



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Čištění a údržba povrchů v energetice

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Martin Machalínek

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní inženýrství

SPECIALIZACE: Bez specializace

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Machalínek** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **469571**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Čištění a údržba povrchů v energetice

Název diplomové práce anglicky:

Cleaning and maintenance of surfaces in energy industry

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozbor metod čištění a údržby povrchů
- 2) Návrh metody čištění
- 3) Realizace navržené metody čištění na vybrané součásti
- 4) Vyhodnocení stavu povrchu vyčištěné součásti

Seznam doporučené literatury:

1. SHARMA, R. K., PATEL, L. R., BHATT, M. M. (2001) On Line Chemical Cleaning of Critical Heat Exchangers for Cooling Water Deposit and their Control to Sustain High Production Level of Methanol - An Experience and Case Study at GNFC. In: National Seminar on Corrosion and Its Prevention(NSCP-2001), 13-14, December, 2001, National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur
2. KONONENKO, R.V. Methods of Cleaning Scale from the Internal Surface of Finned Pipes. Chemical and Petroleum Engineering. July 2014, Volume 50, Issue 3– 4, pp 197–200. <https://doi.org/10.1007/s10556-014-9879-9>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc., ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **15.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **06.08.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2021**

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

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Kuchaře, Ph.D., IWE, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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:

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce **Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE** a konzultantovi **doc. Ing. Viktoru Kreibichovi, CSc.**, kteří mne uvedli do problematiky a poskytli pomoc při řešení a realizaci experimentální části diplomové práce. Dále bych rád poděkoval svým blízkým za jejich podporu při studiu.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá čištěním a údržbou povrchů v energetice. Práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou. V teoretické části je popsána problematika zanášení vnitřních povrchů energetických zařízení, mechanismy vzniku usazenin a problémy, ke kterým dochází zanášením. Dále jsou popsány metody čištění vnitřních povrchů s důrazem na chemické čištění a prevenci.

Praktická část se zabývá návrhem metody chemického čištění a aplikací navržené metody na trubkovém svazkovém výměníku s následným vyhodnocením výsledného stavu vnitřního povrchu vybraného zařízení.

Název diplomové práce:	Čištění a údržba povrchů v energetice
Autor práce:	Bc. Martin Machalínek
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE
Konzultant:	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
Akademický rok:	2020/2021
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Rozsah práce:	62 stránek, 5 tabulek, 34 obrázků
Klíčová slova:	Zanášení, usazeniny, chemické čištění, čištění vnitřních povrchů

ANNOTATION

The diploma thesis deals with the cleaning and maintenance of surfaces in energy industry. The thesis is divided into theoretical and practical part. The theoretical part describes the problem of fouling of the inner surfaces of energy equipment, the mechanisms of scales formation and problems that are affected by fouling. Methods of cleaning inner surfaces are also described with importance on chemical cleaning and prevention.

The practical part deals with the design of method of chemical cleaning and application of the designed method on a tube exchanger with subsequent evaluation of the resulting state of the inner surface of the selected equipment.

Title of the final thesis:	Cleaning and maintenance of surfaces in energy industry
Author:	Bc. Martin Machalínek
Supervisor:	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE
Consultant:	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
Academic year:	2020/2021
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Extent:	62 pages, 5 tables, 34 pictures
Keywords:	Fouling, scales, chemical cleaning, cleaning of inner surfaces

OBSAH

ÚVOD A CÍL PRÁCE	11
1. PROBLEMATIKA ZANÁŠENÍ A VZNIKU USAZENIN	12
1.1 USAZENINY A ZANÁŠENÍ ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ	12
1.2 MECHANISMY ZANÁŠENÍ	14
1.2.1 KRYSTALIZAČNÍ ZANÁŠENÍ	16
1.2.2 ZANÁŠENÍ ČÁSTICEMI	17
1.2.3 ZANÁŠENÍ ZPŮSOBENÉ CHEMICKOU REAKCÍ	17
1.2.4 KOROZNÍ ZANÁŠENÍ	18
1.2.5 BIOLOGICKÉ ZANÁŠENÍ	19
1.2.6 ZANÁŠENÍ ZPŮSOBENÉ MRAZEM	19
1.3 PROBLÉMY VZNIKAJÍCÍ ZANÁŠENÍM	20
2. POUŽÍVANÉ MATERIÁLY V ENERGETICE	21
2.1 ŽÁRUVZDORNÉ OCELI A SLITINY	21
2.2 KOROZIVDORNÉ OCELI	21
2.3 UHLÍKOVÉ OCELI A LITINY	22
2.4 MĚĎ	22
3. METODY ČIŠTĚNÍ A ÚDRŽBY POVRCHŮ V ENERGETICE	23
3.1 CHEMICKÉ ČIŠTĚNÍ A ÚDRŽBA POVRCHŮ	23
3.1.1 VOLBA CHEMICKÉHO ČIŠTĚNÍ	24
3.1.2 MOŘENÍ V ALKÁLÍCH	26
3.1.3 MOŘENÍ V KYSELINÁCH	26
3.1.4 PASIVACE	30
3.1.5 CHELATAČNÍ ČINIDLA	30
3.1.6 INHIBITORY KOROZE	32

3.1.7	PREVENCE PROTI ZANÁŠENÍ	34
3.2	MECHANICKÉ ČIŠTĚNÍ A ÚDRŽBA POVRCHŮ	36
3.2.1	ČIŠTĚNÍ VYSOKOTLAKÝM PROUDEM VODY	36
3.2.2	ČIŠTĚNÍ ULTRAZVUKEM	37
3.2.3	ČIŠTĚNÍ TRYSKÁNÍM.....	37
3.2.4	ČIŠTĚNÍ PROJEKTILY	38
3.2.5	ČIŠTĚNÍ VRTÁNÍM S PROPLACHEM.....	38
3.2.6	ČIŠTĚNÍ KARTÁČOVÁNÍM S PROPLACHEM	39
3.2.7	ČIŠTĚNÍ DUSÍKEM.....	39
4.	PRAKTICKÁ ČÁST.....	40
4.1	POPIS EXPERIMENTU.....	40
4.1.1	NÁVRH METODY A TECHNOLOGICKÝ POSTUP	40
4.1.2	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	41
4.1.3	ČISTÍCÍ PŘÍPRAVEK	43
4.2	VIZUÁLNÍ KONTROLA PŘED VYČIŠTĚNÍM	44
4.3	PROPLACH VODOU.....	44
4.4	CHEMICKÉ ČIŠTĚNÍ CIRKULACÍ PŘÍPRAVKU.....	45
4.5	PRŮBĚŽNÁ KONTROLA PARAMETRŮ A ZPRACOVÁNÍ ZÍSKANÝCH DAT	45
4.6	VYPUŠTĚNÍ ČISTÍCÍHO PŘÍPRAVKU A PROPLACH VODOU.....	52
4.7	VIZUÁLNÍ KONTROLA PO VYČIŠTĚNÍ	52
4.8	VYHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ	53
5.	ZÁVĚR.....	54
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	55
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM TABULEK.....	62

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Al_2O_3	chemická sloučenina – oxid hlinitý (korund)
ATMP	fosfonát – kyselina aminotris(methylenfosfonová)
$[\text{BTBA}]^+ [\text{AlCl}_4]^-$	iontová kapalina – benzyltributylammonium tetrachloroaluminat
$^\circ\text{C}$	jednotka teploty – stupeň Celsia
CaCO_3	chemická sloučenina – uhličitan vápenatý
CaSiO_3	chemická sloučenina – křemičitan vápenatý
CaSO_4	chemická sloučenina – síran vápenatý
Cl^-	aniont chloru
–COOH	karboxylová skupina
Cr	chemický prvek – chrom
Cr_2O_3	chemická sloučenina – oxid chromitý
DTPA	chelatační činidlo – kyselina pentetová
e^-	elektron
EDTA	chelatační činidlo – kyselina ethylendiamintetraoctová
Fe	chemický prvek – železo
Fe^{2+}	kationt železa
FeSiO_3	chemická sloučenina – křemičitan železnatý
H^+	kationt vodíku
H_2	molekula vodíku
H_2O	chemická sloučenina – voda
H_2O_2	chemická sloučenina – peroxid vodíku
H_2SO_4	kyselina sírová
H_3NSO_3	kyselina sulfamová
H_3PO_4	kyselina fosforečná
HCl	kyselina chlorovodíková
HEDP	fosfonát – kyselina etidronová
HEDTA	chelatační činidlo – kyselina hydroxyethylethylenediamintrioctová
HF	kyselina fluorovodíková
HNO_3	kyselina dusičná
KMnO_4	chemická sloučenina – manganistan draselný (hypermangan)
mg/l	jednotka koncentrace – miligram na litr
min	jednotka času – minuta
MgCO_3	chemická sloučenina – uhličitan hořečnatý

MgSO₄	chemická sloučenina – síran hořečnatý
MPa	jednotka tlaku – megapascal
Na₂CO₃	chemická sloučenina – uhličitan sodný
Na₂SiO₃	chemická sloučenina – křemičitan sodný
Na₃PO₄	chemická sloučenina – fosforečnan sodný
NaNO₃	chemická sloučenina – dusičnan sodný
NaOH	chemická sloučenina – hydroxid sodný
NH₄F	chemická sloučenina – fluorid amonný
NH₄HF₂ / NH₄F·HF	chemická sloučenina – bifluorid amonný
Ni	chemický prvek – nikel
NTA	chelatační činidlo – nitrilotrioctová kyselina
(-PO₃H₂)	fosfonátová skupina
PAA	polymerní inhibitor – polyakrylát
PAPCA	aminopolykarboxylové kyseliny
PBTC	fosfonát – kyselina 2-fosfonbutan-1,2,3-trikarboxylová
pH	vodíkový exponent
PMA	polymerní inhibitor – kyselina polymaleinová
PMAA	polymerní inhibitor – kyselina polymetakrylová
SiF₄	chemická sloučenina – fluorid křemičitý
SiO₂	chemická sloučenina – oxid křemičitý

ÚVOD A CÍL PRÁCE

Energetická zařízení, jako jsou zejména zařízení na výměnu tepla, tedy výměníky tepla, kotle apod., se vyskytují ve všech možných průmyslových odvětvích a velmi často tato zařízení jsou postižena společným problémem, a to zanášením teplosměnných ploch od nečistot a složek, které jsou obsaženy v procesních médiích jako jsou voda, spaliny aj. Je známo několik mechanismů zanášení, které za určitých pracovních podmínek se mohou vyskytovat souběžně. Zanášením nečistotami vznikají usazeniny, které poté mají za následek snížení výkonu daného energetického zařízení, a to souvisí se snížením efektivního provozu zařízení.

Mnohdy kvůli vzniklým usazeninám na vnitřním povrchu je třeba zařízení odstavit a nechat jej vyčistit. Tyto plánované či neplánované odstávky jsou nákladné. Energetická zařízení je také možné čistit bez nutnosti odstavení, pak je řeč o „online“ čištění. Takové čištění se realizuje přidáním chemických látek s čistícími účinky do procesního média. Jelikož samotné čištění je nákladné, klade se důraz na prevenci zanášení například přidáním vhodných látek do procesního média, které brání usazování nečistot na čistém vnitřním povrchu energetických zařízení.

Cílem této diplomové práce bylo shromáždit dostatek informací o problematice čištění a údržby povrchů v energetice s důrazem zejména na chemické metody čištění a údržby povrchu, navrhnout vhodný způsob čištění vnitřních povrchů zařízení používaných v energetice a realizovat navrženou metodu čištění na vybraném zařízení s následným vyhodnocením výsledného stavu povrchu zařízení.

1. PROBLEMATIKA ZANÁŠENÍ A VZNIKU USAZENIN

1.1 USAZENINY A ZANÁŠENÍ ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ

Vznik usazenin, a následné zanášení nejen energetických zařízení, je vážný problém, který může omezit výrobu, nebo způsobit neplánované odstávky zařízení, a proto je potřeba tomu věnovat zvláštní pozornost. Tento problém se objevuje v řadě různých průmyslových odvětvích jako jsou například chemické, potravinářské, farmaceutické, či energetické procesy. [1]

Usazeniny jsou nečistoty usazující se na povrchu zařízení. Zanášením se pak rozumí akumulaci neboli hromadění těchto nečistot a nežádoucího materiálu na povrchu zařízení. Nečistoty jako kal, vodní kámen, různé sedimenty, precipitáty, nevyužité zbytky paliva, to vše souvisí se zanášením. Tepelné výměníky, chladiče, potrubí, nádrže, čerpadla, kompresory, filtry, kotle, reaktory či pece jsou zařízení náchylná ke vzniku usazenin. Celková účinnost těchto zařízení závisí na nepřetržitém a bezproblémovém provozu. Charakter, vzhled a rychlost vzniku usazenin závisí zejména na proudícím médiu, konstrukci, umístění, ale také na struktuře povrchu (tj. drsnost, přítomnost produktů koroze aj.), dále na podmínkách procesu, při kterém je zařízení používáno (tj. teplota a její fluktuace, tlak, rychlost a typ proudění média aj.). [2]

Mezi nejdůležitější faktory ovlivňující míru zanášení patří následující faktory:

- Vlastnosti proudícího média

Významný vliv na vznik usazenin má samotné médium proudící zařízením a jeho chemické vlastnosti. Některá média vykazují nízkou tendenci k zanášení a jiné naopak mohou způsobit silné zanesení zařízení. Čistota je pak důležitým parametrem, protože právě tyto nečistoty obsažené v médiu budou tvořit nános.

- Teplota povrchu zařízení

Obecně lze říct, že s vyšší teplotou povrchu zařízení bude i rychleji docházet ke vzniku usazenin. Právě fyzikálně-chemické jevy jsou základem vzniku usazenin a při vyšších teplotách tyto chemické reakce probíhají snadněji a rychleji, zvyšuje se také riziko vzniku koroze a může dojít i k připečení usazeniny k povrchu zařízení. Například zanesení přehřívacích tepelných výměníků na jejich horkém konci je právě způsobeno řadou chemických reakcí vyvolaných vysokými provozními teplotami.

- Drsnost povrchu

V případě drsnosti povrchu platí, že čím je povrch drsnější, tím na povrchu budou snadněji ulpívat nečistoty a vznikat tak usazeniny.

- Rychlost proudění pracovního média

Obecně platí, že s vyšší rychlostí proudění média bude docházet k menšímu ulpívání nečistot na povrchu zařízení, tyto nečistoty nebudou mít schopnost se usazovat a nestihnou tak vytvořit nános. Naopak s pomalým prouděním nečistoty budou schopny se hromadit na povrchu zařízení a tvořit tak usazeniny. Jsou známy kritické rychlosti, nad nimiž nedochází ke vzniku usazenin v důsledku odstranění nánosů smykovými silami proudem média.

- Materiál zařízení

Typ materiálu má výrazný vliv na zanášení. Na povrchu levných uhlíkových ocelí bude snadno vznikat koroze, ale ani korozivzdorné oceli nejsou zcela imunní vůči všem chemickým látkám obsažené v pracovním médiu. [2, 3, 7]

Usazeniny mohou vznikat různými mechanismy, které se budou výrazně lišit v organických, vodných, nebo plynných médiích. Důležité charakteristiky nánosů jsou tepelný odpor, který je až o dva řády vyšší než u kovových materiálů a tloušťka vrstvy nánosů, která se pohybuje od několika milimetrů.

Zanesení v organických médiích, jako jsou páry ropných produktů, paliva, organická rozpouštědla a další, dochází z důvodu nestability a nekompatibility složek ropných látek po vytvoření směsi nebo rozkladu organických látek vedoucí ke vzniku koksu či dehtu. Dalšími důvody jsou polymerace a oxidace uhlovodíků, srážení kalu a produkty koroze. Typické problémové oblasti zahrnují zejména výměníky tepla, pece v destilačních jednotkách, zařízení tepelného krakování aj.

Důvody znečištění v systémech chlazení vodou jsou zejména krystalizace, resp. tvorba vodního kamene, vznik uhličitánů vápenatých a hořečnatých, síranů, fosforečnanů, dále pak depozice mikroorganismů a jejich metabolických produktů, ale také produkty koroze jako jsou oxidy, hydroxidy, či soli korodujících kovů.

