

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

TEPELNÉ VÝMĚNÍKY A PROBLEMATIKA JEJICH ZANÁŠENÍ

HEAT EXCHANGERS AND THE ISSUE OF THEIR FOULING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB OSTREZI

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. VOJTĚCH TUREK

BRNO 2009

Anotace

Cílem této práce je rozdělení a schématické znázornění jednotlivých typů tepelných výměníků. Popsány jsou příčiny jejich zanášení, problematická místa, monitorování zanášení a možnosti snížení jeho rychlosti. Práce obsahuje také rozbor důsledků zanášení a možné způsoby jejich odstraňování.

Klíčová slova

výměník, tepelný výměník, zanášení, tlaková ztráta, výkon, účinnost

Annotation

The aim of this work is to sort and schematically describe single types of heat exchangers. The problems of their fouling, fouling monitoring and fouling speed reduction are discussed as well. This work also contains an analysis of fouling effects and possible ways of their removal.

Keywords

exchanger, heat exchanger, fouling, pressure drop, power, efficiency

Tímto prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Tepelné výměníky a problematika jejich zanášení vypracoval sám, pouze s využitím pramenů v práci uvedených.

.....

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Vojtěchu Turkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Obsah

Úvod.....	2
1 Základní pojmy.....	3
1.1 Tepelný výměník.....	3
1.2 Zanášení.....	3
2 Základní typy proudění.....	5
2.1 Souproud.....	5
2.2 Protiproud.....	6
2.3 Křížový proud.....	7
3 Tepelný přenos mezi různými fázemi.....	8
3.1 Kapalina – kapalina.....	8
3.2 Kapalina – plyn.....	8
3.3 Plyn – plyn.....	9
3.4 Pevná látka – kapalina/plyn.....	9
3.5 Přenos při změně fáze.....	9
4 Typy tepelných výměníků.....	9
4.1 Trubkové výměníky.....	10
4.1.1 Trubka v trubce.....	10
4.1.2 Trubkové výměníky.....	13
4.1.3 Spirálové výměníky.....	16
4.2 Deskové výměníky.....	17
4.2.1 Rozebíratelné výměníky.....	17
4.2.2 Nerozebíratelné výměníky.....	19
4.2.3 Spirálové výměníky.....	19
4.3 Rekuperátory.....	20
4.3.1 Rotační rekuperátory.....	20
4.3.2 Pevné rekuperátory.....	21
5 Mechanismy zanášení a možnosti odstraňování nánosů.....	22
5.1 Krystalizační a precipitační zanášení.....	22
5.2 Naplavování.....	23
5.3 Biologické zanášení.....	23
5.4 Korozní zanášení.....	23
5.5 Zanášení v důsledku chemické reakce.....	24
5.6 Zanášení v důsledku mrznutí.....	24
6 Kontrola zanesení výměníku.....	25
6.1 Monitorování in situ.....	25
6.2 Kontrola zanesení odstaveného výměníku.....	25
Závěr.....	26
Seznam symbolů.....	27
Reference.....	28

Úvod

Současný svět se čím dál více potýká s problémem úbytku energetických zdrojů a s tím spojeným růstem cen energií. Z tohoto důvodu jsou zaváděna opatření směřující k maximálnímu zužitkování vyprodukované energie a k minimalizaci jejich ztrát. Tato opatření se týkají také tepla, které je jednou z hlavních forem energie. V oblasti tepelné výměny mezi dvěma a více prostředími jsou dva krajní případy, jichž je snaha dosáhnout. První z nich nastává tehdy, když je požadováno, aby mezi prostředími neprobíhala žádná tepelná výměna. To znamená, že je zapotřebí udržet všechno teplo v jednom prostředí, aniž by unikalo do prostředí jiných – toto uniklé teplo by představovalo nechtěné ztráty.

Druhým krajním případem je úplný přenos tepla z jednoho prostředí do druhého. Teplo je v ideálním případě přeneseno všechno a pokud se tak nestane, je přenos ztrátový. Co možná nejefektivnější přenos tepla mezi prostředími zajišťují právě tepelné výměníky, které jsou tématem této práce. Je snahou vyrábět tepelné výměníky s minimálními výrobními a provozními náklady, které jsou však schopny dosahovat maximální tepelné účinnosti. S ohledem na výkon, provozní podmínky a vlastnosti pracovních látek je nutno správně zvolit typ tepelného výměníku, dobře uspořádat jednotlivé prvky výměníku a vhodně vybrat materiál.

I když je tepelný výměník dobře navržen a vyroben, jeho účinnost se během provozu snižuje. Nejčastější příčinou bývá zanášení výměníku, které je způsobeno usazováním nečistot na jeho stěnách. Vrstva nečistot funguje jako tepelný izolant a negativně ovlivňuje přenos tepla. Zanášení se projevuje v různých formách u všech typů výměníků a dochází k němu postupně během provozu výměníku. Tepelná účinnost zaneseného výměníku klesá v řádu desítek procent. Základem úspěšného řešení problematiky zanášení je prevence. Se zanášením je nutno počítat už při návrhu výměníku, běžně je proto tepelný výměník předimenzován o 20% až 40%. Vybraný materiál má na zanášení opět rozhodující vliv.

Tepelný výměník je během provozu potřeba monitorovat a při zjištění vysoké míry zanesení je nutno přistoupit k čištění. Ve většině případů je kvůli čištění nutné výměník odstavit, což často zapříčiní odstavení celého provozu. Náklady na čištění a finanční ztráty vzniklé odstávkou však bývají značné, proto se klade důraz především na prevenci zanášení.

Cílem této práce je v následujících kapitolách popsat:

- základní typy tepelné výměny mezi různými fázemi,
- typy proudění tekutin ve výměnících,
- základní typy konstrukce tepelných výměníků včetně schémat,
- klasifikaci jednotlivých druhů zanášení včetně možností odstranění nánosu a
- možnosti kontroly zanesení.

1 Základní pojmy

1.1 Tepelný výměník

Tepelný výměník je zařízení pracující na principu výměny tepelné energie mezi dvěma nebo více látkami o různých teplotách. Tepelné výměníky jsou používány v nejrůznějších oblastech průmyslu. Nezastupitelnou roli hrají především v jaderných a tepelných elektrárnách, teplárnách, chladárnách, v chemickém a petrochemickém průmyslu a obecně ve všech provozech, kde je potřeba cokoli ohřívat nebo chladit. Mezi tepelné výměníky, se kterými se člověk setkává denně, patří například radiátory ústředního topení, chladiče automobilů, výparníky ledniček a další.

Většina tepelných výměníků je konstruována na základě nepřímého styku látek, mezi kterými probíhá tepelná výměna. Látky jsou odděleny nepropustnou stěnou, která zabráňuje přenosu hmoty a stará se pouze o přenos tepla mezi nimi. Jednoduchým příkladem může být horký čaj v hrnku. Pokud chceme hrnek s čajem ochladit, vložíme ho do hrnce se studenou vodou. Stěna hrnku zabrání smíchání čaje a vody z hrnce, ovšem propouští teplo z čaje do vody v hrnci, čímž se čaj rychle ochlazuje. Tepelná výměna s nepřímým stykem látek má své nenahraditelné místo ve všech odvětvích průmyslu.

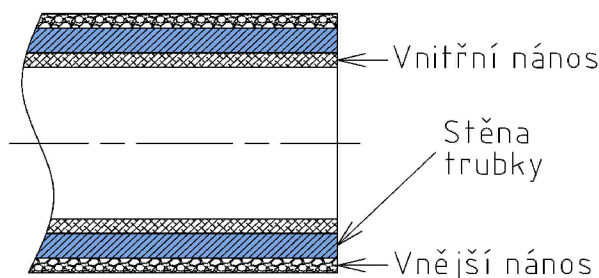
V každodenním životě se také často setkáváme s tepelnou výměnou, kde dochází k přímému kontaktu látek. Tepelný přenos je tedy doprovázen také přenosem hmoty. K tomu dochází například tehdy, pokud v hrnci vaříme vodu. Horká pára stoupá vzhůru z hrnce, přímo předává své teplo okolnímu vzduchu a tím ho ohřívá. Na stejném principu pracují i průmyslové chladicí věže, ve kterých se vodní pára ochlazuje předáváním obsaženého tepla přímo okolnímu vzduchu.

1.2 Zanášení

Zanášení je proces, při kterém se na stěnách tepelného výměníku usazují nečistoty. Tento proces probíhá u všech tepelných výměníků a má za následek drastické snížení jejich výkonu zejména ze dvou důvodů:

- Za prvé, usazené nečistoty tvoří na stěnách tepelného výměníku vrstvu, která má několikanásobně nižší tepelnou vodivost než teplovodivý materiál výměníku a funguje tudíž jako izolace. Tím dochází k omezení prostupu tepla a ke zhoršení výkonu výměníku.
- Za druhé, zanášení tepelného výměníku zvyšuje tlakovou ztrátu. Tlaková ztráta je důležitá charakteristika každého tepelného výměníku a říká nám, o kolik je tlak na výstupu nižší, než tlak na vstupu. Dokonalý výměník by měl vykazovat nulovou tlakovou ztrátu, čili výstupní tlak by měl být stejný jako vstupní. V praxi však není možné tohoto docílit. Každý výměník je potřeba konstruovat tak, aby jeho tlaková ztráta byla co nejnižší. Je nutno počítat s tím, že nárůst tlakové ztráty musíme kompenzovat zvýšením tlaku na vstupu. Toho docílíme tak, že zvýšíme výkon čerpadel, což se však velmi negativně promítne v provozních nákladech.

Při zanášení roste tloušťka vrstvy nečistot, což má vždy za následek zúžení průřezu, kterým proudí tekutina. Povrch usazených nečistot je navíc drsný a tím klade větší dynamický odpor protékající tekutině. Oba tyto faktory způsobí, že tekutina hůře protéká výměníkem a tím pádem roste tlaková ztráta.



