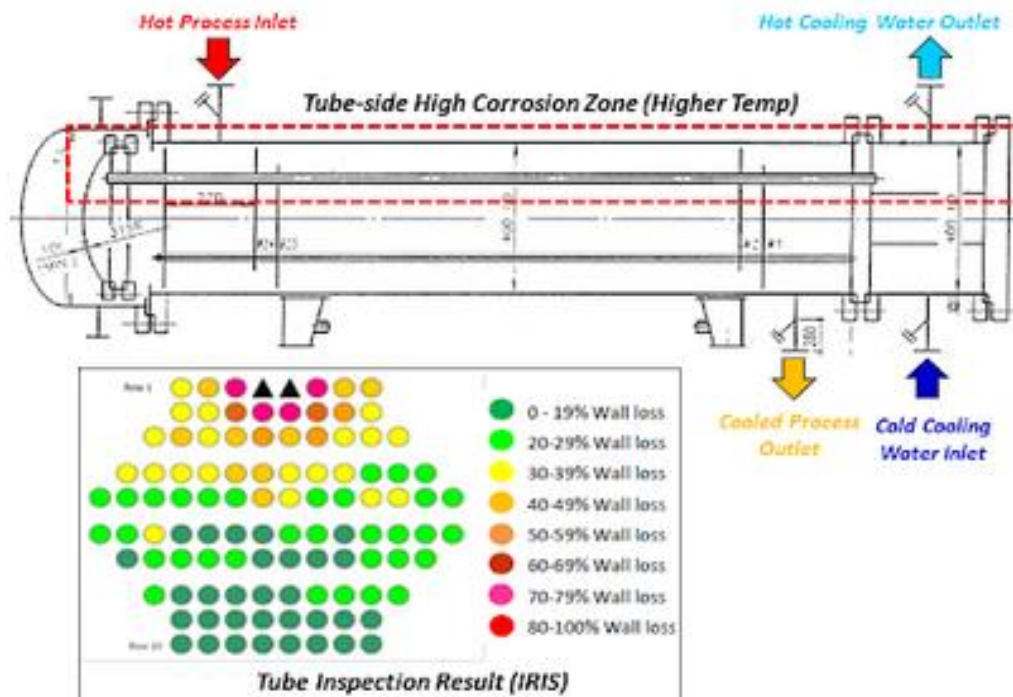
Obr. 8 – Koroze na trubkách proti tryskám pláště [19]

překlad: shell inlet nozzle – tryska vstupu do pláště, impingement location – místo přímého nárazu média. Žluté ohraničení zvýrazňuje místo porušení trubek způsobené korozi



Obr. 9 - Ochranná deska, která zabraňuje korozi trubek proti vstupu trysek pláště [19]

Při proudění horké vody jsou korozi nejvíc zasažená místa, kde je teplota nejvyšší, viz obr. 10 [20]. Pokud je tedy voda ohřívána, budou nejvíce zasažena místa u výstupu, a pokud je ochlazována, tak u vstupu.



Obr. 10 - Schéma korozního úbytku závislého na teplotě (červená barva = největší úbytek materiálu z povrchu trubek) [20]

překlad: hot process inlet – vstup teplého média, hot cooling water outlet – výstup horké chladicí vody, tube-side high corrosion zone (higher temp) – Zóna zvýšené koroze potrubí (zvýšená teplota), cooled process outlet – výstup ochlazeného média, cold cooling water inlet – vstup chladné ochlazovací vody, Wall loss – úbytek materiálu trubek, tube inspection result – výsledky inspekce trubek.

3.1.2 Eroze

Eroze – je proces opotřebení, při kterém je poškození povrchu způsobeno opakovaným působením vysokého lokalizovaného napětí. [21]

Eroze u tepelných výměníků vede k závažným provozním a ekonomickým problémům. Opotřebení potrubí tepelného výměníku závisí dle [22] na mnoha faktorech:

- rychlost proudících pevných částic,
- průměr částic – rychlost eroze se zvyšuje, dokud průměr částic nedosáhne rozmezí 50-100 μm . Pokud jsou částice větší, není již rychlost eroze ovlivněna průměrem částic,
- tvar částic – rychlost eroze nesférickými částicemi s ostrými hranami je u kovových povrchů znatelně vyšší,
- tvrdost částic,
- úhel nárazu částic – k maximálnímu opotřebení tažných materiálů nastává při úhlu nárazu mezi 20°- 40°, zatímco u křehkých materiálů při kolmém nárazu.

3.1.3 Zanášení tepelných výměníků

Problematika tepelných výměníků a jejich chování v provozu je sledováno velmi detailně v práci [23], a to od navrhování, až po chování při provozu. Proto je dále uváděna její citace.

Zanášení tepelných výměníků zhoršuje přenos tepla, zvětšuje drsnost povrchu, a tím zhoršuje proudění kapalin a zvyšuje riziko koroze, viz obr. 11 [23]. Průmyslové tepelné výměníky, zřídka kdy fungují s neznečišťujícími kapalinami. Růst usazenin také zvyšuje provozní náklady (ve Spojených Státech se předmětné náklady ročně pohybují mezi 4 až 10 miliardami dolarů ročně).



Obr. 11 - Zanesená trubka tepelného výměníku [24]

bílá až běžová barva – usazeniny

Ke zvýšení nákladů dochází dle [23] kvůli následujícím důvodům:

- používání nadměrných velikostí výměníků,
- špatný výkon zařízení, který vede k energetickým ztrátám,
- zvýšené náklady na čištění a odstranění koroze,
- odstavení výroby při čištění,
- zkrácení životnosti zařízení.

Větší spotřeba energie tepelných výměníků způsobená usazeninami je také odpovědná za 1 - 2,5 % celosvětových emisí CO₂ [25].

Zanášení tepelných výměníků může také vést k nerovnoměrnému tepelnému zahřívání, a to především u zařízení s vysokým tepelným tokem, jako jsou parní generátory [26]. To může nakonec způsobit mechanické selhání tepelného výměníku. Nejhorší následky mechanického selhání bývají v rafineriích nebo tepelných elektrárnách.

