

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

ALGORITMUS AUTOMATICKÉHO VÝBĚRU VHODNÉHO TYPU ZAŘÍZENÍ Z DATABÁZE VÝMĚNÍKŮ TEPLA

ALGORITHM FOR AUTOMATIC SELECTION OF SUITABLE EQUIPMENT TYPE FROM HEAT
EXCHANGER DATABASE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MICHAL HAVLŮ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK JEGLA, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Havlů Michal, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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:

Algoritmus automatického výběru vhodného typu zařízení z databáze výměníků tepla

v anglickém jazyce:

Algorithm for automatic selection of suitable equipment type from heat exchanger database

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Seznámit se s metodou priorit pro výběr procesních zařízení.
2. Specifikovat kritéria výběru a specifikační matice výměníků tepla v databázi.
3. Formulovat výběrový algoritmus a provést jeho softwarovou realizaci.
4. Na konkrétních průmyslových případech demonstrovat praktické aplikace algoritmu při výběru vhodného zařízení z databáze výměníků tepla.

Cíle diplomové práce:

Specifikace charakterizačních matic databáze výměníků.

Popis zvoleného výběrového algoritmu a softwarová implementace.

Praktická aplikace algoritmu na databázi výměníků na konkrétních průmyslových případech.

Seznam odborné literatury:

1. Hewit G.F. (ed.), Heat Exchanger Design Handbook 1998, Begell House, Inc., New York, (1998).
2. Kakac S., Liu H.: Heat exchangers – selection, rating and thermal design, CRC Press LLC, (2002).
3. Hewitt, G.F.: Process Heat Transfer, Begell House, Inc., New York (1994).

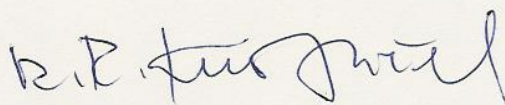
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 13.11.2008



prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá tvorbou výběrového algoritmu databáze výměníků tepla určených pro výběr vhodného typu výměníku pro danou aplikaci a sestavením tabulek priorit popisujících vhodnost jejich použití. Daná databáze je součástí víceúčelového výpočtového programu, jehož součástí jsou celkem tři moduly: modul umožňující výběr (či zúžení výběru) výměníku tepla pro danou aplikaci, modul určený pro tepelněhydraulický výpočet a modul pro výpočet investičních a provozních nákladů. Práce seznamuje s podstatou metody výběru tepelného výměníku vhodného pro danou aplikaci. V diplomové práci jsou specifikována jednotlivá kritéria výběru, ze kterých vyplývají tabulky priorit pro daný typ zařízení. Tyto tabulky jsou nezbytnou součástí výběrového algoritmu. Součástí práce byla i softwarová realizace vytvořeného výběrového algoritmu. Diplomová práce obsahuje i detailnější a podrobnější popis jednotlivých typů výměníků tepla zahrnutých ve výběrové databázi. Na jednoduchých příkladech je demonstrována funkce výběrového algoritmu pro výběr vhodného zařízení z databáze výměníků tepla pro danou průmyslovou aplikaci.

ABSTRACT

Thesis is devoted to development of an database algorithm for selection (or necking selection) of suitable type of heat exchanger for given industrial application. Database creates a part of multipurpose calculation system containing three individual modules: (i) module for selection (or necking selection) of type of heat exchanger for given application, (ii) module for thermal-hydraulic design or rating of heat exchanger, (iii) module for calculation of investments and operating cost. Thesis describes details of method for selection of suitable heat exchanger type for given application and presents and discuss individual criteria for selection process which influence values in tables of priorities for given equipment. These tables are unavaible part of selection algorithm. Details of software application of selection algorithm are also presented in the thesis. Description of behaviour of individual types of heat exchanger creates important part of thesis. Practical application of developed selection algorithm is demonstrated on several industrial examples.

KLÍČOVÁ SLOVA

Výměník tepla, trubka v trubce, zkroucené trubky, U-trubky, radiační výměník, svazek trubek, databáze výměníků, kritéria výběru, výběr výměníku, algoritmus výběru, vícekritériální rozhodování.

KEYWORDS

Heat exchanger, double pipe, twisted tube, U-tubes, radiation exchanger, tube bundle, database of exchanger, criterion selection, selection of exchanger, algorithm selection, multicriteria decision.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP DLE ČSN ISO 690

HAVLŮ, M. *Algoritmus automatického výběru vhodného typu zařízení z databáze výměníků tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 77s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ:

Na tomto místě bych chtěl velmi poděkovat doc. Ing. Zdeňku Jeglovi, PhD. a Ing. Bohuslavu Kilkovskému, PhD. z ÚPEI za odborné vedení a množství cenných rad a připomínek, bez kterých bych tuto práci nemohl dokončit. Současně chci poděkovat svým rodičům a blízkým za jejich podporu a trpělivost, kterou mi věnovali po celou dobu mého magisterského studia.

PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně dle pokynů vedoucího diplomové práce s použitím uvedené literatury a podkladů.

V Brně dne 26. května 2009

.....
Bc. Michal Havlů

Obsah

1.	ÚVOD.....	8
1.1.	CHARAKTERISTIKA PROBLEMATIKY ÚKOLU	9
1.2.	ZAMĚŘENÍ A CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	10
2.	VÝMĚNÍKY TEPLA PRO PROCESNÍ A ENERGETICKÝ PRŮMYSL.....	11
2.1.	ROZDĚLENÍ VÝMĚNÍKŮ TEPLA V PROCESNÍM A ENERGETICKÉM PRŮMYSLU	12
2.1.1.	<i>Rozdělení výměníků podle ploch zúčastňujících se sdílení tepla</i>	12
2.1.2.	<i>Rozdělení podle vzájemného směru a smyslu proudění obou pracovních látek</i>	13
2.1.3.	<i>Rozdělení podle provedení konstrukce ploch výměny tepla</i>	14
2.2.	KONVENČNÍ TYPY VÝMĚNÍKŮ TEPLA	15
2.2.1.	<i>Výměník trubka v trubce</i>	15
2.2.2.	<i>Trubkové výměníky tepla se svazkem trubek v plášti</i>	17
2.2.3.	<i>Výměník se zkroucenými trubkami</i>	19
2.2.4.	<i>Deskové výměníky tepla</i>	20
2.2.5.	<i>Příčně obtékaný svazek trubek</i>	24
2.3.	SPECIÁLNÍ TYPY VÝMĚNÍKŮ TEPLA	24
2.3.1.	<i>Spalinový radiční výměník</i>	24
2.3.2.	<i>Modulový výměník tepla s U-trubkami</i>	26
2.3.3.	<i>Koaxiální výměník tepla</i>	27
2.3.4.	<i>Šroubovicový deskový výměník tepla (výměník voda – kal)</i>	28
2.4.	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VOLBU VÝMĚNÍKU	29
2.5.	POŽADAVKY KLADENÉ NA VÝMĚNÍK TEPLA	33
3.	VÝBĚR VHODNÉHO TYPU VÝMĚNÍKU Z DATABÁZE.....	33
3.1.	POPIS DATABÁZE A JEJÍ POUŽITÍ	34
3.2.	METODY VÝBĚRU – VÝBĚROVÉ ALGORITMY	35
3.2.1.	<i>Expertní systémy</i>	35
3.2.2.	<i>Neuronové sítě</i>	36
3.2.3.	<i>Vícekritériální rozhodování</i>	37
3.2.4.	<i>Rozhodovací stromy</i>	37
3.2.5.	<i>Genetický algoritmus</i>	38
3.3.	VÍCEKRITÉRIÁLNÍ ROZHODOVÁNÍ	39
3.3.1.	<i>Metody vícekritériálního rozhodování</i>	39
3.3.2.	<i>Metody stanovení vah jednotlivých kritérií</i>	40
3.4.	KRITÉRIA PRO VÝBĚROVÝ ALGORITMUS	44
3.4.1.	<i>Hodnotící kritéria</i>	46
3.5.	POSTUP POUŽITÍ ZVOLENÉHO VÝBĚROVÉHO ALGORITMU	51
3.6.	STRUČNÝ MANUÁL VYTVOŘENÉHO PROGRAMU	57
3.7.	DEMONSTRACE DATABÁZE NA PŘÍKLADECH (UKÁZKY VÝBĚRU)	58
4.	ZÁVĚR	64
5.	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE	65
6.	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	67
7.	SEZNAM PŘÍLOH.....	69

1. Úvod

Jedna z forem energie, která je lidstvem odedávna využívána pro technické účely i v obecném životě, je energie tepelná. Aby tento druh energie mohl člověk využívat, musí jej umět nejen získávat, ale také dopravovat, resp. předávat do požadovaného prostoru či média v potřebném čase a v daném množství. Je nutné s ní účinně zacházet a nesmí se s ní zbytečně plýtvat. Přímé využití tepla pro nejrůznější průmyslové i komunální účely se uskutečňuje prostřednictvím zařízení, jejichž nedílnou součástí jsou různé varianty systémů pro výměnu tepla, zabezpečujících transport tepla mezi pracovními látkami zúčastňujícími se daného procesu.

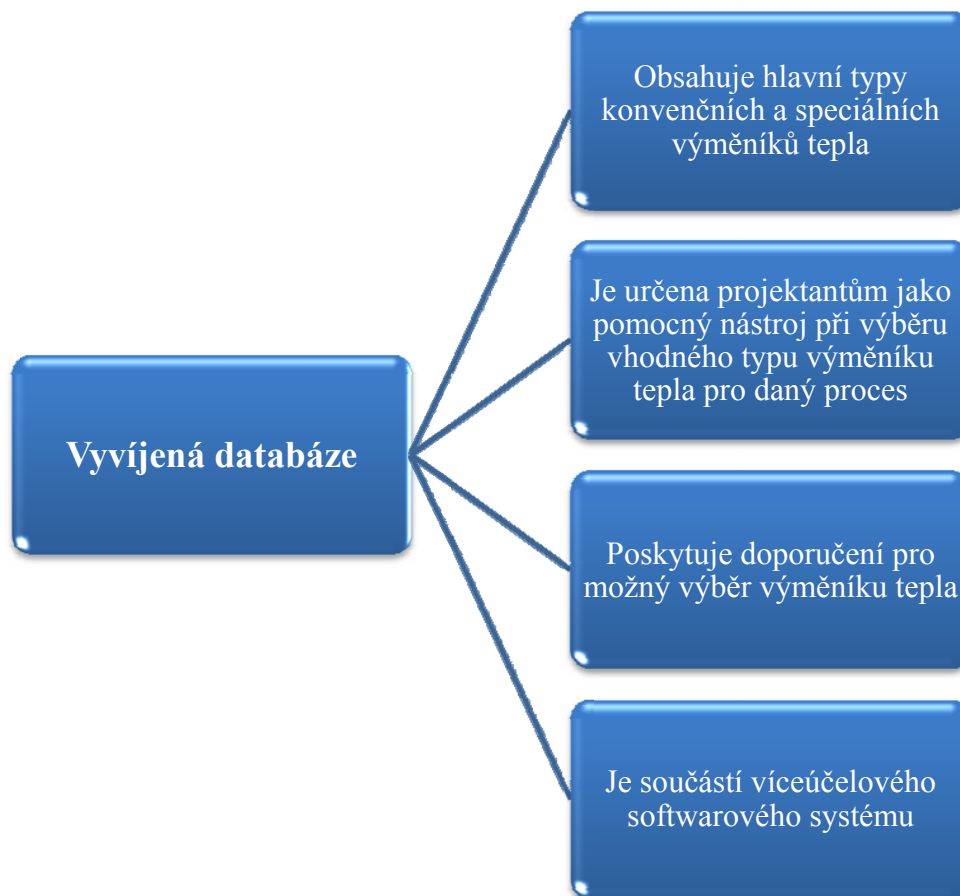
Základním stavebním prvkem těchto systémů jsou výměníky tepla. Výměník tepla je nejvíce používaným aparátem v různých odvětvích průmyslu (chemie, petrochemie, energetika, potravinářství, ...). Výměník tepla je zařízení sloužící k přenosu tepla mezi dvěma i více látkami. Jeho úkolem je zabezpečit realizaci technologických procesů a operací vyžadujících ohřev nebo chlazení tekutin.

Výběr vhodného typu výměníku tepla je důležitou fází vlastního návrhu procesů a zařízení. V mnoha průmyslových odvětvích je stále ještě automaticky volen výměník se svazkem trubek v plášti, který lze prakticky použít pro libovolné provozní podmínky (teplota, tlak, ...) a pro jehož návrh existují velmi dobré a dlouholetou praxí ověřené výpočtové postupy. Pro řadu aplikací jsou však výhodnější jiné typy s vyšší termickou účinností a nižšími investičními a provozními náklady.

Správný výběr vhodného typu výměníku tepla je důležitý zejména při jejich použití v tzv. vysokoteplotních aplikacích. Typickým představitelem takového procesu je systém využití tepla v procesu termického zpracování odpadů, kde se využívá teplo plyných produktů spalování.

Výběr nevhodného typu výměníku může způsobit při provozu významné problémy (velké zanášení, dilatace, popřípadě i úplné zničení) a tím i velké ztráty. Aby se těmto nepříznivým jevům zamezilo, je snaha vyvinout databázi (software), která by umožnila výběr příslušného výměníku k dané aplikaci. Vyvíjená databáze je řešena s cílem umožnit výběr vhodného typu výměníku tepla (nebo alespoň omezení jeho výběru) pro konkrétní aplikaci.

Je snahou, aby výběr vhodného typu výměníku byl prováděn postupným zadáváním provozních parametrů (typ pracovní látky, teplota, tlak, znečištění pracovních látek, ...) a následným vyčíslením vhodnosti daných typů a eliminace nevhodných typů. Za tímto účelem je tvořen algoritmus výběru a tabulky priorit. Eliminací je myšleno odstranění výměníku tepla z možných typů při nesplnění zadaného kritéria. Databázový systém je součástí víceúčelového softwarového systému spolu s modulem pro předběžný výpočet geometrie jednotlivých typů výměníků a modulem pro odhad investičních a provozních nákladů [1, 2, 11, 13].

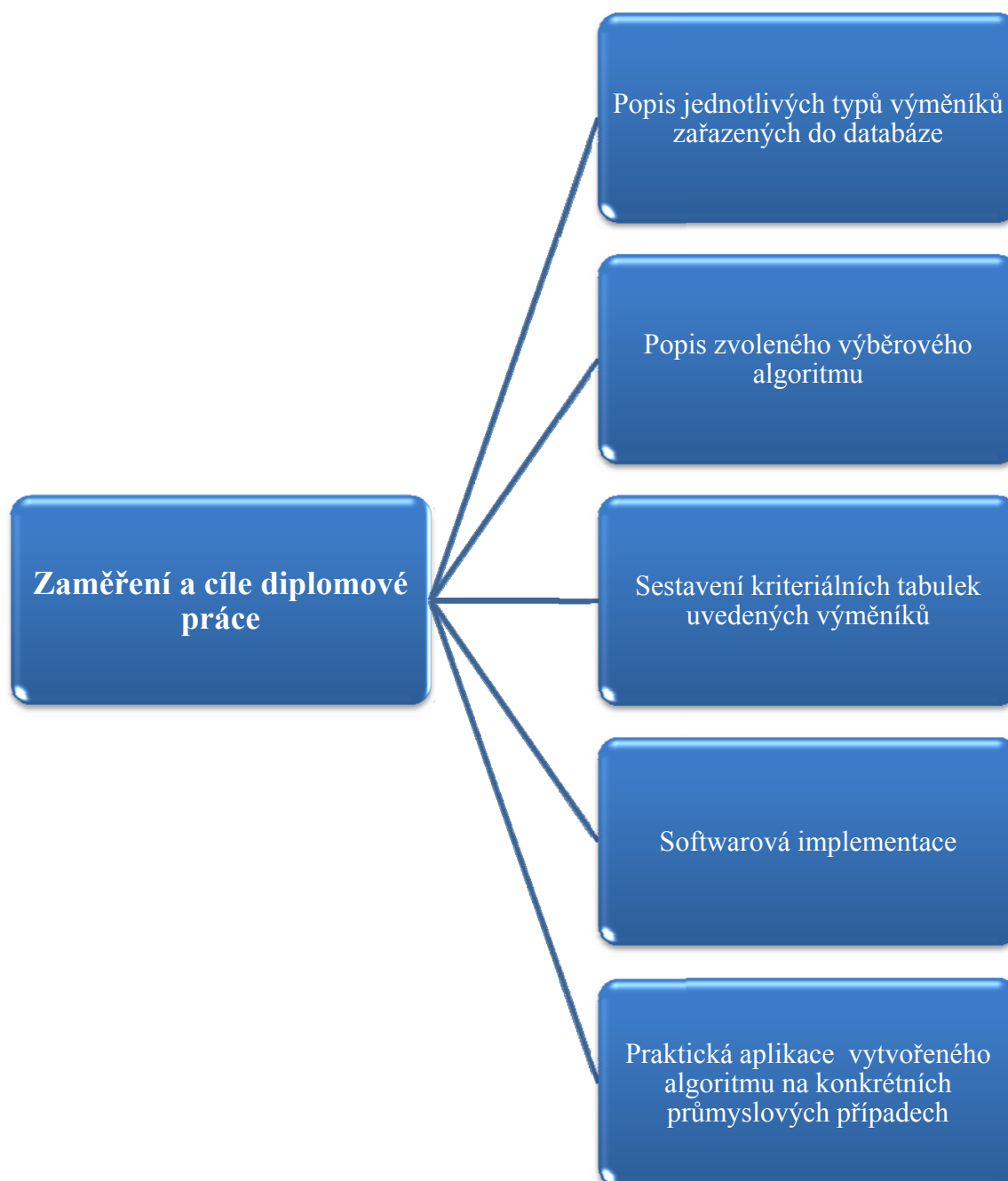


Obrázek 1 Schéma vyvíjené databáze

1.1. Charakteristika problematiky úkolu

- Seznámit se s metodou priorit pro výběr procesních zařízení.
- Specifikovat kritéria výběru a vytvořit matice priorit výměníků tepla zahrnutých v databázi.
- Formulovat výběrový algoritmus a provést jeho softwarovou realizaci.
- Na konkrétních průmyslových případech demonstrovat praktické aplikace vytvořeného algoritmu při výběru vhodného zařízení z databáze výměníků tepla.

1.2. Zaměření a cíle diplomové práce



Obrázek 2 Schéma zaměření a cílů diplomové práce

2. Výměníky tepla pro procesní a energetický průmysl

Výměníky tepla jsou zařízení sloužící pro uskutečnění průběžné nebo přerušované výměny tepelné energie mezi dvěma nebo více proudy pracovních látek (teplonosná média). Slouží k přenosu tepla. Jejich úkolem je zabezpečit realizaci technologických procesů a operací vyžadujících ohřev nebo chlazení tekutin popř. tuhých látek různé modifikace. Výměníky tepla patří mezi nejstarší a nejrozšířenější zařízení používaná v procesním, chemickém nebo energetickém průmyslu. V realizaci samotného výměníku tepla je patrná značná mnohotvárnost související s použitými konstrukčními principy, s velmi různorodými oblastmi použití a s velkým množstvím druhů pracovních látek [1, 2, 5, 11, 12, 13].

Účelem výměníků tepla například v oblasti energetiky:

- **Ohřev pracovní látky.**
Jedná se především o ohřev pracovní látky zejména horkou vodou nebo spaliny. Patří sem například regenerační ohříváky napájecí a topné vody, ohříváky vzduchu v topných systémech apod.
- **Chlazení pracovní látky.**
Účelem těchto výměníků je snížení teploty pracovních látek. Patří sem například chladiče oleje, kondenzátu parních ohříváků apod.
- **Výroba páry.**
Do této skupiny zařazujeme výměníky, v nichž je pára vyráběna z napájecí vody například pomocí horké vody, páry, spalin apod. Tyto výměníky se nazývají parogenerátory a odparky.
- **Kondenzace páry.**
Tyto typy výměníků se nazývají kondenzátory a jejich účelem je zkapalnění páry. Chladicím médiem v těchto výměnících bývá nejčastěji voda nebo vzduch.
- **Využití odpadního tepla.**
Výměníky mají speciální konstrukci a jsou určeny jen pro danou aplikaci, pro kterou byly zkonstruovány.

