

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra termomechaniky

Zdeněk Illichmann

TEPELNÉ TRUBICE

Diplomová práce

Liberec 1996

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Obor 23 - 17 - 08
Konstrukce strojů a zařízení

zaměření
Tepelná technika
Katedra termomechaniky

TEPELNÉ TRUBICE

Zdeněk Illichmann

KTE - DP - 008

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Ivo Středa, CSc.
Konzultant: Doc. Ing. Josef Olehla, CSc.

Rozsah práce:

Počet stran: 75
Počet příloh: —
Počet tabulek: 8
Počet obrázků: 24
Počet výkresů: —

Datum: 24. 5. 1996

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra : termomechaniky

Školní rok : 1995/96

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Zdeňka I l l i c h m a n n a

obor Tepelná technika

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č.172/1990 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci :

Název tématu : TEPELNÉ TRUBICE

Zásady pro vypracování :

1. Současný stav, typy tepelných trubic, konstrukce a aplikace.
2. Teorie výpočtů tepelných trubic - využití počítače.
3. Návrh experimentálního zařízení.
4. Experimentální ověření vlastností tepelných trubic (vliv náplně a úhlu sklonu na tepelný výkon trubice).
5. Závěr a zhodnocení.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Univerzitní knihovna
Voroněžská 1329, Liberec 1
PŠČ 461 17

KTE/TT

45 p.

V 155/96 S

ANOTACE

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra termomechaniky

Obor: **Tepelná technika**

Diplomant: **Zdeněk Illichmann**

Téma: **Tepelné trubice**

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Ivo Středa, CSc.**

Konzultant: **Doc. Ing. Josef Olehla, CSc.**

Práce shrnuje informace o tepelných trubicích.

Zabývá se jejich principem činnosti, rozdělením a využitím, rovněž otázkami konstrukce a technologie.

Podrobněji je popsán způsob teoretického výpočtu tepelných trubic, tj. jejich výkonu a limitů. Je sestaven počítačový program provádějící výpočet..

Experimentální část zkoumá vliv množství náplně tepelné trubice na její výkon a průběh přechodové charakteristiky.

OBSAH

SEZNAM OZNAČENÍ	7
1. ÚVOD	8
2. SOUČASNÝ STAV, KONSTRUKCE A APLIKACE	9
2.1 Princip činnosti	9
2.2 Rozdělení tepelných trubic	11
2.3 Konstrukce tepelných trubic	16
2.3.1 Otázky materiálu a pracovních látek	16
2.3.2 Postup výroby tepelných trubic	18
2.3.3 Preventivní diagnostika	20
2.3.4 Vliv množství pracovní látky na výkon	21
2.4 Aplikace tepelných trubic	22
3. TEORETICKÝ VÝPOČET TEPELNÝCH TRUBIC	28
3.1 Přenosové jevy v tepelných trubicích	28
3.1.1 Gravitační tepelné trubice	30
3.1.2 Ostatní druhy tepelných trubic	38
3.2 Výpočet limitů tepelného výkonu	40
3.2.1 Sonický limit	40
3.2.2 Výparní limit	42
3.2.3 Interakční limit	43
3.2.4 Kapilární limit	44
3.3 Využití počítače pro výpočet	45
3.3.1 Rozbor úlohy	45
3.3.2 Výpis programu	47

4. MĚŘENÍ VLIVU MNOŽSTVÍ NÁPLNĚ NA ČINNOST	57
4.1 Návrh měření	57
4.1.1 Popis používané tepelné trubice	57
4.1.2 Prováděné zkoušky - statická a dynamická	59
4.2 Návrh měřicího zařízení	61
4.2.1 Statická zkouška	61
4.2.2 Dynamická zkouška	61
4.2.3 Úpravy tepelné trubice	63
4.3 Postup zkoušek a jejich průběh	64
4.4 Zpracování výsledků měření	66
4.5 Hodnocení	71
5. ZÁVĚR	73
SEZNAM LITERATURY	75

Seznam základních označení

b	šířka (m)	indexy:	
c	měrná tepelná kapacita ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)	A	chladnější prostředí
d	průměr (m)	G	inertní plyn
g	tíhové zrychlení (m/s^2)	I	interakční limit
H	výška vzlínání (m)	K	kondenzace
K_G	geometrický faktor ($\text{m}^{-1,75}$)	L	pracovní látka
K_L	látkový faktor ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1,75} \cdot \text{K}^{-0,75}$)	P	teplejší prostředí
K_Q	přenosový faktor	Q	teplo
L	délka (m)	S	sonický limit
M	molová hmotnost (kg/mol)	W	plášť
l_v	měrné výparné teplo ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ad	adiabatická část
$\dot{M}$	hmotnostní průtok pracovní látky (kg/s)	e	vnější
$\dot{m}$	hmotnostní průtok chladicí vody (kg/s)	i	vnitřní
$\dot{Q}$	tepelný tok (W)	p	pára
$\dot{q}$	plošná hustota tepelného toku ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	v	var
R	odpor (tepelný nebo elektrický), molová plynová konstanta		
Re	Reynoldsovo číslo	α	součinitel přestupu tepla
S	plocha (m^2)	δ	tloušťka (m)
T	termodynamická teplota (K)	η	účinnost
t	teplota ($^{\circ}\text{C}$)	κ	Poissonova konstanta
U	elektrické napětí (V)	λ	tepelná vodivost ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)
w	rychlost (m/s)	μ	dynamická viskozita ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
We	Weberovo číslo	ν	kinematická viskozita (m^2/s)
x	souřadnice	ρ	hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
y	souřadnice	σ	povrchové napětí (N/m)
		τ	čas (s) , napětí (Pa)

1. ÚVOD

Vědeckotechnický rozvoj v posledních desetiletích se spolu s růstem počtu obyvatel naší planety vyznačuje neustále se zvyšující potřebou energie. V důsledku toho dochází k energetické krizi, k poškozování životního prostředí. Žádný náhradní zdroj energie není v dohledu. Nejdůležitější je tedy lépe hospodařit se stávajícími zdroji, tj. efektivněji využívat tu energii, která je k dispozici.

To spolu se stále náročnějšími technologiemi způsobuje zvyšování nároků na výměnu tepla, kterým klasické výměníky tepla již nemusí vyhovovat. V takových případech se používají výměníky tepla založené na fázových změnách teplosměnného média (prostředníka), jehož cirkulace se zajišťuje nuceně, např. pomocí čerpadel. Takovéto uspořádání je však výrobně, montážně a provozně poměrně náročné. Výzkum a vývoj v oblasti termokinetiky se proto zaměřil na hledání nových cest ke zvýšení energetické účinnosti teplosměnných zařízení, zmenšení jejich rozměrů, snížení spotřeby materiálu a na realizaci teplosměnných elementů výhodných pro nové stroje nebo zařízení o velkých měrných výkonech, při co možná nejmenší náročnosti na výrobu, obsluhu a údržbu.

Jeden ze způsobů řešení intenzifikace přenosu tepla v problematice chlazení a ohřevu je založen na využití výparného a kondenzačního tepla vhodných teplotnosných látek v uzavřeném cyklu vypařování nebo var - kondenzace, kde dopravu látky neobstarává čerpadlo, ale síly tíhové, kapilární apod.

Pro takové teplosměnné elementy se vžil název tepelné trubice. V naší republice probíhá jejich vývoj od konce 60. let.

Tepelné trubice pro široký rozsah teplot se staly prvkem používaným dnes

v celé řadě oborů průmyslu, zemědělství i v nevýrobní oblasti. Mají mnoho podob a jejich použití vede ke kvalitativně novým koncepcím tepelných zařízení.

Efektivní uplatnění tepelných trubic vyžaduje dobrou znalost jejich vlastností, jež se zjišťují pomocí různých experimentů na hotových trubicích. Výzkum rovněž jde cestou teoretickou, tj. vytvořením fyzikálního modelu tepelné trubice.