Zanášení tepelného výměníku je dle [23] závislé na mnoha parametrech:

- vlastnosti tekutin a jejich náchylnost k tvorbě usazenin,
- vysoká teplota,
- hydrodynamické účinky proudění,
- materiál potrubí,
- čistota kapalin,
- drsnost povrchu potrubí,
- vyloučené pevné látky,
- umístění více zanášející kapaliny,
- typ tepelného výměníku,
- geometrie a orientace tepelného výměníku,
- celkový návrh zařízení,
- sezónní změny teploty.

Vlastnosti kapalin a jejich náchylnost k tvorbě usazenin jsou nejdůležitější parametry ovlivňující zanášení tepelných výměníků [23]. Změnou parametrů procesu je možné změnit podmínky tak, aby se usazeniny tvořily méně.

Při vyšší teplotě dochází k větší tvorbě usazenin [23]. To je způsobeno hlavně rychlejšími chemickými reakcemi, tvorbou krystalů a zvýšenou rychlostí koroze. Některé používané kapaliny se ale při nízké teplotě chovají opačně a dochází k podpoře tvorby krystalů. Pro tyto případy je lepší použít optimální teplotu k překonání těchto problémů. Pro vodu náchylnou k tvorbě vodního kamene je požadováno, aby teplota nepřekročila 60 °C.

Rychlost tvorby biologických usazenin je velice závislá na teplotě [23]. Při vyšších teplotách totiž dochází k rychlejším chemickým a enzymatickým reakcím a tím roste

i rychlost růstu buněk. Pokud však stoupne teplota na ještě vyšší úroveň, mohou naopak některé buňky citlivé na teplo odumřít.

Hydrodynamické účinky proudění, jako je jeho rychlost a smykové tření na povrchu také ovlivňují zanášení [23]. Čím vyšší je rychlost proudění, tím vyšší bude tepelný výkon a menší zanášení tepelného výměníku. Konstantní tok médií také snižuje zanášení. Usazeniny se budou ukládat hlavně v místech, kde se mění rychlost proudění. Při udržení relativně rovnoměrných rychlostí proudění se tedy snižuje tvorba usazenin.

Materiál potrubí ovlivňuje hlavně zanášení korozními produkty [23]. Například uhlíková ocel je nejvíce náchylná na korozi, ale zároveň je také nejlevnější.

Měď ve vodě vykazuje schopnost, že dokáže zabít některé škodlivé organismy, její použití je však limitováno na následující [23]:

- slitiny mědi jsou zcela zakázány ve vysokotlakých parních tepelných výměnících v tepelných elektrárnách, protože jejich vznikající korozní produkty jsou ukládány v parních generátorech a následně blokují lopatky turbín,
- ochrana životního prostředí omezuje použití mědi ve vodách řek, jezer a oceánů, protože je jedovatá pro vodní život.

Dle [23] dále platí:

- nekorozivní materiály jako je titan a nikl zabrání sice korozi, ale jsou drahé a nedokážou zabít škodlivé organizmy,
- skleněné, grafitové nebo teflonové potrubí často redukuje zanášení a zjednodušuje čištění.

Proto je dle [23] také důležitá povrchová úprava materiálů, která dokáže snížit tvorbu usazenin (plasty, smalt, sklo nebo polymery) [23].

Čistota kapalin není nikdy stoprocentní a vniknutí i malé nečistoty v kapalině může dle [23] iniciovat tvorbu usazenin buď jako první vrstva znečištění, nebo jako katalyzátory zanášejících procesů.

Podle [23] například znečištění rafinérských uhlovodíkových proudů je způsobeno vniknutím kyslíku nebo stopových prvků jako jsou vanad nebo molybden.

Podle [23] dochází také k tomu, že částice nečistot zafungují jako očkování pro vytváření krystalů. Naopak nečistoty jako písek v chladicí vodě mohou mít někdy odmašťující účinek a snížit množství nečistot, nebo je úplně odstranit.

Podle [23] ovlivňuje drsnost povrchu následující faktory:

- špatně upravený povrch poskytuje nukleační místa, která podporují vytvoření prvních usazenin,
- lepší kvalita povrchu má vliv na pomalejší zanášení a usnadňuje čištění.

I hladká potrubí mohou ale časem zdrsnet kvůli tvorbě vodního kamene, korozi nebo erozi [23].

Rovněž dle [23] vyloučené pevné látky podporují usazování částic sedimentů na teplosměnnou plochu. V případě vody jako média pomáhá proti usazování vysoké rychlosti proudění (nad 1 m/s). Další možnost, jak zabránit usazování je instalace filtrace.

Podle [23] lze obecně říct, že je lepší použít více zanášející kapalinu uvnitř potrubí, hlavně kvůli menší pravděpodobnosti vzniku míst s pomalejším tokem a kvůli jednoduššímu čištění. Pokud to není možné, je třeba věnovat pozornost výběru konstrukce přepážek.

Typ tepelného výměníku také dle [23] ovlivňuje zanášení. Nejnáchylnější typy tepelných výměníků na zanášení jsou trubkové výměníky. V případě deskového výměníku je zanášení o 10–25 % nižší než v případě trubkového tepelného výměníku, a to hlavně díky vysoké turbulenci, nepřítomnosti stojatých oblastí a hladkému povrchu jednotlivých desek. Ve spirálovém tepelném výměníku také dochází k vysoké turbulenci a nenachází se v něm stojatá místa, proto se bude také zanášet pomaleji než trubkový tepelný výměník.

Geometrie tepelného výměníku ovlivňuje především rovnoměrnost toků a tím způsobené zanášení [23]. Jejich orientace pak dokáže velice usnadnit jejich čištění.

Celkový návrh zařízení dokáže velmi ovlivnit míru zanášení výměníku [23]. Například použitím filtrace.

