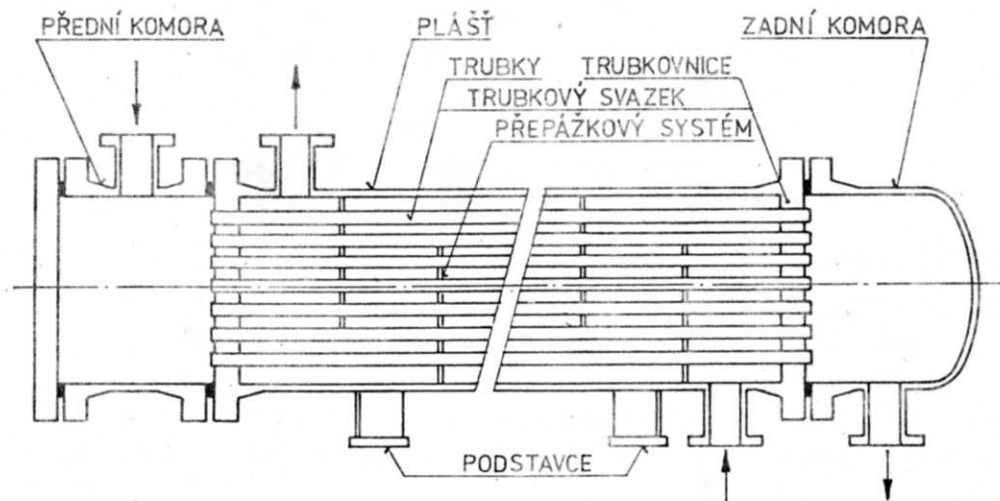


4. TRUBKOVÉ VÝMĚNÍKY TEPLA

Výměna tepla patří k operacím, které jsou zastoupeny prakticky ve všech chemických či potravinářských technologiích. Tepelné změny soustav je možné realizovat různým způsobem, čemu odpovídá široký sortiment teplosměnných zařízení. Významnou skupinu z nich představují trubkové výměníky tepla. Jsou to aparáty, ve kterých se přenos tepla uskutečňuje nepřímo, rekuperačně. Znamená to, že látky, vyměňující si teplo se bezprostředně nestýkají, jsou od sebe odděleny teplosměnnou plochou vytvořenou ze soustavy trubek. Potřebná teplosměnná plocha se dosáhne vhodnou velikostí, délkou a počtem trubek ve výměníku.

Schématicky je trubkový výměník tepla znázorněn na obr. 4.1



Obr. 4.1

Podstatou konstrukce trubkových výměníků tepla je vytvoření dvou, teplosměnnou plochou /trubkovým svazkem/ od sebe oddělených pracovních prostorů, trubkového a mezitrubkového. Trubkový prostor tvoří komory a vnitřek všech trubek. Mezi pláštěm a vnější stranou trubek je mezitrubkový prostor. Podle obr. 4.1 protéká látka A trubkovým prostorem a látka B mezitrubkovým prostorem.

Protože výměník může v provozu pracovat při obecně rozdílném tlaku látky A a látky B, hovoříme o trubkovém a mezitrubkovém prostoru jako o dvou samostatných tlakových prostorech. Aparát jako celek musí být konstrukčně navržen tak, aby za všech provozních stavů splňovaly jeho jednotlivé části a jejich spojení předepsané podmínky pevnosti a stability.

Předmětem této kapitoly je konstrukce a dimenzování trubkových výměníků tepla jako jednoúčelových samostatných aparátů. Trubkové svazky totiž mohou být součástí vestavby také jiných aparátů jakou jsou kolony, odparky, krystalizátory, chemické reaktory a pod. Pro jejich návrh platí v podstatě stejná pravidla jako pro trubkové výměníky tepla.

4.1 Základní rozdělení trubkových výměníků tepla

Potřeby provozní praxe v chemické a potravinářském průmyslu jakož i v energetice vedly postupně k vytvoření několika typických konstrukcí trubkových výměníků. Skutečnost, že četnost použití těchto aparátů je značná, vede výrobce k rozsáhlé

typizaci jednotlivých konstrukčních skupin výměníků a jejich stavebnicovému řešení. To má význam nejen z hlediska výrobního či provozního ale i ekonomického /ceny aparátů/.

Trubkové výměníky teple se dělí na dva základní typy:

- výměníky trubka v trubce,
- výměníky se svazkem trubek v plášti.

Za výměníky trubka v trubce se považují jednoduché souprouté nebo protiproudé výměníky, které mají v plášti o průměru max. 159 mm /normalizovaný rozměr trubky/ jednu, nebo více trubek. Celkové konstrukční řešení tohoto typu a spojování /řazení/ jednotlivých výměníků za účelem dosažení potřebné teplovýmenné plochy je na obr. 4.2.

Trubkové výměníky se svazkem trubek v plášti se dělí na tři hlavní typy:

- výměník s pevnými trubkovnicemi - obr. 4.3 a 4.7
- výměník s plovoucí hlavou /nebo trubkovnicí/ - obr. 4.4
- výměník s U-trubkami - obr. 4.6

Podle polohy za provozu dělí se výměníky dále na:

- ležaté /svazek trubek je uložen horizontálně/ - obr. 4.3, 4.4 a 4.6
- stojaté /svazek trubek je ve svislé poloze/ - obr. 4.7

Popis konstrukce a použití jednotlivých typů výměníků

Výměník typu trubka v trubce

Konstrukce je vytvořena ze dvou trubek, vnitřní a plášťové - obr. 4.2 a, nebo z několika vnitřních trubek upevněných v malé trubkovnici - obr. 4.2 b. Plášťová trubka může mít vnější průměr max. 159 mm. Výměníky tohoto typu mají malou teplosměnnou plochu, jejich konstrukce je však jednoduchá. Čistit se dá jen trubkový prostor.

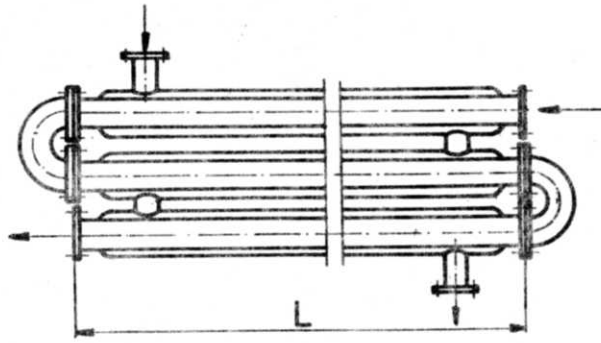
Výměníky trubka v trubce mohou být v uspořádání jednotělesovém nebo vícetělesovém, které umožňuje řadit jednotlivé výměníky jak sériově tak paralelně. Používají se pro tepelný výkon do 1 MW. Pro vyšší výkony jsou určeny již výměníky se svazkem trubek.

Výměník s pevnými trubkovnicemi

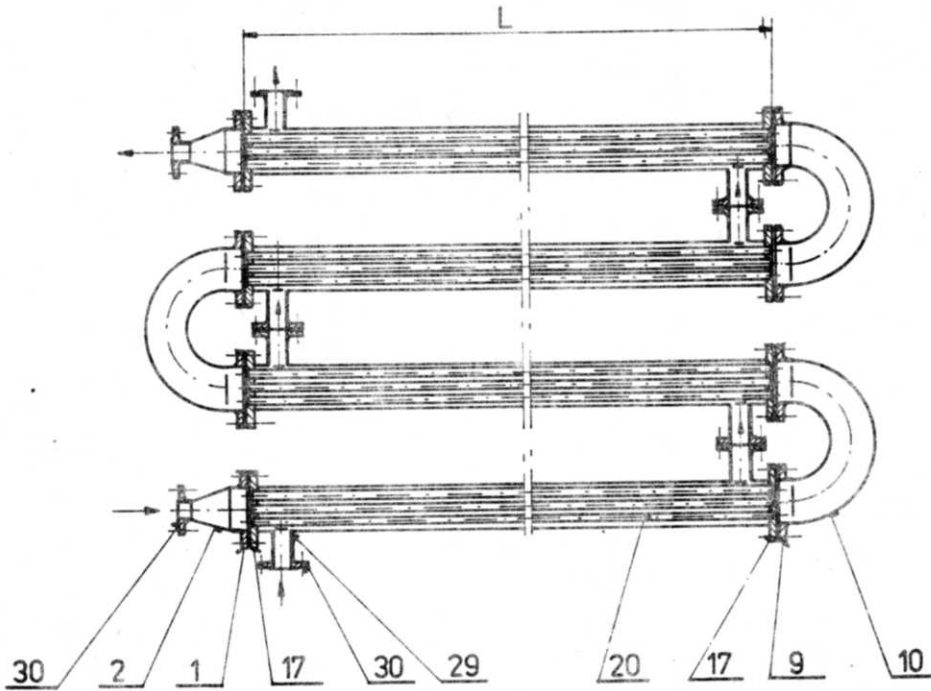
Plášť a obě trubkovnice jsou u tohoto typu pevně spojené. Trubkový svazek tvoří tedy s pláštěm nerozebíratelný celek - obr. 4.3. Tato konstrukce neumožňuje volnou teplotní dilataci pláště a svazku trubek. Za provozu, kdy plášť i trubky mají rozdílnou teplotu, v důsledku jejich pevného spojení vznikají v těchto částech příčevná dilatační napětí, která se sčítají se základními napětími od působení tlaku v jednotlivých prostorech výměníka. Aby tato příčevná napětí nepřekročila přípustnou hodnotu, připouští se u tohoto typu rozdíl teplot látek proudících v trubkovém a mezitrubkovém prostoru max. 20 °C.

Výměníky s pevnými trubkovnicemi jsou konstrukčně relativně jednoduché a umožňují vytvořit v malém celkovém objemu aparátu velkou teplosměnnou plochu. Tloušťka trubkovnice díky výztužnému účinku trubek vychází poměrně malá. Při respektování výše uvedeného omezení v rozdílu teplot pracovních látek je možné použít tento typ výměníka i pro vysoké teploty a tlaky. Trubkový svazek se dá čistit jen v trubkovém prostoru, což je třeba zohlednit při použití pro látky, ze kterých se na teplosměnné ploše mohou vytvářet nánosy.

Pro větší rozdíly teplot, než bylo výše uvedeno, je možné výměníky s pevnými trubkovnicemi použít za předpokladu, že se vhodnou konstrukční úpravou - zabudováním kompenzátorů - umožní dilatace pláště.



a)



b)

obr. 4.2

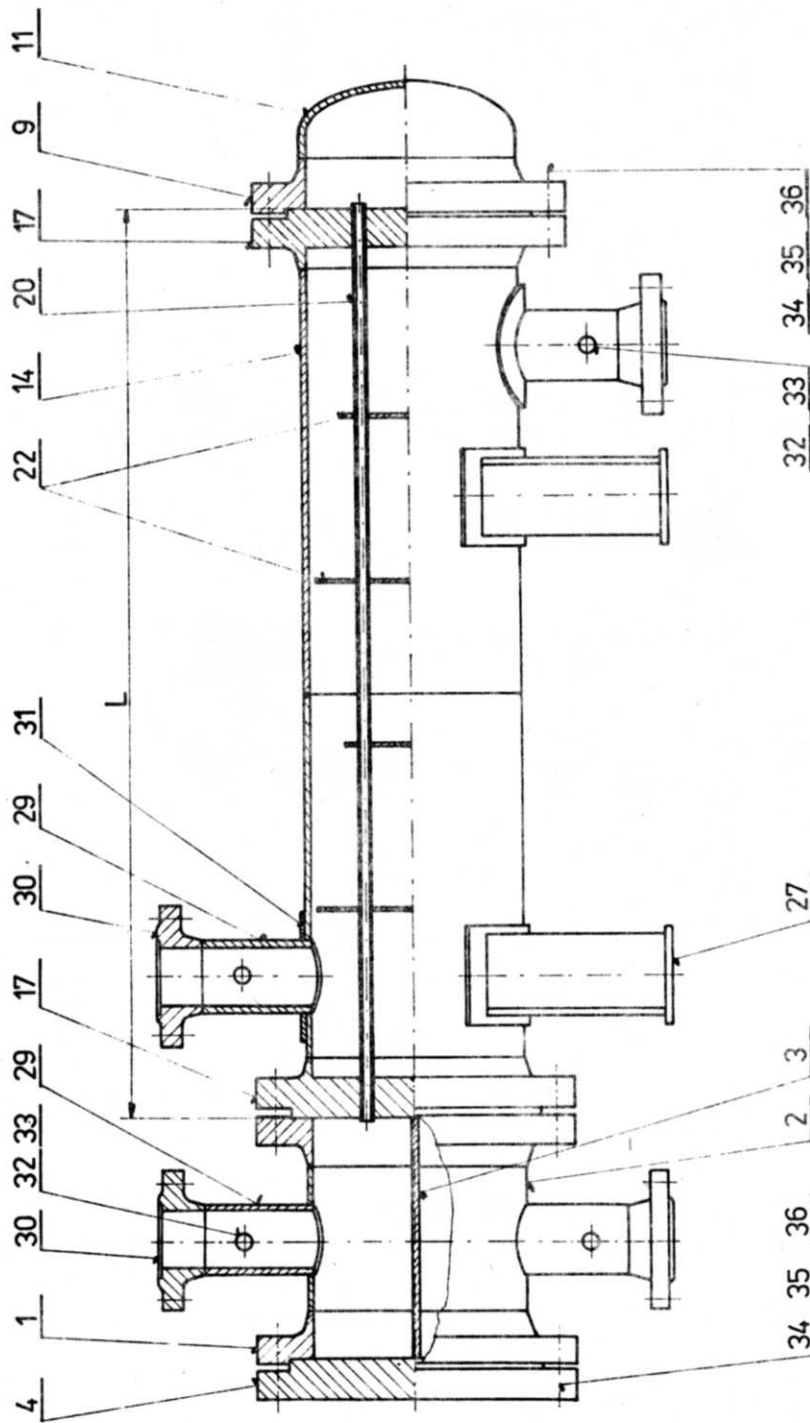
Názvosloví

Přední komory

- 1 - příruba komory
- 2 - meziplášť
- 3 - přepážka komory
- 4 - víko komory
- 5 - klenuté dno komory

Zadní komory

- 6 - dno pláště, víko pláště
- 7 - příruba víka
- 8 - dno víka, víko komory
- 9 - příruba víka
- 10 - meziplášť
- 11 - dno víka, plovoucí hlava
- 12 - dvojdílný kroužek
- 13 - víko plovoucí hlavy /příruba a dno/



Názvosloví - pokračování

Plástě

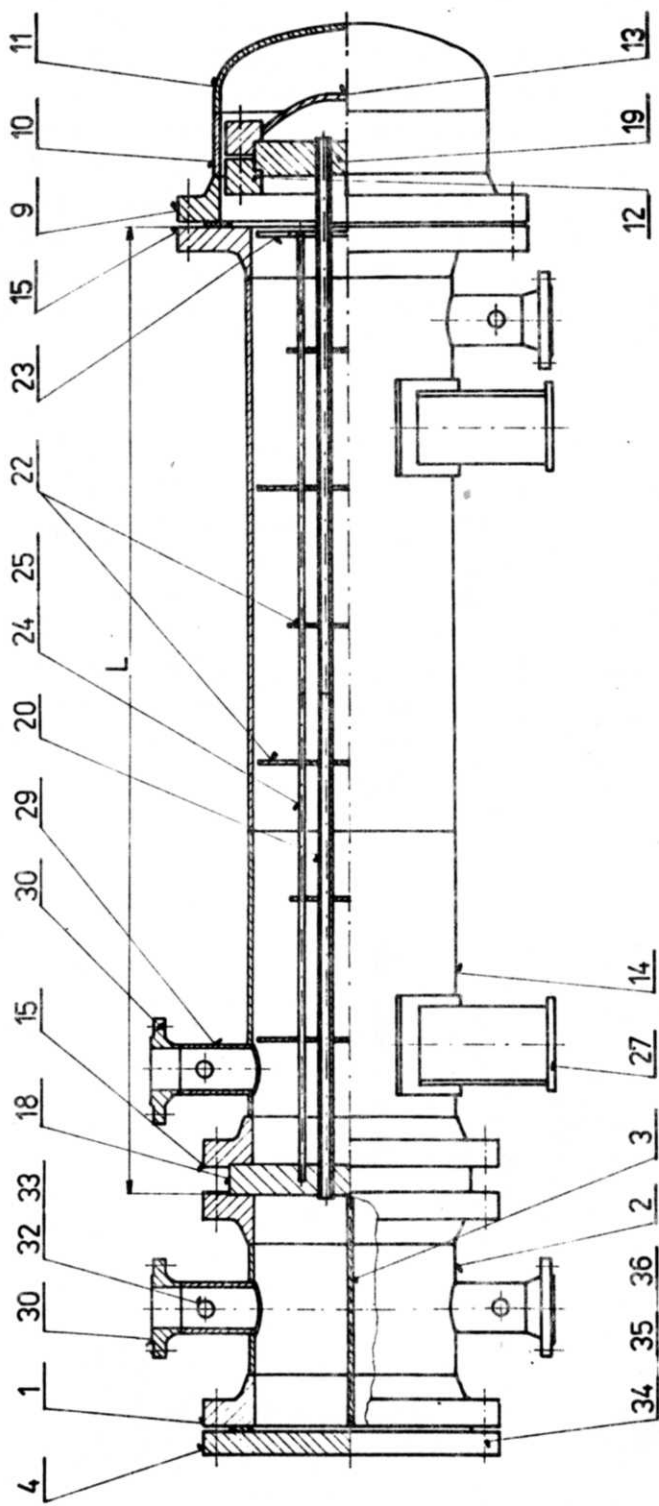
- 14 - lub plástě
- 15 - příruba plástě
- 16 - vlnový kompenzátor

Trubkové svazky

- 17 - trubkovnice pevná
- 18 - trubkovnice sevřená
- 19 - trubkovnice plovoucí
- 20 - trubka svazku

- 21 - U-trubka
- 22 - segmentová přepážka
- 23 - opěrná přepážka
- 24 - 25 - rozpěrná tyč a rozpěrná trubka

obr. 4.3



Názvosloví - pokračování

- Hrdla, návarky a příruby
 29 - trubka hrdla
 30 - příruba hrdla
 31 - ploché výztužné kroužek
 32, 33 - návarek a zátkový šroub