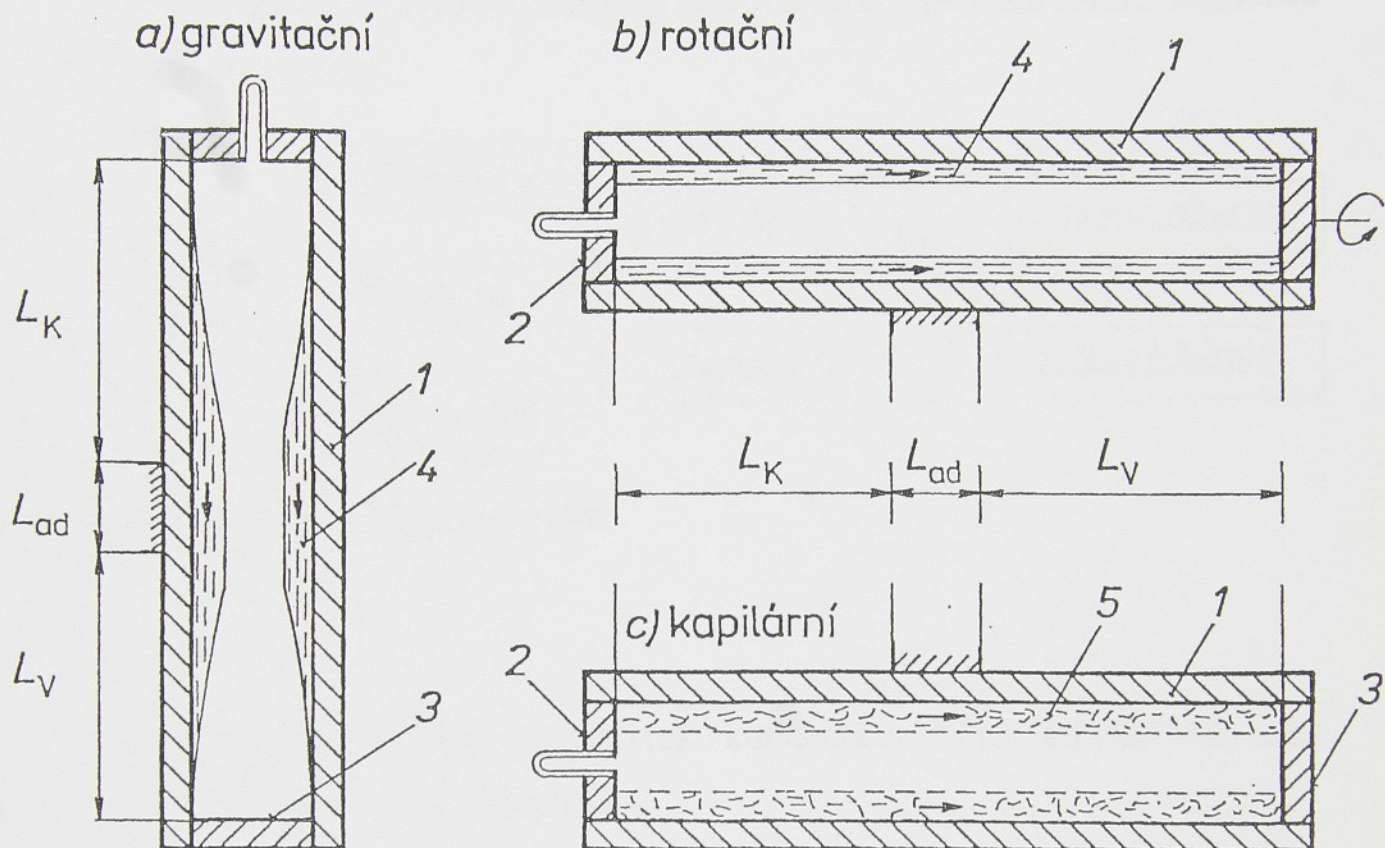
2. KLASIFIKACE, KONSTRUKCE A APLIKACE **TEPELNÝCH TRUBIC**

2.1 PRINCIP ČINNOSTI

Tepelná trubice je teplosměnný element pracující na principu zintenzivnění přenosu tepla v uzavřeném tepelném oběhu s fázovými změnami, zejména při vypařování a kondenzaci pracovní látky. Je tvořena nejčastěji trubkou válcového tvaru, na čelech těsně uzavřenou, z níž se vypumpuje vzduch do absolutního tlaku nižšího než 10 Pa. Vnitřní prostor zaujímá pracovní látka, zpravidla se zde vyskytuje zároveň ve fázi kapalné a plynné, jíž se do trubice vpraví 10 - 20 % vnitřního objemu.

Zahřívá-li se jeden úsek tepelné trubice, tzv. výparný, odpařuje se na jeho vnitřním povrchu pracovní látka a proudí do úseku chlazeného zvaného kondenzační část, kde kondenzuje a předává teplo. Odtud je dopravována zpět do výparné části trubice. Úsek trubice, kde nedochází ke sdílení tepla, se nazývá adiabatický a teplota páry v tomto úseku určuje pracovní teplotu tepelné trubice t_p . Doprava kondenzátu z kondenzační do výparné části je zajišťována působením tíhových sil u gravitačních tepelných trubic, kapilárních

sil u kapilárních tepelných trubic apod. Jednotlivé trubice jsou na obr. 1.

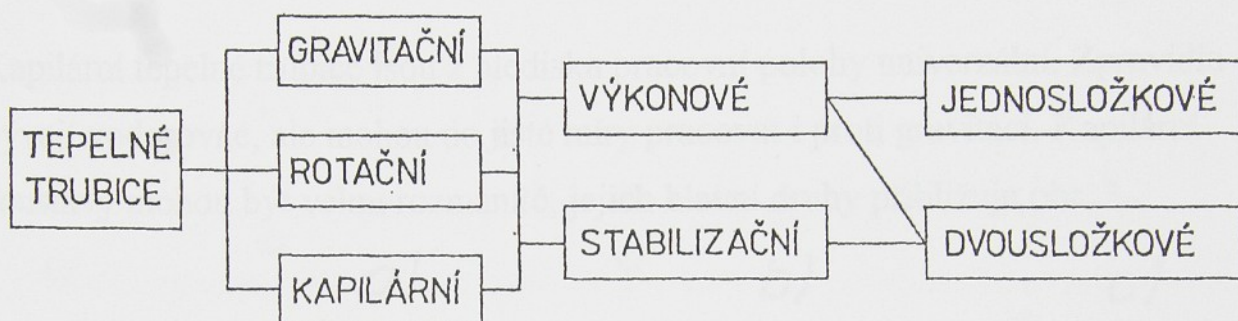


Obr. 1 Hlavní typy tepelných trubic, 1 - plášť, 2 - plnicí víčko, 3 - víčko, 4 - vrstva kondenzátu, 5 - kapilární soustava, L_K - kondenzační část, L_{ad} - adiabatická část, L_V - výparná část

Tepelná trubice se tedy chová jako by byla vyrobena z materiálu o velmi vysoké tepelné vodivosti, kolem $10^3 - 10^4 \text{ W/mK}$, což je mnohem více, než u přírodních materiálů, kde tepelná vodivost stříbra je asi 418 W/mK .

2.2 ROZDĚLENÍ TEPELNÝCH TRUBIC

V současnosti se využívá celá řada různých typů tepelných trubíc. Rámcové členění je na obr. 2.



Obr. 2 Rozdělení tepelných trubíc

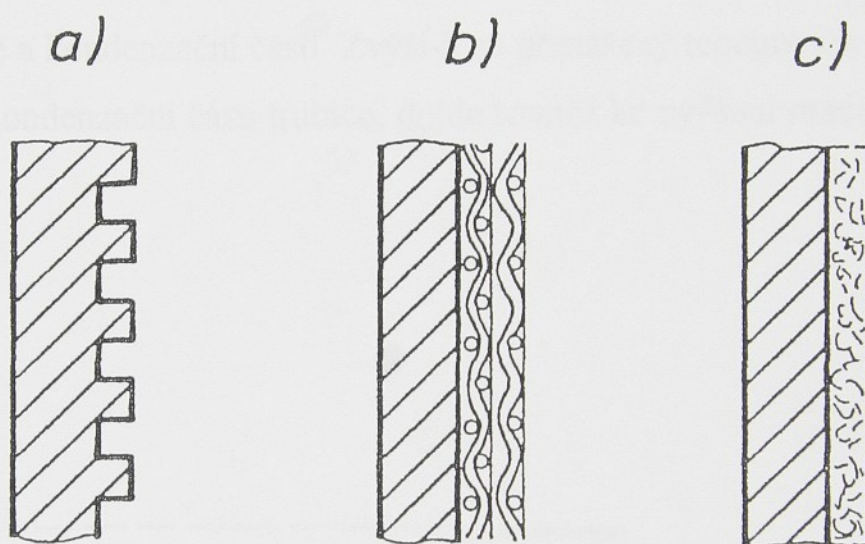
Podle způsobu zajištění vratného toku kondenzátu se člení tepelné trubice na tyto základní typy : - **gravitační**
- **rotační**
- **kapilární**

Gravitační tepelné trubice (obr. 1 a) jsou z uvedených typů výrobně nejjednodušší. Kondenzát natéká do výparné části po hladké vnitřní stěně působením tíže. Trubice tedy pracuje ve vertikální nebo skloněné poloze (až 75° odklon od vertikály) s výparnou částí umístěnou pod kondenzační.

U rotačních tepelných trubíc umožňuje návrat pracovní látky z kondenzační části do výparné odstředivé zrychlení.