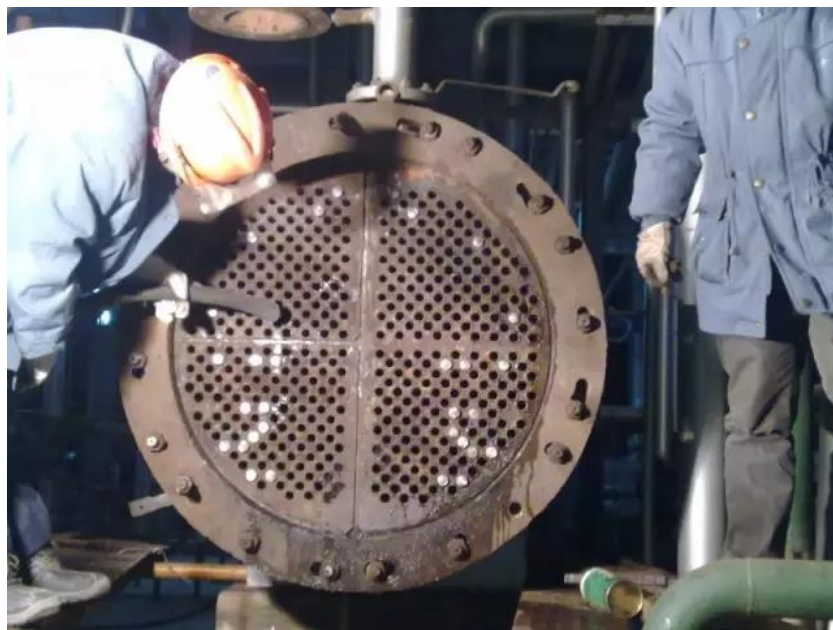
Sezónní změny teploty je třeba brát v úvahu, pokud se jako chladicí kapalina používá voda, hlavně kvůli zimním podmínkám, kdy se okolní teplota může pohybovat i pod 0 °C [23]. Kvůli tomu je třeba zvýšit teplotu, což ale zase přispívá k zanášení.

3.1.4 Mechanické poškození tepelných výměníků

Mechanické poškození uvnitř tepelného výměníku se během provozu projevuje ucpáním nebo únikem [27]. Pára nebo kapalina se ale z výměníku ven dostane, když dojde k prasklinám a trhlinám. Úniky způsobují smíchání obou médií, a tím i nežádoucí účinky jako je znečištění, které může způsobit elektrickou vodivost horké vody. Při ucpání zase lze pozorovat zvýšení tlaku.

Selhání může způsobit únik tekutin jak z potrubí, tak i pláště [28]. Dle citované práce existuje i potenciální nebezpečí výbuchu, požáru nebo úniku toxických látek. Kromě toho můžou mít následky, jako je významná ztráta produkce, zranění, úmrtí nebo poškození celého zařízení.

Podle údajů v [27] má poškození výměníku většinou za následek dlouhé a drahé odstavení systému, kvůli následnému analyzování poškození, opravám nebo výměnám. Provozní společnosti se snaží tyto ztráty minimalizovat, ale v případě úniku horkých, nebo jedovatých par může dojít k úrazu zaměstnanců, nezúčastněných osob nebo dokonce i životního prostředí. V trubkovém výměníku při poškození menšího počtu trubek je možnost je zaslepit viz obr. 12. Pokud by se však muselo zaslepit nepřijatelný počet trubek, byl by výměník neúčinný a měl by být úplně vyměněn, nebo by se měly zvážít podmínky následného provozu.



Obr. 12 - Trubkový výměník se zaslepenými poškozenými trubkami [29]

Stříbrné body jsou zaslepené trubky.

4 Údržba tepelných výměníků

Dle [23] je údržba tepelných výměníků náročná, a to zejména ve stárnoucích zařízeních. Spočívá především v následujícím:

- každý den by měla proběhnout vizuální kontrola výměníku, zda z něj neuniká kapalina,
- v pravidelných intervalech by se měl výměník rozebrat a zkontrolovat jeho vnitřní části:
 - kontrola koroze povrchu,
 - kontrola eroze povrchu,
 - kontrola zanesení usazeninami,
 - kontrola těsnosti všech spojů.

Pro jednotlivé druhy tepelných výměníků je třeba zvolit vhodné metody údržby.

4.1 Čištění tepelných výměníků

Čištění tepelných výměníků se dělí na mechanické a chemické.

4.1.1 Mechanické čištění

Hlavní metody mechanického čištění se dělí na:

- čištění pomocí čistícího projektilu,
- čištění tlakem.

Jednou z možností mechanického čištění je použití čistícího projektilu. Využívají se speciální projektily různých tvarů a materiálů. Těmto projektilům je dodána kinetická energie, a ty poté proletí trubkami výměníku. Projektily se používají kovové, plastové, nylonové nebo nerezové. Každý typ projektilu je určený na jiné znečištění, například nylonový projektil je určen pouze na dočištění a lehké nečistoty, kdežto kovový projektil je určen pro extrémní znečištění [30-32].

Projektilové čištění je omezeno teplotou média kolem 120 °C kvůli stabilitě materiálu projektilu [30-31].

Mezi hlavní přednosti projektilového čištění patří ekologičnost a bezpečnost metody (použití nízkých tlaků) [30-32].

Nevýhodou je potřeba rozebrat soustavu tepelného výměníku, zbytková vrstva neodstraněných nečistot a pracnost [30-32].

Čištění tlakem je založeno na pumpování vody pod vysokým tlakem (70 – 300 MPa) skrz tepelný výměník pomocí speciálních čerpadel. Jedná se o velice účinnou metodu odstraňování usazenin [33]. Při čištění se většinou vnitřní trubky výměníku vyndávají z vnějšího pláště a posílají na čisticí stanoviště, viz obr. 13.



