



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VLIV ZANÁŠENÍ VÝMĚNÍKU A SOUČINITEL PROSTUPU
TEPLA**

EFFECT OF EXCHANGER FOULING AND HEAT TRANSFER COEFFICIENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Karel Konopiský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Karel Konopiský
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv zanášení výměníku a součinitel prostupu tepla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vlivem nečistot v teplosměnných médiích probíhá na stěnách výměníku tvorba úsad, které mají negativní dopad na intenzitu prostupu tepla stěnou výměníku. Intenzita zanášení a tepelný odpor vytvořené vrstvy závisí na spoustě parametrů, především na vlastnostech teplosměnného média, charakteru proudění a teplotách při kterých k usazování dochází. Náplní práce je popis procesu usazování a vyjádření míry vlivu parametrů procesu na intenzitu usazování a vlastnosti usazené vrstvy.

Cíle diplomové práce:

- rešerše o degradaci teplosměnné plochy výměníků vlivem usazování se nečistot a korozních produktů na stěny výměníků,
- hodnotit míru úsad při znalosti kvality vody ve výměnících,
- zpracovat výpočet degradace koeficientu prostupu tepla na stěně výměníku v čase, ve statických podmínkách,
- porovnání výsledků s naměřenými daty.

Seznam doporučené literatury:

KUPPAN, Thulukkanam. Heat exchanger design handbook. New York: Marcel Dekker, 2000. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.). ISBN 0-8247-9787-6.

HEWITT, Geoffrey Frederick: Heat Exchanger Design Handbook 2008, Begell House, New York, 2008. ISBN: 978-1-56700-259-1

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vlivem zanášení výměníku a součinitelem prostupu tepla. Součástí práce je nejprve teoretický popis zanášení, jeho vznik, průběh a vliv na teplosměnné plochy výměníků. V práci je také proveden rozbor chemického složení chladicí vody dle odebraného vzorku a na jeho základě určen potenciál této vody k zanášení. Závěrem jsou pak představeny výpočtové modely zanášení v trubkové části výměníku, provedeny výpočty zanášení na reálném výměníku a jejich porovnání s daty naměřenými při provozu výměníku.

Klíčová slova

Zanášení, výměník tepla, součinitel prostupu tepla, tlaková ztráta, Kern-Seatonův model

ABSTRACT

This diploma thesis covers the influence of fouling in heat exchangers and heat transfer coefficient. In the first part of the thesis are covered the characteristics of fouling and its formation, process, and effects on heat transfer surfaces in exchangers. In the next part of the thesis, chemical analysis of cooling water is performed on an extracted sample and the potential of fouling is determined based on the analysis. In the conclusion part, computational models of fouling in the tube side of the heat exchanger are presented; fouling of an actual heat exchanger is calculated and compared with data captured during the operation of the heat exchanger.

Key words

Fouling, heat exchanger, heat transfer coefficient, pressure drop, Kern-Seaton model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KONOPIŠKÝ, Karel. *Vliv zanášení výměníku a součinitel prostupu tepla*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124552>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením doc. Ing. Marka Baláše, Ph.D., s využitím informací ze zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Marku Balášovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné připomínky a rady, vstřícný přístup a pohotovou komunikaci, kterou mi poskytl při vypracování této práce. Dále bych zde rád poděkoval zaměstnancům jaderné elektrárny Dukovany Ing. Jaroslavu Pavlů, Ph.D. a Ing. Jiřímu Rapouchovi, Ph.D., kteří poskytli nezbytné podkladové materiály a svými cennými vědomostmi výrazně přispěli k vyhotovení této práce.

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 Úvod do řešené problematiky.....	8
1.1 Vliv zanášení na termodynamické vlastnosti výměníku.....	8
1.2 Náklady vznikající zanášením	9
1.2.1 Naddimenzování teplosměnné plochy	9
1.2.2 Dodatečné náklady na energii	9
1.2.3 Náklady na opatření proti vzniku koroze a zanášení.....	10
1.2.4 Náklady na odstávku výměníku	10
1.3 Charakteristiky ovlivňující zanášení.....	10
1.3.1 Vlastnosti provozní kapaliny a její sklon k zanášení	10
1.3.2 Teplota teplosměnné plochy.....	10
1.3.3 Rychlost provozní kapaliny a hydrodynamické účinky	11
1.3.4 Materiál trubky	12
1.3.5 Nečistoty v provozní kapalině.....	12
1.3.6 Drsnost povrchu trubek	12
1.3.7 Usazeniny	13
1.3.8 Umístění znečištěné látky na stranu trubky.....	13
1.3.9 Tok v mezitrubkovém prostoru	13
1.3.10 Druh výměníku	13
1.3.11 Sezónní změny teplot	15
1.3.12 Konstrukce zařízení	15
1.3.13 Geometrie a umístění.....	15
1.4 Průběh zanášecího procesu	16
1.4.1 Iniclace	16
1.4.2 Přenos	17
1.4.3 Uchycení.....	17
1.4.4 Odnos usazenin	19
1.4.5 Stárnutí usazenin	20
1.5 Mechanismy zanášení	21
1.5.1 Korozní zanášení	21
1.5.2 Biologické zanášení.....	22
1.5.3 Částicové a sedimentační zanášení	24
1.5.4 Chemické zanášení	25
1.5.5 Zanášení v důsledku mrazu a tuhnutí.....	26
1.5.6 Precipitační a krystalizační zanášení.....	27
1.5.7 Kombinované zanášení	29
2 Zhodnocení míry úsad v konkrétním výměníku na základě rozboru kvality vody	30
2.1 Chemické složení odebírané vody v čase	31
2.2 Sledované parametry.....	31
2.2.1 Tvrdost vody	33
2.2.2 Koroze a agresivita vody.....	34
2.2.3 Barva, zákal a průhlednost	35
2.2.4 Nerozpuštěné látky	36

2.2.5	Hodnota pH.....	36
2.2.6	Celkový organický uhlík.....	37
2.2.7	Chemická spotřeba kyslíku.....	37
2.2.8	Neutralizační kapacita	37
2.2.9	Koncentrace železa a manganu.....	38
2.2.10	Chloridy a sírany.....	39
2.2.11	Vodivost.....	40
2.3	Chladicí okruh JE Dukovany	40
2.4	Rozbor konkrétního měření.....	41
2.4.1	Plnění normy.....	42
2.4.2	Sklon k zanášení dle chemického složení.....	44
2.4.3	Stanovení součinitele zanášení dle empirických měření	45
3	Výpočet zanášení reálného výměníku.....	46
3.1	Přístup dle Kern-Seatonovy metody.....	46
3.2	Přístup dle Bell-Delawarovy metody	46
3.3	Teoretické podklady k výpočtové části	47
3.3.1	Zavádění předpokladů	47
3.3.2	Výpočet vlivu zanášení výměníku nezávisle na času	48
3.4	Model zanášení v čase	50
3.5	Model zanášení reálného výměníku dle Kernova modelu	52
3.6	Posouzení míry správnosti výpočtového modelu.....	61
	ZÁVĚR	62
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	72
	SEZNAM OBRÁZKŮ	74
	SEZNAM TABULEK.....	76
	SEZNAM GRAFŮ.....	77

ÚVOD

Tepelné výměníky jsou zařízení, jejichž účelem je přenos tepelné energie mezi médii o různých teplotních parametrech. Tato média bývají obvykle ve výměníku rozdělena pevnou stěnou, aby nedocházelo k jejich vzájemnému promíchávání. Tyto stěny vytvářejí tzv. teplosměnné plochy a jejich vlastnosti významně ovlivňují celkové předané teplo mezi médii. V průběhu užívání výměníku se však na těchto plochách utváří z částic obsažených v médiu vrstva usazenin, která prostup tepla stěnou znesnadňuje. Takový proces se nazývá zanášení výměníku.

Zanášení se řadí, podobně jako například kavitace či koroze, k chemicko-fyzikálním procesům, které nemají v reálném světě téměř žádné pozitivní přínosy a znesnadňují správné fungování strojních zařízení. Hlavní negativní stránkou zanášení je jeho nepříznivý vliv na funkci hydraulických a tepelných zařízení. Pro tuto práci je zanášení důležité z pohledu jeho vlivu na teplosměnné plochy v tepelných výměnících, což jsou zařízení, ve kterých dochází k výměně tepelné energie mezi dvěma proudy médií o rozdílné teplotě. Vzhledem k tomu, že tepelné výměníky se v současné době vyskytují téměř ve všech průmyslových odvětvích, má snížení jejich účinnosti vyvolané zanášením obrovské finanční dopady. V krajních případech může dokonce tak omezit funkci výměníku, že musí dojít k odstávce celého průmyslového procesu.

1 Úvod do řešené problematiky

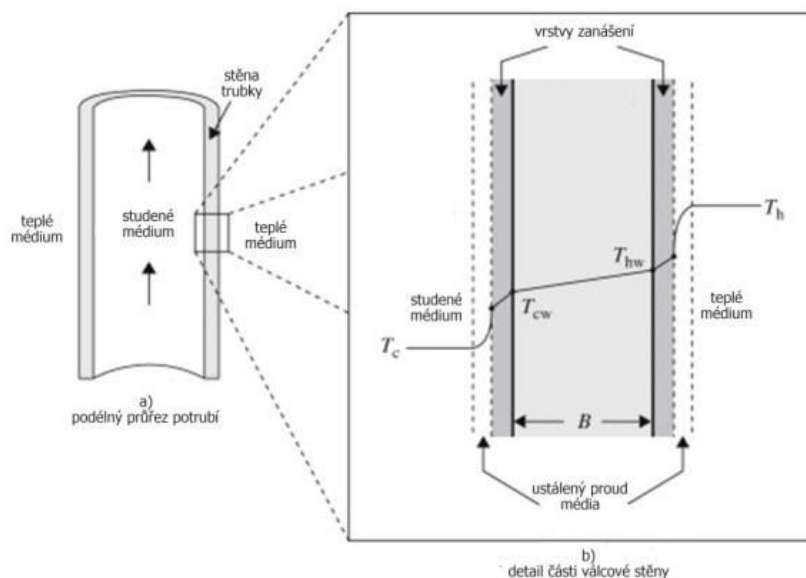
Zanášení výměníků je nežádoucí jev, ke kterému dochází v průběhu jejich používání. Je definováno jako nežádoucí nános vytvářející se na teplosměnných plochách, jehož největším vlivem je snížený přenos tepla a růst odporu vůči vodnímu proudu, který má za následek zvýšení tlakové ztráty[1].

K různým druhům zanášení během provozu dochází u všech typů průmyslově využívaných výměníků, jelikož velmi zřídka používají kapalinu bez nežádoucích příměsí. Výjimku mohou tvořit výměníky pro kryogenické teploty. Nežádoucí vrstva na povrchu výměníků se skládá, v závislosti na teplosměnném médiu, z pevných částic, sedimentujících částic, polymerů, solí, biologických produktů, korozních částic atd.[2].

Růst vrstvy usazenin v průběhu užívání postupně snižuje termodynamické vlastnosti výměníků, zvyšuje energetickou náročnost procesu, napomáhá vzniku koroze a může vyústit až v totální mechanické selhání výměníku[1].

1.1 Vliv zanášení na termodynamické vlastnosti výměníku

Jako tepelné zanášení označujeme stav, kdy dochází k nechtěnému shromažďování částic, které vytvářejí postupně se zvětšující pevnou vrstvu usazenin, působící jako teplotní izolant. Tato vrstva pak zvyšuje teplotní odpor na teplosměnných plochách a zvyšuje také hydraulický odpor vůči proudu kapaliny. Tepelná vodivost vrstvy usazenin je obvykle nižší než teplotní vodivost materiálů použitých jako teplosměnná plocha výměníků[1].



Obr. 1: Prostup tepla válcovou stěnou s vrstvami usazenin, přeloženo[3]

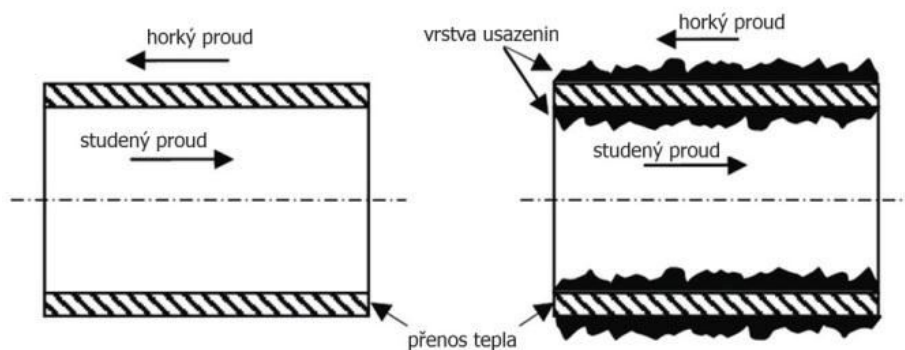
Celkový tepelný odpor pro trubkový výměník s vnitřním i vnějším zanesením je pak vyjádřen rovnicí (1):

$$R_T = \frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{\alpha_i A_i} + \frac{R_i}{A_i} + \frac{\Delta t_w}{k_w A_m} + \frac{R_o}{A_o} + \frac{1}{\alpha_o A_o} \quad (1)$$

Celkový součinitel přestupu tepla se pak může vyjádřit jako součet součinitele přestupu tepla za předpokladu čistého prostředí a přídavného teplotního odporu spojeného se zanášením.

$$\frac{1}{U_{o,f}} = \frac{1}{U_{o,c}} + R_F \quad (2)$$

Postupným narůstáním vrstvy usazenin se snižuje vnitřní průměr trubky výměníku a zvyšuje se drsnost jejího povrchu, což vede k růstu třecího odporu proti proudění. Vlivem usazenin se tak postupně zanášejí jednotlivé průtokové kanály, což vede ke zvyšování tlakové ztráty ve výměníku.



Obr. 2 Ukázka tvorby usazenin na stěnách trubky výměníku, přeloženo[4]

Mezi další nepříznivé vlivy zanášení patří vytváření prostředí pro vznik a šíření koroze, snížení tepelné účinnosti výměníku, což má negativní vliv na následné procesy či zvýšení tepelné zátěže celého systému a v neposlední řadě může dojít ke kontaminaci provozní kapaliny či výsledného produktu.

1.2 Náklady vznikající zanášením

Podobně jako kavitace u hydraulických strojů je zanášení u tepelných výměníků velmi nežádoucí, jelikož přináší dodatečné a nemalé náklady. Přítomnost usazenin na teplosměnných plochách způsobuje především tyto dodatečné výdaje:

1.2.1 Naddimenzování teplosměnné plochy

Při návrzích teplosměnných ploch výměníků se právě kvůli usazeninám a dalším faktorům běžně navyšuje plocha přibližně o 20-40 % oproti vypočítané ploše při ideálních podmínkách provozu.

1.2.2 Dodatečné náklady na energii

Jelikož zanášení snižuje rychlost přenosu tepla, je vynakládána dodatečná energie na její zvýšení. Zanášení také zvyšuje tlakovou ztrátu, a tím více je nutné dodávat energie pro splnění teplotního zatížení výměníku.

1.2.3 Náklady na opatření proti vzniku koroze a zanášení

Pro správné fungování výměníku je důležité pravidelné odstraňování nánosů na teplosměnných plochách, což přináší dodatečné náklady na čistící materiál a samotný čistící proces, personál a náklady související s ekologickým odstraněním odpadních produktů po čištění.

1.2.4 Náklady na odstávku výměníku

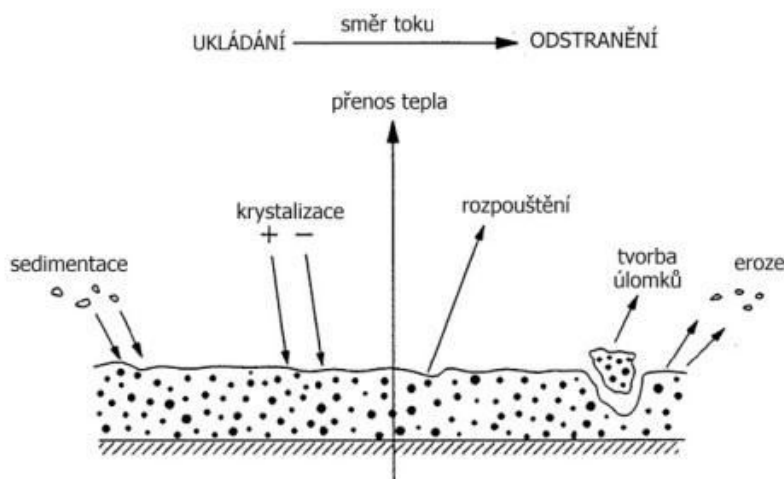
Provádění pravidelného odstraňování nánosů z teplosměnných ploch je spojeno s odstávkou výměníku. Proto nemůže výměník v tomto období sloužit své funkci a v případě odvětví, kde je provoz výměníků nezbytný, může dojít k odstávce celého výrobního procesu či využití pohotovostních/záložních výměníků. Veškeré tyto varianty představují dodatečné náklady pro provozovatele[1].

1.3 Charakteristiky ovlivňující zanášení

V průběhu let bylo vyvinuto mnoho provozních a konstrukčních řešení, která mají příznivý vliv na potlačení a velikost zanášení teplosměnných ploch[1].

1.3.1 Vlastnosti provozní kapaliny a její sklon k zanášení

Největší pozornost je věnována provozní kapalině a podmínkám příznivým pro vznik znečištění. Upravení provozu výměníku může vést k podmínkám, které způsobují nižší znečištění.

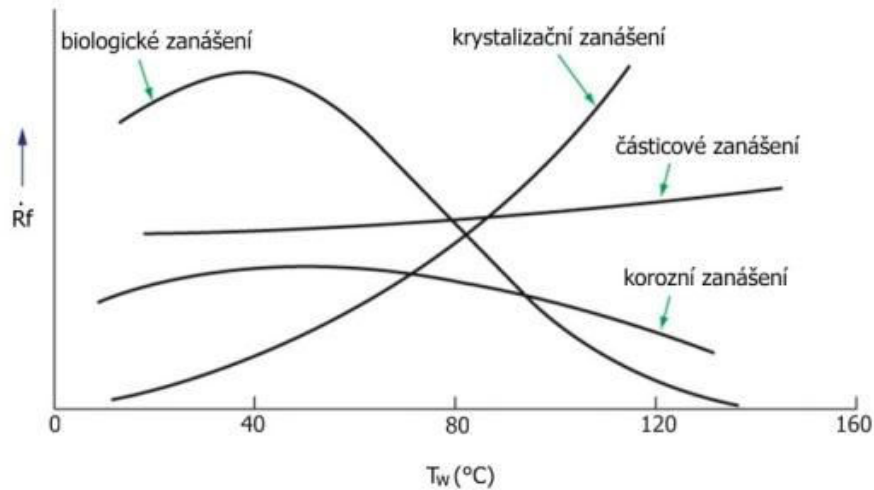


Obr. 3: Proces tvorby vrstvy usazenin na stěně výměníku, přeloženo[5]

1.3.2 Teplota teplosměnné plochy

Rychlost zanášení teplosměnných ploch se s rostoucí teplotou zvyšuje. To je způsobeno zejména tzv. efektem spékání (rychlejší shlukování částic), zvýšenou tvorbou koroze, rychlejšími chemickými reakcemi, zrychleným růstem krystalů, zrychlenou polymerizací

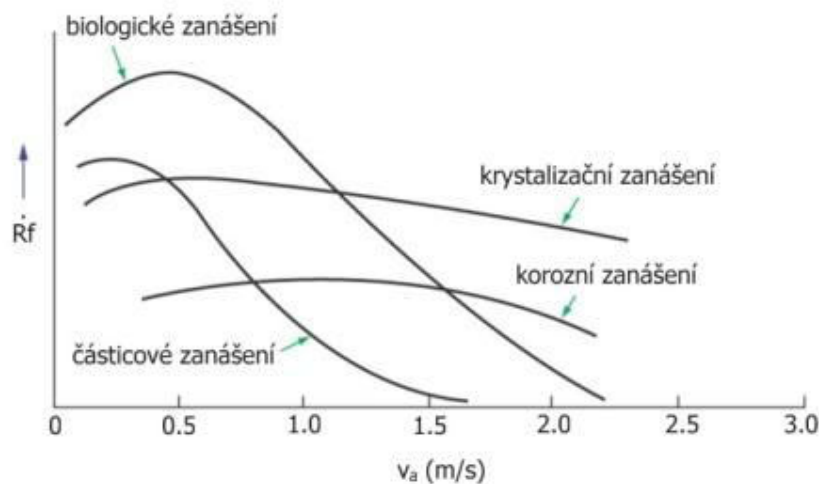
a sníženým účinkem látek proti zanášení. Při nižších teplotách tak vrstvy usazenin nenarůstají takovým tempem a jsou obvykle snadněji odstranitelné, nicméně u některých provozních kapalin mohou nízké teploty povrchů vyvolat zvýšenou krystalizaci a tuhnutí částic. Teplota teplosměnné plochy také výrazně ovlivňuje biologické zanášení, kdy vhodná teplota může velmi výrazně urychlit množení organismů, naopak velmi vysoká teplota je může usmrtit.



Obr. 4: Tvorba jednotlivých typů zanášení v závislosti na teplotě, přeloženo[6]

1.3.3 Rychlost provozní kapaliny a hydrodynamické účinky

Při uvažování tlakové ztráty dochází s rostoucí rychlostí proudění ke zvýšení tepelného výkonu výměníku a snižování rychlosti jeho zanášení. Ustálené proudění provozní kapaliny ve výměníku taktéž snižuje proces zanášení. V částech výměníku, kde jsou rychlosti proudu nižší, dochází snadněji k usazování částic. Naopak v oblastech, kde má proud vysokou rychlost, či prudce mění směr, může docházet k odlupování a odnášení usazenin vlivem stříhového napětí. Pro správný provoz výměníku je žádoucí dosahovat přibližně rovnoměrných rychlostí, aby nedocházelo k usazeninám ani jejich následnému odnosu a shromáždění na jiném místě.



Obr. 5: Tvorba jednotlivých typů zanášení v závislosti na rychlosti proudu, přeloženo[6]

1.3.4 Materiál trubky

Výběr materiálu trubek, které tvoří výměník, velmi výrazně ovlivňuje jejich následné zanášení, zejména pak zanášení způsobené korozi.

Materiál [1]:

- **Uhlíkatá ocel** Ačkoliv je velmi náchylná ke vniku a šíření koroze, je zároveň nejlevnější z běžně využívaných materiálů.
- **Měď** Ve spojení s vodou vykazuje biocidní vlastnosti (přímo hubí či omezuje růst organismů). Její užití je však omezené. Slitiny mědi jsou například zakázány u vysokotlakých parních výměníků v elektrárnách, jelikož korozní částičky slitin mědi jsou unášeny a následně se usazují ve vysokotlakých parních generátorech či mohou následně bránit v otáčení listů turbíny. Kvůli svým biocidním účinkům je měď také velkou hrozbou pro přírodní prostředí, zejména u vodních ekosystémů, a proto se v těchto prostředích nepoužívá.
- **Nekorozivní materiály** Mezi nekorozivní materiály patří zejména titan a nikl. Tyto materiály jsou však velmi drahé a nemají biocidní účinek, a tak jsou náchylnější k biologickému zanášení.
- **Skelné, grafitové a teflonové trubky** Tyto materiály jsou velmi odolné vůči zanášení a dají se snadno čistit. Jejich nevýhodou je však vysoká cena a horší mechanické vlastnosti.

Ačkoliv správná volba materiálu trubek výrazně ovlivňuje jejich zanášení, ochrana povrchu trubek vrstvou plastu, sklovitého smaltu, skla či některých polymerů může výrazně snížit usazování částic na jejich povrchu.

1.3.5 Nečistoty v provozní kapalině

Provozní kapaliny bývají velmi zřídka stoprocentně čisté. I malé množství nežádoucích příměsí v kapalině však může mít výrazný vliv na vznik a růst usazenin. Nejvíce je na příměsích závislé chemické usazování, kdy nežádoucí látky v kapalině mohou vyvolat další chemické reakce či iniciovat polymerizaci, a krystalizační zanášení, kdy nežádoucí příměsi mohou vyvolat proces usazování, jelikož slouží jako zárodky pro tvorbu krystalů. Nežádoucí příměsi v kapalinách nemají vždy pouze příznivý vliv na růst vrstvy usazenin (ale například písek v chladicí kapalině má ve výměnících čistící účinek a snižuje či přímo odstraňuje vrstvy usazenin).

1.3.6 Drsnost povrchu trubek

Materiály s větší drsností poskytují na svém povrchu více možností pro vznik zárodků usazování, jelikož se na jejich povrchu snáze usazují částice. Naopak hladší materiály odolávají po delší dobu vzniku usazenin a jsou zároveň i lépe čistitelné. Po zahájení vzniku usazování už však nehraje drsnost trubky přílišnou roli, protože ji nahrazuje drsnost vrstvy

usazenin na ní vytvořené. Takto mohou i ve velmi hladkých trubkách vznikat vrstvy usazenin s velkou drsností.

Dalším účinkem drsnosti trubek je pak vytváření turbulencí v proudu kapaliny, kdy na drsnějších površích vznikají větší turbulence.

1.3.7 Usazeniny

Usazeniny podporují tvorbu zanášení výměníků tím, že se vlivem gravitace usazují na spodních částech trubek ve výměnících. Jelikož velikost usazování závisí na rychlosti proudu kapaliny, dochází k největšímu zanášení v místech s nízkými rychlostmi proudu (pod $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Kvůli odstraňování usazenin bývají výměníky často na vstupních částech¹ vybaveny filtry či síty. U takto vybaveného výměníku však mírně roste tlaková ztráta.

1.3.8 Umístění znečištěné látky na stranu trubky

Stalo se obecným pravidlem, že znečištěnější látka se obvykle umísťuje tak, aby protékala uvnitř trubek výměníku. To pak výrazně usnadňuje jeho čištění. Dalším důvodem je, že uvnitř trubek je menší šance výskytu nízkorychlostních proudů či míst, kde by docházelo k sedimentaci, což by vedlo k urychlení zanášení.