Kapilární tepelné trubice mají na svém vnitřním povrchu vytvořenu kapilární soustavu, na níž v kondenzační části kondenzuje pracovní látka. Ta je působením kapilárního tlaku dopravována po celé ploše kapilární soustavy, tedy i do výparné části, kde dochází k opětovnému vypařování.

Kapilární tepelné trubice jsou z hlediska pracovní polohy univerzální. Zpravidla bývají vodorovné, ale mohou do jisté míry pracovat i proti gravitaci. Kapilární soustavy mohou být velmi rozmanité, jejich hlavní druhy přibližuje obr. 3.



Obr. 3 Charakteristické kapilární soustavy, a - drážková, b - sítová, c - spěkaná

K výrobně nejjednodušším patří drážkové kapilární soustavy a soustavy vytvořené několika vrstvami jemných kovových sít. Spojením těchto dvou systémů vznikne kombinovaná soustava s poměrně dobrými vlastnostmi. Síta mohou být také ke stěně přitlačována pružinou. Náročnější na technologii jsou různé druhy spěkaných soustav z prášků nebo vláken.

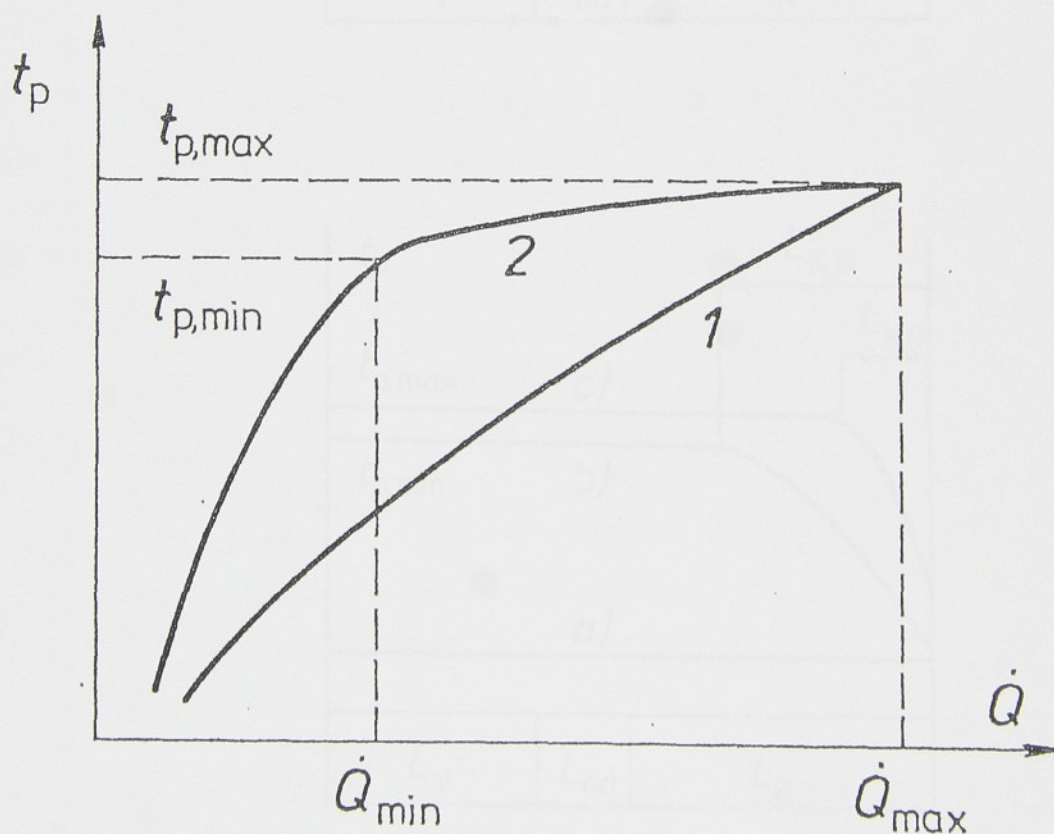
Kapilární tlak vznikající na styku kapaliny s povrchem kapilární soustavy, který způsobuje tok kapalně fáze pracovní látky z kondenzační do výparné části, roste s klesající velikostí pórů, čímž se však zároveň zvyšuje hydraulický odpor. Navrhnout optimální kapilární soustavu nebývá tedy snadné.

Z funkčního hlediska se tepelné trubice dělí na :

- **výkonové**, jejichž úkolem je pouze přenos často vysokého tepelného výkonu
- **stabilizační**, v nichž kromě pracovní látky je inertní plyn regulující pracovní teplotu

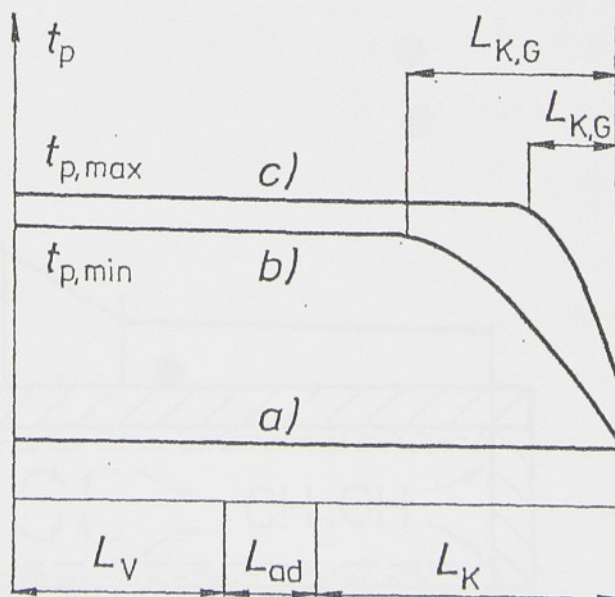
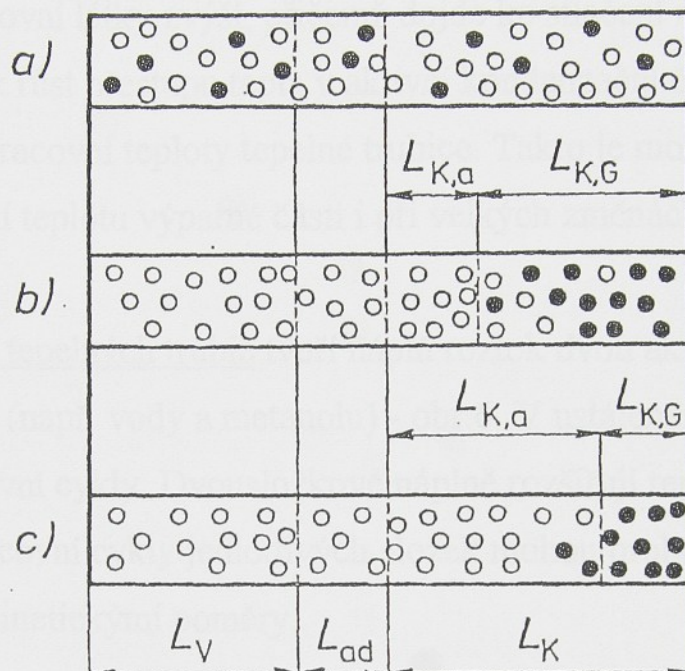
O stabilizačních tepelných trubicích:

Pracovní teplota výkonové tepelné trubice závisí na okrajových podmínkách (teplotách) ve výparné a kondenzační části. Zvýší-li se přenášený tepelný tok při nezměněné teplotě v kondenzační části trubice, dojde rovněž ke zvýšení pracovní teploty (obr.4).



Obr. 4 Činnost tepelných trubic, 1 - výkonová, 2 - stabilizační

Požaduje-li se udržení pracovní teploty v úzkém rozmezí, použije se stabilizační tepelná trubice. Činnost jedné její charakteristické varianty zobrazuje obr. 5.