Obr. 13 - Čištění trubek výměníku tlakem [33]

Když se ale přemístování výměníku nehodí, používá se speciální vybavení, které zvládne čištění i na místě, kde se výměník nachází [33]. Toto vybavení musí být přenosné a velké tak, aby se dalo použít i v omezeném prostoru, viz obr. 14.



Obr. 14 – Přenosné tlakové čistící zařízení [33]

4.1.2 Chemické čištění

Chemické čištění se dělí na dva způsoby, a to na reakční čištění a dekontaminující. V obou případech se využívá kombinace chemických reakcí, proudění a teploty. Úspěch čištění závisí na správné kombinaci všech tří aspektů čištění. To je také důvod, proč plánování chemického čištění zabere daleko více času než plánování čištění tlakem [33].

Při chemickém čištění energetických zařízení složených z více druhů materiálu se musí dbát na to, aby chemikálie nepoškodila žádnou součást. Špatná kvalifikace a neznalost osob může mít za následek poškození celé čištěné soustavy [34].

Chemické čištění se dělí na:

- reakční
- dekontaminační.

Metoda reakčního čištění se využívá na odstranění anorganických usazenin jako jsou vápník, uhličitany, fosforečnany a sírany [33]. Hlavní důvod použití reakčního čištění je zvýšení energetické efektivity především vodních chladičů a kotlů.

V závislosti na typu usazenin a materiálu energetického zařízení se nechává proudit okruhem slabá, nebo silná kyselina, aby odstranila usazeniny a zároveň měla co nejmenší dopad na základní materiál [33]. Důležité je dávat pozor, aby nebyly trubky vystaveny působení kyseliny po zbytečně dlouhou dobu, jinak by hrozila degradace základního materiálu.

Po čištění většinou přichází na řadu pasivace [33]. Pasivace je také závislá na druhu základního materiálu, například uhlíková ocel se pasivuje dusitanem sodným a nerezová ocel uhličitanem sodným.

Dekontaminační čištění se využívá při odstraňování uhlovodíkových usazenin [33]. Využívá se různých metod od úpravy pH až po balíčky povrchově aktivních látek, zaměřených na specifické typy uhlovodíků.

Průtok a teplota jsou regulovány různými způsoby podle typu použité chemikálie. Dle [33] lze požadovaného průtoku dosáhnout cirkulací, plněním a namáčením, nebo dokonce aplikací v plynné fázi. Teplota je často řízena přímým vstříkáváním páry, nebo použitím dalšího tepelného výměníku.

Výhody chemického čištění oproti tlakovému jsou dle [33]:

- cena – provádí se bez nákladných a časově náročných demontáží a montáží zařízení, čímž se snižují nároky na pracovní sílu a prostoje systému,
- účinnost – výrazně zlepšuje čistotu systému, usazeniny jsou často zcela odstraněny, čímž se zvyšuje účinnost proudění a přenosu tepla,
- důkladnost – úplné odstranění usazenin brání vzniku nových usazenin a prodlužuje dobu provozu zařízení,
- rychlost – znatelně rychlejší než většina metod, zejména u složitějších systémů,
- dosah – umožňuje čištění v jinak nepřístupných místech,
- nepřerušování provozu – některé metody lze provádět i bez nutnosti vypínání zařízení.

Nevýhody chemického čištění oproti tlakovému jsou dle [33]:

- délka přípravy – větší požadavky na plánování,
- odpad – odpad musí být neutralizován, nebo zneškodněn vhodnými způsoby,
- neočekávané účinky – v případě reakčního čištění jsou odstraněny všechny usazeniny, včetně těch, které mohly pomáhat například v místech ztenčení trubek korozí.

4.2 Monitorování mechanické integrity tepelných výměníků

Monitorování mechanické integrity tepelných výměníků se provádí řadou metod. Zda je metoda proveditelná, závisí dle [35] na mnoha faktorech jako jsou:

- použité konstrukční materiály,
- degradační mechanismy,
- režimy selhání,
- nebezpečí potenciálního selhání,
- pravděpodobnost detekce,
- rozložení celého systému,
- dostupnost jednotlivých komponent,
- využití dat od operátora a jeho zkušeností.

Na základě těchto faktorů se k dosažení optimálního pokrytí a pravděpodobnosti detekce používá dle [35] kombinace následujících metod:

- funkční testování (pravidelná kontrola funkčnosti zařízení),
- inspekce (lidský odhad, nebo pomocí speciálních nástrojů jako je ultrazvuk, nebo termografie),
- sledování výkonu (například účinnost, teplota, tlak nebo proud),
- sledování procesu (například pH, koncentrace kyslíku, koncentrace chloridu),
- analytické metody (například termodynamická analýza nebo frekvenční analýza).

Sledování procesu se zde liší od sledování výkonu tím, že sledování procesu lze vnímat jako více zaměřené na sledování chemických vlastností vnitřního média, zatímco sledování výkonu je zaměřené více na sledování výkonu stroje.

Sledování poškození tepelných výměníků je velice náročné, protože je nezbytné znát všechny možné příčiny potenciálních selhání, viz tabulka 1 [35].

Tabulka 1 - Tabulka možných selhání tepelného výměníku a jejich příčin, zpracováno dle [35]

| Selhání tepelného výměníku | Příčina selhání tepelného výměníku |
|----------------------------|--|
| Praskání | Přítomnost korozivních kontaminantů (např. CO ₂ , H ₂ S nebo mikrobů) |
| | Neslučitelnost provozních podmínek a materiálu potrubí |
| | Vibrace způsobené tokem média |
| | Přítomnost erozivního média a následná eroze |
| | Selhání konstrukce (například nedostatečné tloušťky stěn) |
| | Chyby při instalaci, údržbě atd. (špatná kvalita svarů, použití špatných nástrojů) |
| Plošné zeslabení stěny | Přítomnost korozivních kontaminantů |
| | Přítomnost erozivního média |
| | Neslučitelnost provozních podmínek a materiálu trubek |
| | Selhání konstrukce |
| Lokální zeslabení stěny | Přítomnost korozivních kontaminantů |
| | Přítomnost erozivního média |
| | Špatná kvalita svarů |
| Uvolnění ventilů/přírub | Použití špatného typu ventilů/přírub |
| | Nedodržení postupu montáže |
| | Chyba při instalaci v kombinaci s tlakovou trubicí a následné výbušné oddělení ventilu/příruby |
| Snížená účinnost | Přítomnost biologického znečištění, korozních produktů nebo pevných částic |
| | Nedostatečné intervaly čištění |
| | Příliš velké průměry potrubí |