V plynných médiích, jako kyslík a kouřové plyny v pecích, nebo procesní plyny v rafineriích, způsobuje zanesení povrchu zařízení zejména vysokoteplotní korozi, korozi zapříčiněnou popelem z paliva či proprašováním kovů. Znečištění v plynných médiích

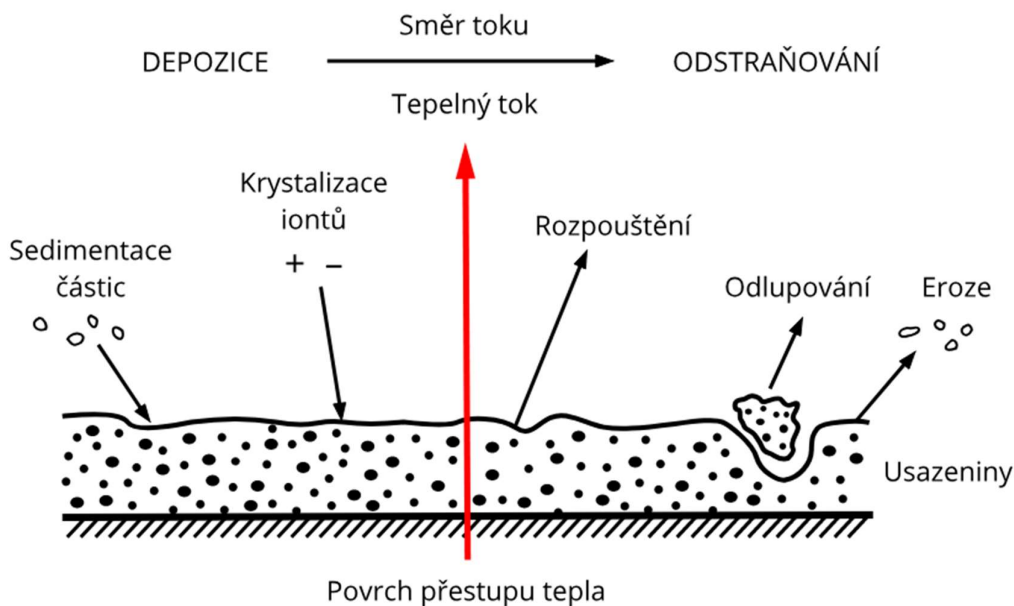
se spíše považuje jako produkt koroze, nikoli zanesení samotné, konkrétně se pak hovoří o zanesení korozí.

Znečištění zanášením může být organické, anorganické, nebo jejich kombinací. Mechanismus znečištění se pak liší nejen tvorbou organických a anorganických nánosů, ale liší se také v jednotlivých zařízeních.

Jelikož složitost a rozmanitost vzniku znečištění zanášením poměrně komplikuje předvídání následného znečištění usazeninami, jeho monitorování a úpravu povrchu nebo celého zařízení proti zanášení, tak budou v následující kapitole popsány jednotlivé mechanismy zanášení. [2]

1.2 MECHANISMY ZANÁŠENÍ

Obecně platí, že několik mechanismů zanášení může působit současně a téměř vždy se budou vzájemně posilovat. V běžné soustavě lze předvídat několik odlišných způsobů depozice a odstraňování nečistot, což ukazuje obrázek 1. Každý ze základních mechanismů vzniku usazenin zahrnuje pět rozlišitelných kroků: iniciace – dochází k akumulaci malého množství nečistot, hromadný transport částic k povrchu, přilnutí k povrchu zařízení, částečné odstranění a stárnutí, resp. vytvrzení. Jelikož tyto kroky mohou fungovat paralelně, znečištění zanášením je komplikovaný fyzikálně-chemický proces. [2, 5, 8]

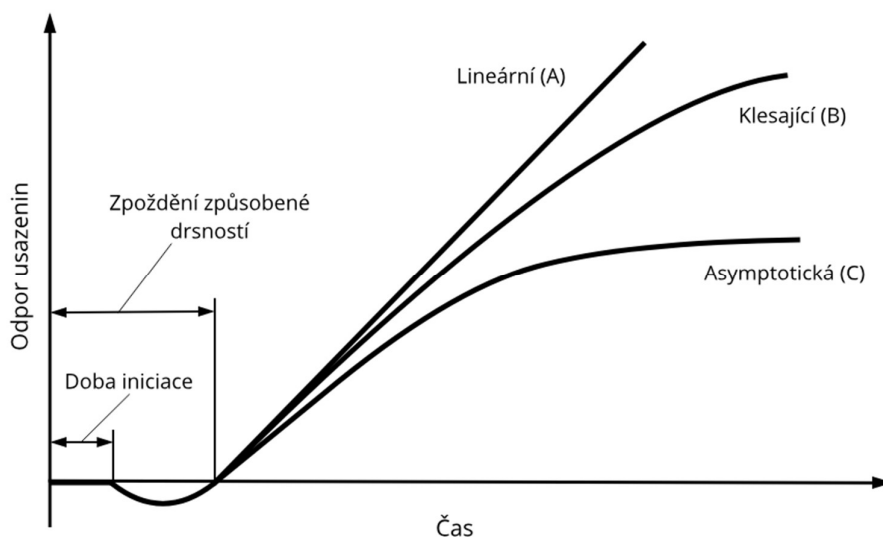


Obrázek 1 – Způsoby depozice a následného odstraňování během zanášení [8]

V dostupné literatuře se lze setkat s několika základními typy zanášení, které lze rozlišit podle mechanismu vzniku usazenin, které se dále liší podle řady faktorů jako jsou provozní podmínky, při kterých je zařízení používáno. Základními typy zanášení jsou:

- Krystalizační zanášení
- Zanášení částicemi
- Zanášení způsobené chemickou reakcí
- Korozní zanášení
- Biologické zanášení
- Zanášení způsobené mrazem [1, 2, 4]

Na obrázku 2 lze vidět odpor usazenin v závislosti na čase. Odpor usazenin způsobuje změny charakteristiky proudění procesního média v blízkosti stěn energetického zařízení. Doba iniciace nebo čas zpoždění se považuje za dobu, kdy povrch čistého zařízení není ještě zanesen nečistotami. Po uplynutí času zpoždění lze křivku zanášení popsat jako lineární (A), klesající (B) a asymptotickou (C). Lineární křivka zanášení (A) je typická pro houževnaté a silně přilnavé usazeniny, kdy rychlost depozice je vyšší než rychlost odstraňování. Klesající křivka (B) je charakteristická snížením rychlostí depozice a jedná se o usazeniny s nižší pevností. Tato kombinace s postupem času způsobí pokles depozice nebo rychlosti zanášení. Asymptotická křivka (C) je nejčastěji zmiňována v případech různých typů zanášení a je charakterizována postupně se zvyšující rychlostí odstraňování nečistot až nakonec se může rovnat rychlosti depozice. [8]



Obrázek 2 – Typické křivky průběhu závislosti odporu zanášení na čase [8]

1.2.1 KRYSTALIZAČNÍ ZANÁŠENÍ

Při krystalizačním zanášení (v některých literaturách známo jako precipitační) je hlavním mechanismem vznik nánosu krystalů a precipitátů z rozpuštěných solí v médiu na povrchu zařízení pro přenos tepla. K precipitaci a krystalizaci dochází, když povrchová koncentrace překročí tzv. mez rozpustnosti. Vznik krystalů a precipitátů může nastat v procesním médiu, v tepelné mezní vrstvě, nebo na rozhraní médium-povrch. Tento typ zanášení je častý u zařízeních jako jsou parogenerátory v elektrárnách a teplárnách.

K zanášení krystaly a precipitáty tedy dochází v důsledku přesycení vodného roztoku, což může být způsobeno následujícími procesy:

- Ohřevem vody a následným vyloučením CaCO_3 , MgCO_3 , CaSO_4 , MgSO_4 , CaSiO_3 , FeSiO_3 a další
- Ochlazování pod mezí rozpustnosti
- Kolísáním pH
- Míchání proudů média s rozlišným chemickým složením
- Odpařováním rozpouštědla

Tyto vzniklé krystaly a precipitáty bývají velmi tvrdé a pevné, je tedy náročné je odstranit mechanicky, a proto se volí pro jejich odstranění chemické metody čištění. Dále je možné předejít tvorbě usazenin přidáním chemických látek do média, které pak zabraňují vyloučení precipitátů a krystalů z pracovního média. [2, 3, 6, 7]



Obrázek 3 – Příklad krystalizačního zanášení [16]

1.2.2 ZANÁŠENÍ ČÁSTICEMI

Zanášení částicemi vzniká akumulací pevných částic suspendovaných v procesním médiu na povrchu zařízení. Těžké částice se vlivem gravitace usazují na vodorovném povrchu, lehké částice se usazují na plochách pod různými sklony v důsledku sací síly nebo jiného mechanismu. Nejčastěji dochází k zanesení částicemi zbytků nespáleného paliva, nebo popelu na trubkách kotle, či usazování prachu na vzduchem chlazených kondenzátorech.

Takto vzniklé znečištění samo o sobě není příliš náročné odstranit, problém však nastává, když je toto znečištění kombinováno s jiným mechanismem zanášení (např. při vzniku dehtu). Pak je potřeba volit chemické metody čištění. Samotné znečištění částicemi lze odstranit zvýšením rychlosti proudění média, médium pak odnáší tyto nánosy, které je nutné na výstupu filtrovat. Avšak toto čištění není úplně dokonalé, nedojde ke kompletnímu odstranění nánosu. Efektivnější je v tomto případě mechanické čištění, ale to jen v případech, kdy nános je přístupný nebo zařízení je rozebíratelné. Odstranění lze pak provést pomocí kartáčů nebo vysokotlakým vodním proudem. [3, 7, 8, 9]

1.2.3 ZANÁŠENÍ ZPŮSOBENÉ CHEMICKOU REAKCÍ

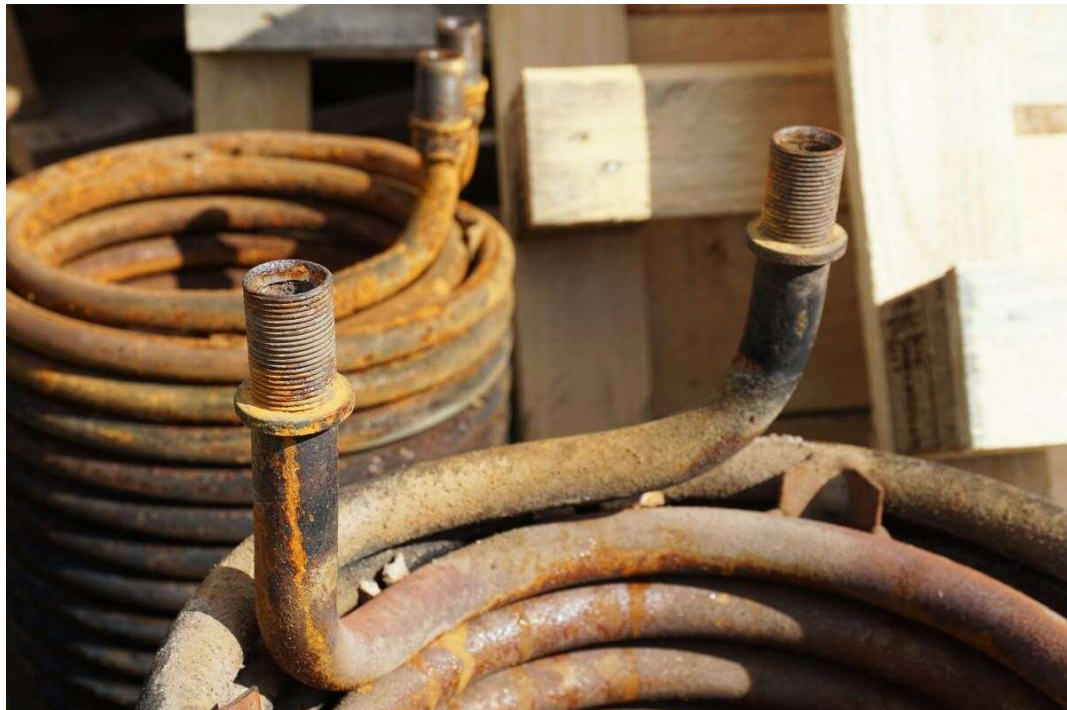
V případě zanášení způsobené chemickou reakcí dochází ke vzniku usazenin na povrchu horké stěny zařízení pro přenos tepla právě nežádoucí chemickou reakcí v procesním médiu, přičemž se materiál povrchu zařízení do reakce nezapojuje, ale může působit jako katalyzátor. Typické chemické reakce, ke kterým dochází při tomto druhu znečištění, jsou polymerace či koksování. Obvykle tento typ zanášení se začíná tvořit v oblastech lokálních horkých míst tepelného výměníku. To se může projevat v širokém teplotním rozmezí od teploty okolí až do více než 1 000 °C. S rostoucí teplotou narůstá i počet chemických reakcí v procesním médiu energetického zařízení. Mezi procesy, při kterých dochází k zanášení způsobené chemickou reakcí patří zejména ukládání koksu v petrochemickém průmyslu v krakovacích pecích. Dále tento mechanismus znečištění je častý v aplikacích zpracovatelského průmyslu jako je rafinace ropy.

Jelikož usazeniny tohoto typu jsou často velmi houževnaté, je tedy potřeba použít speciální metody čištění povrchu. [3, 6, 7, 8, 10]

1.2.4 KOROZNÍ ZANÁŠENÍ

Korozní zanášení je způsobeno také chemickou reakcí (z pravidla oxidací), ale liší se od znečištění způsobeným chemickou reakcí tím, že materiál povrchu zařízení se do reakce zapojuje a reaguje s procesním médiem za vzniku koroze. Je třeba zmínit, že růst nánosu má značný nepříznivý účinek na účinnost takto postiženého energetického zařízení, avšak je tento vliv méně důležitý než znečištění částicemi korozních produktů, které se následně vytvoří jinde v systému. Důležitými faktory při korozním zanášení jsou chemické vlastnosti procesního média a materiálu povrchu zařízení, oxidační potenciál a alkalita, lokální teplota a velikost tepelného toku, ale také hmotností průtok pracovního média. Korozní zanášení má značný význam při konstrukci kotlů a kondenzátorů elektráren spalující fosilní paliva kvůli přítomnosti síry v palivu.

Zanášení korozí je závislé na volbě materiálu povrchu zařízení, se kterým procesní médium dochází ke styku. Správným výběrem materiálu (např. drahé slitiny) lze koroznímu zanášení předejít. Hodnota pH procesního média je také řídicím parametrem vzniku korozního zanášení, je tedy vhodné upravit pH provozního média a zamezit tak koroznímu působení média na materiál povrchu zařízení. [6, 7, 8, 10]



Obrázek 4 – Příklad korozního zanášení [17]

1.2.5 BIOLOGICKÉ ZANÁŠENÍ

Biologické zanášení je způsobeno usazováním bakterií a organických látek na povrchu zařízení a následným růstem vzniklé vrstvy množením. Obecně tento typ zanášení vzniká ve vodních médiích s nízkou rychlostí proudění. Biologické znečištění lze rozdělit na dva typy, a to mikrobiální a makrobiální. V případě kondenzátorů elektráren využívající mořskou vodu se lze setkat s biologickým zanášením.

Biologické znečištění lze ovlivnit volbou materiálu, například neželezné mosazné materiály jsou pro některé organismy jedovaté. Biologické zanášení lze také odstranit přidáním pesticidů do provozního média. Pesticidy bez oxidačního účinku spolehlivě ničí bakterie a brání dalšímu množení, ale nejsou schopny odstranit vytvořené nánosy organických vrstev na povrchu zařízení. Pesticidy s oxidačním účinkem efektivně zabíjí bakterie a také odstraňují již vzniklé nánosy organických vrstev a veškeré organické látky v procesním médiu. Při aplikaci těchto pesticidů je potřeba určit, zda pesticidy nebudou reagovat s materiálem zařízení. [1, 6, 7, 8, 9]

1.2.6 ZANÁŠENÍ ZPŮSOBENÉ MRAZEM

Zanášení způsobené mrazem je způsobeno tuhnutím nebo zamrznutím pracovního média nebo některých složek média na podchlazeném povrchu zařízení v důsledku změny fáze kapalina-pevná látka, nebo fáze pára-pevná látka v médiu. K tomuto mechanismu zanášení dochází při nízkých teplotách, obvykle při teplotě okolí a méně, v závislosti na místních tlakových podmínkách. Hlavními faktory ovlivňující toto znečištění jsou hmotnostní průtok procesního média, teplotní a krystalizační podmínky, povrchové podmínky a koncentrace prekursoru pevné látky v médiu. Obvykle dochází ke vzniku námrazy na teplosměnné ploše během výroby chladicí vody, nebo při chlazení vlhkého vzduchu.