Uložení výměníků

- 27 - podstavec
 28 - patka

Šrouby, matice, těsnění

- 34, 35, 36 - šrouby, matice, těsnění

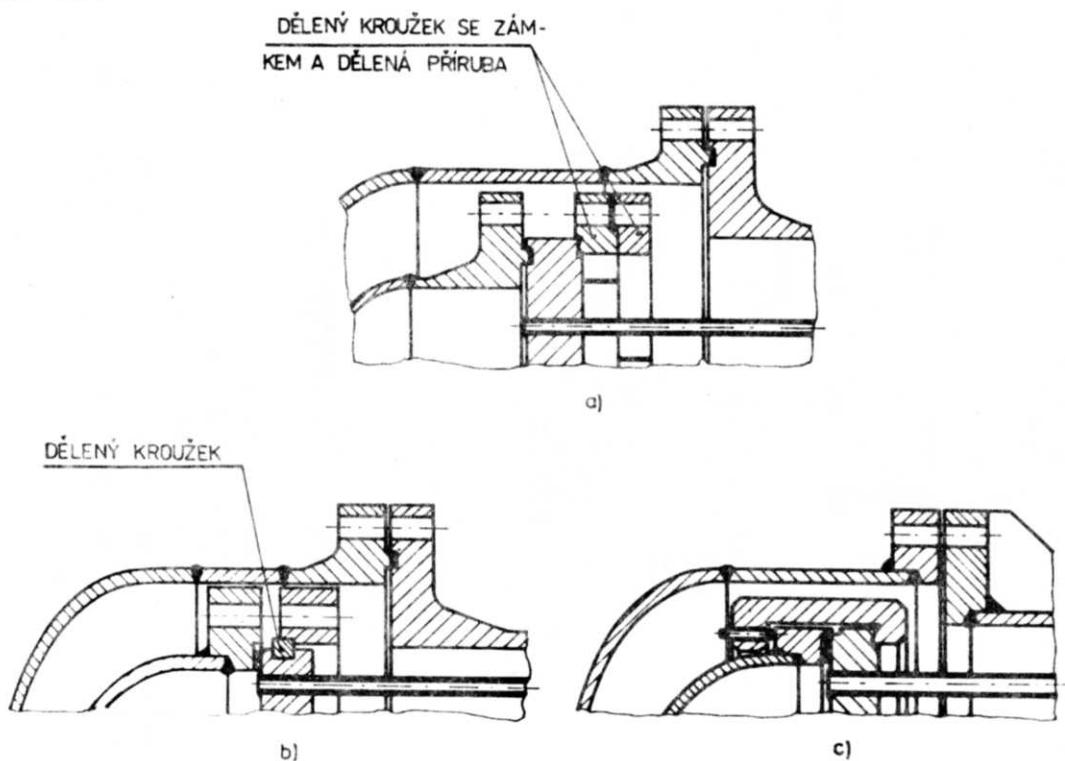
obr. 4.4

V praxi se používají dva typy kompenzátorů - vlnocový a ucpávkový. Plášť s vlnocovým kompenzátozem je na obr. 4.7. Detail konstrukce ucpávkového kompenzátoru v plášti je na obr. 4.8.

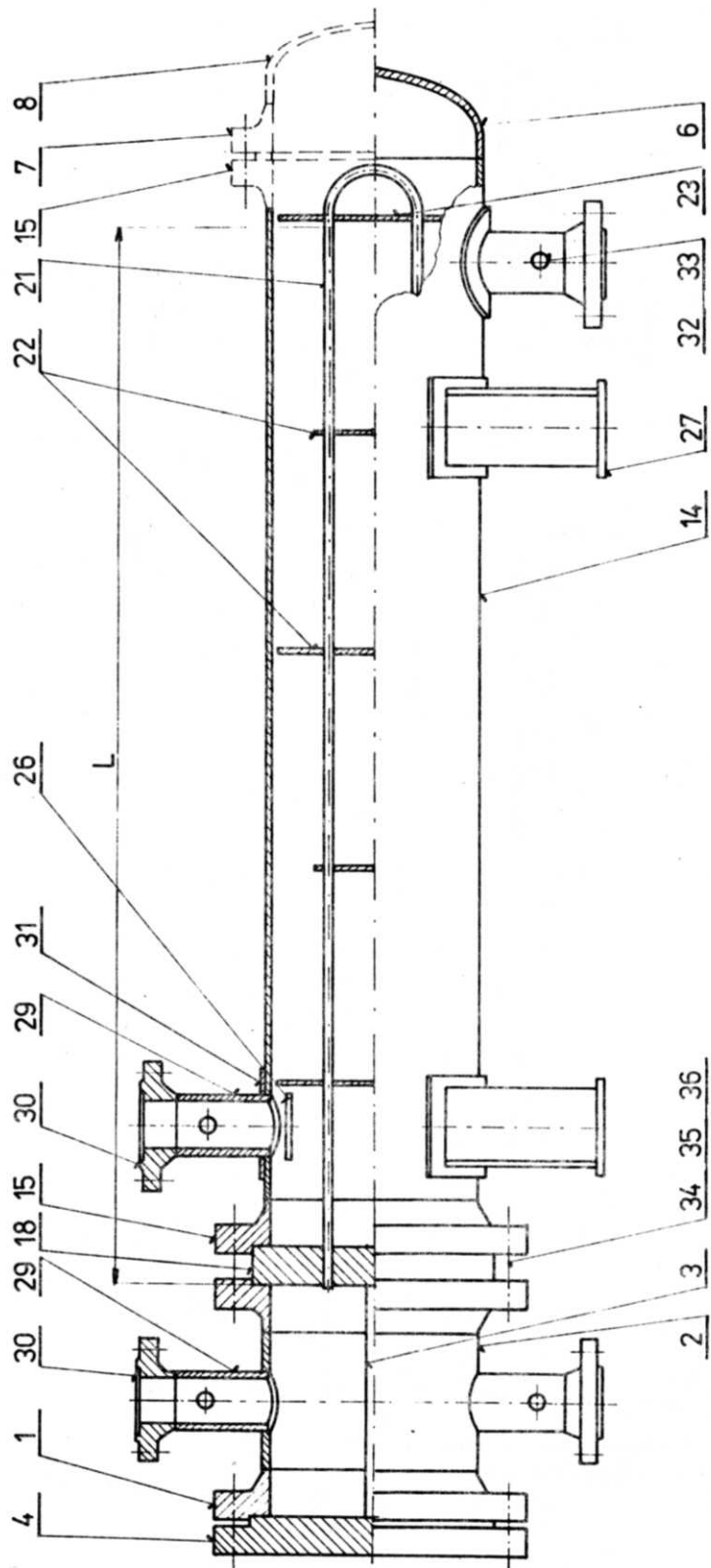
Použití kompenzátorů má však své omezení. Vlnocový kompenzátor je sice jednoduchý avšak v důsledku vlastní ohybové tuhosti eliminuje dilatační napětí jen částečně. Se zvětšující se tloušťkou jeho stěny /při vyšších tlacích v plášti/ se kompenzační účinek snižuje. Používá se proto jen asi do tlaku 1 MPa v mezitrubkovém prostoru. Ucpávkový kompenzátor, je-li konstrukčně a výrobně dobře proveden, umožňuje volnou dilataci pláště. Stlačovaná ucpávka, která je podstatou kompenzátoru, představuje však z provozního hlediska dosti nespolehlivý prvek zařízení - hlavně při vyšších tlacích a větších průměrech pláště. Použití tohoto typu kompenzátoru je tedy vhodné jen za určitých okolností. Jednou z nich je přípustnost případného úniku pracovní látky ucpávkou do okolí. Reálné použití se jeví proto jen do tlaku asi 1,0 MPa, průměru pláště do 1000 mm a pro všeobecně neagresivní pracovní látky.

Výměník s plovoucí hlavou

Jde o konstrukci, kdy jedna trubkovnice svazku je sevřena mezi příruby pláště a přední komory, zatímco druhá, ve spojení se zadní komorou je uložena v plášti výměníka s možností volného posuvu - obr. 4.4. Tím je zajištěná plná možnost dilatace trubkového svazku. Výměník může pracovat při libovolném rozdílu teplot pracovních látek. Trubky v tomto případě nemají na trubkovnice takový výztužný účinek jako u předešlého typu, proto jejich tloušťka vychází pro zatížení stejným tlakem podstatně větší. Složitější konstrukce aparátu se přirozeně promítá do jeho vyšší ceny. Výhodou je, že trubkový svazek je možné z pláště výměníka vyjmout, což umožňuje jeho případné čištění jak v trubkovém tak mezitrubkovém prostoru. Výměníky tohoto typu mohou být použity pro libovolné tlaky v pracovních prostorech. Staví se do průměru válce až 1500 mm. Různá konstrukční řešení plovoucí hlavy jsou naznačena na obr. 4.5.



Obr. 4.5

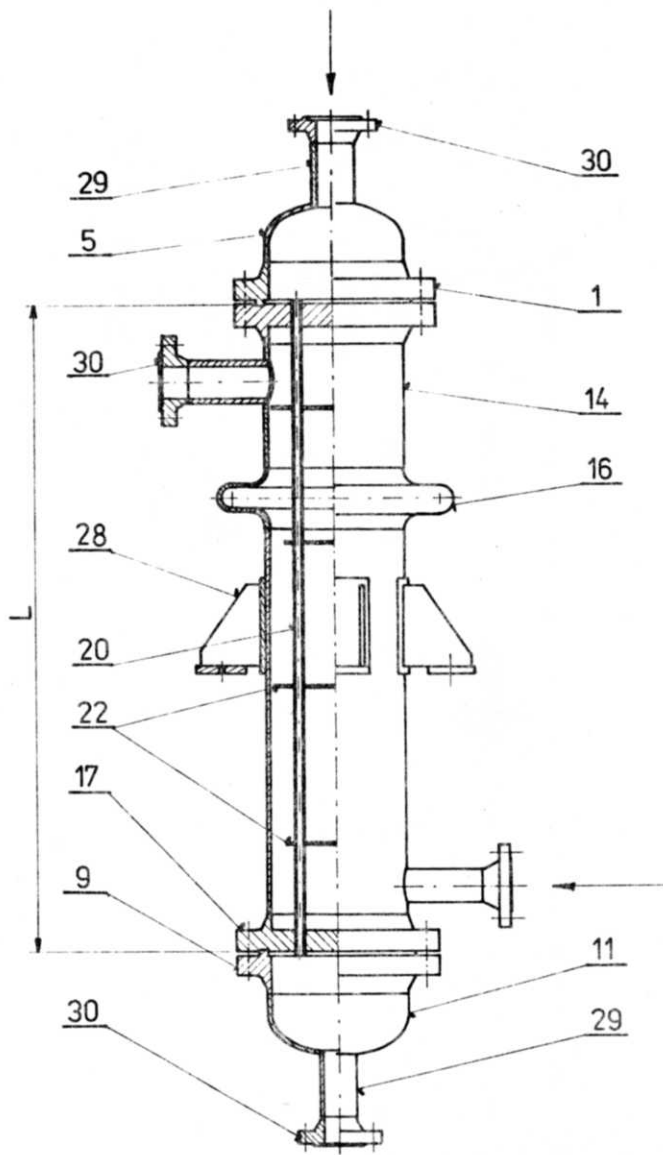


Názvosloví - pokračování

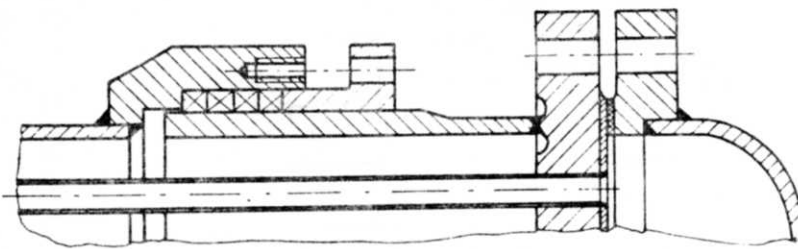
Části chránící proti erozi a nárazům

26 - nárazový plecn

obr. 4.6



obr. 4.7



obr. 4.8

Výměník s U-trubkami

Tento typ má jen jednu trubkovnici, obvykle sevřenou mezi přírubu pláště a přední komory - obr. 4.6. Trubky ohnuté do tvaru U vycházejí a končí v této jediné trubkovnici, výměník je v trubkové prostoru - tedy vždy dvouchodý. Trubky svým volným koncem mohou v plášti volně dilatovat, omezení z hlediska rozdílů teplot pracovních látek nejsou žádné. Konstrukce je vhodná pro nejvyšší tlaky a teploty. Trubky na trubkovnici nemají žádný výztužný účinek, proto její tloušťka vychází největší ze všech uvedených výměníků. Trubkový svazek se obvykle řeší jako demontovatelný z pláště. Tím, že aparát má jen jednu trubkovnici je cenově levnější než výměníky s plovoucí hlavou. Čistitelnost trubkového i mezitrubkového prostoru je však obtížná, co je třeba respektovat při zařazení tohoto typu do technologie.

4.2 Základní konstrukční skupiny a části trubkových výměníků

Trubkové výměníky tepla pozůstávají z několika konstrukčních skupin, ty pak z konstrukčních částí.

Základní konstrukční skupiny jsou:

- přední a zadní komory
- pláště
- trubkové svazky
- části k zvýšení intenzity výměny tepla
- části chránící proti erozi a účinkům proudu pracovních látek
- uložení výměníků
- hrdla s náverky a přírubami
- šrouby, matice, těsnění
- závěsné a jiné pomocné vybavení.

Základní konstrukční části jsou vyznačené pozičními čísly na obr. 4.2 až 4.6. Doporučené názvosloví je uvedené pod obrázky.

4.2.1 Komory výměníků

Komory výměníků jsou konstrukční skupiny, kterými se uzavírá plášť s trubkovým svazkem. Dělí se na přední a zadní.

Přední komora je vždy ta, do které pracovní látka mající procházet trubkovým prostorem vstupuje.

Zadní komora je ta, z které se pracovní látka z trubkového prostoru odvádí nebo se v ní otáčí a vrací zpět do trubek.

U výměníka s U-trubkami funkcí zadní komory mají ohyby trubek, ve kterých se pracovní látka otáčí a vrací do přední komory.

Komory výměníků jsou konstrukčně řešeny různě podle typu a celkové koncepce aparátu. Mohou být samostatnými celky, které se smontují s pláštěm nebo provedeny prodloužením pláště přes trubkovnice. Uzavřeny mohou být dny klenutými, rovnými nebo odnímatelnými víky. Různé může být umístění resp. vyvedení hrdel, přepážkování komory a pod. Charakteristická provedení komor jsou uvedena dále.

Chody ve výměnících

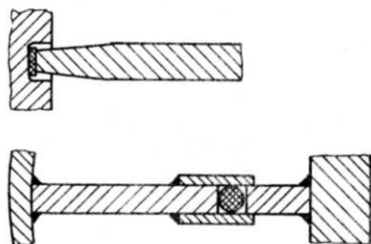
Pod pojmem chod ve výměníku rozumíme chod celého průtočného množství pracovní látky v trubkách v jednom směru. Prochází-li pracovní látka z přední do zadní komory všemi trubkami svazku a ze zadní komory je odváděna ven z aparátu hovoříme o jednochodém výměníku. Výměníky typu trubka v trubce /i při více trubkách v plášti/

jsou vždy jednochodé.

Při výpočtu součinitelů přestupu tepla na vnitřní či vnější straně trubek vycházíme vždy z určité výpočtové rychlosti proudění pracovních látek v trubkách nebo mezi nimi. Je zřejmé, že při uvažované teplosměnné ploše by požadavek na dosažení výpočtové rychlosti v trubkách mohl vést často k maslému počtu trubek značné délky. Aby v těchto případech stavební délka trubkového svazku vyšla reálná, zavedeme v přední komoře pracovní látku jen do určité části z celkového počtu trubek, v zadní komoře proud otočíme, další částí trubek vedeme zpět atd. Pracovní látka může takto projít svazkem vícekrát. Takové uspořádání toku nazýváme vícechodé a zařízení tohoto typu vícechodé výměníky.

Výměníky s pevnými trubkovicami a plovoucí hlavou mohou být realizovány jako jednochodé i vícechodé. Výměník s U-trubkami, pokud není uzpůsoben jinak, je vždy dvouchodý.

Požadavek na vícechodé uspořádání toku trubkami svazku se řeší vhodným umístěním přepážek do přední a zadní komory. Tím se vymezí sekce trubek pro jednotlivé chody. Výměníky se dělají ponejvíce osmichodé. Přepážky v komorách musí zabezpečit těsné oddělení jednotlivých chodů. Jsou proto do komory obvykle vevařené a vůči víku komory a trubkovicí těsněné. S vícechodým uspořádáním toku uvnitř trubek souvisí jejich rozdělení po ploše trubkovnice. Prostor pro vytvoření drážek k uložení těsnění na čele trubkovnice se řeší vynecháním určité řady trubek ze souvislého pole trubek jak bude uvedeno dále. Příklady utěsnění přepážek jsou na obr.4.9.



Hrdla pro přívod resp. odvod pracovní látky se osazují zpravidla do mezipláště komory. Obvykle se tím umožní otevření výměníka bez nutnosti demontáže potrubí. V zásadě však mohou být hrdla umístěna i ve dnách komor.