1.3.9 Tok v mezitrubkovém prostoru

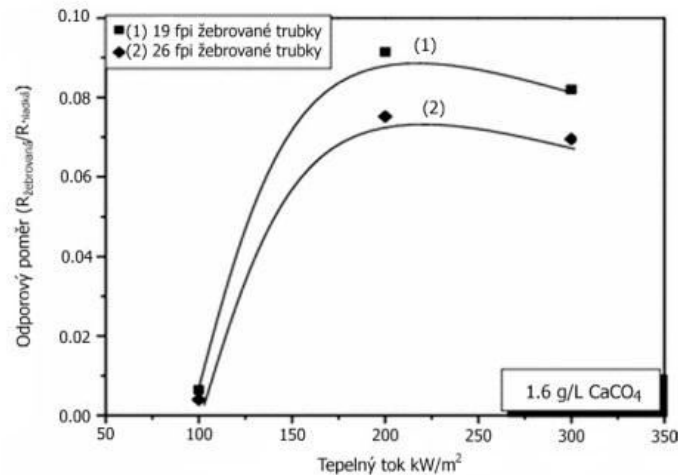
Rychlosti proudu dosahované v mezitrubkovém prostoru jsou obecně nižší a méně stabilní oproti rychlostem, kterých je dosahováno uvnitř trubek. V mezitrubkovém prostoru se také vyskytuje více míst, na kterých se vyskytují nulové či velmi malé rychlosti proudu. Tato místa jsou pak ideální pro shromažďování usazenin. Pakliže je očekáváno zvýšené zanášení právě v mezitrubkovém prostoru, je třeba klást zvýšený důraz na výběr správného typu přepážek a jejich rozmístění ve výměníku, aby bylo dosaženo optimálního průtoku kapaliny výměníkem, a tím snížena příležitost nečistot usazovat se na teplosměnných plochách.

1.3.10 Druh výměníku

Výměník s mírně žebrovanými trubkami

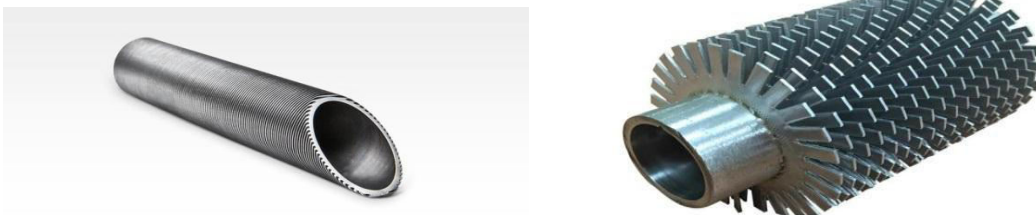
Dle obecných předpokladů by žebrované trubky měly být více náchylné k zanášení než trubky hladké. Žebrování by tak z hlediska zanášení bylo výhodné pro velmi čisté pracovní látky, kterými mohou být například některé velmi čisté plyny. U trubek s mírným žebrováním však není ovlivněna rychlost zanášení, ale spíše vývoj zanášecího procesu [7]. Hladké trubky a trubky s mírným žebrováním (s konstantním rozestupem a výškou žeber) vykazují za stejné období totožnou tloušťku vrstvy usazenin. Žebrování může dokonce i snižovat vrstvu usazenin oproti hladkým trubkám, jestliže je očekáváno, že pracovní látka výměníku bude vykazovat velkou míru krystalizačního zanášení.

¹ I výtupních pokud chceme chránit před usazeninami části systému za výměníkem.



Obr. 6: Ukázka závislosti tepelného odporu způsobeného zanášením na žebrování trubky, přeloženo [8]

Z pohledu vývoje vrstvy usazenin jsou nejprve nánosy usazenin rovnoměrně rozloženy mezi plochou žeber a samotné trubky. K nerovnoměrnému rozložení usazenin však začne docházet v okamžiku, kdy tloušťka usazenin na žebrech dosáhne maxima a mezery mezi jednotlivými žebry jsou zcela vyplněny usazeninami. K podobnému procesu zanášení dochází také u tzv. zoubkovaných trubek, kde je však nutné počítat ještě se šířením zanášení uvnitř mezer mezi jednotlivými sousedními zuby.



Obr. 7: Ukázka žebrovaných a zoubkovaných trubek [9] [10]

Návrhy na zvýšení přestupu tepla

Při zvažování užití žebrovaných trubek ke zvětšení plochy pro přestup tepla, a tím zvýšení celkového výkonu výměníku, hraje zanášení také svoji roli. Za použití experimentálních pokusů však bylo dokázáno, že zanášení by nemělo mít vliv na většinu zařízení, která zvyšují přestup tepla. Obecně by tak měli na zanášení působit stejní činitelé jak u běžných, tak i vysoce výkonných teplosměnných povrchů.

Deskové výměníky tepla

Vzhledem k tomu, že se v deskových výměnících nenacházejí oblasti s nízkými rychlostmi proudu, dochází v nich k vysokému víření pracovní kapaliny, rychlosti proudu jsou konstantní a povrch desek je hladký, dosahují hodnoty faktorů způsobující zanášení oproti trubkovým výměníkům zhruba jen 10-25 %.

Spirálové výměníky tepla

Ve spirálovém výměníku dochází k vysoké vířivosti pracovní látky, a tím i významnému snížení možného zanášení. I to je jeden z důvodů, proč se spirálové výměníky i přes jejich vyšší pořizovací cenu používají v některých částech rafinérského procesu [11].

1.3.11 Sezónní změny teplot

Tento bod je důležitý zejména v případě, že výměník využívá jako chladicí médium vodu, která může v zimním období dosahovat hodnot blízkých, či dokonce nižších, než je 0 °C. Zvýšená teplotní odchylka kapaliny od běžného stavu může výrazně ovlivnit výkon výměníku a zároveň působit na některé faktory ovlivňující zanášení.

1.3.12 Konstrukce zařízení

Konstrukce výměníku může výrazně ovlivnit zanášení. Například v oblastech za přepážkami ve směru proudu vzniká prostor pro výrazné zanášení.



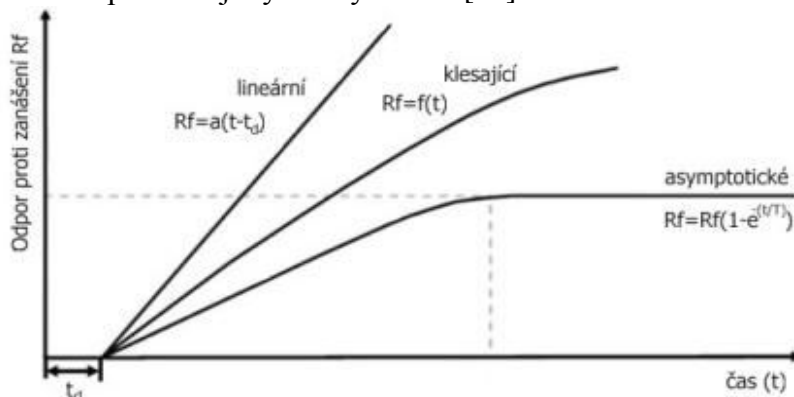
Obr. 8: Ukázka tvorby usazenin v místech s nižší rychlostí za přepážkami výměníku[12]

1.3.13 Geometrie a umístění

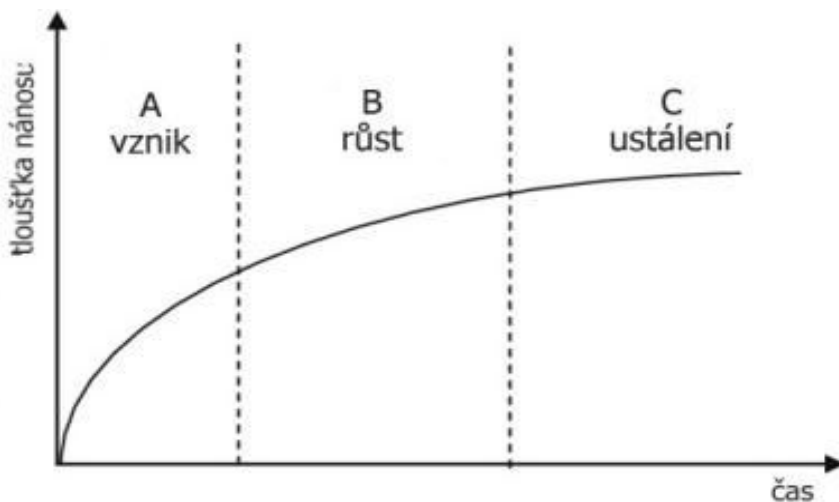
Volba rozměrů jednotlivých částí výměníku ovlivňuje jednotnost proudu jak v trubkovém, tak mezitrubkovém prostoru. Geometrie a vlastnosti povrchu trubek, jako jsou rozvržení trubek, rozteč trubek, hustota žebrování atd., mají vliv na zanášení. Užití lehce žebrovaných trubek ve vztahu k zanášení bylo zmiňováno už více. Trubek s výrazným žebrováním by se pak mělo využívat pouze v prostředí s mírně či středně znečišťující pracovní látkou. Správné umístění a dostupnost výměníku pak ulehčuje jeho pravidelnou údržbu a čištění.

1.4 Průběh zanášecího procesu

Kvůli skutečnosti, že tvorba usazenin je závislá na velkém počtu proměnných, se jedná o velmi komplexní jev. Dle empirických měření bylo zjištěno, že pro vývoj vrstvy usazenin ve výměnících za běžných podmínek je typické pět fází: iniciace znečištění, přenos na povrch, uchycení na povrchu, odnášení usazenin z povrchu a stárnutí usazenin. Tyto fáze pokrývají celý proces zanášení a předurčují výkon výměníku[13].



Obr. 9: Ukázka typů zanášecích křivek, přeloženo[14]



Obr. 10: Průběh tvorby vrstvy usazenin v čase, přeloženo[15]

1.4.1 Iniciace

Iniciace zanášení je první fází v průběhu zanášecího procesu. Předchází jí doba tzv. *prodlevy zanášení* t_d , kdy se netvoří na povrchu výměníku žádná vrstva. Základním mechanismem zanášení je během této fáze heterogenní nukleace. Časová doba prodlevy zanášení je tím kratší, čím je vyšší míra nukleace. Činitelé, kteří nejvíce ovlivňují délku doby t_d , jsou zejména teplota, rychlost kapaliny, chemické složení znečištěného proudu a vlastnosti a stav povrchu teplosměnné plochy výměníku. Nízkoenergetické povrchy (nesmáčitelné povrchy) vykazují obvykle delší dobu prodlevy, než povrchy vysokoenergetické (smáčitelné). V případě krystalizačního zanášení se doba prodlevy snižuje se zvyšujícím se stupněm přesycení kapaliny. U chemického zanášení se doba prodlevy snižuje se zvyšující se teplotou povrchu, a to z důvodu urychlení indukční reakce. Zvýšená drsnost povrchu pak u všech druhů zanášení snižuje dobu prodlevy, jelikož na povrchu výměníku vzniká více vhodných míst pro vznik nukleace, adsorpce a adheze.

1.4.2 Přenos

V průběhu této fáze dochází k přesunu důležitých prvků (např. kyslík), reaktantů či samotných částic způsobujících zanášení z proudu pracovní kapaliny na teplosměnný povrch. K přesunům dochází působením jednoho či více následujících mechanismů[13]:

Difuze: Vyjadřuje hromadný přesun znečišťujících částic z hlavního proudu kapaliny k teplosměnnému povrchu v důsledku rozdílu koncentrací mezi tekutinou proudu a tekutinou sousedící s povrchem.

Elektroforéza: Při tomto ději dochází k přesunu znečišťujících částic s elektrickým nábojem směrem k či od nabitého povrchu v závislosti na polaritě částice a povrchu. Ukládání způsobené elektroforézou se zvyšuje s tím, jak klesá elektrická vodivost kapaliny, zvyšuje se teplota a rychlost kapaliny, a také závisí na pH kapaliny či velikosti částic.

Termofoforéza: Dochází zde k přesunu malých částic vlivem existence teplotního gradientu. Chladnější povrch výměníku přitahuje koloidní částice², zatímco v případě teplejšího povrchu jsou tyto částice odpuzovány, tzn., že částice se pohybují ve směru záporného teplotního gradientu. Vliv termofoforézy je vyšší u výměníků pracujících s plyny než u typů využívajících kapaliny.

Difusioforéza: Popisuje kondenzaci plynného proudu na povrchu výměníku za působení koncentračního gradientu.

Sedimentace: Tento proces se týká usazování částic, jako je rez, jíla či prachu na povrchu výměníku vlivem působení gravitace. Pro vznik sedimentů musí být gravitační síla působící na částice větší než síla vztlaková. Sedimentace je významná u kapalin obsahujících velké částice a pohybujících se pomalými rychlostmi. Často se tak vyskytuje například v systémech chladicích věží a dalších průmyslových systémech, kde částice prachu a rzi působí jako katalyzátor a/nebo vstupují do komplexních reakcí.

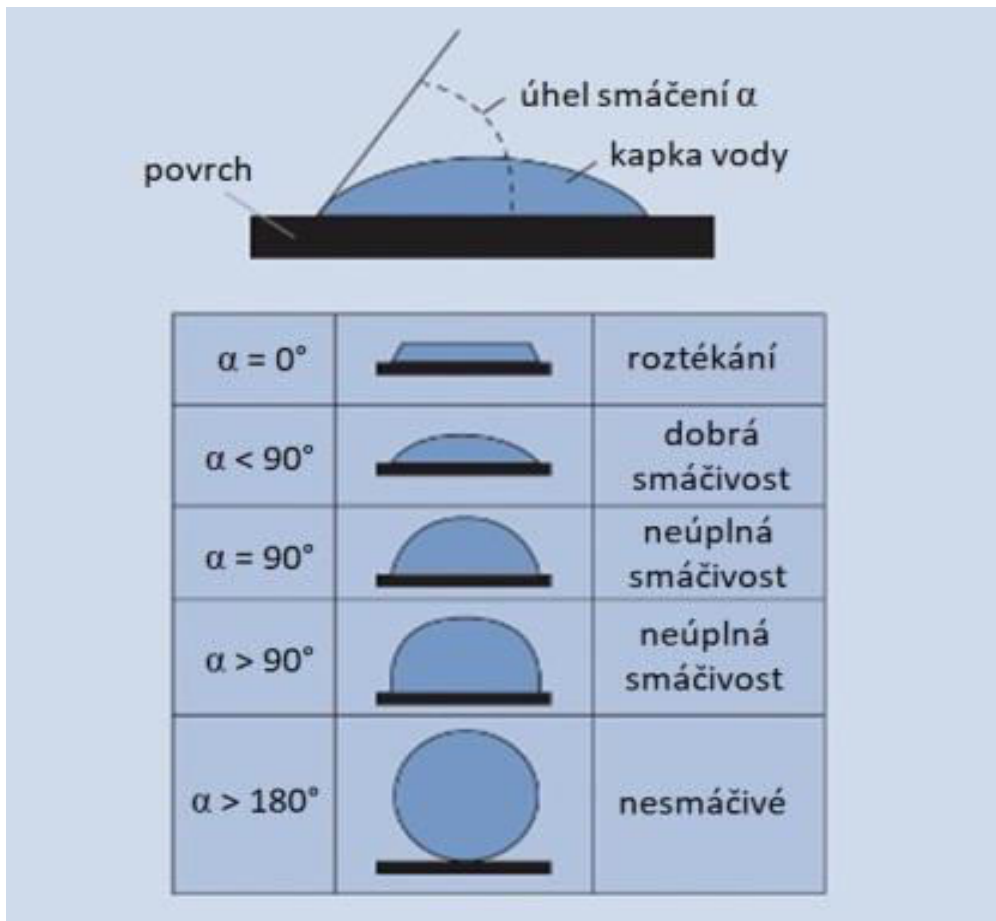
Setrvačnost: Velké částice mohou v proudu dosáhnout velkých rychlostí a při následné změně směru proudění se vlivem setrvačných sil nebudou dále pohybovat ve směru proudu, ale místo toho se usadí na povrchu.

1.4.3 Uchycení

Část znečišťujících částic, které se dostanou z proudu k povrchu, se na něm také přichytí. Proces uchycení není zcela důkladně popsán, ale je dán kombinací chemických a fyzikálních procesů. Proces uchycení ovlivňují zejména tři vzájemně provázané veličiny: stav povrchu, povrchové síly a pravděpodobnost uchycení.

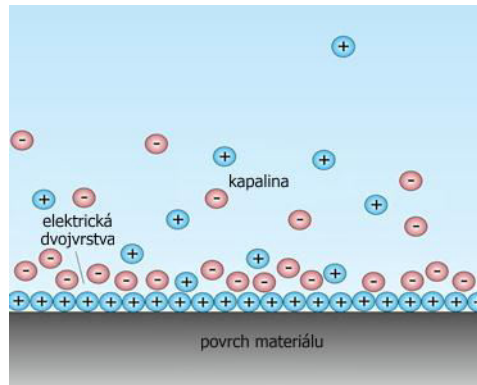
² částice, které svou velikostí spadají do rozmezí 1 nm až 1000 nm

Vlastnosti povrchu, které jsou důležité pro uchycení částic, jsou povrchová volná energie a smáčitelnost povrchu (kontaktní úhel a roztékání). Nesmáčitelné nebo nízkoenergetické povrchy (např. polymerové nebo keramické povrchy) mají delší prodlevu před vznikem zanášení než smáčitelné nebo vysokoenergetické povrchy a jsou méně náchylné k ukládání usazenin. Drsnost povrchu zvyšuje kontaktní plochu povrchu a poskytuje místo pro vznik nukleace a iniciaci procesu zanášení. Tím zvyšuje smáčitelnost u smáčitelných povrchů a snižuje nesmáčitelnost u povrchů nesmáčitelných.



Obr. 11: Smáčitelnost povrchu, přeloženo[16]

Mezi nejvýznamnější povrchové síly patří London-van der Waalsovy síly, které popisují mezimolekulární přitažlivost mezi nepolárními molekulami. Přitažlivost je v tomto případě vždy kladná. Další síly působící na povrchu jsou síly elektrické dvojvrstvy, která se skládá ze dvou opačně nabitých vrstev, které se vytváří při styku nabitého povrchu tuhé látky s kapalinou. Nabitý povrch tvoří tzv. vnitřní vrstvu, k níž jsou elektrostatickými a adsorpčními silami přitahovány či odpuzovány ionty, jejichž náboj neutralizuje náboj povrchu – tzv. vnější vrstva. Viskózní síly pak ovlivňují přichycení částic pohybujících se směrem k povrchu.

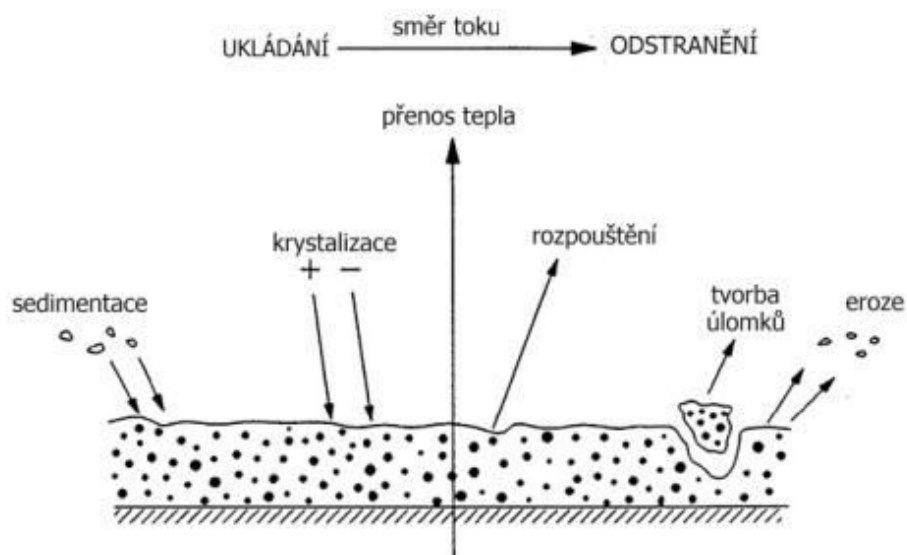


Obr. 12: Tvorba elektrické dvojrstvy, přeloženo[17]

Pravděpodobnost uchycení představuje zlomek částic, které se dostanou ke stěně a zůstanou tam přichyceny. Tato pravděpodobnost je užitečný statistický nástroj pro určení míry uchycení částic v této části zanášecího procesu.

1.4.4 Odnos usazenin

Některé usazeniny jsou z povrchu odstraněny hned po ulpění, jiné až po delší době. K odnášení usazenin může docházet souběžně s uchycováním částic na povrchu výměníku. Rozdíl v množství usazujících se a odpadávajících částic udává celkové zanášení a vytváří tak tvar charakteristické křivky zanášení. K odnášení usazenin ze stěn výměníků dochází vlivem působení: smykového napětí, turbulentních vírů, rozpouštění usazenin a eroze.

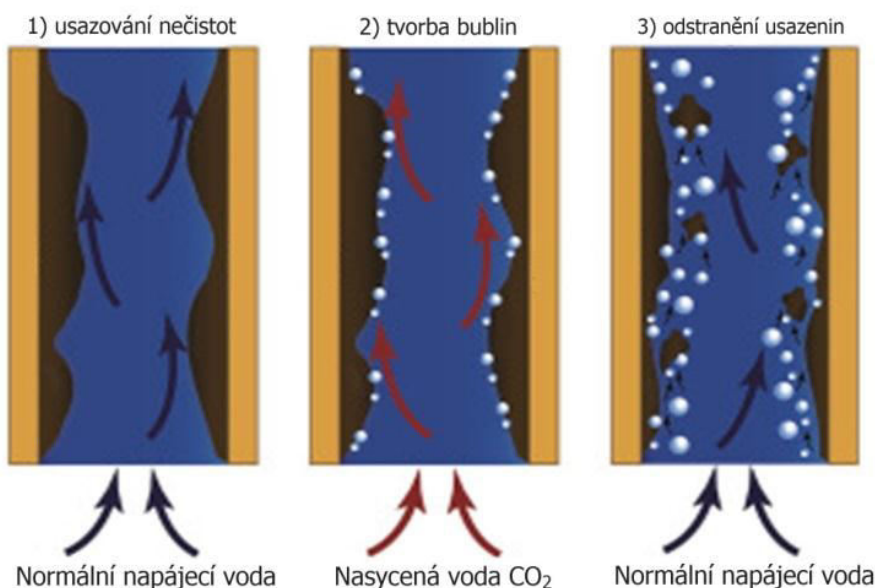


Obr. 13: Proces tvorby vrstvy usazenin na stěně výměníku, přeloženo[5]

Smykové napětí je vyvoláno na stěně výměníku mezi vrstvou usazenin a proudem kapaliny. Jak roste vrstva usazenin, prostor pro průtok kapaliny se zmenšuje, a tak roste rychlost proudu. To vyvolává i zvýšení smykového napětí a nové částičky usazenin jsou rychleji odnášeny. Vrstva usazenin tak bude růst pouze za předpokladu, že přitažlivé síly ve vrstvě usazenin jsou větší, než je hodnota smykového napětí.

V proudu kapaliny se příležitostně mohou vyskytnout *turbulentní víry*, které zvedají z vrstvy usazenin částice a vrací je zpět do proudu kapaliny.

Odnos částic z vrstvy usazenin je ovlivněn i jejich *rozpuštěností*. Jelikož částice zřejmě byly v době jejich přichycení na vrstvu usazenin nerozpustné, dojde k jejich rozpuštění pouze za předpokladu, že se změní nějaká z charakteristik ovlivňujících zanášení nebo se změní vlastnosti proudící kapaliny. K nejčastějším změnám patří změna: lokální teploty, rychlosti proudu kapaliny, zásaditosti a dalších provozních veličin. Příkladem změny vlastnosti proudící kapaliny pro odstranění vrstev usazenin může být zvýšení teploty kapaliny pro odstranění biologického znečištění nebo změna zásaditosti kapaliny pro odstranění vrstev korozního zanášení. Při rozpouštění vrstvy usazení se částičky uvolňují v podobě iontů.



Obr. 14: Ukázka rozpouštění a odnosu usazenin, přeloženo[19]

Eroze je úzce spojena s celkovým procesem odstraňování. Při erozi dochází k odstraňování materiálu ve formě částic. Pokud je však vrstva usazenin složena z dobře zkrystalizovaného čistého materiálu, je velmi těžké ji odstranit. Pokud je v opačném případě složena z různých materiálů (zejména různých typů solí), její odstranění by mělo probíhat snadněji. Zvláštní formou eroze jsou odštěpky, které mohou být vyvolány nárazem cizího tělesa (například písek) do vrstvy usazenin.

1.4.5 Stárnutí usazenin

Proces stárnutí započne, jakmile se částice usadí na teplosměnné ploše, případně již na vytvořené vrstvě usazenin. Stárnutí usazenin popisuje veškeré změny, které působí na vrstvu usazenin v průběhu času. Stárnutí usazenin zahrnuje jak fyzikální a chemické přeměny, tak i zuhličatění materiálu v případě biologického zanášení (organismy jsou postupně otravovány korozi a odumírají) nebo dehydrataci a změnu krystalové mřížky u anorganických usazenin. Příмым následkem stárnutí usazenin je změna tepelné vodivosti vrstvy usazenin. Proces stárnutí může mít oslabující nebo naopak posilující vliv na vrstvu usazenin.

1.5 Mechanismy zanášení

Je důležité pochopit mechanismy tvorby zanášení, které vytvářejí vrstvu nánosů na teplosměnných plochách výměníků, abychom mohli účinně předcházet jejich tvorbě a případně zvolili správný postup pro jejich zmírnění či odstranění. Každý z těchto mechanismů je specifický tím, jaké chemické, fyzikální či jiné procesy ho ovlivňují. V určitých případech se může více druhů mechanismů překrývat a probíhat souběžně.

Dle odborné literatury jsou mechanismy zanášení děleny na sedm základních druhů [20]:

- Korozní zanášení
- Biologické zanášení
- Částicové a sedimentační zanášení
- Chemické zanášení
- Zanášení v důsledku mrazu a tuhnutí
- Precipitační a krystalizační zanášení
- Kombinované zanášení

1.5.1 Korozní zanášení

K tomuto druhu zanášení dochází při reakci materiálu výměníku s kapalinou a následném vzniku korozních produktů, které se ukládají na teplosměnné ploše. Korozní produkty mají za následek změnu zejména tepelné vlastnosti povrchu, tzn., vytvoří vrstvu izolantu. Velikost korozního zanášení je dána zejména chemickým složením proudu kapaliny a materiálem teplosměnné plochy. Mezi nečistoty, které ovlivňují chemické složení kapaliny, patří především sirovodík, amoniak a chlorovodík[21]. Nejběžnější formou tohoto druhu zanášení je úbytek materiálu teplosměnné plochy způsobený celkovým zeslabováním.