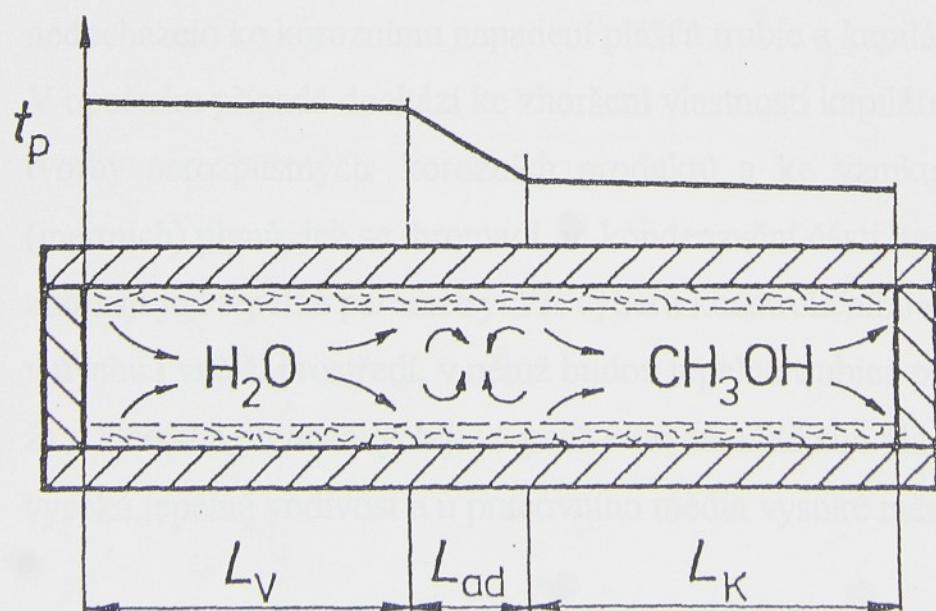


Obr. 5 Činnost stabilizačních tepelných trubic, L_{Ka} - aktivní úsek, L_{KG} - pasivní úsek, a - nulový výkon, b - nižší výkon, c - vyšší výkon, o - částice pracovní látky, ● - částice inertního plynu

Při přenášení tepelného výkonu proudí pára pracovní látky unášející inertní plyn do kondenzační části, kde se tento inertní plyn hromadí a vytváří tepelně málo aktivní oblast o délce L_{KG} . S rostoucím tepelným výkonem se rychlost proudění páry pracovní látky zvýší, přičemž dojde ke stlačení neaktivní oblasti, což má za následek růst přestupu tepla v aktivní kondenzační části s délkou L_K a tím i stabilizaci pracovní teploty tepelné trubice. Takto je možné udržet přibližně konstantní teplotu výparné části i při velkých změnách výkonu.

U dvousložkových tepelných trubic tvoří náplň roztok dvou aktivních teplonosných látek (např. vody a metanolu) - obr.6. V ustáleném stavu probíhají v trubici dva pracovní cykly. Dvousložkové náplně rozšiřují teplotní rozsah činnosti trubice, pracovní cykly jednotlivých složek mohou probíhat v oblastech s vhodnými termokinetickými poměry.

Kromě těchto základních typů existuje celá řada tepelných trubic lišících se tvarem (koaxiální) nebo způsobem činnosti (tepelné diody).



Obr. 6 Činnost dvousložkových tepelných trubíc

2.3 KONSTRUKCE TEPELNÝCH TRUBIC

Vlastnosti tepelných trubic, tj. tepelné, hydraulické a teplotní charakteristiky jsou dány přenosovými jevy při proudění kapalné parní fáze i při vypařování a kondenzaci pracovní látky. Tyto jevy ovšem může značně ovlivnit konstrukce trubic a technologie výroby.

Způsob zhotovení tepelných trubic závisí na mnoha faktorech, jako jsou pracovní teplota, použití, technologické možnosti pracoviště. Obecně lze říci, že tepelné trubice jsou výrobně náročnější než klasické výměníky tepla, složitost výroby je srovnatelná s výrobou kapalinových nebo dvoufázových výměníků.

2.3.1 Otázky použití materiálů a pracovních látek

Pro efektivní uplatnění tepelných trubic v pracovních podmínkách je třeba zajistit jejich spolehlivou a dlouhodobou činnost bez nežádoucích změn vlastností. Požadovaná životnost výměníku tepla z tepelných trubic je až 15 let. Proto je třeba volit teplotnosné látky a materiály tepelných trubic tak, aby nedocházelo ke koroznímu napadení plášťů trubic a kapilárních soustav látkou. V opačném případě dochází ke zhoršení vlastností kapilárních soustav vlivem tvorby nerozpustných korozních produktů a ke vzniku nekondenzujících (inertních) plynů, jež se hromadí v kondenzační části tepelné trubice, čímž zhoršují její tepelné parametry. Při výběru konstrukčního materiálu je třeba brát v úvahu i vnější prostředí, v němž budou tepelné trubice pracovat. Je zřejmé, že z hlediska přenosových jevů patří k nejdůležitějším vlastnostem u materiálu vysoká tepelná vodivost a u pracovního média vysoké měrné výparné teplo.

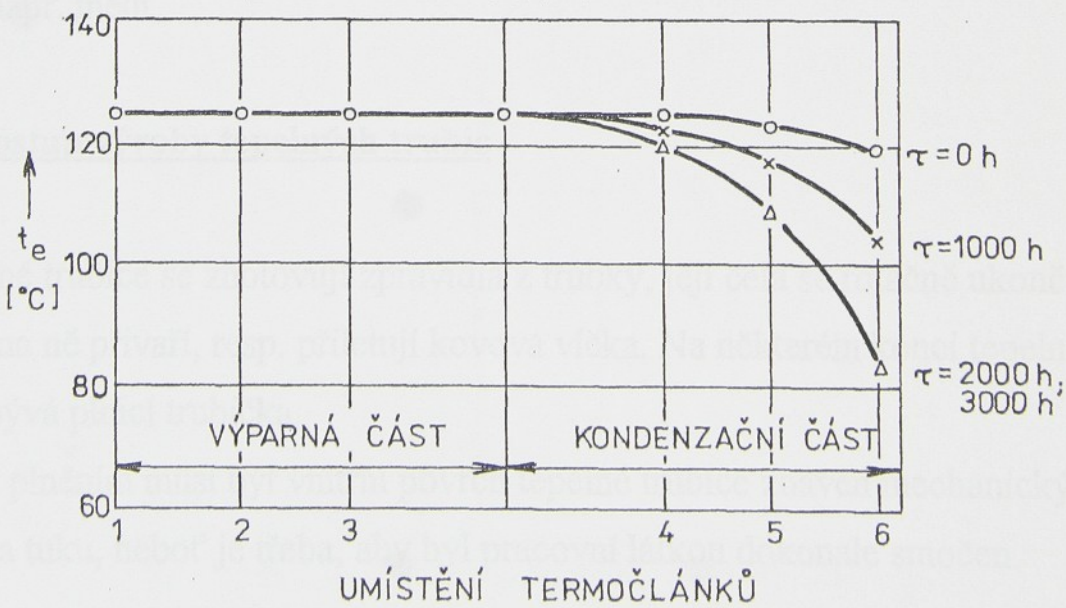
V současnosti běžně používané materiály a pracovní látky jsou uvedeny v tab. I.

Tab. I.

materiál	pracovní látka
měď	voda
hliník	etanol
ocel	amoniak
mosaz	toluen
nikl	difenyl
	difyl

Dlouhodobé zkoušky životnosti

Vhodnost kombinace materiálu pláště a pracovní látky se posuzuje při dlouhodobých zkouškách životnosti, kdy zkoušené tepelné trubice pracují při skutečných pracovních režimech. Vzniká-li při korozním napadení pláště pracovní látkou inertní plyn (vodík), dochází k jeho hromadění při provozu na konci kondenzační části (podobně jako u stabilizačních tepelných trubic), čímž se snižuje účinnost. Průběhy teplot po délce tepelné trubice během zkoušek jsou zakresleny na obr. 7.



Obr. 7 Průběh teplot podél vnějšího povrchu

Kompatibilita materiálů a teponosných látek

Měděná tepelná trubice s vodní náplní

Z výsledků chemických a metalografických zkoušek plyne, že tyto materiály jsou kompatibilní.

S měděnými plášti jsou dobře kompatibilní i aceton, metanol, difenyl, difyl, špatně naopak amoniak.

Hliníkové trubice s náplní amoniaku

Je-li amoniak bez vody, pracují tepelné trubice dlouhodobě a spolehlivě.

Ocelové tepelné trubice s vodní náplní

U tepelných trubic z legované oceli se zpočátku velmi rychle tvoří vodíkový polštář. Poté dojde k pasivaci a tvorba vodíku ustane.

Hliníkové tepelné trubice s vodní náplní

Z hlediska přenosových jevů jde o nejvhodnější kombinaci materiálu (vysoká tepelná vodivost a nízká hustota hliníku a vynikající termofyzikální vlastnosti vody). Dochází však k intenzivnímu koroznímu napadení hliníku vodou za tvorby vodíku. Na rozdíl od ocelových plášťů je tvorba vodíku nepřetržitá a velmi intenzivní. Jako řešení se nabízí pokovení vnitřního povrchu tepelné trubice např. mědí.