Nánosy způsobené mrazem je relativně jednoduché odstranit, ve většině případů stačí zvýšit teplotu stěny zařízení, nebo zvýšit teplotu provozního média. Dalším řešením může být posunutí bodu tuhnutí pracovního média. [6, 7, 10]

1.3 PROBLÉMY VZNIKAJÍCÍ ZANÁŠENÍM

Znečištění zanášením vede k mnoha problémům a omezením, které je třeba brát v potaz, a to je taky důvod, proč se věnovat čištění a údržbě takto znečištěných povrchů zařízení. Mezi tyto problémy a omezení vznikající zanášením patří:

- a) Vznik nánosu koroze, korozní produkty přispívají k znečištění.
- b) Snížení přenosu tepla a výstupní teploty proudu provozního média. Znečištěný materiál má až o dva řády nižší tepelnou vodivost než čistý povrch zařízení z kovového materiálu. V důsledku toho je narušen přenos tepla a snížena zpětně získaná energie.
- c) Pro správné chlazení pracovního média na horké straně tepelného výměníku bude nutné pravděpodobně zajistit navýšení chladicí kapacity.
- d) Zvyšující se tlaková ztráta, a v důsledku toho klesající průtok, bude mít za následek navýšení nákladů na energii.
- e) Blokování, případně ucpání potrubí, výměníků tepla, čerpadel a kompresorů.
- f) Navýšení spotřeby paliva za účelem zajištění požadované teploty proudu pracovního média.
- g) Vyšší teploty mohou zkracovat životnost zařízení.
- h) Dopad na životní prostředí z důsledku zvýšeného uvolňování emisí skleníkových plynů. Další ekologický aspekt zahrnuje nutnost uložení uhlíkatých a uhlovodíkových usazenin obsahující síru, dusík a kovy na odpovídajícím místě.
- i) Snížení kapacity skladovacích nádrží v případě, kdy se na dně hromadí velké množství usazenin a nekontrolovaně se ukládají pod nános koroze.
- j) Neplánované odstávky zařízení kvůli pravidelnému čištění od znečištění.
- k) Bezpečnostní rizika a problémy životního prostředí. [2]

2. POUŽÍVANÉ MATERIÁLY V ENERGETICE

S rostoucím trendem nároků na požadavky materiálů používaných v energetice dochází také k neustálému vývoji materiálů pro toto odvětví. Na tyto materiály jsou kladeny vysoké nároky zejména z hlediska materiálových vlastností jako jsou tvařitelnost, tažnost, dostatečná mez kluzu, pevnost v tahu a pevnost při tečení, ale také jsou kladeny požadavky na žáruvzdornost a odolnost vůči korozi při zvýšených teplotách i tlacích a v neposlední řadě také na životnost.

2.1 ŽÁRUVZDORNÉ OCELI A SLITINY

Žáruvzdorné oceli a slitiny jsou takové materiály, které disponují vysokou oxidační a korozní odolností a mají stálé materiálové vlastnosti při aplikacích, kde je vyžadována odolnost vůči vysokým teplotám v rozmezí od 600 až 1 200 °C. Materiály odolávají vlivům horkých plynů a spalin, ale také solných a kovových tavenin. Nejvyšším teplotám nejlépe vzdorují zejména niklové slitiny, které jsou na bázi Ni-Cr, nebo Ni-Cr-Fe. Žáruvzdorné materiály jsou řazeny mezi vysokolegované materiály. Hlavním legujícím prvkem je chrom. Přísady dalších legujících prvků jako jsou nikl, křemík, molybden, vanad, hliník apod. zvyšují účinky chromu. Žáruvzdorné oceli se dělí z hlediska struktury na feritické chromové oceli, austenitické oceli a austeniticko-feritické oceli, tzv. duplexní oceli. Mezi průmyslové aplikace žáruvzdorných materiálů v energetice patří zejména použití na většinu částí parního kotle v elektrárnách, tepelné výměníky aj. [11, 12, 13]

2.2 KOROZIVDORNÉ OCELI

Korozivzdorné oceli se vyznačují zvýšenou odolností vůči korozi za běžných, ale i zvýšených teplot. Jedná se o vysokolegované materiály, přičemž základním legujícím prvkem korozivzdorných ocelí je chrom. Korozivzdorné oceli se zásadně liší od žáruvzdorných ocelí zejména nižším obsahem chromu, křemíku a hliníku. Podmínkou korozivzdornosti oceli je obsah více jak 12 % chromu a přítomnost dalších legujících prvků jako nikl, molybden, mangan, niob, titan aj. Korozivzdorné oceli se řadí mezi materiály schopné pasivace. Pasivace je vlastnost materiálu, kdy dochází na povrchu materiálu ke vzniku ochranné pasivní vrstvy, která je tvořena ve většině případů stabilními oxidy. Korozivzdorné oceli se dělí z hlediska struktury na feritické oceli, martenzitické oceli, austenitické oceli a austeniticko-feritické oceli. [12, 13, 14]



Obrázek 5 – Tepelný výměník ze žáruvzdorné oceli 1.4841 [18]

2.3 UHLÍKOVÉ OCELI A LITINY

Dalšími materiály běžně používanými v energetickém průmyslu jsou konstrukční uhlíkové oceli a litiny. Konstrukční oceli běžných jakostí a ušlechtilé oceli mají uplatnění zejména pro trubkové ocelové konstrukce, ropovody, zařízení pro vedení oleje, tlakové nádoby a zásobníky, ale mohou z nich být konstruovány také tepelné výměníky v závislosti na provozních podmínkách. Litiny pak jsou využívány zejména pro radiátory a topná tělesa.

2.4 MĚĎ

Díky své výborné tepelné vodivosti má také své uplatnění měď, která se dobře pájí a tváří. Tento materiál má uplatnění při výrobě trubek pro rozvod teplé vody nebo taky nízkoteplotní tepelné výměníky. [7, 15]

3. METODY ČIŠTĚNÍ A ÚDRŽBY POVRCHŮ V ENERGETICE

Fyzikálně-chemická povaha znečištění a materiálu ovlivňují přilnavost usazenin k povrchu energetického zařízení a v důsledku toho také ovlivňují postup odstranění usazenin a čištění zanesených povrchů. Nelze rozhodnout o postupu čištění bez nahlédnutí do energetického zařízení a identifikace typu usazenin i jeho chemického složení. Pro každý typ zanášení existují jiné specifické způsoby čištění povrchu. Někdy stačí pouze vysokotlaký proud vody k odstranění např. organických usazenin. V mnoha případech je však nutné přistoupit k čištění vhodnou kyselinou alespoň ve stopovém množství, které je obsaženo v nejrůznějších čistících prostředcích, za účelem rozpustit vzniklé usazeniny. [2]

Metody čištění a údržby povrchu lze dělit na mechanické a chemické. Dále se lze setkat i s dělením „on-line“ a „off-line“ čištění povrchu. V případě on-line čištění se jedná o takové způsoby čištění povrchu, kdy není potřeba čištěné zařízení odstavit z provozu. Čištění tedy probíhá za provozu daného zařízení. V případě off-line čištění je naopak potřeba zařízení odstavit, aby se čištění mohlo provést. [19]

3.1 CHEMICKÉ ČIŠTĚNÍ A ÚDRŽBA POVRCHŮ

Chemické čištění zahrnuje metody, kdy se využívá roztoků chemikálií k rozpuštění a odstranění usazenin. Chemické čištění se obvykle provádí cirkulací daného roztoku zařízením. Chemické čištění má oproti mechanickému čištění několik výhod. Jedná se o levnější řešení čištění a údržby povrchu, není nutné demontovat zařízení, odstranění usazenin je rovnoměrnější (roztoky se snadno dostanou do nepřístupných míst). Chemické čištění se využívá k odstranění organických a anorganických usazenin a v případě potřeby také k pasivaci.

Je třeba vzít v úvahu, že po odstranění usazenin čistý kovový povrch zařízení bude vystaven kyselým, či alkalickým čistícím roztokům. Existují ale i čistící roztoky na neutrální bázi. Proto by měla být definována náchylnost ke korozi daného materiálu zařízení a odhadnuty možné ztráty materiálu způsobené korozí. Kyselé roztoky by měly být používány spolu s inhibitory koroze. Tyto kyselé roztoky však nerozpouští usazeniny, jsou-li v usazeninách přítomny organické látky. Prvním krokem by proto mělo být moření v alkalickém roztoku, které se provádí pomocí alkálií s detergenty k odstranění usazenin obsahující organické látky. Obecně platí, že postup chemického čištění se skládá z pěti fází,

přičemž každá fáze je sledována z hlediska kvality povrchu před pokračováním k další fázi. Avšak ne vždy je potřeba aplikace všech pěti fází a některé fáze mohou být tak vynechány.

Postup chemického čištění energetických zařízení se skládá z následujících operací:

- a) **Moření v alkáliích** (odmašťování) – cílem je odstranit organické usazeniny a zefektivnit následující čištění kyselinou, či jiným čistícím přípravkem.
- b) **Oplachování** – cílem je odstranit fyzicky změkčený materiál znečištění vytvořený během odmašťování.
- c) **Moření v kyselinách** – cílem je odstranit anorganickou část usazenin jako jsou soli, hydroxidy a oxidy.
- d) **Neutralizace a oplachování** – cílem je neutralizovat a odstranit zbytkovou kyselinu po moření, rozpuštěné anorganické sloučeniny a kal vznikající při moření.
- e) **Pasivace** – cílem je vytvořit ochranou protikorozní pasivní vrstvu na povrchu kovových zařízení. [2]

3.1.1 VOLBA CHEMICKÉHO ČIŠTĚNÍ

Volba čistícího prostředku má zásadní vliv na ekonomiku čištění. Výběr použitých chemikálií k čištění dále závisí nejen na typu usazenin, ale také na materiálu čištěného zařízení a také na podmínkách čištění. V mnoha případech chemické čištění energetických zařízení, jako jsou výměníky tepla, chladicí okruhy aj., zahrnuje použití kyselin, či podobných čistících roztoků na této bázi. Někdy při použití nevhodných a agresivních čistících roztoků může dojít k nevyhnutelné a nepatrné ztrátě materiálu, ale přidání korozních inhibitorů značně sníží korozi. Inhibitory koroze jsou vhodné pouze pro konkrétní kovy a za určitých podmínek. Taktéž je třeba vzít v úvahu nebezpečí použití některých chemikálií a jejich problémy s následnou likvidací. Následující tabulka 1 uvádí seznam běžných usazenin a nánosů v průmyslu i některých odpovídajících prostředků, které lze použít k jejich čištění. [23, 28]

Tabulka 1 – Volba chemického čištění v závislosti na typu usazenin [21, 23, 28]

Usazeniny	Chemické čištění	Nevhodné materiály
Oxidy železa	5–15 % HCl	Korozivzdorné oceli, Incoloy 800
	2 % glykolové / 1 % mravenčí	Lehké kovy
	Sodné soli HEDTA/EDTA	Lehké kovy
	Kyselina citrónová	Lehké kovy
Oxidy mědi	HCl + thiomčovina	Slitiny mědi, korozivzdorné oceli
	Soli EDTA a oxidační činidla	Slitiny mědi
Vodní kámen, uhličitany, zejména CaCO₃	5–15 % HCl	Korozivzdorné oceli, Incoloy 800
	7–20 % H ₃ NSO ₃	Lehké kovy
	5–10 % kyselina mravenčí	Lehké kovy
	Soli EDTA	Lehké kovy
Fosfáty, zejména CaPO₄	5–15 % HCl	Korozivzdorné oceli, Incoloy 800
	Sodné soli EDTA	Lehké kovy
	7–20 % H ₃ NSO ₃	Lehké kovy
Sulfáty, zejména CaSO₄	1 % NaOH poté 5–15 % HCl	Korozivzdorné oceli, lehké kovy
	Soli EDTA a směsi organických kyselin	Lehké kovy
Křemičitany	HCl + bifluorid amonný / HF	Korozivzdorné oceli, slitiny titanu, Lehké kovy, Incoloy 800
Sulfidy železa	5–10 % HCl + aldehydy	Korozivzdorné oceli, Incoloy 800
	5–10 % H ₂ SO ₄ + aldehydy	Martenzitické oceli, lehké kovy
Uhlíkaté nánosy, organické zbytky	3 % NaOH + 2 % KMnO ₄ poté moření v kyselině	Lehké kovy
Těžké uhlovodíky, dehet a asfalteny	Alkalické čisticí prostředky, rozpouštěcí emulze	Lehké kovy (v případě silných alkálií)
Lehké uhlovodíky, paliva, oleje, tuky	Detergenty s alkalickými přísadami v závislosti na složení nánosů	Lehké kovy (v případě silných alkálií)

3.1.2 MOŘENÍ V ALKÁLÍCH

Alkalické čištění neboli odmašťování odstraňuje pouze organické části v usazeninách. Nejjednodušším způsobem odmašťování je odmašťování v organických rozpouštědlech jako jsou nafta, petrolej, organická rozpouštědla na bázi aromatických látek aj. Jedná se o rozpuštění mastnot pouhým molekulárním pochodem. Organické usazeniny jsou ve většině případů složeny z degradovaných organických sloučenin, polymerovaných látek, koxu, asfaltů a dehtů. Jedna část organických usazenin je rozpuštěna v polárním rozpouštědle a druhá část v nepolárním rozpouštědle.

Na zařízení se systémy chladící vody, jako jsou tepelné výměníky, potrubí, kotle, kompresory aj., je třeba aplikovat odmašťování vodnými alkalickými roztoky, které spočívá v emulgaci a dispergaci nečistot. Toto alkalické čištění značně zvýší účinnost následujícího čištění povrchu mořením. Vodné alkalické roztoky jsou podobné pro většinu čištěných materiálů (s výjimkou hliníkových materiálů). Roztoky obsahují obvykle kombinaci látek jako jsou uhličitán sodný Na_2CO_3 , fosforečnan sodný Na_3PO_4 , křemičitan sodný Na_2SiO_3 a čistící přípravek s nízkou pěnivostí. Někdy se do roztoků také přidává manganistan draselný KMnO_4 (hypermangan). Tyto složky jsou přidány v hmotnostních koncentracích 1,8 – 2,2 % do čisté vody. Roztok je pak cirkulován v zařízení při 20–95 °C po dobu 6–24 hodin a často také pod tlakem. Příliš se nedoporučuje používat hydroxid sodný NaOH a žíraviny kvůli možnému koroznímu praskání a křehnutí uhlíkových ocelí, avšak přidáním vhodného množství dusičnanu sodného NaNO_3 , jakožto inhibitoru, lze zabránit koroznímu praskání a křehnutí ocelí. V průběhu čištění je u některých zařízení důležité v pravidelných intervalech měřit zvýšenou koncentraci oleje v roztoku. Když tato koncentrace dosáhne maxima, tj. hodnota se více už nenavýšuje, znamená to, že veškerý olej je odstraněn z vnitřního povrchu zařízení. Po alkalickém čištění by mělo být zařízení opláchnuto, aby se odstranil alkalický roztok obsahující rozpuštěné organické složky (zejména olej, tuk, mastnota a další). [2, 20, 21, 22]

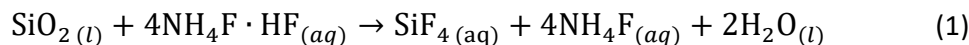
3.1.3 MOŘENÍ V KYSELINÁCH

Moření slouží k odstranění anorganických usazenin jako jsou různé soli a korozní produkty. K moření se používají minerální nebo organické kyseliny. Minerální kyseliny (např. chlorovodíková) jsou silnými rozpouštědly anorganických usazenin. Organické kyseliny (např. citronová) jsou mnohem slabší, často se používají v kombinaci s jinými

chemickými látkami. Výhodou organických kyselin je, že se mohou likvidovat spalováním. Chemické čištění mořením probíhá cirkulací kyseliny v zařízení i při vyšších teplotách po dobu několika hodin a používá se pro zařízení jako jsou tepelné výměníky, potrubí chladících systémů nebo kotlů. [2, 20, 21, 23]

Kyselina chlorovodíková HCl je nejméně nákladnou a nejpoužívanější kyselinou k rozpuštění usazenin a rzi. Běžně se používá v koncentraci 5–15 % při teplotách 50–80 °C. Kyselina se doplňuje, pokud koncentrace klesne pod 4 %. Kyselinu chlorovodíkovou je však potřeba použít s inhibitory k minimalizaci koroze. Jako inhibitory koroze se používají aminy v množství 0,2 hm. %. Kyselina chlorovodíková s inhibitory koroze se obvykle používá k čištění potrubí z uhlíkových a legovaných ocelí, litiny, mosazi, bronzu a slitin mědi. I když kyselina chlorovodíková je inhibována, nedoporučuje se k čištění korozivzdorných ocelí, materiálů Incoloy 800 a Inconel 600, hliníku nebo pozinkované oceli.