Rozlišujeme dva mechanismy korozního zanášení[22]:

- a) **Přímý mechanismus** – korozní produkty se po dokončení reakce ihned hromadí a ulpívají na povrchu;
- b) **Nepřímý mechanismus** – korozní produkty mohou být přemístěny proudem pracovní látky z korozního povrchu na jiné místo systému, kde jsou usazeny sedimentací

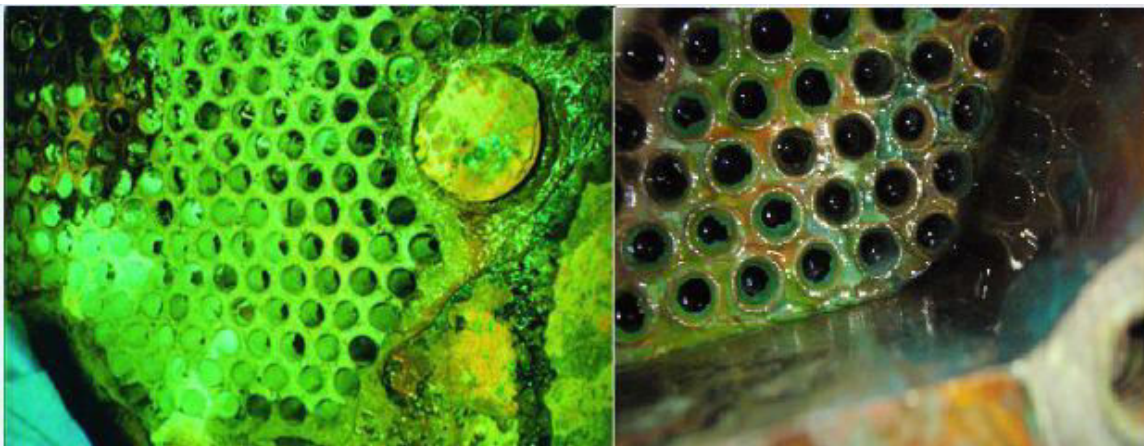
V případech, kdy pracovní látka způsobuje korozi kovového teplosměnného povrchu výměníku, může již vzniklá korozní vrstva chránit materiál před další korozi. V takovém případě jakýkoliv pokus o vyčištění povrchu má za následek pouze urychlení koroze a poškození materiálu teplosměnných ploch[23]. Prvním krokem pro ochranu před korozním zanášením při projektování výměníku by měla být vhodná volba korozivzdorného materiálu, kterým jsou např. nerezavějící oceli nebo slitiny na bázi niklu, a vyloučení rizikových kombinací zvoleného materiálu výměníku s látkami obsaženými v provozní kapalině v tab. 1[24]. Dalšími projektovými opatřeními jsou použití ochranných povrchů na teplosměnných plochách (plast, smalt nebo sklo), přidání chemikálií potlačujících korozi do provozní kapaliny, či použití katodové ochrany[1].

Tab. 1: Riziková kombinace volby materiálu výměníku a média v něm proudícím[18]

Kovový materiál	Prostředí
Uhlíkové oceli	NaOH Mořská vod Uhličitany CO a CO ₂ Dusičnany
Korozivzdorné oceli <ul style="list-style-type: none"> • Austenitické • Feritické • Dvoufázové 	<ul style="list-style-type: none"> • NaCl, NaOH, mořská voda, MgCl • H₂S, NH₄Cl • Stejně prostředí jako austenitické, avšak odolnější
Slitiny NiCrFe	Horké kyselé a alkalické roztoky
Slitiny Cu - Zn	NH ₃ , amonné sloučeniny, vodní pára
Slitiny Al	NaCl, mořská voda, vodní pára
Slitiny Ti	Methanol, N ₂ O ₄

1.5.2 Biologické zanášení

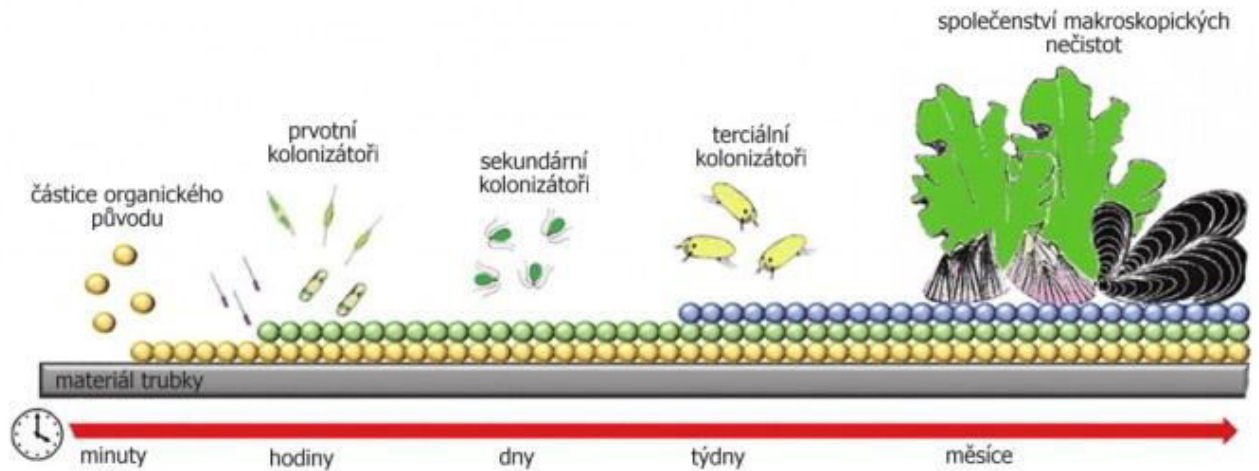
Ukládání a růst částic organického původu na teplosměnných plochách se nazývá biologické zanášení. Mezi částice vytvářející zanášení patří mikroorganismy a makroorganismy společně s jejich produkty. Mezi mikroorganismy vytvářející mikrobiální zanášení se řadí bakterie, řasy, plísně či houby. Makrobiální zanášení pak způsobují makroorganismy jako mořské a vodní řasy, korýši, mušle či různé škeble[13]. Vrstva vytvořená těmito organismy může i při malé tloušťce výrazně ovlivnit součinitel přestupu tepla[23].



Obr. 15: Ukázka biologického zanášení na stěnách výměníku[25]

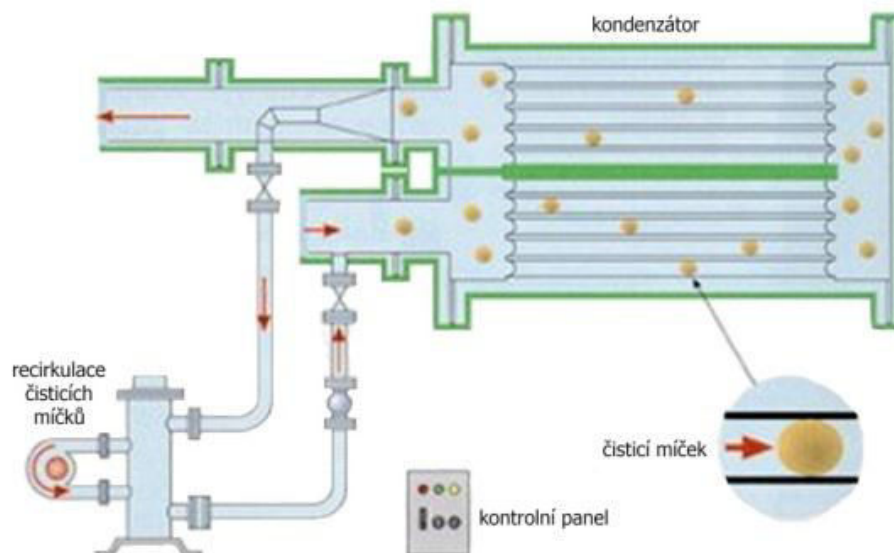
Biologické zanášení se vyskytuje nejčastěji u výměníků využívajících jako chladicí médium vodu z řek, jezer, moře či různých jiných vodních zdrojů. Po kontaktu s teplosměnnou plochou se na ní mohou tyto částice uchytit a dále růst a množit. Následkem takového typu zanášení pak může být úplné zarůstání trubek výměníku, zachytávání dalších částic, jako je například bláto, či vytvoření prostředí pro růst koroze[1]. Mikrobiální zanášení

obvykle předchází makrobiálnímu, a proto se více zohledňuje při návrzích výměníků. Pro vznik mikrobiálního zanášení stačí poměrně malé množství organismů v chladicí vodě. Jako přibližná hranice pro vznik tohoto typu zanášení je uváděno množství $1 \cdot 10^5$ buněk·ml⁻¹ pro bakterie a $1 \cdot 10^3$ buněk/ml u hub[26]. Biologické zanášení ve výměníku začíná obvykle tvorbou tzv. biofilmu, či vrstvy slizu, který vytvářejí příznivé podmínky pro další růst organismů. Jelikož se v této formě zanášení jedná o biologické organismy, teplota pro jejich přežití se pohybuje v mezích 0 – 90 °C a pro jejich růst a šíření je to rozmezí 20–50 °C[2].



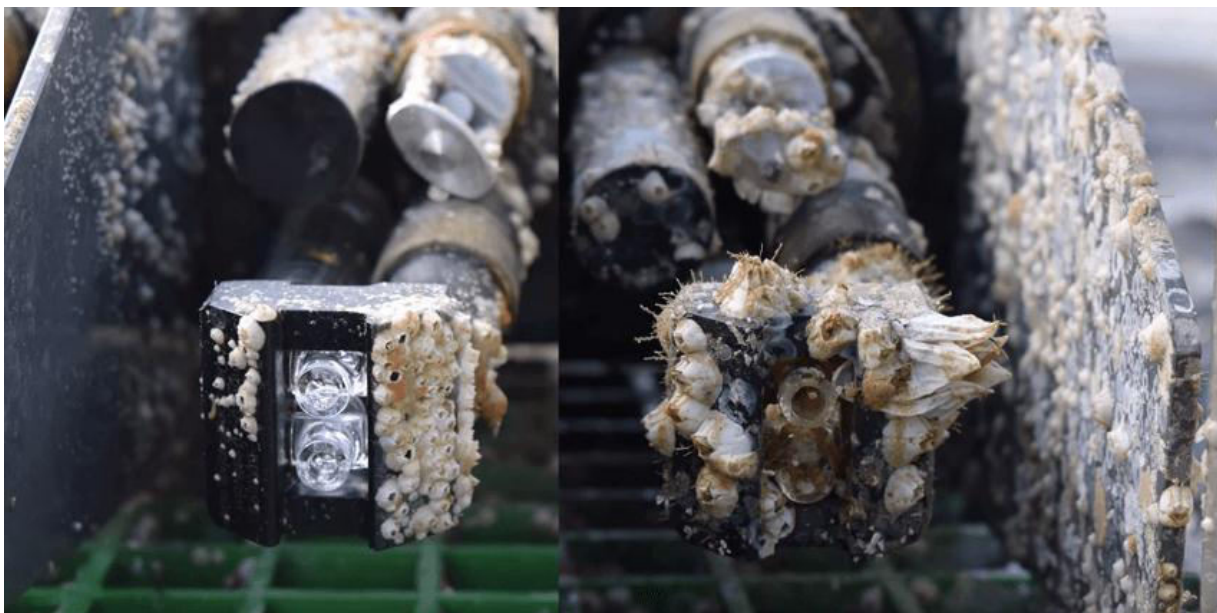
Obr. 16: Postupná tvorba biologického zanášení v čase, přeloženo a upraveno[27]

Pro zamezení tohoto typu zanášení se již v projektové fázi doporučuje používat materiály s vyšším obsahem mědi, která má biocidní účinky. K mechanickému odstraňování již vytvořené vrstvy biologického zanešení se pak využívá různých typů filtrací, kartáčování, vzduchových rázů či různých čistících gumových míčků. Další možností je termální čištění, při kterém je výměník propláchnut vodou, či zahřán nad teplotu přežití bioorganismů.



Obr. 17: Ukázka čištění kondenzátoru pomocí čistících míčků, přeloženo[28]

Častým řešením biologického zanášení je také přidání chemických přípravků do pracovní kapaliny, které mají za účel usmrtit organismy. Nejčastěji se využívá chloru, bromu, ozonu, měničů pH či různých přídatných solí. Další možností jak snížit zanášení je využití ultrafialového záření[1].



Obr. 18: Ochrana před biologickým zanášením pomocí UV zářiče[29]

1.5.3 Částicové a sedimentační zanášení

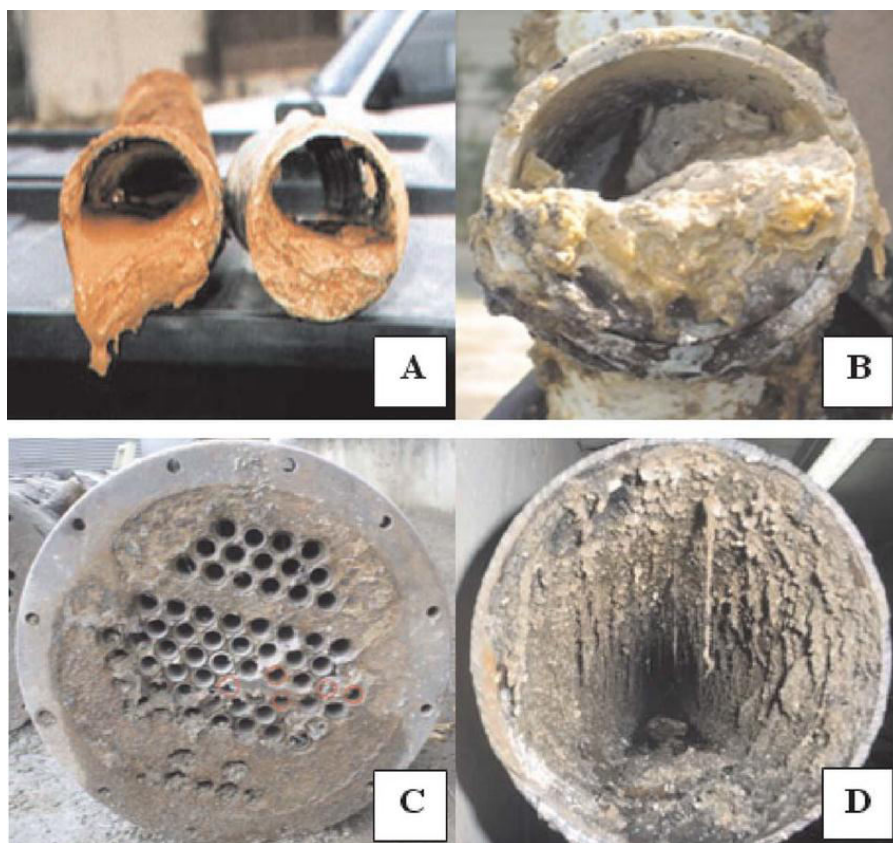
Pro případ, kdy dochází k ucpávání částic obsažených v proudu pracovní tekutiny na teplosměnné ploše, se používá termín *částicové zanášení*. Pokud je usazování částic způsobeno gravitační silou, jedná se o *sedimentační zanášení*.

K tomuto typu zanášení dochází nejčastěji při ukládání směsi částic ve výměníku. Částice v proudu pracovní látky jsou směsí různě velkých částic přiváděných do výměníku a částic v něm vytvářených a nejčastěji se jedná o produkty koroze rozptýlené v pracovní látce, jíly a minerály v říční vodě, suspendované látky v chladicí vodě, saze v nedokonalém spalování, prach ve vzduchových chladičích atd.[2].

Sedimentační zanášení nejčastěji probíhá, pokud rychlost pracovní látky klesne pod určitou tzv. terminální nebo kritickou úroveň a částice rozptýlené v proudu pracovní látky se začnou usazovat u dna výměníku. Obvykle tyto usazeniny pevně nepřilnou k povrchu, a čím je vrstva nánosů vyšší, tím vyšší je i pravděpodobnost, že tato vrstva bude pracovní látkou částečně sama odstraněna[24].

K efektivnímu odstranění usazenin je zapotřebí dosáhnout dostatečné rychlosti proudící tekutiny. Pokud se k usazeninám nelze dostat mechanickými čisticími prostředky nebo pokud není výměník rozebíratelný, je možné dočasně zvýšit rychlost proudění tekutiny. Nečistoty je nutné na výstupu z výměníku zachytávat pomocí filtrů nebo sít. Mechanické čištění je také

velmi efektivní, ovšem je ho možné použít pouze v případech, kdy jsou usazeniny přístupné. Odstranění se pak provádí pomocí kartáčů nebo vysokotlakých vodních proudů[30].



Obr. 19: Ukázka různého sedimentačního zanášení[31]

1.5.4 Chemické zanášení

Nánosy jsou při tomto typu zanášení výsledkem chemických reakcí probíhajících v proudícím médiu. Na rozdíl od korozního zanášení se materiál teplosměnných ploch nezúčastňuje na vzniku tohoto typu zanášení, avšak může působit jako katalyzátor chemických reakcí, jako jsou krakování, koksování, polymerizace či oxidace[13].

Tvorba tohoto zanášení velmi významně závisí na teplotách média. Zanášení může vznikat od hodnot teploty okolí až po teploty přesahující 1000 °C, četnost chemických reakcí však roste exponenciálně s rostoucí teplotou tekutiny proudící výměníkem. Místa s největší tvorbou chemického zanášení se tak vyskytují v teplotních lokálních maximech výměníku (vrstvy nánosů se tvoří ale po celé teplosměnné ploše)[2]. Protože je při vlastní konstrukci výměníku snaha dosáhnout co nejvyšší teploty tekutin ke zvýšení jeho přenosové schopnosti, následkem je i nárůst chemického zanášení, které zpětně tepelný výkon výměníku snižuje. Proto by měl být vliv tohoto zanášení uvažován při návrhu výměníku například snížením doby pobytu média ve výměníku[30].

Usazované částice jsou obvykle organického původu, avšak pro vytváření chemických reakcí může být potřebné i působení anorganických částic. Tepelná nestabilita látek, jako jsou

například asfaltény či bílkoviny, může mít za následek vznik prekurzorů, což jsou sloučeniny účastníci se chemických reakcí při vzniku jiných sloučenin. Chemické zanášení se tak obvykle vyskytuje zejména v petrochemickém a zpracovatelském průmyslu[2].

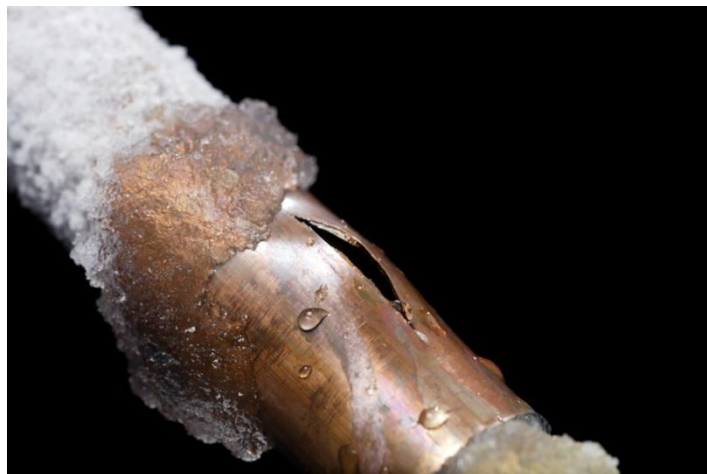


Obr. 20: Ukázka výměníku postiženého chemickým zanášením[25]

1.5.5 Zanášení v důsledku mrazu a tuhnutí

U tohoto typu zanášení dochází k zamrznání kapaliny nebo složek s vyšší teplotou tání obsažených ve vícesložkových roztocích na podchlazených teplosměnných plochách. Běžnými příklady je tvorba námrazy z vlhkosti obsažené ve vzduchu, zamrznání chladicí vody v nízkoteplotních procesech, či ukládání parafinových vosků při chlazení média obsahujícího uhlovodíky[13].

Tvorbu tohoto zanášení ovlivňuje zejména nízká teplota (obvykle teplota okolí či dokonce nižší v závislosti na místním tlaku), hmotnostní průtok pracovní látky, krystalizační podmínky látky či stav teplosměnné plochy[2].



Obr. 21: Porušení stěny trubky způsobené tuhnutím média[32]

Jedná se o nejsnáze odstranitelnou formu usazenin. Pro odstranění venkovní námrazy na výměníku postačí zvýšit teplotu desky nebo teplotu pracovní tekutiny. Pokud často dochází k namrznání pracovní tekutiny, je nutné změnit její vlastnosti posunutím bodu tuhnutí na nižší teplotu nebo zvolit vhodnější umístění výměníku včetně přívodního a zpětného potrubí proudících tekutin[30]. Pakliže je tento typ zanášení uvažován již v návrhu, je možnost zvolit vysoký součinitel zanášení, což má však za následek zvýšení naddimenzování plochy výměníku a jeho následnou nízkou efektivitu v čistém stavu. Další možností je volba souproutého proudění oproti protiproutému[1].



Obr. 22: Námraza vzniklá u výměníku v motoru letounu Boeing 777[33]

1.5.6 Precipitační a krystalizační zanášení

Při precipitačním zanášení dochází k vysrážení solí, které jsou rozpuštěné v pracovní kapalině, na teplosměnné ploše výměníku při překročení jejich míry rozpustnosti. Přesycenost solí v kapalině je tak nezbytná pro vznik tohoto typu zanášení. K vysrážení solí dochází v kapalině, v mezní teplotní vrstvě či přímo na povrchu teplosměnné plochy.

K tomuto typu zanášení dochází zejména u vodních roztoků a jiných kapalin obsahujících rozpuštěné soli při jejich ochlazování či zahřívání. Pokud roztok obsahuje normálně rozpustné soli (rozpustnost a koncentrace solí se snižuje se snižující teplotou), dochází k tvorbě tohoto zanášení na studených površích. Naopak u solí s inverzní rozpustností, jako jsou například vápenné či hořečnaté soli, dochází k tvorbě zanášení při ohřívání roztoku.

Nejčastěji k tomuto typu zanášení dochází při používání neupravené vody, mořské vody, geotermální vody, slané vody, roztoků obsahujících hydroxid sodný atd.

K tvorbě krystalizačního zanášení dochází zejména u plyných pracovních látek obsahujících malé množství organických sloučenin, které mohou vytvářet krystaly na chladných površích.

Proces precipitace a krystalizace začne obvykle vznikat na tzv. nukleačních místech (obvykle nedokonalosti povrchu) a odtud se dále šíří po celém povrchu. Pokud je vrstva

usazenin tvrdá a houževnatá, hovoříme o tzv. *scalingu* (obvykle u solí s inverzní rozpustností). V případě, že je vzniklá vrstva porézní (až kašovitá), hovoříme o tzv. *kalovém charakteru* usazenin[2].



Obr. 23: Ukázka precipitačního a krystalizačního zanášení[34]

Těmto typům zanášení lze předejít přidáváním chemických látek do tekutiny. Přídavné chemické látky zabráňují vylučování částic z pracovní tekutiny a k jejich následnému usazování na deskách výměníků. Usazeniny vzniklé krystalizací nebo precipitací jsou velmi pevné a tvrdé, a proto je jejich odstranění mechanickou cestou velmi obtížné. Čištění se provádí nejčastěji chemicky[30].



Obr. 24: Ukázka precipitačního a krystalizačního zanášení[25]

1.5.7 Kombinované zanášení

V praxi se obvykle na zanášení výměníku podílí souběžně více zanášecích mechanismů uvedených výše. To vyvolává potíže predikování zanášecí vrstvy, jejího omezování, či případného odstraňování, jelikož změna jedné z proměnných, jako je například teplota média, může vyvolat rozdílný vliv na vrstvu usazenin u výše zmíněných zanášecích mechanismů.



Obr. 25: Ukázka různých druhů zanášení působících na výměník[35]

2 Zhodnocení míry úsad v konkrétním výměníku na základě rozboru kvality vody

Pro výpočet zanášení konkrétního tepelného výměníku použiji výměník instalovaný společností ČEZ, a. s. v jaderné elektrárně Dukovany. Zde se používá jako chladicí médium pro napájení výměníku voda odebíraná z povrchového zdroje, z vodního díla Dalešice, vyrovnávací nádrže Mohelno na řece Jihlavě. Největší část odebírané vody z této nádrže je použita právě pro doplňování chladicích okruhů, mnohem menší část je pak užita pro výrobu demineralizované vody, tzv. demivody³.

Pro chlazení různých technologických zařízení se používá chladicí voda. Většinou se používají cirkulační chladicí systémy s otevřeným okruhem. Chladicí voda cirkuluje chladicím okruhem, přičemž teplo se odvádí stykem oteplené vody s atmosférickým vzduchem v chladicích věžích. V chladicích věžích dochází k ochlazení procházejícím vzduchem a odpařováním vlastní cirkulační vody. Odpařováním dochází k zahušťování zbývající vody v okruhu.

Ke snížení respektive udržování koncentrací solí a suspendovaných látek na přijatelné úrovni se část oběhové chladicí vody z chladicího okruhu odvádí jako odluh při současném doplňování ztrát (odluh a odpar) upravenou čerstvou vodou.

Nejhrubší nečistoty se odstraňují již před vstupem vody do čerpadel čerpací stanice na pravém břehu nádrže. Plovoucí kmeny, větve, nebo různé odpadky jsou zachytávány pomocí česel. Z vyrovnávacího vodojemu surová voda samospádem odtéká buď do úpravní chladicí vody, nebo do chemické úpravní vody.

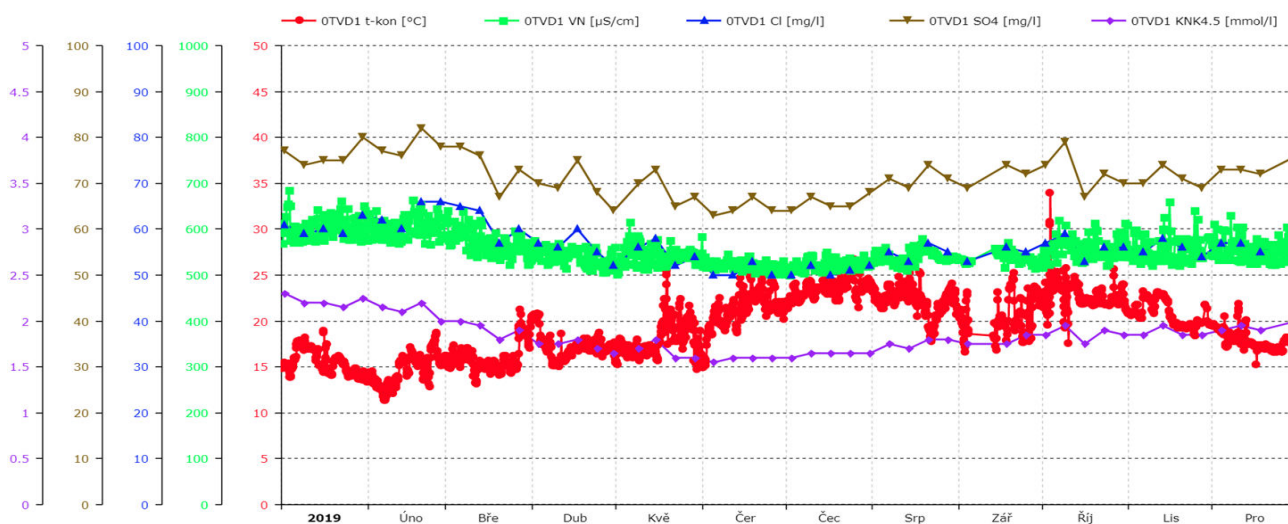
Pro okruh cirkulační vody, systémy technické vody důležité (TVD) a technické vody nedůležité (TVN) a požární vody je potřeba voda určité kvality. Pokud voda nespĺňuje chemické limity, projde úpravnou chladicí vody. K čištění surové vody slouží čičiče, do kterých je voda přiváděna samospádem. Do vody se přidávají koagulanty, což jsou látky, které napomáhají srážení. Nečistoty vytvoří vločky, které se dají lépe odstranit. Voda zbavená nečistot odtéká do centrální čerpací stanice.