Ilustrace 1: Vnitřní a vnější nánosy na stěnách trubky trubkového výměníku

Kombinace pracovních látek a materiálu výměníku je vždy volena tak, aby nemohlo dojít k vzájemným chemickým reakcím. Pokud se ale ve výměníku začne hromadit jiná látka a začne tvořit usazeniny, mohou tyto usazeniny reagovat s materiálem výměníku. Nejčastějším produktem takovéto reakce je koroze, která se ale objeví až v důsledku zanášení.

Míru a rychlost zanášení u tepelných výměníků ovlivňuje nemalé množství faktorů. Mezi ty nejdůležitější z nich patří:

- *Vlastnosti pracovních látek*

Nejvýznamnější vliv na zanášení má samozřejmě samotná pracovní látka a její chemické a mechanické vlastnosti. Některé tekutiny vykazují malé tendence k zanášení, jiné mohou způsobit silné zanášení výměníku. Čistota tekutiny je také zcela zásadní, protože se usazují právě nečistoty a pevné látky rozpuštěné v tekutinách.

- *Teplota povrchu*

Obecně platí, že čím vyšší je teplota vnitřního povrchu výměníku, tím intenzivnější bude zanášení. Při vyšší teplotě probíhají chemické reakce rychleji, zrychluje se biologické zanášení, zvyšuje se riziko výskytu koroze a objevuje se přepékání nánosu na plochy výměníku.

- *Drsnost povrchu*

Pro co nejefektivnější tepelnou výměnu mezi povrchem stěny a tekutinou je zapotřebí mít povrch co nejdrsnější. Pro zanášení platí ale opak, čím drsnější jsou stěny výměníku, tím lépe se na nich budou nečistoty usazovat.

- *Rychlost proudění pracovních látek*

Platí obecná závislost, že čím vyšší je rychlost proudící tekutiny, tím nižší bude schopnost nečistot usazovat se. Pokud bude proud pomalý, nečistoty se budou zachytávat na stěnách výměníku a relativně rychle vytvoří nános. Při rychlém proudění se naopak nečistoty nestihnou na stěnách výměníku zachytit a zanášení tak bude značně zpomalené.

- *Materiál tepelného výměníku*

Materiál a jeho povrch výrazným způsobem ovlivňují zanášení. Dle [1] jsou uhlíkové oceli levné, avšak velmi náchylné ke korozi. Měď a její slitiny dobře odolávají korozi, bývají ovšem často napadány organizmy, které způsobují biologické zanášení. Nerezová ocel a titan jsou dobře odolné proti korozi, jejich nevýhodou je ovšem vysoká cena. Sklo, grafit nebo teflon jsou chemicky téměř nereaktivní, výborně se čistí, nicméně jsou drahé a vyznačují se také nízkou tepelnou vodivostí.

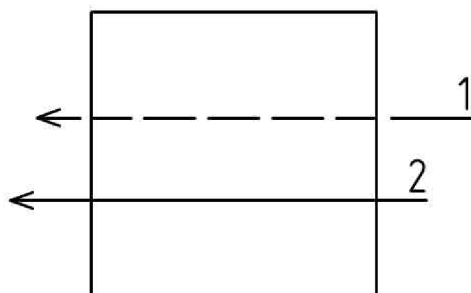
- *Typ tepelného výměníku*

Vliv typu tepelného výměníku na zanášení a kritické místa u jednotlivých výměníků jsou probrány v kapitole 4.

2 Základní typy proudění

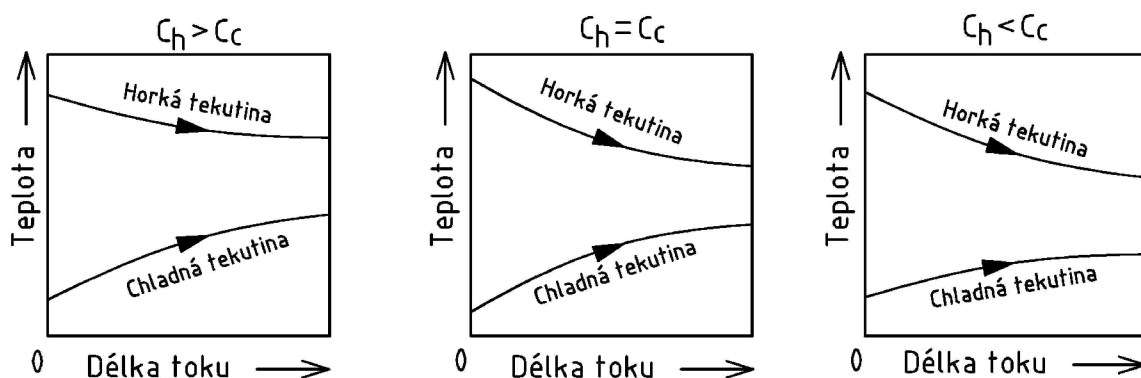
2.1 Sou proud

Schéma sou proudého proudění tekutin najdeme na obrázku 2. Šipky znázorňují směr proudění dvou tekutin v případě proudění podél rovinné stěny (tekutina 1 proudí za stěnou, tekutina 2 před stěnou). Tekutiny tečou kolem stěny vzájemně rovnoběžně a stejným směrem.



Obrázek 2: Sou proud

Graf 1 znázorňuje změnu teploty obou tekutin při průchodu kolem teplovodivé stěny v závislosti na její délce. Na vstupu mají obě tekutiny maximální možný rozdíl teplot. Při průchodu kolem stěny přechází teplo z horké tekutiny do tekutiny chladné, čímž se horká tekutina ochlazuje a chladná se ohřívá. Teplo odevzdané se zákonitě musí rovnat teplu přijatému a pokud mají tekutiny stejnou měrnou tepelnou kapacitu, jsou jejich křivky změny teploty stejné, ovšem zrcadlově obrácené. To lze jasně vidět na grafu 1b, další grafy vystihují průběh teplot u tekutin s rozdílnými měrnými tepelnými kapacitami. Grafy jsou platné pro případ, že obě tekutiny proudí kolem stěny stejnou rychlostí.

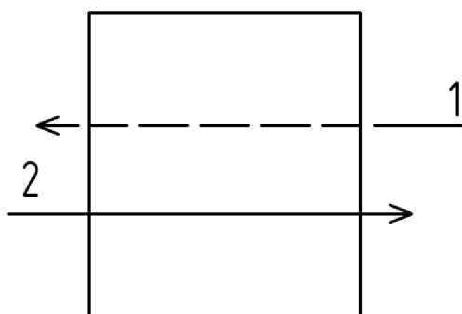


Graf 1: Závislosti teplot tekutin při souproutém toku

V technické praxi není tento způsob proudění příliš rozšířený, jelikož jeho účinnost je relativně nízká. Příčinou je to, že i kdyby byla délka proudu nekonečně dlouhá, tak se teplota obou tekutin srovná na určité střední hodnotě, a tím pádem se nemůže teplejší tekutina nikdy ochladit na vstupní teplotu kapaliny chladnější.

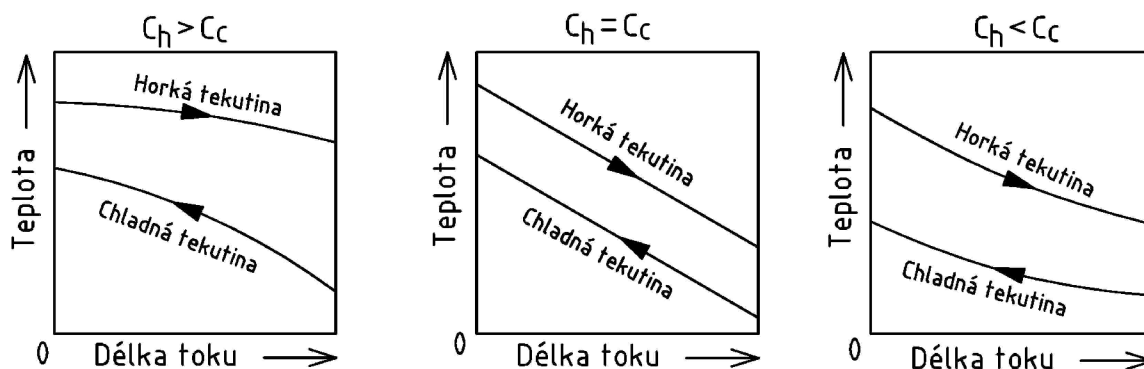
2.2 Protiproud

Protiproud opět ilustrujeme na případě proudění podél rovinné stěny. Nyní jsou proudy vzájemně rovnoběžné, ovšem směry jejich proudění opačné, jak je zřejmé z obrázku 3.



Obrázek 3: Protiproud

Zaměříme se na graf 2b, kde tekutiny o stejné měrné tepelné kapacitě proudí v protiproudu. Horká tekutina vstupuje do grafu zleva a je reprezentována horní křivkou. Při svém průtoku odevzdává své teplo skrze stěnu tekutině chladné. Ta naopak vstupuje do grafu na straně pravé a během průtoku svou teplotu zvyšuje. Důležitým faktem v tomto idealizovaném případě je to, že teplotní rozdíl obou tekutin během celého průtoku je konstantní.

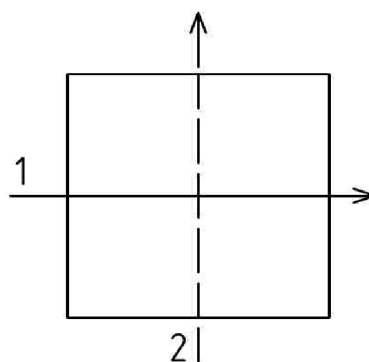


Graf 2: Závislosti teplot tekutin při protiproudém toku

Oproti souproudu může výstupní teplota horké tekutiny klesnout až na vstupní teplotu tekutiny chladné a dojde tak k úplné tepelné výměně (případ protiproudu o nekonečné délce). Z tohoto důvodu je protiproud využíván u většiny tepelných výměníků.

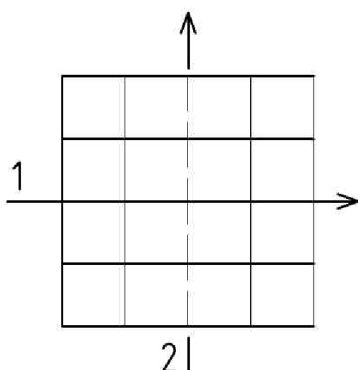
2.3 Křížový proud

Speciálním případem proudění tekutin výměníkem je křížový proud. Tekutiny v tomto případě protékají výměníkem tak, že směr proudění jedné tekutiny je kolmý na směr proudění druhé. Efektivita takového výměníku je vyšší než u souproudu, ovšem nižší než u protiproudu.