2.1. Rozdělení výměníků tepla v procesním a energetickém průmyslu

Výměníky tepla se dělí do mnoha skupin a podskupin podle nejrůznějších kritérií.

Mezi základní dělení patří rozdělení podle:

- počtu ploch zúčastňujících se přenosu tepla;
- vzájemného směru a smyslu proudění obou pracovních látek;
- provedení konstrukce ploch výměny tepla.

2.1.1. Rozdělení výměníků podle ploch zúčastňujících se sdílení tepla

Podle způsobu sdílení tepla mezi jednotlivými pracovními látkami je možno výměníky zařadit do jednotlivých skupin.



Obrázek 3 Schéma rozdělení výměníků podle pracovního pochodu

Rekuperační výměníky

Pracovní látky jsou odděleny pevnou stěnou o určité tloušťce. Tato stěna odděluje obě média od sebe tak, že nedochází k jejich mísení. Tepelná energie přechází z jedné pracovní látky do druhé přes tuto stěnu, jež současně tvoří plochu výměny tepla [9, 10, 12].

Regenerační výměníky

Regenerační výměníky využívají pro přenos tepla akumulační hmotu, která se střídavě zahřívá a ochlazuje a tím předává teplo do proudu jedné látky a odebírá ho látce druhé. Přenos tepla se uskutečňuje prostřednictvím pohyblivé nebo nepohyblivé výplně [9, 10, 12].

Směšovací výměníky

Sdílení tepla probíhá přímým stykem obou pracovních látek. Směšovací výměníky jsou výměníky, v nichž přenos tepla (a většinou i přenos hmoty) nastává při přímém styku plynu a kapaliny.

V energetice i procesním průmyslu se výměníky tohoto typu používají velmi často, například ve spojitosti s tepelnou úpravou vody (odplyňovače, chladicí věže).

Nejčastější aplikace směšovacích výměníků:

➤ ***vstřík vody do páry***

K regulaci teploty přehřáté páry u kotle se nejčastěji používá vstřík napájecí vody do páry. Tato regulace je jednostranná (snižuje teplotu přehřáté páry z kotle).

➤ ***ohřev napájecí vody***

Druhou rozšířenou aplikací směšovacího výměníku je ohřev napájecí vody. Jedná se o míšení vody a nízkotlaké páry. S výměnou tepla dochází i ke změně chemického složení, proto se tyto výměníky tepla nazývají odplyňovačky [9, 10, 12].

2.1.2. Rozdělení podle vzájemného směru a smyslu proudění obou pracovních látek

Pracovní látky mohou ve výměníku mít různý vzájemný směr proudění.

Souproudé uspořádání

Směry os proudů ohřívajícího a ohřivaného média jsou rovnoběžné a vektory rychlostí mají stejný smysl. Využívá teplotní spád nejhůře. Výstupní teplota ohřivaného média je vždy nižší než výstupní teplota ochlazovaného média. Jeho výhodou je však větší rovnoměrnost teplotního pole materiálu stěny, což je v některých případech rozhodující. Nejvyšší teplota stěny je nižší než u protiproudu.

Protiproudé uspořádání

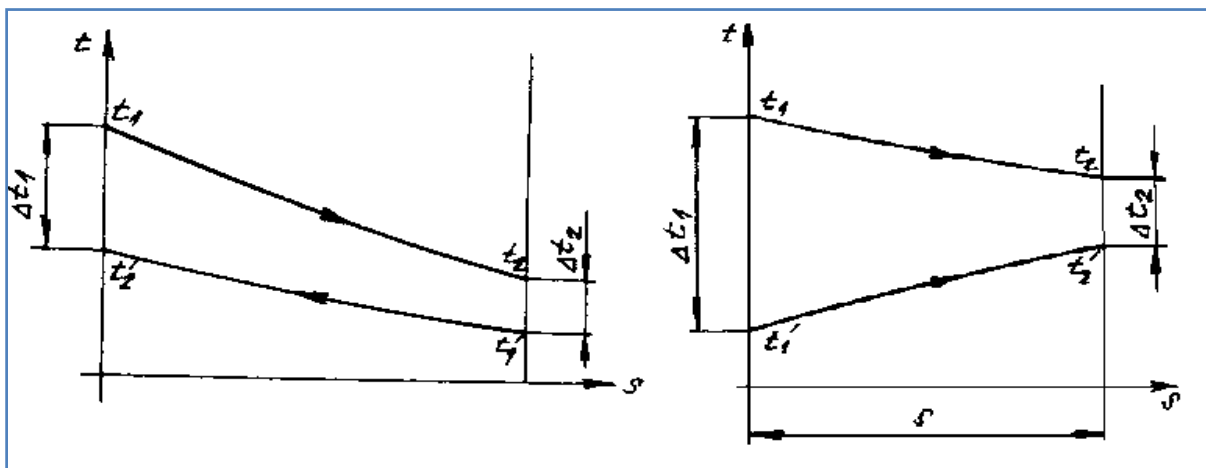
Směry proudů jsou rovnoběžné a mají opačný smysl. Nejlépe využívá teplotní spád. Výměníky tohoto typu umožňují dosažení nejvyšší teploty ohřivaného média nebo nejnižší teploty chlazeného média.

Křížové uspořádání

Osy proudů jsou mimoběžné a v kolmém průmětu spolu svírají úhel 90°. Výměníky tohoto typu bývají obvykle snáze konstruované než oba předchozí typy a mají také některé výhody z hlediska intenzifikace přenosu tepla.

Vícenásobně souproudé, protiproudé a křížové provedení

Kombinované prouděním je kompromisní řešení mezi požadavky tepelné efektivity a snadné konstrukce. Počet chodů není omezen a při větším počtu chodů se takové uspořádání blíží protiproudému, popřípadě souproudému uspořádání. U plášťových výměníků se využívá teplotní spád méně efektivně než při čistém protiproudu [7, 8, 9, 10, 12].



Obrázek 4 Proudění ve výměnících (protiproud, souproud) [10]

2.1.3. Rozdělení podle provedení konstrukce ploch výměny tepla

Z hlediska tvaru provedení ploch výměny tepla se výměníky dělí na:

- výměníky trubkové;
- výměníky deskové.

Výměníky trubkové

Teplosměnným elementem jsou hladké nebo žebrované trubky, jejichž osy jsou přímé nebo vhodně tvarované. Průřez trubek je nejčastěji kruhový, může však také být oválný nebo kosočtvercový. Vzájemná orientace proudů je obvykle protiproudá.

Možné typy trubkových výměníků:

- výměník trubka v trubce;
- výměník se svazkem trubek v plášti (přímé trubky, U-trubky);
- výměník se zkroucenými trubkami (twisted tube);
- šroubovicový výměník.

Výhodou je jednoduchá výroba a využití čistého protiproudu při zachování příčného obtékání trubek média na vnější straně.

Nevýhodou je pak celistvost trubky při opravách. Při poruše je nutno ji celou vyměnit.

Výměníky deskové

Teplosměnným elementem je rovinná hladká, profilovaná, spirálovitě vinutá, popřípadě žebrovaná deska. Podle provedení jsou jednotlivé desky k sobě pevně přitisknuty a mají ve svém profilu vylisovány kanálky nebo jsou spojeny pájením či svařováním. Jedno médium proudí jednou skupinou těchto kanálků, druhé jinými bezprostředně přilehlými kanálky. Pracovní látky v deskovém výměníku proudí v sousedních deskách protiproudě, souproudě či s křížovým tokem. Čistě protiproudý tok je výhodný z hlediska přestupu tepla i dosažení co nejmenší plochy. Jednotlivé desky jsou k sobě spojeny pájením, svařováním nebo jsou staženy šroubovými svorníky. Konstrukce se svorníky vyžaduje mezi jednotlivými deskami těsnění.

Výhodou deskových výměníků oproti trubkovým je:

- kompaktnost řešení;
- čistý protiproud a velká turbulence proudů pracovních látek spolu s malou tloušťkou stěny vedou k malým rozměrům a malé hmotnosti;
- u výměníků lze velmi jednoduše zvětšovat výkon přiřazováním dalších unifikovaných desek.

Nevýhodou deskových výměníků s těsněním mezi jednotlivými deskami jsou problémy s dosažením těsnosti při větších tlacích (je možnost použít pájených či svařovaných deskových výměníků).

Výměníky bez teplosměnných ploch

Jedná se převážně o výměníky směšovací [1, 5, 6, 9, 10, 12, 13]. Častou aplikací je chlazení spalin nástríkem vody. Za výměník bez teplosměnných ploch lze považovat i chladicí věž, kde se ke chlazení vody používá okolního vzduchu.

2.2. Konvenční typy výměníků tepla

V této části jsou popsány nejčastěji používané (konvenční typy) výměníky tepla. Zde popsané výměníky jsou i součástí vytvářené databáze určené k výběru vhodného výměníku tepla pro konkrétní aplikaci.

2.2.1. Výměník trubka v trubce

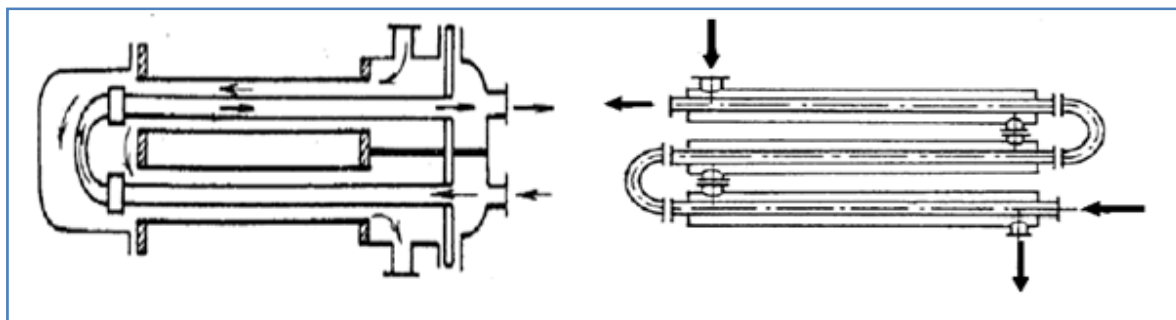
Z hlediska konstrukce je to nejjednodušší typ výměníku tepla. Jedno z nejčastějších použití je pro aplikace v potravinářství (mléčné produkty, čokoláda, pivo, ovocné šťávy, marmelády, med). Typický výměník trubka v trubce se skládá z jedné trubky umístěné soustředně do jiné trubky s větším průměrem. Obě média ve výměníku proudí souběžně nebo protiproudě v trubkovém nebo mezitrubkovém prostoru. Mohou být zkonstruovány v rozebíratelném nebo nerozebíratelném provedení. Maximální teploty u těchto typů výměníků jsou 180 až 200 °C a tlaky do 5 MPa. Pro dosažení vyšších součinitelů přestupu tepla je z hlediska konstrukce vhodnější použít žebrovaní plochy výměny tepla nebo případně různé další druhy intenzifikace přenosu tepla.



Obrázek 5 Trubkový rekuperační výměník tepla typu trubka v trubce [1]

Pro nejnáročnější (vysokotlaké a vysokoteplotní) aplikace jsou dvoutrubkové výměníky kompletně svařované.

Hlavním nedostatkem výměníků tepla typu trubka v trubce oproti trubkovým s přepážkovými systémy, jsou značné rozměry a velká spotřeba kovu na jednotku plochy výměny tepla. Velkou výhodou je oproti tomu snadná konstrukce, která umožňuje použití normalizovaných průměrů trubek a plášťů.



Obrázek 6 Výměník trubka v trubce v rozebíratelném a nerozebíratelném provedení [11]

Nerozebíratelné provedení výměníku tepla typu trubka v trubce je (podobně jako trubkové výměníky tepla s pevnými trubkovnicemi) používáno jen při malých teplotních rozdílech ($\leq 20^\circ\text{C}$). Slouží jen pro čisté pracovní látky, kdy není potřeba častého čištění mezitrubkového prostoru.

U rozebíratelného provedení výměníků tepla tohoto typu je možné snadné čištění uvnitř trubek i v mezikruží. Za účelem minimalizace pořizovacích nákladů jsou tyto výměníky vyráběny z trubek standardních velikostí. Pláště jsou rovněž standardních rozměrů, volených tak, aby umožnily umístění vybraných trubek (a zvoleného provedení žebrování). Možnost i použití u vyšších teplotních diferencí látek ($\geq 20^\circ\text{C}$).

Vhodnost pro použití:

Plyn – plyn, plyn – kapalina, kapalina – kapalina, kondenzace – plyn, kondenzace – kapalina.

Výhody:

Možnost dosáhnout čistý souproudý a protiproudý tok, realizace velké teplotní difference mezi vnitřní a venkovní trubicí, variabilita použití materiálu, dobrá možnost čištění obou ploch.

Nevýhody:

Vysoké požadavky na materiál a zastavěnou plochu. Malá plocha výměny tepla na jednotku objemu [1, 2, 6, 10, 13].

Teplota:	- 100 až 650 °C
Tlak:	do 140 MPa (trubky), 30,7 MPa (plášť)
Zanášení:	mírné
Výhody:	čistý protiproud
Nevýhody:	požadavky na materiál, malá plocha výměny na jednotku objemu

Tabulka 1 Hlavní parametry použití výměníku tepla trubka v trubce

2.2.2. Trubkové výměníky tepla se svazkem trubek v plášti

Nejčastěji používaným typem výměníků tepla jsou trubkové plášťové výměníky. S hlavním použitím pro vysoké tlaky a teploty. Tyto typy výměníků jsou univerzálně použitelné pro kapaliny i plyny (včetně fázových změn).

Skládají se z trubkového svazku, trubkovnic, pláště, vstupních či obrátových komor a přepážek. Výměníky se svazkem trubek v plášti jsou nejpoužívanějšími výměníky tepla v chemickém a petrochemickém průmyslu, a to s různými konstrukčními obměnami. Tyto výměníky poskytují vcelku široký rozsah poměrů velikostí plochy výměny tepla k jejich objemu respektive hmotnosti.

Vzájemná orientace proudů se v jednotlivých partiích výměníků mění (soproud, protiproud, křížový tok). Záleží na vedení toku v mezitrubkovém prostoru nebo v plášti. Proud může být rozdělen podélnými i příčnými přepážkami (segmentovými, diskovými, šroubovicovými, tyčovými). Výměníky jsou dostatečně masivní, snesou tedy obvyklá namáhání v provozu. Dají se většinou snadno čistit a části, které jsou nejčastěji předmětem závad (těsnění a trubky), mohou být snadno vyměněny [1, 2, 6, 10, 13].

K výhodám trubkového výměníku se svazkem trubek v plášti patří možnost:

- použití širokého rozsahu materiálů (ocel, plast, sklo);
- vhodné volby průtočných průřezů;
- použití v širokém rozsahu teplot a tlaků (600 °C, 4 až 6,3 MPa);
- možnost mechanického čištění;
- méně náročná výroba.

Nevýhody:

- relativně vysoké tlakové ztráty (vlivem přepážek);
- větší hmotnost výměníku (vztažena na jednotku plochy výměny tepla).

Teplota:	do 800 °C
Tlak:	do 140 MPa (trubky), 30,7 MPa (plášť)
Zanášení:	střední
Výhody:	možnost použít široký rozsah materiálů, méně náročná výroba
Nevýhody:	vysoké tlakové ztráty, větší hmotnost výměníku

Tabulka 2 Hlavní parametry použití výměníků tepla se svazkem trubek v plášti

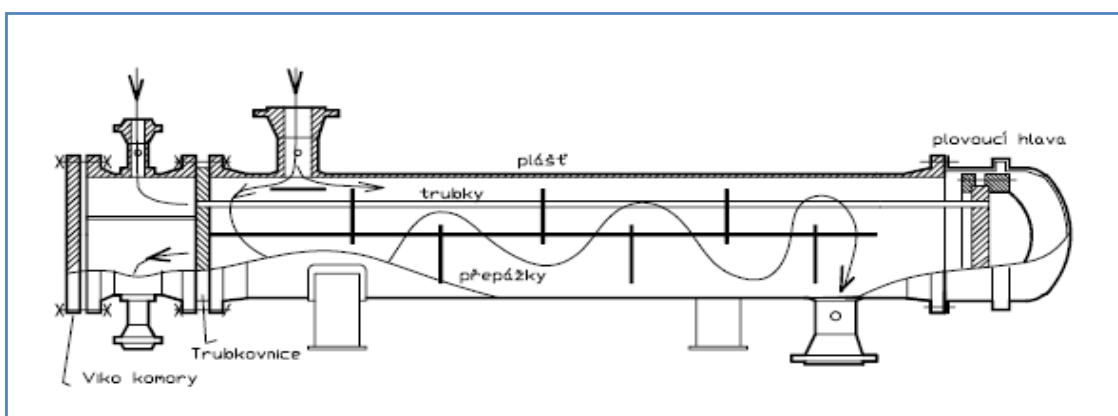
Konstrukční varianty trubkových výměníků se svazkem trubek v plášti.

➤ **Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem s pevnou trubkovnicí**

Dovoluje výměnu poškozených trubek a dává dobré možnosti pro vyčištění vnitřního povrchu trubek. Lze jej však použít jen při malých teplotních rozdílech mezi pracovními látkami. Pro kompenzaci různé teplotní roztažnosti trubek a pláště se tento typ může doplnit vlnovým kompenzátorem v plášti.

➤ **Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem s plovoucí hlavou**

Dovoluje rozdílnou teplotní dilataci trubek a pláště, při zachování všech výhod předcházejícího typu, avšak na úkor větší složitosti a větší hmotnosti. Přibývá zde totiž další velký přírubový spoj a těžké víko.



Obrázek 7 Výměník tepla se segmentovými přepážkami s plovoucí hlavou [3]

➤ **Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem s U-trubkami**

U výměníků s U-trubkami nevznikají problémy s teplotními dilatacemi. Trubky se mohou volně roztahovat. Používají se trubky velmi malých průřezů a tloušťek, výměníky mají nízkou hmotnost, svazek je kompaktní a dobře využívá prostoru pláště.

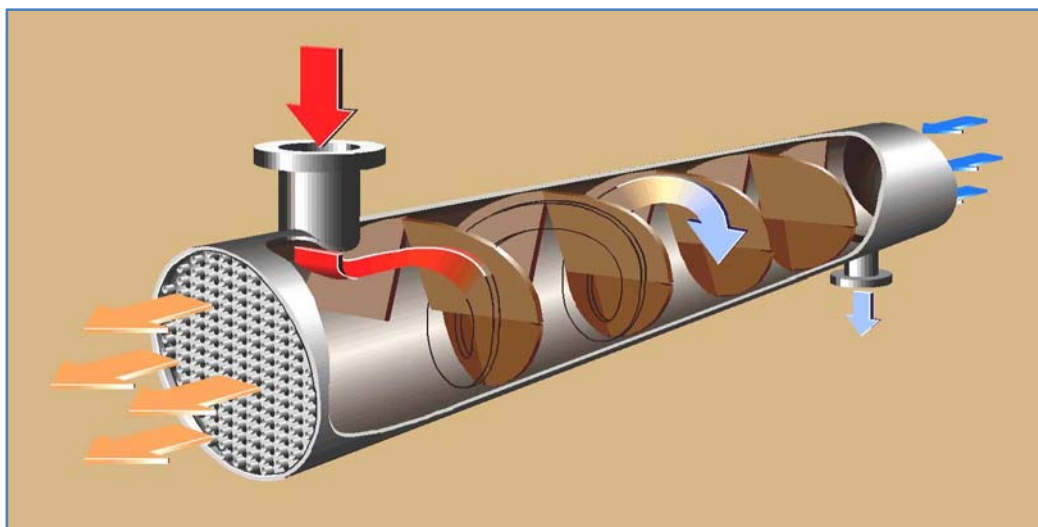
Nevýhodou je nemožnost mechanického čištění vnitřního povrchu trubek a nemožnost výměny poškozené trubky. Při použití vyšších tlaků narůstá tloušťka trubkovnice až do velikosti 500 mm a výroba trubkovnic již vyžaduje zvláštní tepelné postupy.