Voda v řece Jihlavě, z které je voda pro účely elektrárny čerpána, nepřesahuje stanovené chemické limity a není potřeba ji dále upravovat například čičením[37].

³ Demineralizovaná voda se vyznačuje tím, že je snížena až o 96% minerálních látek a až o 98% organických látek vůči vstupní vodě, tím pádem nezpůsobuje tvorbu vodního kamene[36].

2.1 Chemické složení odebírané vody v čase

Provozovatel výměníku provádí rozbory odebírané vody v pravidelných intervalech. Díky tomu je možné vytvořit graf závislosti obsahu chemických sloučenin obsažených ve vodě v průběhu celého kalendářního roku. Z uvedených křivek níže je zřejmé, že sledované veličiny se v průběhu roku dramaticky nemění, ale zároveň je možné vypořizovat trend lehkého poklesu v průběhu letních měsíců. Opačný trend lze pak sledovat u teploty odebírané vody.



Obr. 26: Obsah chemických sloučenin obsažených ve vodě v průběhu kalendářního roku, zdroj vlastní

2.2 Sledované parametry

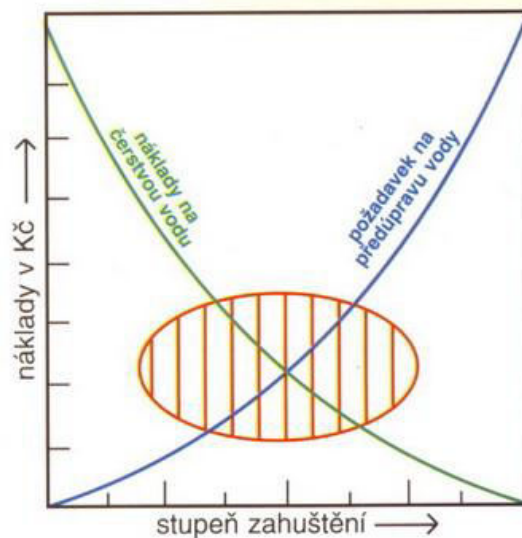
Pro správné fungování chladicího okruhu se musí používat voda splňující stanovenou normou ČSN 75 71 71 (757171) Kvalita vod - Složení vody pro průmyslové chladicí okruhy.

Tato norma platí pro řízení chemických režimů chladicích okruhů v průmyslových a energetických závodech. Doporučuje ukazatele kvality chladicí vody v různých typech chladicích okruhů a chladičů, a dále stanovuje doporučené ukazatele složení vody, která přichází do styku s rozváděcím potrubím, vodními komorami a teplosměnnými plochami chladičů a dalšími konstrukčními prvky chladicích okruhů, jako jsou atmosférické chladiče, vany apod. Příměsi v chladicí vodě jsou doporučeny z hlediska koroze konstrukčních prvků, tvorby nánosů (zejména na teplosměnných plochách chladičů)[38].

Se zhoršující kvalitou používané chladicí vody roste míra usazenin v systému, která tak negativně ovlivňuje jeho účinnost, což se projeví v nákladech na provoz systému. Proto je žádoucí najít optimální rozhraní parametrů kvality vody oproti nákladům vynaloženým na její úpravu.

U uzavřených okruhů, kde je teplo odváděno ohřevem chladicí kapaliny a nedochází k přílišným ztrátám kapaliny, se dohlíží na alkalitu cirkulační vody a případně dochází ke změkčování doplňované vody.

U otevřených chladicích okruhů, kde je chladicí výkon zajišťován odparem vody, je tato hranice vyjádřena rozsahem tzv. stupně zahuštění. Ten roste při odpařování chladicí vody (a tím pádem i jejím zahušťování), čímž dochází po určité době k překročení rozpustnosti přítomných solí a ke tvorbě vodního kamene. Je tedy potřeba vodu v okruhu udržovat na správném zahuštění tak, aby nedocházelo k vylučování minerálních úsad na vodní straně okruhu. Toho se dosáhne neustálým odpouštěním části okruhové vody do odpadu – tzv. odluhováním části vody v systému a napouštěním vody nové[39].



Obr. 27: Ukázka ideální oblasti zahuštění kapaliny[39]

Velikost odluhu se orientačně určuje tak, že velikost odluhu se pokládá za rovnou velikosti odparu. Při dodržení tohoto pravidla dojde v chladicím okruhu k nárůstu solnosti cirkulující vody na dvojnásobek solnosti vody dopouštěcí. Například činí-li odpar na chladicí věži $1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, nastavuje se odluh rovněž na $1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a průtok dopouštěcí vody na chladicí věž pak činí $2 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ [40].

Pro správné fungování chladicího okruhu se dají stanovit obecné požadavky na kvalitu napájecí vody zaměřující se na potlačení koroze konstrukčních materiálů a vzniku nánosů organických solí. Pro plnění těchto požadavků se při vodním rozboru zkoumá především obsah rozpuštěných látek ve vodě jako O_2 , CO_2 , NO_2 , Cl , SO s ohledem na korozi a vznik korozivních kalů a pro tvorbu úsad je pak zásadní obsah SO , CO , PO , SiO_2 , Ca_2^+ , Mg_2^+ , Fe_2^+ , Mn_2^+ a všechny ostatní koloidní a nerozpuštěné látky.

Obecné požadavky na kvalitu napájecí vody[41]:

- Bezbarvost, bez zákalu a bez sedimentačních látek
- Bez tvorby chemických nebo biologických povlaků (nízká koncentrace železa a manganu), malá celková mineralizace
- Nesmí být agresivní vůči kovům a stavebninám
- Málo organických látek

Plnění požadavků je navázáno na tyto konkrétní fyzikálně-chemické parametry:

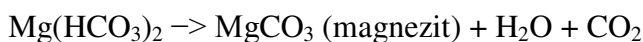
2.2.1 Tvrdost vody

Pod tímto termínem se obecně rozumí suma koncentrace vápníku, hořčíku a ostatních kovů alkalických zemin ve vodě. Tyto prvky jsou v přírodě rozšířené a do vody se tak dostávají při rozkladu hlinitokřemičitanů vápenatých a hořečnatých a ve větších koncentracích rozpuštěním vápence (CaCO_3), dolomitu ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), magnezitu (MgCO_3), sádrovce ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) a jiných minerálů.

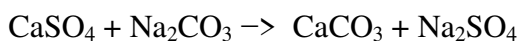
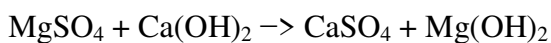
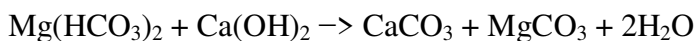
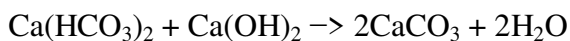
Jako rozpuštěné prvky ve vodě se vápník a hořčík vyskytují převážně jako jednoduché ionty Ca^{2+} a Mg^{2+} v málo mineralizovaných a středně mineralizovaných vodách. Ve více mineralizovaných vodách s vyšší koncentrací hydrogenuhličitanů a síranů se pak mohou ve větším množství tvořit i různé iontové asociáty⁴.

Z hlediska tvorby nánosů v potrubí je podstatně závadnější vápník než hořčík, neboť většina vápenatých solí je méně rozpustná než odpovídající soli hořečnaté (nánosy jsou tvořeny především uhličitanem vápenatým). Hořčík však působí agresivněji vůči betonu[43].

Rozlišuje se přechodná a trvalá tvrdost vody. **Přechodná tvrdost** obsahuje rozpuštěný hydrogenuhličitan vápenatý [$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$] a hydrogenuhličitan hořečnatý [$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$]. Tyto dvě látky mají bílou krystalickou formu a jsou to v podstatě uhličitá kyseliny, které jsou rozpustné ve vodě. Rozpustnost těchto látek ve vodě je významně závislá na teplotě a tlaku. Při zahřívání vody se rozpustný $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ rozkládá na CaCO_3 – uhličitan vápenatý = vodní kámen, H_2O – vodu a CO_2 – oxid uhličitý dle chemické rovnice uvedené níže (a obdobně pro hořčík). Uhličitan vápenatý vzniklý při této reakci je ve vodě téměř nerozpustný a utváří úsady na vnitřních stěnách tepelných výměníků.



Z výše uvedeného vyplývá, že přechodnou tvrdost vody lze odstranit převařením – dekarbonizací. Převařením se však nezbavíme **tvrdosti trvalé** (nekarbonátové), za kterou jsou odpovědné především sírany (síran vápenatý [CaSO_4] a síran hořečnatý [MgSO_4]), a dále chloridy, dusičnany a křemičitany. K jejich odstranění se používá srážení působením hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a uhličitanu sodného Na_2CO_3 , čímž se rozpustné hydrogenuhličitan a sírany převedou na méně rozpustné normální uhličitan, a to uhličitan vápenatý a uhličitan hořečnatý, resp. hydroxid hořečnatý[44].



⁴ Částice vznikající z iontů opačným pochodem, než je disociace. V tomto případě např. CaHCO_3 , CaSO_4 , CaOH^+ aj. a stejné obdoby s hořčíkem[42].

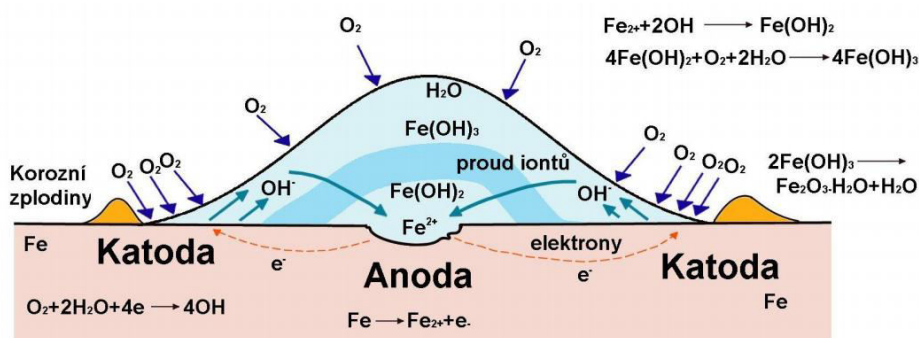
2.2.2 Koroze a agresivita vody

Koroze je samovolné, postupné rozrušení kovů či nekovových organických i anorganických materiálů (např. hornin, keramiky či plastů) vlivem chemické nebo elektrochemické reakce s okolním prostředím. Toto rozrušování se může projevovat rozdílně od změny vzhledu až po úplný rozpad celistvosti a celkově má za následek znehodnocování korodovaného materiálu. Z pohledu teplosměnných výměníků je koroze dále nežádoucí tím, že korozní zplodiny se usazují na teplosměnných plochách a působí zde jako izolant, což má vždy značný vliv na ekonomiku provozu[45].

Korodování je způsobeno chemickými nebo elektrochemickými procesy. U teplosměnných výměníků se obvykle vyskytuje spíše elektrochemická koroze, jelikož teplonosné medium (obvykle voda) působí jako elektricky vodivé prostředí[46].

Hlavním činitelem koroze je atmosférický kyslík, resp. hydroxidová skupina (OH), dále anionty vzniklé z kyselin (CO_3^{2-} , Cl^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , apod.). Vodíkové ionty kyselin se nahrazují ionty kovů, čímž vznikají soli. Koroze v kapalinách se nejčastěji projevuje v systémech využívajících vodu. Ve strojírenství přicházejí do styku s vodou především vodní stroje, stroje a zařízení na výrobu páry, chladicí systémy, rozvodná potrubí a armatury aj. Agresivita vod z hlediska koroze je závislá na tvrdosti vody, hodnotě jejího pH, na množství plynů rozpuštěných ve vodě (především O_2 , H_2 a CO_2) a na teplotě a proudění vody[47].

Plyny rozpuštěné ve vodě se sledují z toho důvodu, jelikož ve vodě působí jako tzv. depolarizátory, což jsou látky s redukční schopností. Ty odebírají elektrony, a tak způsobují nepřetržitý průběh ionizace a korozních reakcí na styku kovových materiálů s vodou[48].



Obr. 28 Schematické znázornění reakcí v kapce solného roztoku na železném povrchu[49]

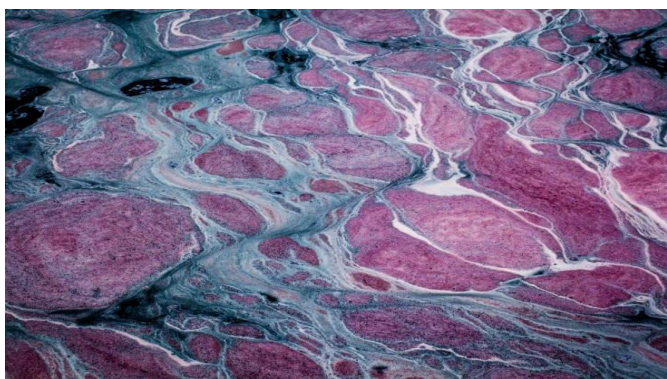
Agresivita vody je schopnost vody rozrušovat betonové a železobetonové konstrukce. Na konstrukce mohou agresivně působit zejména škodlivé látky obsažené v podzemních vodách. Útočnost podzemní vody může být v závislosti na nejvíce agresivní látce různého druhu:

- vyluhovací - podle dočasné tvrdosti vyjádřené v $\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$
- kyselostní - stanovená na základě acidity podzemní vody - ukazatelem pH faktor
- síranová – SO_4^{2-} ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
- uhličitá - útočný CO_2 ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
- hořečnatá – Mg^{2+} ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

Agresivně mohou působit rovněž např. sirovodík, amoniak, huminové kyseliny a další chemikálie organického i anorganického původu - druhotné produkty průmyslové a zemědělské výroby[50].

2.2.3 Barva, zákal a průhlednost

Barva vody je optická vlastnost vyvolávající změnu spektrálního složení procházejícího viditelného světla. Zbarvení vody může být buď přirozeného, nebo antropogenního původu. Voda se barví huminovými látkami⁵ žlutě nebo žlutohnědě, jíly a fytoplankton ji zbarvují do zelena, a kationty železa (Fe^{3+}) ji barví do rezava. Zbarvení antropologického původu obvykle souvisí s průmyslovým barvením textilu. Barva se vyjadřuje v jednotkách $\text{mg Pt} \cdot \text{l}^{-1}$.



Obr. 29: Zbarvení odpadní vody z textilního průmyslu[52]

Zákal je způsoben nerozpuštěnými látkami (jílové minerály, vyloučené železo, mangan, bakterie apod.). Ke zvýšení zákalu přispívá i období cirkulací, jarní tání sněhu, větrné a suché podnebí, nárůst fytoplanktonu v jarním období. Zvýšeným výskytem organismů vzniká tzv. vegetační zákal (vegetační zbarvení vody). Povrchové vody jsou zakalené velmi často, naopak podzemní vody jsou převážně bez zákalu.



Obr. 30: Různé stupně zakalení vody, přeloženo[53]

⁵ Huminové látky jsou přírodní látky (směs organické hmoty) obsažené v půdě a kaustobiolitech (rašelině, hnědém uhlí a lignitu). Jako důležitá složka půdy vznikají biochemickými přeměnami (tlením) organických (převážně rostlinných) zbytků a jsou součástí přírodního humusu[51].

Průhlednost vody představuje množství světla, které proniká vodním sloupcem. Je závislá na barvě a zátoku vody. Mírou průhlednosti je výška sloupce vody, při které přestane být viditelná bílá deska nebo písmo určitých rozměrů[54].

2.2.4 Nerozpuštěné látky

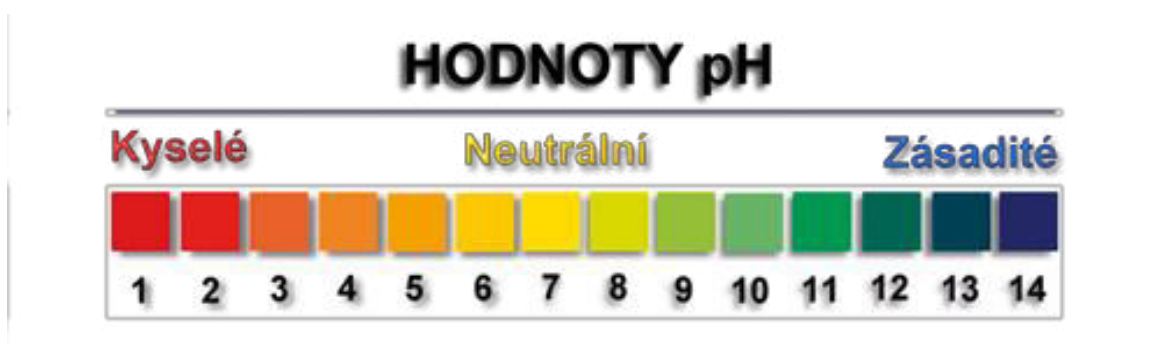
Pod pojmem nerozpuštěné či také suspendované látky rozumíme tuhé látky, odstranitelné filtrací nebo odstředěním za určených podmínek[55].

Nerozpuštěné látky jsou širším pojmem, protože zahrnují i látky koloidně dispergované. Nejčastěji se však pod tímto pojmem rozumí látky, které volně sedimentují. Hranice mezi suspendovanými a nerozpuštěnými látkami není přesně dána. Obvykle se uvádí velikost částic 0,5 μm až 1 μm a stanovení počtu nerozpuštěných látek se tak provádí dle toho, kolik částic neprojde filtrací přes filtr ze skleněných vláken o této střední velikosti[56].

Více než dvě třetiny nerozpuštěných látek jsou tvořeny látkami organickými[57]. Mezi tyto látky patří v přírodních a užitkových vodách například různé hlinitokřemičitany, hydratované oxidy kovů (nejčastěji železa, manganu a hliníku), fytoplankton, zooplankton, tuky, oleje aj. Nerozpuštěné látky se dále dělí na usaditelné, neusaditelné a vzplývavé[58].

2.2.5 Hodnota pH

Tato hodnota vyjadřuje, zda vodný roztok reaguje kyselé či naopak zásaditě. Pro přehlednost se třídí dle stupnice 0 až 14, kdy hodnota 0 značí silně kyselé látky a hodnota 14 značí silně zásadité látky. Neutrální voda má při standardních podmínkách hodnotu 7.



Obr. 31: Stupnice pH[59]

Vliv pH kapaliny je důležitý zejména kvůli možné chemické reakci s materiálem nádoby či potrubí, v němž je kapalina uložena. Dále s ohledem na tvorbu koroze, ochranných vrstev či úsad. V kyselém prostředí například klesá tendence k tvorbě úsad, ale vzrůstá tendence k tvorbě koroze[60].

2.2.6 Celkový organický uhlík

Též se pro něj používá označení TOC (z anglického Total Organic Carbon). Tento parametr ukazuje celkové množství organických látek přítomných v zkoumaném vzorku vody a slouží jako nespécifický ukazatel kvality vody.

Mezi přirozené zdroje organických látek ve vodě patří zejména rozkladné procesy organické hmoty, mezi antropogenní zdroje TOC řadíme pak veškeré úniky organických látek do odpadních vod z domácností, statků a nejrůznějších průmyslových provozů.

Vlivem vysokého obsahu organických látek dochází k stimulaci rozvoje organické látky štěpících mikroorganismů, které svou činností spotřebovávají ve vodě rozpuštěný kyslík. S klesající nasyceností kyslíkem začínají prosperovat kolonie anaerobních mikroorganismů, které nadále prohlubují degradaci ekosystému vedoucí až k vzniku tzv. anaerobní mrtvé vody[61].

2.2.7 Chemická spotřeba kyslíku

Jedná se o ukazatel, jehož hodnota vyjadřuje míru organického znečištění vody. CHSK udává množství kyslíku, které je třeba k úplné oxidaci všech látek obsažených ve zkoumané vodě. Obecně platí, že čím vyšší je hodnota CHSK, tím je voda znečištěnější organickými látkami živočišného nebo rostlinného původu či oxidovatelnými anorganickými látkami. Kvalitní podzemní voda dosahuje hodnot pod $1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. U povrchových vod se pohybuje v rozmezí $5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ a výše[62].

2.2.8 Neutralizační kapacita

Tento pojem velmi úzce souvisí s pojmy alkalita a acidita. Ty se stanovují neutralizační titrací vzorku vody silnou kyselinou nebo silnou zásadou do příslušné hodnoty pH bodu ekvivalence. Vzhledem k tomu, že acidobazické vlastnosti přírodních a užitkových vod souvisejí především s převládajícím uhličitánovým systémem, byly pro odměrné stanovení alkality a acidity navrženy indikátory methylová oranž a fenolftalein, protože titrační exponenty uhličitánového systému leží v jejich funkční oblasti (pH 4,5 a 8,3).

Neutralizační kapacitou (NK) vody se rozumí látkové množství silné jednosytné kyseliny nebo silné jednosytné zásady v mmol, které spotřebuje jeden litr vody pro dosažení určité hodnoty pH. Rozlišuje se proto:

- a) kyselinová (neutralizační) kapacita (KNK) v $\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$
- b) zásadová (neutralizační) kapacita (ZNK) v $\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$

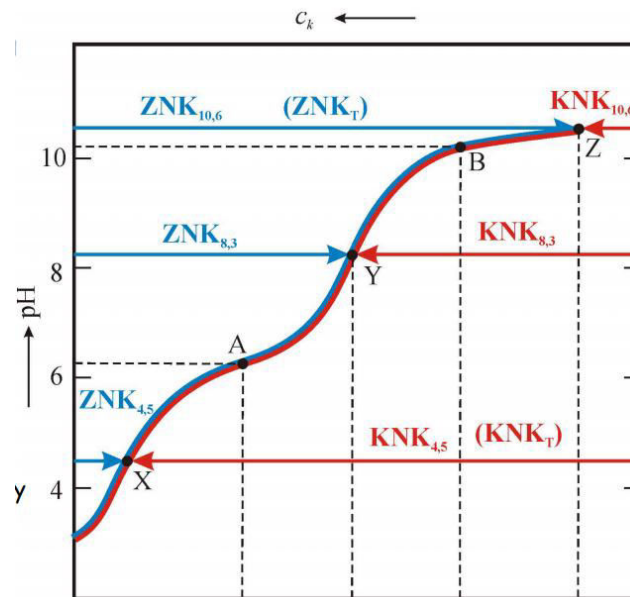
Mezi nejčastěji používané kyselinové a zásadové kapacity uhličitánového systému patří dle stanovených hodnot pH tyto kapacity[63]:

$$\text{KNK}_{4,5} = c(\text{HCO}_3^-) + 2c(\text{CO}_3^{2-}) + c(\text{OH}^-) - c(\text{H}^+)$$

$$\text{KNK}_{8,3} = c(\text{CO}_3^{2-}) + c(\text{OH}^-) - c(\text{H}_2\text{CO}_3) - c(\text{H}^+)$$

$$\text{ZNK}_{4,5} = c(\text{H}^+) - c(\text{HCO}_3^-) - 2c(\text{CO}_3^{2-}) - c(\text{OH}^-)$$

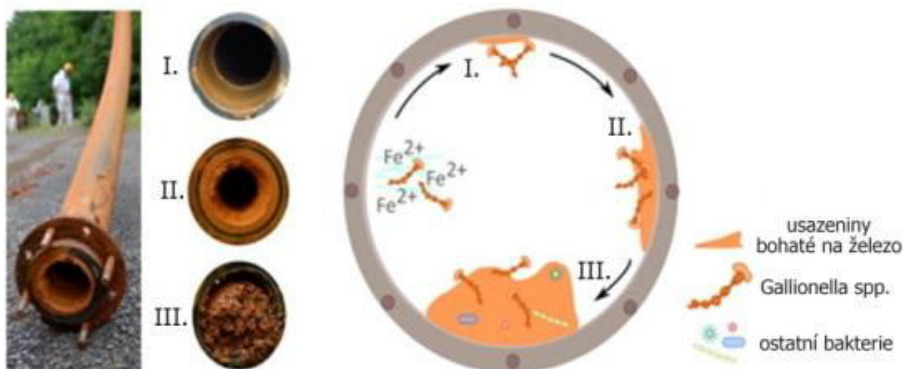
$$\text{ZNK}_{8,3} = c(\text{H}^+) + c(\text{H}_2\text{CO}_3) - c(\text{CO}_3) - c(\text{OH}^-)^6$$



Obr. 32: Titrační křivka uhličitanového systému a příslušné neutralizační kapacity[64]

2.2.9 Koncentrace železa a manganu

Do vod se **železo** (Fe) nejčastěji uvolňuje vyluhováním z železných rud (pyrit [FeS₂], krevet [Fe₂O₃], magnetovec [Fe₃O₄], hnědel [Fe₂O₃·H₂O] aj.). Umělým zdrojem jsou pak odpadní vody podniků upravujících železo (válcovny, drátovny aj.), a také korozní procesy v potrubí. Ve vodách se železo vyskytuje nejčastěji v oxidačním stupni II (pro bezkyslíkaté prostředí) a III (pro kyslíkaté prostředí), v rozpuštěné nebo nerozpuštěné formě. Železo nepříznivě ovlivňuje barvu a zákal vody. Již v malých koncentracích (0,5 mg·l⁻¹) může železo způsobovat zákal vody v aerobních podmínkách, nebo může být příčinou nadměrného rozvoje železitých bakterií (to může vést k ucpávání potrubí, odumírání živočichů či zápachu).