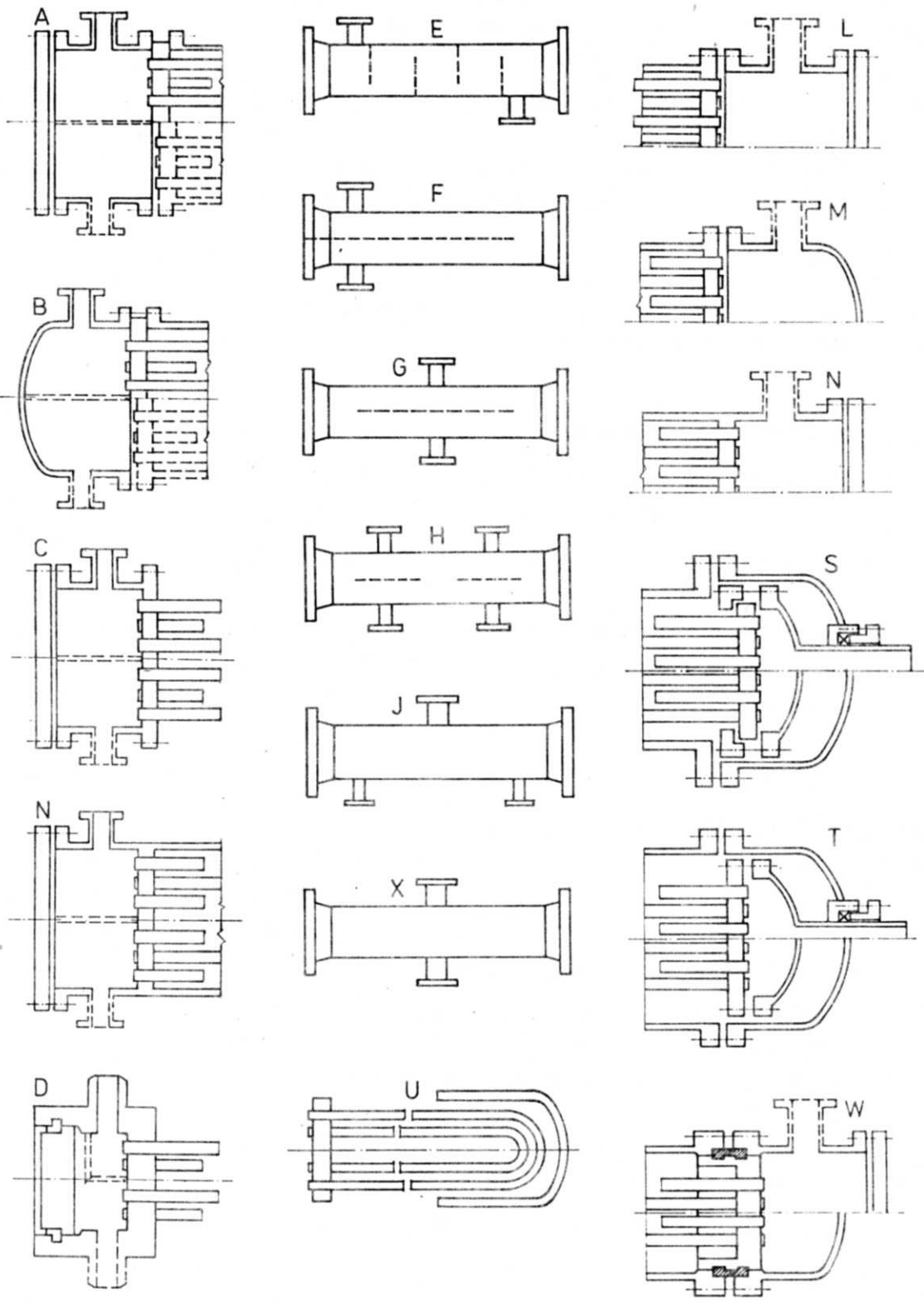
Obr. 4.9

4.2.2 Pláště výměníků

Pláště výměníků jsou válce zhotovené z bezešvých trubek /do průměru 500 mm/ nebo z plechových lubů. Na obou koncích jsou opatřeny přírubami /u typu U přírubou a dnem/ pro spojení s ostatními konstrukčními skupinami aparátů. Řešení je dáno typem výměníka a dalšími technickými požadavky.

Z hlediska toku pracovní látky v mezitrubkovém prostoru uvažujeme v pláštích jen provedení jednochodé nebo dvouchodé. Uspořádáním přepážek můžeme dosáhnout různého dělení toku.

Charakteristická provedení komor a plášťů výměníků tepla jsou přehledně naznačeny na obr. 4.10, ze kterého je vidět šíři variability konstrukčního řešení pro zadané pracovní podmínky. Ze stručného komentáře k jednotlivým typům komor a plášťů je zřejmé, že některé provedení jsou přednostní, jiná se volí jen v technicky zdůvodněných případech.



obr. 4.10

Charakteristická provedení komor

Přední komory

- Typ A : Komora s odnímatelným víkem, demontovatelná z pláště. Hrdla umístěna v meziplášti. Používá se přednostně.
- Typ B : Komora s přivařeným klenutým dnem, demontovatelná z pláště. Hrdla v meziplášti, případně ve dně.
- Typ C : Komora s odnímatelným víkem pevně spojená s trubkovicí. Možnost vyjmutí trubkového svazku. Použití jen v technicky zdůvodněných případech.
- Typ N : Komora s odnímatelným víkem, pevně spojená s trubkovicí a pláštěm. Trubkový svazek se nedá vyjmout. Použití jen v technicky zdůvodněných případech.
- Typ D : Speciální komora pro vysoké tlaky. Vložené víko je jištěno kroužkem a těsněné ucpávkou se samotěsnícím účinkem.

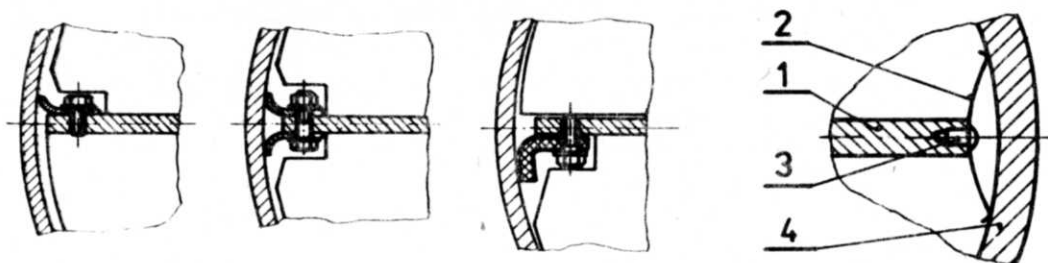
Zadní komory

- Typ I : Provedení jako přední komora typu A a pro výměník s pevnými trubkovicemi.
- Typ M : Provedení jako přední komora typu B a pro výměník s pevnými trubkovicemi.
- Typ N : Provedení jako přední komora typu N.
- Typ S : Komora pro normální nebo protaženou plovoucí hlavu s dvoudílným kroužkem /protipřírubou/. Přednostně se používá normální plovoucí hlava.
- Typ T : Komora pro normální nebo protaženou plovoucí hlavu bez dvoudílného kroužku.
- Typ U : Komora pro svazek s U-trubkami. Tvoří ji obvykle klenuté dno přivařené k plášti.
- Typ W : Komora pro plovoucí trubkovicí utěsněnou vnějším těsněním. Opatřena je buď odnímatelným víkem /typ A/ nebo přivařeným klenutým dnem /typ B/.

Charakteristická provedení plášťů

- Typ E : Jednoduché uspořádání v mezitrubkovém prostoru bez přepážek případně s přepážkami. Hrdla se umísťují co nejbližší k okrajům pláště. Přednostní řešení!
- Typ F : Dvouchodé uspořádání toku v mezitrubkovém prostoru. Podélná přepážka musí být vůči plášti dokonale utěsněna - obr. 4.11.
- Typ G : Dvouchodé uspořádání s jedním děleným tokem. Hrdla co nejbližší k okraji pláště. Použití jen v technicky zdůvodněných případech.
- Typ H : Dvouchodé uspořádání se dvěma dělenými toky. Použití jen v technicky zdůvodněných případech
- Typ J : Jednoduché uspořádání s jedním děleným tokem. Jen v technicky zdůvodněných případech.
- Typ X : Uspořádání pro tzv. křížový tok. Použití jen v tech. zdůvodněných případech.

U plášťů vyrobených z bezešvých nebo podélně svařovaných trubek se za řídicí průměr pláště bere průměr vnější. U plášťů z plechových lubů je řídicím vnitřní průměr.



- 1 - podélná přepážka 2 - pružná těsnicí lišta
3 - rýhovaný hřeb 4 - plášť výměníka

Obr. 4.11

V následujících tabulkách jsou pro orientaci uvedené doporučené dimenze vybraných konstrukčních částí komor a plášťů trubkových výměníků. Všechny rozměry v tabulkách jsou v mm.

Tab. 4.1 Minimální tloušťky přepážek chodů

Průměr pláště	Uhlíková a nízkoleg. ocel	Nerez. mat.
do 426	6	6
457 až 650	10	8
700 až 1000	12	10
1000 až 1500	14	12

Tab. 4.2 Průměry plášťů výměníků trubka v trubce

DN trubky	Průměr pláště	DN trubky	Průměr pláště
50	57	100	108
65	76	125	133
80	89	150	159

Tab. 4.3 Tloušťky plášťů výměníků trubka v trubce

Průměr pláště	Max.tloušťka pláště		Průměr pláště	Max.tloušťka pláště	
	Z uhlíkové a nízkoleg. oceli	Z nerez. materiálu		Z uhlíkové a nízkoleg. oceli	Z nerez. materiálu
67	3,2	2,5	108	5,0	4
76	3,6	3	133	5,6	5
89	4	3,5	159	6,3	5,5

Tab. 4.4 Průměry plášťů pro výměníky se svazkem trubek

Pláště z trubek		Pláště z plechových lubů	
DN trubky	Průměr pláště	Průměr pláště	
200	219	550	950
250	273	600	1000
300	324	650	1100
350	377, 356	700	1200
400	406, 426	750	1300
450	457	800	1400
500	508, 530	850	1500
		900	

Tab. 4.5 Maximální tloušťky stěn plášťů vyrobených z hladkých bezešvých trubek z materiálů uhlíkové nebo nízkolegované ocele

Průměr pláště	Max. tl. pláště	Průměr pláště	Max. tl. pláště
219	9	377	14
273	10	406	14
324	12,5	457	14
356	12,5	508	14

Tab. 4.6 Maximální tloušťky stěn plášťů vyrobených z podélně svařovaných trubek z nerezových materiálů

Průměr pláště	Tloušťka pláště	Průměr pláště	Tloušťka pláště
219	7	377	11
273	8	426	12
324	10	530	15
356	10		

4.2.3 Trubkové svazky výměníků

Další základní konstrukční skupinou výměníků tepla jsou trubkové svazky. Sesta ve trubkového svazku pozůstává z trubek, trubkovic a přepážkového systému. Charakterem vzájemného spojení jednotlivých konstrukčních částí jde o nerozebíratelný celek tvořící vestavbu aparátu.

Podle typu výměníka a provedení zadní komory mohou být trubkové svazky

- vyjímatelné z pláště výměníka: jsou to trubkové svazky s plovoucí hlavou resp. plovoucí trubkovicí a svazky s U-trubkami,
- nevyjímatelné t.j. pevně spojené s pláštěm, jako je tomu u výměníka s pevnými trubkovicemi.

Průměr trubkového svazku

Pod pojmem průměr trubkového svazku se rozumí průměr kružnice opsané všem trubkám svazku. Závisí od vnitřního průměru pláště a u výměníků s plovoucí hlavou od typu zadní komory. Průměry svazků jsou pro informaci uvedené v tab. 4.7 a 4.8.

Tab. 4.7 Průměry trubkových svazků při provedení se zadní komorou typu S

Průměr pláště	Průměr svazku	Průměr pláště	Průměr svazku
219	166	700	657
273	217	750	707
324	263	800	757
256	297	850	807
377	318	900	857
406	349	950	907
426	396	1000	957
457	396	1100	1051
508	447	1200	1151
530	469	1300	1251
550	515	1400	1351
600	565	1500	1451
650	607		

Tab. 4.8 Průměry trubkových svazků při provedení se zadními komorami typu L,M,N,U,W

Průměr pláště	Průměr svazku	Průměr pláště	Průměr svazku
219	186	700	682
273	238	750	730
324	284	800	780
356	318	850	830
377	330	900	880
406	370	950	930
426	390	1000	980
457	417	1100	1080
508	468	1200	1180
530	490	1300	1280
550	532	1400	1380
600	582	1500	1480
650	632		

Konstrukční délka trubkových svazků

Pod konstrukční délkou trubkových svazků s dvěma trubkovicemi rozumíme vzdálenost čel trubkovic od sebe. U výměníků s U-trubkami se za konstrukční délku bere jen délka rovné části trubek /po ohyb/. Na obr. 4.3, 4.4, 4.6 resp. 4.7 je tato hodnota zakótovaná a označená písmenem L. Délka trubkového svazku by měla být 5 až 10-ti násobkem průměru výměníka.

Doporučované hodnoty konstrukčních délek svazků jsou:
 výměníky se svazky trubek: 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000 a 9000 mm,
 výměníky trubka v trubce : 1500, 3000, 4500, 6000 a 7500 mm.

Trubky

Trubky jsou základním funkčním elementem výměníků. Vzhledem k malé tloušťce stěny oproti jiným konstrukčním částem aparátu jsou prvkem nejchoulostivějším z hlediska trvanlivosti při korozi a taky při jiných namáháních jako např. kmitání /únavu materiálu/. Průměrem trubek a hustotou jejich uspořádání v trubkovém svazku je určovaná teplosměnná plocha na jednotku délky svazku a tím využití objemu pláště výměníka. Volbu průměrů trubek určují samozřejmě také látkové vlastnosti a stav pracovních látek /plyny, kapaliny/.

Co do tloušťky stěny musí trubky vyhovovat požadavkům pevnosti a stability. Ohled na korozi se bere přídatkem k tloušťce. Respektovat se musí také technologická hlediska, v tomto případě provedení spojení trubky s trubkovnicí.

Pro standartní případy trubkových výměníků se na stavbu svazků používají hladké bezešvé trubky z materiálů:

- uhlíkové a nízkolegované ocele tř. 11, 12 případně 16
- nerezové ocele tř. 17
- hliník a jeho slitiny
- měď a její slitiny.

Doporučené průměry trubek /vnější/ pro trubkové svazky jsou uvedeny v tab.4.9. U výměníků typu trubka v trubce může být průměr vnitřní trubky max. 76 mm.

Tab. 4.9 Vnější průměry trubek pro svazky výměníků

Vnější průměr trubky /doporučované průměry trubky/	Vnější průměr trubky /lze použít jen v techn.zdůvodněných případech/
10	28
12	30
14	32
16	38
20	44,5
22	50
25	51

Uspořádání trubek v trubkovnici

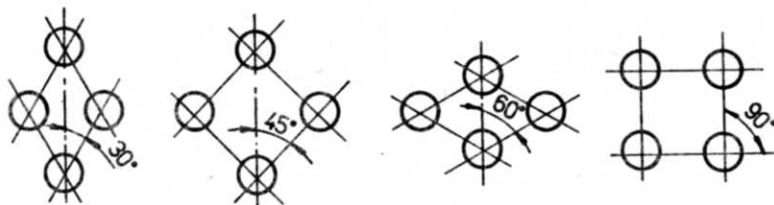
Geometrie rozmístění trubek ve svazku je obvykle dána více okolnostmi, které je třeba komplexně zvážit. Hlavní z nich je dosáhnout v mezitrubkovém prostoru takové poměry proudění, aby intenzita výměny tepla byla co největší.

Zásadně se používá dvojího uspořádání:

- do rovnostranného trojúhelníka
- do čtverce.

Trubky mohou být přitom uspořádány tak, že spojnice jejich os budou svírat se svislou osou trubkového svazku úhel: 30° , 45° , 60° nebo 90° - obr. 4.12.

Orientace na svislou osu trubkového svazku bereme z toho důvodu, že v tomto směru předpokládáme převládající směr proudění pracovní látky v mezitrubkovém prostoru při použití standartních segmentových přepážkových systémů. Ze tohoto tzv. příčné- ho obtékání svazku se přednostně používá geometrie s úhlem 30° nebo 45° . Při podélném obtékání trubek svazku může být použita libovolná geometrie uspořádání.



Obr. 4.12

Další okolností, která někdy rozhoduje o rozmístění trubek v trubkovnici je požadavek na čistitelnost mezitrubkového prostoru. V tom případě se volí uspořádání s úhlem 45° nebo 90° a navrhne se také vhodný větší rozstup trubek.

Geometrie rovnostranného trojúhelníka umožňuje nejhustější uspořádání trubek ve svazku a tím nejlepší využití plochy trubkovnice.

Rozteč trubek

Pokud tomu nebrání jiné okolnosti /požadavek na čistitelnost vnějšku trubek, typ spoje trubky s trubkovnicí a pod./ snažíme se trubky ve svazku umístit co nejbliže k sobě, aby se racionálně využila plocha trubkovnice a objem aparátu. Podle konstrukčních zvyklostí se rozteč trubek volí přibližně jako 1,25 násobek vnějšího průměru trubky. Minimálně přípustné rozteče jsou uvedeny v tab. 4.10.

Tab. 4.10 Minimální dovolená rozteč trubek
/rozměry v mm/

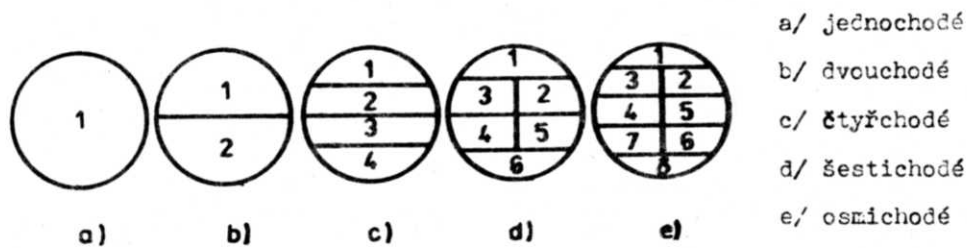
Vnější průměr trubek	Rozteč trubek	Vnější průměr trubek	Rozteč trubek
10	13,5	28	35
12	15,5	30	38
14	19	32	41,5
16	21	38	48
20	26	44,5	55
22	29	50	62,5
25	32	51	64

Pokud se vyžaduje možnost mechanického čištění mezitrubkového prostoru je potřeba volit rozteč trubek tak, aby mezera mezi povrchem trubek ve svazku byla aspoň 6,5 mm.

Za maximální hodnotu rozteče trubek se považuje 1,5 násobek průměru trubky.