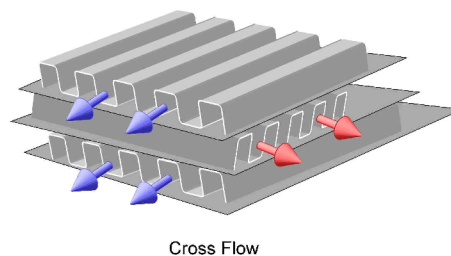


Obrázek 4: Křížový proud

Ve zjednodušeném případě protéká tekutina kolem rovinné stěny po celém jejím povrchu (obr. 4). Pokud chceme dosáhnout vyšší efektivity, rozdělíme tuto plochu žebrováním jako je patrné z obrázků 5 a 6. Přidáním žebrování rozdělíme proudění kapaliny do více kanálů a především zvýšíme teplosměnnou plochu. Výměníky s křížovým proudem můžeme najít například v rekuperátorech nebo ve výměnících plyn - kapalina.



Obrázek 5: Křížový proud



Obrázek 6: Křížový proud [10]

3 Tepelný přenos mezi různými fázemi

V běžné praxi je možno se setkat se třemi základními fázemi, a to pevnou, kapalnou a plynnou. Kapaliny a plyny se souhrnně označují jako tekutiny. V tepelných výměnících se může teplo přenášet mezi libovolnými kombinacemi těchto fází. Následující rozdělení vystihuje tyto kombinace a popisuje praktické případy, ve kterých se vyskytují.

3.1 Kapalina – kapalina

Přenos tepla mezi kapalinami je nejčastěji využíván v průmyslových tepelných výměnících. Jedná se především o výměníky trubkové, trubkové spirálové, deskové nebo deskové spirálové.

O tepelné výměně mezi tekutinou a stěnou rozhoduje koeficient přestupu tepla α . Ten není materiálovou konstantou, jeho velikost závisí jak na vlastnostech tekutiny (hustota, viskozita), tak na vlastnostech stěny (struktura povrchu). Obecně však platí, že přestup tepla mezi kapalinou a teplovodivou stěnou je několikanásobně vyšší než mezi plynem a stejnou stěnou.

3.2 Kapalina – plyn

Z důvodu rozdílných koeficientů přestupu tepla u kapalin a plynů se dá říct, že pro přenos tepla z kapaliny do plynu je nutné, aby povrch teplosměnné plochy na straně plynu byl mnohonásobně větší než na straně kapaliny. Toho se v praxi dosahuje tak, že tekutina proudí uvnitř profilu (nejčastěji trubky) a plyn na jeho vnější straně. Pro zvýšení teplosměnné plochy mezi výměníkem a plynem se používají trny, žebrování a podobně.

Tepelné výměníky fungující na tomto principu jsou nejčastěji používány v případech, kdy je nutno přenášet teplo mezi kapalinou a vzduchem. Mezi ně patří například chladiče motorů automobilů, radiátory ústředního topení nebo výměníky v klimatizacích.

3.3 Plyn – plyn

Užitím tepelného výměníku pro přenos tepla mezi plyny zabráníme jejich mísení. Pro co nejvyšší tepelnou výměnu je nutno použít co největších teplosměnných ploch se značným žebrováním. Tento typ tepelné výměny je nejčastěji využíván v rekuperátorech (viz. kapitola 4.3).

3.4 Pevná látka – kapalina/plyn

Jedná se o typ přenosu tepla, který se vyskytuje především v případě vzniku tepla přímo v pevné látce. Toto teplo je skrze tepelný výměník převáděno do kapaliny nebo plynu. V praxi se může jednat například o chlazení mikroprocesoru (CPU, GPU) osobního počítače. Část elektrické energie protékající mikroprocesorem se mění na odpadní teplo, které je pracovní látkou odváděno pryč.

3.5 Přenos při změně fáze

K tomuto typu přenosu tepla dochází ve výparnicích a kondenzátorech. Jedna pracovní látka má většinou neměnnou fázi, druhá pracovní látka vlivem dodávání nebo odebírání tepla mění svou teplotu nebo skupenství. Příkladem může být výparník využívající horké spaliny. Teplo dodané ze spalin nejdříve způsobí změnu teploty vody na teplotu vypařování a poté za konstantní teploty dochází ke změně skupenství.

4 Typy tepelných výměníků

Nezávisle na typu, všechny tepelné výměníky musí splňovat následující požadavky:

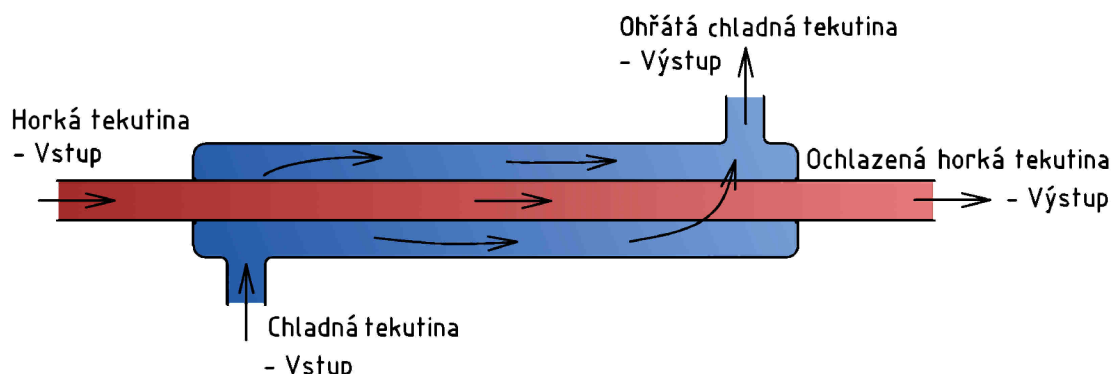
- *Vysoká tepelná účinnost*
Každý tepelný výměník je charakterizován svým výkonem, který udává, jaké množství energie je výměníkem předáno z horké do chladné pracovní látky za jednotku času. V případě zanášení výkon klesá a tím pádem klesá i tepelná účinnost daného výměníku. Účinnost je klíčovým parametrem jakéhokoliv tepelného výměníku.
- *Tlaková ztráta*
Ztráta tlaku je druhou zásadní vlastností. Jak již bylo zmíněno v sekci 1.2, s rostoucí tlakovou ztrátou (způsobenou například zanášením) roste rozdíl tlaků na vstupu a výstupu a tím pádem rostou provozní náklady.
- *Spolehlivost a dlouhá životnost.*
Spolehlivost je důležitá především z toho důvodu, že ve většině průmyslových provozů je při poruše a následném odstavení výměníku odstavena i celá výroba. Pokud se například v jaderné elektrárně vyskytne závada na parogenerátoru, nezůstává jiná možnost než celou elektrárnu odstavit na dobu potřebnou k jeho opravě.

- *Jednoduchost údržby a oprav*
Tento faktor hraje důležitou roli právě při zanášení nebo při poruše. Pokud je nutné výměník odstavit kvůli závadě nebo čištění, musí být délka odstávky co nejkratší z důvodů popsaného výše.
- *Kompatibilita materiálu s pracovní látkou*
Kompatibilita musí být zajištěna u jakéhokoliv výměníku. Pro dlouhou životnost a bezporuchový provoz je nutno zaručit, že pracovní látka nebude s materiálem výměníku nikterak chemicky reagovat, a to jak krátkodobě, tak především dlouhodobě. Vzájemná chemická reakce by mohla způsobit korozi, nebo by přispívala ke zrychlení zanášení výměníku.
- *Cena*
Co nejnižší cena je v dnešní době vyžadována u každého výrobku, tepelné výměníky nevyjímaje. Zásadní vliv na ni má konstrukce výměníku, tzn. jaký materiál je použit k výrobě, jaká je jeho celková hmotnost, a především jaká je složitost výroby.
- *Kompaktnost*
Při konstruování každého výměníku je snahou docílit co nejvyššího tepelného výkonu při co nejmenších rozměrech. S rostoucími rozměry automaticky vzrůstá hmotnost výměníku, spotřeba materiálu a práce potřebná k jeho výrobě, což má za následek nechtěný nárůst celkové ceny výměníku. Zvýšení kompaktnosti také snižuje náklady na převoz a na manipulaci s výměníkem. Je také snahou konstruovat výměníky lehké, avšak zároveň odolné proti vysokým tlakům a teplotám.

4.1 Trubkové výměníky

4.1.1 Trubka v trubce

Výměník typu trubka v trubce je konstrukčně nejjednodušším typem výměníku. Jak je vidět na obr. 7, výměník sestává ze dvou soustředných trubek, kterými protékají tekutiny o různých teplotách. Směr proudění obou tekutin je ve schématu stejný, jedná se tedy o sou proud. Tepelná výměna u tohoto typu výměníku probíhá především přes stěnu vnitřní trubky, teplejší tekutina předává během průtoku vnitřní trubkou své teplo tekutině proudící vnější trubkou. Dle zákona zachování energie je ideálně teplo, které odevzdala tekutina ve vnitřní trubce, rovno teplo, které přijala tekutina v trubce vnější.



Obrázek 7: Schéma tepelného výměníku trubka v trubce

Jelikož tepelná výměna probíhá pouze skrze stěnu vnitřní trubky, je účinnost tohoto trubkového výměníku relativně nízká. Teplo procházející stěnou trubky za jednotku času popisuje rovnice 1.