Obr. 33: Ukázka postupného ucpání trubky železitými bakteriemi, přeloženo[65]

⁶ c - koncentrace v mmol·l⁻¹

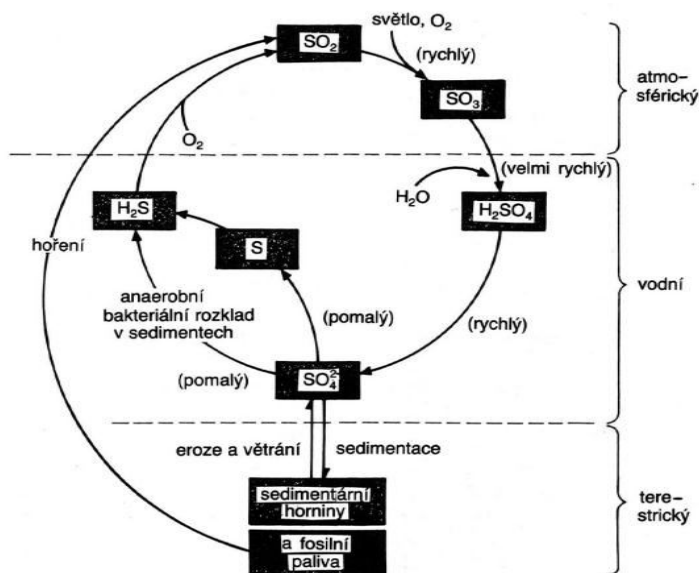
Mangan (Mn) se do vod nejčastěji dostává buď vyluhováním manganových rud (burel $[\text{MnO}_2]$, baumit $[\text{Mn}_2\text{O}_3]$, hausmannit $[\text{MnCO}_3]$ aj.) nebo z umělých zdrojů v podobě odpadních vod ze zpracování rud či chemických závodů, kde se oxiduje manganistanem. V neutrálním prostředí se mangan vyskytuje jako jednoduchý iont Mn^{2+} , za nepřítomnosti kyslíku pak nejčastěji v podobě manganaté soli. I při malých koncentracích manganu může dojít k pomnožení manganových bakterií, což může způsobit ucpávání vodovodního potrubí[66].

2.2.10 Chloridy a sírany

Ve vodě jsou chloridy jednou z nejběžnějších složek. Jsou obsaženy téměř ve všech horninách a do vod se vyluhují ve formě chloridů nejčastěji z ložisek kamenné soli a draselných solí. Umělým zdrojem je dezinfekce vody chlorací či solení silnic v zimních obdobích. Chloridy nejsou nijak zdraví škodlivé, neasimilují je rostliny ani bakterie, ale jsou neustále uvolňovány živočichy. Chlor se ve vodě může v menší míře vyskytovat i jako kyselina chlorná (HClO), anion (ClO^-) nebo v různých chlorokomplexech. Jejich nadbytek se však projevuje vyšším korozivním účinkem vody na kovové materiály[67].

Spolu s hydrogenuhlíčitany a sírany jsou chloridy hlavními anionty povrchových vod, běžně jsou obsaženy jednotky až desítky $\text{mg.l}^{-1} \text{Cl}^-$. Ve vodách jsou chemicky i biochemicky poměrně stabilní, při infiltraci vody se v půdách prakticky nezadržují. Ve vodách s vyšší mineralizací díky dobré rozpustnosti chloridových solí můžeme najít i desítky $\text{g.l}^{-1} \text{Cl}^-$. Přípustné max. zatížení vodárenských toků je $150 \text{ mg.l}^{-1} \text{Cl}^-$, ostatní povrchové vody $350 \text{ mg.l}^{-1} \text{Cl}^-$.

Sloučeniny síry se vyskytují v přírodních vodách v různých oxidačních stupních (0, II, IV, či VI). Přírodním zdrojem síry je rozklad organických látek (bílkovin) a výluh z minerálů sádrovce ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a anhydritu (CaSO_4). Umělým zdrojem jsou pak odpadní vody z železáren a městské a průmyslové exhalace (spalováním fosilních paliv v elektrárnách či domácích topeništích či emise v dopravě). V běžných přírodních vodách se síra vyskytuje nejčastěji ve formě jednoduchého iontu SO_4^{2-} v desítkách až stovkách mg.l^{-1} .



Obr. 34: Koloběh síry v přírodě[68]

Vysoké koncentrace síranů mohou působit korozivně na kovy a zvláště také na beton. Síraný představují komplikaci při odstraňování dusičnanů pomocí iontové výměny. Nadlimitní koncentrace síranů většinou způsobuje i překročení hodnoty konduktivity[69][66].

2.2.11 Vodivost

Často používané termíny jsou také konduktivita či solnost. Jedná se skupinový ukazatel vyjadřující množství rozpuštěných anorganických solí ve vodě a taktéž schopnost kapaliny vést elektrický proud. Nepřímo tak vyjadřuje obsah minerálních látek ve vodě[62].

Mírou schopnosti kapaliny vést elektrický proud je měrná elektrická vodivost, což je převrácená hodnota elektrického odporu naměřeného mezi dvěma elektrodami o ploše 1 m^2 vzájemně vzdálených 1 metr. Jednotkou vodivosti je siemens ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$). Kvůli malým reálným hodnotám vodivosti se často užívají $\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$ či $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ [70].

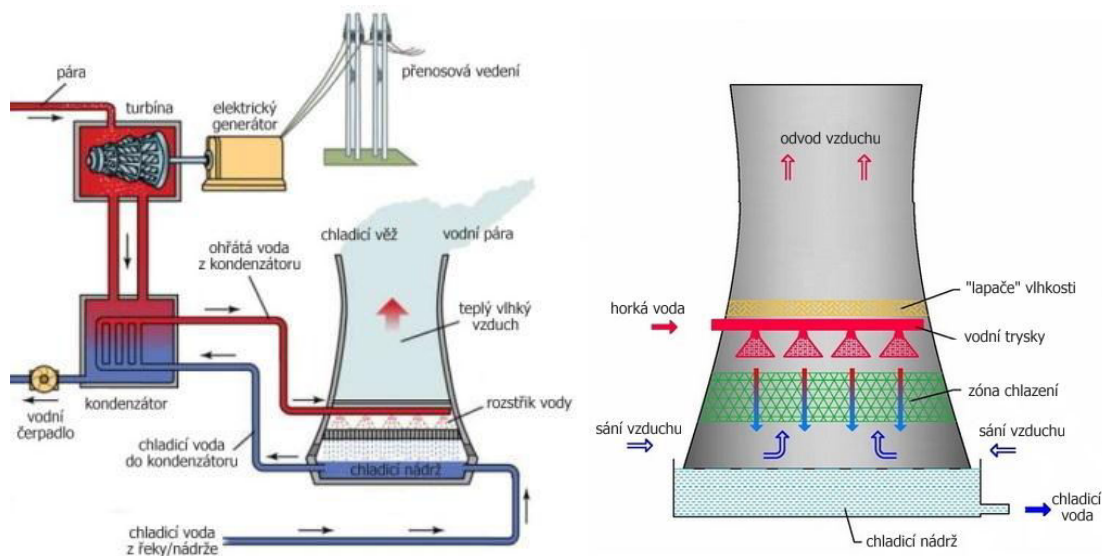
Tab. 2: Převodní tabulka vodivosti[71]

	$\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$	$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$
$1 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$	1000	10 000

V kapalinách zprostředkovávají elektrický proud ionty. Kapalina je tím vodivější, čím více iontů obsahuje. U demineralizovaných vod dosahuje vodivost pouze hodnot kolem $5,5 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, říční voda pak kolem $500 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ [72][73].

2.3 Chladicí okruh JE Dukovany

Výměník, který budu dále rozebírat ve výpočtové části, patří do terciálního okruhu elektrárny a využívá ke svému chlazení vodu doplňovanou z vodní nádrže Mohelno na řece Jihlavě. V tomto případě se jedná o chladicí okruh otevřený s atmosférickým chladičem v podobě chladicích věží, kterými je odváděno teplo z chladicí kapaliny.



Obr. 35: Schéma terciálního okruhu a chladicí věže, přeloženo[74][75]

Množství odluhu je u jaderných elektráren přísně limitováno vyhláškou Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) č. 307/2002 Sb., o radiační kontrole[76] dle počtu vypouštěných radionuklidů (přibližně z 99% tritium) obsažených v odluhu. Zde se projevila nedokonalost v projektování elektrárny, kdy se nepředpokládalo budoucí zpříšňování norem, a odluh je tak vypouštěn ve stejných místech jako dochází k odběru chladicí vody. Kvůli tomuto omezení je tak velikost odparu zhruba 1,7krát větší, než velikost průtoku odluhu.

Tab. 3: Parametry vodních okruhů EDU při výkonu bloků 100% N_{NOM} , zdroj Čez a.s.

Parametr	Ozn.	Jednotka	zima	jaro/ podzim	léto	extrémní horko
Teplota vzduchu-suchý teploměr	T_{db}	°C	15,0	19,5	31,5	46,2
Průtok doplňované surové vody do CČS	F_{DOP}	m ³ /hod	544	566	625	699
Teplota doplňované surové vody	T_{DOP}	°C	11,9	15,6	21,4	21,4
Průtok odluhu věžových okruhů	F_{OD}	m ³ /hod	202	210	228	253
Průtok odparu z věžového okruhu	F_{VAP}	m ³ /hod	342	356	397	446

2.4 Rozbor konkrétního měření

Měřené veličiny, které jsou použity pro rozbor odebírané vody pro chlazení výměníku, byly odebrány provozovatelem elektrárny dne 11. 3. 2020 v 6:15 z cirkulačního okruhu výměníku. Měřené veličiny nijak nevybočují z běžně měřených hodnot v daném období a lze z nich tak věrně odvodit kvalitu používané chladicí vody.

Tab. 4: Měřené látky obsažené ve vodě, zdroj Čez a.s.

Veličina	Zkratka	Hodnota	Jednotka
Vápník	Ca	48,1	mg·l ⁻¹
Chemická spotřeba kyslíku	CHSK	19	mg·l ⁻¹
Chlor	Cl	60	mg·l ⁻¹
Železo	Fe(celk)	0,028	mg·l ⁻¹
Draslík	K	9,5	mg·l ⁻¹
Kyselinová neutralizační kapacita	KNK4,5	2	mmol·l ⁻¹
Hořčík	Mg	15,6	mg·l ⁻¹
Sodík	Na	37,3	mg·l ⁻¹
Nerozpuštěné látky	NL	<2.0	mg·l ⁻¹
Dusičnany	NO ₃	37	mg·l ⁻¹
pH	pH	7,7	–
Průzračnost	Pz	93,5	%

Oxid křemičitý	SiO ₂	10,8	mg·l ⁻¹
Sírany	SO ₄	78	mg·l ⁻¹
Vodivost nekatexovaná	VN	620	μS·cm ⁻¹

2.4.1 Plnění normy

Pro chladicí okruh výměníku platí Česká technická norma ČSN 75 7171 „Kvalita vod – Složení vody pro průmyslové chladicí okruhy“ vydaná v lednu roku 2014. Tato norma se používá pro řízení chemických režimů chladicích okruhů v průmyslových a energetických závodech. Norma stanovuje doporučené ukazatele kvality chladicí vody, která přichází do styku s rozváděcím potrubím, vodními komorami a teplosměnnými plochami chladičů a dalšími konstrukčními prvky různých typů chladicích okruhů, jako jsou atmosférické chladiče, vany apod. Příměsi v chladicí vodě jsou doporučeny z hlediska omezení koroze konstrukčních prvků, tvorby nánosů (zejména na teplosměnných plochách chladičů).

Norma není určena pro průtočné chlazení⁷. Norma nespécifikuje požadavky na mikroorganismy přítomné v chladicí vodě a úroveň jejich počtu[38].

V dané normě nás zajímají systémy s odparem, které jsou používány ve velkých elektrárenských a chladírenských provozech, jako je také JE Dukovany, a jejich chemický režim si zaslouží největší pozornost vzhledem ke komplexnosti problémů, které při provozu mohou nastat. V okruhu jsou zastoupeny jak materiály ocelové, tak ze slitin mědi a jímky jsou obvykle z betonu. Pro porovnání volíme hodnoty z posledního sloupce „III Chladiče z korozivzdorné oceli a z titanu“, kvůli materiálu výměníku[77].

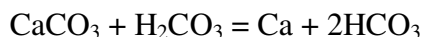
⁷ Dochází k odvodu tepla přímo do řeky/ moře.

Veličina	jednotka	I. Chladiče z uhlíkaté oceli	II Chladiče z měděných slitin	III Chladiče z korozivzdorné oceli a z titanu
pH		7,5-9,5	6,5-8,5	Min. 6,0
KNK _{4,5}	mmol.l ⁻¹	0,8-2,3 ¹⁾	0,6-2,1 ¹⁾ max. 3,0 ²⁾	0,6-2,3 ¹⁾ max. 3,0 ²⁾
Ryznarův index		5,5-7,0	5,0-7,0 ²⁾	5,0-7,5 ²⁾
CO ₂ agr.	mg.l ⁻¹	max.5,0	max.7,0	max.7,0
vodivost	μS.cm ⁻¹	max.1200	max.200	max.350
Cl ⁻	mmol.l ⁻¹	max.200	max.5000	max.6000
SO ₄ ²⁻	mg.l ⁻¹	max.500 max.1000 ³⁾	max.500 max.1000 ³⁾	max.500 max.1000 ³⁾
S ²⁻	mg.l ⁻¹	max.1,0	max.2,0	max.2,0
NH ₄ ⁺	mg.l ⁻¹	-	max. 3,0	max. 8,0
Fe+Mn	mg.l ⁻¹	max.3,0	max.1,0 ⁴⁾	max.5,0
O ₂	mg.l ⁻¹	max.3,0	max.3,0	-
CHSK _{Mn}	mg.l ⁻¹	max.50	max.50	max.50
Nerozpuštěné látky	mg.l ⁻¹	max.15 ⁵⁾	max.20 ⁶⁾ max.50 ⁷⁾	max.50 ⁷⁾
Cl ₂	mg.l ⁻¹	max.0,4	max.0,4	max.0,4
1) Pro vody s kompletačními účinky možno zvýšit na základě provedení zajišťovací zkoušky				
2) Při trvalém procesu mechanického čištění				
3) Při použití cementu odolávajícímu síranové korozi				
4) Fe a Mn pouze v iontové formě				
5) Viz CSN 83 0615				
6) Při rychlosti proudění chladičem do 1,5 m.s ⁻¹				
7) Při rychlosti proudění chladičem nad 1,5 m.s ⁻¹				

Obr. 36: Norma ČSN 75 7171 „Kvalita vod – Složení vody pro průmyslové chladicí okruhy“

Je nutné podotknout, že JE Dukovany neměří některé z prvků uvedených v normě, jelikož jejich hodnota se pohybuje blízko k nule. Konkrétněji se jedná o množství síry (S²⁻), amonia (NH₄⁺), manganu (Mn) a plynného chlóru (Cl₂). Taktéž Ryznarův index není průběžně měřen, jelikož je považován jen jako doplňková informace.

Namísto agresivního oxidu uhličitého (CO₂ agr.) se v JE Dukovany měří přímo množství vápníku (Ca). Vzájemný vztah mezi těmito veličinami je takový, že oxid uhličitý (CO₂) obsažený v kyselině uhličitě (H₂CO₃) je v rovnováze iontů vápníku a hydrogen uhličitanů, tzv. vápenato-uhličitanové rovnováže[78].



U měřených látek rozpuštěných v chladicí vodě je patrné, že jejich koncentrace je vůči povolené normě minimální. Měřené hodnoty pH a kyselinové neutralizační kapacity taktéž splňují interval stanovený normou.

Jediné překročení je zřejmé u hodnoty vodivosti (měřených 620 μS.cm⁻¹ vůči normou stanoveným maximálně 350 μS.cm⁻¹). To je způsobeno tím, že v elektrárně je měřena nekatexovaná vodivost (taktéž označovaná jako přímá vodivost či konduktivita) a jedná se

o vodivost prostředí danou všemi jeho složkami (ionty). Norma je stanovena pro tzv. katexovanou vodivost, což je vodivost média po průchodu katexovou kolonou, na které dojde k zachycení všech kationtových složek (sodné, amonné, apod.). Hodnota katexované vodivosti je tak dána pouze anionty (chloridy, sírany, dusičnany, apod.).

Tab. 5: Porovnání množství rozpuštěných látek dle normy a skutečnosti, zdroj vlastní

Měřená látka	Zkratka	Množství dle normy	Skutečně měřené množství	Jednotka
Chlor	Cl	6000	1,69 ⁸	mmol·l ⁻¹
Sírany	SO ₄ ²⁻	500	78	mg·l ⁻¹
Železo	Fe	5	0,028	mg·l ⁻¹
Chem. spot. kyslíku	CHSK	50	19	mg·l ⁻¹
Nerозpuštěné látky	NL	50	2	mg·l ⁻¹

2.4.2 Sklon k zanášení dle chemického složení

Pro posouzení potenciálu chladicí vody dle chemického složení poslouží vědecký článek publikovaný americkými profesory Lorenzem Cremaschim a Xiaoxiaou Wu v mezinárodním časopise zabývajícím se přenosem tepla[79].

Zmínění autoři ve své práci uvádí tabulku uvedenou níže s dělením potenciálu vody k zanášení dle chemických látek v ní obsažených.

Fouling potential	Total hardness	Calcium (as CaCO ₃)	Magnesium (as CaCO ₃)	M-Alkalinity (as CaCO ₃)	P-Alkalinity (as CaCO ₃)	Chloride (ppm)	Sulfate (ppm)
Low	180–358	13–92	16–53	54–91	4–15	102–258	64–133
Medium	345–533	18–265	28–109	106–289	6–77	208–884	139–603
High	557–1765	129–391	76–183	204–1813	58–417	491–1947	319–1947
Fouling potential	Sodium (ppm)	Iron (ppm)	Copper* (ppm)	pH	Total dissolved solid (ppm)	EC (μS/cm)	LSI (—)
Low	43–93	<0.1	NA	8.2–8.4	428–897	649–1359	<1.0
Medium	87–373	<0.1	NA	8.4–8.8	826–2896	1251–4360	1.1–2
High	192–741	<0.1	NA	9.0–9.6	2000–7971	3030–11690	2.1–3.8

Obr. 37 Potenciál vody k zanášení dle rozpuštěných látek[79]

Total hardness neboli celková tvrdost je ve zjednodušené formě vyjádřena jako množství uhličitánu vápenatého (CaCO₃) vzniklého z vápníku a hořčíku obsažených ve vodě. V širším smyslu sem patří i další kationty (železo, mangan, aj.), které však už nemají na výsledek přílišný vliv. Tento vztah je vyjádřen rovnicí uvedenou níže[80], kde koeficienty před prvky vyjadřují faktor přeměny daného množství na množství uhličitánu. Po dosazení měřených hodnot zjistíme, že se totální tvrdost vody pohybuje kolem 185 mg·l⁻¹[81].

$$[\text{CaCO}_3] = 2,5 \cdot [\text{Ca}^{2+}] + 4,1 \cdot [\text{Mg}^{2+}]$$

⁸ Měřená hodnota v mg·l⁻¹ převedena na mmol·l⁻¹ podělením hodnoty molární hmotnostní chloru (35,45 g·mol⁻¹) a následnou úpravou jednotek.

Podle stejných přepočtených koeficientů získáme hodnoty pro vápník (výsledná hodnota $120,25 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) a hořčík (výsledná hodnota $64 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) jako uhličitan vápenatý. Elektrárna neměří data potřebná pro výpočet množství M a P alkality. Stejně tak nelze vyznačit vodivost (a od ní odvozovaný Langelierův saturační index [LSI]), jelikož elektrárna měří jiný typ vodivosti. Zbylé látky obsažené ve vodě se vyznačí do sloupců podle jednoduchého přepočteního vztahu $1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1} = 1 \text{ ppm}$ [82].

Dle hodnot z měření zaznačených do tabulky lze říci, že chladicí voda přiváděná do výměníku má nízký potenciál ke vzniku zanášení. Hodnoty chloru, sodíku a pH jsou dokonce mírně nižší, než nejnižší stanovená hranice. Taktéž hodnoty vápníku a hořčíku se pohybují pouze mírně nad limity pro nízký potenciál.

2.4.3 Stanovení součinitele zanášení dle empirických měření

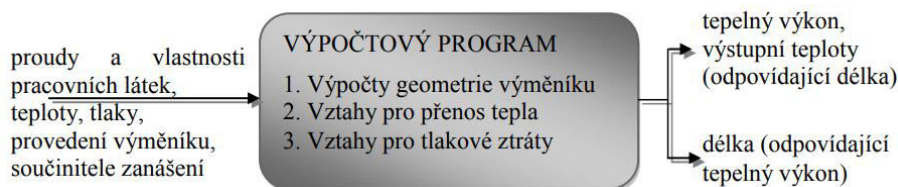
Hlavním zdrojem veřejně dostupných hodnot součinitelů zanášení jsou tabulky hodnot navržených Asociací výrobců trubkových výměníků (TEMA) v 50. letech 20. století k usnadnění konstrukcí tepelných výměníků především v petrochemickém průmyslu. Je nutné zdůraznit, že tabulkové hodnoty jsou pouze orientační a nikoliv přesné, a dodnes se vedou odborné diskuze, nakolik se uváděné hodnoty odchyľují od reálných. Pro určení druhu lze použít poznatky z předchozí kapitoly, kde na základě chemické kvality vody bylo konstatováno, že se jedná o chladicí říční vodu s malým obsahem látek způsobujících zanášení. Po dosažení teplot chladicí a chlazené vody udávaných parametry výměníku lze vyčíst, že podle tabulky TEMA pro chladicí vody vydané roku 1978 a používané dodnes by se součinitel zanášení měl pohybovat kolem hodnoty $0,000352 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ [83].

Teplota horké pracovní látky Teplota vody Rychlost proudění vody (m/S)	Do 115°C Do 50°C		115°C až 205°C Nad 50°C	
	< 0,9	> 0,9	< 0,9	> 0,9
Mořská voda	0,000088	0,000088	0,000176	0,000176
Odsolená mořská voda	0,000352	0,000176	0,000528	0,000352
Vody pro chladicí a sprchové věže				
Upravená voda	0,000176	0,000176	0,000352	0,000352
Neupravená voda	0,000528	0,000528	0,000881	0,000705
Městská voda a voda ze studny	0,000176	0,000176	0,000352	0,000352
Voda z řeky				
Minimálně	0,000352	0,000176	0,000528	0,000352
Průměrně	0,000528	0,000352	0,000705	0,000528
Špinavá voda (kal, bláto)	0,000528	0,000352	0,000705	0,000528
Písčítá (nad 15 zrněk/galon)	0,000528	0,000528	0,000881	0,000881
Voda pro chlazení motoru	0,000176	0,000176	0,000176	0,000176
Destilovaná nebo v uzavřeném oběhu				
Kondenzát	0,000088	0,000088	0,000088	0,000088
Napájecí voda kotle	0,000176	0,000088	0,000176	0,000176
Odkalování kotle	0,000352	0,000352	0,000352	0,000352

Obr. 38 Stanovení hodnoty součinitele zanášení na základě parametrů a kvality chladicí vody[83]

3 Výpočet zanášení reálného výměníku

Při konstruování tepelného výměníku je dbáno na jeho teplotní návrh, který vede ke stanovení teplosměnné plochy, která by zvládla splnit požadavky na teplotní výměnu dle provozovatele. Dalším požadavkem při konstrukci je dosažení co nejmenší tlakové ztráty proudící kapaliny a z ní plynoucí zvyšující se náklady na chod čerpadla k udržení daného proudu. Zanášení výměníku má bohužel negativní vliv na tyto požadavky (tzn., snižuje prostup tepla stěnou, což vede k naddimenzování teplosměnné plochy při návrhu, a dále vede ke snižování vnitřního průměru trubek s proudící kapalinou, což zvyšuje tlakovou ztrátu). Pro konstruktéra je tak důležité zahrnout vliv zanášení do návrhu výměníku tak, aby byl výměník i přes tyto negativní vlivy schopen v čase plnit požadavky provozovatele.



Obr. 39: Schéma kontrolního výpočtu tepelného výměníku[84]

V průběhu let bylo publikováno několik metod, jak co nejpřesněji navrhnout teplosměnnou plochu při konstrukci výměníků. Pro návrh trubkových výměníků je pak z těchto metod nejčastěji volen přístup dle *Kern and Seaton* metody a *Bell-Dellaware* metody.

3.1 Přístup dle Kern-Seatonovy metody

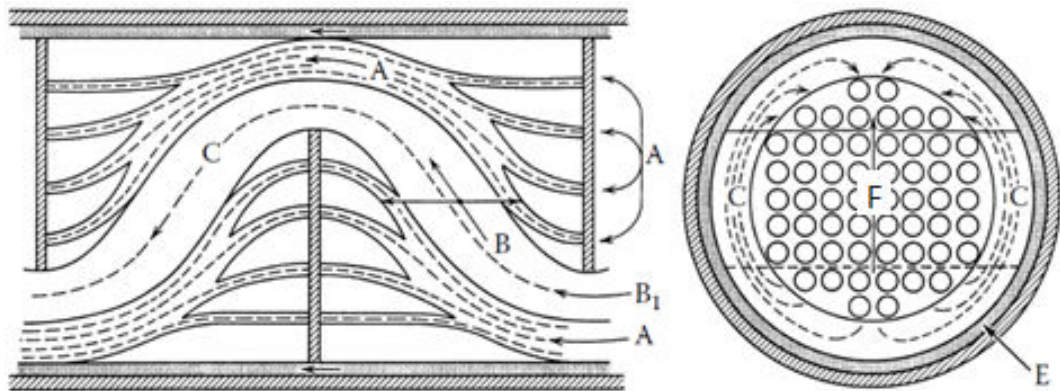
Tato metoda je někdy označovaná zkráceně jen jako Kernova metoda. Byla publikována v 60. letech v USA D. Q. Kernem a R. E. Seatonem na základě experimentálního měření na běžně používaných průmyslových výměnících. Kernova metoda nepočítá s korelačními faktory jednotlivých proudů v mezitrubkovém prostoru výměníku, a zavádí tak zjednodušenou představu o celistvém proudu procházejícím výměníkem.

Tato metoda je využívána především pro uspokojivou predikci součinitele přestupu tepla. Nedostatkem metody je nedostatečná predikce tlakových ztrát, jelikož ty jsou více závislé právě na vznikajících prouděch u přepážek, které jsou v této metodě zanedbány[85][86].

3.2 Přístup dle Bell-Delawarovy metody

Tato metoda na rozdíl od Kernovy metody zohledňuje ve výpočtu vliv zkratových a obtokových proudů u přepážky. Byla založena na experimentálních datech získaných z trubkových výměníků se segmentovými přepážkami a spočívá v korelaci ideálního součinitele přestupu tepla α_{id} pomocí korelačních faktorů J_{tot} jednotlivých proudů[87][13].

$$\alpha = \alpha_{id} \cdot J_c \cdot J_l \cdot J_b \cdot J_s \cdot J_r = \alpha_{id} \cdot J_{tot} \quad (3)$$



Obr. 40: Proudění média v mezitrubkovém prostoru výměníku[87]

- Proud A – Zkratový proud přepážkou a stěnou trubky.
- Proud B – Hlavní činný proud s příčným tokem.
- Proud C – Obtokový proud mezi svazkem trubek a stěnou pláště.
- Proud E – Zkratový proud mezi hranou přepážky a stěnou pláště.
- Proud F – Proud tekoucí podél přepážky mimo svazek trubek.

Přenos tepla a tlakové ztráty jsou ovlivňovány zejména proudem B[88].