Pokud v usazeninách je přítomen křemík nebo křemičitany, je třeba použít k rozpuštění těchto usazenin kyselinu chlorovodíkovou s 1 hm. % bifluoridem amonným (NH_4HF_2 nebo $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$), což uvolní do HCl kyselinu fluorovodíkovou HF. Pak rozpuštění usazenin probíhá podle rovnice:

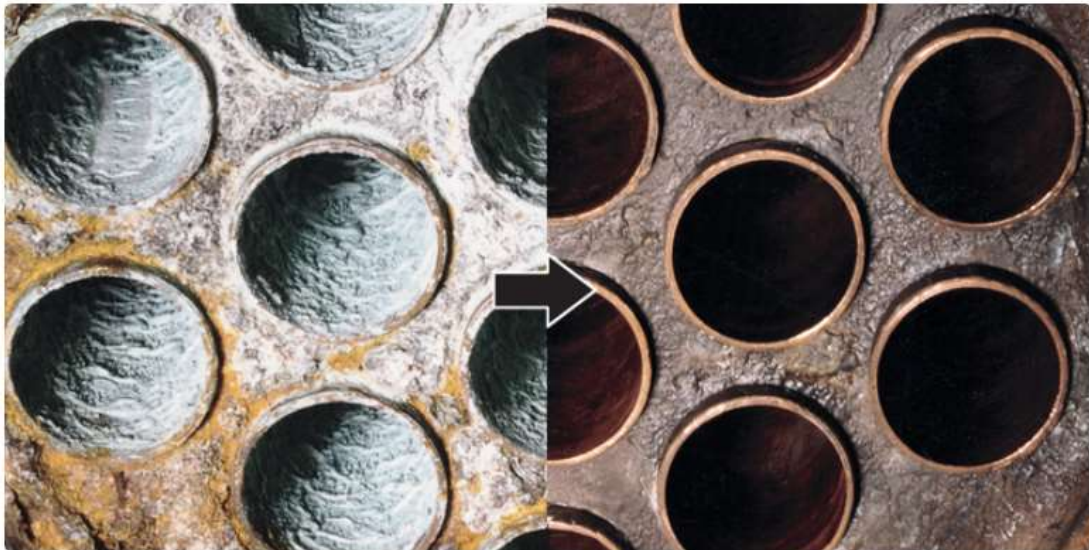


Při moření kyselinou s bifluoridem amonným je třeba brát v potaz na jaký materiál zařízení je roztok aplikován. Kompatibilita materiálů je podobná jako u kyseliny chlorovodíkové, avšak slitiny titanu by nikdy neměly být vystaveny takovému roztoku. Bifluorid amonný v kombinaci s kyselinou HCl příliš dobře rozpouští titan. Je třeba si uvědomit, že bifluorid amonný patří mezi nejnebezpečnější sloučeniny ve srovnání s jinými sloučeninami používanými pro čištění a je třeba provést příslušná opatření.

Kyselinu fluorovodíkovou v koncentraci 1–2 % při teplotách až 80 °C lze použít jako předoperační čištění k odstranění usazenin. Často se taky používá v kombinaci s kyselinou dusičnou HNO_3 k čištění korozivzdorných ocelí a pasivaci.

Kyselina dusičná HNO_3 se primárně používá k čištění korozivzdorných ocelí. Jedná se o extrémně silný oxidant a obecné použití této kyseliny je dosti omezené jednak kvůli korozi, a tak i z hlediska bezpečnosti. Běžné konvenční inhibitory, detergenty a další přísady nejsou v kyselině dusičné stabilní. Kyselina dusičná by se neměla používat k čištění

uhlíkových ocelí, slitin mědi a mnoho jiných kovů. Pro kyselinu dusičnou byly vyvinuty speciální inhibitory koroze.



Obrázek 6 – Ukázka chemického čištění před a po [24]

Kyselina sírová H_2SO_4 se využívá k odstranění nánosů koroze a vodního kamene v koncentracích 5–10 % při teplotách až 82 °C. Přesto že kyselina sírová je relativně levná a dostupná, má několik nevýhod. Je třeba extrémně zvýšené opatrnosti při manipulaci s kyselinou. Při použití kyseliny sírové dochází k precipitaci síranu vápenatého $CaSO_4$ a dalších depositů obsahující vápenaté soli. Kyselinu s přidanými inhibitory koroze lze použít k čištění uhlíkových ocelí, austenitických korozivzdorných ocelí, slitin mědi a niklu.

Kyselina sulfamová H_2SO_3 se používá v koncentracích 7–20 % při teplotách do 65 °C k odstranění vápenatých nánosů a železných oxidů, avšak její použití na odstranění železných oxidů není až tak efektivní jako v případě čištění kyselinou chlorovodíkovou. Pokud se kyselina sulfamová zahřeje nad 75 °C, kyselina se začíná rozkládat na hydrogensíran amonný NH_4HSO_4 , čímž se výrazně snižuje účinnost odstranění vápenatých usazenin a zvyšuje se náchylnost ke korozi materiálů zařízení. Bifluorid amonný se běžně přidává ke kyselině sulfamové v množství 0,25–1 hm. % jako urychlovač pro rozpuštění rzi. Jedná se o relativně drahou kyselinu, avšak kyselina sulfamová je bezpečná k manipulaci a snadná na přípravu. Kyselina sulfamová s inhibitory koroze je vhodná pro čištění uhlíkových ocelí, mědi, mosazi a litiny. Bez bifluoridu amonného je nejvíce účinnou na čištění korozivzdorných ocelí.

Kyselina fosforečná H_3PO_4 se občas používá v koncentraci 2 % při teplotě 50 °C po dobu 4–6 hodin k moření a pasivaci ocelových potrubí. Je méně agresivní než kyselina

sírová, ale více agresivní než kyselina sulfamová. Při odstraňování rzi není až tak účinná jako kyselina chlorovodíková, ale osvědčila se pro čištění korozivzdorných materiálů. Dříve se kyselina fosforečná používala k odstranění okují z nových kotlů, a proto že pomáhala pasivovat povrch materiálu. Obecné použití kyseliny fosforečné je omezeno vyššími náklady a špatnou rozpustností fosforečnanu vápenatého při nízkých hodnotách pH.

Kyselina mravenčí se obecně používá ve směsích s jinými kyselinami (např. kyselina citrónová) protože sama o sobě špatně rozpouští oxidy železa. Běžně se přidávají kyselina erythorbová nebo bifluorid amonný do roztoku kyseliny mravenčí jako urychlovače pro lepší rozpuštění právě oxidů železa. Kyselinu mravenčí lze použít na nerezové oceli, jedná se o relativně levnou kyselinu, kterou je možné likvidovat spalováním.

Kyselina glykolová se často používá v kombinaci s kyselinou mravenčí ve složení 1 % kyseliny mravenčí a 2 % kyseliny glykolové při teplotách 80–96 °C k odstranění oxidů železa a vápenatých usazenin. Přidáním bifluoridu amonného pak lze odstranit i usazeniny obsahující křemík. Do takového roztoku je třeba přidat inhibitory v případě použití na uhlíkové oceli. Kombinace kyseliny mravenčí a kyseliny glykolové má uplatnění při čištění nedemontovatelných částí reaktoru a kotlů z důvodu, že lze kyselinu rozložit na neškodné vedlejší produkty zahřátím na teplotu 150–175 °C. Primárním použitím je pro čištění kotlů od magnetitu Fe_3O_4 a v předehřívacích sekcích. Kombinaci těchto kyselin lze použít také pro čištění korozivzdorných ocelí.

Kyselina citrónová při koncentraci 3 % a teplotě 65 °C se používá k čištění usazenin obsahující železné oxidy. Amonná kyselina citrónová je účinná při odstraňování usazenin oxidů železe při pH 3,5. Navýšením hodnoty pH na 9 a přidáním oxidačního činidla, jako je dusitan sodný NaNO_2 , lze také odstranit měď. Avšak kde je amoniak, tam je problém s likvidací. Citran sodný při odstraňování nánosů rzi se svou účinností vyrovná citranu amonnému a také je schopen pasivovat čištěný materiál. Citran sodný ale není příliš účinný k odstranění mědi a je nutno dávat pozor na srážení solí železa. Kyselina citrónová se také používá ve zředěném roztoku k zachycení zbytkových oxidů železa při čištění kotlů kyselinou chlorovodíkovou pro snazší pasivaci materiálu zařízení. [2, 21, 23]

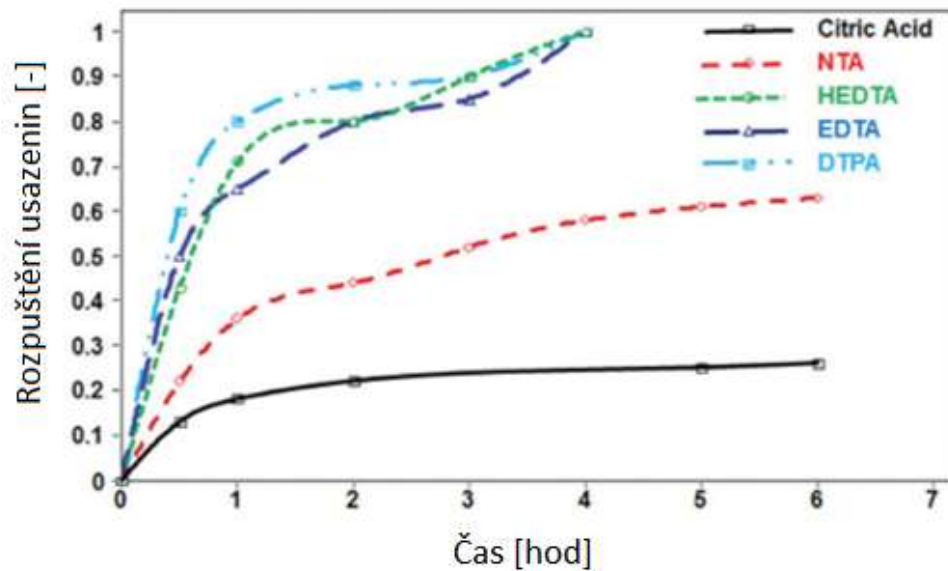
3.1.4 PASIVACE

Po moření a následné neutralizaci oplachem je povrch čistého kovu v aktivním stavu. Pokud by se povrch materiálu zařízení nechal tak a byl by vystaven okolní atmosféře, nebo by se zařízení uvedlo rovnou do provozu, povrch materiálu by začal nekontrolovaně oxidovat. Aby se tomuto ději zabránilo, je třeba povrch pasivovat. Pasivace je proces vytvoření pasivní ochranné protikorozní vrstvy na povrchu materiálu zařízení. Termín pasivace se také používá pro vytváření pasivní vrstvy oxidu Cr_2O_3 na zařízení z korozivzdorné oceli. K pasivaci korozivzdorných austenitických ocelí se používá 20–25% roztok kyseliny HNO_3 a 2% kyseliny HF při $50\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 6 hodin. Pasivační roztok pro uhlíkovou ocel je alkalický (NH_4OH , $\text{pH} = 9,5$) a obsahuje oxidační činidlo H_2O_2 . V případě že zařízení se nebude po čištění ihned používat, měl by být vnitřní prostor naplněn inertním plynem (obvykle dusíkem) a ponechat tak až do spuštění. Pasivační postupy a řešení se budou trochu lišit pro jednotlivé typy zařízení. [2, 21, 23]

3.1.5 CHELATAČNÍ ČINIDLA

Alternativními prostředky k čištění a rozpuštění usazenin jsou vodné roztoky s obsahem chelatačních činidel v rozmezí hodnot pH 2–12. Chelatační činidla jsou chemické látky, které jsou schopna tvořit rovnovážné komplexní sloučeniny s ionty kovů jako jsou železo či měď. Avšak při různých hodnotách pH mohou vázat i jiné ionty kovů. Chelatační činidla jsou charakteristická tvorbou více než jedné vazby mezi kovem a molekulou komplexotvorného činidla, což vede k vytvoření kruhové struktury zahrnující iont kovu. [21, 25, 26]

Mezi nejběžnější skupinu chelatačních činidel patří aminopolykarboxylové kyseliny PAPCA. Do této skupiny patří chemické látky jako jsou NTA, EDTA, HEDTA a DTPA. Nejpoužívanější chemickou látkou z této skupiny je EDTA. Jedná se o velmi univerzální chemickou látku tvořící komplexy kovových iontů. Chelatační činidla je třeba upravit pomocí kyselin nebo zásad v závislosti na typu chelatačního činidla a složkách nánosů, které mají být odstraněny. Chemické čistící rozpouštědla byla vytvořena s hodnotami pH 4,5–9,2 a lze s nimi odstraňovat usazeniny obsahující železo a měď (ale při správném pH také soli vápníku, niklu či chromu).



Obrázek 7 – Rozpuštění oxidů železa v amonných chelátech při pH 9,2 při teplotě 160 °C [25]

Amonné soli PAPCA zejména tedy EDTA spolehlivě rozpouští oxidy železa z povrchu zařízení z materiálu oceli při hodnotě pH 9 a při teplotě 150 °C a zanechává ocel v pasivovaném stavu. Jedná se o nejběžnější čistící přípravek kotlů ze skupiny roztoků s chelatačním činidlem. Při procesu čištění však nedochází v první fázi k odstranění nánosů obsahující měď. Roztok je potřeba poté oxidovat oxidačním činidlem jako je vzduch, dusitan sodný, peroxid vodíku nebo kyslík. Poté při snížené teplotě 65–82 °C dochází k odstranění usazenin obsahující měď. Chelatační činidlo EDTA, v kombinaci s chemickými látkami jako jsou amoniak a hydrazin N_2H_4 obsahující inhibitor koroze při hodnotě pH 7 a teplotě 93 °C, se jeví jako mnohem účinnější než jiná rozpouštědla jako kyselina citrónová v kombinaci s mravenčí, či EDTA v kombinaci s kyselinou citrónovou.

Pasivace povrchu zařízení při čištění rozpouštědly s chelatačním činidlem EDTA je nejsnazší při určitých podmínkách. Mezi tyto podmínky patří vysoký průtok čistícího roztoku, vysoká koncentrace železa navázaného na cheláty a nižší teploty při čištění. Vysoké koncentrace volného chelátu zpomalují pasivaci. Doporučuje se použít silná oxidační činidla, jako jsou vzduch s $NaNO_2$ nebo H_2O_2 .

Mezi hlavní výhody použití chelatačního činidla EDTA patří:

- Roztoky s EDTA jsou většinou neutrální nebo mírně zásadité, nedochází ke korozi.
- EDTA je účinné chelatační činidlo, které ve dvou fázích odstraňuje usazeniny s obsahem železa i mědi.

- Nánosy jsou téměř zcela rozpuštěny, což minimalizuje následné ruční čištění. Během oplachu nedochází k precipitaci. Postačuje jediný oplach.
- Cirkulace čistícího roztoku se dosahuje za provozu zařízení, není tedy potřeba externího čerpadla.
- Není nutná aplikace pasivačního roztoku po čištění.
- S roztoky EDTA je manipulace mnohem bezpečnější než s kyselinami.