Obrázek 8 Svazek trubek U-trubkového výměníku [19]

➤ Výměník tepla se šroubovicovým přepážkovým systémem

Tento výměník, minimalizuje nedostatky konvenčních segmentových přepážek. Snižuje tlakové ztráty a zlepšuje přenos tepla, snižuje výskyt zkratových proudů a zmírňuje zanášení v mezitrubkovém prostoru.

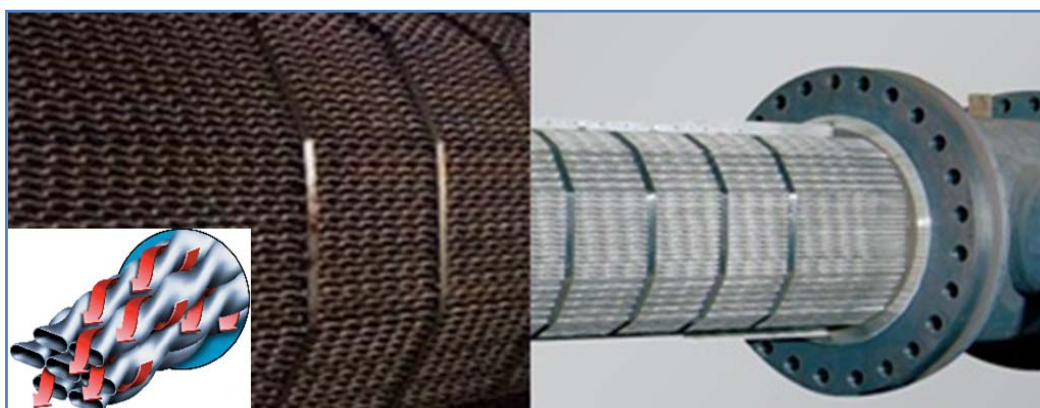


Obrázek 9 Uspořádání šroubovicového přepážkového systému ve výměníku tepla [4]

2.2.3. Výměník se zkroucenými trubkami

Výměník tepla se zkroucenými trubkami překonává omezení, která mají konvenční trubkové výměníky se segmentovými přepážkami. Jedná se zejména o odstranění tzv. mrtvých koutů, kde dochází k velkému zanášení a tlakovým ztrátám.

Výměník se zkroucenými trubkami se skládá ze svazku specificky formovaných trubek smontovaných v plášti bez použití přepážek. Trubky mají ojediněle formovaný tvar, který má za následek oválný šroubovicový průřez. Tento tvar způsobuje uvnitř trubek šroubovicový tok, což vede ke zvýšení turbulence a zlepšení součinitele přestupu tepla oproti trubkám přímým. Konce trubek jsou již kulaté, aby je bylo možno vložit do konvenčních trubkovic. Tekutina v plášti proudí v mezeře mezi zkroucenými trubkami vířivým tokem. Tento typ proudění vede k narušení podmínek laminárního toku a zvyšuje turbulenci [1, 6].



Obrázek 10 Výměník tepla se zkroucenými trubkami – vnitřní uspořádání [20]

Teplota:	do 600 °C
Tlak:	do 6,3 MPa
Zanášení:	mírné
Výhody:	větší plocha výměny na jednotku objemu
Nevýhody:	vysoké tlakové ztráty

Tabulka 3 Hlavní parametry použití výměníku tepla se zkroucenými trubkami

2.2.4. Deskové výměníky tepla

Tento konstrukční typ výměníku tepla patří mezi jeden z nejrozšířenějších konvenčních typů výměníků tepla. Podle typu desek jej můžeme rozdělit na deskový výměník tepla s hladkými deskami nebo s profilovanými deskami.

Systémy použití deskových výměníků tepla:

Plyn – plyn, kapalina – kapalina, odpařování – kondenzace

Výhody deskových výměníků:

- Deskové výměníky tepla mají 3 až 5krát vyšší účinnost než výměníky trubkové.
- Jsou velice kompaktní.
- Mají malou hmotnost při zachování potřebných výkonových charakteristik.
- Umožňují zvětšit nebo zmenšit teplovýmennou plochu dle požadavků.
- Profilování desek vede i při malých rychlostech k turbulentnímu toku.
- Velmi dobrá možnost čištění.
- Malé prostorové a půdorysné náročnosti.
- Malá zastavěná plocha při velké ploše výměny tepla.
- Jednoduchá konstrukce.
- Snadná a levná instalace.
- Jednoduše vyřešené dilatace.
- Použití odlišných materiálů dle antikoročních požadavků.
- Výměníky větších výkonů lze s výhodou skládat z bloků.

Nevýhody deskových výměníků:

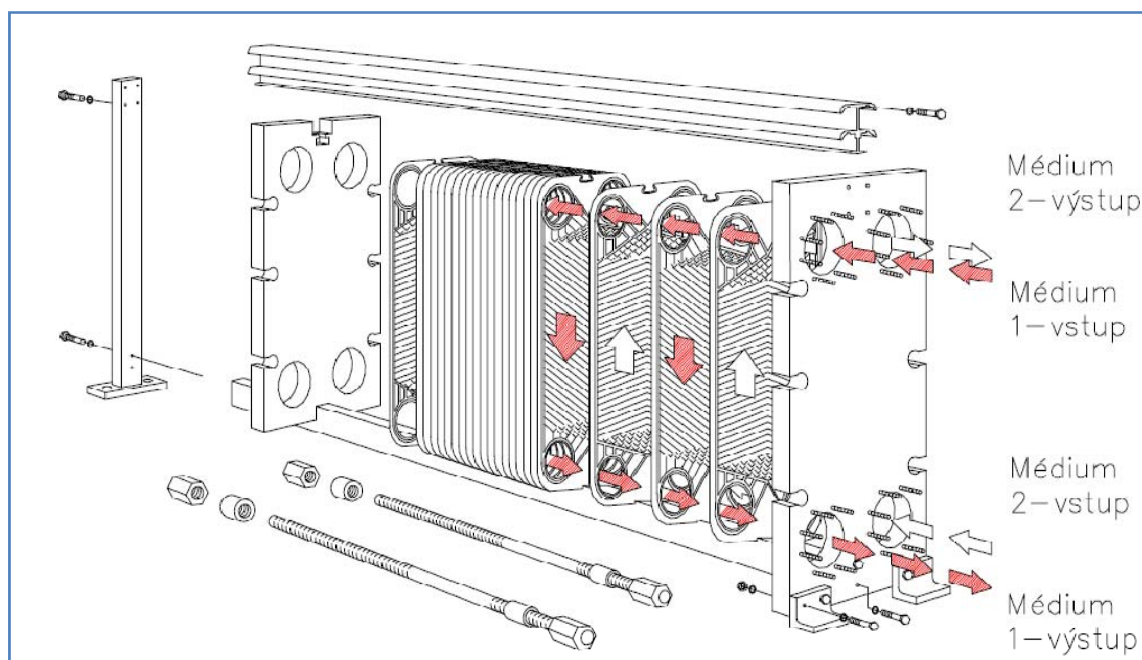
- Omezení z hlediska provozních tlaků a teplot a kratší interval mezi opravami, zapříčiněný nutností výměny těsnění jednotlivých teplosměnných desek.
- Omezený rozsah teplot a tlaků (dané materiálem těsnění a tuhostí desek)
- Těsnění (dlouhé styčné plochy)
- Omezená odolnost proti zanášení.

➤ Deskové výměníky tepla s profilovanými deskami (skládány, pájený)

Deskové výměníky s tímto typem profilu a spojení desek se používají hlavně ve výměňkových stanicích pro ohřev nebo chlazení, dále pak v potravinářském (chlazení surové šťávy, chlazení mléka, chlazení a ohřev viskózních kapalin) nebo pivovarnickém průmyslu. Jejich hlavní výhodou je malá zastavěná plocha při velké ploše výměny tepla s možností jednoduché změny teplosměnné plochy. Tyto typy výměníku patří mezi jeden z nejrozšířenějších konvenčních typů výměníků tepla.

Výměník se skládá ze sady desek, seřazených za sebou a stažených pomocí šroubů mezi hlavní a přítlačnou deskou (rozebíratelný typ) nebo jsou desky vzájemně připájeny (nerozebíratelný typ). Vyrábějí se i polorozebíratelné typy, tj. desky jednoho proudu (agresivního, nebezpečného) jsou připájeny nebo přivařeny a u druhého proudu jsou desky odděleny těsněním. Veškeré desky jsou prolisovány tak, aby v proudícím médiu docházelo k intenzivní turbulenci, díky které se zvyšuje přestup tepla. Profilováním desek dochází také k jejich zpevnění.

U rozebíratelných typů lze zajistit relativně snadnou čistitelnost celého zařízení. Této vlastnosti se využívá právě v potravinářských provozech. Nerozebíratelné (pájené) typy lze používat naproti tomu pro vyšší teploty a tlaky. Deskové výměníky lze také použít i pro výměnu tepla mezi médii s nepříliš velkými teplotními spády (využití nízkoteplotního zbytkového tepla) [1, 5, 10, 13].

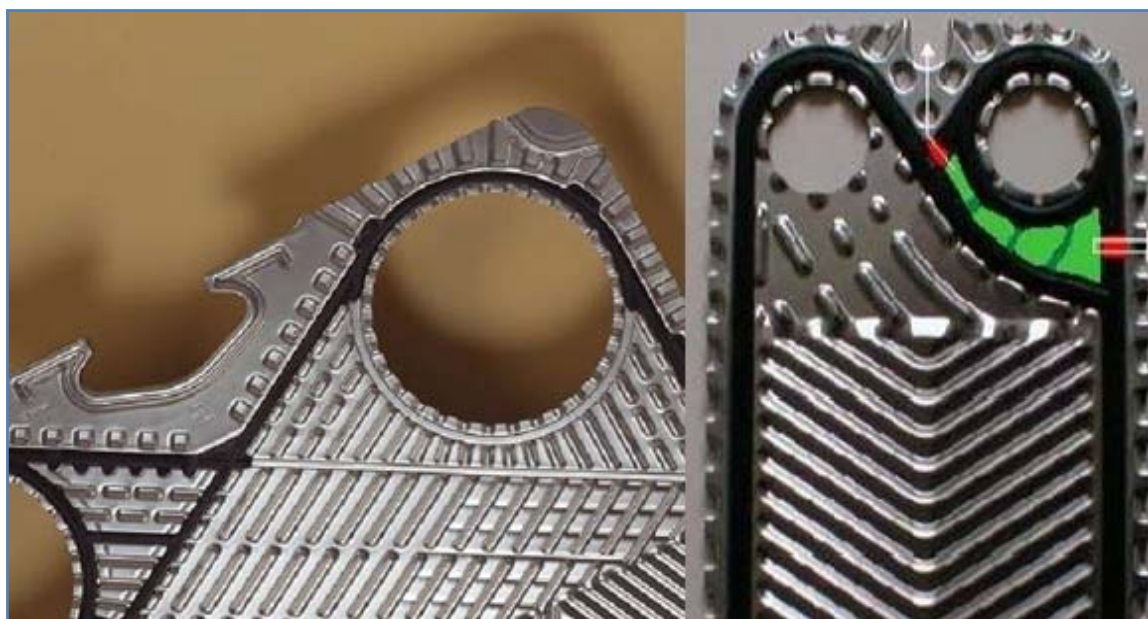


Obrázek 11 Schéma skládaného deskového výměníku tepla [3]

Profilované desky:

Desky jsou staženy pomocí šroubů mezi hlavní a přitlačnou deskou. Každá z desek je opatřena těsněním. Tím je docíleno oddělení mezideskových prostorů pro průtok primárního a sekundárního média.

Každé médium prochází svým systémem kanálů, tvořených utěsněnými mezideskovými prostory. Všechny desky jsou prolisovány tak, aby v proudícím médiu docházelo k opakovanému intenzivnímu proudění, čímž se zvyšuje přestup tepla. Materiál desek je standardně z nerezové oceli, titanu nebo niklu. Každý výrobce deskových výměníků má své řešení na podobu a profil desky [1, 5, 10, 13].



Obrázek 12 Detail profilované desky [3]

Teplota:	do 250 °C (skládání), do 400 °C (pájený, svařovaný)
Tlak:	do 1,6 MPa (skládání), do 2,5 MPa (pájený, svařovaný)
Zanášení:	mírné
Výhody:	malá zastavěná plocha při velké ploše výměny tepla
Nevýhody:	tlakové ztráty, teplotní a tlakový rozsah použití ovlivňuje druh těsnění

Tabulka 4 Hlavní parametry použití deskového výměníku s profilovanými deskami

➤ Deskový výměník tepla s hladkými deskami

Deskové výměníky s hladkými deskami mají svou přednost ve velice nízkých tlakových ztrátách, což snižuje provozních náklady. V technické praxi jsou používány především k výměně tepla mezi plynnými médii o malých přetlácích resp. podtlacích.

Teplosměnná plocha těchto výměníků je tvořena deskami čtvercového nebo obdélníkového tvaru. Na krajích jsou desky ohnuty do žlábků. Desky jsou naskládány na sebe tak, že se vytvoří křížově uspořádané štěrbiny, jimiž proudí spaliny a vzduch.

Nejvýznamnější předností je právě velká teplosměnná plocha (většinou tenkostěnná) připadající na jednotkový objem výměníku. Velká teplosměnná plocha je vyžadována kvůli nízkým koeficientům přestupu tepla z plynu a malým teplotním rozdílům mezi proudem spalin a vzduchu. Důsledkem je snížení spotřeby energie třeba při spalovacích procesech. Kompaktní deskové výměníky (s tzv. hladkými deskami) jsou jedním z nejvhodnějších zařízení pro předehřev spalovacího vzduchu u kotlů, spaloven nebo procesních pecí. Konstruktivní varianta plyn – plyn (vzduch – vzduch, spaliny – vzduch) je využívána také v technologických provozech (svaročny, lakovny, sušárny). Pro velkou teplosměnnou plochu těchto zařízení vztaženou na jednotku objemu je lze použít i pro výměnu tepla mezi médii s nepříliš velkými teplotními spády. Z tohoto důvodu se hodí pro využití nízkopotenciálního zbytkového tepla, které doposud zůstávalo v mnohých procesech nevyužito [1, 5, 10, 13].



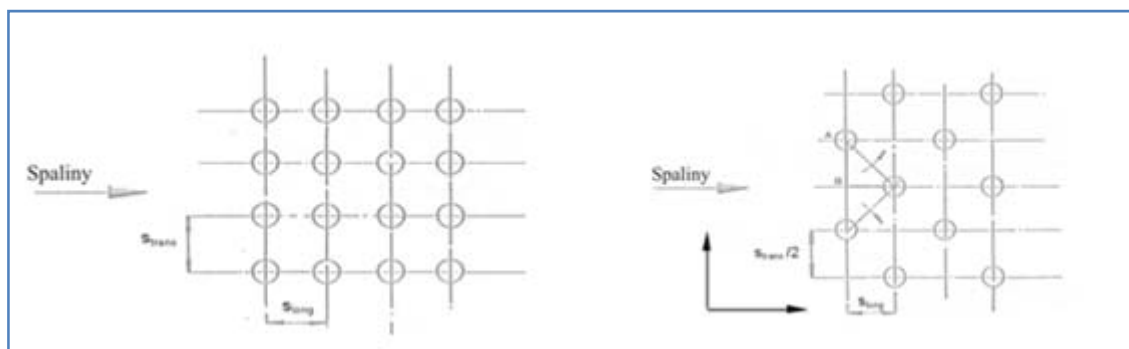
Obrázek 13 Deskový výměník tepla s hladkými deskami [1]

Teplota:	do 600 °C
Tlak:	do 0,4 MPa
Zanášení:	střední
Výhody:	velká plocha výměny tepla na jednotku objemu
Nevýhody:	tlakové a teplotní omezení

Tabulka 5 Hlavní parametry použití deskového výměníku s hladkými deskami

2.2.5. Příčně obtékaný svazek trubek

Za příčně obtékaný svazek trubek se považuje paralelní uspořádání trubek, který je ohříván nebo sám vyhřívá tekutinu proudící kolmo na něj. Do mezitrubkového prostoru se u tohoto „výměníku“ většinou přivádí ohřívající medium (spaliny). Daná procesní látka je ohřívána v trubkovém prostoru. V tomto provedení je možnost zvýšit plochu výměny tepla žebrováním trubek, ovšem je to omezeno teplotou cca do max. 400 °C (záleží na typu žeber).



Obrázek 14 Uspořádání svazku trubek (za sebou v zákrytu, vystřídané) [1]

Teplota:	do 600 °C
Tlak:	do 140 MPa (trubky), v mezitrubkovém prostoru omezeno pláštěm
Zanášení:	střední až vysoké
Výhody:	v případě použití žebrování lze docílit velké plochy výměny tepla
Nevýhody:	není protiproudé uspořádání (téměř protiproudě lze dosáhnout vícechodým uspořádáním jedné z pracovních látek)

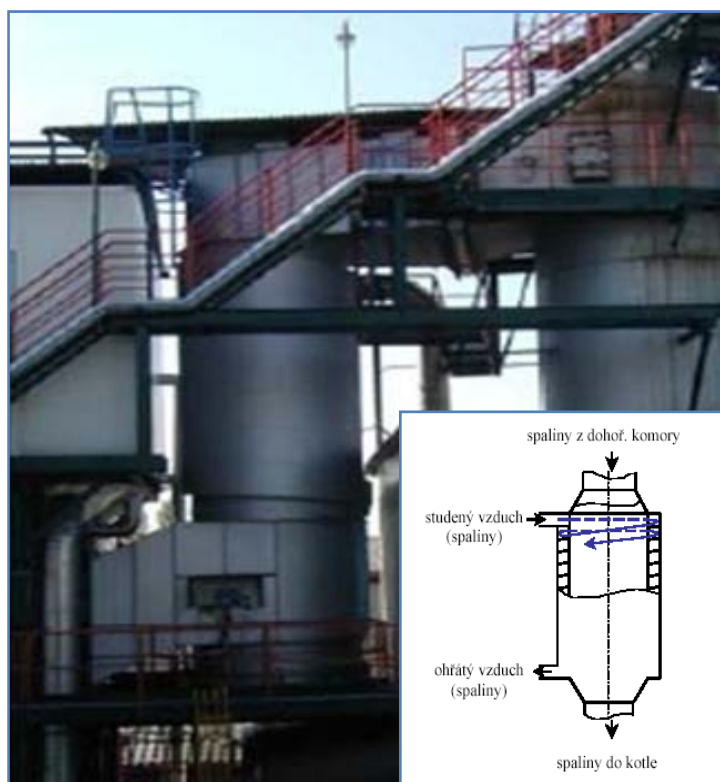
Tabulka 6 Hlavní parametry použití výměníku s příčně obtékaným svazkem trubek

2.3. Speciální typy výměníků tepla

Ne vždy je možné použít konvekční typy výměníků tepla, a z toho důvodu jsou pro specifické požadavky vyvíjeny tzv. výměníky speciální. Následující kapitola popisuje některé tyto výměníky tepla.

2.3.1. Spalinový radiální výměník

Příkladem aplikace tohoto druhu zařízení je využití k přehřevu spalovacího vzduchu do spalovací pece, ohřevu vypraných spalin nebo k ohřevu určitého podílu recyklovaných spalin, které jsou dále smíchávány s chladnými spalinami z vypírky. Rekuperátor využívá vysokopotencionální teplo spalin přímo z dohořovací komory, a proto materiál výměníku musí být odolný vůči vysokým teplotám [1].



Obrázek 15 Spalinový rekuperátor [4]

Princip činnosti:

Spaliny proudící centrální trubkou předávají teplo chladnému médiu (vzduch, recyklované spaliny), které proudí ve šroubovicovém kanálu velkou rychlostí. Přenos tepla v trubkovém prostoru (prostor spalin) se kvůli vysoké teplotě spalin uskutečňuje převážně radiací. Přenos tepla konvekcí v prostoru centrální trubky se uplatní v podstatně menší míře, protože proudící spaliny mají relativně malou rychlost ($2 - 3 \text{ m.s}^{-1}$) a malou turbulenci (vnitřní průměr trubky se pohybuje podle množství spalin kolem $0.5 - 1 \text{ m}$). Naproti tomu v úzkém šroubovicovém kanálu dochází k přenosu tepla výhradně konvekcí. Předehříváč vzduchu je umístěn přímo za sekundární spalovací komorou. Spaliny ze spalovací komory vstupují do výměníku s teplotou pohybující se od 1000°C do 1100°C (někdy i více) [1].