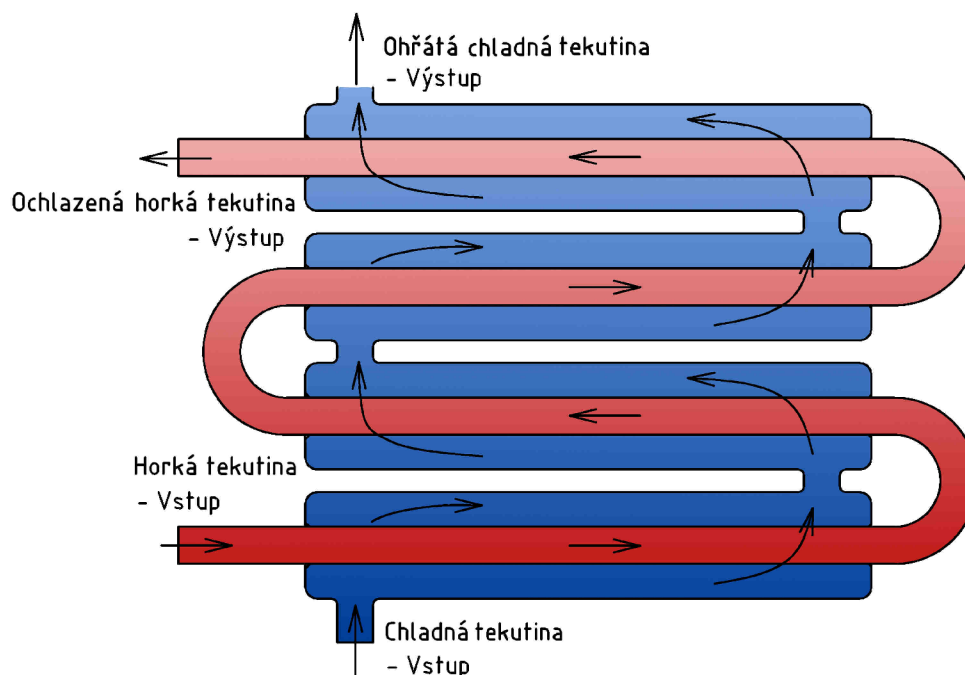
$$\dot{Q} = 2\pi \cdot \frac{l \cdot \lambda \cdot (T_H - T_C)}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (1)$$

Jedná se o zjednodušený vztah pro prostup tepla válcovou stěnou a vyplývá z něj, že pro zvýšení účinnosti tepelné výměny je nutno:

1. prodloužit délku trubky l (zvětšíme teplosměnnou plochu),
2. zvětšit průměry trubky d_1 a d_2 (opět dosáhneme zvětšení plochy),
3. snížit tloušťku stěny trubky,
4. použít materiál s co nejlepší tepelnou vodivostí λ ,
5. zaručit co nejvyšší teplotní rozdíl $T_H - T_C$ anebo
6. zvětšit vnější plochu vnitřní trubky žebrováním, trny apod.

Pro zvýšení účinnosti je také vhodné zapojit do série větší počet těchto výměníků (viz obr. 8), čímž opět dojde ke zvýšení plochy tepelné výměny. Jednoduchost konstrukce umožňuje použít výměník pro tekutiny o vysokých tlacích a teplotách.

U reálného tepelného výměníku je ovšem nutno také uvažovat tepelné ztráty do okolí. Cílem většiny tepelných výměníků je převést co nejvíce přebytečného tepla z jednoho prostředí do druhého, a proto musí být zajištěno, aby se co nejméně tepla dostalo nechtěně do okolí. K minimalizaci takovýchto ztrát se aplikuje izolační materiál na vnějšek výměníku. V případě výměníku trubka v trubce se izoluje zvenčí celá vnější trubka, aby teplo neunikalo skrze její stěny do okolí. Kvůli další minimalizaci ztrát do okolí se horká tekutina přivádí do vnitřní trubky, protože kdyby byla přivedena do trubky vnější, zvýšila by se teplota její vnější stěny a tím i ztráty.



Obrázek 8: Sériové souproudé zapojení většího počtu dvojtrubkových výměníků

Pokud se vnitřní trubky výměníku začnou zanášet, je nutno pro výpočet použít vzorec, který zohlední i vnitřní a vnější nános. Obecný tvar vzorce pro prostup tepla složenou válcovou stěnou (pro zjednodušení neobsahuje koeficient α pro přestup tepla mezi stěnou a tekutinou):

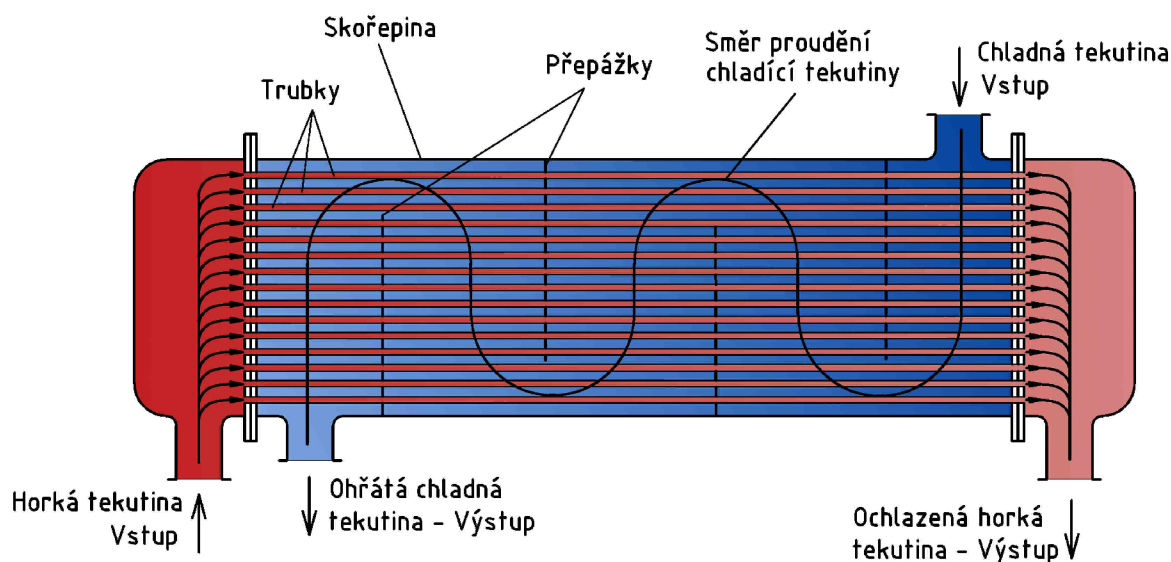
$$\dot{Q}_r = \pi \cdot l \cdot \frac{T_{S1} - T_{S,n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (2)$$

Negativní vliv zanášení na účinnost tepelného výměníku je možno demonstrovat na následujícím příkladu výměníku typu trubka v trubce:

Uvažujme kapalinu protékající trubkou z uhlíkové oceli o průměru 100 mm a tepelné vodivosti $54 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Horká kapalina v trubce má teplotu $100 \text{ }^\circ\text{C}$, chladná kapalina vně trubky $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplotní rozdíl tedy činí $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Pokud se na vnitřní straně trubky vytvoří nános o tloušťce 10 mm a tepelné vodivosti $2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, dojde tím ke snížení celkové tepelné vodivosti, neboť nános funguje jako tepelný izolant. Dosazením do vzorce pro složenou kruhovou stěnu zjistíme, že tepelný tok trubkou s nánosem je $10\times$ menší než tepelný tok nezanesenou trubkou. Výkon takového výměníku se tedy snížil o 90%.

4.1.2 Trubkové výměníky

Trubkové výměníky jsou průmyslově nejvíce využívaným typem výměníků. V angličtině se pro tyto výměníky používá termín „Shell and Tube“. Princip tohoto tepelného výměníku lze vidět na obr. 9.



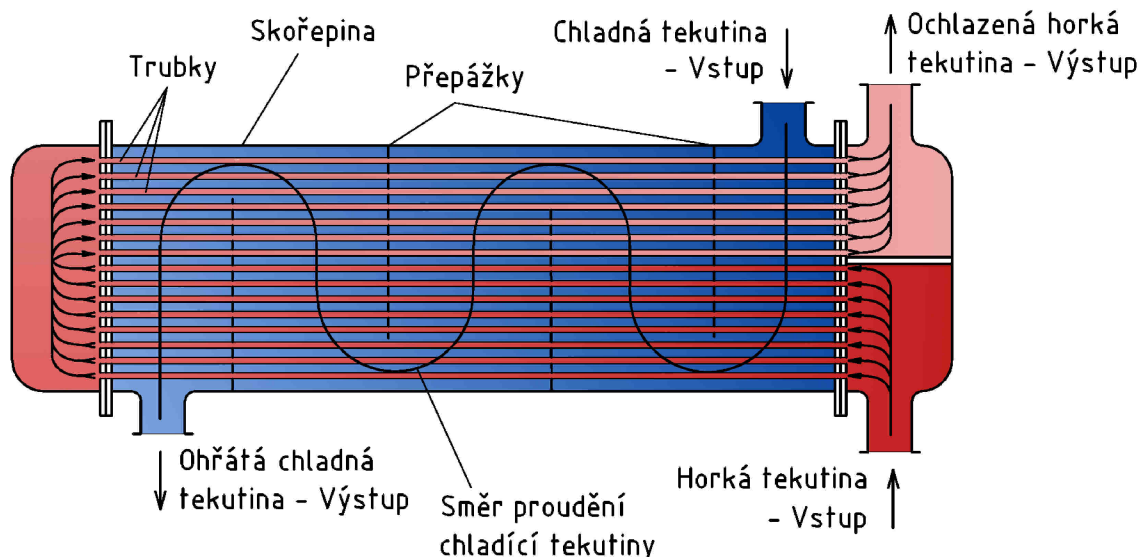
Obrázek 9: Trubkový výměník – základní uspořádání

Horká tekutina vtéká do výměníku na levé straně a její proud se rozděluje do velkého počtu malých trubek. Těmito trubkami prochází horizontálně přes vnitřní část tepelného výměníku, snižuje svoji teplotu a ochlazená vystupuje z výměníku na straně pravé. Druhá tekutina vyplňuje celý vnitřní prostor výměníku a je v přímém kontaktu s vnitřními trubkami. Tekutina vtéká do výměníku shora, směr jejího proudění je obecně opačný vůči proudu v úzkých trubkách (protiproud). Ve skořepině jsou umístěny přepážky, které nutí tekutinu měnit směr a zvyšují tak účinnost tepelné výměny mezi trubkami a tekutinou. Mezi přepážkami dochází ke křížovému proudění, takže v rámci celého výměníku se jedná o křížový protiproud.