Amonné soli HEDTA při vysokém pH mají přibližně podobnou účinnost jako EDTA. Kyseliny HEDTA mají však mnohem vyšší rozpustnost ve vodě než EDTA. Chelatační činidla HEDTA v kombinaci s kyselinou mravenčí, nebo kyselinou sírovou, odstraňují oxidy železa z trubek kotlů mnohem rychleji než jiná kyselá rozpouštědla. Zvýšená rychlost je pravděpodobně zapříčiněna nízkými hodnotami pH (obvykle pH 1,2–2,3) a silnými chelátovými vazbami s železem i při nízkém pH. Rozpouštědla na bázi sodné soli HEDTA v kombinaci s HCl při pH 2 lze také použít pro čištění, avšak hlavní využití mají v ropném a plynárenském průmyslu. [25, 26]

Roztoky obsahující chelatační činidla DTPA je možné taktéž použít k chemickému čištění, ale jedná se o nákladnou chemikálii pro většinu použití. V běžných aplikacích se nevyužívá. [25]

3.1.6 INHIBITORY KOROZE

Inhibitory koroze jsou chemické sloučeniny schopné inhibovat oxidační proces kovu ve vodném prostředí a následně tak bránit vzniku koroze. Inhibitory by měly být přidávány v malém množství bez účinků na povrch materiálu zařízení. Dle řady různých výzkumných studií inhibitory koroze zahrnují organické, anorganické či povrchově aktivní látky. [27]

Bez použití inhibitorů koroze by se neměla provádět většina operací chemického čištění energetických zařízení pro odstranění usazenin z povrchu zařízení. Inhibitory koroze se přidávají do chemických čistících prostředků, aby umožnily účinné čištění, aniž by vznikala koroze na povrchu materiálu zařízení. Většina běžných inhibitorů koroze fungují třemi způsoby:

- Katodické inhibitory zpomalují katodickou část reakce vzniku koroze (2)



- Anodické inhibitory omezují anodickou část reakce (3)



- Adsorpce inhibitorů tvoří fyzickou bariéru na povrchu kovu a brání tak korozi

Inhibitory koroze musí být schopné dispergovat nebo rozpouštět se v chemickém čisticím prostředku, a to ať už v čistém nebo v znečištěném. Musí být také kompatibilní s konstrukčními materiály zařízení. Například pro korozivzdorné oceli by se měly používat inhibitory koroze s nízkým obsahem chloridů. Koncentrace použitého inhibitoru souvisí s typem rozpouštědla usazenin, s konstrukčními materiály zařízení, poměrem plochy čištěného povrchu k objemu zařízení a s prouděním média. [21, 25]

Složení inhibitorů koroze obvykle zahrnuje aktivní složku, pomocné látky (soli) inhibitoru, povrchově aktivní látku (která podporuje disperzi v médiu) a rozpouštědlo. S enviromentálními omezeními a konkurenceschopnými náklady čelí výrobci inhibitorů koroze mnoha výzvám. Mezi důležité aspekty patří koeficient rozložení a biologická rozložitelnost aktivní složky. Proto v poslední době je použití vysoce bezpečných chemických sloučenin inhibitorů koroze hlavním cílem v různých průmyslových aplikacích. [27, 28]

Iontové kapaliny jsou považovány za slibné sloučeniny pro řízení koroze kovů v mnoha různých průmyslových aplikacích. Obecně platí, že iontové roztoky jsou soli ve formě kapaliny a jejich teplota tání je menší než 100 °C. Skládají se ze dvou částí, a to organických kationtů a různých variant aniontů. Iontové kapaliny jsou klasifikovány jako „zelené“ chemické sloučeniny, jsou tedy ekologicky šetrné. Vyznačují se nízkým tlakem par, nízkou hořlavostí, nízkou toxicitou a vysokou chemickou stabilitou. Náklady iontových kapalin se za poslední roky značně snižují s rostoucí poptávkou.

Účinnost iontových kapalin závisí na výběru kationtů a aniontů. Podle této skutečnosti je návrh chemické struktury důležitým krokem k zavedení vysoce účinných inhibitorů koroze v průmyslových aplikacích.

V posledních době se iontové kapaliny stávají novým trendem v odvětví korozních inhibitorů používaných k ochraně kovových povrchů před korozi při procesech moření a čištění povrchů od usazenin. K tomuto účelu byla vyvinuta nová iontová kapalina [BTBA]⁺ [AlCl₄]⁻. Tato iontová kapalina v roztoku kyseliny dosahuje vynikajících antikorozních vlastností při nízké koncentraci. V tomto případě je náboj povrchu kovového materiálu kladný, což umožňuje přitahovat ionty Cl⁻ a aniontové části [AlCl₄]⁻. Při studii

iontových kapalin na bázi alkyl-imidazolia bylo zjištěno, že se zvyšující se koncentrací iontové kapaliny v kyselém čistícím roztoku se antikorozi vlastnosti zvyšují. Nejvyšší protikorozi vlastnosti vykazovala iontová kapalina s aniontovou částí ethylsulfát. [27]

3.1.7 PREVENCE PROTI ZANÁŠENÍ

Usazování nečistot a další růst lze efektivně ovlivnit inhibitory zanášení. Inhibitory zanášení jsou navrženy tak, aby bránili znečištění povrchu zařízení, ale nejsou však určeny k čištění stávajících usazenin. Proto také by měly být tyto inhibitory přidávány do procesního média ihned po vyčištění zařízení. Inhibitory zanášení se přidávají do recirkulující chladicí vody nebo se používají v kotlové vodě k řízení úrovně nasycení uhličitánem vápenatým CaCO_3 .

Inhibitory zanášení se ve vodných systémech používají již řadu let. Dříve se používaly hlavně přirozeně se vyskytující polymery a jiné sloučeniny jako např. anorganické polyfosfáty. Polyfosfátové sloučeniny regulují řadu problémů v průmyslových vodných systémech včetně koroze, stabilizace kovů a inhibice nánosů. Avšak jejich použití je omezeno kvůli špatné tepelné stabilitě. Jako inhibitory zanášení lze použít i již dříve zmíněná chelatační činidla (např. EDTA), která se silně komplexují s kationty usazenin, a tak brání jejich usazování na povrchu zařízení. V dnešní době produkty inhibitorů zanášení jsou založeny zejména na fosfonátech a nízkomolekulárních polymerech. [23, 29]

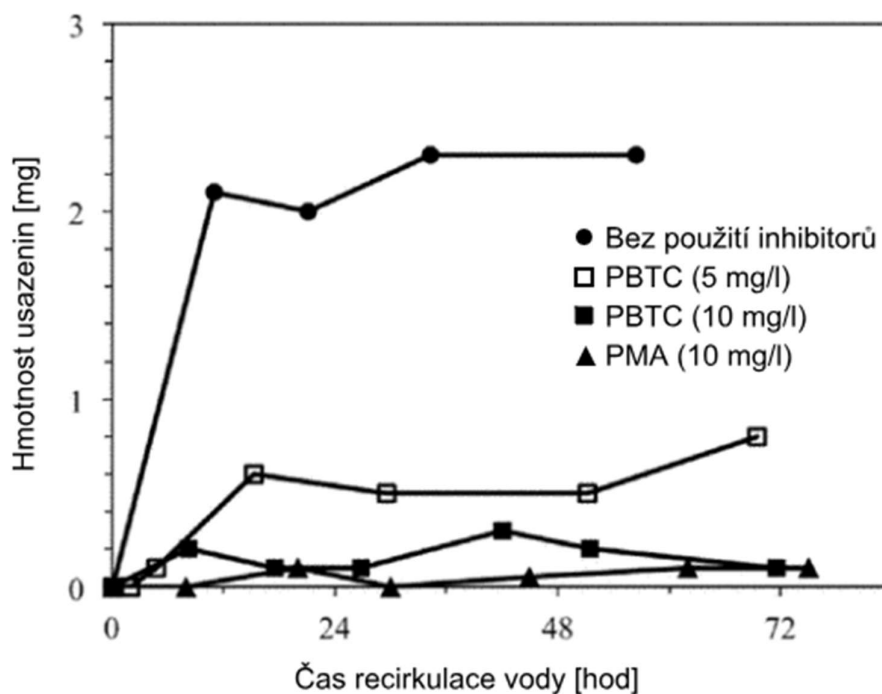
Fosfonáty jsou charakterizovány fosfonovou skupinou ($-\text{PO}_3\text{H}_2$) navázanou na atom uhlíku. Fosfonáty se vyznačují vynikající stabilitou při extrémních hodnotách pH a při vysokých teplotách. Mezi hlavní fosfonáty patří sloučeniny jako ATMP nebo HEDP. Tyto sloučeniny jsou velice účinné k inhibici nánosů CaCO_3 . Jejich tepelná stabilita se pohybuje mezi teplotami 130–170 °C v závislosti na molekulární struktuře a pH roztoku. [29]

Fosfonát PBTC je velmi účinným inhibitorem zanášení používaný v různých průmyslových aplikacích, zejména v systémech chladicí vody, úprava průmyslové vody, nebo jako příměs v průmyslových čistících prostředcích. Při své vysoké účinnosti se jedná o poměrně levný inhibitor zanášení ve srovnání se standardními fosfonáty jako jsou HEDP nebo ATMP. [30]

Polymerními inhibitory zanášení jsou primárně polykarboxylové kyseliny charakteristické skupinou $-\text{COOH}$ na uhlíkovém řetězci. Polymery mají vyšší tepelnou

stabilitu než fosfonáty, limitní teploty při jejich aplikacích jsou v rozmezí 170–200 °C. Běžnými polymery pro řízení vzniku nánosů jsou polyakryláty (PAA), kyselina polymetakrylová (PMAA) a kyselina polymaleinová (PMA). [29]

V mnoha případových studiích se zkoumal vliv inhibitorů zanášení na vznik usazenin. Studie se zabývaly vznikem usazenin v chladicím systému chladicích věží tepelné elektrárny. Pro tyto účely se asi v polovině případů používá upravená odpadní komunální voda. Při typických vlastnostech recirkulačního chladicího systému v chladicích věžích, jako jsou zvýšená teplota, či odpařování vody vedoucí k vyšší koncentraci minerálů během průtoku vody, byl vznik nánosů a usazenin hlavním problémem použití komunální odpadní vody. Studie potvrdily vysokou účinnost inhibitorů zanášení v prevenci proti vzniku nánosů a některé studie také potvrdily, že inhibitory zanášení fungují také jako inhibitory koroze. V případové studii bylo zjištěno, že bez použití inhibitorů zanášení se vzorek zanesl v průměru více než 2 mg usazenin, dále bylo zjištěno, že fosfonát PBTC při množství 10 mg/l potlačil vznik nánosů na 0,2 mg usazenin, což bylo účinnější než při množství 5 mg/l. PMA při množství 10 mg/l téměř úplně inhibovala vznik usazenin, což prokázalo vynikající účinek proti vzniku usazenin v upravené komunální odpadní vodě. [8]



Obrázek 8 – Vznik usazenin v komunální odpadní vodě v závislosti na čase při teplotě 40 °C [8]

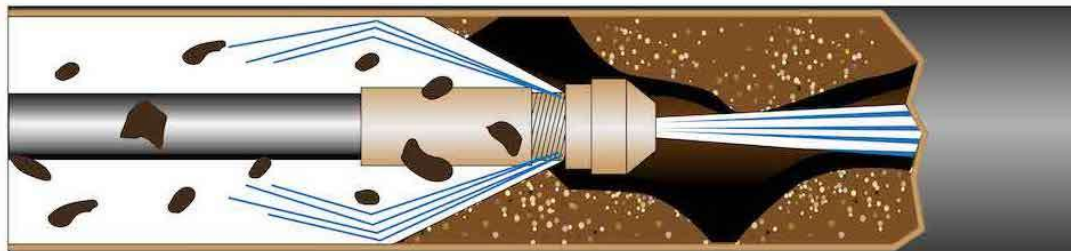
3.2 MECHANICKÉ ČIŠTĚNÍ A ÚDRŽBA POVRCHŮ

Mechanické čištění zahrnuje zejména hydraulické a abrazivní metody čištění. Hydraulické čištění se provádí při tlacích 2–220 MPa a zahrnuje čištění vysokotlakým vodním paprskem, čištění párou a ultrazvukové čištění. Abrazivní metody zahrnují tryskání, čištění projektily, vrtání aj. Abrazivní čištění má využití zejména tam, kde hydraulické metody nemusí být praktické.

Při mechanickém čištění je potřeba zastavit zařízení a v mnoha případech i zařízení kompletně rozebrat. Dále je potřeba zařízení přepravit na místo určené k čištění a po vyčištění a opětovné montáži je potřeba provést zkoušku těsnosti. Mechanické čištění může trvat až několik dnů v závislosti na velikosti a hmotnosti zařízení. Čištění mechanickými způsoby nemusí být úplně bezpečné jak pro lidi, tak pro životní prostředí. Například při čištění zařízení vysokotlakým vodním paprskem dochází ke znečištění organickými a anorganickými mlhami. Také se jedná o poměrně nákladné čištění zejména taky kvůli delší odstávce zařízení. [2]

3.2.1 ČIŠTĚNÍ VYSOKOTLAKÝM PROUDEM VODY

Vysokotlaké čištění vodním paprskem je jednou z nejběžnějších mechanických metod čištění povrchu zařízení. Usazeniny a nánosy na povrchu zařízení jsou odstraněny vysokotlakým proudem vody. Proces vysokotlakého čištění vyžaduje vysokotlakou čerpací jednotku pro poskytnutí dostatečného průtoku vody, který odstraní konkrétní typ usazenin. Rozhodující vliv na čištění touto metodou má konstrukce trysky, jejichž účelem je zvýšit kinetickou energii proudícího média na úkor tlaku a vnitřní energie. V některých případech lze ke zvýšení účinnosti čištění vodním paprskem přidat do vody částice šetrné k životnímu prostředí jako například hydrogenuhličitan sodný. Z důvodů použití vysokých tlaků, je třeba dbát zvýšené bezpečnosti. [21, 25]



Obrázek 9 – Metoda vysokotlakého čištění vodním paprskem [31]

3.2.2 ČIŠTĚNÍ ULTRAZVUKEM

Ultrazvukové procesy lze použít pro čištění zařízení jako jsou tepelné výměníky. Ultrazvuk dodává mechanickou energii k čištění zařízení ponořeného v lázni a tyto ultrazvukové vlny tak pomáhají odstraňovat usazeniny z povrchu zařízení. Šířící se ultrazvukové vlny zařízením, které je naplněno kapalným médiem, se lámou a když dojde k překročení prahové hodnoty akustického tlaku, dochází ke kavitaci. Na rozhraní fází média a povrchu zařízení začíná vznikat mnoho nízkotlakých bublin. Poté co dojde k implozi těchto bublin, nastane uvolnění velkého množství energie. Lokální tlakové vlny dosahují hodnot až 100 MPa a odstraní tak nánosy na povrchu zařízení a brání tak dalšímu usazení. Tato metoda má větší uplatnění v případě prevence zanášení než samotné odstranění usazených nečistot. [25, 32, 33]



Obrázek 10 – Čištění tepelného výměníku ultrazvukem v lázni [34]

3.2.3 ČIŠTĚNÍ TRYSKÁNÍM

Tryskání je mechanickou metodou čištění povrchu zařízení využívající pro tyto účely čištění lehká abraziva v proudu stlačeného vzduchu pomocí tryskacích zařízení. Abraziva jsou unášena vysokou rychlostí, narážejí na povrch zařízení a zbavují jej tak usazených nečistot, až dokud nevznikne pevný a čistý povrch. Pomocí trysek je proud abraziva usměrňován pod vhodnými úhly. V procesu tryskání se používají různá abraziva. Častým abrazivem je korund Al_2O_3 . Trend směřuje k aplikaci jemnějších abraziv kvůli zvýšení rychlosti čištění u méně zanesených povrchů, hrubší zrna jsou pak lepší pro těžce zanesené povrchy. Je důležité během procesu tryskání udržovat správnou velikost zrn abraziva. [21, 36]

3.2.4 ČIŠTĚNÍ PROJEKTILY

Pomocí stlačeného vzduchu nebo vody lze trubkami tepelného výměníku vstřelit projektily, které následně čistí vnitřní povrch zařízení. Proces spočívá zejména ve správné volbě konkrétních projektilů. Vhodných projektilů pro čištění vnitřního povrchu touto metodou je mnoho, výběr však závisí na typu usazenin a povaze znečištění zařízení. Projektily mohou být zhotoveny z různých materiálů dle použití a to: plastové, kovové, nylonové. [23, 36]



Obrázek 11 – Tlaková pistole a projektily pro projektilové čištění [36]

3.2.5 ČIŠTĚNÍ VRTÁNÍM S PROPLACHEM

Čištění metodou HydroDrill funguje na principu vyvrtávání vnitřních povrchů tepelných výměníků a současným proplachem pro odvedení vyvrtaných nánosů. Dle literatury se jedná se o nejúčinnější a nejrychlejší metodu k odstranění těžkých, tvrdých nánosů a zcela zacpaných trubek. Čištění je omezeno průměrem trubek zařízení a jejich délkou. [36, 37]



Obrázek 12 – Metoda HydroDrill [37]

3.2.6 ČIŠTĚNÍ KARTÁČOVÁNÍM S PROPLACHEM

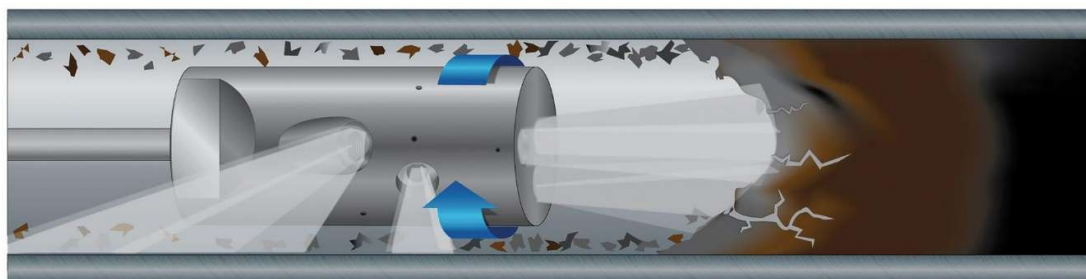
Systém Excaliber je zařízení pro čištění vnitřních povrchů trubek speciálním rotačním kartáčem na ohebném hřídeli se současným proplachem vodou. Díky široké škále kartáčů je čištění vhodné pro měkké i tvrdé usazeniny. Jedná se o univerzální systém čištění trubek tepelných výměníků a kondenzátorů. Použití toho zařízení je velmi snadné. [38]



Obrázek 13 – Čistící zařízení Excaliber [38]

3.2.7 ČIŠTĚNÍ DUSÍKEM

Čištění kapalným dusíkem je rychlé a velmi efektivní řešení pro čištění vnitřních, ale i vnějších povrchů zařízení, touto metodou lze odstranit i nejodolnější usazeniny. Technologie NitroLance využívá při čištění dusíkem tři základní mechanismy k odstranění usazenin u povrchu zařízení a to: mechanický tlak, podchlazení a tepelnou/objemovou roztažnost. [36]



Obrázek 14 – Tryska pro čištění kapalným dusíkem technologií NitroLance [36]

4. PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem diplomové práce bylo shromáždit informace o metodách čištění a údržby povrchů v energetice zejména zařízeních, jakou jsou chladiče, tepelné výměníky, kotle apod. Tato zařízení je komplikované čistit z důvodu uzavřených těžko přístupných vnitřních povrchů, proto je vhodné volit chemické metody čištění. Hlavním cílem diplomové práce bylo navrhnout metodu čištění a následně tuto metodu také realizovat na vybraném zařízení.