Monitorování mechanické integrity energetických zařízení používá dva druhy metod, a to podle toho, zda se dá provádět za plného provozu, nebo se musí zařízení zastavit [35]. To, že se dá ale nějaká metoda provádět například na tlakových kotlích bez zastavení provozu neznamená, že to tak bude možné i u tepelných výměníků, kde bude například potřeba odstranění izolace apod.

Používané metody jsou dle [35]:

- inspekce pomocí vířivých proudů,
- ultrazvukové metody,
- termografická inspekce,
- akustická emise,
- monitorování vibrací,
- další metody.

4.2.1 Inspekce pomocí vířivých proudů

Inspekce pomocí vířivých proudů je jedním z druhů elektromagnetické inspekce [35]. Jejich pomocí lze odhalit povrchové nedostatky v elektricky vodivých materiálech. Používá se pro detekci trhlin a povrchových vad.

Podle údajů v [35] když se cívka pod napětím přiblíží k povrchu vodivé součásti, indukují se na ní vířivé proudy. To ovlivňuje impedanci cívky. Když je v součásti nějaká prasklina, nebo jiná deformace, pokríví se vířivé proudy, což změní impedanci cívky. Změna se měří a analyzuje podle vzorů, aby se zjistilo, o jaký nedostatek materiálu se jedná.

Ze stejného zdroje je úspěch metody závislý na schopnostech a zkušenostech obsluhy, protože musí umět rozeznat vady od rušivých dat.

4.2.2 Ultrazvukové metody

Ultrazvukové metody dokážou detekovat, a popsat tvar a velikost vad [35]. Funguje i přes vrstvy nátěru, nebo jiné povrchové úpravy a dokáže velmi přesně změřit tloušťku stěny, popřípadě ztráty tloušťky.

Při analýze jsou podle [35] důležité schopnosti obsluhy, aby dokázala rozeznat vady od rušivých signálů způsobených geometrií součásti a u některých materiálů i jejich strukturou.

Inspekční rychlost je pomalá a metoda vyžaduje velmi čisté potrubí [35].

4.2.3 Termografická inspekce

Termografickou inspekci lze odhalit vady pomocí měření povrchové teploty [35]. Pomocí speciálních infračervených kamer se vytvoří obraz součásti. Místa s užší stěnou mají tendenci se více zahřívat než místa s normální tloušťkou stěny. Tato místa tedy budou vidět na obraze, protože budou teplejší než jejich okolí.

Termografickou inspekci lze použít pro odhalení povrchových i vnitřních vad [35]. Výhodou je také to, že poskytuje trvalý záznam o kontrole. Schopnost odhalení objemových vad, jako je pórovitost svarů je dobrá, ale špatná při odhalování plošných vad, jako jsou například praskliny ve svarech.

4.2.4 Akustická emise

Akustická emise může být použita na odhalení trhlin nebo koroze [35]. Když se součást náhle zdeformuje a uvolní místní napětí, tak emituje energii, která je zachycena senzory na povrchu. Tyto senzory mění energii na elektrické signály, které jsou dále zpracovány. Tuto techniku je však obtížné ověřit a měla by být použita společně s jinými metodami.

4.2.5 Monitorování vibrací

Periodické monitorování vibrací při provozu tepelného výměníku dokáže odhalit mechanické poruchy a poskytnout varování před selháním zařízení [35].

4.2.6 Ostatní metody

Mezi další metody patří použití nástrojů na měření tloušťky stěny (fyzických, laserových), které měří obvodovou geometrii potrubí, detektory plynu a monitorování koroze pomocí korozních sond [35].

Kontrola a monitorování rosného bodu vodních par u uhlovodíkových plynových systému je velice důležitá metoda predikce koroze potrubí z uhlíkové oceli, které používají médium obsahující uhlovodíky [35].

Velmi málo z těchto kontrolních metod lze použít za provozu na tepelných výměnících, zejména u potrubí, ale i pro plášť [35]. Výměníky jsou často izolovány a odstranění izolace často vyžaduje odstavení zařízení. Pro kontrolu bez odstavení se dají použít metody monitorování vibrací a akustické emise, protože senzory lze umístit pod izolaci už při instalaci, díky jejich nízké ceně a jednoduchému použití. Avšak kvůli množství rušivých dat se na ně nedá stoprocentně spolehnout.

I když existuje velké množství technologií pro monitorování mechanické integrity, žádná z nich nedokáže detekovat všechny potenciální poruchy a každá má své výhody i omezení v závislosti na typu a konstrukci tepelného výměníku [35]. Například neexistuje žádná metoda, kterou lze použít ke kontrole všech materiálů potrubí.

5 Data o dopadech na vybraném zařízení a metoda zpracování dat

Na deskovém pájeném výměníku z teplotnosti bylo provedeno měření průtoku a doba ohřevu sekundární strany na teplotu 30 °C, a to před čištěním i po každém ze dvou chemických čištění [36, 37]. Parametry výměníku jsou v tabulce 2.