Jak je známo, každý materiál reaguje na změnu teploty změnou svého objemu. V praxi se tento jev označuje jako tepelná dilatace (tepelná roztažnost) a v případě tepelných výměníků může způsobovat značné potíže. Tuto problematiku lze demonstrovat na výměníku z obrázku 9. Při provozu protéká trubkami výměníku horká voda a přitom celý objem skořepiny vyplňuje voda chladná. Kdyby bylo vše svařeno, vnitřní trubky by vlivem vyšší teploty po délce dilatovaly více, než skořepina. Jelikož síly působící při teplotní roztažnosti jsou značné, došlo by ke značnému zprohýbání a vnitřní trubky by mohly i popraskat.

U trubkových výměníků je problém tepelné roztažnosti nejcitelnější. Dle [1] je nejlepší vyrobit trubkový výměník co nejdelší, jelikož je jednodušší použít méně dlouhých trubek než mnoho trubek krátkých (především kvůli pracnému vrtání otvorů a svařování). Čím delší trubky budou však použity, tím více budou dilatovat a potažmo způsobovat problémy.

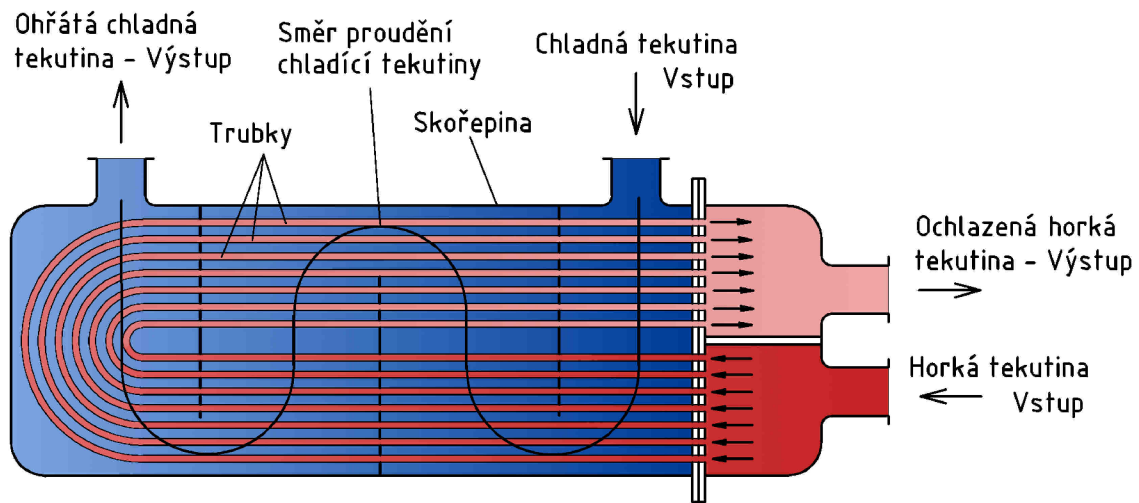
Obrázek 10 znázorňuje jiný typ uspořádání výměníku. Horká tekutina vstupuje do výměníku pravým spodním hrdlem a polovinou trubek prochází přes výměník na jeho druhou stranu. Tam tekutina změni svůj směr a teče zpět k pravému hornímu výstupnímu hrdlu. Směr proudění chladné tekutiny je obdobně jako v předchozím případě měněn přepážkami.



Obrázek 10: Trubkový výměník s dvojitým průchodem horké tekutiny

Negativní vliv tepelné roztažnosti se u tohoto typu výměníku obvykle řeší tak, že konce trubek na levé straně nejsou napevno spojeny s boční stěnou, ale mohou se v ní volně pohybovat. Mezi trubky a desku jsou pak umístěna těsnění, která umožňují trubce dilatovat a zároveň zabraňují mísení obou pracovních látek. Protože se trubky roztahují po celé své délce, je nutno, aby byly volné i při průchodu přepážkami. Průchody musí být opět těsné, protože v opačném případě by jimi protékala tekutina, měnil by se charakter proudění a snižovala by se tak účinnost výměníku.

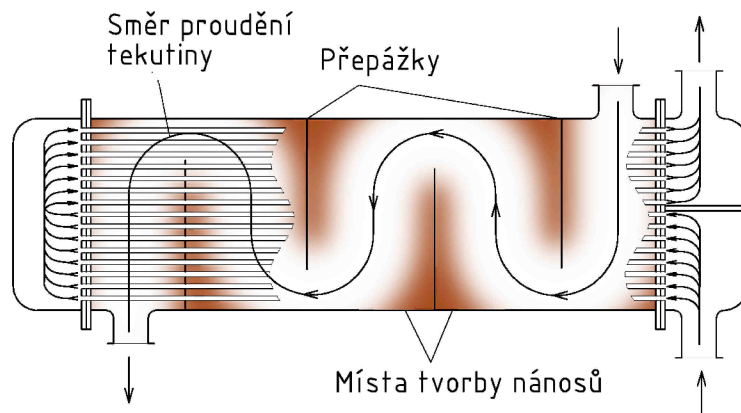
Problém s teplotní roztažností je nejlépe vyřešen na obrázku 11. Typ proudění je velice podobný tomu z obrázku 10, ovšem trubky na levé straně neústí do volného prostoru, nýbrž jsou tvarovány do U. Z tohoto důvodu se nazývají U-trubky. Výhodou tohoto uspořádání je, že trubky se mohou volně roztahovat, přičemž horká a chladná tekutina jsou v každém místě výměníku od sebe dobře odděleny. Není zapotřebí žádných těsnění, ovšem opět je nutné, aby se trubky procházející přepážkami mohly v těchto volně pohybovat.



Obrázek 11: Trubkový výměník s U-trubkami

Zanášení se u trubkových tepelných výměníků vyskytuje na různých místech v závislosti na využívání konkrétního výměníku. Jinak se bude zanášet výparník, jinak kondenzátor a jinak výměník pracující beze změny fáze. Obecně platí, že trubky se zanášejí nejvíce na svých vnitřních stěnách, a to po celé své délce. Jedná se především o zanášení krystalizační, kdy jsou tvořeny tvrdé a pevné nánosy po celém obvodu trubek. Obdobně tak probíhá i zanášení na jejich vnějších stěnách. Co se okolní tekutiny týče, k největšímu zanášení dochází především v místech s nejnižší rychlostí pracovní látky. Jak je možno vidět na obrázku 12, těmito místy jsou především rohy mezi skořepinou a přepážkami.

Čištění trubkových výměníků se většinou provádí mechanicky, je časově náročné a neobejde se bez kompletního odstavení výměníku. Při čištění je výměník vypuštěn a odmontuje se jedna z jeho bočních stran (tato je vždy demontovatelná právě kvůli opravám a čištění). Po demontáži boční strany se z výměníku vysune trubkový svazek, poté následuje čištění vnitřku skořepiny, vnitřních stěn trubek a v omezené míře i vnějších stěn trubek.



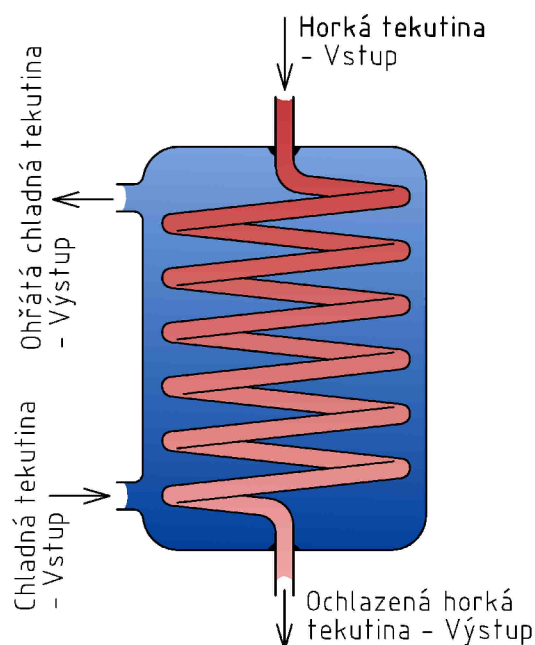
Obrázek 12: Kritická místa zanášení trubkového výměníku



Obrázek 13: Průřez trubkovým výměníkem [7]

4.1.3 Spirálové výměníky

Obměnou výměníku typu trubka v trubce je výměník spirálový (obr. 14). Ten opět sestává z vnitřní a vnější trubky. Vnitřní trubka však už není přímá, ale je stočena do spirály, což má za následek mnohonásobné zvětšení její plochy a tím pádem i zvýšení tepelné výměny. Výměník je v tomto případě protiproudý. Dalšího zvýšení efektivity lze docílit zvýšením počtu spirál, tzn. do jedné spirály vložíme další spirálu s menším poloměrem.



Obrázek 14: Spirálový výměník

Pokud chceme provádět tepelnou výměnu mezi více než dvěma tekutinami, můžeme do každé ze spirál přivést jinou horkou tekutinu. Chladnější tekutina v „nádrži“ pak ochlazuje více tekutin najednou v rámci jednoho tepelného výměníku.