Rozdělení trubek do chodů

Jak jsme již uvedli v předcházející části, pro dosažení potřebné rychlosti pracovní látky v trubkách se výměník často řeší jako vícechodý. Trubky se vhodným umístěním přepážek v přední a zadní komoře rozdělí na sekce o stejném počtu trubek v jednom chodu. Základní způsoby rozdělení trubek do chodů a umístění přepážek je uvedeno na obr. 4.13, kde případy a/ až e/ znamenají uspořádání:



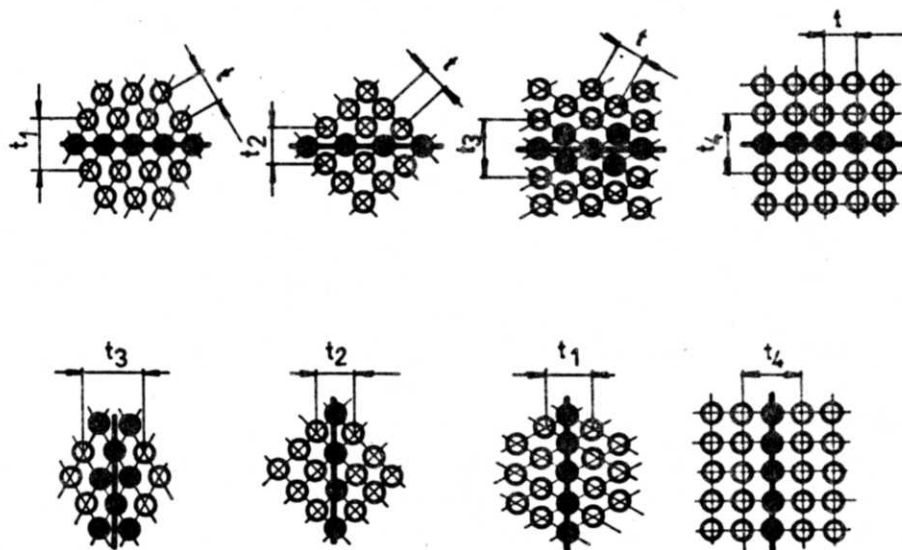
Obr. 4.13

Pro daný průměr výměníka se doporučuje maximální počet chodů podle tab.4.11. V jednom chodu nesmí být méně než 8 trubek.

Tab. 4.11 Maximální počet chodů pro daný průměr výměníka

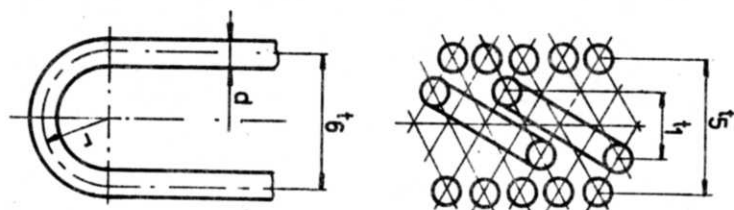
Průměr výměníku / mm /	Max. počet chodů
do 377	2
406 až 508	4
550 až 800	6
850 až 1500	8

Vytvoření plochy pro těsnění komorových přepážek vůči trubkovnici se řeší vynecháním vodorovné nebo svislé řady trubek v trubkovém poli. Podle geometrie a úhlu uspořádání se někdy musí vynechat i přilehlé řady trubek. Na obr. 4.14 jsou naznačeny způsoby vynechání svislé nebo vodorovné řady trubek. Vynechané trubky jsou označené plným černým kroužkem.



Obr. 4.14

U svazků s U-trubkami, které jsou vždy dvouchodé, může dojít k případu, že minimálně přípustná rozteč t_6 bude větší než rozteč t_1 , která vyplývá z vybraní řady trubek. Uspořádání trubek za těchto podmínek je ukázáno na obr. 4.15.



Obr. 4.15

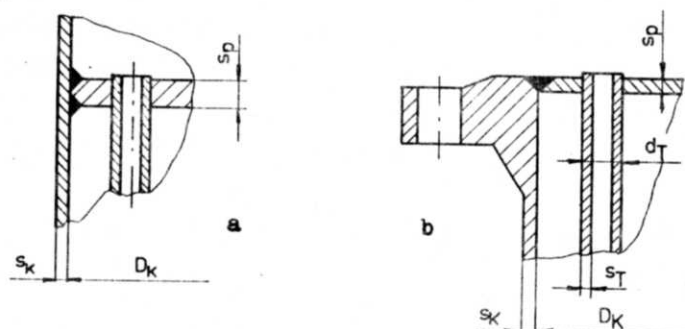
Poznámka: minimální poloměr ohybu U-trubek r podle obr. 4.15 je:
 2,5 násobek vnitřního průměru trubky z uhlíkových ocelí
 3,5 násobek pro trubky z nerezových ocelí

Trubkovnice

Trubkovnice jsou kruhové desky, ve kterých jsou upevněny konce trubek svazku a které spolu s trubkami dělí vnitřní prostor výměníka na trubkový a mezitrubkový. Podle typu předních a zadních komor, tedy z hlediska spojení trubkovnice s pláštěm a komorami můžeme vyčlenit tyto konstrukční případy:

- trubkovnice vevařené do pláště nebo příruby pláště
- trubkovnice k plášti přivařené
- trubkovnice sevřené mezi příruby komory a pláště
- trubkovnice plovoucí.

Jednotlivé případy a jejich použití jsou zřejmé z obr. 4.10. Proto některá řešení ní jen stručně komentujeme v souvislosti s jejich aplikací ve stavbě jednotlivých typů výměníků. Rozměry zakótované na obrázcích jsou pak potřebné pro pevnostní výpočty, které jsou obsahem části 4.3 - dimenzování konstrukčních částí výměníků tepla.



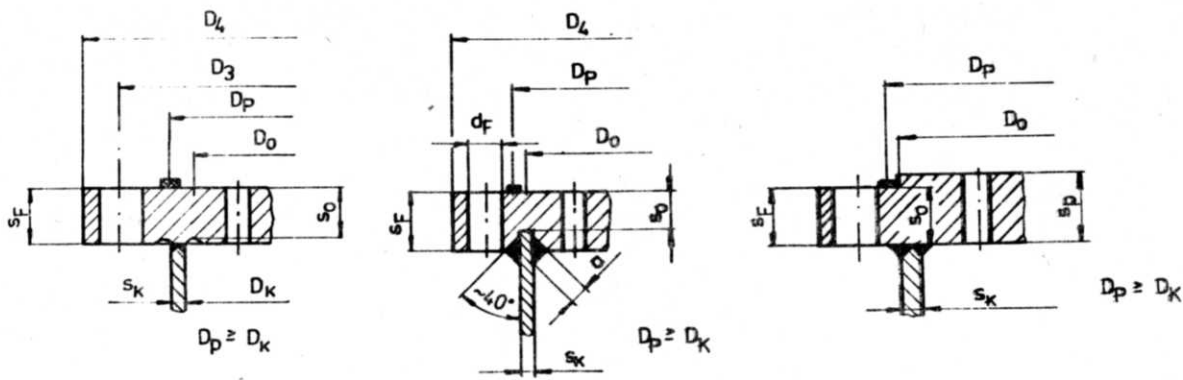
Obr. 4.16

Vevaření trubkovnice do pláště - obr. 4.16a nebo do příruby pláště - obr. 4.16b je typické pro výměníky s pevnými trubkovicemi. Jak bude zdůvodněno v části 4.3 vychází v tomto případě tloušťka trubkovnice relativně malá. Zatížení od utažení spoje pláště

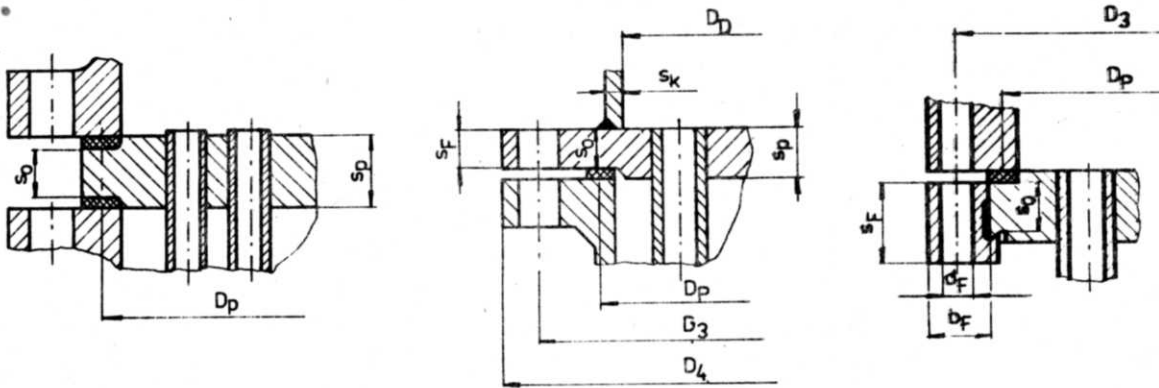
s komorou přenáší v plné míře příslušně dimenzovaná příruba pláště.

Přivaření trubkovnice k plášti je znázorněno na obr. 4.17. V tomto případě dostatečně silnou desku trubkovnice na okraji využijeme a provedeme jako protipřírubu pro připojení komory. Kromě namáhání od tlaku v trubkovém či mezitrubkovém prostoru je do trubkovnice zenášeno též ohybové namáhání od utažení přírubového spoje, na které musí být tato dimenzovaná. Nebezpečný průřez, který je nutné z pevnostního hlediska kontrolovat je v tloušťce s_0 .

Trubkovnice sevřené mezi příruby pláště a komor - obr. 4.18 a 4.19 jsou řešením pro výměníky s plovoucí hlavou a U-trubkami, kde trubkový svazek je v naprosté většině případů navrhován jako vyjímatelný z pláště. Na obr. 4.19 je naznačený případ, kdy na trubkovnici je přímo přivařen meziplášť nebo dno zadní komory.



Obr. 4.17



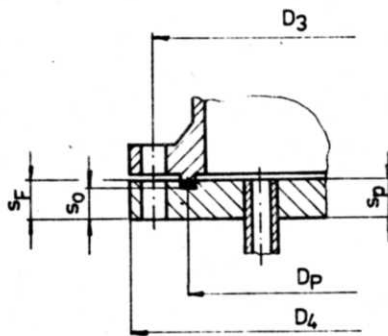
Obr.4.18

Obr.4.19

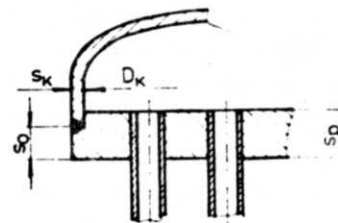
Obr.4.20

Spojení sevřením trubkovnice mezi příruba se používá taky v konstrukci plovoucích hlav - obr. 4.20. Trubkovnice plovoucí hlavy je z jedné strany sevřená přírubou komory plovoucí hlavy, z druhé pak radiálně dělenou přírubou /z důvodu montáže/, která je proti vysmeknutí osazená na kuželové ploše provedené na okraji trubkovnice tzv. zámku.

Z dalších možných řešení je na obr. 4.21 plovoucí trubkovnice provedená jako protipříruba komory plovoucí hlavy a na obr. 4.22 s přímo přivařeným dnem.

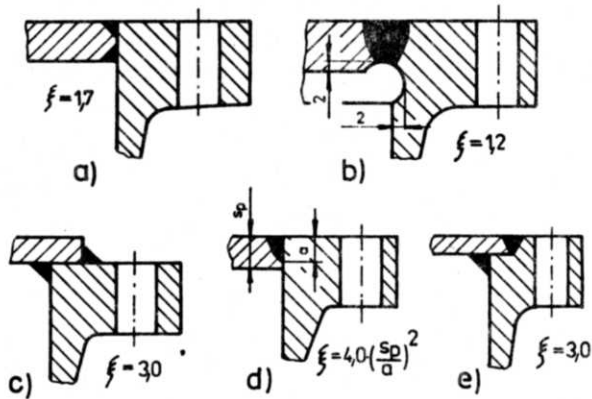


Obr.4.21



Obr.4.22

Vhodné provedení svarových spojů v případech vevaření trubkovnice do pláště nebo příruby a přivaření trubkovnice k plášti je velmi důležité. Nabízí se celá řada řešení, ne všechny jsou však co do kvality svarového spoje rovnocenné. Tato skutečnost je u jednotlivých možností uvedených na obr. 4.23 a 4.24 vyjádřena součinitelem ξ , který charakterizuje kvalitu spoje z hlediska přenosu napětí mezi trubkovnicí a pláštěm. Se součinitelem ξ se uvažuje ve výpočtech výměníků s pevnými trubkavicemi na nízkocyklovou únavu. Čím je hodnota ξ nižší, tím je spoj dokonalejší.

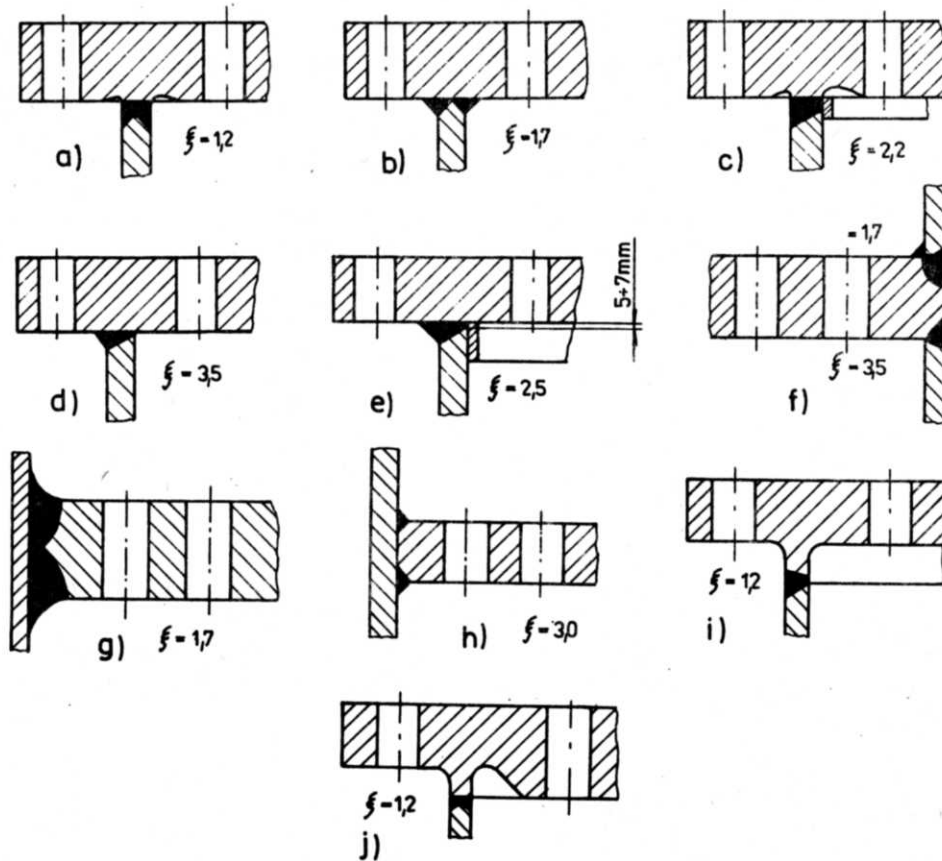


Obr. 4.23

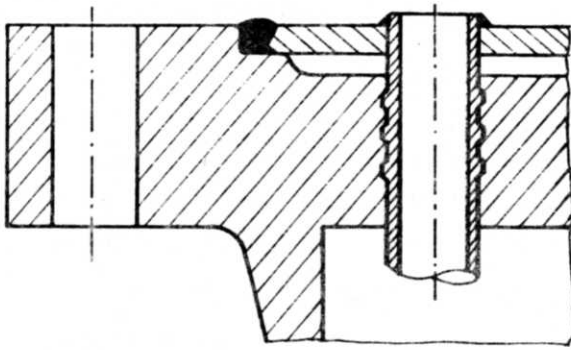
Dvojitá trubkovnice

V případě mimořádných požadavků na těsnost spojení trubek s trubkovnicí, jako je tomu např. u výměníků používaných v jaderné technice avšak i u některých chemických technologií se trubkovnice řeší jeho dvojitá - obr. 4.25. Trubka je zaválcovaná do základní trubkovnice a přivařena k trubkovnici pomocné. Materiál pomocné trubkovnice a trubek může být např. tř. 17, čím se současně řeší otázka korozní odolnosti

trubkového prostoru. Prostor mezi základní a pomocnou trubkovnicí je pak napojen na systém detekce úniku pracovní látky při netěsnostech spojů trubek s trubkovnicemi, který signalizuje poruchu.



Obr. 4.24



Obr. 4.25

Těsné a pevné spojení trubek s trubkovicí patří k základům spolehlivé funkce trubkových aparátů. Pokud hovoříme o těsnosti a pevnosti spojení, máme na mysli skutečně dvě samostatné funkce, které musí konstrukcí a technologií zabezpečené. Těsnost spoje je vyžadovaná z principu činnosti výměníka, těsného oddělení pracovních látek. Požadovaná pevnost spoje vyplývá ze skutečnosti, že

spoj je technicky nemáhaný zatížením od tlaku v pracovních prostorech výměníka a případně nevykompenzovaných teplotních napětí.

Spolehlivé spojení trubek s trubkovicemi se realizuje těmito způsoby:

- zaválcováním
- přivařením
- kombinací zaválcování a přivaření.

Zaválcované spoje

Podstata zaválcování spočívá ve vytvoření deformačního /svěrného/ spoje trubky s trubkovicí. Trubka zasunutá s malou vůlí do otvoru v trubkovicí je vhodným nástrojem radiálně po obvodě plasticky deformována až se vůle vymezí a okraj otvoru v trubkovicí se pružně deformuje. Pro kvalitu spoje je důležité, aby trubka byla splastizována v celém průřezu rovnoměrně. V trubkovicí se připouštějí pouze pružné deformace. Aby se toho dosáhlo /kromě pečlivého provedení zaválcování/ doporučuje se volit pro trubkovicí vždy materiál s vyšší hodnotou meze kluzu než má materiál trubek. Proces zaválcování a kvalitu spoje určují dvě veličiny - velikost zaválcovací síly a tzv. stupeň zaválcování.

Stupeň zaválcování, jako měřitelná hodnota, vyjadřuje poměrné zeslabení stěny trubky v důsledku radiálního přetvoření. Je vyjádřen vztahem:

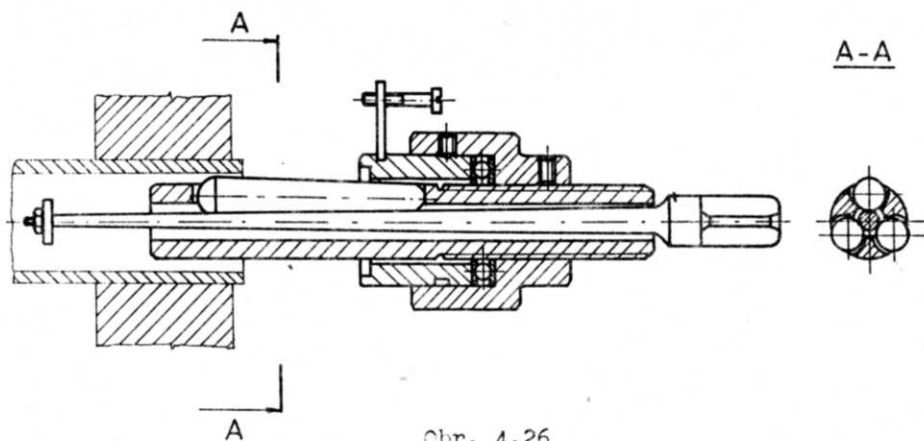
$$K = \frac{(d-d_1) - (d'-d'_1)}{(d-d_1)} \cdot 100 \quad \%$$

kde je d - vnější průměr trubky před zaválcováním
 d_1 - vnitřní průměr trubky před zaválcováním
 d' - průměr otvoru v trubkovicí
 d'_1 - vnitřní průměr trubky po zaválcování.