4.1 POPIS EXPERIMENTU

V rámci experimentu byla navržena metoda čištění, která byla realizována na trubkovém svazkovém výměníku. Bylo zvoleno chemické čištění cirkulací čistícího přípravku. V průběhu čištění se v pravidelných intervalech měřily hodnoty pH a teplota cirkulujícího čistícího přípravku.

4.1.1 NÁVRH METODY A TECHNOLOGICKÝ POSTUP

K samotnému čištění energetického zařízení, jako je např. výměník tepla, je potřeba mít vhodné zařízení, aby bylo možné výměník efektivně vyčistit. K čištění je potřeba čerpadlo s dostatečně velkou sběrnou nádobou. Objem nádoby je dán objemem čištěného zařízení. Dále je potřeba příslušenství jako jsou hadice, redukce a těsnění pro bezpečné propojení čerpadla s výměníkem do okruhu. Také je potřeba přívod vody pro realizaci proplachu výměníku, měřící zařízení pro průběžnou kontrolu hodnot pH a teploty a průmyslový videoskop pro vyhodnocení stavu povrchu před a po čištění.

Technologický postup chemického čištění vybraného zařízení byl zvolen následovně:

1. Vizuální endoskopická kontrola vnitřního povrchu před vyčištěním
2. Proplach čistou vodou
3. Příprava a aplikace čistícího přípravku do čištěného zařízení
4. Cirkulace čistícího přípravku
5. Průběžné měření hodnot pH a teploty čistícího přípravku
6. Vypuštění čistícího přípravku
7. Proplach vodou
8. Vizuální endoskopická kontrola vnitřního povrchu po vyčištění

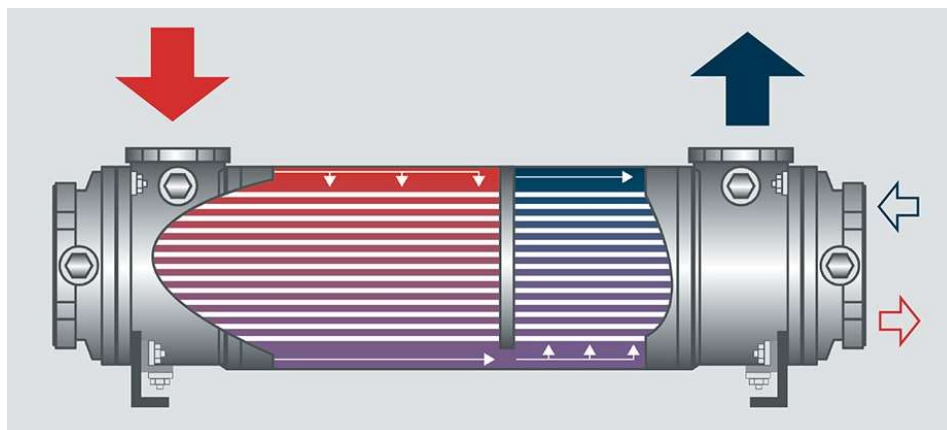
4.1.2 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE

Výměník BASCO TYPE 500

Jako energetické zařízení k vyčištění byl použit trubkový svazkový výměník BASCO TYPE 500 od firmy API Heat Transfer. Výměník je opatřen válcovým pláštěm z uhlíkové oceli a měděnými trubkami uvnitř výměníku.



Obrázek 15 – Trubkový svazkový výměník BASCO TYPE 500



Obrázek 16 – Schéma trubkového svazkového výměníku [39]

Čerpadlo se sběrnou nádobou

K uvedení čistícího přípravku do pohybu, v rámci zapojeného okruhu, bylo použito čerpadlo se sběrnou nádobou a příslušenstvím jakou jsou hadice, redukce a těsnění.



Obrázek 17 – Čerpadlo se sběrnou nádobou

Průmyslový videoskop Olympus Implex Ultralite

Vizuální endoskopická kontrola vnitřního povrchu byla provedena průmyslovým videoskopem Olympus Impex Ultralite. Díky odolné inspekční trubici s rychlým a přesným natáčením sondy byly pořízeny kvalitní snímky vnitřního povrchu výměníku.



Obrázek 18 – Průmyslový videoskop Olympus Implex Ultralite [40]

pH metr HANNA HI-98191

K průběžné kontrole parametrů, jako je hodnota pH a teplota čistícího přípravku, byl použit pH metr HANNA HI-98191 s titanovou elektrodou.

Technické parametry:

- Rozsah: - 2,00 až 16,00 pH, - 20,0 až 120,0 °C
- Přesnost: $\pm 0,1$ pH, $\pm 0,4$ °C



Obrázek 19 – pH metr HANNA HI-98191 [41]

4.1.3 ČISTÍCÍ PŘÍPRAVEK

K chemickému čištění výměníku byl použit přípravek nové generace na kyselé bázi s vhodným katalyzátorem pro urychlení čistící reakce a s vhodnými inhibitory. Čistý povrch výměníku je následně po vyčištění přímo pasivován tímto čistícím přípravkem. Čistící přípravek je vodou ředitelný. Tento čistící přípravek nebude v práci jmenován hlavně kvůli tomu, aby nebyl zvýhodněn, či znevýhodněn žádný z distributorů, popř. výrobců čistících přípravků.

4.2 VIZUÁLNÍ KONTROLA PŘED VYČIŠTĚNÍM

Před samotným čištěním, a zapojením všech potřebných zařízení do okruhu, byla provedena vizuální endoskopická kontrola vnitřního povrchu. Kontrola byla provedena průmyslovým endoskopem Olympus Implex Ultralite zmíněným již dříve.

Na snímcích níže (Obrázek 20) lze vidět zanesený vnitřní povrch primárního okruhu výměníku.



Obrázek 20 – Zanesený vnitřní povrch primárního okruhu před vyčištěním

Na následujících snímcích (Obrázek 21) lze vidět zanesený vnitřní povrch sekundárního okruhu výměníku. Sekundární okruh výměníku je na první pohled více zanesen.



Obrázek 21 – Zanesený vnitřní povrch sekundárního okruhu před vyčištěním

4.3 PROPLACH VODOU

Po provedení vizuální kontroly vnitřního povrchu výměníku, a zjištění stavu vnitřního povrchu, byl výměník osazen redukcemi a propojen s čerpadlem se sběrnou nádobou do okruhu. Veškeré závitové spoje byly důkladně zatěsněny tak, aby nedocházelo k úniku vody, resp. čistícího přípravku ze soustavy.

Poté co byl výměník propojen s čerpadlem se sběrnou nádobou byl proveden první proplach vodou. Proplach vodou trval 10 minut. Proplachem vodou byly z vnitřního povrchu výměníku odstraněny některé hrubé nečistoty. Na obrázku 22 níže lze vidět znečištěnou vodu po prvním proplachu primárního okruhu výměníku.



Obrázek 22 – Zakalená voda po prvním proplachu primárního okruhu výměníku

4.4 CHEMICKÉ ČIŠTĚNÍ CIRKULACÍ PŘÍPRAVKU

Po proplachu výměníku vodou byl připraven čistící přípravek v koncentraci 1:10. Počáteční hodnota pH čistícího přípravku byla 0,78 a přípravek měl teplotu 18,6 °C.

Po nalití čistícího přípravku do sběrné nádoby čerpadla bylo spuštěno samotné chemické čištění výměníku cirkulací čistícího přípravku. Čištění výměníku bylo provedeno v několika fázích. V první fázi byl čištěn pouze samostatně primární okruh. První fáze čištění trvala 295 minut. V druhé fázi primární a sekundární okruh byl propojen do jednoho společného okruhu. Druhá fáze čištění trvala 390 minut, čištění však bylo přerušeno z důvodu dosažení vysoké teploty čistícího přípravku. Dočištění pokračovalo následující den dalších 90 minut. Celkem tedy čištění v druhé fázi trvalo 480 minut. V třetí a poslední fázi čištění byl zapojen samostatně pouze sekundární okruh. Čištění sekundárního okruhu trvalo 150 minut.

4.5 PRŮBĚŽNÁ KONTROLA PARAMETRŮ A ZPRACOVÁNÍ ZÍSKANÝCH DAT

V průběhu čištění byly v pravidelných intervalech kontrolovány a zaznamenávány průběžné hodnoty pH a teploty cirkulujícího čistícího přípravku. K měření těchto parametrů byl použit pH metr HI-98191 od výrobce HANNA Instruments, který byl již zmíněn dříve.

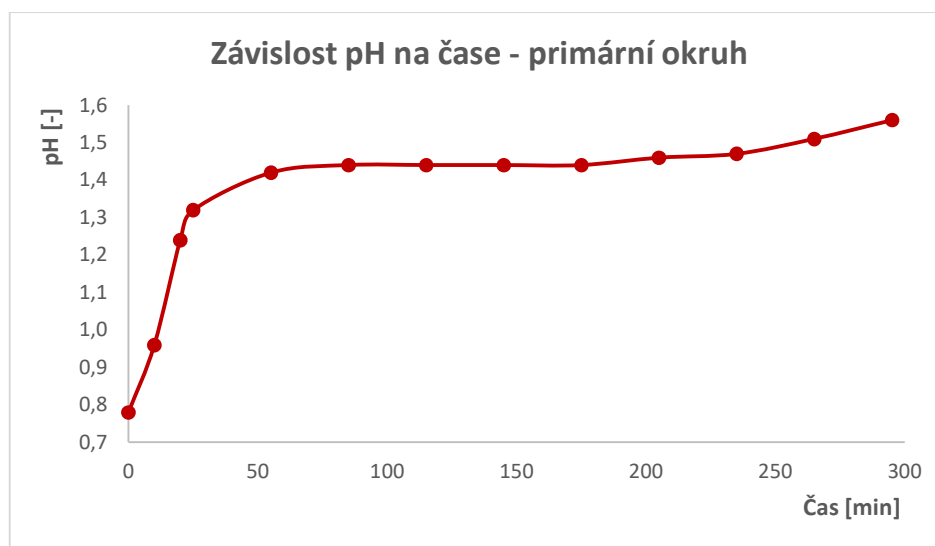
Z naměřených dat byly zpracovány grafické závislosti pro každou fázi čištění. Jedná se o závislosti pH na čase, teploty na čase a pH na teplotě.

V následující tabulce níže (Tabulka 3) jsou zaznamenány naměřené průběžné hodnoty pH a teploty z průběhu čištění primárního okruhu.

Tabulka 2 – Naměřené hodnoty parametrů v průběhu první fáze čištění (primární okruh)

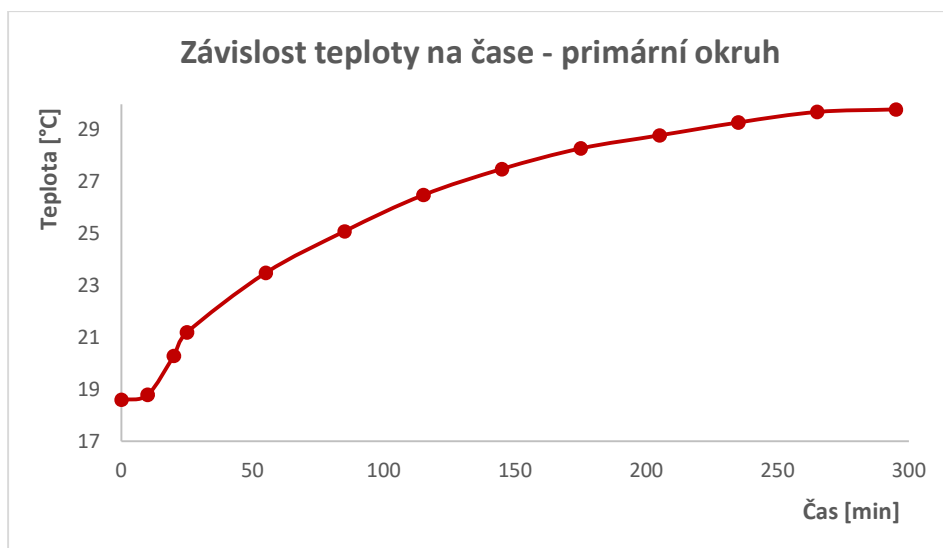
Pořadí měření	Čas [min]	pH [-]	Teplota [°C]
1	0	0,78	18,6
2	10	0,96	18,8
3	20	1,24	20,3
4	25	1,32	21,2
5	55	1,42	23,5
6	85	1,44	25,1
7	115	1,44	26,5
8	145	1,44	27,5
9	175	1,44	28,3
10	205	1,46	28,8
11	235	1,47	29,3
12	265	1,51	29,7
13	295	1,56	29,8

Z naměřených hodnot pH byla zpracována závislost pH na čase (Obrázek 23). Z grafické závislosti lze vidět, že v průběhu čištění pH čistícího přípravku roste. To je způsobeno rozpuštěním usazenin a nečistot v čistícím přípravku, čistící přípravek se vyčerpává.



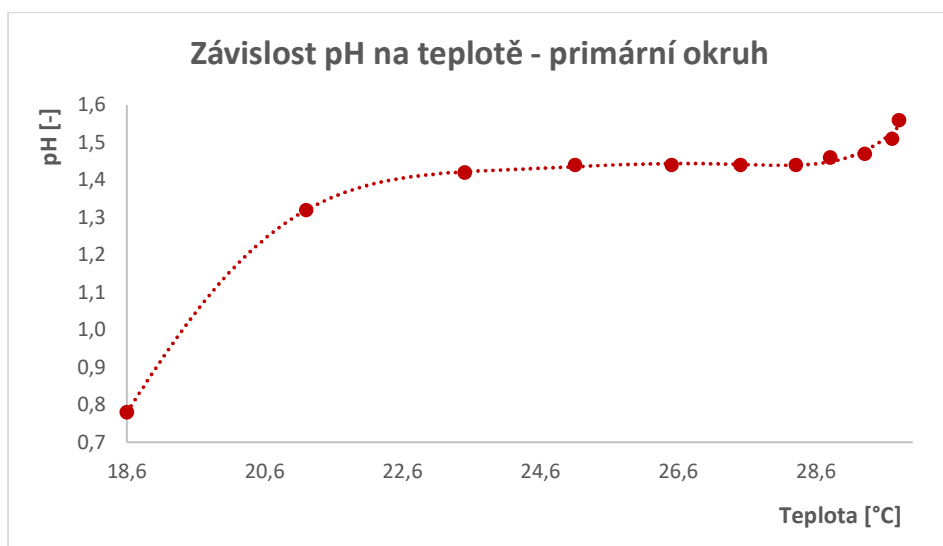
Obrázek 23 – Grafická závislost pH na čase primárního okruhu v první fázi čištění

Z hodnot teplot čistícího přípravku naměřených v průběhu čištění byla zpracována závislost teploty na čase (Obrázek 24). Z grafické závislosti lze pozorovat, že teplota čistícího přípravku v průběhu čištění roste. To je zapříčiněno chemickou reakcí mezi usazeninami a čistícím přípravkem. Při čištění primárního okruhu v první fázi čištění teplota čistícího přípravku narostla až na 29,8 °C.