4.2 Deskové výměníky

4.2.1 Rozebíratelné výměníky

U deskového výměníku dochází k tepelné výměně skrze desku. Obě strany této desky jsou v přímém kontaktu s proudícími pracovními látkami o různých teplotách, přičemž samotná deska tvoří bariéru mezi těmito látkami (stejně jako stěna trubky). Nedochozí tudíž k výměně materiálu.

$$\dot{Q} = \frac{S \cdot \lambda \cdot (T_H - T_C)}{l} \quad (3)$$

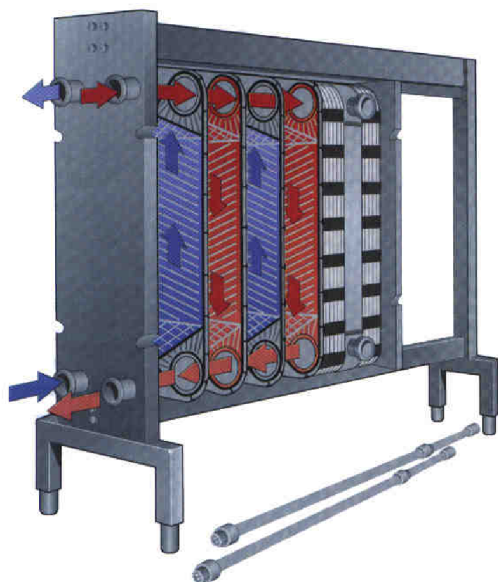
Rovnice (3) popisuje množství tepla, které prochází z horké do chladné látky za určitý čas. Při konstrukci každého tepelného výměníku je prioritou, aby tepelná výměna probíhala co nejefektivněji, což znamená, že množství přeneseného tepla \dot{Q} za určitý časový úsek musí být co nejvyšší. Toho můžeme u tepelné výměny skrze desku dosáhnout následujícími způsoby:

1. zvětšením plochy desky S ,
2. použitím materiálu s co nejvyšší tepelnou vodivostí λ ,
3. zvýšením rozdílu teplot tekutin $T_H - T_C$,
4. snížením tloušťky desky l anebo
5. volbou výhodnějšího typu žebrování desky.

$$\dot{Q}_S = S \cdot \frac{T_{S1} - T_{S,n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{\lambda_i}} \quad (4)$$

Rozebíratelné výměníky se skládají z mnoha desek umístěných za sebe, jak je patrné z obrázku 15. S rostoucím počtem desek roste i plocha tepelné výměny, přičemž takto vzniklý tepelný výměník je stále velmi kompaktní. Funkce je (dle obr. 15) následující: chladná tekutina vtéká do výměníku levým dolním hrdlem, část tekutiny pokračuje ve směru vtoku hlouběji do výměníku, část tekutiny mění svůj směr a obtéká desku výměníku směrem nahoru. Horká tekutina vstupuje do výměníku vpravo nahoře a její část protéká mezi první a druhou deskou směrem dolů k pravému dolnímu výstupnímu hrdlu. První deska je tedy zepředu v kontaktu s chladnou tekutinou a zezadu v kontaktu s tekutinou horkou. Horká tekutina předává skrze desku své teplo chladné tekutině.

K tomuto procesu dochází periodicky skrze každou další desku. Dle obrázku tedy každou lichou mezerou mezi dvěma deskami protéká tekutina chladná směrem nahoru a každou sudou mezerou protéká teplá tekutina směrem dolů.



Obrázek 15: Schéma funkce deskového výměníku [8]

Obrázek 16: Zanesená deska [5]

Jednotlivé desky jsou na svých okrajích opatřeny těsněním, jsou přiřazeny k sobě a důkladně sešroubovány po celé délce okrajů. Právě tento typ spojení je limitující pro tlak pracovních látek. Deskové výměníky jsou proto nejčastěji využívány pro tepelný přenos mezi stejnými fázemi (nejčastěji kapalinami), kdy je dosaženo vysoké účinnosti při nízkém teplotním rozdílu. Desky bývají co nejtenčí kvůli co nejlepší tepelné výměně. Jsou vyrobeny z plechu a ke zvýšení plochy tepelné výměny a turbulentnosti proudění jsou na nich lisovány profily nejrůznějších tvarů.

Předností tohoto výměníku je především jeho snadná rozebíratelnost. Přední deska výměníku je pevně uchycena ke konstrukci, zadní deska se dá posouvat po horní traverze. Obě desky jsou z tlustého materiálu (řádově desítky milimetrů). Jejich hlavní funkcí je totiž stáhnout plechové desky mezi nimi co nejpevněji, udržet tlak tekutiny a zabránit jejímu úniku. Pokud dojde k zanesení nebo poruše výměníku, odšroubují se tyče, které stahují desky k sobě a zadní posuvná deska se po traverze odsune. Plechy je pak možno od sebe oddělit a provést jejich čištění, opravu, nebo výměnu jednotlivých kusů.

Zanášení těchto výměníků probíhá především na plochách desek. Díky profilování desek je proudění tekutiny značně turbulentní. To jednak dle [1] zlepšuje přestup tepla mezi tekutinou a deskou, ale především omezuje zanášení desek.

Typické pracovní teploty pro deskové výměníky jsou dle [3] v rozsahu od -35 °C do $+200\text{ °C}$ a pracovní tlaky mohou dosahovat až $2,5\text{ MPa}$. Nejnižší teplotní rozdíl mezi kapalinami může být až 1 °C . Jsou využívány především pro tepelnou

výměnu mezi kapalinami, nebo jako výparníky či kondenzátory. Vzájemné proudění tekutin je vždy protiproud. Využívají se především v procesním a potravinářském průmyslu, své využití však nacházejí také v průmyslu petrochemickém. Co do rozšířenosti jsou v průmyslu na druhém místě hned za trubkovými výměníky.

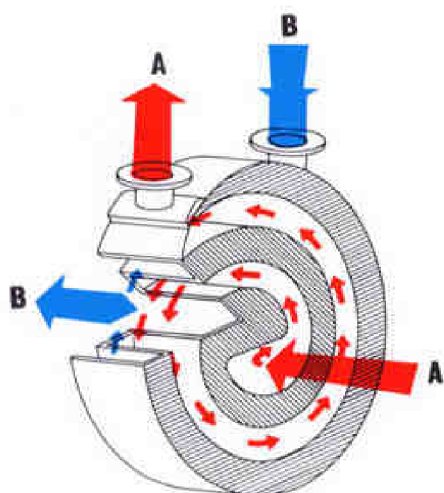
4.2.2 Nerozebíratelné výměníky

Funkcí a konstrukcí jsou tyto výměníky totožné s rozebíratelnými, ovšem spojení jednotlivých plátů je pevné a výměník proto není možné rozebrat. Jednotlivé pláty jsou k sobě svařeny nebo spájeny. Pevnější konstrukce svařovaných výměníků jim umožňuje pracovat v rozmezí tlaků od velmi nízkých (téměř vakua) až po tlaky na hranici 4 MPa. Nepřítomnost těsnění dále dovoluje výměníkům zvládat teploty v rozmezí od $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pájené výměníky nejsou tak pevné, zvládnou maximální teploty do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaky do 3 MPa.

Jelikož se takovýto výměník nedá rozebrat, nedá se tedy ani mechanicky čistit. Jediná možnost čištění takového výměníku je buď zvýšeným průtokem a tlakem, opačným průtokem, použitím chemického čištění nebo kombinací těchto možností.

4.2.3 Spirálové výměníky

Spirálový tepelný výměník je zvláštním, avšak v průmyslu hojně využívaným typem deskového výměníku. Jeho funkci vystihuje schéma na obrázku 17. Horká tekutina (A) vtéká do výměníku zepředu. Poté protéká skrz spirálu celým výměníkem a vystupuje ven vertikálně levým horním výstupem. Pravým horním vstupem vtéká do výměníku chladná tekutina (B), spirálovitě protéká výměníkem a vystupuje horizontálně vpravo. Směr proudění horké kapaliny je vyznačen červenými šipkami, chladná kapalina proudí na druhé straně spirály ve šrafované části.



Obrázek 17: Schéma funkce spirálového výměníku [4]



Obrázek 18: Fotografie spirálového výměníku [6]

Proudění je protiproudé a má tudíž nejvyšší možnou účinnost. Celková účinnost spirálového plátového výměníku je vysoká, ovšem výrobní náklady jsou kvůli spirálové konstrukci značné. Maximální přípustné teploty pracovních látek se pohybují kolem 400 °C a tlaky mohou být až 1,5 MPa. Limitujícím faktorem je těsnění mezi spirálou a bočním demontovatelným víkem.

Zanášení výměníku probíhá jednak na celé ploše stěn (krystalizačním zanášením), ale především ve spodní části spirály (naplavováním), kde se nečistoty drží vlivem gravitace. Spirálový výměník má jako jediný díky své konstrukci samočisticí schopnost. Tekutina totiž protéká pouze jedním kanálem, čili pokud dojde k naplavení nečistot do spodní části spirály, sníží se v ní průřez a zvýší se rychlost proudění tekutiny. Rychle proudící tekutina tak sama odstraňuje nános. Navíc, boční kruhové stěny jsou demontovatelné a výměník je pak možno čistit mechanicky.

4.3 Rekuperátory

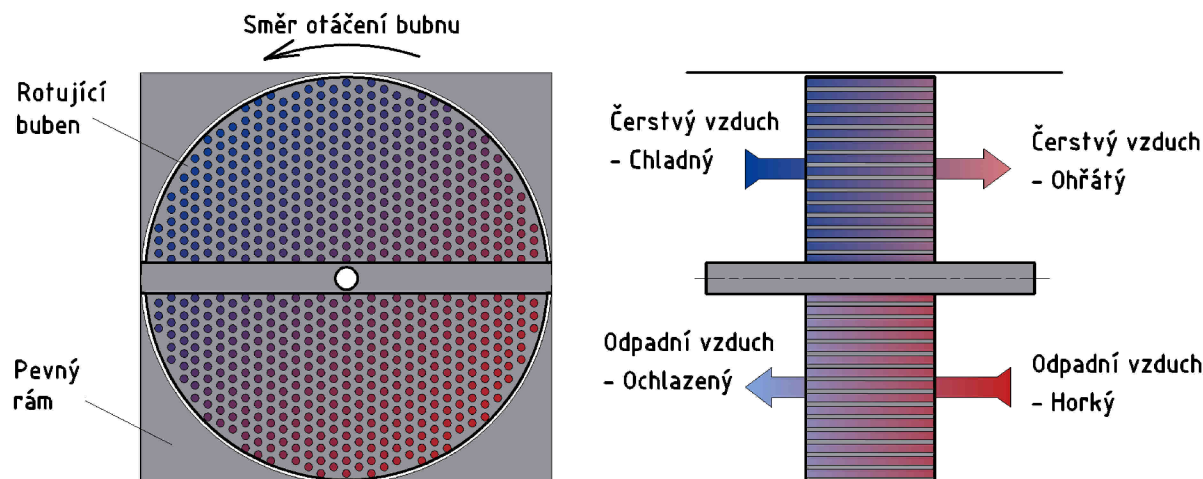
Jedná se o zvláštní, avšak v dnešní době velmi významnou skupinu tepelných výměníků. Jejich základním principem je zaručit výměnu hmoty mezi dvěma prostředími a zároveň minimalizovat tepelné ztráty. V praxi si rekuperaci můžeme demonstrovat například na větrání výrobní haly v zimě. Hala je vytápěná a teplota uvnitř je vyšší než teplota venku. Při větrání dochází k tomu, že teplý vzduch odchází z haly do okolí a na jeho místo se dostává studený vzduch zvenku. Tím ovšem dochází ke značným tepelným ztrátám. Z haly totiž vypouštíme ohřátý vzduch a tím pádem musíme přichodzí studený vzduch znovu ohřát na vnitřní teplotu. Princip rekuperace spočívá v tom, že vzduch odcházející z haly předá své teplo pomocí rekuperátoru vzduchu, který do haly vstupuje zvenčí. Účinnost rekuperátorů se pohybuje v rozmezí 30 – 70%, špičkové rekuperátory dokáží pracovat s účinností až 90%. Rekuperátory se dělí na dva základní druhy.