Optimální hodnota stupně zaválcování pro různé průměry trubek byla stanovena ze zkušeností a má informativní charakter. Nemíjí proto možné považovat za jednoznačný ukazatel kvality spoje. Orientační hodnoty stupně zaválcování pro různé průměry trubek jsou:

trubky do průměru 24 mm	:	$K = 6 \div 7 \%$
do průměru 28 mm	:	$K = 7 \div 8 \%$
do průměru 38 mm	:	$K = 8 \div 9 \%$

Zaválcování se provádí zaválcovacím přípravkem, kterého podstata je znázorněná na obr. 4.26.



Obr. 4.26

Přípravek pozůstává ze štíhlého kuželovitého středového trnu a klece s válcovacími tělesy též kuželovitého tvaru. Osovým tlakem na středový trn za jeho současného otáčení se válcovací tělesa rozestoupí až v trubce dosednou na její vnitřní povrch. Odvalováním po něm při postupně vzrůstající osové síle na středový trn tu dochází k rozválcování trubky zasunuté v otvoru trubkovnice. Po splastizování a dosednutí trubky na povrch otvoru začne se pružně deformovat jeho okolí. V tomto stadiu se musí proces zválcování vést tak, aby radiální napětí na ploše otvoru nepřekročilo mez kluzu materiálu trubkovnice, t.j. aby po zválcování byly splněny předpoklady pro dosažení svěrného spoje. To se v praxi dosahuje kontrolou kroutícího momentu potřebného na pohon středového trnu válcovacího přípravku. Pohony přípravků /elektrické, pneumatické/ jsou vybaveny tak, že při překročení kroutícího momentu nastaveného podle materiálu trubek a trubkovnice se pohon automaticky vypne. Hodnoty potřebných momentů jsou získané empiricky. Pro ocele s mezí kluzu 240 až 300 MPa se optimální hodnota kroutícího momentu pohybuje v rozpětí od 7,5 Nm pro trubky 14 x 2 až po 175 Nm pro trubky 44,5 x 3,5 mm. Podrobnější údaje obsahuje např. ČSN 69 6810.

Podle úpravy otvoru v trubkovnici se zválcované spoje realizují následujícími způsoby - obr. 4.27:

a/ zválcováním do hladkých otvorů - obr. 4.27a.

Tento typ spoje je vhodný pro nižší tlaky, max. do 3 MPa, za předpokladu dodržení optimálního režimu zválcování.

b/ zválcováním do otvorů s hřebínkem - obr. 4.27b.

Spoj je vhodný pro trubky s malou tloušťkou stěny /do 1 mm/. Hřebínek vytvořený v otvoru trubkovnice pozůstává z pěti až sedmi plytkých obvodových drážek.

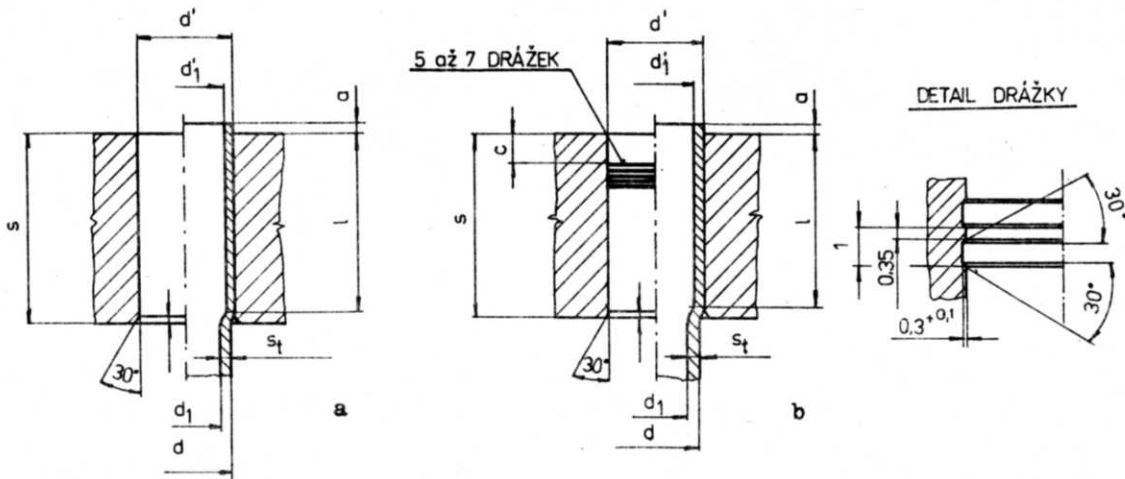
c/ zválcováním do otvorů s drážkami - obr. 4.27c.

Je to nejběžnější způsob spojení trubek s trubkovnicemi, vhodný pro nejvyšší tlaky a teploty. Podle délky zválcované části trubky a jejího průměru se v otvoru vytvoří jedna až dvě drážky o šířce 3 až 6 mm a hloubce 0,5 až 0,7 mm.

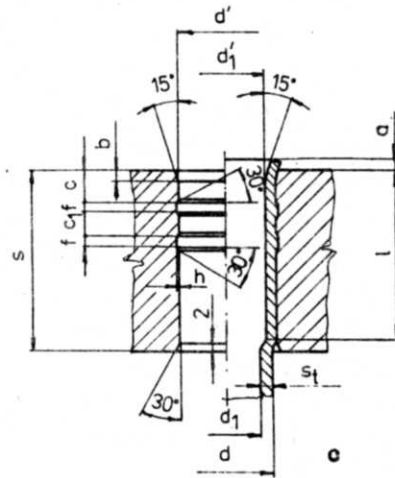
Po zválcování se přechýlávající konce trubek obvykle ještě rozlezují, čím se dále zvýší pevnost a těsnost spoje.

Pod délkou zválcování se rozumí délka trubky ve spoji plasticky deformovaná. Pro spolehlivé spojení se délka zválcování doporučuje brát jako nejmenší z hodnot :

$$l = \min \left\{ (1,5 \div 2) d ; 40 \div 45 \text{ mm} ; \begin{array}{l} \text{tloušťka trubkovnice} \\ \text{minus 3 mm} \end{array} \right\}$$



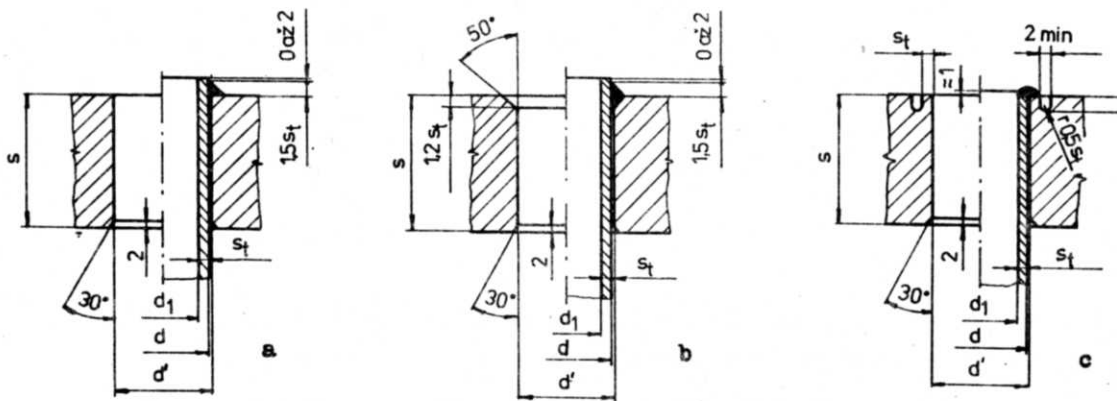
Nejmenší přípustná délka zaválcování je 10 mm, největší 45 mm. Pokud má trubkovnice tloušťku větší než 45 mm udělá se otvor ve zbytku délky o větším průměru.



Obr. 4.27

Svařované spoje

U tohoto typu spoje se trubka k trubkovnici přivaří koutovým, čelním nebo speciálním sverem. Svařované spoje se používají tehdy jestliže zaválcování nemůže



Obr. 4.28

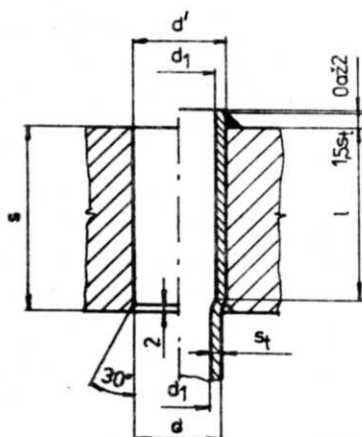
zabezpečit spolehlivou těsnost spoje. Pro teploty nad $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ se trubky do trubkovnice vždy přivařují a to i tehdy byly-li předtím zaválcovány. Při uvedených teplotách by totiž postupně došlo k zániku pružné složky napětí ve spoji, čím by tento ztratil těsnost. Nejběžněji se používají následující způsoby přivaření trubek k trubkovnici:

- a/ vnějším koutovým svarem pro trubky o tloušťce stěny 3 až 4 mm - obr. 4.28a,
- b/ kombinovaným 1/2 V swarem a koutovým swarem u trubek o tloušťce stěny 4 mm a větší - obr. 4.28b,
- c/ čelním swarem s odlehčovací drážkou v trubkovnici pro trubky o tloušťce stěny do 3 mm - obr. 4.28c. Tento spoj se vyznačuje vysokou spolehlivostí. Drážkou se vytvoří z materiálu trubkovnice krček, který je přibližně stejně pružný jako trubka. Při svařování nevznikají studené spoje a svařky v důsledku spojení pružných prvků nepraskají. Spojení trubek s trubkovnicemi ze slitin hliníku je možné jedině tímto způsobem.

Svařování se provádí ručně nebo poloautomatem, zásadně v ochranné atmosféře argonu wolframovou elektrodou /WIG/. Při zavařování nerezových trubek do plátovaných nebo nerezových trubkovnic se nepoužívá přídavný svařovací materiál. Spoj se vytvoří roztavením konce trubky přečnívajícího nad rovinou trubkovnice o cca 2 mm.

Kombinované spoje

Výše uvedené způsoby spojení trubek s trubkovnicemi mají svoje přednosti i nedostatky. Zaválcovaný spoj se vyznačuje vysokou únosností v osovém směru /odolnost vůči vytažení trubky ze spoje/, nemusí však být dostatečně těsný. Svařovaný spoj je těsný, jeho únosnost je však menší. V případech, kdy se vyžaduje současně vysoká pevnost a dokonalá těsnost spoje - co je typické pro zařízení chemického průmyslu - používá se pro spojení trubek s trubkovnicí kombinace zaválcování a přivaření - obr. 4.29.



Obr. 4.29

Trubky se nejprve do trubkovnice zaválcují jen po vymezení vůle v otvorech, potom přivaří a nakonec zaválcují na příslušnou hodnotu stupně zaválcování. Spoje tohoto typu jsou spolehlivé i při dynamickém charakteru namáhání výměníka.

Přepážky v trubkovém svazku

Součástí trubkového svazku je **přepážkový** systém, účelem kterého je usměrnění proudu tekutiny v mezitrubkovém prostoru tak, aby se dosáhla požadovaná intenzita přestupu tepla. Přepážkový systém tvoří soustava

přepážek různého tvaru a polohy vzhledem k trubkám svazku. Volba typu přepážkového systému závisí ve značné míře od toho proudí-li v mezitrubkovém prostoru kapalina, plyn nebo páry.

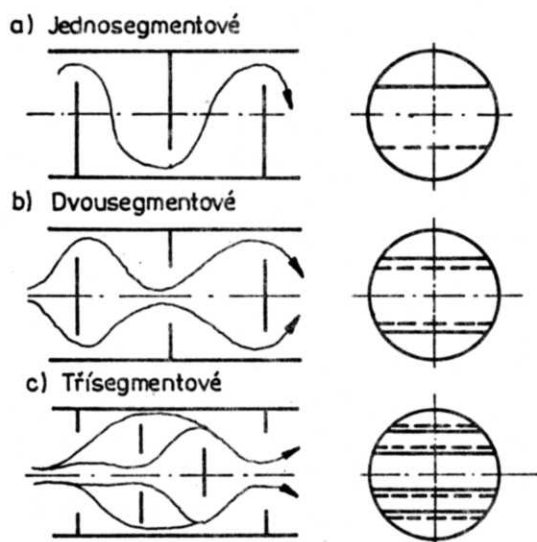
Použití přepážek je nutné, protéká-li mezitrubkovým prostorem kapalina. Přepážkami vytváříme kanál takového průřezu, aby se v prostoru mezi trubkami

dosáhla rychlost toku potřebná pro dosažení očekávané hodnoty součinitele přestupu tepla na vnější straně trubek svazku.

Segmentové přepážky a jejich uspořádání

Z různých typů přepážkových systémů, kterými se má dosáhnout jednochoďový podélný tok kapaliny v mezitrubkovém prostoru je nejpoužívanější systém se segmentovými přepážkami. Přepážky v tomto případě jsou kruhové desky s uříznutým jedním nebo více segmenty. Jsou převlečeny trubkami svazku a orientovány kolmo na trubky v určitých vzdálenostech od sebe.

Segmentové přepážky se dělají v provedení jedno-, dvou- nebo třísegmentovém obr. 4.30.



Obr. 4.30

Přepážky přitom mohou být v systému postaveny tak, že všechna jejich seříznutí budou v poloze vodorovné, svislé nebo šikmé. Přednostně se používá systém jednosegmentových přepážek. Dvou- a třísegmentové přepážky přicházejí do úvahy je ve zvlášť technicky zdůvodněných případech. Tento přepážkový systém, až na oblast pohybu proudu kolem hrany segmentu zabezpečuje příčné obtékání trubek svazku. Pro tento případ jsou k dispozici poměrně spolehlivé vztahy k výpočtu součinitelů přestupu tepla a tlakových ztrát.

Průměr přepážek se navrhuje jen o málo menší než je vnitřní průměr pláště. Vůle mezi přepážkami a pláštěm musí umožnit nenásilné vytažení svazku z pláště. Doporučené mezery

mezi přepážkou a pláštěm v závislosti od průměru pláště jsou uvedeny např. v CN 69 6109.

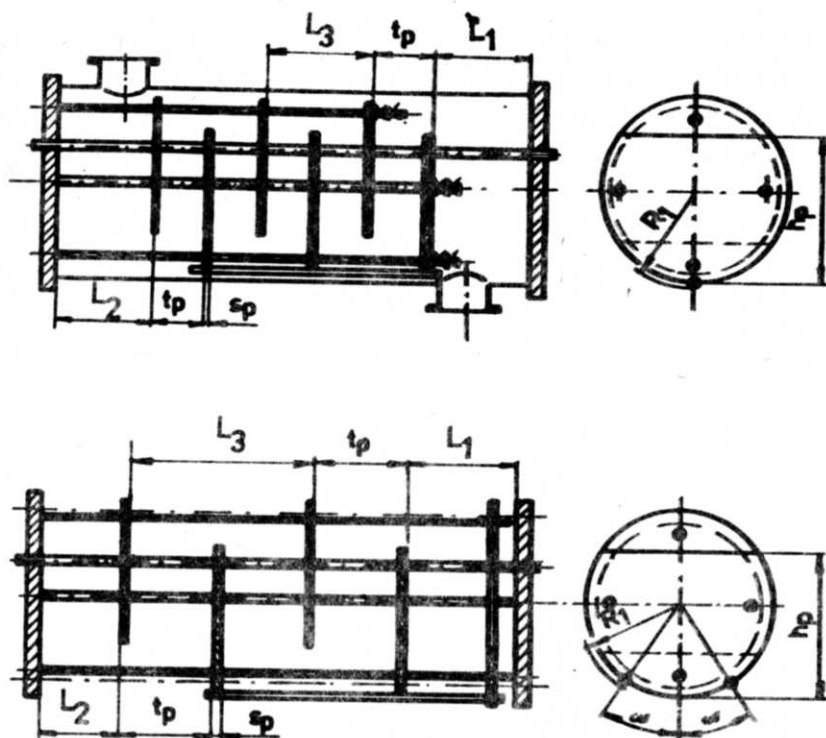
Tloušťka přepážek podle průměru a jejich rozestupu se volí v rozsahu od 4 do 16 mm pro jakékoliv materiály.

Na obr. 4.31 je schematicky znázorněný přepážkový systém s jednosegmentovými přepážkami pro svazek výměníku s pevnými trubkovicemi - obr. 4.31a a pro svazek vyjímatelný z pláště - obr. 4.31b.

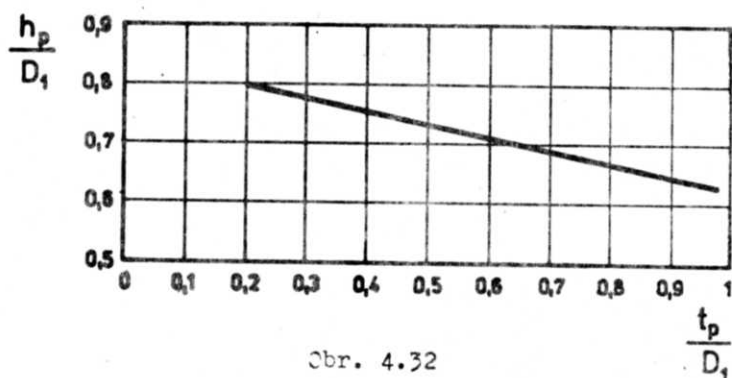
Výška h_p jednosegmentových přepážek a jejich rozstup t_p v trubkovém svazku se volí v závislosti od vnitřního průměru pláště výměníka D_1 podle obr. 4.32.