Teplota:	až nad 900°C
Tlak:	do 5 MPa
Zanášení:	silné
Výhody:	vysoká teplotní odolnost
Nevýhody:	nákladné na výrobu, malá plocha výměny tepla na jednotku objemu

Tabulka 7 Hlavní parametry použití spalinového radiačního výměníku

2.3.2. Modulový výměník tepla s U-trubkami

Celý výměník je sestaven z modulů. Díky tomu se dá měnit velikost teplosměnné plochy podle potřeby daného procesu. Každý modul je složen z U-trubek vyskládaných v řadě. Ohřívané médium je vedeno do trubek, které mají dva chody. Ohřívající médium proudí kolmo na trubky.



Obrázek 16 Modulový výměník tepla (předehříváč vzduchu) [4]

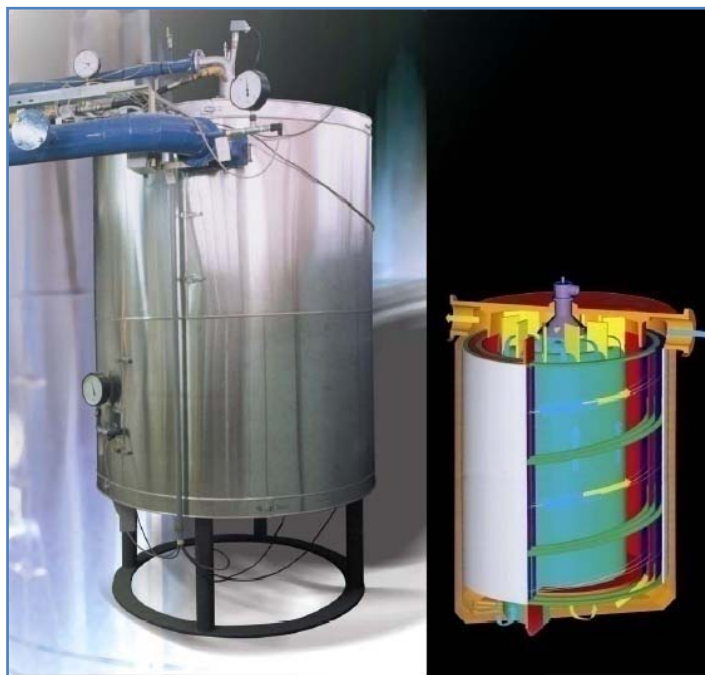
Použitím bloku U-trubek je umožněna dilatace a následné použití pro vysokoteplotní aplikace. K dalším výhodám patří modulové uspořádání, které umožňuje změnu plochy výměny tepla [1].

Teplota:	do 6500 °C
Tlak:	do 140 MPa (trubky), do 4,0 MPa (plášť)
Zanášení:	střední
Výhody:	modulové uspořádání, možnost dilatace, vysoký tlak v trubkách
Nevýhody:	

Tabulka 8 Hlavní parametry použití modulového výměníku s U-trubkami

2.3.3. Koaxiální výměník tepla

Tento typ výměníku je jeden z nových originálních návrhů vyvinutých na ÚPEI FSI VUT. Základ konstrukce vychází z integrace dvou částí zařízení do jedné kompaktní jednotky. Zařízení má řadu výhod ze strany využití tepelných ztrát pro zvýšení přehřevu vzduchu. Výměník má menší hmotnost a zvýšenou tepelnou účinnost v porovnání s konvenčním uspořádáním.



Obrázek 17 Koaxiální výměník tepla [3]

Charakteristika zařízení:

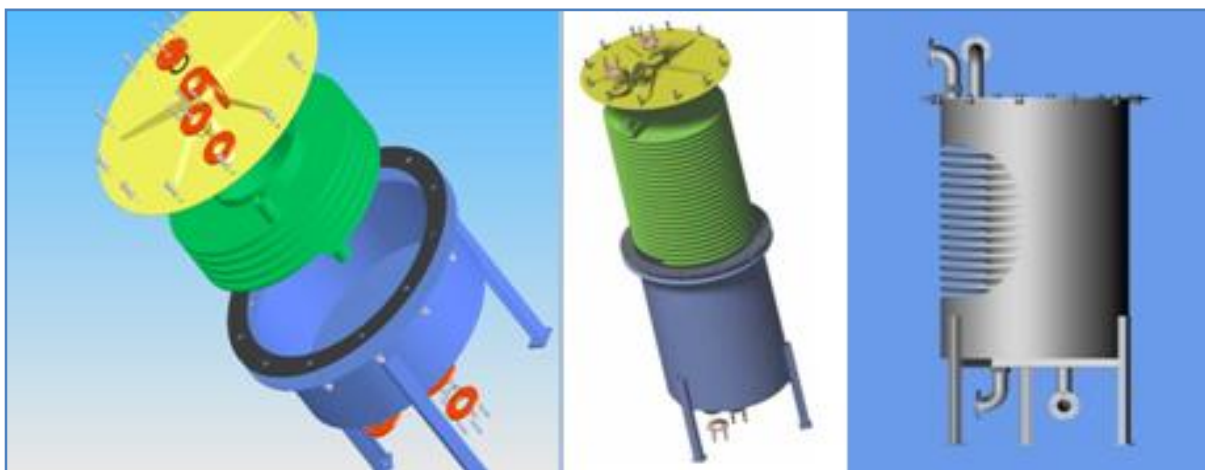
Spalovací válcová komora je umístěna uvnitř výměníku tepla (přehříváč znečištěného vzduchu). Válcový přehříváč je sestaven z několika soustředných nerezových plátů. Obě pracovní látky protékají v prostoru mezi jednotlivými páry válcových plátů tvořících plochy výměny tepla. Úzké distanční proužky, které jsou šroubovitě navinuty mezi pláty, tvoří obdélníkové kanály uspořádané do šroubovice. Tím výměník dosahuje protiproudého toku procesních látek [1].

Teplota:	do 600 °C
Tlak:	do 2,0 MPa
Zanášení:	žádné, mírné
Výhody:	větší plocha výměny na jednotku objemu
Nevýhody:	

Tabulka 9 Hlavní parametry použití koaxiálního výměníku tepla

2.3.4. Šroubovicový deskový výměník tepla (výměník voda – kal)

Šroubovicový deskový výměník tepla. Základ konstrukce tvoří dvouchodá šroubovice s obdélníkovým průřezem kanálu. Šroubovice je vinuta kolem středové trubky a je rozdělena na otevřenou a uzavřenou část. V uzavřené části šroubovice proudí od spodu nahoru voda. Kal proudí otevřenou částí šroubovice ze shora dolů. Je tedy využito i samospádu. Zakřivení kanálu má pozitivní vliv na samočisticí schopnost. Tím, že kal proudí v otevřené části šroubovice a šroubovici lze vyjmout z pláště výměníku, je umožněno snadné čištění plochy výměny tepla na straně kalu.



Obrázek 18 Šroubovicový výměník voda – kal [1]

Výhody takového typu výměníku jsou:

- snadné čištění na straně kalu
- zakřivení kanálu má pozitivní vliv na samočisticí schopnost
- snížení tlakové ztráty na straně kalu využitím samospádu

Teplota:	do 250 °C
Tlak:	do 0,5 MPa
Zanášení:	vysoké
Výhody:	snadné čištění, snížení tlakové ztráty (využití samospádu)
Nevýhody:	

Tabulka 10 Hlavní parametry použití šroubovicového deskového výměníku tepla

2.4. Faktory ovlivňující volbu výměníku

Ne každý výměník se hodí pro všechny aplikace. Jednotlivé typy mají svá specifika a omezení, která je nutno při výběru vhodného typu výměníku dodržet. V opačném případě může dojít k netěsnostem, zanášení, dilataci nebo ke zničení výměníku.

Někdy však není možné použít konvenční typy výměníků kvůli specifickým požadavkům provozu. V těchto případech je potřeba, aby výměník odolával například: vysokým teplotám spalin, zanášení a nálepům látek nebo byl vhodný pro předehřev kalů.

Všechny tyto aspekty jsou významné především pro termické procesy (spalovny odpadů, spalovny kalů). Pro tyto případy je nutné použít tzv. speciálních typů výměníků tepla [1].

Řada specifických faktorů ovlivňujících volbu vhodného výměníku tepla pro danou aplikaci:

➤ *Tepelné a hydraulické požadavky*

- Vstupní a výstupní teploty médií (teplotní omezení výměníku, dilatace).
- Tlak pracovních látek.
- Náchylnost k zanášení.
- Dovolená tlaková ztráta.

➤ *Kompatibilita s médii a provozní podmínky*

- Materiál konstrukce výměníku musí odolat působení látek po celou dobu životnosti zařízení nebo musí existovat přijatelný způsob opravy případně výměny poškozených částí.
- Některé pracovní látky mohou způsobovat zanášení teplosměnných ploch, čímž dochází ke snižování výkonu výměníku.

➤ *Údržba*

Podle vlastností média je třeba zvážit následující požadavky a kritéria:

- požadavek na možnost čištění teplosměnné plochy (mechanicky, chemicky);
- požadavek na kontrolu znečištění pracovních ploch;
- možnost výměny všech poškozených dílů;
- možnost modifikace výkonu při změně podmínek provozu.

➤ *Dostupnost*

- Termín zakázky často vyžaduje použití standardních konstrukcí, které mohou být dodány v krátkém časovém období.
- Nedostatek výpočtových metod pro určité typy výměníků.

➤ ***Ekonomika***

- V případě, že několik typů splňuje předchozí požadavky, pak musí být konečná volba provedena z ekonomického hlediska. Ve všech případech je třeba najít optimální podmínky vzhledem k investičním a provozním nákladům.

Při výběru vhodného výměníku tepla pro konkrétní aplikaci je vhodné postupovat hierarchicky podle důležitých technických kritérií v součinnosti s vymezeními daty jednotlivých zařízení (viz tab. 11). Výměník se vyloučí z doporučení, pokud nesplňuje jednu z uvedených podmínek.

Mezi důležitá technická kritéria (vstupní data nutná pro výběr) při výběru vhodného výměníku patří:

➤ ***Maximální tlak.***

Mnoho typů výměníků může být použito jen při nízkých tlacích a pro danou aplikaci. Například pokud je tlak příliš vysoký, lze jej okamžitě vyloučit.

➤ ***Teplotní rozsah.***

Výměníky mohou být použity jen v daném rozsahu teplot a tak může být výběr vhodného typu výměníků ulehčen.

➤ ***Dostupný rozsah velikosti.***

Tento problém je téměř vždy možné překonat použitím několika výměníků zapojených paralelně, ačkoli to sebou přináší další náklady na instalaci. Významné je toto hledisko při rekonstrukcích jednotek s omezeními na zastavěnou plochu.

➤ ***Omezení pracovních látek.***

Zde je kladen hlavní důraz na kompatibilitu mezi tekutinou a materiálem konstrukce. Možnost promíchání tekutin – u výměníků s těsněním má selhání těsnění za následek promíchání tekutin nebo prosakování. Zcela zřejmé jsou následky selhání těsnění u látek s vysokou toxicitou nebo u hořlavých tekutin. I toto kritérium je velmi významné a často bývá důležitým při rozhodování o typu výměníku. Při aplikacích, kde jsou jako jedna pracovní látka použity spaliny, musí být brán v potaz i obsah tuhých částí a nálepů ve spalinách a jejich vliv na funkci výměníku.

➤ ***Odolnost proti zanášení a možnost čištění teplosměnných ploch.***

Toto kritérium hodnotí provedení geometrie konstrukce výměníku ve vztahu k vlastnostem pracovních látek.

- Pokud spaliny obsahují částičky prachu, neměly by být spaliny umístěny do trubek s ohyby.
- Pokud je pracovní látka silně znečišťující, měla by být umístěna v takovém prostoru, ve kterém je snadné čištění a nebo použit výměník, který má menší náchylnost k zanášení. Toho se dá docílit jak vhodnou geometrií, tak i vhodnou rychlostí médií.
- Pokud spaliny obsahují prach a dehet mohou se spaliny umístit do rovných trubek, kvůli snadné čistitelnosti. Trubky musí mít i dostatečně velký průměr, aby se daly čistit. To ale může negativně ovlivnit součinitel prostupu tepla.
- Pokud spaliny obsahují pouze prach, lze je umístit do mezitrubkového prostoru a dosáhnout většího součinitele přestupu tepla.
- Při zanášení prachem a proudění spalin v mezitrubkovém prostoru je někdy vhodné uspořádat trubky do zákrytu místo často používaného vystřídáního uspořádání.

Kvůli snadné čistitelnosti se pro výměníky tepla na jednotkách termického zneškodňování používají spíše trubky než desky. Při kondenzaci se může použít modulární výměník tepla, kde jako poslední stupeň je zařazena kondenzační část výměníku.

➤ ***Aspekty stability výkonu a flexibility***

- Flexibilita je možná regulací (škrcením, „bypassem“).
- Při vysokých teplotách spalin je dobré použít U-trubky kvůli dilataci (mohou volně dilatovat, na rozdíl od rovných trubek v pevné trubkovnici).
- Při velkých rozdílech teplot obou pracovních látek by mohly praskat třeba svary.
- Při nestabilitě pracovní teploty látky je nebezpečí poškození výměníku [1].

Typ výměníku	Maximální tlak	Teplotní rozsah použití	Omezení tekutiny	Velikost plochy výměny m ²	Speciální vlastnosti
Se svazkem trubek v plášti	30,7 MPa	-200 až 600 °C (pro vyšší rozsahy nutno použít speciální materiály)	Podmíněno materiálem konstrukce.	10 – 1000 m ²	Velmi přizpůsobivý, použitelný téměř pro všechny aplikace.
Trubka v trubce	od 30,7 MPa (plášť) do 140 MPa (trubka)	-100 až 600 °C		0,25 – 200 m ²	Standardní modulární konstrukce.
Deskový výměník (profilové desky - těsněné)	1,6 MPa až do 2,5 MPa	-25 až 175 °C (-40 až 200 °C pro speciální typy)	Podmíněno materiálem konstrukce a omezeno materiálem těsnění.	do 1200 m ²	Standardní modulární konstrukce a nejvíce hospodárny provoz.
Lamelový výměník	2,0 MPa	Do 220 °C při teflonovém těsnění, do 500 °C (azbestové těsnění a nerezová ocel).		do 1000 m ²	
Spirálový výměník tepla	1,8 MPa	až do 400 °C	Podmíněno materiálem konstrukce. Vhodný pro látky náchylné na zanášení.	do 200 m ²	Upravené podle specifik procesu. Vysoký účinek přenosu tepla. Dobrá údržba (samočištění). Malé instalační náklady.
Rekuperační výměník plyn - plyn	0,15 MPa	250 °C a vyšší	Pro ohřev vody i jiných kapalin.	do 500 m ²	Široké spektrum typů, výběr podle vlastností plynu.

Tabulka 11 Příklady faktorů výběru pro konvenční typy výměníků tepla [5, 6]

2.5. Požadavky kladené na výměník tepla

K nejzákladnějším požadavkům týkajících se návrhu a výběru kladených na výměník tepla patří:

- Co nejmenší rozměry, hmotnost a cena výměníku.
- Co nejmenší tlakové ztráty, se kterými souvisí minimální energie na dopravu procesních látek a právě co nejmenší ztráty energie pracovních látek.
- Co nejvyšší spolehlivost v provozu.

V některých případech jsou tyto požadavky protichůdné. Z toho důvodu je konečné řešení kompromisem. Výběr z více řešení posuzovaných z toho pohledu pak představuje optimální návrhovou variantu.

Provozní spolehlivost zařízení by měla být zahrnuta již v konstrukčním řešení a výrobě výměníku. Velký podíl na ni má správně prováděná údržba daného zařízení [1].

3. Výběr vhodného typu výměníku z databáze

Výběr vhodného typu výměníku tepla je důležitou fází vlastního návrhu procesů a zařízení. V mnoha průmyslových odvětvích je stále ještě automaticky volen výměník se svazkem trubek v plášti, který lze prakticky použít pro libovolné provozní podmínky (teplota, tlak), a pro jehož návrh existují velmi dobré a dlouholetou praxí ověřené výpočtové postupy. Pro řadu aplikací jsou však výhodnější jiné typy s vyšší termickou účinností a nižšími investičními a provozními náklady.

Správný výběr vhodného typu výměníku tepla je důležitý zejména při jejich použití v tzv. vysokoteplotních aplikacích. Typickým představitelem takového procesu je systém využití tepla v procesu termického zpracování odpadů, kde se využívá teplo plyných produktů spalování. Výběr nevhodného typu výměníku při takovýchto aplikacích může způsobit při provozu problémy (velké zanášení, dilatace, popřípadě úplné zničení) a tím i velké ztráty.

Vyvíjená databáze obsahuje hlavní typy konvenčních výměníků tepla a speciální typy výměníků tepla určených pro výměnu tepla používaných zejména při termických procesech. Databáze je určena projektantům jako pomocný nástroj při výběru vhodného typu výměníku tepla pro daný proces nebo alespoň pro zúžení jeho výběru. Dále databáze umožňuje poskytovat doporučení pro možný výměník tepla. Jednalo by se o informace k umístění médií a geometrie a jiných doporučení a varování.

Výběr vhodného typu výměníku je prováděn zadáváním provozních parametrů (zejména typ pracovní látky, teplota, tlak, zanášení) a určením vhodnosti pro danou aplikaci, tzv. prioritu.

Databáze výběru výměníku je součástí víceúčelového softwarového systému spolu s modulem pro návrhový a kontrolní výpočet jednotlivých typů výměníků (*modul 2*) a modulem pro odhad investičních a provozních nákladů (*modul 3*) [1, 14].

3.1. Popis databáze a její použití

Přednostně je databáze zaměřena na usnadnění výběru vhodného typu pro danou aplikaci a ve spojení s dalšími moduly výpočtového systému i pro předběžný výpočet geometrie a také pro předběžné určení investičních a provozních nákladů.

Databáze zahrnuje výměníky pro nízkoteplotní a vysokoteplotní aplikace, aplikace pro přehřev kalu a přehříváče spalovacího vzduchu. Databáze může ovšem sloužit i pro jiné použití, například pro výběr a předběžný výpočet výměníků pro potravinářský průmysl, chemický průmysl a petrochemii.

➤ *Nízkoteplotní aplikace*

V nízkoteplotních aplikacích (se vstupní teplotou spalin kolem 250 °C), jsou široce používány různé typy deskových výměníků tepla. Jestliže vstupní teplota spalin je takto nízká, mohou být použity konvenční typy deskových výměníků a optimalizovány pomocí optimalizačních procedur. V některých provozních případech ovšem musí být plochy výměny tepla (kvůli škodlivým vlastnostem spalin) opatřeny antikorozií vrstvou (smalt, sklo) [1].

➤ *Vysokoteplotní aplikace*

Typickým představitelem takového procesu je systém využití tepla z procesu termického zpracování odpadů, kde se využívá teplo plyných produktů spalování. Kvůli charakteru spalin je často nutné umístit přehříváč vzduchu před parní kotel na odpadní teplo. Výběr nevhodného typu přehříváče při takovýchto aplikacích může způsobit při provozu závažné problémy (velké zanášení, dilatace, popřípadě úplné zničení výměníku tepla), a tím i velké provozní ztráty [1].

➤ *Specifické aplikace*

Je uvažována potenciální aplikace výměníků tepla ve spalovnách kalu. Energie obsažená ve spalinách vyrobených spalováním čistírenského kalu může být použita tímto způsobem k přehřevu kalu před odvodněním. Aplikace vychází z dříve zmíněného poznatku, že přehřev kalu před odvodněním může zvýšit dosažitelný stupeň odvodnění. Očekávané zlepšení odvodnění kalu zlepší energetickou bilanci procesu spalování a umožní pravděpodobně i autotermní spalování kalu. K tomuto účelu je vyvíjen nový typ výměníku typu „voda – kal“.