2.3.2 Postup výroby tepelných trubic

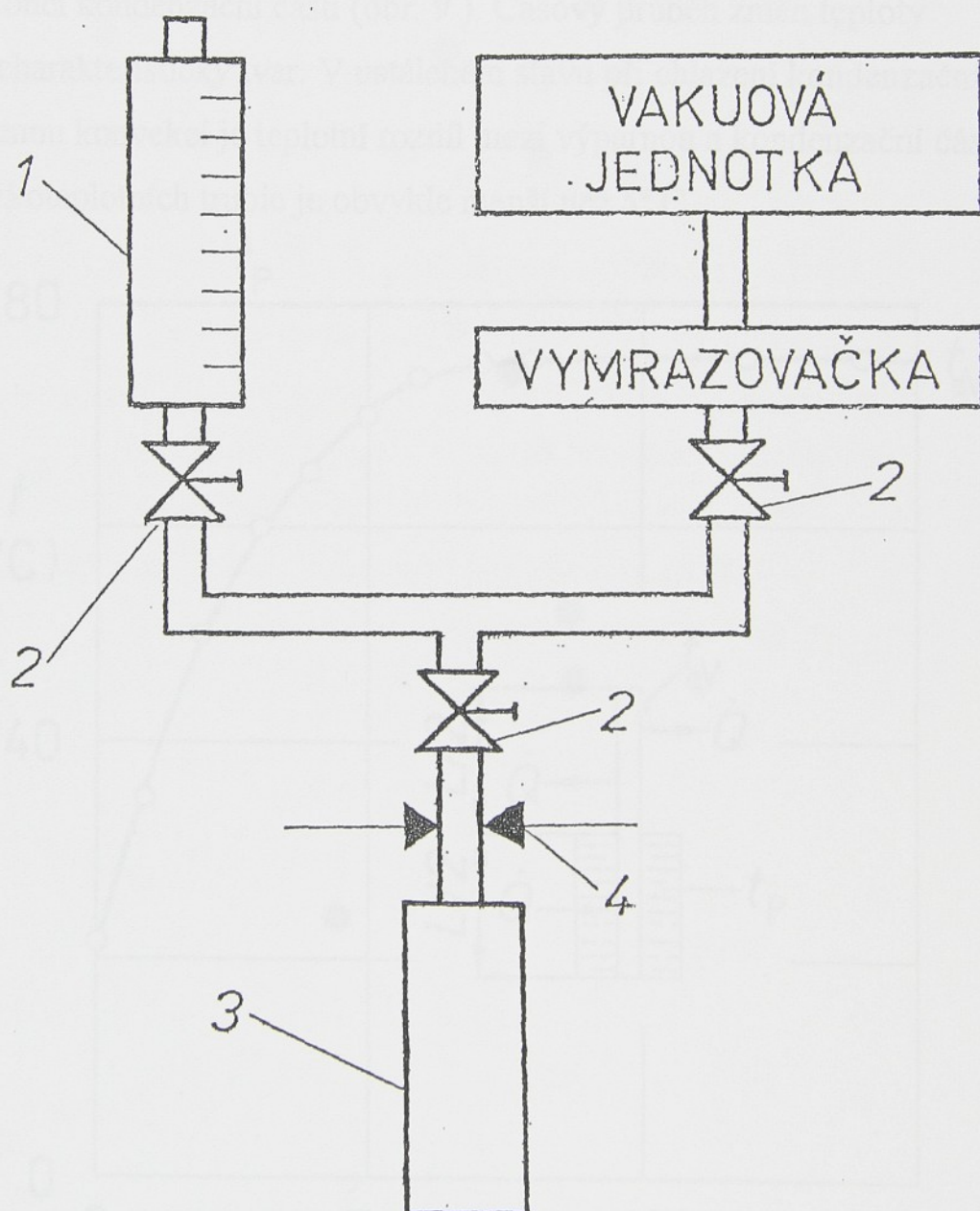
Tepelné trubice se zhotovují zpravidla z trubky, její čela se rotačně ukončí, nebo se na ně přivaří, resp. přiletují kovová víčka. Na některém konci tepelné trubice bývá plnicí trubička.

Před plněním musí být vnitřní povrch tepelné trubice zbaven mechanických nečistot a tuku, neboť je třeba, aby byl pracovní látkou dokonale smočen.

Zvláštní pozornost vyžadují kapilární soustavy. K dokonalému vyčištění se používají ultrazvukové čističky. Poté se trubice odplyňuje zahřátím na vyšší teplotu a evakuováním vývěvou.

Obvyklý postup při plnění tepelných trubice je znázorněn na obr. 8.

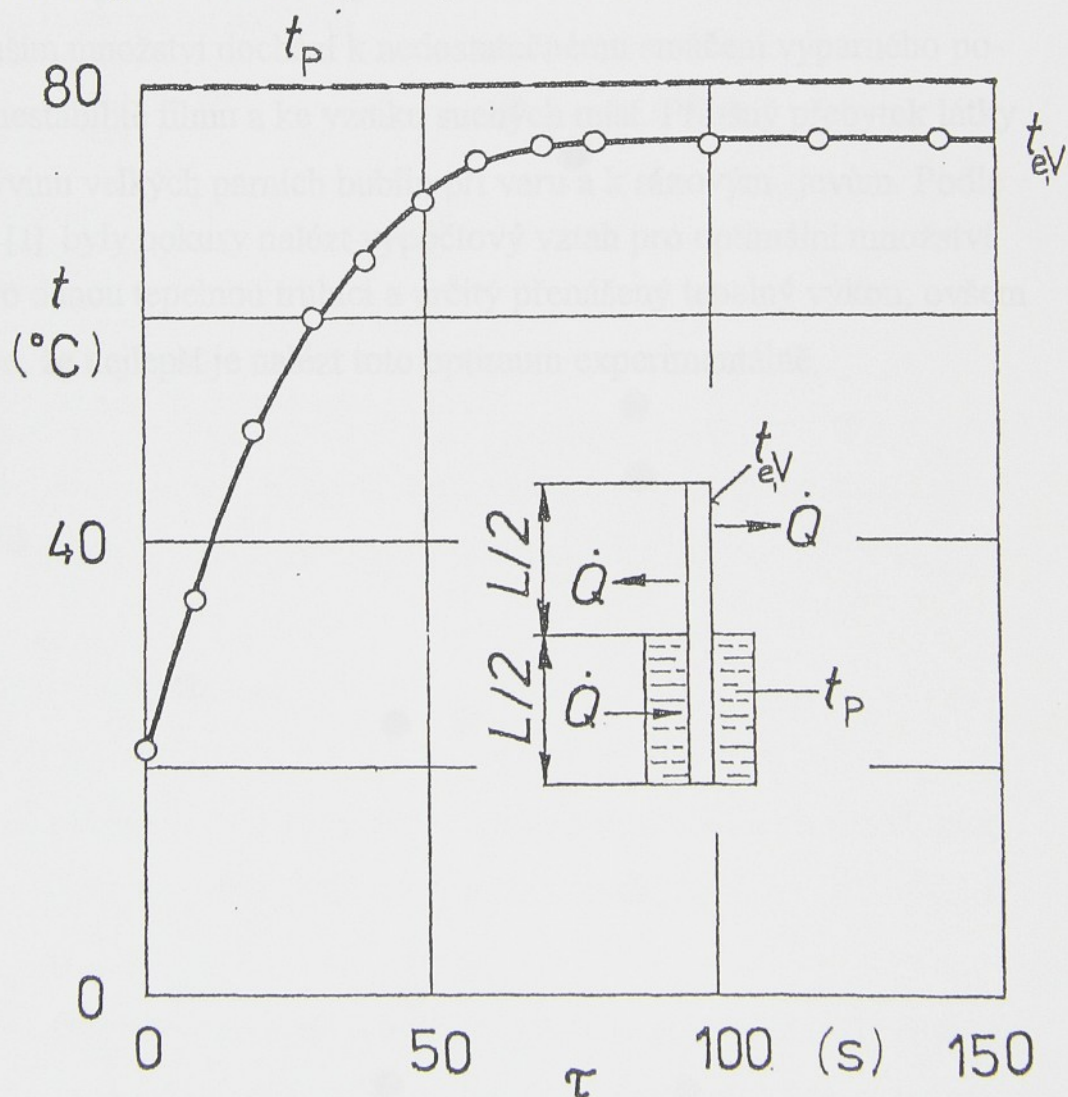
Z odměrového zásobníku se do tepelné trubice přepustí potřebné množství látky, jež musí být dokonale čistá, vakuovou jednotkou se odčerpá vzduch. Plnicí trubička se poté promáčkne.