4.3.1 Rotační rekuperátory

Rotační rekuperátor sestává z válcového bubnu, který se otáčí v pevném rámu. Buben obsahuje velké množství kanálek, kterými může vzduch procházet skrz. Funkci rotačního rekuperátoru popisuje obrázek 19, schéma proudění čerstvého a odpadního vzduchu je zobrazeno v jeho pravé části.

Pro pochopení funkce rotačního výměníku je nejlepší si představit, že buben stojí. Jednou jeho polovinou prochází horký odpadní vzduch ven a druhou polovinou proudí chladný vzduch dovnitř. Polovina, kterou prochází horký vzduch se od něj ohřívá a je tedy horká. Druhá polovina je chladná protože jí prochází chladný vzduch. Pokud dojde k otočení výměníku o 180°, bude horkou polovinou bubnu procházet chladný čerstvý vzduch, který se bude ohřívát, kdežto chladnou polovinou bude procházet horký odpadní vzduch, který se bude ochlazovat. Tím bude při každém otočení výměníku docházet k předávání tepla z horkého vzduchu do chladného. Ve skutečnosti se však výměník otáčí neustále, takže k předávání tepla dochází průběžně. Buben tedy do sebe absorbuje teplo z horkého odpadního vzduchu a poté ho předává chladnému čerstvému vzduchu, čímž ho ohřívá.

Pro co nejvyšší účinnost rotačního rekuperátoru je nutno zaručit, aby mezera mezi rotujícím bubnem a rámem byla co nejmenší a aby tak všechny proudící vzduch musel projít bubnem. Je také nutné, aby přepážka v místě dotyku s bubnem byla co nejlépe utěsněna a nedocházelo tak k promíchávání čerstvého a odpadního vzduchu.



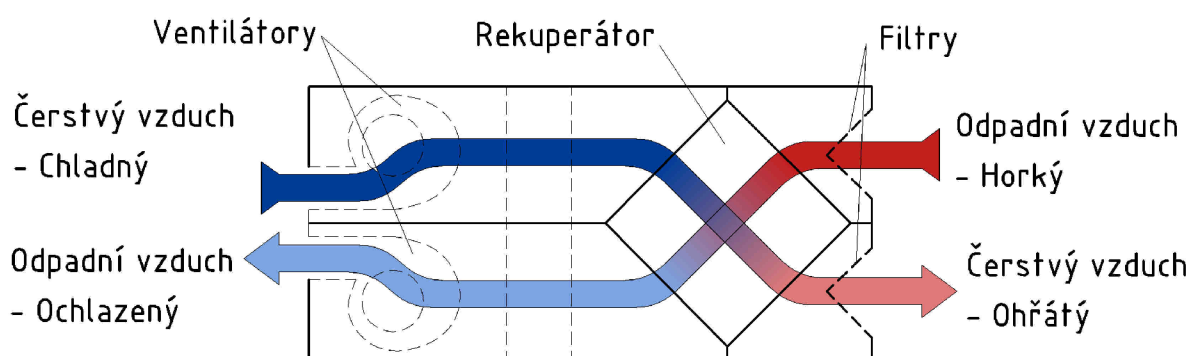
Obrázek 19: Rotační rekuperátor

Zanášení tohoto rekuperátoru je nejčastěji způsobeno pevnými částicemi obsaženými v protékajícím vzduchu. Proto je nutno odpadní i čerstvý vzduch na vstupu filtrovat a zamezit tak vniknutí pevných částic do bubnu rekuperátoru.

4.3.2 Pevné rekuperátory

Základem pevného rekuperátoru je tepelný výměník s křížovým prouděním (křížový typ proudění je popsán v sekci 2.3). Jeho funkce je znázorněna na obrázku 20. Horký odpadní vzduch, který je třeba odvětrat, prochází rekuperátorem, odevzdává mu v sobě obsažené teplo a tím se ochlazuje. Čerstvý vzduch zvenčí naopak při průchodu rekuperátorem teplo přijímá a tím se ohřívá.

Na obrázku 21 je fotografie takového rekuperátoru. O proudění vzduchu skrze rekuperátor se starají dva ventilátory. K zanášení rekuperátoru dochází stejně jako u rotačního typu usazováním pevných částic obsažených v proudícím vzduchu. Takovému zanášení se dá snadno zabránit instalováním prachových filtrů na vstupy rekuperátoru. Pevné částice se tak zachytí na filtrech a nedojde k zanesení ploch výměníku.



Obrázek 20: Schéma pevného rekuperátoru



Ilustrace 21: Fotografie pevného rekuperátoru [9]

5 Mechanismy zanášení a možnosti odstraňování nánosů

Dle [3] je možno zanášení rozdělit do šesti kategorií podle mechanismu, který jej způsobuje. U těchto mechanismů jsou v textu níže uvedeny i dostupné metody odstraňování vzniklého nánosů.

5.1 Krystalizační a precipitační zanášení

Krystalizační anebo precipitační zanášení se vyskytuje v případech, kdy se z tekutiny uvolňují částice v ní rozpuštěné. Tyto částice se buď nejdříve vyloučí z tekutiny a poté se usazují na stěny výměníku, nebo se zde usazují přímo z tekutiny. V případě užití vody jako pracovní látky je tento jev zcela běžný – usazují se minerální látky v ní rozpuštěné. Všeobecně platí, že čím vyšší je teplota vody, tím nižší je výskyt tohoto typu zanášení. Krystalizační a precipitační zanášení se nejčastěji objevuje na povrchu, kde teplo přestupuje do vody (obvykle během vypařování). S tímto typem zanášení se můžeme setkat například u parogenerátorů v elektrárnách a teplárnách.

Řešení:

Běžně se tomuto typu zanášení dá předejít přidáním chemických látek do tekutiny. Ty zabraňují vylučování částic z pracovní látky a jejich následnému usazování na stěnách výměníku. Nánosy vzniklé krystalizací nebo precipitací jsou velmi pevné a tvrdé, a proto je jejich odstranění mechanickou cestou obtížné. Čištění se proto zpravidla provádí chemiky.

5.2 Naplavování

Nečistoty obsažené v pracovní látce se usazují na stěnách výměníku kvůli své schopnosti dobře přilnout k jejich povrchu. Vytvoří tak nový, dobře přilnavý povrch, na který se pak naplavují další vrstvy.

Řešení:

K efektivnímu odstranění naplavenin je zapotřebí dosáhnout dostatečné rychlosti proudící tekutiny. Pokud se k nánosům nelze dostat mechanickými čisticími prostředky, nebo není výměník rozebíratelný, je možno dočasně zvýšit rychlost proudění. Při vysoké rychlosti proudění není jejich přilnavá schopnost dostatečná a dojde k odplavení již existujícího nánosu. Nečistoty je pak nutno na výstupu z výměníku zachytávat pomocí filtrů nebo sít. Mechanické čištění je také velmi efektivní, ovšem je možno ho použít pouze v případech, kdy jsou nánosy přístupné. Odstranění se provádí pomocí kartáčů nebo vysokotlakých vodních proudů.

5.3 Biologické zanášení

Biologickým zanášením lze označit usazování a růst mikroorganismů v tepelném výměníku. Jedná se především o bakterie, kterým vyhovuje prostředí s konstantní teplotou a pomalým prouděním. Takovéto bakterie se pak množí a tvoří tak nános svými těly, přičemž často produkují další látky nežádoucí pro funkci výměníku. Tyto se totiž mohou dále usazovat na stěnách, nebo s nimi chemicky reagovat a způsobovat korozi.

Řešení:

K odstranění biologického zanášení se používají pesticidy přidávané do pracovní látky. Pesticidy bez oxidačního účinku spolehlivě zabíjejí bakterie a zabraňují jejich dalšímu množení, avšak nejsou schopné odstranit již usazené organické vrstvy. Pesticidy s oxidačním účinkem dokáží jak zabít bakterie, tak také rozpustit všechny organické nánosy ve výměnících. Při použití pesticidů je nutno zaručit, aby nereagovali s materiálem výměníku.

5.4 Korozní zanášení

Koroze je jedním z typů chemických reakcí, nejčastěji se jedná o oxidaci kovových materiálů. Tepelné výměníky jsou konstruovány tak, aby byly co nejvíce korozivzdorné – materiál výměníku a pracovní látka musí být vždy navzájem nereaktivní. Pokud se však do oběhu dostane látka schopná reagovat s materiálem výměníku (například kyselina vytvořená bakteriemi při biologickém zanášení) dochází k nechtěné korozi. V místě koroze dojde k vytvoření vrstvy, která se opět

chová jako izolant a snižuje efektivnost tepelné výměny. V krajním případě může koroze způsobit perforaci stěny výměníku a způsobit tak únik pracovní látky do okolí nebo vzájemné promíchávání pracovních látek. Při korozi se dále rez odlupuje od poškozeného povrchu a může se usazovat v jiných místech výměníku.