Jak je z uvedené závislosti zřejmé, výška přepážek se pohybuje v rozsahu $h_p = (0,6 \div 0,8) D_1$ a rozstup v rozsahu $t_p = (0,2 \div 1) D_1$. Hodnoty $t_p = 0,2 D_1$ a $t_p = 1 D_1$ se považují za krajní hodnoty rozstupů. Vzdálenost /rozstup/ přepážek mezi sebou a od trubkovic má být po celé délce trubkového svazku vždy stejná. Neumožňuje-li to umístění hrdel v plášti, připouští se větší vzdálenost mezi první a poslední přepážkou a trubkovicemi /hodnoty L_1 a L_2 na obr. 4.31/.

Rozstup mezi přepážkami se konstrukčně zabezpečuje obvykle pomocí tyčí na jednom konci našroubovaných do trubkovic a rozpěrných trubek. Tyče se umísťují



Obr. 4.31



Obr. 4.32

na okraji trubkového pole obvykle na místo jedné trubky. Jejich počet se pohybuje od 4 do 10 podle průměru pláště. U vyjímání svazků se o část přepážek v dolní části přivařují kluzné tyče případně kladky pro ulehčení vytažení svazku z pláště.

Kromě usměrnění proudu pracovní látky v mezitrubkovém prostoru plní přepážky ještě jednu významnou funkci. Udržují po délce vzájemnou rozteč trubek ve svazku a svým podepřením zkracují tzv. volnou délku trubek z hlediska jejich zatížení osovou tlakovou silou, kdy jsou namáhané na vzpěr. Vzhledem k této funkci musí se při určování rozestupu přepážek brát ohled na dodržení přípustných maximálních hodnot nepodepřené /volné/ délky trubek ve svazku, co představují hodnoty L_1, L_2 resp. L_3 na obr. 4.31. Doporučené hodnoty pro jednotlivé typy výměníků jsou uvedené např. v ON 69 6109.

U výměníků s U-trubkami má být poslední přepážka / t.j. přepážka nejbliže ohybům trubek/ umístěna tak, aby pro každý ohyb trubek součet průměru ohybu a rovné části trubky od přepážky k ohybu nepřekročil určitou maximální hodnotu. Doporučení obsahuje ON 69 6109.

Ze určitých podmínek proudění v mezitrubkovém prostoru může v důsledku dynamických účinků proudu na trubky dojít k jejich rozkmitání. Krozí-li toto nebezpečí snažíme se trubky přepážkami podepřít v co nejmenších vzdálenostech. Rozestup

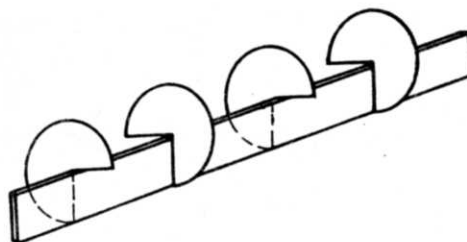
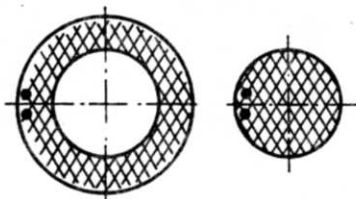
přepážek je pak dán přípustnou tlakovou ztrátou v mezitrubkovém prostoru. O dalších opatřeních k zamezení kmitání trubek bude pojednané dále.

Otvory pro trubky v přepážkách se dělají o průměru větším o 0,4 až 0,8 mm jako je průměr trubek a to závisle od průměru trubek. Předpokládají-li se projevy kmitání, pak se otvory dělají menší.

Jiné přepážkové systémy

V praxi se používají i jiné typy přepážkových systémů. Pro informaci uvedme aspoň některé.

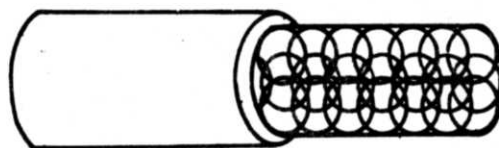
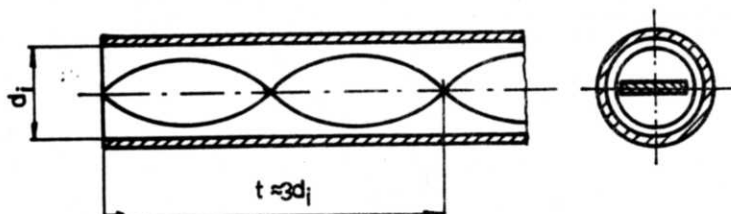
Přepážkový systém vytvořený z mezikruhových a kruhových, vzájemně vystřídá- ných přepážek je na obr. 4.33.



Obr. 4.33

Obr. 4.34

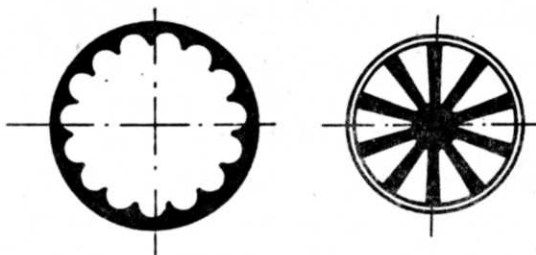
Přepážkový systém ze segmentů s výřezem tvaru výseče kruhu o vrcholovém úhlu 90° a podélnou přepážkou zabezpečující promíchání proudu je na obr. 4.34.



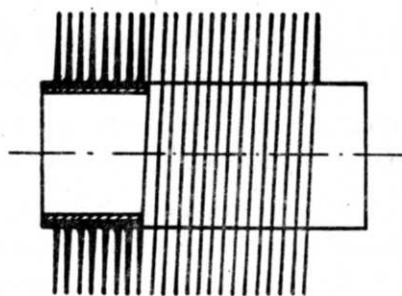
Obr. 4.35 a

Systémy s podélně /vzhledem k trubkám/ uloženými přepážkami se používají v případech chceme-li v mezitrubkovém prostoru dosáhnout dvouchodý tok pracovní látky nebo vícenásobné rozdělení proudu /viď obr. 4.10/. U těchto přepážek je důležité utěsnění přepážky vůči plášti. U nevýjimatelných trubkových svazků se přepážky přivaří podélně k plášti. U výjimatelných svazků se utěsnění zabezpečí pružnými

těsníci listy z tenkého plechu, metaloplastických nebo jiných vhodných a dostatečně pružných materiálů. Konstrukční provedení těsnění je na obr. 4.11.



obr. 4.35 b



obr. 4.35 c

4.2.4 Části k zvýšení intenzity výměny tepla

Dosažení vysoké intenzity výměny tepla je základním požadavkem při návrhu výměníků. Ovlivňuje velikost aparátu a tím i jeho pořizovací náklady. Na druhé straně však zvýšení intenzity výměny tepla lze dosáhnout jen speciálními úpravami trubek nebo zavedením doplňujících funkčních prvků, co se samozřejmě projeví v ceně. V praxi se pro konkrétní případy musí hledat optimální řešení, které splní požadavky procesu spolehlivosti a životnosti, jakož i hlediska ekonomická t.j. ceny zařízení a provozních nákladů.

V trubkovém prostoru je zvýšení intenzity přestupu tepla možno dosáhnout následujícími způsoby:

- volbou vhodného průměru trubek

Zmenšujeme-li průměr trubek, zvyšuje se rychlost proudění a vzrůstá součinitel přestupu tepla. Zvyšuje se však také tlaková ztráta a snižují možnosti čištění trubek. Je třeba hledat vhodný kompromis.

- umístěním pasívních vířičů do trubek

Jsou to různé typy pulzátorů, mixérů nebo destruktorů mezní vrstvy. Používají se podle toho v jaké oblasti proudění výměník pracuje - obr. 4.35 a

- ožebrováním vnitřního povrchu trubek

Tím se zvyšuje teplosměnný povrch na vnitřní straně trubek. Žebra jsou podélná, vytvářena z materiálu trubky vhodnou technologií tvárnění - obr. 4.35 b

- úpravou povrchu trubek

Trubky jsou různým způsobem podélně deformovány, např. tím, že v činné části se ovalizují a pak zkrucují, nebo jsou prolisovány na povrchu do tvaru šroubovnice a pod.

V mezitrubkovém prostoru lze zvýšení intenzity přestupu tepla dosáhnout:

- vhodnou volbou přepážkového systému

Tu je omezením opět přípustná tlaková ztráta a požadavky na čištění svazku.

- ožebrováním vnějšího povrchu trubek

Podle směru proudění v mezitrubkovém prostoru může jít o žebrování podélné nebo příčné. Podélná žebra se vytvářejí buď z materiálu trubky technologií tvárnění, nebo přivařením na hladké trubky. Příčné žebrování různé hustoty se čelá nevíjením plechového páska na hladkou trubku za současného odporového přivaření takto vznikající žebra - obr. 4.35 c

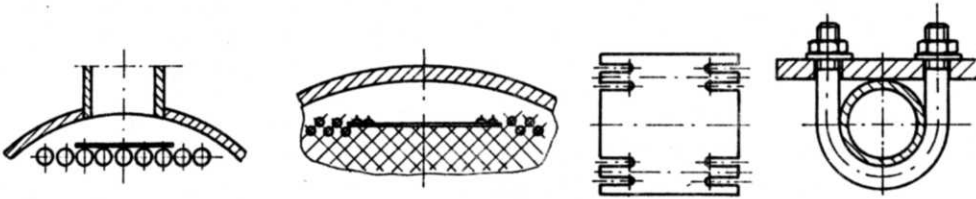
Podrobněji jsou aplikace naznačených způsobů zvýšení intenzity výměny tepla probírané v předmětu Tepelné pochody. Z konstrukčního hlediska platí zásady uvedené v této části skript.

4.2.5 Průřezy hrdel, ochrana trubkových svazků proti účinkům pracovních látek

Průřez hrdel, kterými pracovní látky vstupují a vystupují z výměníka musí být takový, aby hodnota součinu $\rho \cdot w^2$ pro každou pracovní látku nebyla větší než 6000. Přitom ρ je hustota pracovní látky v kg m^{-3} a w její rychlost v ms^{-1} .

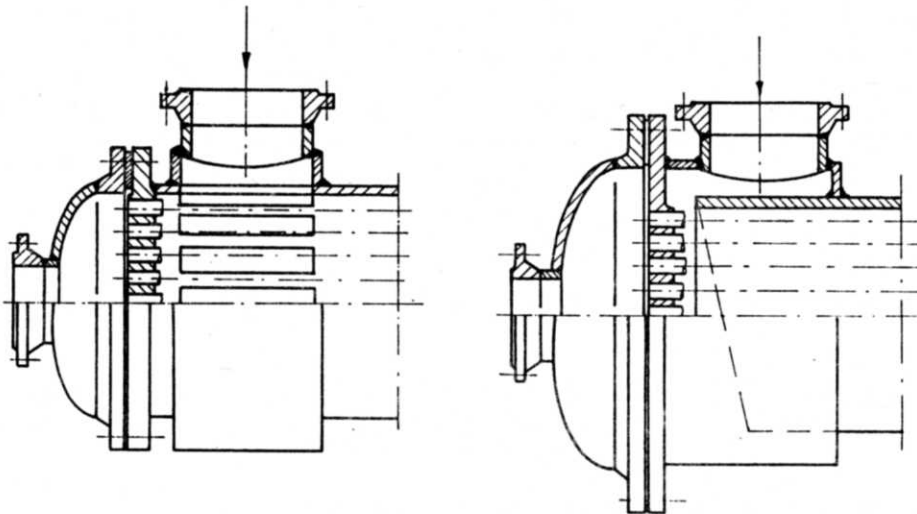
Podle charakteru, složení a stavu pracovních látek je v určitých případech potřebné chránit trubkový svazek v místech proti ústí hrdel. Tento požadavek je aktuální hlavně v mezitrubkovém prostoru, kde v důsledku vysokých rychlostí okolo trubek v oblasti blízko ústí hrdla může docházet k abrazi trubek, hlavně však k jejich rozkmitání.

Nejjednodušší ochranou trubkového svazku v mezitrubkovém prostoru je umístění nárazového plechu oproti ústí hrdla - obr. 4.36. Plech je možno uchytit přímo o trub-



obr. 4.36

ky. Jinou možností je zvětšení vstupního průřezu zvětšením průměru pláště a rozvedením proudu po obvodu trubkového svazku - obr. 4.37.



obr. 4.37

Uvedená opatření je nutno udělat jestliže hodnota součinu $\rho \cdot w^2$ pracovní látky na vstupu do mezitrubkového prostoru vychází větší než:

2250 - pro nekorozivní a neabrazivní jednofázové kapaliny

750 - pro všechny ostatní kapaliny včetně kapalin při teplotě varu.

Ochrana trubkového svazku prostřednictvím uvedených opatření se musí realizovat v každém případě jestliže pracovními látkami jsou plyny, pára nebo dvoufázové směsi kapalin a par.

4.2.6 Uložení výměníků tepla

Jak bylo již uvedeno, výměníky tepla mohou být v provozu instalovány v poloze horizontální /ležaté/ nebo vertikální /stojeté/. Nevylučují se však případy, kdy trubkový svazek je nakloněn pod různým úhlem k vodorovné rovině. Nesmíme též zapomenout, že trubkový svazek představuje značný podíl tíže celého aparátu, co je třeba respektovat u stojatých výměníků pevnostní kontrolou trubkovnic na toto přídatné zařízení.

Pro uložení ležatých výměníků tepla se používají standartní sedlové podstavce, stojaté výměníky jsou obvykle zavěšeny na patkách.

Plášť výměníka v oblasti zavedení reakcí od uložení musí být dimenzován s ohledem na pevnost a stabilitu podle příslušných výpočetních předpisů /ON 698380 a ON 690990/. Při uložení ležatém musí být jeden podstavec uchycen tak, aby umožňoval dilataci výměníka jako celku.

4.2.7 Návarky

Všechna nejvýše a nejnižší položená místa trubkového i mezitrubkového prostoru, která v pracovní poloze výměníka nelze odvědušnit nebo odvodnit prostřednictvím hrdel musí být opatřena návarky se závitem M 27 x 2 s příslušnými zátkami a těsněním. Pro možnost měření teplot a tlaků na výměníku mají být na každém hrdle umístěny proti sobě dva návarky M 27 x 2 resp. M 20 x 1,5 se zátkou a těsněním.

4.3 Dimenzování konstrukčních částí výměníků tepla

S výchozími pro dimenzování některých konstrukčních částí trubkových výměníků tepla jako jsou pláště, dna, plochá víka, přírubové spoje, hrdla s vyztužením otvorů a úložné části jsme se seznámili v rámci předmětu Konstrukce výrobních zařízení. V běžné inženýrské činnosti při návrhu tlakových nádob respektujeme výpočtové postupy a pravidla pro výběr konstrukčních materiálů a stavbu aparátů tak, jako jsou uvedené v příslušných čs. standardech /ČSN, ON/ resp. standardech přijatých v rámci RVHP /ST SEV/. Ve speciálních případech, kdy výše uvedené předpisy situace nevystihují, postupujeme podle uznávaných standartů zahraničních /ASME, ASTM a pod./ resp. podle uznávaných pravidel vědy a techniky.

V rámci kapitoly o trubkových výměnících tepla se zaměříme na problematiku dimenzování resp. kontrolu pevnosti a stability těch konstrukčních částí, které jsou pro tyto aparáty typické a to trubkovnic, trubek a spojení trubek s trubkovnicemi. Vycházíme přitom z nejnovějšího standartu pro výpočet pevnosti trubkových výměníků tepla ST SEV 4782-84, platného v ČSSR jako ON 69 0045.

Základní konstrukční rozměry a parametry

Základní konstrukční rozměry trubkových výměníků tepla jsou:

- průměr pláště
- konstrukční délka trubkového svazku.

Základní konstrukční parametry jsou:

- výpočtová teplota /max. do 400 °C/
- výpočtový tlak /max. do 6,3 MPa/

Jak jsme již uvedli, trubkové výměníky tepla mají dva od sebe oddělené tlakové prostory, trubkový a mezitrubkový. V každém může být rozdílný tlak a jednotlivé konstrukční části vymezující tyto prostory mají za provozu rozdílné teploty. V dalším budeme označovat:

p_1 - přetlak v mezitrubkovém prostoru /v plášti/

p_2 - přetlak v trubkovém prostoru /v komorách a trubkách/

Výpočtové postupy a vztahy uvedené dále platí pro poměr tloušťky trubkovnice S_p k průměru pláště D_K :

$$\frac{S_p - c}{D_K} \leq 0,4 \quad ; \quad \text{kde } c \text{ je přírůstek na korozi.}$$

Obecné výpočtové parametry pro trubkovnice

Pro trubkovnici vyjádříme následující geometrické charakteristiky:

a/ součinitel závislý od rozložení trubek: Θ

b/ výpočtový průměr otrubkované plochy trubkovnice: D_R

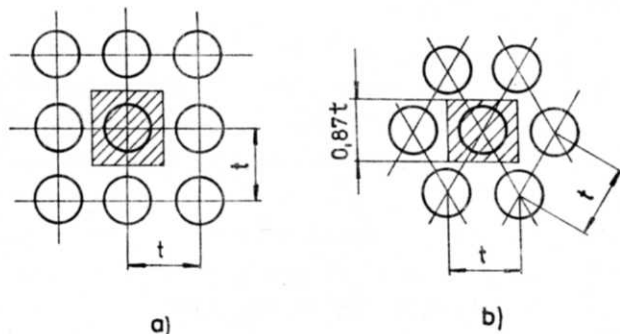
c/ šířka neotrubkovaného okraje trubkovnice: b

d/ bezrozměrná šířka neotrubkovaného okraje: λ_B

e/ výpočtová rozteč trubek: t_R

f/ součinitelé vlivu přetlaku na trubkovnici: η_1, η_2

a/ Součinitel závislý od rozložení trubek



obr. 4.38

Při uspořádání trubek v trubkovnici do čtverce s roztečí t uvažujeme, že podíl plochy z celkové otrubkované plochy trubkovnice připadající na 1 trubku je rovný kvadrátu t - obr. 4.38 a. Hodnotu součinitele Θ pro tento případ bereme rovnou jedné $\Theta = 1$. Při rozložení trubek do rovnostranného trojúhelníka se dá ukázat - obr. 4.38 b, že plocha trubkovnice připadající na jednu trubku je v důsledku hustějšího uspořádání trubek menší a sice rovná $0,87 t^2$. Hodnota součinitele pro tento případ se bere $\Theta = 1/0,87 = 1,15$.

b/ Výpočtový průměr otrubkované plochy trubkovnice

Velikost rovnoměrně otrubkované plochy trubkovnice ve vztahu k počtu trubek, jejich rozteči a geometrickému uspořádání /rozložení/ můžeme vyjádřit vztahem:

$$\frac{\pi D_R^2}{4} = \frac{1}{\Theta} \cdot t^2 \cdot n_R \quad /4.1/$$

kde je: D_R - výpočtový průměr otrubkované plochy

t - rozteč trubek

n_R - výpočtový počet trubek odpovídající počtu trubek v jednochoadém výměníku

Θ - součinitel závislý od rozložení trubek.