Obr. 8 Plnění tepelné trubice, 1 - odměrná nádoba, 2 - uzavírací ventily, 3 - tepelná trubice, 4 - promáčknutí plnicí trubičky

2.3.3 Preventivní diagnostika

Cílem preventivní diagnostiky je prověření funkce tepelné trubice po jejím zhotovení. Těsnost plášťů se před plněním prověřuje tlakovým vzduchem. Hlavní prověrkou správného zhotovení tepelné trubice je stanovení tzv. náběhové charakteristiky. Jde o jednoduchou funkční zkoušku, jejíž podstata spočívá v ohřevu výparné části např. ponořením do horké kapaliny a měření teploty na konci kondenzační části (obr. 9). Časový průběh změn teploty by měl mít charakteristický tvar. V ustáleném stavu při chlazení kondenzační části přirozenou konvekcí je teplotní rozdíl mezi výparnou a kondenzační částí malý a u nízkoteplotních trubíc je obvykle menší než 5°C .



Obr. 9 Náběhová charakteristika tepelné trubice

U kapilárních tepelných trubíc se provádí navíc zkouška správné funkce kapilární soustavy. Tepelná trubice se ve vertikální poloze ohřívá v horní a chladí ve spodní části.

V ustáleném stavu by měl být teplotní profil vyrovnaný.

2.3.4 Vliv množství pracovní látky na výkon

Pro dobrou funkci musí být v tepelné trubici přiměřené množství pracovní látky. Uvádí se, že do gravitační tepelné trubice se vpraví množství látky v kapalném skupenství, které odpovídá asi 10 - 20 % vnitřního objemu trubice.

Při menším množství dochází k nedostatečnému smáčení výparného povrchu, k nestabilitě filmu a ke vzniku suchých míst. Přílišný přebytek látky vede k vývinu velkých parních bublin při varu a k rázovým jevům. Podle literatury [1] byly pokusy nalézt výpočtový vztah pro optimální množství náplně pro danou tepelnou trubici a určitý přenášený tepelný výkon, ovšem ukázalo se, že nejlepší je nalézt toto optimum experimentálně.

2.4 APLIKACE TEPELNÝCH TRUBIC

Tepelné trubice našly uplatnění v mnoha oborech a vyrábějí se v celé řadě různých provedení. Děje se tak pro jejich některé charakteristické vlastnosti, z nichž základní jsou uvedeny v tab. II., kterými se liší od klasických teplosměnných elementů.

Tab. II. Základní vlastnosti tepelných trubíc

Vysoká efektivní tepelná vodivost

vysoká izotermičnost podél celé délky,
stabilizace teploty při změně tepelného toku (u stabilizačního typu),
nízká tepelná kapacita,
nízká hmotnost,
mechanická pasivita,
bezhlučnost provozu,
nenáročnost na obsluhu,
rychlá časová změna teploty,
omezená univerzálnost v prostorovém uložení,
závislost tepelných parametrů na prostorovém uložení,
záměnnost míst ohřevu a chlazení trubice.

Průmyslové aplikace tepelných trubíc jsou zaměřeny zejména na úsporu energie a materiálu a na intenzifikaci chlazení v elektrotechnice a ve strojírenství.

Hlavní oblasti použití tepelných trubíc:

- **výměníky tepla** mezi plynnými nebo kapalnými prostředími.
- **přímé chlazení** rozmanitých komponent strojů nebo přístrojů, např. různých elektrotechnických součástí.

Důležité pro návrh aplikací tepelných trubíc je posouzení, zda jsou pro konkrétní případ výhodnější než klasické výměníky tepla statické nebo dynamické (nucené proudění).

Vhodnost tepelné trubice pro danou úlohu určují především okrajové podmínky, tj. přestup tepla ze zdroje do trubice, popř. z trubice do okolí u výměníků, kde je důležitý součinitel přestupu tepla α .

Případy aplikace tepelných trubic

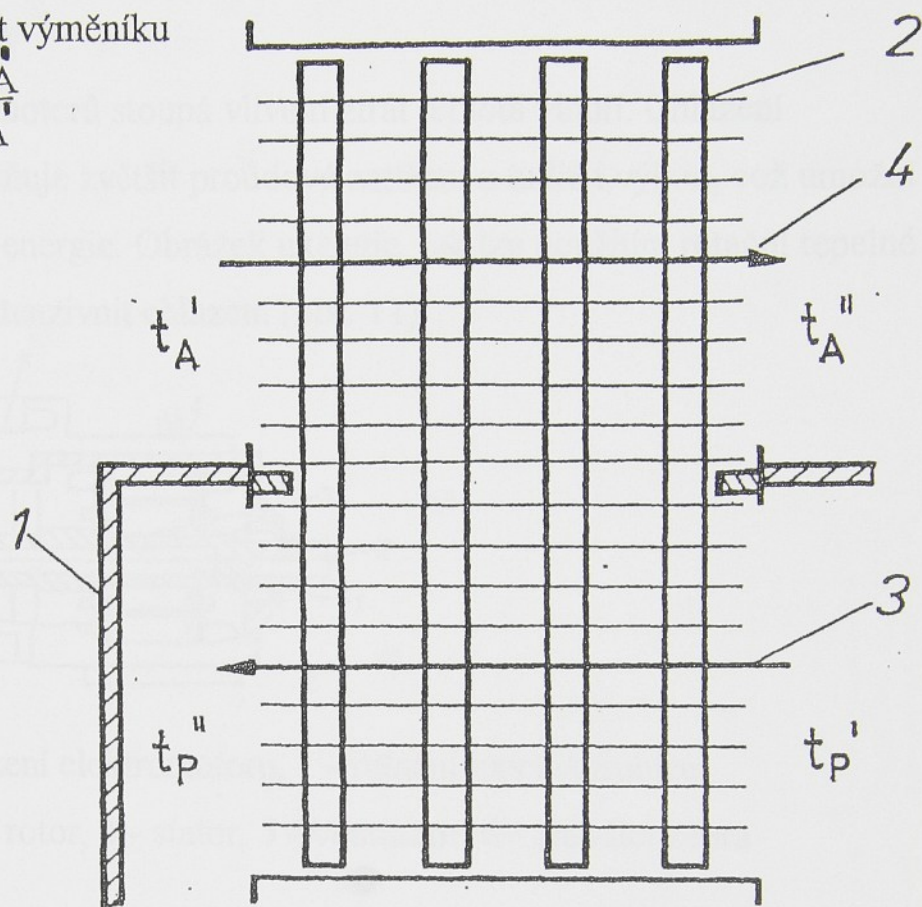
Výměníky tepla z tepelných trubic pro rekuperaci tepla

Z tepelných trubic sestavené výměníky tepla mohou v některých případech efektivně nahradit výměníky klasické i při běžném vysokoteplotním sdílení tepla. Tepelné trubice zde přinášejí výhody spočívající v zajištění lepších podmínek pro přenos tepla v čistém protiproudu na příčně obtékaných svazcích trubic s možností rozšířit teplosměnné plochy vnějším žebrováním. Nejzajímavější oblastí jejich použití je však nízkoteplotní rekuperace odpadního tepla, tedy problém zvláště aktuální při dnešní tíživé energetické situaci. Zde přináší výhodu zejména nízký vnitřní odpor tepelných trubic, který umožňuje přenášet vysoké tepelné toky i při malém rozdílu teplot. Nezanedbatelná je i skutečnost, že výměník lze dobře rozebírat a čistit, je možné dokonale oddělit ohřívané prostředí od chlazeného. Schéma výměníku s naznačeným žebrováním je na obr.10. Výměníky nalézají uplatnění při větrání a klimatizaci veřejných budov, sušáren, drůbežáren, odchovů dobytka apod. Používají se tepelné trubice z hliníkových válcovaných žebrovek plněné amoniakem, nebo měděné s hliníkovými lamelovými žebry plněné vodou.

Výměníky z tepelných trubic lze považovat za speciální případ okruhů s kapalným teponosným prostředníkem. Jsou však kompaktnější, proces probíhá při fázových změnách, je tedy intenzivnější.

Účinnost výměníku

$$\eta = \frac{t_A'' - t_A'}{t_P' - t_A'}$$



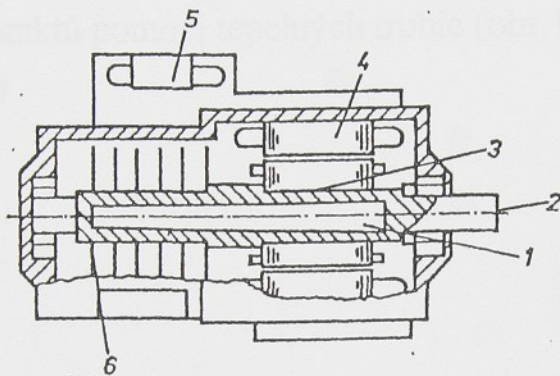
Obr. 10 Schéma výměníku tepla z tepelných trubíc, 1 - dělicí příčka, 2 - tepelné trubice s žebry, 3 - chlazená látka, 4 - ohřívaná látka

Chlazení uzavřených skříní v elektrotechnice

V elektrotechnice se používají uzavřené skříně s různým elektronickým řídicím a regulačním zařízením uvnitř. Dříve se chladily zejména chladiči s nuceným oběhem teplotnosného média. Je zřejmé, že výměník tepla z tepelných trubíc zde přináší výhody zejména v jednodušší konstrukci a spolehlivějším provozu. Uspořádání je podobné jako v předcházejícím odstavci.