Dalším typem výměníku, který databáze obsahuje, je koaxiální výměník tepla. Jedná se o nový a originální návrh výměníku tepla, který je založen na integraci dvou částí zařízení do jedné kompaktní jednotky. Jedná se o spalovací komoru osazenou hořákem instalovanou dovnitř rekuperativního válcového tepelného výměníku. Tím je celé zařízení velmi kompaktní a tepelné ztráty ze spalovací komory jsou pozitivním způsobem využity pro zvýšení přehřevu vzduchu. Zařízení má menší hmotnost a zvýšenou tepelnou účinnost v porovnání s konvenčním uspořádáním. Jako příklad aplikace v průmyslové praxi lze uvést jednotku pro termické zpracování odpadního plynu z chemického provozu. Další využití výměníku je při procesu sušení a čištění zemního plynu [1].

➤ *Předeříváče vzduchu*

Předeřev spalovacího vzduchu je nejčastěji používaný způsob využití odpadního tepla jednotky. Instalace předeříváče vzduchu v jednotkách pro tepelné zpracování odpadů je rozumná v těch případech, kdy předeřev vzduchu přispívá k šetření přídavného paliva (zemního plynu). V energetických aplikacích (výroba tepla a energie) jsou předeříváče vzduchu obvykle umístěny za parním kotlem, avšak situace v aplikacích využívání energie z odpadů je obvykle rozdílná, zvláště kvůli specifickému charakteru spalin [1, 14].

Účel a přednosti databáze:

- Slouží k usnadnění výběru výměníku tepla pro danou aplikaci.
- Obsahuje konvenční a speciální typy výměníků tepla.
- Propojení s dalšími moduly je umožněn návrhový (kontrolní) výpočet a ekonomické vyhodnocení.
- Každý typ výměníku má „svoji“ tabulku priorit.
- Zadáním parametrů výměníku a provozu je vyhodnocena vhodnost všech výměníků v [%].
- Možnost snadného rozšíření databáze.

3.2. Metody výběru – výběrové algoritmy

Obecně pro výběr nejvhodnějšího řešení existuje několik metod různé úrovně složitosti. Na základě jejich rozboru pak byla vybrána metoda, která se pro daný případ nejvíce hodila. Zde jsou popsány ty nejzákladnější, jedná se o:

- expertní systémy;
- neuronové sítě;
- vícekriteriální rozhodování;
- rozhodovací stromy;
- genetický algoritmus.

3.2.1. Expertní systémy

Expertní systémy se pokoušejí o imitaci činnosti expertů (lidí, vědeckých pracovníků, specialistů apod.) a mohou být použity pro podporu rozhodování nebo pro přímé rozhodnutí. Expertní systém je softwarová aplikace využívající umělé inteligence, která může dosáhnout srovnatelné úrovně s lidským expertem při určité specializaci a v určité problematice. Cílem je přenos kvalifikace z expertů na laiky, respektive zajištění přenositelnosti řešení problému do běžné praxe.

U expertního systému se předpokládá, že v průběhu své činnosti se i sám učí.

Expertní systém obsahuje dvě části:

- bázi znalostí;
- odvozovací mechanismus a systém učení.

Pro zajištění přenosu odborné znalosti (faktů a procedur) od odborníka do expertního systému a potom uživateli je třeba čtyř aktivit:

- nabytí znalosti;
- interpretace znalosti;
- odvození znalosti;
- přenos znalosti k uživateli.

Zdrojem znalostí jsou experti nebo písemné prameny. Znalosti jsou dále organizovány jako pravidla nebo návrhové vzory (objektově orientované) a elektronicky ukládány ve znalostní bázi. Ve znalostní bázi jsou data ukládána s potřebnou mírou odborné kvalifikace, která je nutná pro jejich zpětné využití při tvorbě deduktivních závěrů.

Expertní systém by měl obsahovat následující znalostní prvky :

- teorie a fakta sledované problematiky;
- meta – znalosti a obecné strategie řešení;
- aplikovaná pravidla a procedury dané oblasti.

Expertní systém lze podle jeho tvorby a využívání rozdělit na dvě části:

- konzultační část;
- vývojovou část.

Konzultační část zahrnuje experty, laiky a doporučení a realizuje předání závěrů, rad a doporučení uživatelům.

Vývojová část expertního systému předává odborné informace, znalosti, fakta a pravidla o problémové oblasti odborníkem či expertem do znalostní báze a procesní jednotky [15, 16, 17].

3.2.2. Neuronové sítě

Neuronová síť je jedním z výpočetních modelů používaných v umělé inteligenci. Jejím vzorem je chování odpovídajících biologických struktur. Umělá neuronová síť je struktura určena pro distribuované paralelní zpracování dat.

Skládá se z umělých (nebo také formálních) neuronů, jejichž předobrazem je biologický neuron. Neurony jsou vzájemně propojeny a navzájem si předávají signály a transformují je pomocí určitých přenosových funkcí. Neuron má libovolný počet vstupů, ale pouze jeden výstup.

Neuronové sítě se používají mimo jiné i pro rozpoznávání a kompresi obrazů nebo zvuků, předvídaní vývoje časových řad, někdy dokonce k filtrování spamu. V lékařství slouží k prohlubování znalostí o fungování nervových soustav živých organismů [15, 16, 17].

3.2.3. Vícekriteriální rozhodování

Modely vícekriteriálního rozhodování zobrazují rozhodovací problémy, v nichž se důsledky rozhodnutí posuzují podle více kritérií. Zohlednění více kritérií při hodnocení vnáší do řešení problémů obtíže, které vyplývají z obecné protichůdnosti kritérií. Kdyby totiž všechna kritéria ukazovala na stejné řešení, stačilo by pro volbu nejvhodnějšího rozhodnutí jediné z nich. Účelem modelů v těchto situacích je buď nalezení “nejlepší” varianty podle všech uvažovaných hledisek, vyloučení neefektivních variant nebo uspořádání množiny variant. Jednotlivým kritériím lze přidělit i jejich váhu (vliv na řešení).

Přístupy k vícekriteriálnímu rozhodování se liší podle charakteru množiny variant či přípustných řešení. Podle způsobu jejího zadání lze rozlišit dvě skupiny těchto modelů. *Modely vícekriteriálního hodnocení* variant jsou zadány pomocí konečného seznamu variant a jejich ohodnocení podle jednotlivých kritérií. *Modely vícekriteriálního programování* mají množinu variant s nekonečně mnoho prvky vyjádřenu pomocí omezujících podmínek a ohodnocení jednotlivých variant je dáno jednotlivými kritériálními funkcemi. U metod vícekriteriální analýzy variant se jedná o problémy volby nejvýhodnější z konečného počtu variant, přičemž jednotlivé varianty jsou hodnoceny podle několika kritérií [15, 16, 17].

3.2.4. Rozhodovací stromy

Rozhodovací stromy představují grafické zobrazení struktury rozhodovacího procesu pomocí prostředků teorie grafů, pomocí tzv. stromů. Rozhodovací stromy obsahují uzly a hrany zobrazující postup rozhodování.

Uzly rozhodovacího stromu se pro daný účel rozlišují na uzly:

- rozhodovací (zobrazení čtverečky);
- situační (zobrazují kroužky).

Hrany se pak dělí na hrany vystupující z:

- rozhodovacích uzlů (čtverečků) – zobrazují alternativy;
- situačních uzlů (kroužků) – zobrazují stavy okolností.

Použití rozhodovacích stromů je výhodné zejména pro oblast vrcholového řízení, při kterém se jedná většinou o koncepční rozhodování.

Rozhodovací stromy usnadňují chápání složitých rozhodovacích procesů tím, že:

- ukazují, jaké další důsledky a kombinace okolností mohou nastat, zvolíme-li určitou cestu;
- nutí promýšlet každou variantu do všech důsledků;
- podněcují k vyhledávání faktorů nejistoty ovlivňujících důsledky jednotlivých variant.

Výhodou rozhodovacích stromů je možnost zobrazit:

- následná rozhodnutí;
- dlouhé posloupnosti rozhodovacích situací;
- nehomogenní rozhodovací situace.

Nevýhodou rozhodovacích stromů je:

- že v případě většího množství alternativ a stavů okolností mají velké množství uzlů a hran a jejich nakreslení může být těžkopádné [15, 16, 17].

3.2.5. Genetický algoritmus

Genetické algoritmy se používají k optimalizaci cílové funkce na množině přípustných řešení.

Hlavní myšlenka spočívá v tom, že na jednotlivé prvky množiny přípustných řešení pohlížíme jako na nějaké živé organismy v nějakém umělém životním prostředí. Přitom to, jak si tyto organismy v tomto prostředí vedou, tj. jejich schopnost přežít a schopnost reprodukce, odpovídá tomu, o jak "dobrá" řešení se jedná. Vlastní hledání pak spočívá ve výběru nějaké počáteční populace těchto organismů a v následné simulaci jejího vývoje pod kontrolou evolučních mechanismů, zahrnující přirozený výběr, reprodukci, atd. Jak se tato populace od generace ke generaci vyvíjí, "špatná" řešení mají tendenci vymírat, a naopak "dobrá" řešení se mezi sebou hojně kříží a produkují řešení ještě lepší.

Genetické algoritmy jsou poměrně mladá disciplína a v současnosti jsou předmětem intenzivního studia. Jejich zrod je datován do roku 1975 a je spojen zejména se jménem Johna Hollanda, který se v té době věnoval studiu buněčných automatů na Michiganské Univerzitě.

Na začátku řešení je nejprve třeba vybrat nějakou počáteční populaci přípustných řešení. To se děje většinou náhodně, ale máme-li k dispozici nějaké heuristiky, můžeme je uplatnit právě v tomto kroku. Dále, protože budeme chtít na tyto řešení uplatňovat genetické operátory, jako je křížení a mutace, potřebujeme je mít k tomuto účelu reprezentované v nějaké vhodné podobě. Jako dostatečně obecné se jeví kódování ve formě řetězce či pole hodnot. V praxi se přitom velmi často používají binární řetězce. Kódování řetězci má také svou analogii v genetice, kdy v podstatě řetězce odpovídají chromozómům, jednotlivé pozice v řetězci jednotlivým genům a konkrétní hodnoty na těchto pozicích pak alelám. Pro matematický popis a analýzu genetických algoritmů je klíčovým pojmem pojem tzv. schématu. Schéma je šablona, jež slouží k popisu podmnožiny řetězců (chromozómů), které obsahují jisté podobné sekce [18].

Výhody genetických algoritmů

- nevyžadují žádné speciální znalosti o cílové účelové funkci;
- jsou odolné vůči sklouznutí do lokálního optima;
- vykazují velmi dobré výsledky u problémů s rozsáhlými množinami přípustných řešení;
- mohou být využity pro nejrozmanitější optimalizační problémy.

Nevýhody genetických algoritmů

- mají problém s nalezením přesného optima;
- vyžadují velké množství vyhodnocování cílové (účelové) funkce;
- jejich implementace není vždy přímočará.

3.3. Vícekriteriální rozhodování

Jako metodika pro výběr nejvhodnějšího výměníku tepla pro danou aplikaci se jeví využití vícekriteriálního rozhodování. Při výběru se vychází přímo ze specifických technických údajů aplikací, pro které se hledá nejvhodnější zařízení z databáze výměníků tepla (výměníky tepla jsou specifikovány také svými parametry). Při výběru musíme brát v úvahu oboje: jak parametry výměníků, tak parametry aplikací.

Základním prvkem vícekriteriálního rozhodování jsou metody, podle kterých se konečné rozhodnutí stanovuje.

3.3.1. Metody vícekriteriálního rozhodování

Základní rozdělení metody vícekriteriálního rozhodování jsou:

- metody nevyžadující informaci o preferenci kritérií;
 - *prostá bodovací metoda*
 - *prostá metoda pořadí*
- metody vyžadující aspirační úroveň kritérií;
 - *metoda PRIAM*
- metody vyžadující ordinální informace o kritériích;
 - *lexikografická metoda*
 - *metoda ORESTE*
- metody vyžadující kardinální informace o kritériích.
 - *metoda váženého součtu*
 - *metoda TOPSIS*
 - *metoda PROMETHEE*
 - *metoda AHP*
 - *metoda postupných substitucí*

Podrobný popis těchto metod lze nalézt v odborné literatuře [15, 16, 17]. Použitá (upravená) metoda výběru je popsána v další části diplomové práce.

Na začátku byl záměr nasadit právě jednu ze jmenovaných metod přímo na výběr výměníku. Postupně se ale začaly vyskytovat problémy s možností vůbec nějakou metodu použít z důvodu specifických požadavků při výběru už z podstaty problému. Jako nejvhodnější se jevila metoda váženého součtu. Ta byla uzpůsobena pro naše potřeby.

Pro řešení výběrového algoritmu byly použity i metody stanovení vah, které dávají jednotlivým kritériím velikost vlivu na řešení – ne všechna kritéria hodnocení jsou rovnocenná.

Algoritmus řešení databáze vychází z některých dílčích kroků používaných ve výše zmíněných metodách a je jejich kombinací. Konkrétní postup algoritmu je:

- definice kritérií omezujících výběr;
- kritéria mají svůj počet variant;
- sestavení tzv. kritériálních tabulek (matic priorit);
- stanovení vah jednotlivých kritérií viz následující odstavec;
- výpočet algoritmu.

3.3.2. Metody stanovení vah jednotlivých kritérií

Stanovení vah kritérií bývá výchozím krokem analýzy vícekritériální rozhodování. Následující kapitola popisuje základní metody určení vah kritérií, mezi něž patří:

- Bodovací metoda;
- Metoda pořadí;
- Fullerova metoda (metoda Fullerova trojúhelníka);
- Saatyho metoda (metoda AHP).

Bodovací metoda

Důležitost každé z variant podle tohoto kritéria vyjádříme určitým počtem bodů v rámci určené bodovací stupnice. Smí se používat i desetinná čísla a více kritériím je možné přiřadit stejnou bodovou hodnotu. Tato metoda se pro výpočet vah kritérií používá podobně jako metoda pořadí tehdy, hodnotí-li kritéria více expertů. Každý expert ohodnotí každé kritérium určitým počtem bodů, čím je kritérium důležitější, tím více bodů dostane (při použití stupnice od 0 do 10 může mít kritérium 0 bodů od experta, podle kterého je zcela bezvýznamné, a 10 bodů od experta, který je považuje za absolutně důležité). Stupnice pro bodování může být vyjádřena i graficky pomocí úsečky. Na ní jsou pak zakresleny pozice jednotlivých kritérií vzhledem ke koncům úsečky, které vyjadřují nejvyšší a nejnižší preferenci.

Výpočet vah se z bodového hodnocení provede stejně jako u metody pořadí popsané dále. Hodnoty váhového vektoru se pak normalizují podle vztahu:

$$v_j = \frac{b_j}{\sum_{j=1}^n b_j}, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

kde b_j je součet všech bodů od jednotlivých expertů, které j -tému kritériu tyto experti přidělili.

Je ovšem otázkou, zda je vždy vhodné stanovit natvrdo rozsah stupnice již na začátku hodnocení. Tento postup je možný v případě, že máme hned na počátku poměrně jasnou představu o tom, jak asi jsou ta která kritéria důležitá pro hodnocení variant. Potom je asi nejvhodnější přiřadit nejdůležitějšímu kritériu nejvyšší možný počet bodů, nejméně důležitému kritériu nejnižší možný počet bodů a všechna ostatní kritéria umístit na

danou stupnici s přihlédnutím na hodnocení nejen těchto dvou kritérií, ale i na hodnocení ostatních, již dříve umístěných kritérií. Je možné postupovat i tak, že v prvním kroku provedeme jakýsi odhad bodového hodnocení kritérií, který potom ještě jednou posoudíme a případné nesrovnalosti odstraníme. Další možností, jak k bodovému hodnocení přistupovat, je postup, kdy přiřazujeme kritériím bodové hodnocení po indexech s tím, že máme stanovený pouze řád bodů pro hodnocení důležitosti prvního kritéria. Každému dalšímu kritériu přiřazujeme bodové hodnocení opět podle hodnot přidělených předchozím kritériím. Skutečný rozsah stupnice bude tedy znám až po hodnocení posledního kritéria v množině všech kritérií [15, 16, 17].

Metoda pořadí

K určení vah kritérií se metoda pořadí používá především v případech, že jejich důležitost hodnotí několik expertů. Každý z nich seřadí kritéria od nejdůležitějšího po nejméně důležité. Nejdůležitější kritérium bude ohodnoceno n body (n je počet kritérií), druhé nejdůležitější $n-1$ body, atd., až nejméně důležité kritérium dostane jen 1 bod. V případě stejné důležitosti kritérií dostanou tato kritéria body podle průměrného pořadí. Váhu každého z kritérií určíme tak, že sečteme body, které získalo od všech expertů, a vydělíme je celkovým počtem bodů, které experti rozdělili mezi všechna kritéria. Tím je zaručeno, že suma vah všech kritérií je rovna 1.

Je-li obecně j -té, kritérium ohodnoceno b_j body (jedinou hodnotou nebo součtem hodnot při hodnocení více experty), vypočítá se jeho váha na základě vztahu:

$$v_j = \frac{b_j}{\sum_{j=1}^n b_j}, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Tento vzorec normalizuje informace o preferenci kritérií, postup se proto nazývá *normalizace vah kritérií* [15, 16, 17].

Metoda Fullerova trojúhelníka

Pokud ordinální informace vyjadřuje pouze vztah mezi každou dvojicí hodnocených kritérií, lze použít metodu párového porovnávání. Pokud předpokládáme, že v případě, kdy uživatel ohodnotí kritérium j jako důležitější než l zároveň platí, že kritérium l je považováno za méně důležité než kritérium j , stačí provést počet srovnání:

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (3)$$

kde n je počet porovnávaných kritérií.

Toto porovnávání se většinou provádí pomocí tzv. Fullerova trojúhelníku. U každé dvojice prvků se zakroužkuje ten prvek, který se považuje za důležitější. Počet zakroužkování j -tého prvku označíme n_j . Pokud se považují prvky oba stejně důležité, v konečném součtu zakroužkování n_j přičteme k této hodnotě hodnotu 0,5. Konečnou váhu tohoto prvku vypočteme podle vzorce:

$$v_j = \frac{n_j}{N}, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

1	1	1	...	1
2	3	4	...	k
	2	2	...	
	3	4	...	
			...	
			k-2	k-2
			k-1	k
				k-1
				k

Tabulka 12 Obecný Fullerův trojúhelník

Nevýhoda tohoto postupu pro výpočet vah kritérií je v tom, že při plně konzistentní informaci od uživatele je vždy hodnota n_j pro nejméně důležité kritérium rovna nule, čímž samozřejmě bude i hodnota váhy v_j tohoto kritéria rovna nule. Pokud bychom byli důslední, mohli bychom toto kritérium vyloučit z množiny kritérií a provést porovnání ve Fullerově trojúhelníku znovu. Pokud bychom tento postup opakovali ($k - 1$ krát) a vždy by byla informace uživatele plně konzistentní, zůstalo by v množině kritérií pouze jediné – to nejdůležitější kritérium.

Této situaci se můžeme vyhnout tak, že po ukončení porovnání a vyčíslení hodnot n_j , všechny tyto hodnoty zvětšíme o hodnotu jedna (jako by bylo každé kritérium porovnáváno též samo se sebou a bylo důležitější). V tom případě budou hodnoty n_j přesně odpovídat hodnotám p_j tak, jak byly tyto hodnoty zavedeny v metodě pořadí. Navíc není jasné, zda hodnotu jedna přičítat k hodnotám n_j vždy nebo pouze v případě, že existuje n_j rovno nule. Díky normalizaci vektoru vah totiž přičtení hodnoty jedna zkreslí poměr mezi všemi dvojicemi vah, přičemž nejdůležitější informací, kterou váhový vektor poskytuje většině metod pro stanovování preferencí mezi variantami, nejsou absolutní hodnoty vektoru vah, ale právě výše uvedené poměry hodnot vah [15, 16, 17].

Saatyho metoda kvantitativního párového srovnávání (metoda AHP)

Tato metoda slouží k určení vah kritérií pomocí expertního hodnocení. Jde o metodu kvantitativního párového porovnávání kritérií.