Tabulka 2 - Konstrukční parametry výměníku

*) podle evropské směrnice PED

**) médium voda, rychlost 5 m/s (max. přípustná hodnota kvůli hlukovým projevům)

n=počet desek

| | |
|---|-----------------|
| Max./min. provozní teplota [°C] | 175/-160 |
| Max. provozní tlak (S3-S4/S1-S2) [bar] *) | 32/32 |
| Objem/kanál (S3-S4/S1-S2) [l] | 0,25/0,25 |
| Max. průtok (S3-S4/S1-S2) [m ³ /h] **) | 34 |
| Výška, a [mm] | 618 |
| Šířka, b [mm] | 191 |
| Svislá rozteč hrdel, c [mm] | 519 |
| Vodorovná rozteč hrdel, d [mm] | 92 |
| Délka svazku desek, A [mm] | (n x 2,85) + 10 |
| Hmotnost prázdného výměníku [kg] | (n x 0,44) + 7 |
| Standardní připojení | 4 x 2" |
| Materiál desek | AISI 316 |
| Materiál hrdel | AISI 316 |
| Pájecí materiál | Měď |
| Max. počet desek | 150 |
| Výkon pro vytápění [kW] | 500 |
| Výkon pro ohřev teplé vody [kW] | 380 |

K zajištění oběhu bylo použito oběhové čerpadlo s průtokem 1,68 m³/h, viz obr. 15 a jako prostředek k čištění byl použit vodný čisticí koncentrát s kyselým pH. Doba čištění byla 4,5 hodiny i s veškerou přípravou. Na obr. 16 je endoskopický snímek nejvíce zanešeného místa výměníku, a to vstupu primární strany [36,37].



Obr. 15 - Zapojení tepelného výměníku do čistícího okruhu [38]



Obr. 16 - Endoskopický snímek nejvíce zanešeného místa vstupu primární strany výměníku [37]

Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3- Naměřené hodnoty při čištění tepelného výměníku [36]

| Stav | Průtok [m ³ /h] | Doba ohřevu sekundární strany na teplotu 30 °C [min] |
|-------------------|----------------------------|--|
| Nečištěný výměník | 0,3 | 16 |
| Po 1. čištění | 0,8 | 13 |
| Po 2. čištění | 1,1 | 11 |

Pro řízení a zvládnání rizika je nutné znát hodnotu rizika. Hodnocení je metoda stanovení hodnoty sledované entity v dané hodnotové stupnici. Jelikož riziko, tj. ztráty v tepelném výměníku závisí na mnoha faktorech, tak v souladu s inženýrskými disciplínami, které se zabývají riziky, pro posouzení velikosti rizika byla použita hodnotová stupnice založená na velikosti průtoku média tepelným výměníkem, která je v souladu se stupnicí používanou od 80. let v normách ČSN, která je uvedena v tabulce 4 [39]:

Tabulka 4- Stupnice rizika [39]

| Míra rizika | Hodnoty průtoku v % |
|---------------------|---------------------|
| Extrémně vysoká – 5 | Méně než - 5 % |
| Velmi vysoká – 4 | 5–25 % |
| Vysoká – 3 | 25–45 % |
| Střední – 2 | 45–70 % |
| Nízká – 1 | 70–95 % |
| Zanedbatelná – 0 | Více než 95 % |

6 Vyhodnocení získaných dat a návrh opatření

Podle tabulky 4 bylo provedeno vyhodnocení naměřených hodnot. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 - Vyhodnocení dat průtoku

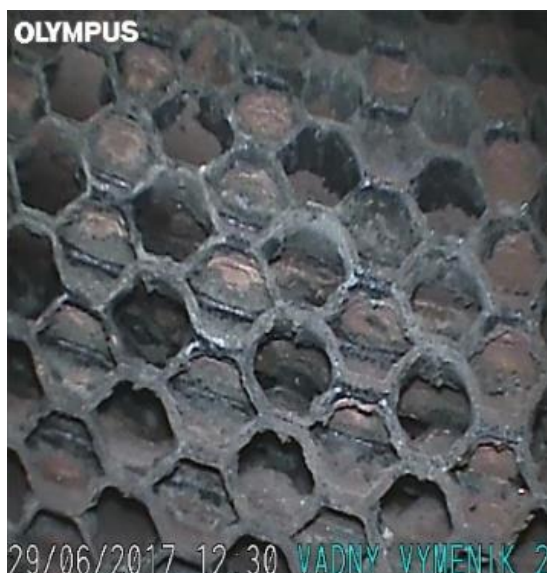
*) rozmezí mezi vysokou a střední mírou rizika

| Stav | Průtok [m ³ /h] | Hodnoty průtoku v % | Míra rizika |
|---------------|----------------------------|---------------------|--------------|
| Před čištěním | 0,3 | 17,86 | Velmi vysoká |
| Po 1. čištění | 0,8 | 47,62 | Střední *) |
| Po 2. čištění | 1,1 | 65,48 | Střední |

Před čištěním bylo riziko selhání velmi vysoké, tj. selhání technického zařízení bylo blízké. Po prvním čištění se míra rizika snížila, ale ne dostatečně. Zůstala na rozmezí vysoké a střední úrovně, a proto bylo provedeno čištění druhé. Po druhém čištění se míra rizika dále snížila na střední úroveň. Na základě norem bylo zařízení schopné provozu.

Použitá metoda čištění se osvědčila a ukázalo se, že předmětnou údržbu je nutné aplikovat pravidelně.

Na obr. 18 a 19 lze vidět rozdíl v znečištění korozními produkty před a po čištění výměníku.



Obr. 18 - Endoskopický snímek vstupu primární strany výměníku před čištěním [36,37]na obrázku lze pozorovat silné zasažení korozí.



Obr. 19 - Endoskopický snímek vstupu primární strany výměníku po čištěním [36,37]na obrázku lze pozorovat výrazné zlepšení oproti obr. 18.

Podle doby ohřevu sekundární strany na teplotu 30 °C se dá určit pouze míra zlepšení. Míru rizika nemůžeme určit, protože se nedá dohledat projektová hodnota doby ohřevu na teplotu. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 - Vyhodnocení dat doby ohřevu sekundární strany na teplotu 30 °C

| Stav | Doba ohřevu sekundární strany na teplotu 30 °C [min] | Zlepšení v % |
|-------------------|--|--------------|
| Nečištěný výměník | 16 | |
| Po 1. čištění | 13 | 18,75 |
| Po 2. čištění | 11 | 31,25 |

Po prvním čištění došlo ke zkrácení doby ohřevu sekundární strany o 18,75 % oproti nečištěnému výměníku. Po druhém čištění se doba zkrátila o dalších 12,5 %, celkově tedy o 31,25 % oproti nečištěnému výměníku. Z toho vyplývá, že i podle doby ohřevu sekundární strany došlo k výraznému zlepšení.