Chlazení elektromotorů

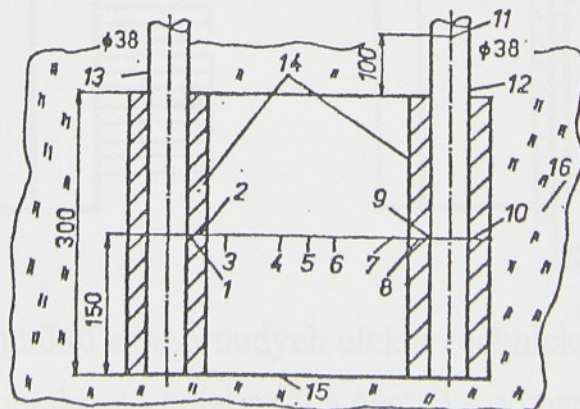
Při provozu elektromotorů stoupá vlivem ztrát teplota vinutí. Chlazení rotorového vinutí umožňuje zvětšit proudové zatížení a tudíž i výkon, což umožní lepší využití elektrické energie. Obrázek ukazuje, jak lze použitím rotační tepelné trubice v ose rotoru zintenzivnit chlazení (obr. 11).



Obr. 11 Schéma chlazení elektromotoru, 1 - rotační tepelná trubice, 2 - hřídel, 3 - rotor, 4 - stator, 5 - ventilátor, 6 - chladicí žebra

Lokální chlazení ocelových odlitků

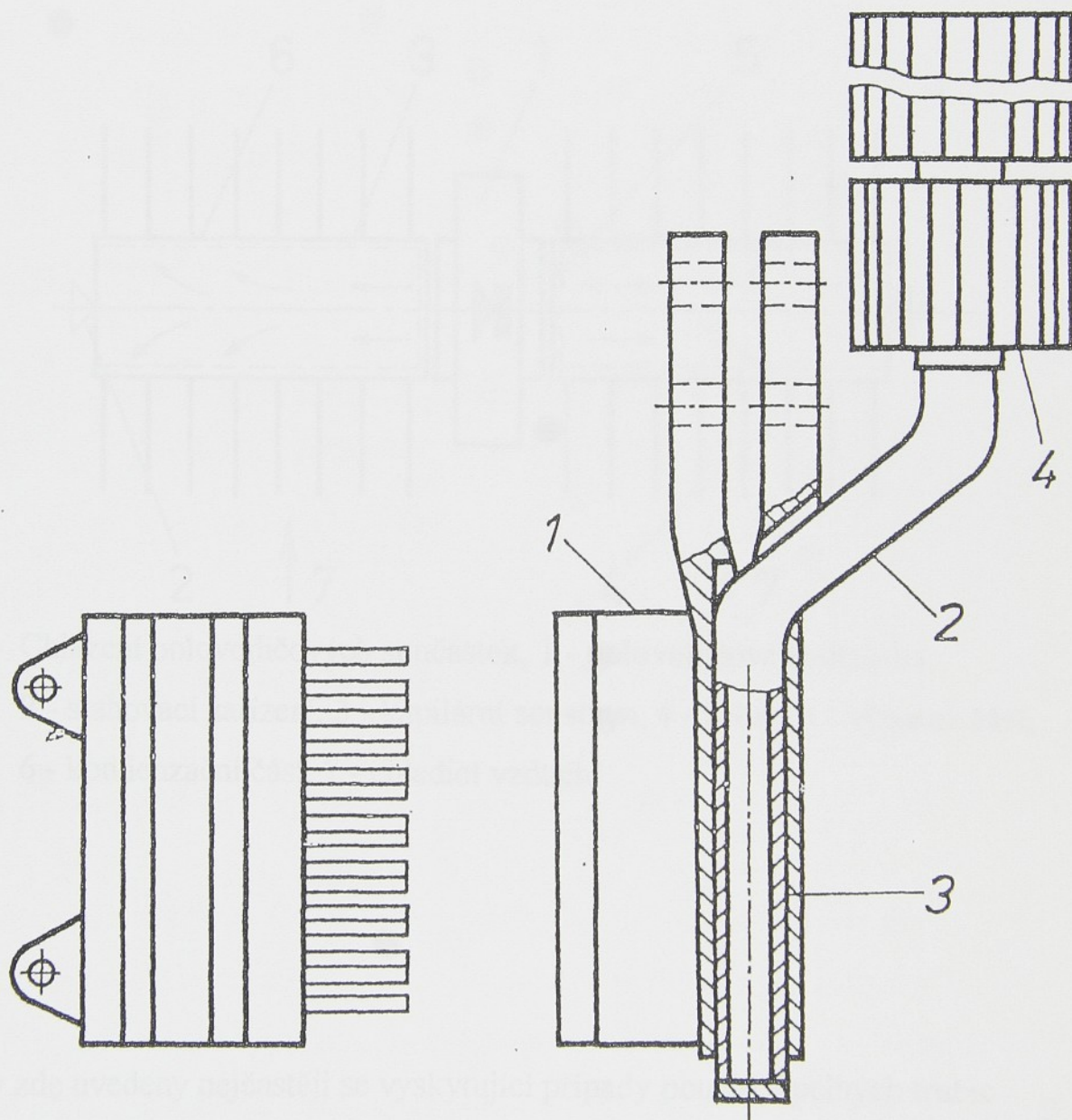
Procesy probíhající při tuhnutí odlitků, mají značný vliv na jejich kvalitu. Proto se snažíme tuhnutí řídit. Jedním ze způsobů je použití tzv. chladítek. Tepelná trubice použitá dle obr. 12 má chlazení urychlit. Podobně je možné tepelné trubice využít i k chlazení kovových forem při vstřikování plastů.



Obr. 12 Chlazení ocelových odlitků, 1, 2, ..., 11 - termočlánky, 12, 13- tepelné trubice, 14 - chladítko, 15 - odlitek, 16 - forma

Chlazení kontaktů silnoprůdých elektrotechnických zařízení

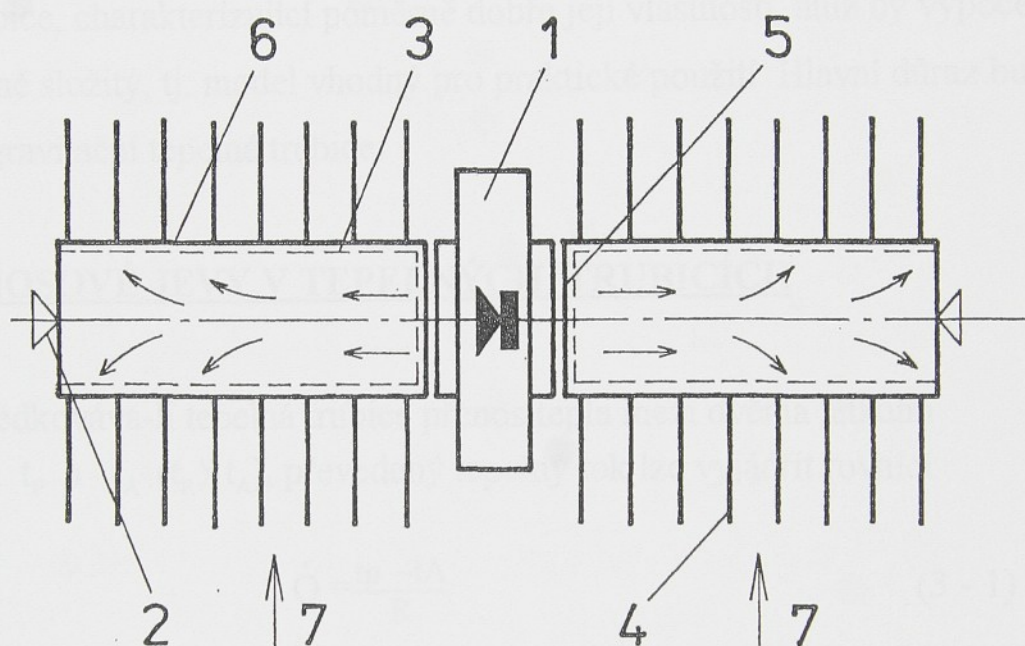
V místech násuvných kontaktů silnoprůdých elektrotechnických zařízení dochází vlivem přechodového odporu při průchodu elektrického proudu k nadměrnému oteplení, což snižuje zatížitelnost kontaktů. Řešení se našlo v podobě chlazení kontaktů pomocí tepelných trubic (obr. 13).