Eliminací ze vztahu /4.1/ dostaneme výpočtový průměr otrubkované plochy trubkovnice:

$$D_R = 2 t \sqrt{\frac{n_R}{\Theta \pi}} \quad /4.2/$$

c/ Šířka neutrubkovaného okraje trubkovnice

Je daná vztahem

$$b = \frac{D_H - D_R}{2} \quad /4.3/$$

kde za D_H se bere konstrukční rozměr D_K podle obr. 4.16, 4.17 a 4.22 resp. D_F podle obr. 4.18, 4.19, 4.20 a 4.21.

d/ Bezrozměrná šířka neutrubkovaného okraje

Definujeme jí vztahem

$$\lambda_B = \frac{2 b}{D_R} \quad /4.4/$$

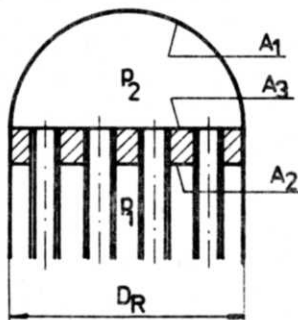
e/ Výpočtová rozteč trubek

Při určení výpočtového průměru D_R jsme uvažovali s výpočtovým počtem trubek n_R , který se rovná skutečnému počtu n jen v případě jednochodého výměníka. U ví-
cechodých výměníků v důsledku vynechání řad trubek pro těsnicí plochy přepážek je
skutečný počet trubek v trubkovnici menší. Výpočtová rozteč trubek pak je:

$$t_R = t \sqrt{\frac{n_R}{n \Theta}} \quad /4.5/$$

Pro případ: $\Theta = 1$ a $n = n_N$ je $t_R = t$.

f/ Součinitelé vlivu přetlaku na trubkovnici



obr. 4.39

Odvození těchto součinitelů vychází z po-
měrů ploch resp. jejich průmětů, na které
účinkují tlaky p_1 a p_2 .

Podle obr. 4.39 je

$$A_1 = \frac{\pi D_R^2}{4}$$

$$A_2 = \frac{\pi D_R^2}{4} - n \frac{\pi d_t^2}{4} = A_1 \eta_1$$

$$A_3 = \frac{\pi D_R^2}{4} - n \frac{\pi (d_t - 2 s_t)^2}{4} = A_1 \eta_2$$

kde je: d_t - vnější průměr trubky

s_t - tloušťka stěny trubky

n - počet trubek

η_1, η_2 - součinitelé

Je zřejmé, že součinitelé vyjadřují poměry ploch:

$$\eta_1 = \frac{A_2}{A_1} = 1 - n \frac{d_t^2}{D_R^2} \quad /4.6/$$

$$\eta_2 = \frac{A_2}{A_1} = 1 - n \frac{(d_t - 2 s_t)^2}{D_R^2} \quad /4.7/$$

Ze vztahů /4.2/ a /4.5/ platí:

$$\gamma_R^2 = 4 t^2 \frac{n_R}{\Theta \pi} \quad \text{a} \quad t = \frac{t_R}{\sqrt{\frac{n_R}{n \Theta}}}$$

Dosažením za t ve vztahu pro D_R^2 dostaneme:

$$D_R^2 = \frac{4}{\pi} t_R^2 n$$

a po dosazení této hodnoty do vztahu /4.6/ a /4.7/ dostaneme vyjádření součinitelů vlivu přetlaku na trubkovnici jako funkci rozměrů trubky a výpočtové rozteče trubek:

$$\eta_1 = 1 - \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_t}{t_R} \right)^2 \quad ; \quad /4.8/$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_t - 2 s_t}{t_R} \right)^2 \quad /4.9/$$

Pevnostní charakteristiky trubkovnice

Výpočet tloušťky trubkovnice a pevnostní a stabilitní kontrola trubek a pláště výměníka se provádí pro následující podmínky zatížení:

- pro p_2 jestliže $p_1 = 0$
- pro p_1 jestliže $p_2 = 0$
- pro působení tlaků p_1 a p_2 současně.

Pevnostními charakteristikami trubkovnice jsou:

- a/ výpočtový přetlak : p_R
- b/ efektivní přetlak : p_E
- c/ součinitel zeslabení trubkovnice : φ_P

Při výpočtu p_R a p_E se musí vždy uvažovat znaménko u tlaku p_1 a p_2 . Pro tlak nižší než je atmosférický /vákuum/ se bere znaménko u tlaku p_1 resp. p_2 záporné.

a/ Výpočtový přetlak

Ze výpočtový přetlak se bere redukováná hodnota vypočítaná z rozdílu tlaku p_1 a p_2 a jednotkového momentu M_0 , který je doplňujícím zatížením trubkovnice, je-li na okraji provedená jako protipříruba.

Výpočtový přetlak určíme ze vztahu:

$$p_R = p_2 - p_1 + \frac{2 M_0}{b^2} (1 - \lambda_B) \quad /4.10/$$

Velikost momentu M_0 závisí od konstrukčního řešení okraje trubkovnice a jejího

spojení s pláštěm resp. s komorami. Pro případ trubkovnice sevřené mezi přírubami pláště a komory - obr. 4.18 - je $M_0 = 0$. Pro situace, kdy je trubkovnice na okraji zatížená ohybovým momentem se moment M_0 vypočítá podle vztahů v tab. 4.11.

Tab. 4.11

Číslo obr.	Vztah pro M_0
4.17	$M_0 = F_B \frac{D_3 - D_P}{2\pi D_K} + p_2 D_P \frac{D_P - D_K}{8}$
4.19	$M_0 = - F_B \frac{D_1 - D_P}{2\pi D_D} - p_1 D_D \frac{D_P - D_D}{8}$
4.20 4.21	$M_0 = F_B \frac{D_3 - D_P}{2\pi D_P}$

V tab. 4.11 je F_B síla ve šroubech přírubového spoje a to větší z hodnot této síly za provozu nebo 0,75 síly montážní.

b/ Efektivní přetlak

Určí se z hodnot tlaků p_1 a p_2 s uvažováním součinitelů vlivu přetlaku na trubkovnici.

$$p_E = p_2 \eta_2 - p_1 \eta_1 \quad /4.11/$$

c/ Součinitel zeslabení trubkovnice

Tímto součinitelem bereme do pevnostního výpočtu trubkovnice ohled na zeslabení kruhové desky otvory pro trubku, případně drážkou pro uložení těsnění přepážek komor. Pro trubkovnice, zeslabené jen otvory je součinitel zeslabení dán poměrem skutečného průřezu mezi dvěma trubkami k průřezu nezeslabenému

$$\varphi_P = \frac{t - d_E}{t} = 1 - \frac{d_E}{t} \quad /4.12/$$

kde d_E je efektivní průměr otvoru pro trubky, který je možno vyjádřit přibližně takto:

$$d_E = d_0 - 2 s_t$$

pro trubkovnice s trubkami upevněnými v celé tloušťce trubkovnice nebo pro trubkovnice o tloušťce $s_P \leq 10$ mm s trubkami přivařenými bez zaválcování.

$$d_E = d_0 - s_t$$

pro trubkovnice s trubkami upevněnými /zaválcovanými/ jen v určité části tloušťky trubkovnice

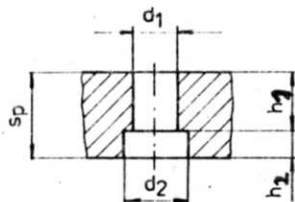
$$d_E = d_t$$

pro trubkovnice o tloušťce $s_P \geq 100$ mm

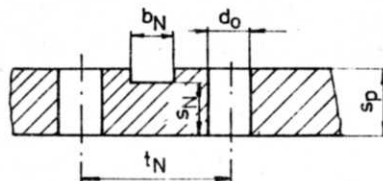
Rozměr d_0 je průměr otvoru pro trubku.

Pro trubkovnice s odstupňovaným průměrem otvorů pro trubky - obr. 4.40 - se za průměr vezme:

$$d_0 = \frac{d_1 h_1 + d_2 h_2}{s_P} \quad /4.13/$$



obr. 4.40



obr. 4.41

Výpočtové rozměry pro případ zeslabení desky trubkovnice drážkou pro těsnění přepážky jsou na obr. 4.41.

Dovolené zatížení trubek

Podle velikosti tlaků p_1 a p_2 v mezitrubkovém a trubkovém prostoru může být trubkový svazek namáhaný jako celek na tah nebo tlak. Podle toho i jednotlivé trubky jsou namáhané osovou tahovou nebo tlakovou silou.

Trubky namáhané tahovou silou

Dovolené zatížení trubek namáhaných na tah se bere jako menší z hodnot:

$$[q^+] = \min \{ [q]_T ; [q]_S \} \quad /4.14/$$

Hranatými závorkami jsou označené přípustné hodnoty přičemž znaménko u q vpravo nahoře označuje tah (+) nebo tlak (-) trubek.

Ve vztahu /4.14/ je:

- $[q]_T$ - dovolené zatížení trubek z podmínek pevnosti
- $[q]_S$ - dovolené zatížení spoje trubky s trubkovnicí

Veličina q má rozměr MPa, znamená tedy přípustnou hodnotu napětí v trubce. Jak je vidět, dovolené zatížení trubek se posuzuje komplexně, t.j. jednak z hlediska pevnosti trubky v tahu, jednak z hlediska pevnosti spoje trubky s trubkovnicí. Dovolené zatížení trubek určené z jejich pevnosti je:

$$[q]_T = \nu^{\beta} \cdot \gamma [G]_T \quad /4.15/$$

kde je

- ν^{β} - součinitel průřezu trubek
- γ - součinitel vlivu dvouosého namáhání trubek
- $[G]_T$ - dovolené namáhání materiálu trubek při výpočtové teplotě

Součinitelé jsou definované následovně:

$$\nu^{\beta} = \pi \frac{(d_T - s_T)(s_T - c_T)}{t_R^2} \quad /4.16/$$

kde c_T je přídavek k tloušťce stěny trubky.

$$\gamma = 1 - \frac{(d_T - s_T) |p_2 - p_1|}{2 (s_T - c_T) [G]_T} \quad /4.17/$$

pro výměníky s pevnými trubkovnicemi resp. kompenzátorem či ucpávkou v plášti.

$\gamma = 1$ pro výměníky s plovoucí hlavou

Pro výměníky s U-trubkami se γ neurčuje.

Dovolené zatížení spoje s trubkovnicí se určí následovně:

a/ pro trubky do trubkovnice zaválcované:

$$[q]_{s1} = 2\pi \frac{(s_T - c_T) l_v \mu [\sigma]_T}{t_R^2} \quad /4.18/$$

kde je:

l_v - délka zaválcování

μ - součinitel tření ve spoji, který se bere:

$\mu = 0,25$ - při zaválcování do hladkých otvorů

$\mu = 0,50$ - při zaválcování do otvorů s drážkami nebo hřebínkem.

b/ pro trubky k trubkovnici přivařené:

$$[q]_{s2} = \frac{0,7 \pi d_m \cdot a}{t_R^2} \cdot \min \{ [\sigma]_P ; [\sigma]_T \} \quad /4.19/$$

kde je:

a - výpočtový nosný rozměr sváru podle obr. 4.42,

$[\sigma]_P$ - dovolené namáhání materiálu trubkovnice při výpočtové teplotě,

$[\sigma]_T$ - dovolené namáhání materiálu trubek při výpočtové teplotě.

c/ pro trubky zaválcované a přivařené:

$$[q]_{s3} = [q]_{s2} + 0,6 [q]_{s1} \quad /4.20/$$

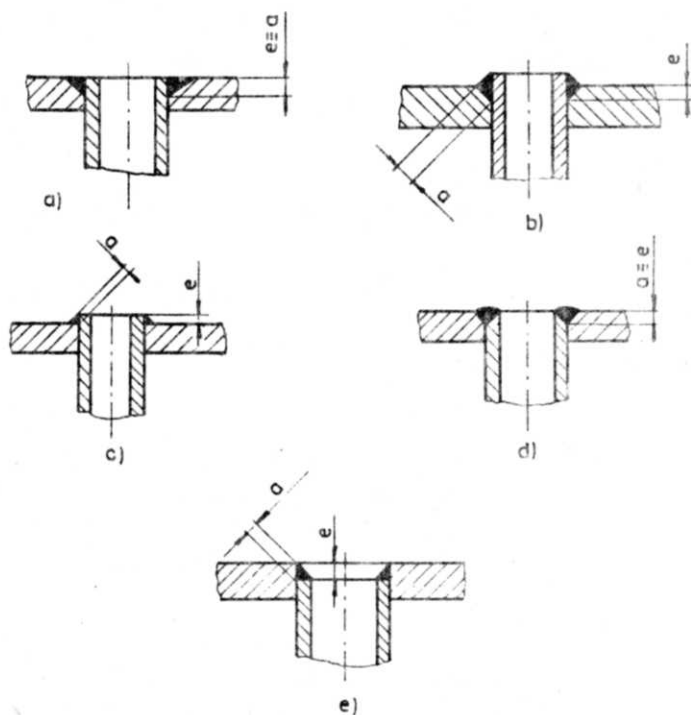
d/ pro trubky do trubkovnice zapájené /u slitin mědi/

$$[q]_{s4} = \frac{\pi d_m l_v [\tau]}{t_R^2} \quad /4.21/$$

kde je:

$[\tau]$ - dovolené namáhání materiálu pájky ve smyku

l_v - délka, na které je trubka zapájená.



obr. 4.42

Trubky namáhané na vzpěr

Při zatížení trubkového svazku jako celku osovou tlakovou silou jsou jednotlivé trubky namáhané na vzpěr. Výpočetem se má prokázat jejich stabilita, t.j. odolnost

vůči vybočení při uvedeném zatížení. Výpočtové vztahy vycházejí z teorie štíhlých prutů namáhaných na vzpěr, která se probírala v základním kurzu pružnosti a pevnosti.

Dovolené zatížení trubek na vzpěr se bere jako menší z hodnot:

$$[q^-] = \min \left\{ [q]_T \varphi_T ; [q]_S \right\} \quad /4.22/$$

kde je:

- $[q^-]$ - dovolené zatížení materiálu trubek v tlaku
 φ_T - součinitel vzpěrnosti trubek

I v tomto případě posuzujeme komplexně t.j. jednak z hlediska stability trubek ($[q]_T \varphi_T$), jednak z hlediska pevnosti spoje trubky s trubkovnicí ($[q]_S$).

Hodnota $[q]_T$ se určí ze vztahu /4.15/ při tlaku $p_1 = 0$.

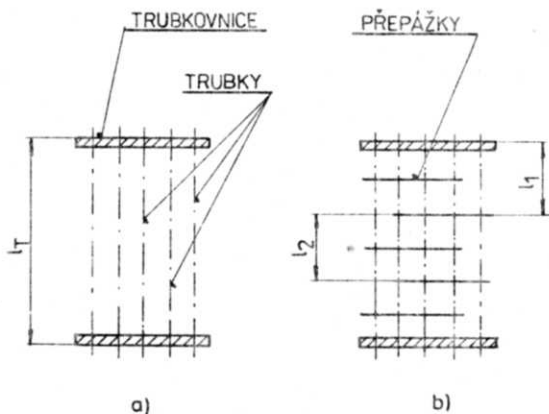
Součinitel vzpěrnosti je dán vztahem:

$$\varphi_T = \frac{1}{\sqrt{1 + \left\{ 0,81 n_u \frac{[\sigma]_T}{E_T} \left(\frac{l_R}{d_{T-S_T}} \right)^2 \right\}^2}} \quad /4.23/$$

kde - kromě už známých veličin - je:

- n_u - bezpečnost vůči ztrátě stability při vzpěru
 E_T - modul pružnosti v tahu materiálu trubky při výpočtové teplotě
 l_R - redukovaná délka trubky při vzpěru, která se bere podle obr. 4.43 následovně:

$$l_R = \min \left\{ 0,5 l_T ; \max \left\{ 0,7 l_1 ; l_2 \right\} \right\} \quad /4.24/$$



$$l_R = \min [0,5 l_T ; \max (0,7 l_1 ; l_2)]$$

obr. 4.43

$$s = k D \sqrt{\frac{p}{[\sigma]}} \quad /4.25/$$

Výpočet tloušťky trubkovnic pro jednotlivé typy výměníků

V předmětu Konstrukce výrobních zařízení resp. v základním kurzu pružnosti a pevnosti byl probrán výpočet plochých kruhových desek zatížených tlakem případně i ohybovým momentem na okraji. Tento výpočet vycházel z teorie mezních stavů, co v tomto případě představuje dosažení plnoplastického stavu ve středu desky. Z této modelové představy byl odvozen vztah pro určení potřebné tloušťky desky zatížené tlakem p :

- kde: k - číselná konstanta charakterizující způsob uložení desky na okraji
 D - výpočtový průměr desky
 p - tlak
 $[\sigma]$ - dovolené namáhání materiálu desky

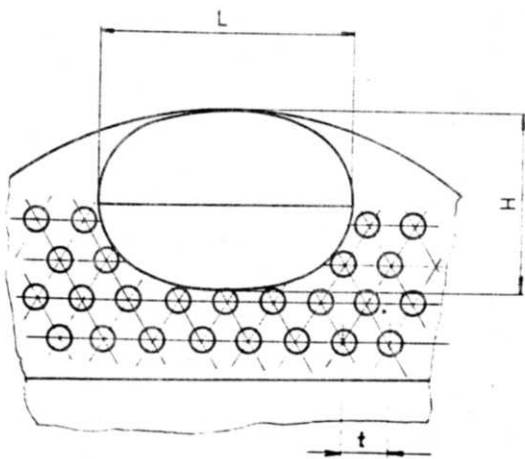
Uložení desky na okraji může být v zásadě dvojího typu - kloubové nebo vetknuté. U reálných konstrukcích se těmto idealizovaným případům jen přibližujeme. Deska /trubkovnice/ sevřená mezi přírubami na šířce těsnění podobá na kloub. Deska vevařená do příruby nebo pláště je uložena přibližně jako vetknutá. Z tohoto posouzení vychází hodnota konstanty k ve vztahu /4.25/, která v konkrétním číselném vyjádření /ČSN 69 0010/ respektuje odlišnost ideálního a reálného uložení. Za výpočtový průměr D se bral průměr desky po místo uložení. Kromě zatížení od tlaku se probíraly i případy, kdy je deska na okraji zatížena doplňujícím ohybovým namáháním. Nesmíme přehlédnout, že při vetknutí je toto ohybové zatížení vždy přítomné jako reakce v uložení.