3.3 Teoretické podklady k výpočtové části

Vzhledem k tomu, že se tato práce zabývá pouze vlivem zanášení na prostup tepla a tlakovou ztrátu v trubkovém prostoru a mezitrubkový prostor uvažuje jako ideální prostředí, je vhodnější zvolit pro výpočtovou část Kernovu metodu.

3.3.1 Zavádění předpokladů

Pro vhodné posouzení a správný výpočet důležitých parametrů výměníku je důležité zavést správné předpoklady, které jsou uvedené níže:

- Tok je stálý a izotermický a vlastnosti tekutin jsou nezávislé na čase;
- Hustota tekutin závisí pouze na místní teplotě nebo je považována za konstantní;
- Tlak v tekutině je nezávislý na směru proudění;
- Neexistují žádné zdroje nebo pohlcovače energie podél směru proudění;
- Třecí faktor je uvažován jako konstantní po celou dobu průchodu kapaliny výměníkem.

3.3.2 Výpočet vlivu zanášení výměníku nezávisle na času

Pro obecné výpočty výměníku slouží níže uvedené rovnice nezávislé na čase.

- **Reynoldsovo číslo v trubkovém prostoru**

Jako kritérium pro rozlišení mezi laminárním a turbulentním prouděním slouží právě Reynoldsovo číslo (Re). Dle experimentálních měření bylo zjištěno, že pro hodnoty přibližně $Re < 2000$ se jedná o laminární proudění a pro hodnoty $Re > 4000$ jde o turbulentní proudění. V pásmu mezi těmito hodnotami se jedná o přechodné proudění.

$$Re_t = \frac{\rho_t u_t d_i}{\mu_t} \quad (4)$$

- **Prandtlovo číslo v trubkovém prostoru**

Udává, jaký přenos tepla (konvektivní nebo konduktivní) v kapalině převládá.

$$Pr_t = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{\frac{c_p \mu}{\lambda}} = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (5)$$

- **Nusseltovo číslo v trubkovém prostoru**

Toto číslo je funkcí dvou předchozích čísel (Re a Pr) a vyjadřuje poměr konvektivního přenosu tepla a konduktivního přenosu tepla kolmo na uvažovanou hranici tekutiny v trubce.

Pro laminární proudění lze použít vyjádření rovnice dle Sieder a Tatea:

$$Nu_t = 1,86 \left(\frac{Re_t Pr_t d_i}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Použitelné pro hodnoty v mezích: $0,48 < Pr_t < 16700$; $(Re_t Pr_t d_i / L)^{1/3} > 2$

Pro turbulentní proudění v hladkých trubkách je možné zvolit Gnielinskiho korelaci:

$$Nu_t = \frac{\left(\frac{f}{2}\right)(Re_t - 1000)Pr_t}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{2}\right)^{\frac{1}{2}} (Pr_t^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (7)$$

Kde f značí Fanningův třecí faktor počítaný z rovnice:

$$f = 0,079 Re^{-0,25} \quad (8)$$

Použitelné pro hodnoty v mezích: $10^4 < Re_t < 5 \cdot 10^6$; $0,5 < Pr_t < 200$ [89]

- **Součinitel přestupu tepla v trubkovém prostoru**

$$\alpha_t = Nu_t \frac{k_t}{d_i} \quad (9)$$

- **Celkový součinitel prostupu tepla**

Celkový součinitel prostupu tepla U_c lze odvodit z odhadovaných hodnot jednotlivých koeficientů přenosu tepla a odporu stěny trubky.

$$U_c = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i} \left(\frac{1}{\alpha_i} + R_{fi} \right) + \frac{d_o}{2\lambda_t} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (10)$$

- **Celkový součinitel prostupu tepla se zaneseným povrchem**

Pro výpočet prostupu tepla se zaneseným povrchem může sloužit rovnice níže, kdy je celkový součinitel prostupu tepla doplněn o hodnotu součinitele zanášení

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U_c} + R_{ft} \quad (11)$$

- **Tlaková ztráta v trubkovém prostoru**

Celková tlaková ztráta na straně trubky je pak vyjádřena vztahem:

$$\Delta P_t = \left(4f \frac{LN_p}{d_i} + 4N_p \right) \frac{\rho u_t^2}{2} \quad (12)$$

Změna směru proudu, jenž má za následek další pokles tlaku při průchodu kapaliny výměníkem v důsledku náhlých expanzí a kontrakcí, jež kapalina podstupuje při změně směru je vyjádřena rovnicí:

$$\Delta P_t = 4N_p \frac{\rho u_t^2}{2} \quad (13)$$

Pokud kapalina podstupuje pouze jeden průchod výměníkem, lze rovnici (13) zjednodušit na vztah:

$$\Delta P_t = 4f \frac{LN_p}{d_i} \rho \frac{u_t^2}{2} \quad (14)$$

- **Čerpací výkon a tlaková ztráta**

Čerpací výkon kapaliny je úměrný poklesu tlaku v kapalině při průchodu výměníkem, kdy rovnice je udána vztahem:

$$P = \frac{m\Delta P}{\rho\eta_p} \quad (15)$$

Hodnota η_p vyjadřuje účinnost čerpadla či ventilátoru a pohybuje se v rozmezí 0,80 až 0,85.

Náklady vyvolané zvýšeným třením kapaliny vznikají tím, že zvýšení práce čerpadla na vstupu do výměníku je větší, než skutečný přínos zvýšení přestupu tepla. Pro plyny a kapaliny o nízké hustotě a také pro kapaliny s velmi vysokou viskozitou má pokles tlaku vždy stejný význam jako rychlost přenosu tepla a má silný vliv na konstrukci tepelných výměníků.

- **Výpočet vnitřního průměru trubky postižené zanášením**

$$d_f = d_i \exp\left(\frac{-2\pi k_f R_f}{d_i}\right) \quad (16)$$

- **Tloušťka vrstvy usazenin t_f**

$$t_f = 0,5t_c \left[1 - \exp\left(\frac{-2\pi k_f R_f}{d_c}\right)\right] \quad (17)$$

3.4 Model zanášení v čase

Modely snažící se popsat a předpovědět zanášení v čase jsou založeny na myšlence, že množství zanášení je vyjádřitelné jako rozdíl mezi tvorbou nánosů a jejich odplavováním.

$$\frac{dR_f}{dt} = \Phi_d - \Phi_r \quad (18)$$

Nejjednodušší model popisující zanášení v čase byl představen roku 1924 McCabem a Robinsonem. Tento model má lineární charakter a je v něm zanedbávána rychlost odplavování nánosů (Φ_r).

$$R_t = \Phi_d t \quad (19)$$

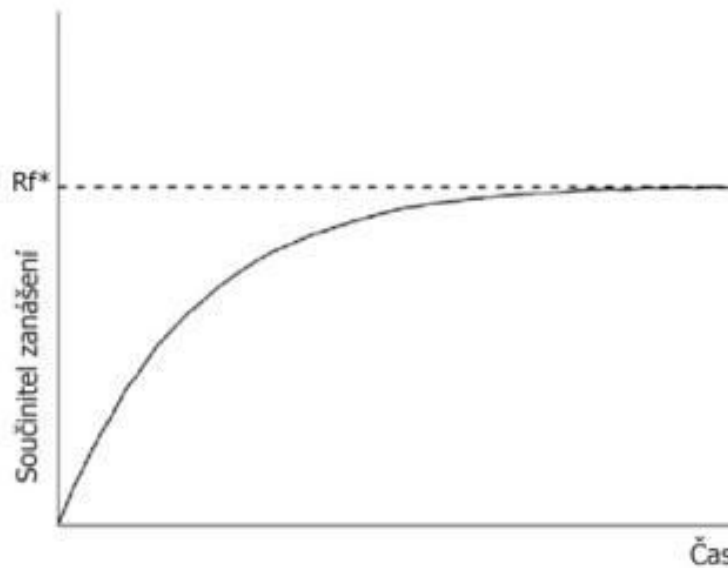
Velmi často pozorovaným modelem zanášení je asymptotický charakter, kde míra usazování je konstantní (parametr „a“), avšak míra odplavování nánosů je proporcionální v závislosti na tloušťce jejich vrstvy a z ní pramenící změně rychlosti a smykového napětí v kapalině (parametr „b“).

$$\frac{dR_f}{dt} = a - bR_f \quad (20)$$

Na podobném principu je založen asymptotický model zanášení navržený Kernem a Seatonem. Ten objasňuje proces zanášení jako formu časové změny součinitele zanášení vyjádřenou rovnicí [13]:

$$R_f = R_f^*(1 - e^{-\beta t}) \quad (21)$$

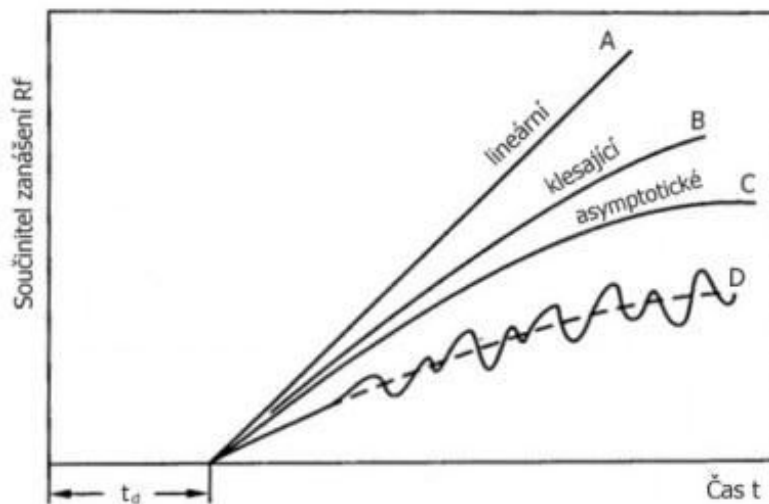
Tento model matematicky vyjadřuje asymptotický průběh křivky zanášení v závislosti na času vyjádřený obrázkem č. 41:



Obr. 41: Asymptotický průběh křivky zanášení, přeloženo [90]

Pro správné vykreslení a užití tohoto modelu zanášení je klíčová znalost konkrétních hodnot R_f^* a β . Skutečné hodnoty těchto konstant závisí na druhu zanášení a na provozních podmínkách, a mohou tak být stanoveny buď z vyhodnocení záznamu pracovních podmínek, nebo z experimentálních měření. Pro predikci jednotlivých mechanismů zanášení bylo navrženo mnoho korelačních vztahů, jenže ty jsou kvůli kombinaci různých druhů zanášení v reálném provozu téměř nepoužitelné. Proto je v této práci k predikci hodnoty součinitele zanášení v čase (R_f^*) užito empiricky odvozených tabulek TEMA.

Je nutno zdůraznit, že užití asymptotického modelu zanášení vede k zjednodušení reálného stavu, kdy u provozu chladicích výměníků dochází k častým změnám provozních parametrů a křivka zanášení v čase představuje spíše pilový průběh (křivka D na obrázku č. 42).



Obr. 42: Typy zanášecích křivek, přeloženo[91]

3.5 Model zanášení reálného výměníku dle Kernova modelu

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, Kernův model závisí na součiniteli zanášení ustáleném v čase (R_f^*) a konstanty β vyjadřující vlastnosti systému. Součinitel zanášení ustálený v čase už byl probíráán v předchozích částech této práce a dle jednotlivých kroků bylo usouzeno, že jeho hodnota dle tabulek TEMA pro dané provozní parametry a zařazení dle kvality vody činí $R_f^* = 0,000352$.

Hodnota konstanty závisící na vlastnostech systému β se obvykle vyvozuje z dat získaných z běžného provozu výměníku či konkrétního experimentálního měření na něm prováděném. Vzhledem k tomu, že tato data nejsou ke zde řešenému výměníku k dispozici, je potřeba vyjít z rovnice (22), která jej určí alespoň přibližně:

$$\beta \cong -K_k \cdot \frac{(u_r - u)}{\rho_s} \quad (22)$$

kde: K_k je korekční konstanta k úpravě výsledků z experimentálních a provozních dat
 u_r je referenční hodnota rychlosti vody. Vzhledem k tomu, že voda ve zde počítaném výměníku dosahuje rychlostí nižších než $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, tak hodnota $u_r = 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
 u je střední rychlost proudu vody ve výměníku
 ρ_s je hustota chladicí vody protékající výměníkem při střední teplotě

Rychlost proudu chladicí vody se ve výměníku postupně mění se zužováním průměru trubek vlivem zanášení v čase a dle požadavku provozovatele na průtok výměníkem. Hustota vody je pak závislá na teplotě přiváděné vody a množství předávaného tepla ve výměníku. Vzhledem k tomu, že se mění teplota přiváděné chladicí vody v závislosti na roční době, teplota kapaliny v průběhu průchodu výměníkem či teplota na výstupu v závislosti na výkonu výměníku, je nutné zavést zjednodušení a hustotu počítat pro střední teplotu udávanou jako průměr teplot na vstupu a výstupu chladicí kapaliny ve výměníku.

Je tedy zřejmé, že křivky zanášení budou pro různé rychlosti (při předpokladu konstantní hustoty vody) mírně odlišné, jako je tomu v grafu č. 1.

Na základě měřených dat dukovanského výměníku pro průtoky chladicí kapaliny v prvním roce měření, kdy se výměník považuje z pohledu zanášení za čistý, bylo dle rovnice (23) vypočteno, že rychlost chladicí kapaliny ve výměníku se pohybuje v pásmu $0,47\text{--}0,74\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Proto bude v následujících výpočtech demonstrován vliv zanášení výměníku na rychlostech odpovídajících tomuto pásmu (rychlosti $0,45; 0,55; 0,6; 0,65$ a $0,75\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

$$u = \frac{Q}{S \cdot N_t} \quad (23)$$

Nejprve pro tyto rychlosti vypočteme hodnoty konstanty β dle rovnice (22). Pro dosazování do vzorce potřebujeme znát hodnotu hustoty pro tlak v trubkovém prostoru a střední teplotu chladicí vody. Tuto hodnotu dostaneme dosazením průměrných vstupních a výstupních teplot výměníku podle jeho parametrů dle rovnice (24). Hodnotu korelační konstanty budeme v tomto případě považovat za $K_k=1$.

$$T_s = \frac{T_{s\ out} + T_{s\ in}}{2} = \frac{50,5 + 19,5}{2} = 35\text{ }^\circ\text{C} \quad (24)$$

V trubkovém prostoru se nachází přetlak $0,87\text{ MPa}$ (celkový tlak tedy činí $p = 0,971325\text{ MPa}$). Střední hustota je tedy určena funkcí tohoto tlaku a střední teploty.

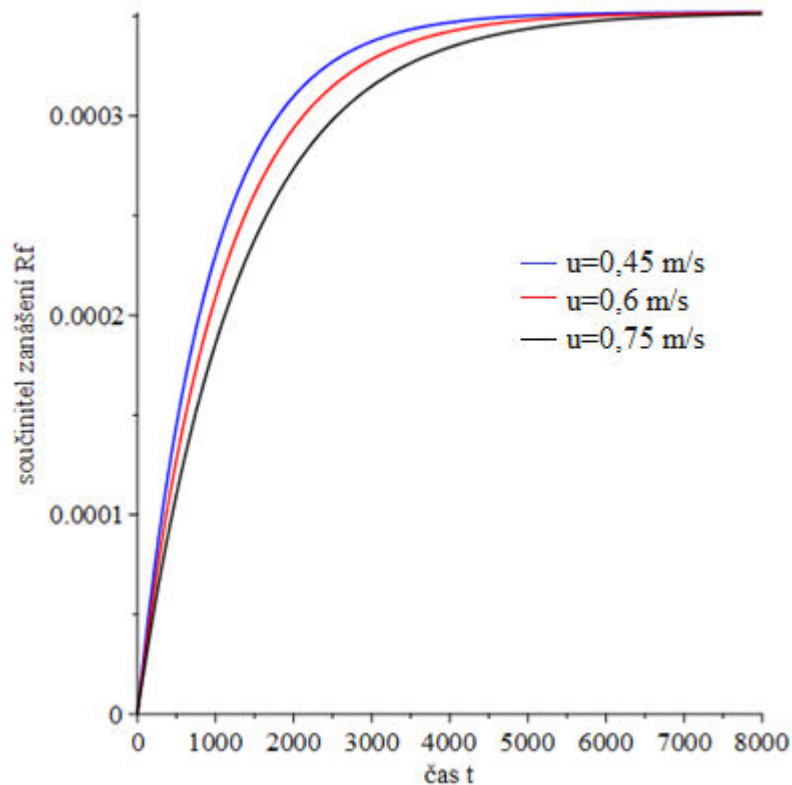
$$\rho_s = f(T_s; p_t) = 994,5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Výsledné konstanty β pro vybrané rychlosti jsou uvedené v tabulce č. 5.

Tab. 6: Konstanty β pro dané rychlosti

u [m/s]	β
0,45	-0,00106
0,55	-0,00096
0,6	-0,0009
0,65	-0,00085
0,75	-0,00075

Pro takto zjištěné hodnoty konstanty β a při znalosti součinitele ustáleného zanášení R_f^* je možné vykreslit průběhy zanášení v čase při různých rychlostech kapaliny dle Kernova modelu do grafu pro libovolný čas (voleno $t=8000\text{ s}$). Pro přehlednost budou vykresleny pouze střední rychlost ($u=0,6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a obě krajní rychlosti ($u=0,45$ a $0,75\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).



Graf 1: Součinitel zanášení v čase v závislosti na rychlosti proudění kapaliny

Z grafu uvedeného výše lze jasně vyčíst, že se při dané střední teplotě výměník s nižší rychlostí toku zaneše rychleji, než výměník s vyšší rychlostí proudění.

Stanovení času

Pro vykreslení grafu zanášení zde počítaného výměníku je důležité nejprve stanovit čas, po kterém dojde k ustálení zanášení. To je obvykle učiněno na základě provozních či experimentálních dat. Tento dukovanský výměník prochází pravidelně každé tři roky, podle požadavku výrobce, kompletní očištěnou od vrstev zanášení, a tak nejsou tato data k dispozici. Proto zde musí být zaveden předpoklad, že výrobce stanovil takovou dobu údržby právě z důvodu odstranění maximální vrstvy usazenin vzniklou při průměrném průtoku výměníkem v počátečním roce, a proto je čas pro provádění výpočtů stanoven jako $t = 3$ roky. Jestliže by vypočtená data neodpovídala těm měřeným, mohla by být tato doba pozměněna.

$$t = 3 \text{ roky} = 3 \cdot 31\,536\,000 \text{ s}^9 = 94\,608\,000 \text{ s}$$

V případě, že by skutečná doba zanesení tohoto výměníku byla delší, než zde určená doba, vedlo by to k tomu, že ve výpočtech by byla zvýšena míra zanášení oproti skutečnosti, zejména v počátečních rocích, kdy zanášecí křivka roste strměji.

⁹ Počet sekund v tzv. obyčejném roce[92].

Výpočet skutečné korekční konstanty a konstanty β

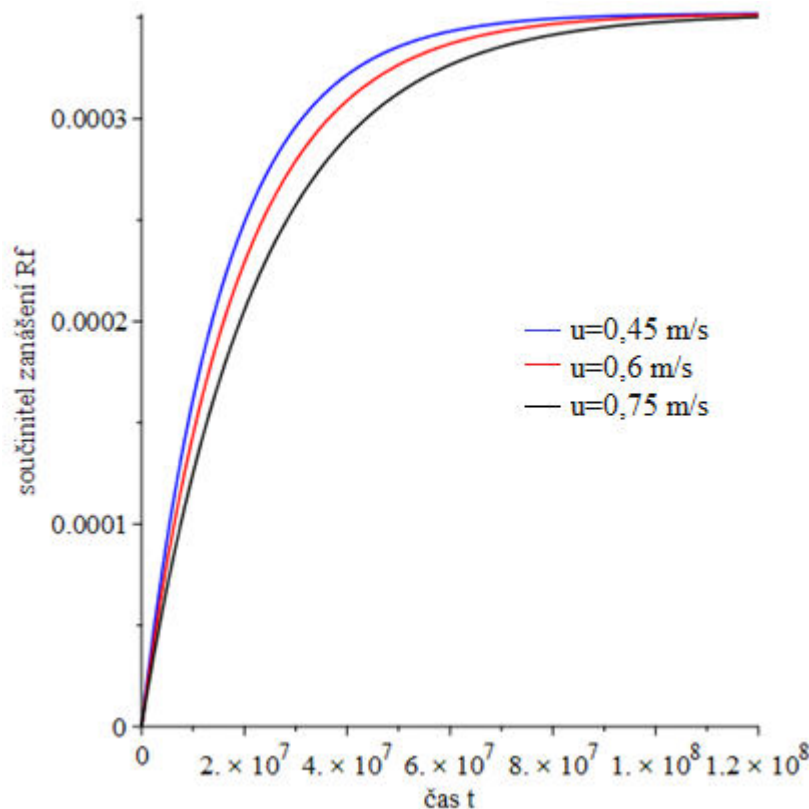
Pro výpočet korekční konstanty dosadíme do rovnice popisující Kernův model, pro výše zvolenou průměrnou rychlost ($u = 0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), skutečný čas ustálení zanášení a vyjádříme z této rovnice právě korekční konstantu. Po takto provedeném výpočtu v programu Maple byla skutečná korekční konstanta stanovena jako $K_k = 5,810338383 \cdot 10^{-5}$.

S takto nově určenou korekční konstantou je možné vypočítat skutečné hodnoty konstanty β popisující vlastnosti systému počítaného výměníku.

Tab. 7: Skutečné hodnoty konstanty β pro dané rychlosti

u [m/s]	β
0,45	-6,1346E-08
0,55	-5,5503E-08
0,6	-5,2582E-08
0,65	-4,9661E-08
0,75	-4,3819E-08

Při znalosti všech potřebných hodnot je možné vykreslit průběhy zanášení v čase při různých rychlostech kapaliny dle Kernova modelu do grafu pro skutečný čas ($t = 94\,608\,000 \text{ s}$). Pro přehlednost jsou opět vykresleny pouze střední rychlost ($u = 0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a obě krajní rychlosti ($u = 0,45$ a $0,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).



Graf 2: Součinitel zanášení v reálném čase při zvolených rychlostech

Jestliže do rovnice Kernova modelu budeme dosazovat vybrané časové intervaly při známých skutečných hodnotách korekční konstanty a konstanty β pro zvolené rychlosti proudu ve výměníku, získáme skutečné hodnoty součinitele zanášení ve stanovených časech. Získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce níže. Je zřejmé, že pro nižší rychlosti proudění chladicí kapaliny dochází k zanášení dřívě.

Tab. 8: Součinitele zanášení v daném čase pro zvolené rychlosti

		čas t [roky]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
rychlost u [m/s]	0,45	0	0,000218	0,000301	0,000333	0,000345	0,000349	0,000351
	0,55	0	0,000205	0,000291	0,000327	0,000341	0,000348	0,00035
	0,6	0	0,000198	0,000285	0,000323	0,000339	0,000346	0,00035
	0,65	0	0,000191	0,000278	0,000318	0,000337	0,000345	0,000349
	0,75	0	0,000176	0,000264	0,000308	0,00033	0,000341	0,000346

Při znalosti součinitele zanášení pro různé rychlosti a časy můžeme vypočítat na základě rovnice (16) hodnoty vnitřních průměrů trubek postižených zanášením při různých rychlostech a čase. K tomu potřebujeme taktéž stanovit teplotní vodivost vrstvy usazenin k_f . Vzhledem k tomu, že neexistuje přesný rozbor daných usazenin a jednotlivé typy zanášení se vzájemně překrývají, bylo toto číslo stanoveno jako přibližný průměr teplotních vodivostí pro různé typy usazenin $k_f = 2,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [13].

Tab. 9: Vnitřní průměry trubek v daném čase pro zvolené rychlosti

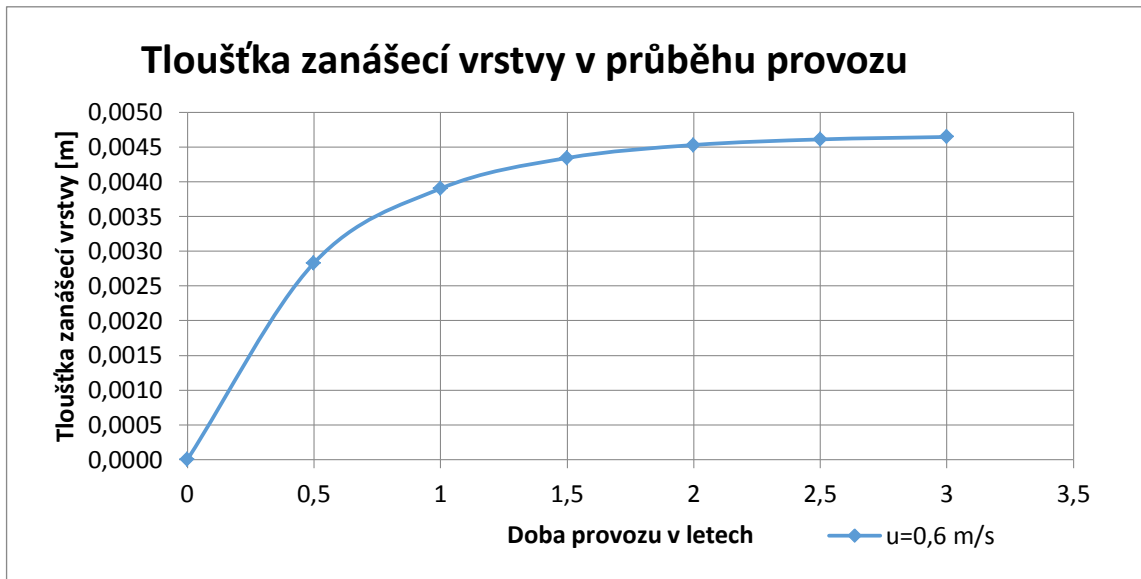
		čas t [roky]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
rychlost [m/s]	0,45	0,016	0,012914736	0,01190481	0,011542	0,011407	0,011356	0,011336819
	0,55	0,016	0,013079484	0,01202568	0,011612	0,011444	0,011374	0,011345543
	0,6	0,016	0,01316859	0,01209554	0,011655	0,011468	0,011387	0,011352088
	0,65	0,016	0,013262548	0,01217262	0,011705	0,011497	0,011403	0,011360721
	0,75	0,016	0,013466223	0,01235167	0,011828	0,011574	0,011449	0,011387149

Pokud odečteme tyto získané hodnoty od původní hodnoty průměru potrubí ($d_i = 0,016 \text{ mm}$), získáme hodnoty tloušťky nánosů pro jednotlivé rychlosti v čase.