Řešení:

Koroznímu zanášení se dá předejít vhodnou volbou materiálu tepelného výměníku s ohledem na pracovní látku. Je taktéž nutné brát ohled na další chemické sloučeniny, které by se během provozu výměníku mohly v pracovních látkách vyskytnout. Vlastní proces koroze se dá ovlivnit buď změnou pracovní látky nebo přidáním inhibitorů zpomalujících proces koroze. Pokud se ve výměníku usazují oxidy, které nevznikají přímo v něm, je nutno najít zdroj koroze a zamezit vzniku rzi a jejímu šíření do výměníku.

5.5 Zanášení v důsledku chemické reakce

Tento typ zanášení se vyskytuje v případě, kdy jedna nebo více složek pracovní látky reagují na stěně výměníku, přičemž samotný materiál stěny se na této reakci nepodílí. Příkladem takovéto reakce je polymerizace. Látka usazená na stěně se mění nad polymer, který je většinou hůře odstranitelný.

Řešení:

Četnost chemických reakcí roste exponenciálně s rostoucí teplotou. Při konstrukci tepelného výměníku je snahou dosáhnout co nejvyšší teploty ke zvýšení jeho výkonu. Toto má však za následek narůst chemického zanášení, které zpětně výkon výměníku snižuje. Proto musí být vliv tohoto zanášení brán v úvahu již při jeho návrhu. Chemické zanesení je možno odstranit buďto mechanicky, nebo chemicky.

5.6 Zanášení v důsledku mrznutí

V chladicích zařízeních může dojít vlivem nízké teploty k částečnému zmrznutí pracovní látky. To má za následek vytvoření zmražené vrstvy na stěnách výměníku, která snižuje jeho účinnost.

Řešení:

Jedná se o nejsnáze odstranitelný nános – pro odstranění námrazy stačí zvýšit teplotu stěny nebo pracovní látky. Pokud k namrzání pracovní látky dochází často, je nutno změnit její vlastnosti posunutím bodu tuhnutí na nižší teplotu.

6 Kontrola zanesení výměníku

6.1 Monitorování in situ

Jelikož přímá vizuální kontrola stěn výměníku není možná, zkoumá se zanášení in situ nepřímou. Monitorování výměníku za provozu dokáže poskytnout poměrně přesné údaje o zanesení výměníku. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2, zanášení výměníku je vždy doprovázeno snížením jeho tepelného výkonu anebo nárůstem tlakové ztráty. Hodnoty vstupních a výstupních tlaků a teplot jsou proto monitorovány a jsou sledovány jejich časové průběhy.

Měření tepelné účinnosti se provádí pomocí měření teplot pracovních látek. Pokud v průběhu času dochází ke snižování teplotního rozdílu mezi vstupem a výstupem dané pracovní látky, značí to snížení účinnosti tepelného výměníku, jehož příčinou bývá právě zanášení.

Měření tlakové ztráty probíhá obdobně jako měření tepelné účinnosti. Tlakoměry dodávají informace o vstupních a výstupních tlacích. Pokud se rozdíl tlaku na vstupu a výstupu začne zvyšovat, znamená to, že se zvyšuje tlaková ztráta, jejíž příčinou bývá ve většině případů opět zanášení.

6.2 Kontrola zanesení odstaveného výměníku

Pokud začne tepelný výměník během svého provozu vykazovat značný pokles výkonu anebo nárůst tlakové ztráty v důsledku možného zanášení, je nutno jej odstavit a provést přímý rozbor zanášení. Výměník je v takovém případě vypuštěn a rozmontován, provádí se vizuální prohlídka všech částí výměníku a zkoumají se místa, ve kterých k zanášení dochází. K určení příčiny zanášení je možno z výměníku odebrat vzorky nánosů a provést jejich chemický rozbor. Po vyhodnocení všech zjištěných údajů jsou navržena opatření zamezující dalšímu zanášení, výměník je vyčištěn, smontován a opět uveden do provozu. Při následném monitorování in situ se zkoumá účinnost provedených opatření na další zanášení výměníku.

Odstavení výměníku se provádí pouze v krajních případech, jelikož jeho rozebrání je časově náročné. Odstávka výměníku dále ve většině případů omezí nebo zcela zastaví výrobní proces, což způsobuje značné finanční ztráty.

Závěr

První část práce sestává z teoretického rozboru základních typů proudění ve výměnících. Volba typu proudění má na účinnost zcela zásadní vliv – obecně nejnižší účinnost má proudění souproudé, nejvyšší protiproudé. Účinnost křížového proudění se nachází mezi nimi. Proudění v tepelných výměnících bývá z konstrukčních důvodů většinou kombinací těchto tří základních proudění.

Druhá kapitola rozebírá tepelnou výměnu mezi různými fázemi látek. Přestup tepla je ovlivněn koeficientem přestupu tepla. Z tohoto důvodu je účinnost výměníku tekutina – tekutina vyšší než účinnost výměníku tekutina – plyn. Tepelný přenos pevná látka – tekutina/plyn stejně jako přenos se změnou fáze byly popsány jen okrajově.

Největší část práce je věnována rozdělení tepelných výměníků dle konstrukce. Trubkové tepelné výměníky jsou průmyslově nejvíce využívány a jsou určeny pro vysoké tlaky, teploty a tepelné výkony. Kritickými místy jsou vnitřní stěny trubek a oblasti s nízkou rychlostí proudění tekutiny. Čištění se provádí chemicky anebo mechanicky a je vždy časově a finančně náročné.

Deskové výměníky obecně zvládají nižší pracovní tlaky, teploty a výkony než výměníky trubkové. Jsou konstrukčně jednodušší a řadí se do skupiny kompaktních tepelných výměníků. Rozebiratelné deskové výměníky lze rychle rozebrat a mechanicky čistit. Nerozebiratelné deskové výměníky je možné čistit pouze chemicky. Spirálové deskové výměníky disponují jako jedny z mála samočisticí funkcí, navíc je lze snadno rozebrat pro mechanické čištění.

Rekuperátory se využívají v případech, kdy je vyžadována výměna látky s minimálními tepelnými ztrátami. Pevné vzduchové rekuperátory se používají pro nižší výkony a jsou konstrukčně jednodušší. Rotační rekuperátory dokáží přenést vyšší výkony, avšak jejich konstrukce je složitější. Oba typy se zanášejí především pevnými částicemi obsaženými v proudícím vzduchu, čemuž lze zabránit instalací filtrů na vstupu rekuperátorů.

Zanášení lze rozdělit do několika kategorií. Nejčastějším typem je krystalizační a precipitační zanášení, které se vyznačuje vznikem tvrdého nánosu. Jeho odstraňování lze provádět chemicky nebo mechanicky, v obou případech je ovšem velmi obtížné. Dalším častým typem zanášení je naplavování, kdy nános vzniká v důsledku usazování nečistot s dobrou adhezivní schopností. Odstranění takto vzniklých nánosů je možné odplavením anebo mechanicky. Další typy zanášení se vyskytují spíše ve speciálních případech.

Monitorování zanášení in situ se provádí nepřímou, a to sledováním účinnosti a tlakových ztrát v závislosti na čase. Pokud je zanesení příliš velké, je nutno výměník odstavit, rozebrat a provést vizuální a chemický rozbor nánosů.

Obecně pro problematiku zanášení platí, že dobrá konstrukce a vhodná volba materiálu výměníku dokáže výrazným způsobem omezit jeho zanášení. Každý výměník je třeba průběžně monitorovat, a při výrazném zhoršení jeho pracovních parametrů je nutné provést čištění a pokud možno zamezit dalšímu zanášení.

Seznam symbolů

c_C	měrná tepelná kapacita chladné tekutiny	$[\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$
c_H	měrná tepelná kapacita horké tekutiny	$[\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$
d_1	vnitřní průměr trubky	$[\text{m}]$
d_2	vnější průměr trubky	$[\text{m}]$
L, l	délka trubky	$[\text{m}]$
Q	tepelný tok	$[\text{W}]$
T_C	termodynamická teplota chladné tekutiny	$[\text{K}]$
T_H	termodynamická teplota horké tekutiny	$[\text{K}]$
t_C	teplota chladné tekutiny	$[\text{°C}]$
t_H	teplota horké tekutiny	$[\text{°C}]$
S	teplosměnná plocha	$[\text{m}^2]$
α	koeficient přestupu tepla	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$
λ	součinitel tepelné vodivosti	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$

Reference

- [1] KUPPAN, T. *Heat Exchanger Design Handbook*. CRC Press, 2000. 1119 s. ISBN 0-8247-9787-6.
- [2] SHAH, R. K., SEKULIC, D. P. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. John Wiley & Sons, 2003. 750 s. ISBN 0-471-32171-0.
- [3] Energy Technology Support Unit & WS Atkins Consultants Ltd. *Compact Heat Exchangers - A Training Package for Engineers* [online]. ©2000 [cit. 2009-03-08].
Dostupný z WWW: <<http://www.energy-efficiency.gov.uk/>>.
- [4] *Global Environment Centre Foundation* [online]. ©2009 [cit. 2009-04-23].
Dostupný z WWW: <<http://gec.jp/>>.
- [5] *Tempco Blog* [online]. ©2007 [cit. 2009-04-18].
Dostupný z WWW: <<http://www.tempcoblog.it/>>.
- [6] *Creamermedia* [online]. ©2009 [cit. 2009-05-15].
Dostupný z WWW: <<http://www.creamermedia.co.za/>>.
- [7] *Hydraulics Pneumatics* [online]. ©2009 [cit. 2009-04-08].
Dostupný z WWW: <<http://www.hydraulicspneumatics.com/>>.
- [8] *College of Engineering* [online]. ©2007 [cit. 2009-03-28].
Dostupný z WWW: <<http://www.egr.msu.edu/>>.
- [9] *Úspory energie, izolace, zdravý životní styl, biopotraviny, ekologie* [online]. ©2008 [cit. 2009-05-10].
Dostupný z WWW: <<http://www.nazeleno.cz/>>.
- [10] *ECS* [online]. ©2000 [cit. 2009-05-26].
Dostupný z WWW: <<http://thisisecs.com>>.