6.1 Návrh opatření

Pravidelná kontrola výměníku by včas odhalila problémy a míra rizika by nestoupala až na velmi vysokou. Pravidelné čištění výměníku by také zamezilo rychlému zvyšování rizika a zabránilo stoupnutí míry rizika. Operátor tepelného výměníku by si také měl všimnout zvýšeného tlaku při takovém rozsahu zanešení.

Dalším opatřením, které by zpomalilo rychlost zanášení a oddálilo zvětšení míry rizika až na velmi vysokou je použití filtrace, nebo úpravy vody. Oboje dokáže snížit množství zanášejících látek a látek zrychlující korozi, a tím zpomalit zanášení tepelného výměníku.

Navrhnutá opatření tedy jsou:

- dodržovat pravidelné kontroly tepelného výměníků,
- dodržovat pravidelné intervaly čištění tepelného výměníku,
- použití filtrace, nebo nějakého druhu úpravy vody,
- proškolení operátorů tepelného výměníku tak, aby dokázali analyzovat údaje a včas zamezit stoupnutí míry rizika.

7 Závěr

Práce byla soustředěna na sledování tepelného výměníku, který byl v provozu v teplárenství. Tepelný výměník byl silně zanesen a riziko selhání bylo velmi vysoké. Jeho průtok bylo pouze 0,3 m³/h, což odpovídá 17,86 % projektové hodnoty a sekundární strana se na 30 °C ohřívala 16 minut. Po prvním čištění se riziko selhání snížilo, ale pouze na rozmezí vysoké a střední míry rizika. Průtok se zvýšil na 0,8 m³/h, což odpovídá 47,62 % projektové hodnoty. Zlepšení nastalo i v rychlosti ohřevu sekundární strany, která se na 30 °C ohřála za 13 minut, což je zlepšení oproti stavu před čištěním o 18,75 %. Protože podle norem nebyl výměník stále provozuschopný, musel se vyčistit ještě jednou. Po druhém čištění se průtok zvýšil na 1,1 m³/h, což už odpovídá 65,48 % projektové hodnoty a míra rizika tak klesla na střední úroveň. Doba ohřevu sekundární strany na teplotu 30 °C klesla na 11 minut a bylo tedy dosaženo zlepšení o 31,25 % oproti stavu před čištěním. Na základě norem už tedy bylo zařízení provozuschopné.

Z této bakalářské práce vyplývá, že pro správnou funkci technického zařízení je provádění údržby klíčové. U tepelných výměníků spočívá v pravidelných inspekcích a následných opatřeních.

Bibliografie

- [1] PROCHÁZKOVÁ, D., PROCHÁZKA, J., LUKAVSKÝ, J., DOSTÁL, V., PROCHÁZKA, Z., OUHRABKA, L. *Řízení rizik procesů spojených s provozem technického díla během jeho životnosti*. ISBN 978-80-01-06675-1. Praha: ČVUT 2019, 465 p. <http://hdl.handle.net/10467/85867> doi:10.14311/BK.9788001066751
- [2] ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. *Výměníky tepla*. In: Katedra technických zařízení budov K11125 [online]. Praha, 17.4.2011 [cit. 03.02.2020]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125yatm/prednasky/125yatm-06.pdf>
- [3] BROGAN, R.J. *Heat exchangers*. In: A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering [online]. c2010 [cit. 2020-02-03]. DOI: 10.1615/AtoZ.h.heat_exchangers. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/832/>
- [4] STEWART, M., LEWIS, O. T. *Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solution*. Waltham: Gulf Professional Publishing, c2013. ISBN 978-0-12-397016-9.
- [5] BALÁŠ, M. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 109 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-3955-9.
- [6] KVA STAINLESS™. *more Efficient Exchange: Benefits for Using KVA Technology to Produce Shell and Tube Heat Exchangers*. [online]. c2014 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <http://www.kvastainless.com/heat-exchangers.html>
- [7] RICHTER, M., SOEHNEL, O. *Průmyslové technologie III*. In: Katedra technických věd [online]., 1-7 [cit. 18.02.2020]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/10%20VymenikyTepla.pdf
- [8] SUNRISE PROCESS EQUIPMENTS. *Double Pipe Heat Exchanger*. [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.sunriseequipments.com/Double-Pipe-Heat-Exchanger.htm>
- [9] IPIECA. *Heat Exchangers*. [online]. London, 2014, 1 February 2014 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/efficient-use-of-heat/heat-exchangers/>