Výpočet tloušťky trubkovnic vychází teda ze známého vztahu /4.25/ odvozeného pro plně kruhové desky. Výpočtové vztahy jsou doplněné případně upravené tak, aby respektovaly příslušné odlišnosti od plných desek /zeslabení/ a odpovídaly podmínkám zatížení případně vyztužení jinými prvky /trubkami/, se kterými je možno uvažovat u trubkovnic jednotlivých typů výměníků.

Výměník s pevnými trubkovicemi

U tohoto typu jsou obě trubkovnice spojené navzájem trubkami a pláštěm v nerozebíratelný celek. Část zatížení od tlaku ve směru osy aparátu přenáší plášť, část trubky. Trubky mají přitom na trubkovnici významný vyztužný účinek. Představují jakoby podepření trubkovnice v místě každé trubky. Při výpočtu tloušťky trubkovnice vycházíme proto z největší trubkami nevyztužené plochy. Tou může být neotrubkovaný okraj šířky b nebo charakteristický rozměr oválu vepsaného do neotrubkované části plochy - obr. 4.44, který se dá vyjádřit vztahem:

$$D = H \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{H}{L} + \left(\frac{H}{L}\right)^2}} \quad /4.26/$$



obr. 4.44

Pro trubkovnice vevařené do pláště nebo příruby - obr. 4.16 - se pak tloušťka trubkovnice vypočítá ze vztahu:

$$S_p \geq S_{PR} + C$$

kde je:

- S_p - provedená tloušťka trubkovnice v otrubkovaném poli a v neotrubkované části
 S_{PR} - výpočtová tloušťka trubkovnice v otrubkovaném poli a v neotrubkované části
 C - součet všech příčavek k tloušťce.

Výpočtová tloušťka se určí ze vztahu /4.25/, do kterého se dosadí

za \underline{D} podle /4.26/ a ze tlak absolutní hodnota rozdílu tlaků v trubkovém a mezi-trubkovém prostoru. Konstanta \underline{k} vzhledem na uložení se bere o hodnotě $k = 0,5$.

$$s_{PR} = 0,5 \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{H}{L} + \left(\frac{H}{L}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{|p_2 - p_1|}{[\sigma]_P}} \quad /4.27/$$

Je-li trubkovnice po celé ploše rovnoměrně otrubkovaná počítá se tloušťka z neutrubkovaného okraje. Za výpočtový rozměr \underline{D} dosazujeme \underline{b} - šířku okraje:

$$s_{PR} = 0,71 b \sqrt{\frac{|p_2 - p_1|}{[\sigma]_P}} \quad /4.28/$$

Kontrola pevnosti trubek se provede podle vztahu:

$$- [q^-] \leq -p_E - \lambda_B (p_2 - p_1) \leq [q^+] \quad /4.29/$$

Kontrola pevnosti pláště se provede podle vztahu:

$$- [F^-] \leq \frac{\pi D_R^2}{4} [p_2 (1 + \lambda_B) + p_1 \lambda_B] \leq [F^+]$$

kde $[F^+]$ a $[F^-]$ jsou dovolené osové síly v plášti z hlediska pevnosti a stability. Jejich výpočet byl probrán v předcházejících přednáškách resp. je obsažen v ON 69 0045 /ST SEV 597-77/.

Je-li okraj trubkovnice proveden jako protipříruba komory /obr. 4.17/ teda je zatížený doplňujícím ohybovým momentem M_0 od utažení přírubového spoje, určí se potřebná tloušťka trubkovnice ze vztahu:

$$s_P \geq \max \{ s_{P1} ; s_{P2} \} + c \quad /4.30/$$

Postupujeme tak, že předběžně určíme tloušťku jen z namáhání na ohyb:

$$s_P = \sqrt{\frac{F_B (D_3 - D_P)}{D_P [\sigma]_P}} \quad /4.31/$$

kde:

F_B - síla ve šroubech přírubového spoje

D_3, D_P - průměry podle obr. 4.17.

Z této hodnoty tloušťky se určí ostatní konstrukční rozměry a pomocné veličiny a výpočet se provede podle dále uvedených vztahů metodou postupných přiblížení s přesností $\pm 5\%$.

Do vztahu /4.30/ se tloušťka trubkovnice s_{P1} vypočítá z maximální neutrubkované plochy - vztah /4.27/. Tloušťka trubkovnice z pevnosti neutrubkovaného okraje se v tomto případě určí ze vztahu:

$$s_{P2} = b \frac{\sqrt{\xi}}{1 + \sqrt{\xi + 1}} \sqrt{\frac{2 |P_R|}{[\sigma]_P (\varphi_P + \lambda_B)}} \quad /4.32/$$

kde výpočtový přetlak P_R se vypočte ze vztahu /4.10/. Součinitel ξ charakterizuje zatížení trubkovnice.

$$\xi = \frac{\varphi_P + \lambda_B}{2 \varphi_P} \cdot \frac{|P_R|}{[q]_0} \quad /4.33/$$

kde $[q]_0$ je redukované dovolené zatížení trubek

$$\begin{aligned} [q]_0 &= [q^-] - p_E && \text{pro } P_R \geq 0 \\ \text{nebo} & && \\ [q]_0 &= [q^+] + p_E && \text{pro } P_R < 0 \end{aligned} \quad /4.34/$$

Nebezpečným průřezem trubkovnice při tomto zatížení je podle způsobu přivaření trubkovnice k plášti - obr. 4.17 - tloušťka s_0 , která musí splňovat podmínku:

$$s_0 \geq \sqrt{0,64 \frac{F_E (D_3 - D_P)}{D_3 [\sigma]_P} + 3 \left(\frac{F_E}{\pi D_P [\sigma]_P} \right)^2} + c \quad /4.35/$$

Kontrola pevnosti trubek ve středu otrubkovaného pole se provede podle vztahu:

$$- [q^-] \leq - p_E \leq [q^+] \quad /4.36/$$

Na okraji otrubkovaného pole musí být splněno:

$$- [q^-] \leq - p_E - P_R \cdot \lambda_B \leq [q^+] \quad /4.37/$$

Kontrola pevnosti a stability pláště se provede podle vztahu:

$$- [F^-] \leq \frac{\pi D_R^2}{4} \left(p_2 + p_1 \cdot 2 \lambda_B + P_R \frac{2 \lambda_B}{1 + \sqrt{\xi + 1}} \right) \leq [F^+] \quad /4.38/$$

Výměníky s plovoucí hlavou

U těchto typů výměníků je výztužný účinek trubek na trubkovnice jen částečný. Výpočtové vztahy pro určení tloušťky trubkovnice, respektující tuto skutečnost, jsou proto o něco složitější, v zásadě však vycházejí ze vztahu /4.25/ pro kruhové desky. Tloušťka pevné i plovoucí trubkovnice se určí ze vztahu:

$$s_P \geq s_{PR} + c$$

Nejprve se vypočte předběžná tloušťka trubkovnice s_P , na základě které se určí ostatní konstrukční rozměry a pomocné veličiny:

$$s_P = \sqrt{0,25 D_P^2 \frac{|P_R|}{[\sigma]_P} + \frac{F_B (D_3 - D_P)}{[\sigma]_P D_P}} \quad /4.39/$$

Dále se postupuje ve výpočtu metodou postupných přiblížení až se dosáhne shoda na $\pm 5\%$.

výpočtová tloušťka trubkovnice se určí ze vztahu:

$$s_{PR} = 0,41 D_R \sqrt{\frac{|P_R|}{[\sigma]_P}} \cdot \max \left\{ \sqrt{\frac{|\Omega| + |\Omega + \phi + \psi|}{\varphi_P + \lambda_B} + \frac{|P_R|}{[\sigma]_P \varphi_P^2}}; \sqrt{\frac{|\Omega|}{\varphi_P}} \right\}$$

veličiny Ω , ϕ , ψ resp. $[q]_0$ a P_R se určí ze vztahů: /4.40/

$$\Omega = 0,4 \frac{|P_R|}{[q]_0} \quad /4.41/$$

v tomto případě je:

$$P_R = P_2 - P_1 \quad /4.42/$$

$$[q]_0 = \begin{cases} [q^+] + P_E & \text{pro } P_R \geq 0 \\ [q^-] - P_E & \text{pro } P_R < 0 \end{cases} \quad /4.43/$$

$$\phi = 3 \lambda_B (1 + \lambda_B) \quad /4.44/$$

$$\psi = \frac{24 M_0}{P_R \cdot D_R^2} (1 + \lambda_B) \quad /4.45/$$

Velikost jednotkového momentu M_0 se vypočítá podle vztahů v tab 4.11 pro příslušné konstrukční řešení. Tloušťka trubkovnice v nebezpečném průřezu musí vyhovovat následujícím podmínkám:

a/ u trubkovnic konstrukce podle obr. 4.17, 4.19, 4.20, 4.21:

$$s_0 \geq \sqrt{0,64 \frac{F_B (D_3 - D_P)}{D_3 [\sigma]_P} + 3 \left(\frac{F_B}{\pi D_P [\sigma]_P} \right)^2} + c \quad /4.46/$$

b/ u trubkovnic podle obr. 4.18:

$$s_0 \geq D_K \frac{|P_R|}{2 [\sigma]_P} + c \quad /4.47/$$

c/ u trubkovnic podle obr. 4.22:

$$s_0 \geq D_P \frac{|P_R|}{2 [\sigma]_P} + c \quad /4.48/$$

Kontrola pevnosti trubek se provede podle vztahu:

$$-[q^-] \leq P_R - P_E \leq [q^+] \quad /4.49/$$

Výměník s U-trubkami

U této konstrukce trubky nemají na trubkovnici žádný výztužný účinek, protože z ní vycházejí a opět se do ní vracejí. Tloušťka trubkovnice se určí ze vztahu:

$$s_p \geq s_{PR} + c$$

Předběžně se tloušťka vypočítá ze vztahu:

$$s_p = \sqrt{0,4 D_p^2 \frac{|P_R|}{[\sigma]_p} + \frac{F_B (D_3 - D_p)}{D_p [\sigma]_p}} \quad /4.50/$$

Z této tloušťky se určí ostatní konstrukční rozměry a pomocné veličiny a provede se výpočet metodou postupných přiblížení s přesností $\pm 5\%$.

Výpočtová tloušťka trubkovnice je:

$$s_{PR} = 0,41 D_R \sqrt{\frac{|P_R|}{[\sigma]_p}} \cdot \max \left\{ \sqrt{\frac{0,5 + |0,5 + \phi + \psi|}{\varphi_p + \lambda_B} + \frac{|P_R|}{[\sigma]_p \varphi_p^2}}; \sqrt{\frac{0,5}{\varphi_p}} \right\} \quad /4.51/$$

kde hodnoty ϕ , ψ , P_R se určí jako v předešlém případě.

V nebezpečném průřezu musí být trubkovnice pevnostně kontrolována podle vztahů /4.46/, /4.47/, /4.48/.

Kontrola pevnosti trubek se provádí jen pro přetlaky větší než 4 MPa, kdy je nutno kontrolovat spoj trubky s trubkovnicí podle vztahu:

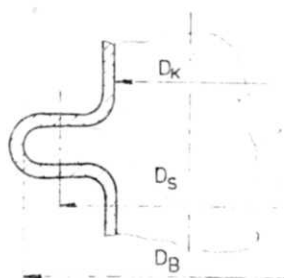
$$|P_R| (1 - \eta_1) \leq [q]_s \quad /4.52/$$

Výměník s kompenzátorem nebo ucpávkou v plášti

Tloušťka trubkovnice se vypočte jako u výměníka s plovoucí hlavou s tím rozdílem, že za výpočtový tlak se vezme:

$$P_R = P_2 + P_1 \frac{D_S^2 - D_R^2}{D_R^2} \quad /4.53/$$

kde D_S je charakteristický rozměr vlnovce podle obr. 4.45.



obr. 4.45

Tloušťka trubkovnice v nebezpečném průřezu s_0 se kontroluje podle vztahu /4.46/.

Kontrola pevnosti trubek - musí být splněno:

$$- [q^-] \leq P_R - P_E \leq [q^+] \quad /4.54/$$

Kontrola pevnosti pláště s kompenzátorem se provede podle vztahu:

$$\sigma_K = \frac{P_1 (D_S^2 + D_K^2)}{4 D_K (s_K - c)} \leq [\sigma]_K \quad /4.55/$$

kde σ_K je podélné napětí v plášti za provozu výměníka a $[\sigma]_K$ je dovolené namáhání materiálu pláště při výpočtové teplotě. Kontrola pevnosti pláště s ucpávkou není nutná.

Vliv vlastní tíhy trubkového svazku

V případě svisle uložených výměníků, u kterých $s_P/D_K \leq 0,22$ je nutná kontrola trubkovic na zatížení od vlastní tíhy trubek, trubkovic, přepážek a pracovních látek v mezitrubkovém resp. v trubkovém prostoru. U výměníků s plovoucí hlavou a U-trubkami je pevná trubkovice vždy nahoře. Proto se místo tíhy pracovní látky v mezitrubkovém prostoru uvažuje tíha pracovní látky v trubkovém prostoru.

Tloušťka trubkovice s uvažováním vlivu přetlaků a vlastní tíhy se určí ze vztahu:

$$s_{PR} \geq \sqrt{s_{PR}^2 - s_{PG}^2} + c \quad /4.56/$$

Výpočtová tloušťka s_{PR} je uvedena v předcházející části pro jednotlivé typy výměníků.

Výpočtová tloušťka trubkovice nesoucí tíhu trubkového svazku se určí následně:

a/ pro trubkovice vevařené do pláště nebo příruby

$$s_{PG} = 0,8 \sqrt{\frac{G \lambda_B}{[\sigma]_P (1 + \lambda_B + \varphi_P)}} \quad /4.57/$$

b/ pro ostatní trubkovice

$$s_{PG} = 0,8 \sqrt{\frac{G \lambda_B}{[\sigma]_P (\lambda_B + \varphi_P)}} \quad /4.58/$$

Ve vztazích je G tíha trubkového svazku včetně pracovní látky. U výměníku s pevnými trubkovicemi se do vztahů /4.57/ a /4.58/ dosazuje $0,5 G$ místo G protože tíhu přenáší obě trubkovice.

Kontrola výměníků na nízkocyklovou únavu

Na nízkocyklovou únavu je nutno kontrolovat výměníky s pevnými trubkovicemi. Podrobnější výpočet není potřebný, je-li splněna podmínka:

$$P_F \leq \frac{2,2}{\xi} [\sigma]_{AP} \left(2 \sqrt{\frac{s_P}{l_T}} + 0,5 \frac{b^2}{s_P l_T} \right) \quad /4.59/$$

kde je:

- P_F - fiktivní přetlak
- ν_B - součinitel průřezu trubky /4.16/
- ξ - součinitel uvažující typ svaru - obr. 4.23, 4.24
- $[\sigma]_{AP}$ - dovolená amplituda napětí trubkovice pro daný počet cyklů - určí se podle ON 69 0049
- l_T - délka trubky - obr. 4.43

Fiktivní přetlak se určí podle vztahu:

$$p_F = p_1 (\eta_1 - \lambda_0 \chi) - p_2 (\eta_2 + \chi) + \chi \left[\alpha_T (T_T - T_0) - \alpha_K (T_K - T_0) \right] E_T +$$

$$+ 0,15 \frac{p_1 D_K E_T}{s_K E_K} + 0,15 \frac{(p_1 - p_2)(d_T - s_T)}{s_T} \quad /4.60/$$

kde:

$$\lambda_0 = \lambda_B (2 + \lambda_B) \quad /4.61/$$

$$\chi = \frac{n (d_T - s_T) s_T E_T}{D_K s_K E_K} \quad /4.62/$$

Veličina χ je poměr tuhosti trubek k tuhosti pláště. Ve vztahu /4.60/ jsou dále hodnoty:

α_T - součinitel teplotní roztažnosti trubek

α_K - součinitel teplotní roztažnosti pláště

T_T a T_K jsou skutečné teploty trubek resp. pláště za provozu a to střední hodnoty po délce

E_T a E_K jsou moduly pružnosti materiálu trubek resp. pláště při výpočtových teplotách.

Pokud není splněná podmínka /4.59/ je nutné provést podrobnější výpočet /viz příloha ON 69 0045/.

Literatura

-
- [4 - 1] Lukavský, J.: Konstrukce a stavba aparátů, Vydavatelství ČVUT Praha, 1980
 - [4 - 2] Vejvoda, S., Vlk, M.: Stavba chemických zařízení II, ediční středisko VUT Brno, 1982
 - [4 - 3] Schneider, F.: Základy konstruování chemických zařízení, ediční středisko VUT Brno, 1987
 - [4 - 4] Klapp, E.: Festigkeit im Apparate und Anlagenbau, Werner-Verlag, 1970
 - [4 - 5] Klapp, E.: Apparate und Anlagentechnik, Springer-Verlag, 1980
 - [4 - 6] Michalev, M.F. a kol.: Rasčet i konstruovanie mašin i apparatov chimičeskich proizvodstv, Vyd. Mašinostrojenie, 1984
 - [4 - 7] Pálfi, Z.: Vegyipari készulékek /atlas/, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986
 - [4 - 8] ST SEV 798-77, /ON 69 6118/: Ocelové svařované teplosměnné aparáty
 - [4 - 9] ST SEV 5825-82, /ON 69 6811/: Teplosměnné trubkové aparáty
 - [4 - 10] ST SEV 4782-84, /ON 69 0045/: Trubkové výměníky tepla
 - [4 - 11] ON 69 6109 /návrh/: Trubkové výměníky tepla s přímými trubkami