Pro ohodnocení párových porovnání kritérií se používá 9-ti bodové stupnice a je možné používat i mezistupně (hodnoty 2, 4, 6, 8) [15, 16, 17]:

- 1 – rovnocenná kritéria i a j
- 3 – slabě preferované kritérium i před j
- 5 – silně preferované kritérium i před j
- 7 – velmi silně preferované kritérium i před j
- 9 – absolutně preferované kritérium i před j

Expert porovná každou dvojici kritérií a velikosti preferencí i – *tého*, kritéria vzhledem k j -*tému* kritériu zapíše do Saatyho matice $S = (s_{ij})$:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ 1/s_{12} & 1 & \dots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/s_{1k} & 1/s_{12} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Jsou-li i -*té* a j -*té* kritérium rovnocenná, je $s_{ij} = 1$, preferuje-li slabě i -*té* kritérium před j -*tým*, je $s_{ij} = 3$, preferuje-li silně i -*té* kritérium před j -*tým*, je $s_{ij} = 5$, při velmi silné preferenci i -*tého* kritéria je $s_{ij} = 7$, při preferenci absolutní dokonce $s_{ij} = 9$.

Je-li preferováno j -*té*, kritérium před i -*tým*, zapíše se do Saatyho matice převrácené hodnoty ($s_{ij} = 1/3$ při slabé preferenci, $s_{ij} = 1/5$ při silné preferenci atd.).

Z toho již vyplývají základní vlastnosti Saatyho matice. Jedná se o matici čtvercovou řádu $n \times n$ a reciproční, tj. platí, že $s_{ij} = 1/s_{ji}$. Prvky matice vlastně vyjadřují odhad podílů vah i -*tého* a j -*tého* kritéria. Na diagonále Saatyho matice jsou proto vždy hodnoty jedna (každé kritérium je samo sobě rovnocenné).

Saaty proto navrhl několik početně velmi jednoduchých způsobů, pomocí kterých lze odhadnout váhy v_j . Nejčastěji se používá postup výpočtu vah jako normalizovaného geometrického průměru řádků Saatyho matice, postup se někdy označuje termínem “metoda logaritmických nejmenších čtverců”. Vypočteme hodnoty b_i jako geometrický průměr řádků Saatyho matice:

$$b_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n s_{ij}} \quad (6)$$

Váhy se pak vypočtou normalizací hodnot b_i

$$v_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (7)$$

3.4. Kritéria pro výběrový algoritmus

Jedním z nejdůležitějších kroků při vývoji výběrové databáze výměníku tepla byla právě volba kritérií. Kritéria samotná prošla od počátečního návrhu řadou různých změn a doplnění.

Před vlastní tvorbou kritérií byl nejprve proveden jejich rozbor a rozdělení dle důležitosti (má vliv na stanovení vah kritérií) a oblasti popisu výměníku.

Důležitost kritérií

Byla provedena rozvaha důležitosti jednotlivých kritérií z pohledu konečného výběru. Výsledkem bylo rozdělení kritérií do skupin:

- hlavní;
- vedlejší;
- doplňková.

Do skupiny “hlavní” spadají kritéria charakteru procesní látky tj. kritérium č.1 a č.5 – označíme jako (1, 5) – popis kritérií je v následující kapitole 3.4.1, tlaku (2, 6), teploty (7, 3) a vhodnosti konstrukce pro jednotlivé dvojice fázových typů látek vstupních proudů (9). Oproti tomu do skupiny “vedlejší” patří kritéria tendence obou médií k zanášení, (8, 4) a vliv teplotní difference (12). Poslední dvě kritéria odolnost provedení konstrukce zařízení na teplotní fluktuaci (10) a vlastnosti teplosměnné plochy zařízení z hlediska jejího čištění (11) jsou zařazena do skupiny “doplňková”.

Oblast popisu výměníku

Kritéria jsou rozdělena do tří základních skupin popisujících:

- hodnocení HORKÉHO (ohřívajícího) proudu;
- hodnocení CHLADNÉHO (ohřívajícího) proudu;
- hodnocení vlastností konstrukce výměníku.

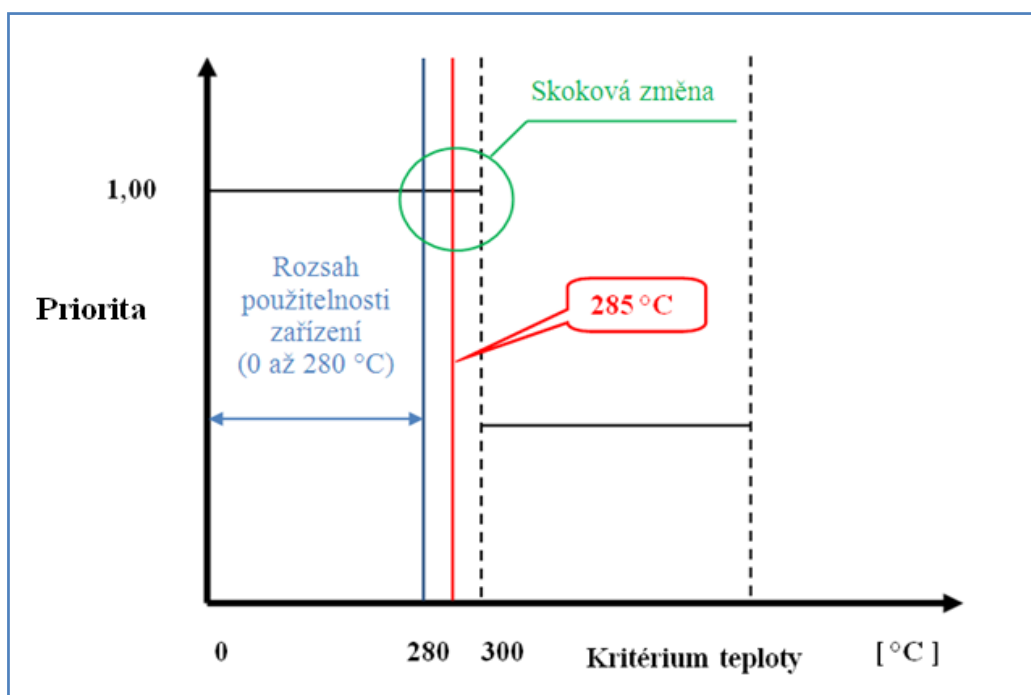
V současné konečné podobě pracuje výběrový algoritmus databáze s 12-ti kritérii.

Skokové změny

Problém skokové změny hodnoty se výrazně projeví při stanovení vhodnosti použití u zařízení, jejichž rozsah použití (teplotní tlakové) spadá do celého kritériálního intervalu. Kritériální interval výrazně převyšuje rozsah použití daného zařízení (viz obr. 19).

Uvedme to na následujícím příkladu. Mějme určitý typ zařízení na výměnu tepla, jenž je prakticky použitelné v rozsahu teplot pracovní látky např. 0 až 280 °C. Teplotní kritérium použité v databázi pro vyhodnocení vhodnosti použití jednotlivých typů zařízení na výměnu tepla má však rozsah například 0 až 300 °C. Má se vyhodnotit možnost použití zařízení pro konkrétní aplikaci, u níž je teplota pracovní látky 285 °C. vstupní údaj 285 °C tedy spadá do použitého kritériálního rozsahu 0 až 300 °C. S přiřazenou odpovídající vhodností (1,00). Avšak použití daného zařízení (nacházejícího se v tomto kritériálním rozsahu je pro tuto aplikaci nevhodné (nevyhovující) – díky omezení jeho použitelnosti v rozmezí 0 až 280 °C (viz schematické znázornění situace na obr. 19).

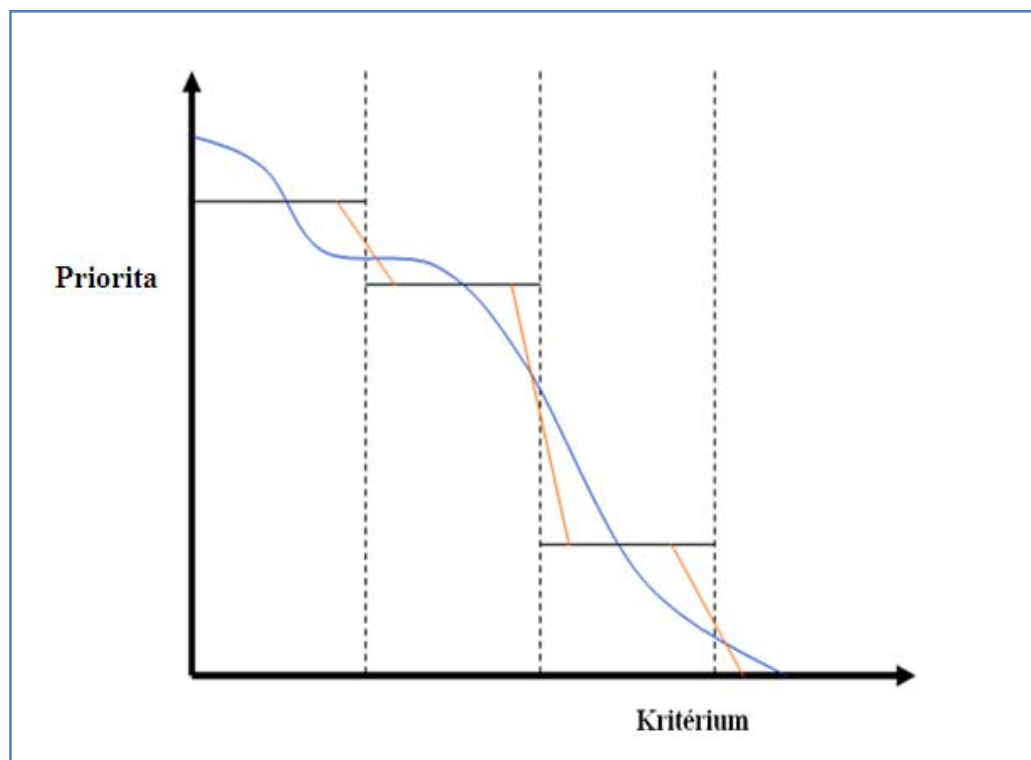
Tyto tzv. skokové změny pak dále zkreslují a zhoršují konečný výběr.



Obrázek 19 Zobrazení tepelných hodnot rozsahů pro ilustraci skokové změny

Pro řešení problému skokové změny hodnoty kritéria se nejčastěji využívá (viz obr. 20):

- proložení křivkou;
- aplikace “fuzzy” množin;
- zjemnění rozsahů.



Obrázek 20 Naznačení možných řešení skokových změn

Při řešení výběrového algoritmu se první dvě varianty ukázaly jako nevhodné a zbytečně složité. Přistoupilo se proto k variantě třetí, a to k zjemnění jednotlivých problémových rozsahů. Daná kritéria se např. z původně pěti rozsahových priorit rozšířila až na deset.

3.4.1. Hodnotící kritéria

Kritéria jsou rozdělena do třech základních skupin:

- Kritéria hodnocení ohřívajícího HORKÉHO proudu.
- Kritéria hodnocení ohřívajícího CHLADNÉHO proudu.
- Kritéria hodnocení vlastností konstrukce výměníku.

Kritéria hodnocení ohřívajícího HORKÉHO proudu

Kritérium 1 (1. řádek kritériální tabulky) – charakter procesní látky horkého proudu:

1. pozice na řádku: priorita použití média – agresivní látka (kyseliny)
2. pozice na řádku: priorita použití média – Newtonovské tekutiny (voda)
3. pozice na řádku: priorita použití média – ne-Newtonovské tekutiny (suspenze)
4. pozice na řádku: priorita použití média – kaly (čistírenské kaly)
5. pozice na řádku: priorita použití média – plyn (spaliny)

Kritérium 2 (2. řádek kritériální tabulky) – tlak ohřívajícího média:

Kritéria pro spektrum tlaku nižšího než atmosférický tlak (podtlak)

1. pozice na řádku: $\leq 0,1$ MPa

Kritéria pro spektrum tlaku blízkého atmosférickému tlaku (nízký tlak)

2. pozice na řádku: 0,1 – 0,2 MPa

Kritéria pro spektrum tlaků vyšších než atmosférický tlak (střední tlak)

3. pozice na řádku: 0,2 – 0,5 MPa
4. pozice na řádku: 0,5 – 1,0 MPa
5. pozice na řádku: 1,0 – 2,0 MPa

Kritéria pro spektrum tlaků významně vyšších než atmosférický tlak (vysoký tlak)

6. pozice na řádku: 2,0 – 2,5 MPa
7. pozice na řádku: 2,5 – 3,5 MPa

Kritéria pro spektrum tlaků velmi významně vyšších než atmosférický tlak (velmi vysoký tlak)

8. pozice na řádku: 3,5 – 4,0 MPa
9. pozice na řádku: 4,0 – 6,0 MPa
10. pozice na řádku: $\geq 6,0$ MPa

Kritérium 3 (3. řádek kritériální tabulky) – teplota ohřívajícího média:

Kritéria pro spektrum teplot blízkých teplotě okolí (tj. normální teploty, nepředpokládá se ohřev médií s teplotou pod 0 °C)

- | | |
|---------------------|-------------|
| 1. pozice na řádku: | 0 – 50 °C |
| 2. pozice na řádku: | 50 – 100 °C |

Kritéria pro spektrum teplot zvýšených (tj. nižší teploty)

- | | |
|---------------------|--------------|
| 3. pozice na řádku: | 100 – 150 °C |
| 4. pozice na řádku: | 150 – 250 °C |

Kritéria pro spektrum teplot středních (tj. střední teploty)

- | | |
|---------------------|--------------|
| 5. pozice na řádku: | 250 – 350 °C |
| 6. pozice na řádku: | 350 – 450 °C |

Kritéria pro spektrum teplot vysokých (tj. vysoké teploty)

- | | |
|---------------------|--------------|
| 7. pozice na řádku: | 450 – 550 °C |
| 8. pozice na řádku: | 550 – 600 °C |

Kritéria pro spektrum teplot velmi vysokých (tj. velmi vysoké teploty)

- | | |
|----------------------|--------------|
| 9. pozice na řádku: | 600 – 900 °C |
| 10. pozice na řádku: | nad 900 °C |

Kritérium 4 (4. řádek kritériální tabulky) – tendence ohřívajícího média k zanášení:

1. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro médium čisté (bez zanášení)
2. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro zanedbatelně znečištěné médium
(minimální zanedbatelné zanášení)
3. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro médium mírně znečištěné (mírné zanášení)
4. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro médium středně znečištěné (střední zanášení)
5. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro médium silně znečištěné (silné zanášení)

Kritéria hodnocení ohřívaného CHLADNÉHO proudu

Jedná se o kritéria č. 5 až č. 8, která jsou totožná s kritérii horkého proudu (kritérium 5 – 8) jsou totožná s kritérii horkého proudu.

Kritéria hodnocení vlastností konstrukce výměníku

Kritérium 9 (9. řádek kritériální tabulky) – vhodnost konstrukce výměníku pro jednotlivé dvojice fázových typů látek na straně obou vstupních proudů

1. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro použití médií ve fázi (plyn/plyn)
2. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro použití médií ve fázi (plyn/kapalina)
3. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro použití médií ve fázi (plyn/odpařování)
4. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro použití médií ve fázi (plyn/kondenzace)
5. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro použití médií ve fázi (kapalina/kapalina)
6. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro použití médií ve fázi (kapalina/odpařování)
7. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro použití médií ve fázi (kapalina/kondenzace)
8. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro použití médií ve fázi (kondenzace/kondenzace)
9. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro použití médií ve fázi (kondenzace/odpařování)
10. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro použití médií ve fázi (odpařování/odpařování)

Kritérium 10 (10. řádek kritériální tabulky) – odolnost provedení konstrukce zařízení na teplotní fluktuaci pracovních látek (na kolísání stability výkonu zařízení resp. flexibilita zařízení):

1. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro pracovní látky bez teplotního kolísání (tj. stabilní výkon)
2. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro pracovní látky s mírným teplotním kolísáním (tj. mírně kolísající výkon, řekněme do +/- 15 % nominálního výkonu)
3. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro pracovní látky se středním teplotním kolísáním (tj. středně kolísající výkon, řekněme do +/- 25 % nominálního výkonu)
4. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro pracovní látky s vysokým teplotním kolísáním (tj. vysoce kolísající výkon, řekněme do +/- 50 % nominálního výkonu)
5. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro pracovní látky s enormně vysokým teplotním kolísáním (tj. velmi vysoce kolísající výkon, řekněme do +/- 75 % nominálního výkonu)

Kritérium 11 (11. řádek kritériální tabulky) – vlastnosti teplosměnné plochy zařízení z hlediska jejího čištění:

1. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro použití mechanického čištění
2. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení pro použití chemického čištění

Kritérium 12 (12. řádek kritériální tabulky) – vliv teplotní difference látek (ΔT) na dilataci výměníku tepla

1. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení, které je vhodné pro teplotní diferenci ≤ 20 °C
nevyžaduje žádné speciální konstrukční úpravy výměníku tepla
2. pozice na řádku:
priorita vhodnosti zařízení, které je vhodné pro teplotní diferenci ≥ 20 °C
vyžaduje konstrukční úpravy výměníku na vykompenzování dilatací

Oblasti kritérií a přiřazení priorit

Jak je z předcházejícího odstavce, popisujícího jednotlivá vytvořená kritéria zřejmé, každé kritérium má svojí několika úrovníovou stupnici rozlišení priorit (max. 10). Kritéria a jejich priority jsou uspořádány do kritériálních tabulek (rozdílný počet variant u jednotlivých kritérií). Jednotlivé priority byly daným kritériím výměníků tepla přiděleny na základě tabulek jejich použití (viz kap. 2). Vyplněné tabulky priorit pro jednotlivé typy výměníků tepla jsou uvedeny v příloze P1.

Počet priorit u kritérií ovlivnila nutnost zahrnout jemnější rozsahy rozdělení (např. kritérium tlaku, teploty) a zabránit tak skokovým změnám.

Priority samotné se pohybují v rozsahu od 0 do 1 (0 – absolutně nevyhovuje, 1 – absolutně vyhovuje). Oblast použití daného zařízení se tímto dostatečně určí a předejde se možným problémům při provozu (omezení funkce zařízení, zničení zařízení).

Samotný rozsah 0 až 1 může být podle potřeby vhodně rozdělen. Na databázi pro specifikaci zařízení je použito tzv. *prioritní dělení* (viz tab. 13).

Dělení oblasti priorit	Definice priorit
0,0	absolutně nevyhovuje
0,1	nevyhovuje
0,2	spíše nevyhovuje
0,3	téměř nevyhovuje
0,4	přestává vyhovovat
0,5	provozoschopné s problémy
0,6	vyhovuje za určitých podmínek
0,7	téměř vyhovuje
0,8	spíše vyhovuje
0,9	vyhovuje
1,0	absolutně vyhovuje

Tabulka 13 Dělení a definice oblasti priorit

Stanovení vah jednotlivých kritérií

Důležitost jednotlivých kritérií ve výpočtu reprezentují v databázi výměníků tzv. kritériální váhy, jak bylo diskutováno v předchozí části (kap. 3.4) diplomové práce.

Stanovení hodnot vah pro jednotlivá kritéria bylo v řešené databázi výměníků tepla provedeno na základě metod uvedených v kapitole 3.3.2 a váhy byly implementovány do vytvořeného výběrového algoritmu.

Výměníky uvedené v databázi

Běžné (konvekční) typy výměníků tepla

Mezi hlavní konvenční výměníky tepla, které jsou zapracovány do vytvořeného výpočtového systému patří ty typy, které se běžně používají a jsou všeobecně známé.

Jedná se o:

- Výměník typu trubka v trubce
- Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem s pevnou trubkovnicí
- Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem s plovoucí hlavou
- Výměník tepla se šroubovicovým přepážkovým systémem
- Výměník tepla se zkroucenými trubkami
- Deskový výměník tepla s profilovanými deskami skládaný
- Deskový výměník tepla s profilovanými deskami pájený
- Deskový výměník tepla s hladkými deskami
- Obtékaný svazek trubek

Speciální typy výměníků tepla

Speciální typy výměníků tepla jsou určeny převážně k jednomu účelu (typu pracovních látek). Příkladem je speciální konstrukční řešení výměníků pro linky termického zpracování odpadů, které jsou schopny plnit specifické požadavky dané aplikace.