Obrázek 24 – Grafická závislost teploty na čase primárního okruhu v první fázi čištění

V následujícím grafu níže byla zpracována z naměřených hodnot závislost pH na teplotě (Obrázek 25). Z grafické závislosti opět lze vidět rostoucí trend.



Obrázek 25 – Grafická závislost pH na teplotě primárního okruhu v první fázi čištění

V následující tabulce (Tabulka 3) jsou zaznamenány naměřené průběžné hodnoty pH a teploty z průběhu druhé fáze čištění, kdy byl zapojen do čistícího okruhu jak primární okruh, tak i sekundární okruh.

Dále v tabulce níže (Tabulka 4) jsou zaznamenány naměřené hodnoty pH a teploty čistícího přípravku z průběhu čištění stále v druhé fázi, které však bylo provedeno následující den.

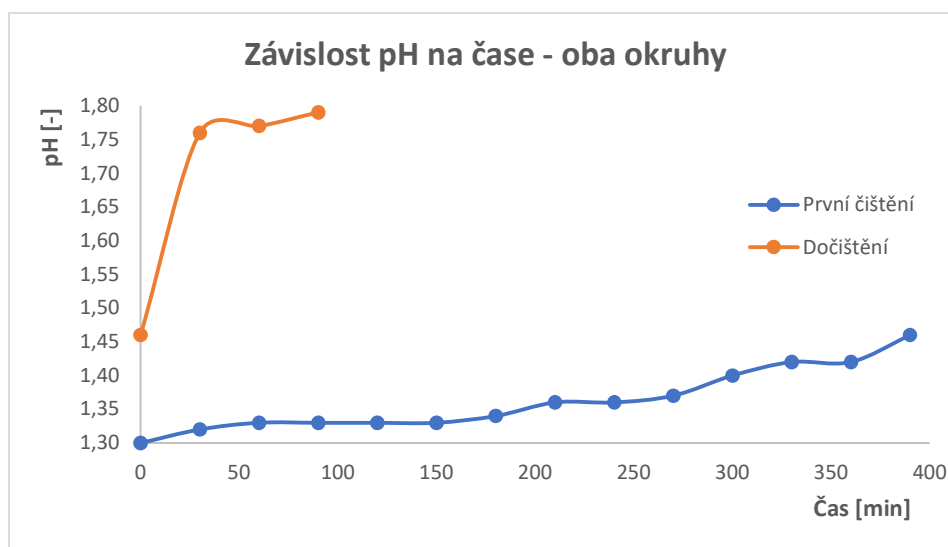
Tabulka 3 – Naměřené hodnoty parametrů v průběhu druhé fáze čištění (primární a sekundární okruh)

Pořadí měření	Čas [min]	pH [-]	Teplota [°C]
1	0	1,30	22,1
2	30	1,32	23,4
3	60	1,33	25,6
4	90	1,33	26,7
5	120	1,33	28,3
6	150	1,33	29,0
7	180	1,34	30,0
8	210	1,36	30,7
9	240	1,36	32,8
10	270	1,37	33,8
11	300	1,40	34,4
12	330	1,42	35,3
13	360	1,42	35,8
14	390	1,46	36,0

Tabulka 4 – Naměřené hodnoty parametrů v průběhu druhé fáze čištění (primární a sekundární okruh) – dočištění následující den

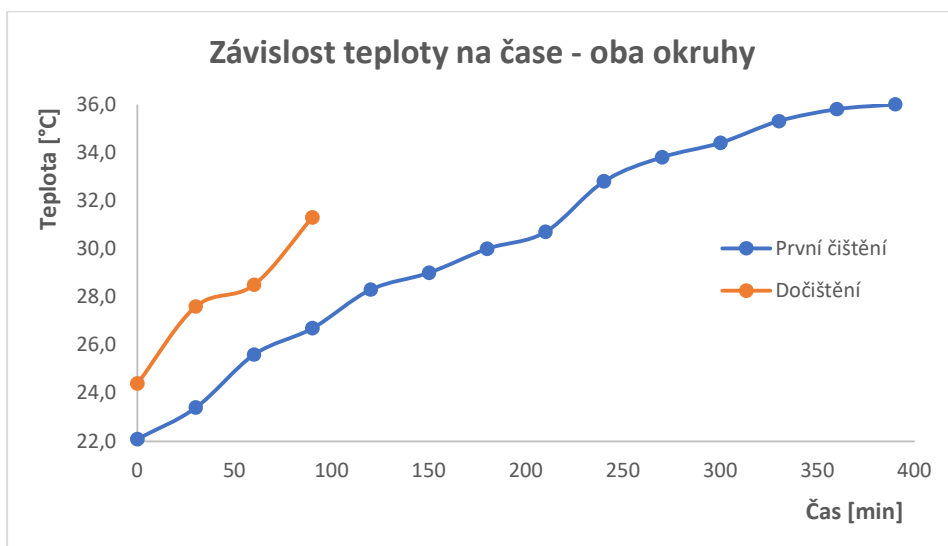
Pořadí měření	Čas [min]	pH [-]	Teplota [°C]
1	0	1,46	24,4
2	30	1,76	27,6
3	60	1,77	28,5
4	90	1,79	31,3

Z naměřených hodnot pH čistícího přípravku byla opět zpracována grafická závislost pH na čase v průběhu druhé fáze čištění, kdy byly zapojeny oba okruhy výměníku najednou. V grafu (Obrázek 26) lze vidět dvě závislosti pH na čase. Opět lze vidět v obou případech rostoucí trend, avšak v tomto případě čištění, kdy byly zapojeny oba okruhy výměníku, lze vidět, že hodnota pH narůstala pomaleji než v případě čištění v první fázi.



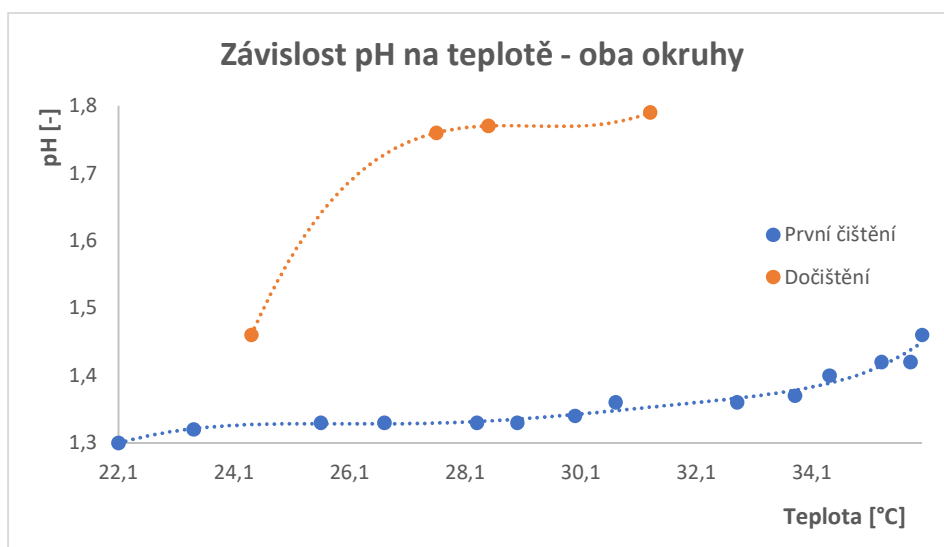
Obrázek 26 – Grafická závislost pH na čase v druhé fázi čištění

Z hodnot teplot čistícího přípravku, naměřených v průběhu čištění v druhé fázi, byla zpracována závislost teploty na čase (Obrázek 27). Teplota čistícího přípravku opět narůstá. Během čištění, které trvalo 390 minut, byla naměřena maximální teplota čistícího přípravku 36 °C, což se už blížilo limitní doporučené teplotě, která je dána výrobcem přípravku. Proto čištění bylo přerušeno a dočištění následovalo další den.



Obrázek 27 – Grafická závislost teploty na čase v druhé fázi čištění

V následujícím grafu níže byla zpracována z naměřených hodnot závislost pH na teplotě (Obrázek 28). Z grafické závislosti lze vidět rostoucí trend.



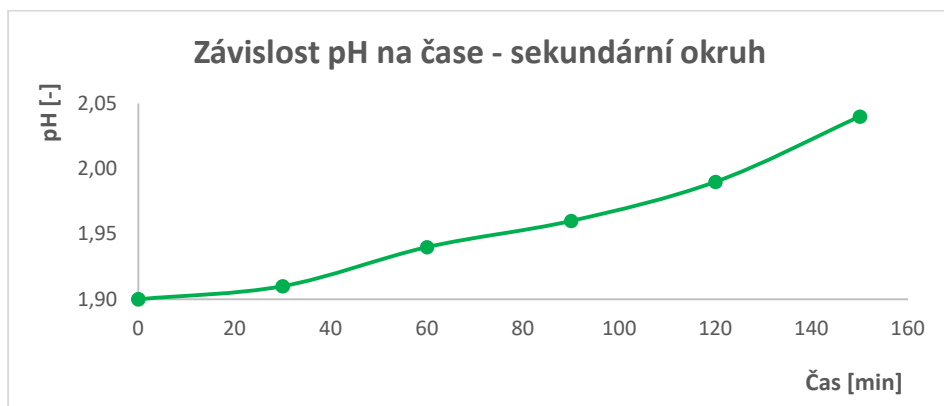
Obrázek 28 – Grafická závislost pH na teplotě v druhé fázi čištění

V následující tabulce (Tabulka 5) jsou zaznamenány naměřené průběžné hodnoty pH a teploty z průběhu třetí fáze čištění, kdy byl zapojen do čistícího okruhu pouze sekundární okruh.

Tabulka 5 – Naměřené hodnoty parametrů v průběhu třetí fáze čištění (sekundární okruh)

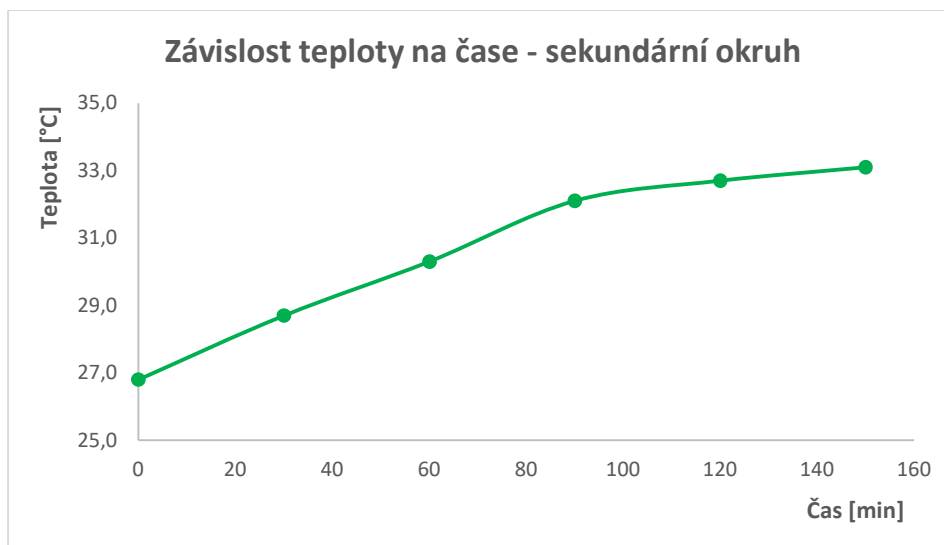
Pořadí měření	Čas [min]	pH [-]	Teplota [°C]
1	0	1,9	26,8
2	30	1,91	28,7
3	60	1,94	30,3
4	90	1,96	32,1
5	120	1,99	32,7
6	150	2,04	33,1

Z naměřených hodnot pH čistícího přípravku, cirkulujícího při čištění v třetí fázi, byla vytvořena grafická závislost pH na čase (Obrázek 29).



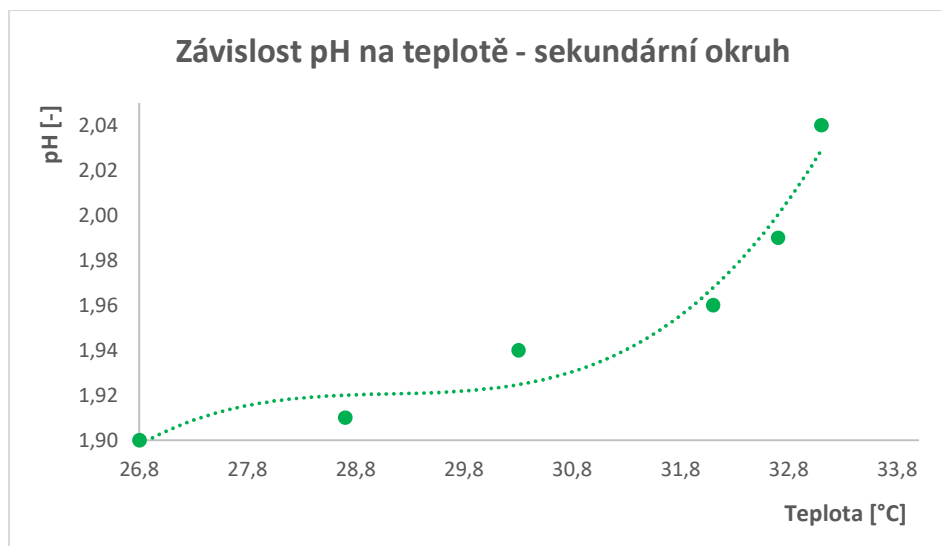
Obrázek 29 – Grafická závislost pH na čase v třetí fázi čištění

Z naměřených teplot čistícího přípravku cirkulujícího výměníkem, ve třetí fázi čištění, byla sestavena grafická závislost teploty na čase (Obrázek 30). Třetí fáze čištění navazovala v rámci desítek minut na dočištění v druhé fázi, proto počáteční teplota čistícího prostředku je poměrně vysoká v porovnání s počátečními teplotami předešlých fází čištění.



Obrázek 30 – Grafická závislost teploty na čase ve třetí fázi čištění

V následujícím grafu níže byla zpracována z naměřených hodnot závislost pH na teplotě (Obrázek 31).



Obrázek 31 – Grafická závislost pH na teplotě v třetí fázi čištění

4.6 VYPUŠTĚNÍ ČISTÍCÍHO PŘÍPRAVKU A PROPLACH VODOU

Po chemickém čištění byl čistící přípravek vypuštěn do předem připravené nádoby a byl odložen. Jelikož pH čistícího přípravku v závěru samotného čištění dosahovalo 2,04, je teoreticky možné tento čistící přípravek ještě znovu použít, neboť nebyla zcela vyčerpána jeho čistící schopnost.

Po vypuštění čistícího přípravku byl proveden opakovaný vícenásobný finální proplach vodou. Závěrečný proplach vodou trval 20 minut.

4.7 VIZUÁLNÍ KONTROLA PO VYČIŠTĚNÍ

Aby se vyhodnotil výsledný stav vnitřního povrchu výměníku, byla po důkladném proplachu vodou provedena závěrečná vizuální kontrola pomocí průmyslového videoskopu. Na snímcích (Obrázek 32 a Obrázek 33) lze vidět srovnání stavu vnitřního povrchu před a po vyčištění primárního okruhu výměníku. Dále na snímcích (Obrázek 34) lze vidět srovnání stavu vnitřního povrchu před a po vyčištění sekundárního okruhu výměníku.



Obrázek 32 – Stav povrchu před a po vyčištění – primární okruh



Obrázek 33 – Stav povrchu před a po vyčištění – primární okruh



Obrázek 34 – Stav povrchu před a po vyčištění – sekundární okruh

4.8 VYHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Experiment spočíval v provedení chemického čištění výměníku, dle navržené metodiky čištění, a sledování vývoje parametrů pH a teploty čistícího přípravku v průběhu čištění. Chemické čištění výměníku bylo provedeno cirkulací čistícího přípravku ve třech fázích. Prvně byl čištěn pouze primární okruh, poté primární a sekundární okruh zároveň a na závěr pouze samotný sekundární okruh.

Z naměřených dat, resp. průběžných hodnot pH a teplot čistícího přípravku, byly vytvořeny grafické závislosti. Na těchto sestavených grafických závislostech lze vidět, že pH v průběhu čištění roste, čistící přípravek se vyčerpává. Jako další lze z grafických závislostí vidět, že čistící přípravek se v průběhu čištění zahřívá, je tedy potřeba hlídat, aby teplota čistícího přípravku nepřesáhla maximální dovolenou teplotu danou výrobcem použitého přípravku.