- [10] GOOCH THERMAL SYSTEMS, Inc. *Design Features & Benefits*. [online]. c2020 [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <http://www.goochthermal.com/spiral-heat-exchanger/design>
- [11] FAN, Y., LUO. L., FLAMANT, G. *Design of Compact Heat Exchangers for Transfer Intensification* [online]. c2008 [cit. 2020-02-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Spiral-heat-exchanger-courtesy-of-Alfa-Laval_fig6_278695521
- [12] WTSML HEAT TRANSFER TECHNOLOGY CO., LTD. *Advantages And Disadvantages Of Spiral Plate Heat Exchanger*. [online]. 2019, Aug 08, 2019 [cit. 2020-02-11]. Dostupné z: <http://www.heatexchangersgasket.com/news/advantages-and-disadvantages-of-spiral-plate-h-26824071.html>
- [13] REMAK a.s.. *Jakým způsobem pracuje rotační výměník tepla?* [online]. c2020 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.remak.eu/cs/jakym-zpusobem-pracuje-rotacni-vymenik-tepla>
- [14] WILLMOTT, A.J. *Regenerative Heat Exchangers*. In: *A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering* [online]. 2 February 2011 [cit. 2020-07-08]. DOI: 10.1615/AtoZ.r.regenerative_heat_exchangers. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/1087/>
- [15] KLINGENBURG GmbH. *Regeneration - Recuperation*. [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <http://www.klingenburg.es/knowledge/regeneration-recuperation/>
- [16] PROCHÁZKOVÁ, D. *Analýza a řízení rizik*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04841-2.
- [17] PROCHÁZKOVÁ, D. *Bezpečnost složitých technologických systémů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Ústav bezpečnostních technologií a inženýrství, 2015. ISBN 978-80-01-05771-1.
- [18] KREIBICH, V. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1472-X.
- [19] AMARINE. *Typical location of Corrosion on Heat Exchanger*. [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://amarineblog.com/2020/01/14/typical-location-of-corrosion-on-heat-exchanger/>
- [20] AMARINE. *Corrosion in Heat Exchanger*. [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://amarineblog.com/2020/04/14/corrosion-in-heat-exchanger/>

- [21] COUSENS, A.K. *The Erosion of Ductile Metals by Solid Particle Impact*. Cambridge, 1984. Disertace. University of Cambridge, Fitzwilliam College, Department of Materials Science and Metallurgy.
- [22] WOJNAR, W. *Erosion of heat exchangers due to sootblowing*. In: Engineering Failure Analysis [online]. 2013, 33, 473-489 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.06.026. ISSN 13506307. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630713002264>
- [23] THULUKKANAM, K. *Heat Exchanger Design Handbook*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 978-1-4398-4213-3.
- [24] PROCESS COOLING. *Mitigating Fouling in Heat Exchangers*. [online]. c2013, September 4, 2013 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.process-cooling.com/articles/87263-mitigating-fouling-in-heat-exchangers>
- [25] MALAYERI, M. R., MÜLLER-STEINHAGEN, H., WATKINSON, A. P. *11th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning-2015, Enfield, Republic of Ireland*. In: Heat Transfer Engineering [online]. 2016, 38(7-8), 667-668 [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.1080/01457632.2016.1206390. ISSN 0145-7632. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01457632.2016.1206390>
- [26] ZUBAIR, S. *A risk based heat exchanger analysis subject to fouling Part I: Performance evaluation*. In: Energy [online]. 25(5), 427-443 [cit. 2020-06-13]. DOI: 10.1016/S0360-5442(99)00080-8. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544299000808>
- [27] KLEIN, U., ZUNKEL, A., EBERLE, A. *Breakdown of heat exchangers due to erosion corrosion and fretting caused by inappropriate operating conditions*. In: Engineering Failure Analysis [online]. 2014, 43, 271-280 [cit. 2020-02-02]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.03.019. ISSN 13506307. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630714001046>
- [28] PASHA, M., ZAINI, D., MOHD SHARIFF, A. *Inherently safer design for heat exchanger network*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [online]. 2017, 48, 55-70 [cit. 2020-06-13]. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.04.002. ISSN 09504230. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950423017303340>
- [29] PROCESS-EQUIPS. *The teacher summed up the heat exchanger installation and repair experience | production*. [online]. 2017, 2017-03-13 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: http://english.process-equip.com/article/article_one.php?topic_id=464

- [30] PROJECTILE TUBE CLEANING, Inc. *Heat Exchanger Tube Cleaning* [online]. c2017 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.projectiletube.com>
- [31] ABD-ELHADY, M. S., MALAYERI, M. R., JALALIRAD, M. R. *Intensification of the cleaning action of structurally different projectiles by multiple injections and changing injection rate*. In: *Desalination* [online]. 2014, **337**, 52-59 [cit. 2020-06-13]. DOI: 10.1016/j.desal.2014.01.011. ISSN 00119164. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011916414000277>
- [32] FINEC TECHNOLOGY s.r.o.. *Projektilové čištění* [online]. c2020 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://finextechnology.cz/projektilove-cistení>
- [33] ROSSITER, A. P., JONES, B. P. *Energy management and efficiency for the process industries* [online]. New Jersey: Wiley, 2015 [cit. 2020-02-23]. ISBN 978-1-118-83825-9. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=1895961>
- [34] KUCHAR, J., KREIBICH, V. *Čištění vnitřních povrchů energetických soustav a rizika zanedbané údržby*. In: *Řízení rizik procesů spojených s technickými díly*. Praha: ČVUT v Praze, 2019, s. 76-81. ISBN 978-80-01-06656-0.
- [35] UTNE, I. B., BRUROK, T., LARSEN, S. *Monitoring the mechanical integrity of heat exchangers*. In: *Process Safety Progress*[online]. 2011, **30**(4), 328-333 [cit. 2020-06-13]. DOI: 10.1002/prs.10475. ISSN 10668527. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/prs.10475>
- [36] KUCHAR, J., KREIBICH, V., HRDINOVÁ, H., HAZDRA, Z., KUBĚNKA, M. *Maintenance of energy equipment*. In: *International Conference on Innovative Technologies 2017*. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2017. pp. 267-270. ISSN 0184-9069.
- [37] KUCHAR, J., KREIBICH, V., AGARTANOV, V., PETŘÍK, M. *Maintenance and cleaning of heat exchangers*. In: *Trends in Production Devices and Systems IV*. Durnten-Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2018. pp. 396-403. ISSN 0255-5476. ISBN 978-3-0357-1265-0.
- [38] KUCHAR, J., KREIBICH, V. *Cleaning of internal surfaces*. In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Basel: Springer Nature Switzerland AG, 2019. pp. 591-600. ISSN 2195-4356. ISBN 978-3-030-16943-5.
- [39] PROCHÁZKOVÁ, D. *Základy řízení bezpečnosti kritické infrastruktury*. ISBN 978-80-01-05245-7. ČVUT, Praha 2013, 223p.