Vytvořená databáze výměníků nyní zahrnuje tyto speciální typy:

- Spalinový radiační výměník tepla
- Modulový U-trubkový výměník tepla
- Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem U-trubky
- Koaxiální výměník tepla
- Šroubovicový deskový výměník tepla (výměník voda – kal)

Jednotlivé základní tabulky priorit výměníků tepla zahrnutých v databázi jsou součástí přílohy P1.

3.5. Postup použití zvoleného výběrového algoritmu

Na konkrétním ukázkovém příkladě bude nyní prezentován princip funkce výběrového algoritmu. Uvažujeme, že se má posoudit vhodnost použití výměníku tepla se segmentovým přepážkovým systémem s plovoucí hlavou (označíme jej jako HE 1) a deskového výměníku tepla s profilovanými deskami v pájeném provedení (označíme jej jako HE 2) pro aplikaci specifikovanou následujícími vstupními daty:

Vlastnosti teplého proudu (ohřívajícího):

Teplota:	550 °C na vstupu, 245 °C na výstupu spaliny
Tlak:	blízký atmosférickému (do 0,2 MPa)
Látka:	spaliny
Zanášení:	střední

Vlastnosti chladného proudu (ohřívaného):

Teplota:	195 °C na vstupu, 477 °C na výstupu
Tlak:	0,628 Mpa
Látka:	paroplynová směs
Zanášení:	žádné (popřípadě velice mírné)

Pro oba posuzované typy výměníků (stejně jako pro ostatní typy) byly nejdříve sestaveny a implementovány jejich kritériální tabulky (viz tab. 14 a tab. 15).

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	0,20	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,20	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabulka 14 Kritériální tabulka výměníku tepla HE 1

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	0,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabulka 15 Kriteriační tabulka výměníku tepla HE 2

Výběrový algoritmus pak funguje následovně:

Krok 1. Zadání vstupních dat do databáze

Po zadání vstupních dat do databáze a následném spuštění výpočtu tlačítkem “Provést výběr” (viz obr. 21) dochází k výpočtu vhodnosti použití jednotlivých zařízení z databáze pro danou aplikaci (Hlavní výpočtový algoritmus databáze – DATABÁZE VÝBĚRU VHODNÉHO TYPU VÝMĚNÍKU TEPLA) je součástí elektronické přílohy.

Postup výpočtu je ilustrován v následujících krocích.

DATABÁZE VÝBĚRU
VHODNÉHO TYPU VÝMĚNÍKU TEPLA

HORKÝ PROUD
(hlavní kritéria)

Charakter procesní látky
plyn

Absolutní tlak látky
nízký tlak, 0,1 - 0,2 MPa

Teplota látky
450 - 550 °C

Tendence k zanášení
střední zanášení

CHLADNÝ PROUD
(hlavní kritéria)

Charakter procesní látky
Newtonovské tekutiny

Absolutní tlak látky
střední tlak, 0,5 - 1,0 MPa

Teplota látky
150 - 250 °C

Tendence k zanášení
bez zanášení

VLASTNOSTI A OMEZENÍ VÝMĚNÍKU

Dvojice fázových typů látek na straně obou vstupních proudů
plyn/odpařování

Odolnost konstrukce zařízení na teplotní fluktuaci pracovních látek (kolísání stability výkonu)
stabilní výkon

Vlastnosti povrchů teplosměnné plochy zařízení z hlediska jeho čištění
mechanické čištění

Teplotní difference látek
teplotní difference větší jak 20°C

☒ Pokud je jedno kritérium rovno 0 tak vyřadit výměník z výběru

Zobrazit zařízení s vhodností větší jak [%] 10 Provést výběr

Obrázek 21 Část hlavního pracovního okna databáze (zadány vstupní data)

Krok 2: Výběr hodnot priorit z kritériálních tabulek

Výběr hodnot priorit z kritériálních tabulek je ilustrován na zmíněných dvou typech výměníků tepla HE 1, HE 2 pomocí následujících tabulek (tab. 16, tab. 17). Identická analogie je v programu použita pro všechny typy výměníků tepla zahrnutých v databázi.

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	0,20	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,20	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-

$X_{1,5} (X_{ij})$
Pozice v
kritériální
tabulce.

Tabulka 16 Kritériální tabulka výměníku HE 1 se zvýrazněným vyhodnocením vstupních dat

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	0,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabulka 17 Kriteriační tabulka výměníku HE 2 se zvýrazněným vyhodnocením vstupních dat

V kriteriačních tabulkách jsou označeny pozice (X_{ij}) podle vstupních dat zadaných před samotným výběrem.

Krok 3: Sestavení matice priorit

Výsledky z předcházejícího kroku pro výměníky HE 1, HE 2 jsou seříděny do matice priorit, jak ukazuje následující tabulka (tab. 18). Hodnoty “HE1, HE2” v tabulce odpovídají označeným hodnotám $X_{i,j}$ v kriteriačních tabulkách z kroku 1. Hodnoty V_i “Váhy” (bodovací metoda) odpovídají výpočtu vah dle bodovací metody, jak bylo uvedeno v kap. 3.3.2.

	HE 1	HE 2	Váhy (bodovací metoda)
Kritérium 1	1,00 ($X_{1,5}$)	1,00	(V_1) 0,08695
Kritérium 2	1,00 ($X_{2,3}$)	1,00	(V_2) 0,0966183
Kritérium 3	1,00 ($X_{3,7}$)	0,00	(V_3) 0,0966183
Kritérium 4	0,20 ($X_{4,4}$)	0,00	(V_4) 0,0772947
Kritérium 5	1,00 ($X_{5,5}$)	1,00	(V_5) 0,08695
Kritérium 6	1,00 ($X_{6,4}$)	1,00	(V_6) 0,0966183
Kritérium 7	1,00	1,00	0,0966183
Kritérium 8	1,00	1,00	0,0772947
Kritérium 9	1,00	0,00	0,08695
Kritérium 10	0,80	0,80	0,0676328
Kritérium 11	1,00	1,00	0,048309
Kritérium 12	1,00 ($X_{i,j}$)	1,00	(V_i) 0,0821256

Tabulka 18 Matice priorit obou porovnávaných výměníků

Krok 4: Sestavení standardizované kritériální tabulky

Výsledky z předchozího kroku 3 jsou použity pro výpočet standardizované kritériální tabulky. Princip výpočtu standardizované kritériální tabulky, jež je v konečné podobě uvedena v tab. 19, vystihuje následující rovnice (8) a její aplikace na 1. kritérium.

(8)

$$r_i = V_i \cdot X_{i,j}$$

kde r_i je měrná hodnota vhodnosti

Příklad výpočtu:

$$r_1 = V_1 \cdot X_{1,5}$$

$$r_1 = 0,08695 \cdot 1,00 = \mathbf{0,08695}$$

	HE 1	HE2
Kritérium 1	0,08695	0,08695
Kritérium 2	0,0966183	0,0966183
Kritérium 3	0,0966183	0
Kritérium 4	0,01545894	0
Kritérium 5	0,08695	0,08695
Kritérium 6	0,0966183	0,0966183
Kritérium 7	0,0966183	0,0966183
Kritérium 8	0,07729468	0,07729468
Kritérium 9	0,08695	0
Kritérium 10	0,05410624	0,05410624
Kritérium 11	0,048309	0,048309
Kritérium 12	0,0821256	0,0821256

Tabulka 19 Standardizovaná kritériální tabulka

Krok 5: Vyčíslení funkce vhodnosti (užitku) v procentuálním tvaru

Obdržené hodnoty měrných vhodností r_i z předchozího kroku jsou použity k vyčíslení funkce vhodnosti daného zařízení. Princip vyčíslení funkce vhodnosti, jež je uvedena v následující rovnici (9), je ilustrován na případě výměníku HE 1.

(9)

$$R_i = \left(\sum_{i=1}^n r_i \right) \cdot 100 [\%]$$

Příklad výpočtu:

$$R_i = (0,08695 + 0,0966183 + 0,0966183 + 0,01545894 + 0,08695 + 0,0966183 + 0,0966183 + 0,07729468 + 0,08695 + 0,05410624 + 0,048309 + 0,0821256) \cdot 100 = \mathbf{92 \%}$$

Obdobný postup je aplikován na všechny výměníky obsažené v databázi. Na základě obdržených výsledků poskytne softwarová implementace výslednou tabulku zobrazující procentuální vhodnost jednotlivých výsledků pro danou aplikaci. Pro uvedený příklad porovnávající vhodnost výměníků HE 1, HE 2 je tato tabulka uvedena níže (viz tab. 20).

	[%]	Pořadí výměníků
HE 1	92	1
HE 2	73	2
..		..
..		..
HE X		..

Tabulka 20 Vyčíslení funkce užitku (vhodnost)

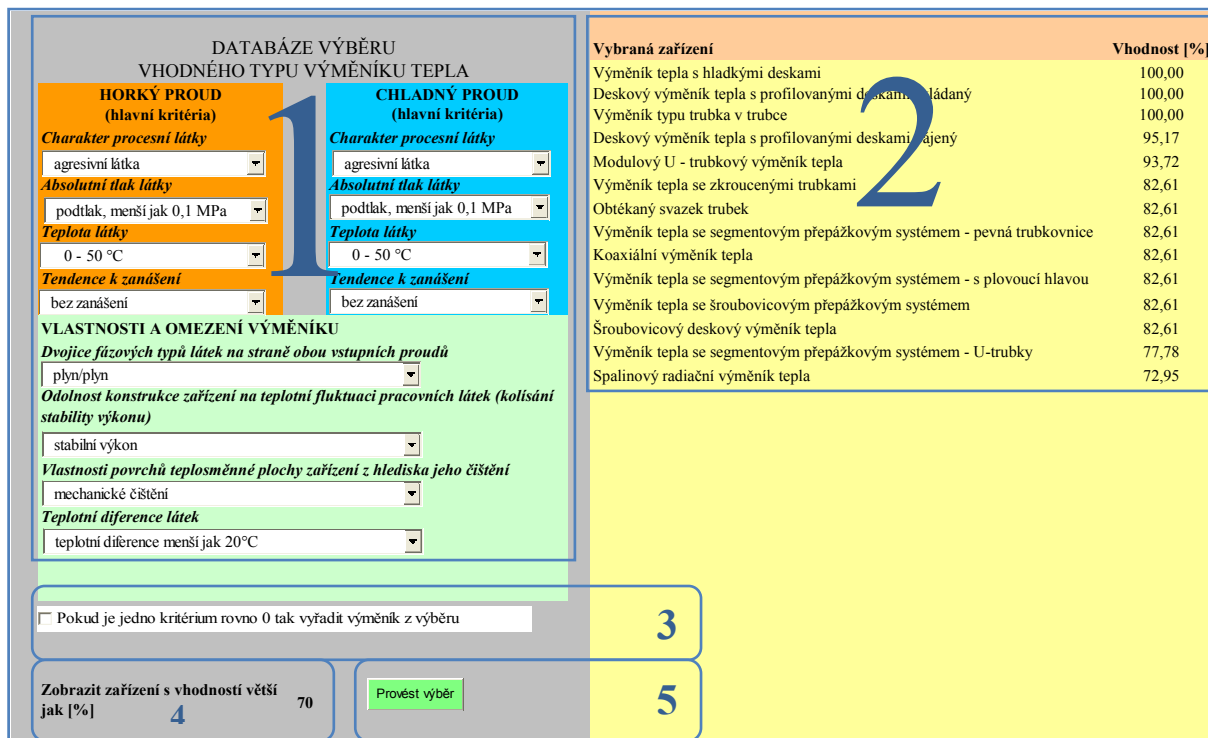
Krok 6: Zhodnocení výsledků

V tomto ilustrativním příkladě vyšel lépe ze dvou porovnávaných výměníků tepla výměník trubkový se segmentovým přepážkovým systémem a plovoucí hlavou (HE 1).

Při skutečném výpočtu (výpočet vhodností pro všechny výměníky v databázi) je konečný finální výběr na uživateli. Program by měl pouze pomoci s výběrem, zúžit možnosti. Ale finální výběr musí provést vždy uživatel. Výběr musí zohledňovat i velikost výměníku, jeho cenu a další kritéria, která nelze jednoduše do výběrového algoritmu začlenit.

3.6. Stručný manuál vytvořeného programu

Tato kapitola se zabývá stručným popisem částí vytvořeného programu.



DATABÁZE VÝBĚRU
VHODNÉHO TYPU VÝMĚNÍKU TEPLA

HORKÝ PROUD
(hlavní kritéria)

Charakter procesní látky

agresivní látka

Absolutní tlak látky

podtlak, menší jak 0,1 MPa

Teplota látky

0 - 50 °C

Tendence k zanášení

bez zanášení

CHLADNÝ PROUD
(hlavní kritéria)

Charakter procesní látky

agresivní látka

Absolutní tlak látky

podtlak, menší jak 0,1 MPa

Teplota látky

0 - 50 °C

Tendence k zanášení

bez zanášení

VLASTNOSTI A OMEZENÍ VÝMĚNÍKU

Dvojice fázových typů látek na straně obou vstupních proudů

plyn/plyn

Odolnost konstrukce zařízení na teplotní fluktuaci pracovních látek (kolísání stability výkonu)

stabilní výkon

Vlastnosti povrchů teplosměnné plochy zařízení z hlediska jeho čištění

mechanické čištění

Teplotní difference látek

teplotní difference menší jak 20°C

☐ Pokud je jedno kritérium rovno 0 tak vyřadit výměník z výběru

Zobrazit zařízení s vhodností větší jak [%] 70

Provést výběr

Vybraná zařízení	Vhodnost [%]
Výměník tepla s hladkými deskami	100,00
Deskový výměník tepla s profilovanými deskami - chlazený	100,00
Výměník typu trubka v trubce	100,00
Deskový výměník tepla s profilovanými deskami - ohřevný	95,17
Modulový U - trubkový výměník tepla	93,72
Výměník tepla se zkroucenými trubkami	82,61
Obtákaný svazek trubek	82,61
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - pevná trubkovnice	82,61
Koaxiální výměník tepla	82,61
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - s plovoucí hlavou	82,61
Výměník tepla se šroubovicovým přepážkovým systémem	82,61
Šroubovicový deskový výměník tepla	82,61
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - U-trubky	77,78
Spalinový radiční výměník tepla	72,95

Obrázek 22 Hlavní pracovní okno programu databáze

Část 1.

Část pracovního okna určená k zadání vstupních dat.

Část 2.

Zobrazení vypočtených výsledků pro jednotlivá zařízení.

Část 3.

Tato část pracovního okna umožňuje tzv. seřadit vybíraná zařízení.

První varianta:

Nezvolena (nezaškrtnuta) funkce programu:

“Pokud je jedno kritérium rovno 0, vyřadit výměník z výběru”.

Druhá varianta:

Zvolena (zaškrtnuta) funkce programu:

“Pokud je jedno kritérium rovno 0, vyřadit výměník z výběru”.

Část 4.

Funkce “Zobrazit zařízení s vhodností větší jak [%]” umožňuje uživateli zadat procentuální hodnotu omezení zobrazovaných výsledků výběru.

Část 5.

Tlačítko “provést výběr” startuje výpočet vhodnosti zařízení.

3.7. Demonstrace databáze na příkladech (ukázky výběru)

Na následujících třech případech výběru tepla jsou demonstrovány aplikační možnosti vytvořeného programu.

Příklad 1 – Ohřev TUV spaliny (výměník spaliny – voda)

Vstupní údaje:

Vlastnosti teplého proudu:

Teplota: nad 900 °C na vstupu
Tlak: 0,8 MPa
Látka: spaliny
Zanášení: vysoké (silné)

Vlastnosti chladného proudu:

Teplota: 50 °C na vstupu
Tlak: 0,3 MPa
Látka: voda
Zanášení: žádné (popřípadě velice mírné)

Nastavení vstupních hodnot do pracovního okna:

**DATABÁZE VÝBĚRU
VHODNÉHO TYPU VÝMĚNÍKU TEPLA**

HORKÝ PROUD (hlavní kritéria)	CHLADNÝ PROUD (hlavní kritéria)
Charakter procesní látky	Charakter procesní látky
plyn	Newtonovské tekutiny
Absolutní tlak látky	Absolutní tlak látky
střední tlak, 0,5 - 1,0 MPa	střední tlak, 0,2 - 0,5 MPa
Teplota látky	Teplota látky
nad 900 °C	50 - 100 °C
Tendence k zanášení	Tendence k zanášení
silné zanášení	bez zanášení

VLASTNOSTI A OMEZENÍ VÝMĚNÍKU

Dvojice fázových typů látek na straně obou vstupních proudů

plyn/kapalina

Odolnost konstrukce zařízení na teplotní fluktuaci pracovních látek (kolísání stability výkonu)

stabilní výkon

Vlastnosti povrchů teplosměnné plochy zařízení z hlediska jeho čištění

mechanické čištění

Teplotní difference látek

teplotní difference větší jak 20°C

☐ Pokud je jedno kritérium rovno 0 tak vyřadit výměník z výběru

Zobrazit zařízení s vhodností větší jak [%] **10**

Provést výběr

Obrázek 23 Pracovní okno databáze po zadání vstupních dat (před výběrem)

Výsledek výběru:

Vybraná zařízení	Vhodnost [%]
Spalinový radiační výměník tepla	100,00
Výměník typu trubka v trubce	84,15
Modulový U - trubkový výměník tepla	82,61
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - s plovoucí hlavou	82,61
Deskový výměník tepla s profilovanými deskami pájený	77,78
Obtékaný svazek trubek	77,58
Výměník tepla se zkroucenými trubkami	74,39
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - pevná trubkovnice	74,39
Výměník tepla se šroubovicovým přepážkovým systémem	74,39
Deskový výměník tepla s profilovanými deskami skládaný	73,91
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - U-trubky	69,56
Koaxiální výměník tepla	65,70
Šroubovicový deskový výměník tepla	65,02
Výměník tepla s hladkými deskami	59,13

Obrázek 24 Okno zobrazení výsledku výběru (první varianta)

Vybraná zařízení	Vhodnost [%]
Spalinový radiační výměník tepla	100,00

Obrázek 25 Okno zobrazení výsledku výběru (druhá varianta)

Vyhodnocení výsledků:

Jako nejlepší řešení pro daná vstupní data vysokoteplotní aplikace program vybral *Spalinový radiační výměník tepla* (absolutně vhodné zařízení).

Jako nejnevhodnější řešení program vybral *Výměník tepla s hladkými deskami*.

Výsledky výběru prezentované na obr. 24 byly vypočteny podle první varianty (tj. nezaškrtnuta v programu volba “Pokud je jedno kritérium rovno 0 tak vyřadit výměník z výběru.”). Výsledky výběru patrné na obr. 25 byly vypočteny podle druhé varianty (tj. volba “Pokud je jedno kritérium rovno 0 tak vyřadit výměník z výběru.” zaškrtnuta).