Po provedení závěrečné vizuální kontroly průmyslovým videoskopem lze z pořízených snímků vidět, že chemické čištění výměníku bylo úspěšné a efektivní, avšak v některých místech malý zbytek usazenin přetrval. Jak bylo vidět při první vizuální kontrole, vnitřní povrch výměníku byl nadměru znečištěn. Takové znečištění by do úplného vyčištění vyžadovalo delší čas samotného chemického čištění cirkulací čistícího přípravku. Hrubým odhadem byl vnitřní povrch výměníku vyhodnocen jako z 95 % vyčištěný.

5. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provést rozbor metod čištění a údržby povrchů v energetice s důrazem na chemické čištění, dále navrhnout vhodnou metodu čištění a její realizaci na vybraném zařízení s následným vyhodnocením stavu vnitřního povrchu čištěného zařízení.

Co se týče samotné problematiky, v diplomové práci byly popsány jednotlivé mechanismy zanášení a problémy, ke kterým může docházet vlivem usazování nečistot na vnitřním povrchu energetických zařízení. Dále byly popsány metody čištění a údržby povrchů. Nejvíce prostoru bylo věnováno chemickým metodám.

V praktické části byl navržen technologický postup čištění vnitřního povrchu energetických zařízení. Technologický postup navrženého čištění zahrnoval vizuální kontrolu vnitřního povrchu průmyslovým videoskopem, poté proplach vodou, samotné chemické čištění cirkulací čistícího přípravku uvnitř energetického zařízení, průběžnou kontrolu parametrů, finální proplach a finální vizuální kontrolu s vyhodnocením výsledného stavu vnitřního povrchu. Tento navržený postup čištění byl aplikován na znečištěném svazkovém trubkovém výměníku. V průběhu celého čištění byly sledovány parametry jako jsou pH a teplota cirkulujícího čistícího přípravku. Z naměřených dat byly poté zpracovány grafické závislosti.

Vyčištění výměníku v rámci experimentu bylo úspěšné. Zvolené cíle diplomové práce byly tedy splněny jak po teoretické stránce, tak i po praktické stránce.

Závěrem je třeba připomenout, že zanášení energetických zařízení, jakou jsou tepelné výměníky, chladiče, kotle aj., je závažným problémem, kterému je třeba se věnovat a nepodceňovat jej. S tímto problémem se lze setkat v mnoha různých průmyslových odvětvích a může omezit výrobu, nebo vést k neplánovaným odstávkám. Vhodnou prevencí nebo volbou správné technologie lze zajistit bezproblémový chod výše zmíněných zařízení a prodloužit tak živostnost, zvýšit efektivitu daných procesů, či snížit náklady na provoz.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Marine and Offshore Renewable Energy* [online]. London: The Royal Institution of Naval Architects, 2012 [cit. 2021-02-12]. ISBN 978-1-62198-846-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BDQ9S1/marine-offshore-renewable/types-of-fouling>
- [2] GROYSMAN, A. Fouling, Corrosion, and Cleaning. GROYSMAN, A. *Corrosion Problems and Solutions in Oil Refining and Petrochemical Industry* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017, 2017-10-25, s. 213-234 [cit. 2021-02-12]. Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality. ISBN 978-3-319-45254-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-45256-2_7
- [3] OSTREZI, J. *Tepelné výměníky a problematika jejich zanášení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vojtěch Turek
- [4] StackPath. *StackPath* [online]. Dostupné z: <https://www.waterteconline.com/process-water/article/14071807/understanding-and-preventing-heat-exchanger-fouling>
- [5] AL-HAJ, H. Fouling in Heat Exchangers. KATSIKIS, Vasilios, ed. *MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications - Volume 3* [online]. InTech, 2012, 2012-09-26 [cit. 2021-02-13]. ISBN 978-953-51-0752-1. Dostupné z: doi:10.5772/46462
- [6] SHAH, R. a D. SEKULIĆ. *Fundamentals of heat exchanger design*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. ISBN 978-0-471-32171-2.
- [7] KUCHAR, J. *Studium a úpravy vnitřních povrchů energetických soustav*. Praha, 2020. Disertační práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
- [8] AMJAD, Z. a K. DEMADIS. *Mineral Scales and Deposits - Scientific and Technological Approaches* [online]. Elsevier, 2015 [cit. 2021-02-15]. ISBN 978-0-44462-752-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UD12E1/mineral-scales-deposits/precipitation-fouling>
- [9] HESSELGREAVES, J., R. LAW a D. REAY. *Compact Heat Exchangers - Selection, Design and Operation* [online]. 2. vydání. Elsevier, 2017 [cit. 2021-02-15]. ISBN 978-0-08-100306-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0119ER8E/compact-heat-exchangers/particulate-fouling-silting>
- [10] ZHU, F., J. JOHNSON, D. ABLIN a G. ERNST. *Efficient Petrochemical Processes - Technology, Design and Operation* [online]. John Wiley, 2020 [cit. 2021-02-15]. ISBN 978-1-5231-3296-6. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012EQ3BP/efficient-petrochemical/determine-additional>
- [11] ŠUMSKÝ, L. *Žárovzdorné oceli pro energetický průmysl*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Pavlína Hájková Ph.D.

- [12] KŘÍŽ, P. *Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Molliková, Ph.D., Paed IGIP.
- [13] Žáruvzdorné oceli a žáruvzdorné niklové slitiny. *TECHportal.cz* [online]. [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/>
- [14] *Korozivzdorné oceli - vlastnosti* [online]. Brusel: Euro Inox, 2002 [cit. 2021-02-24]. ISBN 2-87997-082-2. Dostupné z: https://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties_CZ.pdf
- [15] Měděné výměníky tepla. *Měděné výměníky tepla* [online]. Dostupné z: <https://copperexchanger.webnode.cz>
- [16] Fouling Factors in Shell & Tube Heat Exchangers. *Scambio Termico* [online]. Dostupné z: <http://heatexchan.blogspot.com/2019/04/fouling-factors-in-shell-tube-heat.html>
- [17] Fouling Of Heat Exchanger/ Water Fouling. Fouling Factor and Disadvantages of Fouling | Mecholic. *Mecholic | Addicted To Mechanical Engineering* [online]. Dostupné z: <https://www.mecholic.com/2018/08/fouling-of-heat-exchanger.html>
- [18] Stainless Steel 310S Heat Exchanger Tubes Manufacturer Supplier in Mumbai, India. *SS Seamless and Welded Pipes Manufacturer – Jayhind Metal & Tube* [online]. Copyright © Copyright [cit. 05.03.2021]. Dostupné z: <https://www.jayhindmetal.com/stainless-steel-310-310s-heat-exchanger-tubes-manufacturer-supplier/>
- [19] REVIE, W. *Oil and Gas Pipelines - Integrity and Safety Handbook* [online]. New Jersey: John Wiley, 2015 [cit. 2021-03-06]. ISBN 978-1-5231-2369-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011UJ6N8/oil-gas-pipelines-integrity/cleaning-a-pipeline>
- [20] KREIBICH, V. *Koroze a technologie povrchových úprav: návody ke cvičení*. Praha: České vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-01-00750-2.
- [21] CRAMER, S. a B. COVINO. *ASM Handbook, Volume 13C - Corrosion: Environments and Industries* [online]. ASM International, 2006 [cit. 2021-03-09]. ISBN 978-1-61503-111-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007PJMf3/asm-handbook-volume-13c/chemical-cleaning-solutions>
- [22] FRENIER, W. *CorrCompilation - Advancements for Control of Inorganic Scale, Volumes 1-4* [online]. NACE International, 2019 [cit. 2021-03-17]. ISBN 978-1-5231-3057-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt01281RY1/corrcompilation-advancements/metallographic-inspections>

- [23] MÜLLER-STEINHAGEN, H. C4 Fouling of Heat Exchanger Surfaces. *VDI Heat Atlas* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, 2010-4-23, s. 79-104 [cit. 2021-03-10]. ISBN 978-3-540-77876-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-77877-6_7
- [24] 5 MAJOR LOSSES DUE TO SCALING IN BOILERS by Thermodyne Engineering Systems - Trepup.com. *Trepup.com - eBusiness Platform* [online]. Dostupné z: <https://www.trepup.com/thermodyneengineeringystems/products/5-major-losses-due-to-scaling-in-boilers/222833>
- [25] FRENIER, W. *Technology for Chemical Cleaning of Industrial Equipment (2nd Edition)* [online]. NACE International, 2018 [cit. 2021-03-20]. ISBN 978-1-5231-3061-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0127XP82/technology-chemical-cleaning/chelating-agents>
- [26] MANIVASAKAM, N. *Practical Boiler Water Treatment Handbook* [online]. Chemical Publishing Company, 2011 [cit. 2021-03-20]. ISBN 978-1-5231-0274-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CREQS3/practical-boiler-water/cleaning-p-hydrochloric>
- [27] DEYAB, M. Understanding the anti-corrosion mechanism and performance of ionic liquids in desalination, petroleum, pickling, de-scaling, and acid cleaning applications. *Journal of Molecular Liquids* [online]. 2020, **309** [cit. 2021-03-21]. ISSN 01677322. Dostupné z: doi:10.1016/j.molliq.2020.113107
- [28] OBOT, B., A. MEROUFEL, I. ONYEACHU, A. ALENAZI a A. SOROUR. Corrosion inhibitors for acid cleaning of desalination heat exchangers: Progress, challenges and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids* [online]. 2019, **296** [cit. 2021-03-21]. ISSN 01677322. Dostupné z: doi:10.1016/j.molliq.2019.111760
- [29] SAJI, V. a Saviour U. Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Industry [online]. John Wiley, 2020 [cit. 2021-03-25]. ISBN 978-1-5231-3291-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012ENU1H/corrosion-inhibitors/dispersion>
- [30] 2-Phosphonobutane-1,2,4,-tricarboxylic acid | CAS 37971-36-1 | Connect Chemicals. [online]. Copyright © [cit. 30.03.2021]. Dostupné z: <https://connectchemicals.com/en/product-finder/2-phosphonobutane-124-tricarboxylic-acid-pbtc>
- [31] Restoring Main Sewer Line with Hydrojetting • A ROOTER PROS. *Sewer Repair Drain Cleaning Grease Traps • NJ • A ROOTER PROS* [online]. Dostupné z: <https://njsewerdrain.com/restoring-main-sewer-line-with-hydrojetting/>

- [32] QU, Z., J. YANG, L. WU, et al. Methodology for removing fouling within liquid-filled pipelines based on ultrasonic guided waves cavitation effect. *Applied Acoustics* [online]. 2020, **157** [cit. 2021-04-03]. ISSN 0003682X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apacoust.2019.107018
- [33] MANG, T. a W. DRESEL. *Lubricants and Lubrication, 2 Volume Set (3rd Edition)* [online]. 3. John Wiley, 2017 [cit. 2021-04-03]. ISBN 978-1-5231-1087-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011BYIQ3/lubricants-lubrication/ultrasound-cleaning>
- [34] Ultrasonic Cleaning. *Fluid Dynamics | Homepage* [online]. Copyright © 2018 Fluid Dynamics Pty Ltd [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: <https://www.fluidynamics.com.au/services/ultrasonic-cleaning>
- [35] BAHADORI, A. *Essentials of Coating, Painting, and Lining for the Oil, Gas, and Petrochemical Industries* [online]. Elsevier, 2015 [cit. 2021-04-03]. ISBN 978-0-12801-665-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U9EKD1/essentials-coating-painting/air-blast-cleaning>
- [36] Industrial Cleaning Technologies | CONCO Systems | Services | Industrial. *CONCO Systems | Services | Industrial* [online]. Copyright © [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: <https://www.conco.net/services/industrial-cleaning/industrial-cleaning-technologies>
- [37] Drilling - Conco-Cyrotec. *Conco-Cyrotec - Home* [online]. Copyright © Copyright 2020 [cit. 04.04.2021]. Dostupné z: <https://conco-cyrotec.weebly.com/drilling.html>
- [38] Excaliber - Conco-Cyrotec. *Conco-Cyrotec - Home* [online]. Copyright © Copyright 2020 [cit. 04.04.2021]. Dostupné z: <https://conco-cyrotec.weebly.com/excaliber.html>
- [39] Water-cooled condensers: facts that will blow your mind! - Industrial Manufacturing Blog | linqip. *Industrial equipment platform for buyers, suppliers and service providers* [online]. Copyright © All Right Reserved By Linqip Co. [cit. 13.07.2021]. Dostupné z: <https://www.linqip.com/blog/water-cooled-condensers-facts/>
- [40] Olympus launches new portable, powerful videoscope - Olympus Australia. *Welcome to Olympus. - Olympus Australia* [online]. Copyright © Olympus 2021 [cit. 13.07.2021]. Dostupné z: https://www.olympus.com.au/company/en/news/press-releases/press-release-detail-page_2048.html

- [41] HI-98191 Professional Waterproof pH/ORP/ISE Meter. *pH meters | Hanna Instruments - Official Denmark Store* [online]. Copyright © Hanna Instruments Ltd 2018 [cit. 13.07.2021]. Dostupné z: <https://www.hannainst.dk/hi-98191-professional-waterproof-ph-orp-ise-meter.html>

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1 – Způsoby depozice a následného odstraňování během zanášení [8]
- Obrázek 2 – Typické křivky průběhu závislosti odporu zanášení na čase [8]
- Obrázek 3 – Příklad krystalizačního zanášení [16]
- Obrázek 4 – Příklad korozního zanášení [17]
- Obrázek 5 – Tepelný výměník ze žáruvzdorné oceli 1.4841 [18]
- Obrázek 6 – Ukázka chemického čištění před a po [24]
- Obrázek 7 – Rozpuštění oxidů železa v amonných chelátech při pH 9,2 při teplotě 160 °C [25]
- Obrázek 8 – Vznik usazenin v komunální odpadní vodě v závislosti na čase při teplotě 40 °C [8]
- Obrázek 9 – Metoda vysokotlakého čištění vodním paprskem [31]
- Obrázek 10 – Čištění tepelného výměníku ultrazvukem v lázni [34]
- Obrázek 11 – Tlaková pistole a projektily pro projektilové čištění [36]
- Obrázek 12 – Metoda HydroDrill [37]
- Obrázek 13 – Čistící zařízení Excaliber [38]
- Obrázek 14 – Tryska pro čištění kapalným dusíkem technologií NitroLance [36]
- Obrázek 15 – Trubkový svazkový výměník BASCO TYPE 500
- Obrázek 16 – Schéma trubkového svazkového výměníku [39]
- Obrázek 17 – Čerpadlo se sběrnou nádobou
- Obrázek 18 – Průmyslový videoskop Olympus Implex Ultralite [40]
- Obrázek 19 – pH metr HANNA HI-98191 [41]
- Obrázek 20 – Zanesený vnitřní povrch primárního okruhu před vyčištěním
- Obrázek 21 – Zanesený vnitřní povrch sekundárního okruhu před vyčištěním
- Obrázek 22 – Zakalená voda po prvním proplachu primárního okruhu výměníku
- Obrázek 23 – Grafická závislost pH na čase primárního okruhu v první fázi čištění
- Obrázek 24 – Grafická závislost teploty na čase primárního okruhu v první fázi čištění
- Obrázek 25 – Grafická závislost pH na teplotě primárního okruhu v první fázi čištění
- Obrázek 26 – Grafická závislost pH na čase v druhé fázi čištění
- Obrázek 27 – Grafická závislost teploty na čase v druhé fázi čištění
- Obrázek 28 – Grafická závislost pH na teplotě v druhé fázi čištění
- Obrázek 29 – Grafická závislost pH na čase v třetí fázi čištění

Obrázek 30 – Grafická závislost teploty na čase v třetí fázi čištění

Obrázek 31 – Grafická závislost pH na teplotě v třetí fázi čištění

Obrázek 32 – Stav povrchu před a po vyčištění – primární okruh

Obrázek 33 – Stav povrchu před a po vyčištění – primární okruh

Obrázek 34 – Stav povrchu před a po vyčištění – sekundární okruh

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Volba chemického čištění v závislosti na typu usazenin [21, 23, 28]

Tabulka 2 – Naměřené hodnoty parametrů v průběhu první fáze čištění (primární okruh)

Tabulka 3 – Naměřené hodnoty parametrů v průběhu druhé fáze čištění (primární a sekundární okruh)

Tabulka 4 – Naměřené hodnoty parametrů v průběhu druhé fáze čištění (primární a sekundární okruh) – dočištění následující den

Tabulka 5 – Naměřené hodnoty parametrů v průběhu třetí fáze čištění (sekundární okruh)