Tab. 10: Hodnoty tloušťky vzniklých nánosů v daném čase při zvolené rychlosti

		čas t [roky]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
rychlost [m/s]	0,45	0	0,003085264	0,004095	0,004458007	0,004593	0,004644	0,004663
	0,55	0	0,002920516	0,003974	0,004388065	0,004556	0,004626	0,004654
	0,6	0	0,00283141	0,003904	0,004344931	0,004532	0,004613	0,004648
	0,65	0	0,002737452	0,003827	0,004295208	0,004503	0,004597	0,004639
	0,75	0	0,002533777	0,003648	0,004171657	0,004426	0,004551	0,004613

Při zvolení libovolné rychlosti proudění a dosažení tloušťky nánosů pro tuto teplotu do grafu je zřejmé, že vývoj tloušťky nánosů je závislý na součiniteli zanášení v čase.



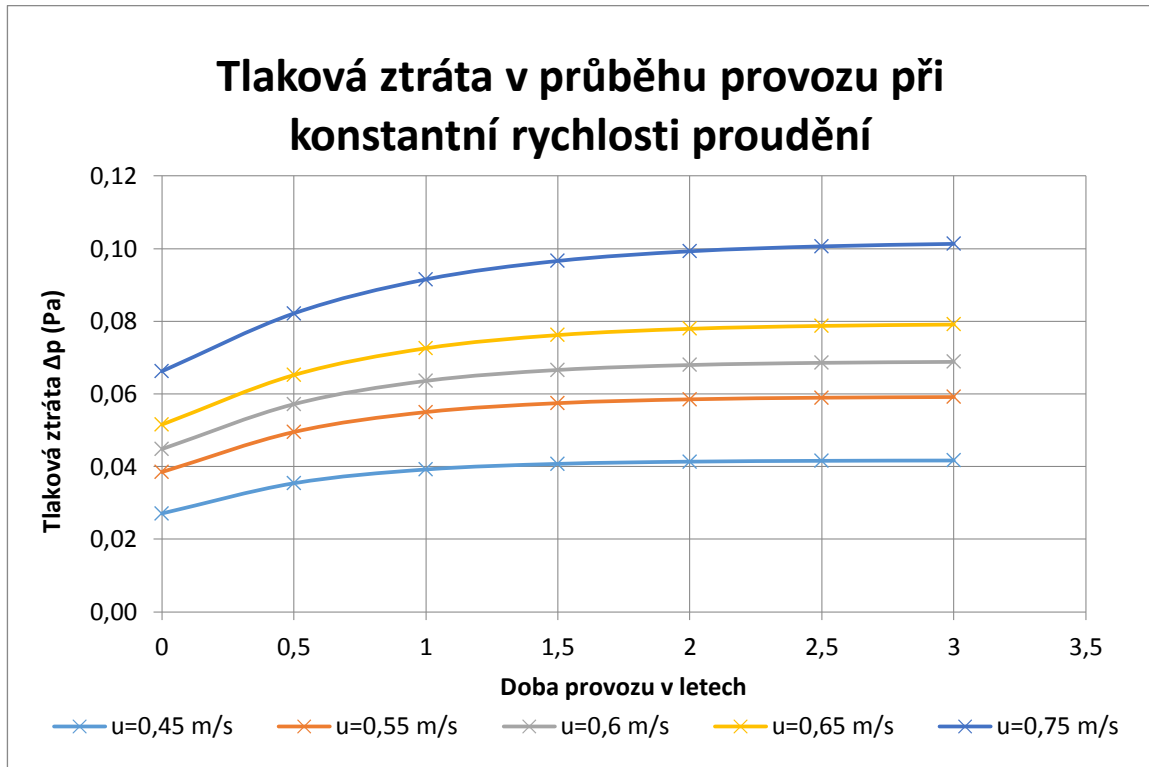
Graf 3: Tloušťka zanášecí vrstvy vznikající při provozu výměníku

Výpočet tlakové ztráty pro dané rychlosti při zanášení je dán rovnicí (14). Pro výpočet musíme taktéž znát hodnotu dynamické viskozity, jež pro danou teplotu chladicí vody činí $\mu_t = 0,0007198 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ a celkovou délku trubek, jež se dá odečíst z výkresové dokumentace a činí $L = 5,967 \text{ m}$.

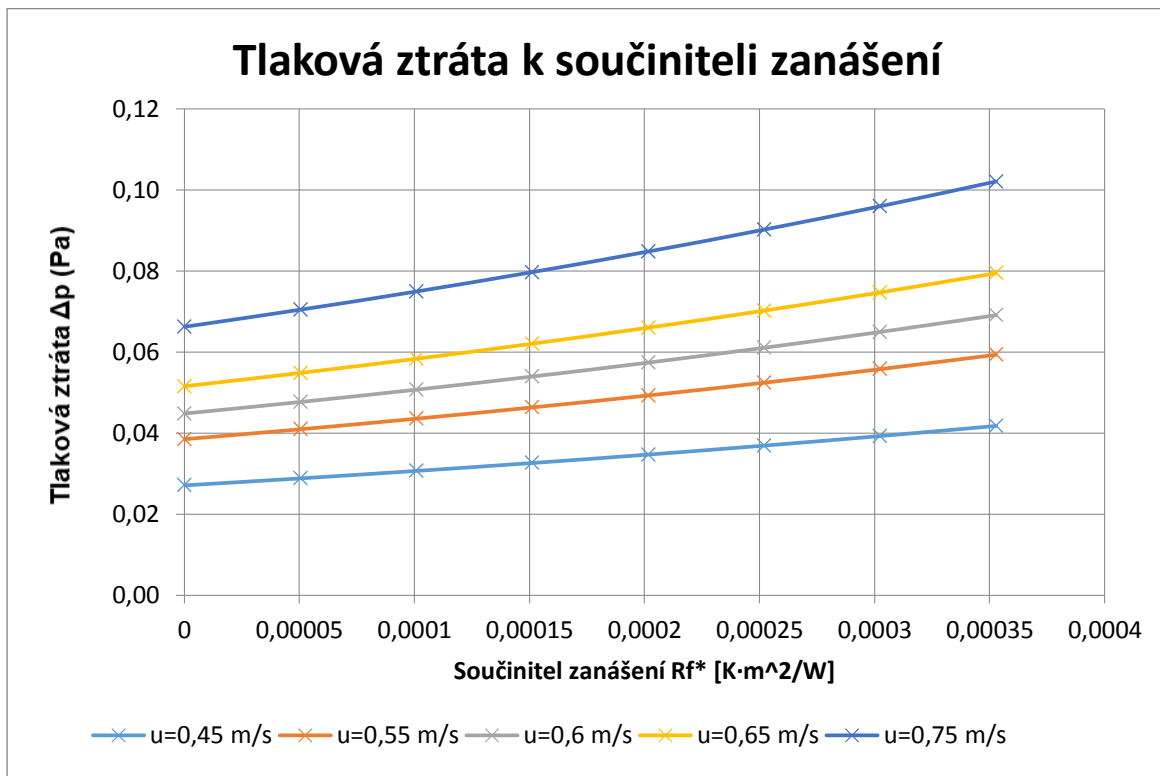
Tab. 11: Tlaková ztráta za dané období při zvolené rychlosti

		čas t [roky]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
rychlost [m/s]	0,45	0,02708619	0,03540307	0,039196	0,040742	0,041346	0,041577762	0,041666
	0,55	0,038482273	0,04950766	0,054989	0,057449	0,058506	0,058952608	0,05914
	0,6	0,044811626	0,0571632	0,063571	0,066588	0,067949	0,068552285	0,068817
	0,65	0,051549492	0,06517645	0,072551	0,076194	0,077919	0,078720217	0,079089
	0,75	0,066219093	0,08214402	0,091512	0,0966	0,099256	0,100613693	0,101301

Takto vypočtenou tlakovou ztrátu je poté možné dosadit do grafu v závislosti na době provozu výměníku, kdy je patrné, že tlaková ztráta roste nejvíce v počátečních letech vlivem rychlého růstu součinitele zanášení, nebo vyjádřit tlakovou ztrátu k růstu součinitele zanášení. Zde je patrné, že s rostoucím součinitelem zanášení roste téměř lineárně také tlaková ztráta.

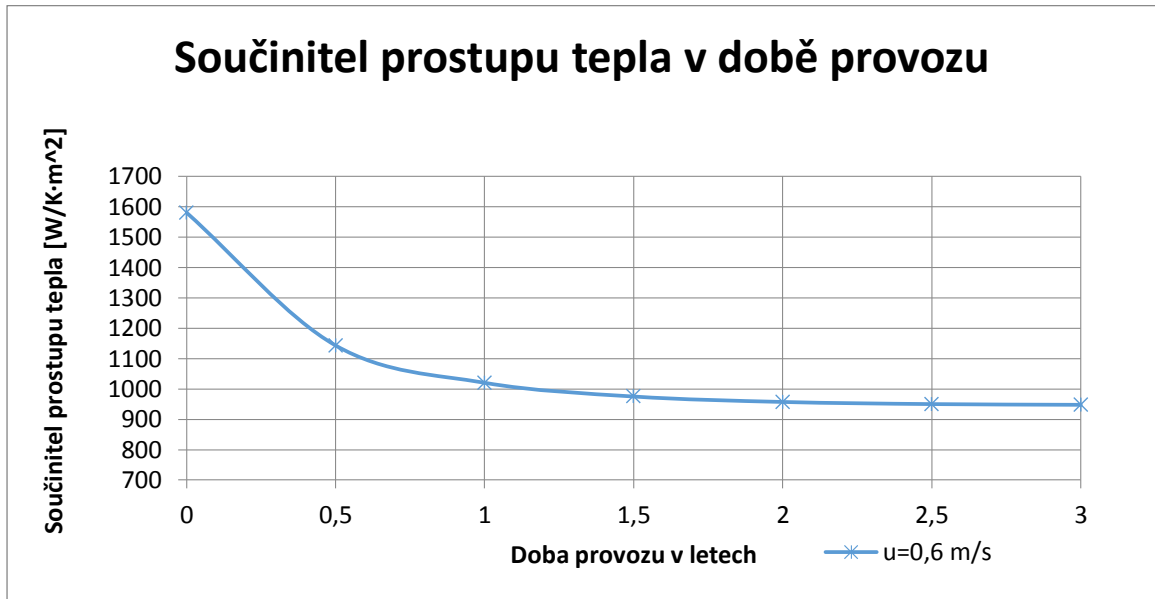


Graf 4: Tlaková ztráta v průběhu provozu výměníku

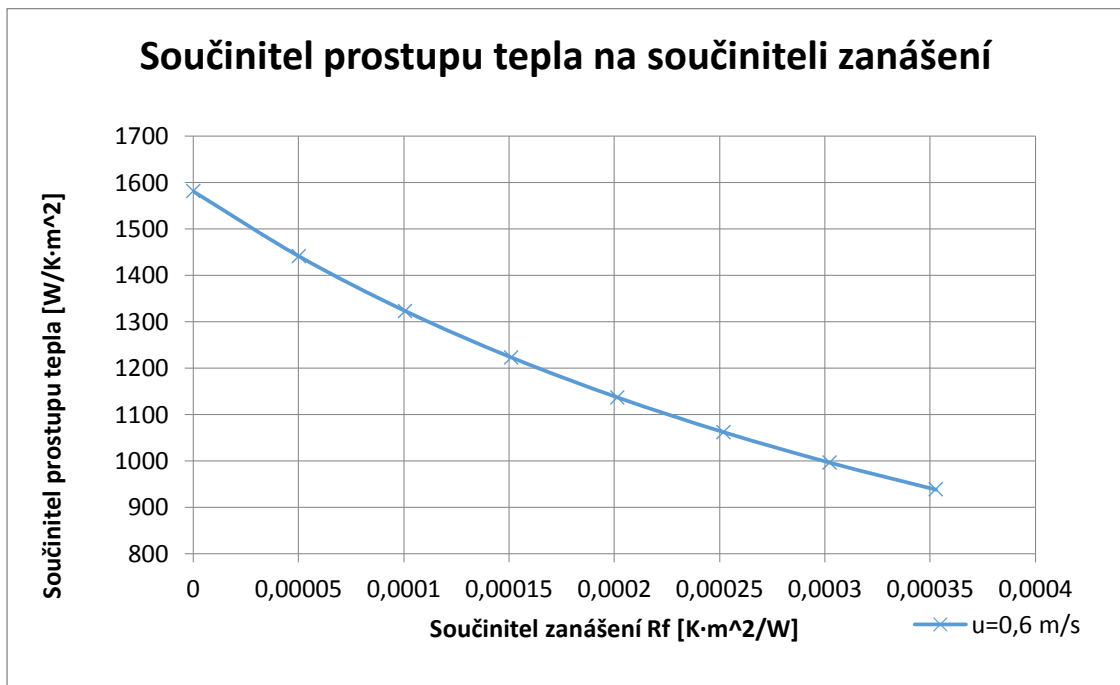


Graf 5: Tlaková ztráta v závislosti na součiniteli zanášení

Pro funkci výměníku je nejdůležitější, kolik tepelné energie se v něm mezi kapalinami dokáže vyměnit. Hodnotu možného předané tepelné energie mezi kapalinami přes stěnu trubek vyjadřuje součinitel prostupu tepla. Vliv zanášení má na tento součinitel negativní dopad, což jde vidět i na grafech níže.

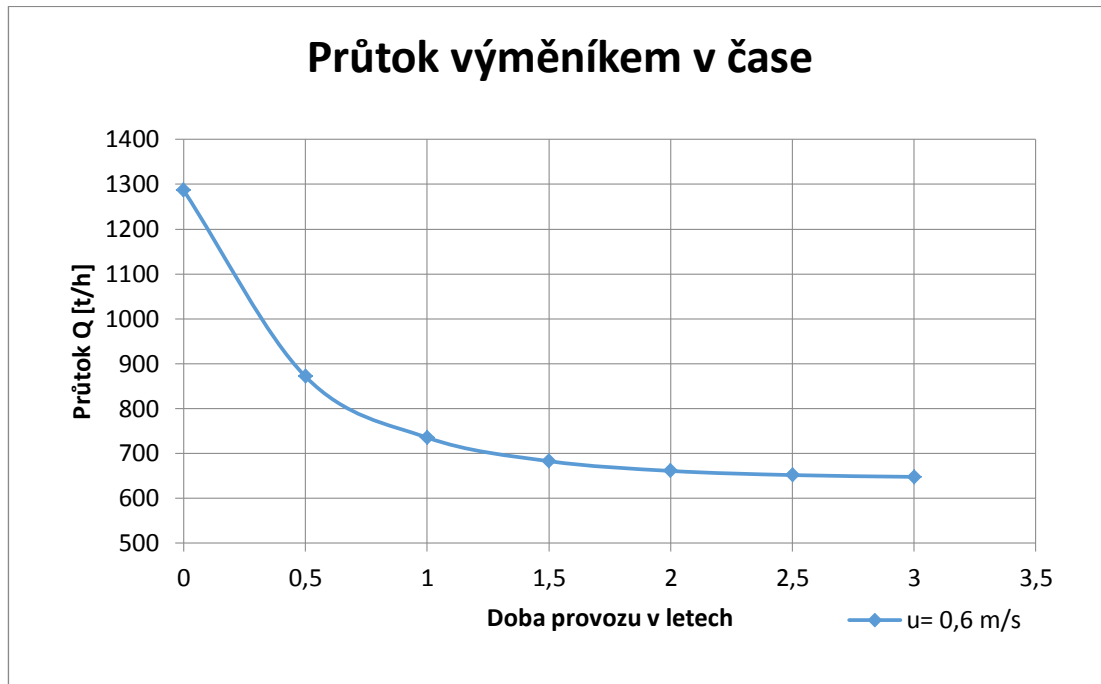


Graf 6: Součinitel prostupu tepla v průběhu provozu výměníku



Graf 7: Součinitel prostupu tepla v závislosti na součiniteli zanášení

Všechny výše uváděné grafy jsou při konstantních rychlostech, které byly zvoleny na počátku výpočtů dle průtoku výměníkem v čistém stavu. V praxi by to ale znamenalo, že s rostoucím zanášením by začal klesat vnitřní průměr potrubí a to by při konstantních rychlostech vedlo k postupnému snížení průtoku chladicí kapaliny výměníkem, což by vyústilo k omezení jeho funkce.



Graf 8: Průtok výměníkem v čase pro danou rychlost

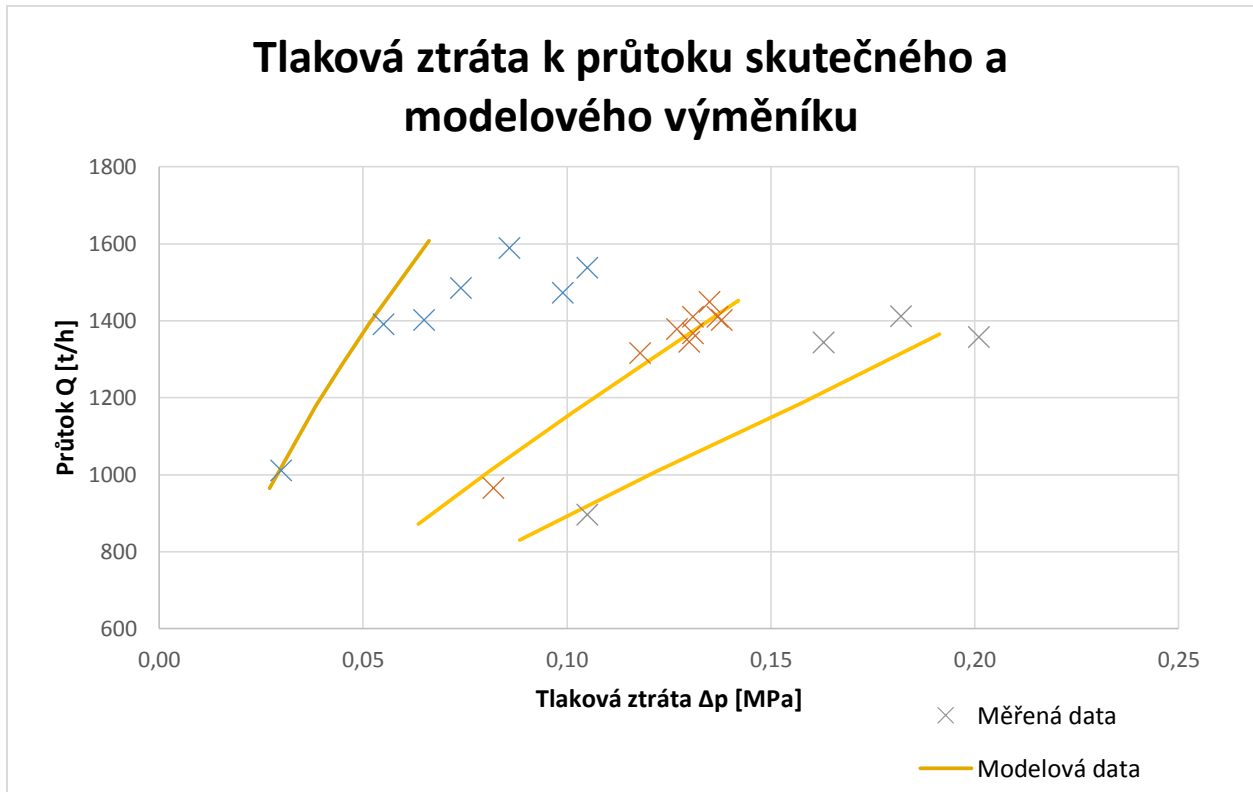
Z tohoto důvodu je nutné počítat s tím, že provozovatel se bude snažit zachovávat spíše konstantnější průtok výměníkem. To vede k tomu, že voda musí v trubkách zúžených zanášením proudit rychleji, což opět vede k ovlivnění zanášení, tlakové ztrátě, atd.

Pro výpočet tlakových ztrát dukovanského výměníku při jeho zanesení je tedy zvolen postup, kdy jsou na základě měřených průtoků za tato období vypočteny rychlosti proudu kapaliny za předpokladu, že průměr potrubí je snížen vrstvou nánosů vypočtenou pro předchozí období. S vybranými hodnotami rychlostí z tohoto rozmezí jsou opět provedeny stejné výpočtové operace jako u rychlostí v nezaneseném stavu.

Při výpočtu součinitele zanášení v průběhu času nejsou důležité hodnoty zanášení před ani za období, ke kterému počítáme tlakovou ztrátu, jelikož v dřívějším období dosahovaly průměrné hodnoty rychlostí nižších velikostí, naopak v následujících obdobích budou opět větší. Je zde velký předpoklad, že hodnoty součinitele zanášení, a z něj odvozených veličin, se ve sledovaném období přizpůsobí průměrným rychlostem v tomto období.

3.6 Posouzení míry správnosti výpočtového modelu

Po provedení výpočetních operací dle výše uvedeného postupu, pro období po 1. a 2. roce provozu výměníku a následném dosažení společně s hodnotami pro čistý stav, lze při vykreslení křivek hodnot do společného diagramu společně se změřenými hodnotami v JE Dukovany zjistit, nakolik se zde uváděný výpočtový model liší od skutečnosti.



Graf 9: Porovnání modelových křivek závislosti tlakové ztráty na průtoku s měřenými skutečnými hodnotami

Z grafu výše vyplývá, že i přes veškerá zjednodušení, která byla zavedena, aby byl vůbec výpočet modelového zanášení možný, jsou si reálné a modelové křivky velmi blízké. Zejména pro období již ve znečištěném stavu výměníku jsou křivky velmi podobné. Lehká odchylka je patrná v období, kdy byl výměník považován z pohledu zanášení za čistý. Musí zde být ale zdůrazněno, že modelové hodnoty jsou vždy vztaženy k začátku jednotlivých období, kdežto reálné hodnoty byly měřeny v průběhu těchto období, což může vyvolat mírné odlišnosti mezi křivkami, zejména v prvním období, kdy zanášení roste nejprudčeji v průběhu času.

Na základě zjevné podobnosti křivek je možné konstatovat, že užití Kernova modelu bylo v tomto případě prospěšné k dosažení výsledné modelové tlakové ztráty výměníku. Stejně tak lze potvrdit správnost různě zaváděných zjednodušení, voleb konstant a výpočetních přístupů v této práci.

ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo provést literární rešerši o zanášení, dále na základě měřených hodnot provést rozbor chladicí vody a odvodit její potenciál k zanášení a v poslední části provést konkrétní výpočet zanášení a jeho vlivu na výměník v jaderné elektrárně Dukovany a vypočtené hodnoty porovnat s reálně měřenými daty.

První kapitola je věnována zevrubné literární rešerši o zanášení. V rámci této kapitoly je nejprve krátký vstup do problematiky zanášení, dále je popsán vliv zanášení na funkci výměníku či průběh zanášecího procesu a závěrem jsou ukázány jednotlivé druhy zanášení.

Další kapitola se zabývá chemickým rozbohem chladicí vody užívané v elektrárně pro chlazení sekundárního okruhu. Nejprve jsou popsány parametry sledované v rozboru a důvod jejich sledování. Dále je představen celý chladicí okruh elektrárny a jeho parametry. Velká část této kapitoly je pak věnována rozboru konkrétního odběru chladicí vody. Nejprve je rozebrána její validita pro rozbor, kdy vzorek odpovídá průměrným hodnotám měřeným v průběhu roku. Poté je zjištěno, že odebraný vzorek splňuje příslušnou normu. Na základě hodnot látek obsažených ve vzorku byl určen potenciál chladicí vody k zanášení, přičemž bylo zjištěno, že voda má minimální potenciál k zanášení. V závěru kapitoly je přiřazen součinitele zanášení podle chemických kvalit odebrané vody a z nich plynoucího potenciálu k zanášení.