Příklad 2 – Ohřev teplé užitkové vody (TUV) – (výměník voda – voda)

Vstupní údaje:

Vlastnosti teplého proudu:

Teplota: 80 °C na vstupu, 40 °C na výstupu
 Tlak: 0,2 MPa
 Látka: voda
 Zanášení: žádné (popřípadě velice mírné)

Vlastnosti chladného proudu:

Teplota: 30 °C na vstupu, 70 °C na výstupu
 Tlak: 0,2 MPa
 Látka: voda
 Zanášení: žádné (popřípadě velice mírné)

Nastavení vstupních hodnot do pracovního okna:

DATA BAZE VÝBĚRU
VHODNÉHO TYPU VÝMĚNÍKU TEPLA

HORKÝ PROUD (hlavní kritéria)	CHLADNÝ PROUD (hlavní kritéria)
Charakter procesní látky Newtonovské tekutiny	Charakter procesní látky Newtonovské tekutiny
Absolutní tlak látky nízký tlak, 0,1 - 0,2 MPa	Absolutní tlak látky nízký tlak, 0,1 - 0,2 MPa
Teplota látky 50 - 100 °C	Teplota látky 0 - 50 °C
Tendence k zanášení bez zanášení	Tendence k zanášení bez zanášení

VLASTNOSTI A OMEZENÍ VÝMĚNÍKU

Dvojice fázových typů látek na straně obou vstupních proudů

kapalina/kapalina

Odolnost konstrukce zařízení na teplotní fluktuaci pracovních látek (kolísání stability výkonu)

stabilní výkon

Vlastnosti povrchů teplosměnné plochy zařízení z hlediska jeho čištění

mechanické čištění

Teplotní difference látek

teplotní difference menší jak 20°C

☐ Pokud je jedno kritérium rovno 0 tak vyřadit výměník z výběru

Zobrazit zařízení s vhodností větší
jak [%]

70

Provést výběr

Obrázek 26 Pracovní okno databáze po zadání vstupních dat (před výběrem)

Výsledek výběru:

Vybraná zařízení	Vhodnost [%]
Výměník tepla se zkroucenými trubkami	100,00
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - pevná trubkovnice	100,00
Deskový výměník tepla s profilovanými deskami skládaný	100,00
Šroubovicový deskový výměník tepla	100,00
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - s plovoucí hlavou	100,00
Výměník typu trubka v trubce	100,00
Výměník tepla se šroubovicovým přepážkovým systémem	100,00
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - U-trubky	95,17
Deskový výměník tepla s profilovanými deskami pájený	95,17
Obtékaný svazek trubek	91,30
Koaxiální výměník tepla	82,61
Výměník tepla s hladkými deskami	82,61
Modulový U - trubkový výměník tepla	80,68
Spalinový radiační výměník tepla	74,88

Obrázek 27 Okno zobrazení výsledku výběru (první varianta)

Vybraná zařízení	Vhodnost [%]
Výměník tepla se zkroucenými trubkami	100,00
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - pevná trubkovnice	100,00
Deskový výměník tepla s profilovanými deskami skládaný	100,00
Šroubovicový deskový výměník tepla	100,00
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - s plovoucí hlavou	100,00
Výměník typu trubka v trubce	100,00
Výměník tepla se šroubovicovým přepážkovým systémem	100,00

Obrázek 28 Okno zobrazení výsledku výběru (druhá varianta)

Vyhodnocení výsledků:

Jako nejlepší řešení program vybral sedm typů výměníků (viz výše). Je dále na projektantovi aby rozhodl, které zařízení bude nejvhodnější. V tomto případě program pomohl pouze zúžit výběr.

Příklad 3 – Ohřev agresivních médií (kyselina sírová)

Vstupní údaje:

Vlastnosti teplého proudu:

Teplota: 340 °C na vstupu, 200 °C na výstupu
 Tlak: 0,8 MPa
 Látka: pára
 Zanášení: žádné (popřípadě velice mírné)

Vlastnosti chladného proudu:

Teplota: 60 °C na vstupu, 150 °C na výstupu
 Tlak: 0,8 MPa
 Látka: kyselina sírová
 Zanášení: žádné (popřípadě velice mírné)

Nastavení vstupních hodnot do pracovního okna:

**DATABÁZE VÝBĚRU
VHODNÉHO TYPU VÝMĚNÍKU TEPLA**

HORKÝ PROUD (hlavní kritéria)	CHLADNÝ PROUD (hlavní kritéria)
<i>Charakter procesní látky</i> Newtonovské tekutiny	<i>Charakter procesní látky</i> agresivní látka
<i>Absolutní tlak látky</i> střední tlak, 0,5 - 1,0 MPa	<i>Absolutní tlak látky</i> střední tlak, 0,5 - 1,0 MPa
<i>Teplota látky</i> 250 - 350 °C	<i>Teplota látky</i> 50 - 100 °C
<i>Tendence k zanášení</i> bez zanášení	<i>Tendence k zanášení</i> bez zanášení

VLASTNOSTI A OMEZENÍ VÝMĚNÍKU

Dvojice fázových typů látek na straně obou vstupních proudů
plyn/kapalina

Odolnost konstrukce zařízení na teplotní fluktuaci pracovních látek (kolísání stability výkonu)
stabilní výkon

Vlastností povrchů teplosměnné plochy zařízení z hlediska jeho čištění
chemické čištění

Teplotní difference látek
teplotní difference větší jak 20°C

☐ Pokud je jedno kritérium rovno 0 tak vyřadit výměník z výběru

Zobrazit zařízení s vhodností větší
jak [%] 80

Provést výběr

Obrázek 29 Pracovní okno databáze po zadání vstupních dat (před výběrem)

Výsledek výběru:

Vybraná zařízení	Vhodnost [%]
Výměník typu trubka v trubce	100,00
Deskový výměník tepla s profilovanými deskami pájený	100,00
Modulový U - trubkový výměník tepla	91,30
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - s plovoucí hlavou	91,30
Deskový výměník tepla s profilovanými deskami skládaný	90,34
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - pevná trubkovnice	83,09
Výměník tepla se šroubovicovým přepážkovým systémem	83,09
Výměník tepla se zkroucenými trubkami	83,09
Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem - U-trubky	83,09

Obrázek 30 Okno zobrazení výsledku výběru (první varianta)

Vybraná zařízení	Vhodnost [%]
Výměník typu trubka v trubce	100,00
Deskový výměník tepla s profilovanými deskami pájený	100,00

Obrázek 31 Okno zobrazení výsledku výběru (druhá varianta)

Vyhodnocení výsledků:

Jako nejlepší řešení program vybral dva typy výměníků (viz výše). Je dále na projektantovi aby rozhodl, které zařízení bude nejvhodnější. V tomto případě program pomohl pouze zúžit výběr.

4. Závěr

V diplomové práci byly na základě zadání vypracovány všechny požadované úkoly:

- Popsána jednotlivá konvenční a speciální zařízení vyskytující se v databázi.
- Specifikována kritéria výběru a sestaveny charakterizační matice databáze výměníků.
- Provedena softwarová implementace a popis vytvořeného výběrového algoritmu.
- Ukázána praktická aplikace výběrového algoritmu na konkrétních průmyslových případech.

Vybraná zařízení jsou určena jak pro vysokoteplotní tak i pro nízkoteplotní aplikace. Výběrový algoritmus databáze je použitelný pro obě tyto varianty.

5. Použitá literatura a zdroje

- [1] Kilkovský, B. *Modelování zařízení pro výměnu tepla v procesech termického zpracování*. Disertační práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008. 185 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Jegla, Z., Ph.D., 2008.
- [2] Kilkovský B., Jegla Z., Kohoutek J., Stehlík P., Koncepce víceúčelového systému pro výpočty zařízení pro výměnu tepla, Výzkumná zpráva VZ-EU-UPEI-2004/07 pro řešení výzkumného záměru VZ 300004, Brno, 2004.
- [3] Stehlík P., Tepelné pochody, Soubor přednášek předmětu, ÚPEI VUT FSI Brno, 2009.
- [4] Stehlík P., Energie a emise, Soubor přednášek předmětu, ÚPEI VUT FSI Brno, 2009.
- [5] Hewitt G.F., Heat Exchanger Design Handbook, Begell House, Inc., New York, 1998.
- [6] Hewitt G. F., Process Heat Transfer, New York : Begall House, Inc., 1994.
- [7] Šípál J., Moderní předávací stanice, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Ústí Nad Labem, FUTM, 2007.
- [8] Jelemský K., Šesták J., Žitný R., Tepelné pochody, Slovenská Technická Univerzita v Bratislavě, 2000.
- [9] Krbek J., Ochrana L., Polesný B., Průmyslová energetika, Učební texty vysokých škol, VUT FSI Brno, 1996.
- [10] Stehlík P., Kohoutek J., Přenos tepla, Učební texty vysokých škol, VUT FSI Brno, 1992.
- [11] Hlavačka V., Lamelové a deskové výměníky tepla, Vydala Společnost pro techniku a prostředí, Novotného lávka S, 116 68 Praha 1, 1992.
- [12] Dvořák Z, Sdílení tepla a výměníky, Učební texty vysokých škol, ČVUT Praha, 1992.
- [13] Stehlík P., Kohoutek J., Němčanský J., Teplené pochody, Učební texty vysokých škol, VUT FSI Brno, 1991.
- [14] Libich V., Ochrana L., Spalovací zařízení a výměníky tepla, Učební texty vysokých škol, VUT FSI Brno, 1989.
- [15] Brožová H., Houška M., Šubrt T., Modely pro vícekritériální rozhodování, ČZU Praha, 2003.

- [16] Brožová H., Rozhodovací modely a znalostní management, ČZU Praha, 2000.
- [17] Fiala, P., Jablonský J., Maňas M., Vícekriteriální rozhodování, VŠE Praha, 1997.
- [18] < http://cs.wikipedia.org/wiki/Genetick%C3%BD_algoritmus > [cit. 2009 – 03 – 03].
- [19] < www.kralovopolska.cz > [cit. 2009 – 03 – 03].
- [20] <www.kochheattransfer.com> [cit. 2009 – 03 – 03].

6. Seznam obrázků a tabulek

Obrázky:

OBRÁZEK 1 SCHÉMA VYVÍJENÉ DATABÁZE.....	9
OBRÁZEK 2 SCHÉMA ZAMĚŘENÍ A CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	10
OBRÁZEK 3 SCHÉMA ROZDĚLENÍ VÝMĚNÍKŮ PODLE PRACOVNÍHO POCHODU	12
OBRÁZEK 4 PROUDĚNÍ VE VÝMĚNÍCÍCH (PROTIPROUD, SOUPROUD) [10]	14
OBRÁZEK 5 TRUBKOVÝ REKUPERAČNÍ VÝMĚNÍK TEPLA TYPU TRUBKA V TRUBCE [1].....	15
OBRÁZEK 6 VÝMĚNÍK TRUBKA V TRUBCE V ROZEBÍRATELNÉM A NEROZEBÍRATELNÉM PROVEDENÍ [11]	16
OBRÁZEK 7 VÝMĚNÍK TEPLA SE SEGMENTOVÝMI PŘEPÁŽKAMI S PLOVOUCÍ HLAVOU [3]	18
OBRÁZEK 8 SVAZEK TRUBEK U-TRUBKOVÉHO VÝMĚNÍKU [19]	18
OBRÁZEK 9 USPOŘÁDÁNÍ ŠROUBOVICOVÉHO PŘEPÁŽKOVÉHO SYSTÉMU VE VÝMĚNÍKU TEPLA [4]	19
OBRÁZEK 10 VÝMĚNÍK TEPLA SE ZKROUCENÝMI TRUBKAMI – VNITŘNÍ USPOŘÁDÁNÍ [20]	19
OBRÁZEK 11 SCHÉMA SKLÁDANÉHO DESKOVÉHO VÝMĚNÍKU TEPLA [3]	21
OBRÁZEK 12 DETAIL PROFILOVANÉ DESKY [3]	22
OBRÁZEK 13 DESKOVÝ VÝMĚNÍK TEPLA S HLADKÝMI DESKAMI [1]	23
OBRÁZEK 14 USPOŘÁDÁNÍ SVAZKU TRUBEK (ZA SEBOU V ZÁKRYTU, VYSTŘÍDANÉ) [1]	24
OBRÁZEK 15 SPALINOVÝ REKUPERÁTOR [4]	25
OBRÁZEK 16 MODULOVÝ VÝMĚNÍK TEPLA (PŘEDEHŘÍVAČ VZDUCHU) [4]	26
OBRÁZEK 17 KOAXIÁLNÍ VÝMĚNÍK TEPLA [3]	27
OBRÁZEK 18 ŠROUBOVICOVÝ VÝMĚNÍK VODA – KAL [1]	28
OBRÁZEK 19 ZOBRAZENÍ TEPELNÝCH HODNOT ROZSAHŮ PRO ILUSTRACI SKOKOVÉ ZMĚNY.....	45
OBRÁZEK 20 NAZNAČENÍ MOŽNÝCH ŘEŠENÍ SKOKOVÝCH ZMĚN	45
OBRÁZEK 21 ČÁST HLAVNÍHO PRACOVNÍHO OKNA DATABÁZE (ZADÁNY VSTUPNÍ DATA)	53
OBRÁZEK 22 HLAVNÍ PRACOVNÍ OKNO PROGRAMU DATABÁZE	57
OBRÁZEK 23 PRACOVNÍ OKNO DATABÁZE PO ZADÁNÍ VSTUPNÍCH DAT (PŘED VÝBĚREM)	58
OBRÁZEK 24 OKNO ZOBRAZENÍ VÝSLEDKU VÝBĚRU (PRVNÍ VARIANTA)	59
OBRÁZEK 25 OKNO ZOBRAZENÍ VÝSLEDKU VÝBĚRU (DRUHÁ VARIANTA)	59
OBRÁZEK 26 PRACOVNÍ OKNO DATABÁZE PO ZADÁNÍ VSTUPNÍCH DAT (PŘED VÝBĚREM)	60
OBRÁZEK 27 OKNO ZOBRAZENÍ VÝSLEDKU VÝBĚRU (PRVNÍ VARIANTA)	61
OBRÁZEK 28 OKNO ZOBRAZENÍ VÝSLEDKU VÝBĚRU (DRUHÁ VARIANTA)	61
OBRÁZEK 29 PRACOVNÍ OKNO DATABÁZE PO ZADÁNÍ VSTUPNÍCH DAT (PŘED VÝBĚREM)	62
OBRÁZEK 30 OKNO ZOBRAZENÍ VÝSLEDKU VÝBĚRU (PRVNÍ VARIANTA)	63
OBRÁZEK 31 OKNO ZOBRAZENÍ VÝSLEDKU VÝBĚRU (DRUHÁ VARIANTA).....	63

Tabulky:

TABULKA 1 HLAVNÍ PARAMETRY POUŽITÍ VÝMĚNÍKU TEPLA TRUBKA V TRUBCE	17
TABULKA 2 HLAVNÍ PARAMETRY POUŽITÍ VÝMĚNÍKŮ TEPLA SE SVAZKEM TRUBEK V PLÁŠTI	17
TABULKA 3 HLAVNÍ PARAMETRY POUŽITÍ VÝMĚNÍKU TEPLA SE ZKROUCENÝMI TRUBKAMI	20
TABULKA 4 HLAVNÍ PARAMETRY POUŽITÍ DESKOVÉHO VÝMĚNÍKU S PROFILOVANÝMI DESKAMI ..	22
TABULKA 5 HLAVNÍ PARAMETRY POUŽITÍ DESKOVÉHO VÝMĚNÍKU S HLADKÝMI DESKAMI	23
TABULKA 6 HLAVNÍ PARAMETRY POUŽITÍ VÝMĚNÍKU S PŘÍČNĚ OBTÉKANÝM SVAZKEM TRUBEK ...	24
TABULKA 7 HLAVNÍ PARAMETRY POUŽITÍ SPALINOVÉHO RADIAČNÍHO VÝMĚNÍKU	25
TABULKA 8 HLAVNÍ PARAMETRY POUŽITÍ MODULOVÉHO VÝMĚNÍKU S U-TRUBKAMI	26
TABULKA 9 HLAVNÍ PARAMETRY POUŽITÍ KOAXIÁLNÍHO VÝMĚNÍKU TEPLA	27
TABULKA 10 HLAVNÍ PARAMETRY POUŽITÍ ŠROUBOVICOVÉHO DESKOVÉHO VÝMĚNÍKU TEPLA	28
TABULKA 11 PŘÍKLADY FAKTORŮ VÝBĚRU PRO KONVENČNÍ TYPY VÝMĚNÍKŮ TEPLA [5, 6]	32
TABULKA 12 OBECNÝ FULLERŮV TROJÚHELNÍK	42
TABULKA 13 DĚLENÍ A DEFINICE OBLASTI PRIORIT	49
TABULKA 14 KRITERIÁLNÍ TABULKA VÝMĚNÍKU TEPLA HE 1	51
TABULKA 15 KRITERIÁLNÍ TABULKA VÝMĚNÍKU TEPLA HE 2	52
TABULKA 16 KRITERIÁLNÍ TABULKA VÝMĚNÍKU HE 1 SE ZVÝRAZNĚNÝM VYHODNOCENÍM VSTUPNÍCH DAT	53
TABULKA 17 KRITERIÁLNÍ TABULKA VÝMĚNÍKU HE 2 SE ZVÝRAZNĚNÝM VYHODNOCENÍM VSTUPNÍCH DAT	54
TABULKA 18 MATICE PRIORIT OBOU POROVNÁVANÝCH VÝMĚNÍKŮ	54
TABULKA 19 STANDARDIZOVANÁ KRITERIÁLNÍ TABULKA	55
TABULKA 20 VÝČÍSLENÍ FUNKCE UŽITKU (VHODNOST)	56

7. Seznam příloh

- P1 Tabulky priorit výměníků tepla zahrnutých v databázi
- P2 Elektronická příloha:
DATABÁZE VÝBĚRU VHODNÉHO TYPU VÝMĚNÍKU TEPLA

P1

Tabulky priorit výměníků tepla zahrnutých v databázi

Běžné (konvekční) typy výměníků tepla

Mezi hlavní konvenční výměníky tepla, které jsou zapracovány do vytvořeného výpočtového systému patří ty typy, které se běžně používají a jsou všeobecně známé.

- Výměník typu trubka v trubce
- Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem s pevnou trubkovnicí
- Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem s plovoucí hlavou
- Výměník tepla se šroubovicovým přepážkovým systémem
- Výměník tepla se zkroucenými trubkami
- Deskový výměník tepla s profilovanými deskami skládaný
- Deskový výměník tepla s profilovanými deskami pájený
- Deskový výměník tepla s hladkými deskami
- Obtékaný svazek trubek

Speciální typy výměníků tepla

Speciální typy výměníků tepla jsou určeny převážně k jednomu účelu (typu pracovních látek). Příkladem je speciální konstrukční řešení výměníků pro linky termického zpracování odpadů, které jsou schopny plnit specifické požadavky dané aplikace.

- Spalinový radiační výměník tepla
- Modulový U-trubkový výměník tepla
- Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem s U-trubkami
- Koaxiální výměník tepla
- Šroubovicový deskový výměník tepla (výměník voda – kal)

Jednotlivé kritériální tabulky výměníků tepla zahrnutých v databázi:

[1] Výměník typu trubka v trubce

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,40	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 5	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,40	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 10	1,00	1,00	1,00	0,80	0,70	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-

[2] Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem s pevnou trubkovnicí

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	0,20	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,20	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-

[3] Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem s plovoucí hlavou

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	0,20	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,20	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-

[4] Výměník tepla se šroubovitým přepážkovým systémem

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	0,20	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,20	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-

[5] Výměník tepla se zkroucenými trubkami

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,70	0,80	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,80	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-

[6] Deskový výměník tepla s profilovanými deskami skládaný

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-

[7] Deskový výměník tepla s profilovanými deskami pájený

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	0,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-

[8] Obtékaný svazek trubek

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60	-	-	-	-	-
Kritérium 5	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,60
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-

[9] Výměník tepla s hladkými deskami

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	0,80	-	-	-	-	-	-	-	-

[10] Spalinový radiační výměník tepla

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 3	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	0,90	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 10	1,00	1,00	0,80	0,70	0,60	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-

[11] Modulový U-trubkový výměník tepla

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	0,50	0,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,60	0,00	0,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	1,00	1,00	0,20	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 7	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70	0,40	0,00	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-

[12] Výměník tepla se segmentovým přepážkovým systémem s U-trubkami

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	0,20	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,20	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	-	-	-	-	-
Kritérium 11	0,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-

[13] Koaxiální výměník tepla

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 5	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-

[14] Šroubovicový deskový výměník tepla voda – kal

	Priorita 1	Priorita 2	Priorita 3	Priorita 4	Priorita 5	Priorita 6	Priorita 7	Priorita 8	Priorita 9	Priorita 10
Kritérium 1	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 2	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 3	1,00	1,00	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 4	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40	-	-	-	-	-
Kritérium 5	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 6	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 7	1,00	1,00	1,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 8	1,00	1,00	1,00	0,40	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 9	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kritérium 10	1,00	0,80	0,60	0,40	0,00	-	-	-	-	-
Kritérium 11	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Kritérium 12	1,00	0,60	-	-	-	-	-	-	-	-