Závěrečná část práce se zaměřuje na modely zanášení a následný výpočet zanášení reálného výměníku. Nejprve jsou představeny modely zanášení, jejich výhody a použití. Na základě požadavků zadání je pro následný výpočet vybrán Kernův asymptotický model zanášení. V této části jsou taktéž uvedeny rovnice, ze kterých se vychází při následných výpočtech, a zavedeny předpoklady vedoucí k nezbytnému zjednodušení, které umožní provedení výpočtů. V samotné výpočtové části jsou nejprve v programu Maple vykresleny křivky průběhu součinitele zanášení při konstantní rychlosti v čase. Z těchto křivek je patrné, že k zanášení výměníku dochází zejména v počátku provozu výměníku. V následných odstavcích jsou pak představeny při konstantní rychlosti závislosti důležitých parametrů (jako je tloušťka nánosu, tlaková ztráta, součinitel prostupu tepla či průtok) na součiniteli zanášení či době provozu výměníku. Z křivek je patrné, že k největším změnám parametrů dochází právě v prvním roce, kdy je taktéž největší růst zanášení. Poslední a klíčovou částí práce je výpočet tlakové ztráty v průběhu užívání tepelného výměníku a následné porovnání výsledků se skutečně naměřenými daty při jeho provozu. Výsledné modelové a skutečné křivky jsou si velmi podobné, a proto lze vyvodit, že použité výpočetní metody, modely a předpoklady byly správně zvoleny. Lehké odchylky jsou vysvětleny nutně zavedenými zjednodušeními na straně výpočtu a nejednoznačností měření skutečných dat na straně reálných podkladů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KUPPAN, T. Heat Exchanger Design Handbook, Second Edition. CRC Press 2013. Print ISBN: 978-1-4398-4212-6.
- [2] RAMESH K. Shah, SEKULIĆ P. Dušan. Fundamentals of heat exchanger design. John Wiley & Sons, inc, Print 2003, ISBN 0-471-32171-0.
- [3] DORAN, Pauline M, Bioprocess Engineering Principles (Second Edition), Chapter 9 - Heat Transfer, 2013, Pages 333-377, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-220851-5.00009-5>, [online] [cit. 15. 6. 20] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780122208515000095?via%3Dihub>
- [4] AWAD, Mostafa. (2011). Fouling of Heat Transfer Surfaces. [online] [cit. 15. 6. 20] Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Thermal-resistances-for-clean-and-fouled-tubes_fig4_221910395
- [5] N., S. Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces. MITROVIC, Jovan, ed. Heat Exchangers - Basics Design Applications [online]. InTech, 2012, 2012-03-09 [cit. 2020-06-24]. DOI: 10.5772/32990. ISBN 978-953-51-0278-6. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/heat-exchangers-basics-design-applications/heat-exchanger-fouling-and-its-mitigation>
- [6] Pugh, Simon & Hewitt, Geoffrey & Müller-Steinhagen, Hans. (2009). Fouling During the Use of "Fresh" Water as Coolant - The Development of a "User Guide". Heat Transfer Engineering. 30. 851-858. 10.1080/01457630902753706. [online] [cit. 15. 6. 20] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/225003558_Fouling_During_the_Use_of_Fresh_Water_as_Coolant_-_The_Development_of_a_User_Guide
- [7] SILVESTRINI, R., Waste heat recovery: Heat exchanger fouling and corrosion, chem. eng. Prog., Dec, 29-35 (1979)
- [8] Esawy, M., Malayeri, M.R. & Müller-Steinhagen, H. Crystallization fouling of finned tubes during pool boiling: effect of fin density. Heat Mass Transfer 46, 1167–1176 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00231-010-0690-7> [online] [cit. 15. 6. 20] Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-010-0690-7>
- [9] WIELAND, Thermal solutions, low- finned tubes, [online] [cit. 15. 6. 20] Dostupné z: <https://www.wieland-thermalsolutions.com/en/products/finned-tubes/low-finned-tubes>
- [10] EPCSTEEL, How to produce the HF welded serrated fin tube, [online] [cit. 15. 6. 20] Dostupné z: <http://www.epcsteel.com/produce-hf-welded-serrated-fin-tube/>
- [11] ALFA LAVAL, Spiral Heat Exchanger solves costly fouling problems, [online] [cit. 15. 6. 20] Dostupné z: https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/media/stories/customer_story_refinery_usa_ppi00422en.pdf

- [12] Al-Haj Ibrahim, Hassan. (2012). Fouling in Heat Exchangers. 10.1016/S0017-9310(96)00261-X. [online] [cit. 15. 6. 20] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235338024_Fouling_in_Heat_Exchangers/citation/download
- [13] KAKAÇ, Sadik. Boilers, evaporators and condensers, Publ. John Wiley & Sons, Inc. 1991 ISBN 978-0-471-62170-6
- [14] JRADI, Rania, Ali FGUIRI, Christophe MARVILLET a Mohamed RAZAK JEDAY. Tubular Heat Exchanger Fouling in Phosphoric Acid Concentration Process. *Heat Exchangers [Working Title]* [online]. IntechOpen, 2019, 2019-9-28 [cit. 2020-06-24]. DOI: 10.5772/intechopen.88936. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/online-first/tubular-heat-exchanger-fouling-in-phosphoric-acid-concentration-process>
- [15] HARCHE, Rima, Rafik ABSI a Abdelkader MOUHEB. Study of the fouling deposit in the heat exchangers of Algiers refinery. *International Journal of Industrial Chemistry* [online]. 2014, 5(2) [cit. 2020-06-24]. DOI: 10.1007/s40090-014-0016-6. ISSN 2228-5970. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40090-014-0016-6>
- [16] GIRIDHAR, Gurram, R.K.N.R. MANEPALLI a Gudimamilla APPARAO. Contact Angle Measurement Techniques for Nanomaterials. *Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization* [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 173-195 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1016/B978-0-323-46139-9.00008-6. ISBN 9780323461399. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323461399000086>
- [17] DUNWELL, Marco, Yushan YAN a Bingjun XU. Understanding the influence of the electrochemical double-layer on heterogeneous electrochemical reactions. *Current Opinion in Chemical Engineering* [online]. 2018, 20, 151-158 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1016/j.coche.2018.05.003. ISSN 22113398. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211339817300965>
- [18] VŠCHT Praha. Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství. Korozní praskání – teorie. [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/koroze_korozni_praskani/teorie.htm
- [19] MORENO, J., N. DE HART, M. SAAKES a K. NIJMEIJER. CO₂ saturated water as two-phase flow for fouling control in reverse electrodialysis. *Water Research* [online]. 2017, 125, 23-31 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1016/j.watres.2017.08.015. ISSN 00431354. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135417306681>

- [20] EPSTEIN, N., Fundamentals of heat transfer surface fouling: With special emphasis on laminar flow, in *Low Reynolds Number Flow Exchangers*, Hemisphere, Washington D.C., 1982, pp. 951-964.
- [21] HASSAN, A.I. Fouling in Heat Exchangers. [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/39353.pdf>
- [22] MOSTAFA, M. A. Fouling of Heat Transfer Surfaces. [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/13202.pdf>
- [23] Wolverine Tube, Initials. Wolverine tube heat transfer data book . (Fouling Factors and Erosion Speeds). [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: https://www.wlv.com/products/databook/ch1_6.pdf
- [24] *HRS Heat Exchangers*, Fouling factors in heat exchangers. [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <http://www.hrs-heatexchangers.com/resource/fouling-factors-heat-exchangers/>
- [25] *Types Of Fouling In Heat Exchangers*, Chemical Process Engineering & Simulation December 18, 2018 [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: https://chempds.blogspot.com/2018/12/types-of-fouling-in-heat-exchangers_18.html
- [26] BOTT, T. R., Fouling Notebook, Institution of Chemical Engineers, London, 1990
- [27] MARTÍN-RODRÍGUEZ, Alberto J., Jose M. F. BABARRO, Fernando LAHOZ, Marta SANSÓN, Victor S. MARTÍN, Manuel NORTE, José J. FERNÁNDEZ a Ali AL-AHMAD. From Broad-Spectrum Biocides to Quorum Sensing Disruptors and Mussel Repellents: Antifouling Profile of Alkyl Triphenylphosphonium Salts. *PLOS ONE* [online]. 2015, 10(4) [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1371/journal.pone.0123652. ISSN 1932-6203. Dostupné z: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0123652>
- [28] *HVAC SYSTEMS*, C.Q.M., [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://www.cqm-tech.com/water-treatment/condenser-cleaner-hvac/>
- [29] *UV Biofouling Control*, AML Oceanographic, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://amloceanographic.com/biofouling-control/>
- [30] CHEMAGAZIN, ročník 2013, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin_2010/file/PDF_full/CHEMAGAZ%20C3%8DN_1-2013.pdf
- [31] FIROUZI, M. a S. H. HASHEMABADI. Analytical Solution for Newtonian Laminar Flow Through the Concave and Convex Ducts. *Journal of Fluids Engineering* [online]. 2009, 131(9) [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1115/1.3184026. ISSN 0098-2202. Dostupné z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article/doi/10.1115/1.3184026/467258/Analytical-Solution-for-Newtonian-Laminar-Flow>

- [32] *Preventing Frozen Pipes*, Single Source, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://singlesource-usa.com/preventing-frozen-pipes/>
- [33] *NTSB urges redesign of Trent 800 fuel-oil heat exchanger*, Flight Global, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://www.flightglobal.com/ntsb-urges-redesign-of-trent-800-fuel-oil-heat-exchanger/85482.article>
- [34] GAUTAM, Rahul Kumar, *Fouling in Process Appararatures*, 2018, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/8710/01b4e805423971e564a10d8a1162d308530f.pdf>
- [35] *Top Tips for Specific Types of Heat Exchanger Fouling*, Flouid Power Journal, 2019, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://fluidpowerjournal.com/top-tips-specific-types-heat-exchanger-fouling/>
- [36] *Demineralizovaná voda*, 2009, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://www.destilovana-voda.cz/o-destilovane-vode/>
- [37] *Vstupní školení pro jaderné elektrárny EDU a ETE*, vlastní materiál společnosti Čez, a. s.
- [38] *ČSN 75 7171 (757171) Jakost vod. Složení vody pro průmyslové chladicí okruhy*, TECHNOR, 2018, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/757171-csn-75-7171_4_15270.html
- [39] *Chladicí okruhy*, Chemická Obchodní Společnost s.r.o., [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: http://www.chos.cz/chladici-okruhy/?fbclid=IwAR2BN6vOkES2CBi7L7Is6lTAm13xo-1j6DwRUQ_UR_fFbn-xKl-Ttp1NwpU
- [40] *Automatické odluhy otevřených okruhů*, AQUA Cleer s.r.o., [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <http://www.aquacleer.cz/sluzby-a-zarizeni/automaticke-odluhy-otevrenych-okruhu.html>
- [41] *Požadavky na kvalitu teplotnosných kapalin*, TOPIN, 2017, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: http://www.topin.cz/clanky/pozadavky-na-kvalitu-teplotnosnych-kapalin-detail-2239?fbclid=IwAR0Thh2wm4dM6ehHlNezFcME7_lkJycgfxSRph0exg-tdkYswhOHF6kQwXk
- [42] *Iontový asociát*, Leporelo, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://leporelo.info/iontovy-asociat>
- [43] PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 4., aktualiz. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2009. ISBN 978-80-7080-701-9
- [44] *Voda - H₂O*, Chemie, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <http://ucebnicechemie.wz.cz/index.php?sloucenina=voda>

- [45] *Koroze*, Chemická Obchodní Společnost s.r.o., [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <http://www.chos.cz/resene-problemy/koroze/?fbclid=IwAR0IH7KEGze3VKwb735KAwrbAFtVx78gI42Leie1lg-jmmckatNxi6eqv3g>
- [46] NOVÁK, P. Druhy koroze kovů. *Koroze a ochrana materiálu*. 2005, roč. 49, čís. 4, ISSN 0452-599X [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: https://web.archive.org/web/20100215160653/http://www.vscht.cz/met/aki/kom_49/49_75_82.pdf
- [47] *Koroze v kapalinách*, Strojírenství, 2020, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: https://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/koroze-v-kapalinach.html?fbclid=IwAR3IFSvW4yLAMF86iXDI0jtOyRyg4nOO8Z4Xq3pI7NP_RLlqV0ieYzzQ8dk
- [48] ČERNÝ, Miroslav, et al. Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984. 264 s. L13-B2-V-31/22629.
- [49] VOSMÍK, Zdeněk, Výskyt koroze a jejích úsad při ohřevu vody ve výměnících, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://www.vosmik-vymeniky.cz/data/140110-vliv-chemickeho-slozeni-vody-1.korozni-vlivy.pdf>
- [50] *Agresivita na pažici a podchycující konstrukce*, ČVUT, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <http://technologie.fsv.cvut.cz/aitom/podklady/online-zakladani/textjama5.html?fbclid=IwAR0PVh6Iwqw-8BliS7wyVVGdKnQx1knlShbcNz5KejJeBD4tQX8Toa6T1mQ>
- [51] *Humínové látky*, Humatex s.r.o., 2015, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: http://www.humatex.cz/cs/obecne-informace/huminove-latky?fbclid=IwAR0uu1CO_SNKegZwndJFSIHUJboS_hTwOLEKrxQAugDD4duUoRJkTTmpTtl
- [52] *Greenpeace report: clothing industry shows progress in cutting hazardous chemicals*, Greenpeace, 2018, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: https://www.greenpeace.org/international/press-release/17739/greenpeace-report-clothing-industry-shows-progress-in-cutting-hazardous-chemicals/?fbclid=IwAR3YKMCDQW0XL97xf5Oco7xrmADjb54NCi4C_Kezo_NO nu-Tu6M-vjsgN8g
- [53] *Turbidity Scale*, Clean Lakes Alliance, 2020, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: https://www.cleanlakesalliance.org/2019-water-quality-monitoring-results/turbidity-scale-2/?fbclid=IwAR0DOoORVrmnWTu6txbPidfikJhos3wx6x2bZi3J_-I-QzKtPSPw67QZNnQ
- [54] AMBROŽOVÁ, J. Aplikovaná a technická hydrobiologie [online]. [2005] [cit. 2020-5-26]. Dostupný z WWW: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-521-8/pages-img/obalka-1.html>. ISBN 80-7080-521-8.

- [55] Horáková, M.: Analytika vody. 2. vyd. Praha: VŠCHT, 2007. 335 s. ISBN 978-80-7080-520-6.
- [56] ČSN EN 872: 2005. Jakost vod – Stanovení nerozpuštěných látek – Metoda filtrace filtrem ze skleněných vláken. Praha: Český normalizační institut, 2005. 12 s.
- [57] PYTL, V. a kol. Příručka provozovatele čistírny odpadních vod. 1. vyd. SOVAK ČR 2004. 209 s. ISBN 80-239-2528-8
- [58] PITTEK, P.: Hydrochemie. 3. vyd. Praha: VŠCHT, 1999. 568 s. ISBN 80-7080-340-1
- [59] *Kyselost a zásaditost*, Web chemie, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://www.webchemie.cz/pH.html>
- [60] WÜNSCH, Josef, ed. Technická příručka pro pracovníky oboru úprav vody. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1981. 778 s
- [61] *Celkový Organický Uhlík*, Arnika, 2014, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: https://arnika.org/celkovy-organicky-uhlik-toc?fbclid=IwAR00Fpl5iln9q3VT20L0rmy0IPMybahmubEPtja9PAIu6AwJ_0QwHU5VWnw
- [62] *Rozbor vody*, SČVK, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://www.scvk.cz/res/archive/114/012518.pdf>
- [63] PITTEK, Pavel, Koncepce neutralizačních kapacit v hydrochemii a technologii vody, 1999, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1999_08_509-511.pdf
- [64] PIVOKONSKÝ, Martin, Hydrochemie- oxid uhličitý a jeho iontové formy, pH, NK, 2018, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <http://www.pivokonsky.wz.cz/HCh/Hydrochemie6.pdf>
- [65] WANG, Juanjuan, Maren SICKINGER, Valerian CIOBOTA, Martina HERRMANN, Helfried RASCH, Petra RÖSCH, Jürgen POPP a Kirsten KÜSEL. Revealing the microbial community structure of clogging materials in dewatering wells differing in physico-chemical parameters in an open-cast mining area. *Water Research* [online]. 2014, 63, 222-233 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1016/j.watres.2014.06.021. ISSN 00431354. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135414004503>
- [66] *Hydrochemie*, 2012, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3182&typ=html
- [67] *Chloridy ve vodě*, EuroClean s.r.o., [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://euroclean.cz/problemy->

- vody/chloridy/?fbclid=IwAR0r5ohmUrE3MIDntTjqSnLLzJvqdozXeof9YkRuRkV0L1RwVCmh6wEn3cU
- [68] *Koloběh síry v přírodě*, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/74254/GAL126_HGF_N2102_2102T006_2009_priloha.pdf?sequence=3&isAllowed=y&fbclid=IwAR1B9TIMomWqKidlBn7rtW9Sgv2-ZeelutwXkh6YQKAbhhWNdN592EsQWaQ
- [69] *Sírany ve vody*, EuroClean s.r.o., [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: https://euroclean.cz/problemy-vody/sirany/?fbclid=IwAR1dvkJN2GCGNtLk_2-6O1j02-RO342UpIKexq-AxCTbX-tHsyNeQIPI9Dg
- [70] *Elektrický proud ve vodě*, FyzWeb, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=172>
- [71] HORÁKOVÁ, Marta a kol. *Analytika vody*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemickotechnologická, 2000. 283 s. ISBN 80-7080-391-6.
- [72] HÜBNER, Pavel. *Úprava vody v energetice*. 2., přeprac. a rozš. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. 520 s. ISBN 978-80-7080-873-3.
- [73] *Povídání o vodě*, Agrola, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: http://www.agrola.cz/laboratorni-rozbor/rozbory-vod/rozbor-pitne-vody/povidani-o-vode/?fbclid=IwAR3tRs50P67FcVPEugVLBo84x646WDq0M35_IQ1ev_u6cLRffW2LsyTsLX8
- [74] *Nuclear power*, Britannica, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/nuclear-power>
- [75] *Cooling tower and its types*, Engineering Insider, 2018, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: https://engineeringinsider.org/cooling-tower-types/?fbclid=IwAR0S4kdgYfXDKnMHrsk0vYVQ8zCwcK-Z2zf_RVXjbgakOgrYTvjRyvzgcRQ
- [76] Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, SUJB, 2002, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/307_po_novele.pdf
- [77] HÜBNER, Pavel. *Úprava vody v energetice*. 2., přeprac. a rozš. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. 520 s. ISBN 978-80-7080-873-3.
- [78] *Oxid uhličitý a jeho formy*, ČVUT, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2008/03/hydro-7.pdf?fbclid=IwAR29j8umJO6ApR3Qi1c-UutuhbZtW1pQhNx7hJYSzUy55pmUscsUOkMizrI>
- [79] Lorenzo Cremaschi & Xiaoxiao Wu (2015) Effect of Fouling on the Thermal Performance of Condensers and on the Water Consumption in Cooling Tower

- Systems, Heat Transfer Engineering, 36:7-8, 663-675, DOI: 10.1080/01457632.2015.954927, Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1080/01457632.2015.954927>
- [80] *Water hardness calculator*, Lenntech, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://www.lenntech.com/ro/water-hardness.htm?fbclid=IwAR3U5i9V8WN15xE6A82T3mrb3B3aBdcKUg5r7bAVCTiAY32zQ6ZDa5F15CU>
- [81] *Conversions and Guides – Water Chemistry CaCO₃ Equivalents*, Nancrede Engineering Co., [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://www.necoindustrialwater.com/conversions-and-guides-water-chemistry-caco3-equivalents/>
- [82] *Parts per Million Conversion*, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <http://delloyd.50megs.com/ppm.html>
- [83] CHENOWETH, J. M. (1990). Final Report of the HTRI/TEMA Joint Committee to Review the Fouling Section of the TEMA Standards. *Heat Transfer Engineering*, 11(1), 73–107. doi:10.1080/01457639008939724
- [84] STEHLÍK, P., KOHOUTEK, J., NĚMČANSKÝ J. Tepelné pochody, výpočet výměníku tepla, Vysoké učení technické, 1991, ISBN 8021403632
- [85] MÜLLER-STEINHAGEN, Hans. Heat Transfer Fouling: 50 Years After the Kern and Seaton Model. *Heat Transfer Engineering* [online]. 2011, 32(1), 1-13 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1080/01457632.2010.505127. ISSN 0145-7632. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01457632.2010.505127>
- [86] COULSON, J. M., RICHARDSON J. F., Coulson & Richardson's Chemical Engineering: Chemical Engineering Design. 3rd ed, Butterworth-Heinemann, 1999, ISBN 0750641428 [20] VDI GES
- [87] SERNA, M. a A. JIMÉNEZ. A Compact Formulation of the Bell–Delaware Method for Heat Exchanger Design and Optimization. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2005, 83(5), 539-550 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1205/cherd.03192. ISSN 02638762. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263876205727301>
- [88] STEHLÍK P., Tepelné pochody, Soubor přednášek předmětu, ÚPEI VUT FSI Brno, 2014
- [89] SUBRAMANIAN, R. Shankar, Heat transfer in Flow Through Conduits, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: https://web2.clarkson.edu/projects/subramanian/ch330/notes/Heat%20Transfer%20in%20Flow%20Through%20Conduits.pdf?fbclid=IwAR0gkH38sLeWEcLDmPF4sKwj_OTKfWIMOV-8RTwz4jNEekmt6MUrr0ViePs

- [90] KIM, Nae-Hyun. The effect of particle concentration on ferric oxide fouling of water in tubes having a two-dimensional repeated rib geometry. *Journal of Thermal Science and Technology* [online]. 2016, 11(2), JTST0021-JTST0021 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1299/jtst.2016jtst0021. ISSN 1880-5566. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jtst/11/2/11_2016jtst0021/_article
- [91] DEY, Ashis Kumar, Investigation of Fouling and its Impact in Heat Exchangers, 2018, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <http://www.journalimcms.org/wp-content/uploads/9-Investigation-of-Fouling-and-its-Impact-Ashis-kumar-Dey-Vol-13-No-4.pdf>
- [92] *Obyčejný rok*, Jednotky.cz, [on-line] [cit. 12. 6. 2020] Dostupné z: <https://www.jednotky.cz/cas/obycejny-rok>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
η_p	Účinnost čerpadla či ventilátoru	%
K_k	Korekční konstanta	—
N_p	Počet průchodů proudu výměníkem	—
N_t	Počet trubek	—
Nu_t	Nusseltovo číslo pro kapalinu v trubce	—
Pr_t	Prandtlovo číslo v trubce	—
Re_t	Reynoldsovo číslo v trubkovém prostoru	—
R_f	Součinitel zanášení	$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$
R_f^*	Součinitel zanášení ustálený v čase	$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$
R_{fi}	Tepelný odpor na vnitřní straně trubky vzniklý zanášením	$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$
R_{ft}	Celkový tepelný odpor vzniklý zanášením	$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$
$T_{S in}$	Střední hodnota teploty vody vstupující do výměníku	K
$T_{S out}$	Střední hodnota teploty vody vystupující z výměníku	K
T_S	Střední teplota	K
U_c	Celkový součinitel prostupu	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
d_i	Vnitřní průměr trubky	m
d_o	Vnější průměr trubky	m
k_t	Tepelná vodivost kapaliny v trubce	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
p_t	Tlak v trubkovém prostoru	Pa
t_c	Tloušťka čisté trubky	m

t_f	Tloušťka nánosu	m
u_r	Referenční hodnota rychlosti vody	$m \cdot s^{-1}$
u_t	Rychlost kapaliny v trubce	$m \cdot s^{-1}$
α_o	Koeficient přestupu tepla kapaliny v mezitrubkovém prostoru	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
λ_t	Součinitel tepelné vodivosti trubky	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
μ_t	Viskozita kapaliny v trubce	$m^2 \cdot s^{-1}$
ρ_s	Hustota chladicí vody protékající výměníkem při střední teplotě	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_t	Hustota kapaliny v trubce	$kg \cdot m^{-3}$
a	Míra zanášení konstantní v čase	$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$
c_p	Tepelná kapacita kapaliny	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
f	Fanningův součinitel	—
J_{tot}	Korelační faktory proudu	—
m	Hmotnostní průtok	$kg \cdot s^{-1}$
t	Čas	s
α_{id}	ideálního součinitele přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
α_t	Koeficient přestupu tepla kapaliny v trubce	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
L	Délka potrubí	m
P	Čerpací výkon	W
Q	Průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
S	Průtočná plocha	m^2
β	Konstanty závisující na vlastnostech systému	—

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Prostup tepla válcovou stěnou s vrstvami usazenin[3]</i>	8
<i>Obr. 2 Ukázka tvorby usazenin na stěnách trubky výměníku[4]</i>	9
<i>Obr. 3: Proces tvorby vrstvy usazenin na stěně výměníku[5]</i>	10
<i>Obr. 4: Tvorba jednotlivých typů zanášení v závislosti na teplotě[6]</i>	11
<i>Obr. 5: Tvorba jednotlivých typů zanášení v závislosti na rychlosti proudu[6]</i>	11
<i>Obr. 6: Ukázka závislosti tepelného odporu způsobeného zanášením na žebrování[8]</i>	14
<i>Obr. 7: Ukázka žebrovaných a zoubkovaných trubek [9] [10]</i>	14
<i>Obr. 8: Ukázka tvorby vrstev usazenin v místech s nižší rychlostí za přepážkami[12]</i>	15
<i>Obr. 9: Ukázka typů zanášecích křivek [14]</i>	16
<i>Obr. 10: Průběh tvorby vrstvy usazenin v čase[15]</i>	16
<i>Obr. 11: Smáčitelnost povrchu[16]</i>	18
<i>Obr. 12: Tvorba elektrické dvojvrstvy [17]</i>	19
<i>Obr. 13: Proces tvorby vrstvy usazenin na stěně výměníku[5]</i>	19
<i>Obr. 14: Ukázka rozpouštění a odnosu usazenin[19]</i>	20
<i>Obr. 15: Ukázka biologického zanášení na stěnách výměníku[25]</i>	22
<i>Obr. 16: Postupná tvorba biologického zanášení v čase[27]</i>	23
<i>Obr. 17: Ukázka čištění kondenzátoru pomocí čistících míčků[28]</i>	23
<i>Obr. 18: Ochrana před biologickým zanášením pomocí UV zářiče[29]</i>	24
<i>Obr. 19: Ukázka různého sedimentačního zanášení[31]</i>	25
<i>Obr. 20: Ukázka výměníku postiženého chemickým zanášením[25]</i>	26
<i>Obr. 21: Porušení stěny trubky způsobené tuhnutím média[32]</i>	26
<i>Obr. 22: Námraza vzniklá u výměníku v motoru letounu Boeing 777[33]</i>	27
<i>Obr. 23: Ukázka precipitačního a krystalizačního zanášení[34]</i>	28
<i>Obr. 24: Ukázka precipitačního a krystalizačního zanášení[25]</i>	28
<i>Obr. 25: Ukázka různých druhů zanášení působících na výměník[35]</i>	29
<i>Obr. 26: Obsah chemických sloučenin obsažených ve vodě v průběhu kalendářního roku, zdroj vlastní</i>	31
<i>Obr. 27: Ukázka ideální oblasti zahuštění kapaliny[39]</i>	32
<i>Obr. 28 Schematické znázornění reakcí v kapce solného roztoku na železném povrchu[49]</i> .	34
<i>Obr. 29: Zbarvení odpadní vody z textilního průmyslu[52]</i>	35
<i>Obr. 30: Různé stupně zakalení vody[53]</i>	35

<i>Obr. 31: Stupnice pH[59].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 32: Titrační křivka uhličitanového systému a příslušné neutralizační kapacity[64]</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 33: Ukázka postupného ucpání trubky železitými bakteriemi[65]</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 34: Koloběh síry v přírodě[68]</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 35: Schéma terciálního okruhu a chladicí věže[74][75]</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 36: Norma ČSN 75 7171 „Kvalita vod – Složení vody pro průmyslové chladicí okruhy“</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 37 Potenciál vody k zanášení dle rozpuštěných látek[79]</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 38 Stanovení hodnoty součinitele zanášení na základě parametrů a kvality chladicí vody[83].....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 39: Schéma kontrolního výpočtu tepelného výměníku[84]</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 40: Proudění média v mezitrubkovém prostoru výměníku[87]</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 41: Asymptotický průběh křivky zanášení[90]</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 42: Typy zanášecích křivek[91]</i>	<i>52</i>

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Riziková kombinace volby materiálu výměníku a média v něm proudícím[18]	22
Tab. 2: Převodní tabulka vodivosti[71]	40
Tab. 3: Parametry vodních okruhů EDU při výkonu bloků 100% N_{NOM} , zdroj Čez a.s.	41
Tab. 4: Měřené látky obsažené ve vodě, zdroj Čez a.s.....	41
Tab. 5: Porovnání množství rozpuštěných látek dle normy a skutečnosti, zdroj vlastní	44
Tab. 6: Konstanty β pro dané rychlosti.....	53
Tab. 7: Skutečné hodnoty konstanty β pro dané rychlosti.....	55
Tab. 8: Součinitele zanášení v daném čase pro zvolené rychlosti.....	56
Tab. 9: Vnitřní průměry trubek v daném čase pro zvolené rychlosti	56
Tab. 10: Hodnoty tloušťky vzniklých nánosů v daném čase při zvolené rychlosti.....	56
Tab. 11: Tlaková ztráta za dané období při zvolené rychlosti.....	57

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Součinitel zanášení v čase v závislosti na rychlosti proudění kapaliny	54
Graf 2: Součinitel zanášení v reálném čase při zvolených rychlostech.....	55
Graf 3: Tloušťka zanášecí vrstvy vznikající při provozu výměníku	57
Graf 4: Tlaková ztráta v průběhu provozu výměníku	58
Graf 5: Tlaková ztráta v závislosti na součiniteli zanášení	58
Graf 6: Součinitel prostupu tepla v průběhu provozu výměníku	59
Graf 7: Součinitel prostupu tepla v závislosti na součiniteli zanášení	59
Graf 8: Průtok výměníkem v čase pro danou rychlost	60
Graf 9: Porovnání modelových křivek závislosti tlakové ztráty na průtoku se měřenými skutečnými hodnotami.....	61