Obr. 13 Chlazení kontaktů silnoprůdých elektrotechnických zařízení,
1 - násuvný kontakt, 2 - adiabatická část, 3 - výparná část,
4 - kondenzační část s žebry

Chlazení polovodičových součástek

Teplo vznikající na P - N přechodu polovodičových součástek je nutno odvádět, neboť polovodiče jsou citlivé na vysoké teploty. Běžně používané kovové žebrované chladiče mohou být nahrazeny chladiči z tepelné trubice (obr. 14), které zajišťují chlazení při vyšších tepelných tocích.



Obr. 14 Chlazení polovodičových součástek, 1 - polovodičová součástka, 2 - stahovací zařízení, 3 - kapilární soustava, 4 - žebra, 5 - výparná část, 6 - kondenzační část, 7 - chladicí vzduch

Byly zde uvedeny nejčastěji se vyskytující případy použití tepelných trubice v praxi. Existuje ovšem celá řada dalších jejich aplikací např. v kosmické technice, jaderném průmyslu, ale i v domácnostech.

3. TEORETICKÝ VÝPOČET TEPELNÝCH TRUBIC

Přenosové jevy probíhající v tepelné trubici jsou složité na teoretický popis, proto se zpočátku zjišťovaly vlastnosti těchto prvků převážně experimentálně, což nebylo dostačující. Byl vytvořen na základě zkušeností výpočtový model tepelné trubice, charakterizující poměrně dobře její vlastnosti, aniž by výpočet byl neúnosně složitý, tj. model vhodný pro praktické použití. Hlavní důraz bude kladen na gravitační tepelné trubice.

3.1 PŘENOSOVÉ JEVY V TEPELNÝCH TRUBICÍCH

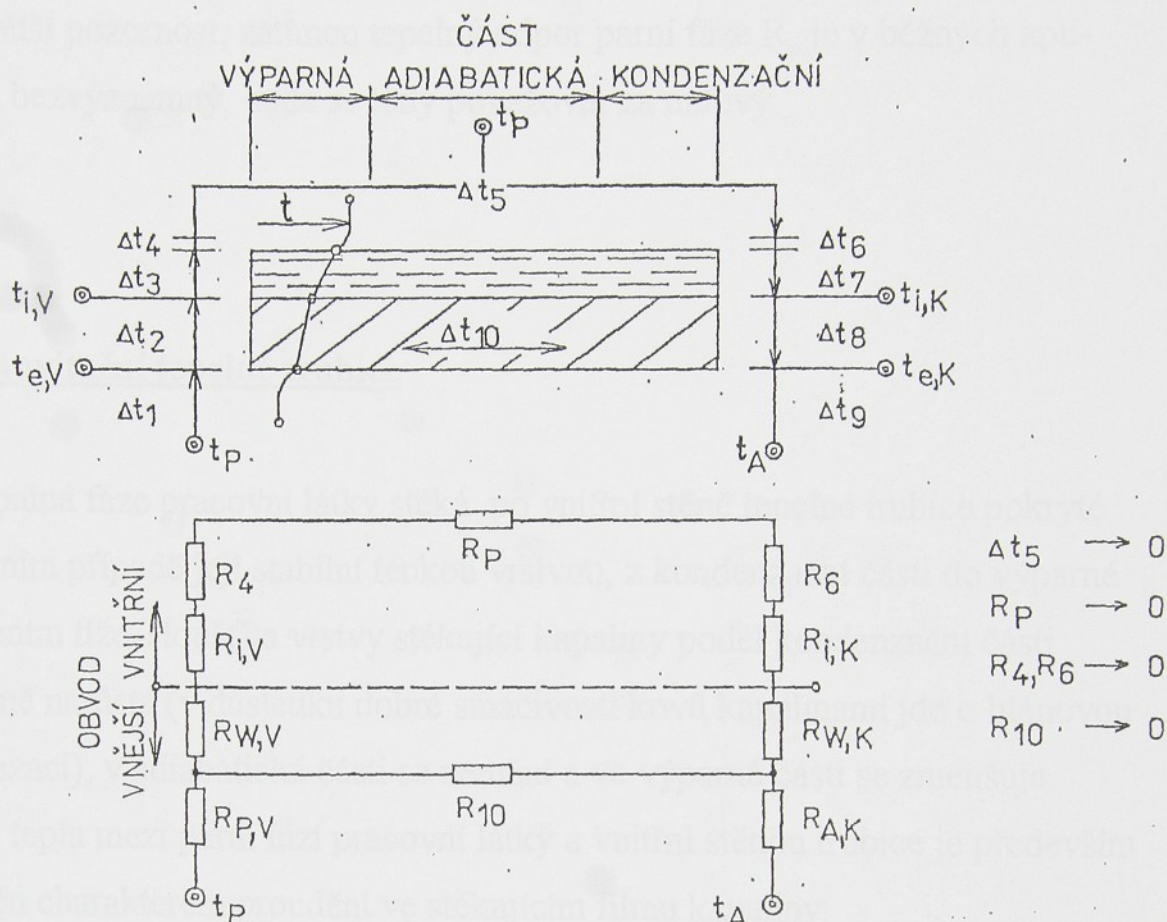
Zprostředkovává-li tepelná trubice přenos tepla mezi dvěma látkami o teplotách t_p a t_A ($t_p > t_A$), převedený tepelný tok lze vyjádřit rovnicí

$$\dot{Q} = \frac{t_p - t_A}{R} \quad (3 - 1)$$

Veličina R , tepelný odpor tepelné trubice, se dá dále rozepsat

$$R = R_{p,v} + R_{w,v} + R_i + R_{w,k} + R_{a,k} \quad (3 - 2)$$

Tepelné odpory $R_{p,v}$ a $R_{a,k}$ se vztahují k přenosu tepla mezi vnějším povrchem výparné a kondenzační části a okolním prostředím o teplotách t_p a t_A (obr. 15). Jejich výpočet se provádí zpravidla stejně jako u klasických výměníků tepla, např. podle Nusseltovy teorie při přestupu tepla. Veličiny $R_{w,v}$ a $R_{w,k}$ představují odpory při vedení tepla stěnou tepelné trubice ve výparné a kondenzační části a jejich stanovení málokdy činí nějaké potíže.



Obr. 15 Výpočtové schéma tepelného obvodu

Objektem zájmu v následných řádcích bude vnitřní tepelný odpor R_i , obecně závislý na druhu použité pracovní látky, na pracovní teplotě tepelné trubice a jejích geometrických parametrech a na přenášeném tepelném toku. Vnitřní tepelný odpor se skládá ze tří složek

$$R_i = R_{i,V} + R_p + R_{i,K},$$

které závisí na vnitřním mechanismu přenosu tepla a na proudění parní fáze pracovní látky. Veličiny $R_{i,V}$ a $R_{i,K}$ vyjadřují přenos tepla v tenkém filmu kapalné fáze pracovní látky ve výparné a kondenzační části gravitačních a rotačních tepelných trubíc, nebo tepelný odpor kapilární soustavy naplněné kapalinou u kapilárních trubíc, jsou pro funkci důležité, proto jim bude věno-

vána větší pozornost, zatímco tepelný odpor parní fáze R_p je v běžných aplikacích bezvýznamný, bude se tedy považovat za nulový.

3.1.1 Gravitační tepelné trubice

Kapalná fáze pracovní látky stéká po vnitřní stěně tepelné trubice pokryté v ideálním případě její stabilní tenkou vrstvou, z kondenzační části do výparné působením tíže. Tloušťka vrstvy stékající kapaliny podél kondenzační části postupně narůstá (v důsledku dobré smáčivosti kovů kapalinami jde o blánovou kondenzaci), v adiabatické části se nemění a ve výparné části se zmenšuje. Přenos tepla mezi parní fází pracovní látky a vnitřní stěnou trubice je především ovlivněn charakterem proudění ve stékajícím filmu kapaliny.

Bilance sil při proudění pracovní látky

Teoretické řešení laminárního proudění kapaliny po svislé stěně vychází z následujících předpokladů:

- setrvačné síly ve vrstvě kapaliny jsou zanedbatelné ve srovnání s viskózními,
- na fázovém rozmezí se neuvažuje působení třecích sil,
- fyzikální vlastnosti kapaliny se v uvažovaném rozmezí teplot nemění,
- proudění kapaliny ve vrstvě není ovlivňováno jejím povrchovým napětím.

Proudění popisuje Navier - Stokesova rovnice vyjadřující zákon zachování hybnosti v tekutině. V tomto případě jde o působení třecích a tíhových sil - stékání po svislé stěně. Zůstane tedy rovnice

$$\frac{d\tau}{dy} = \rho_L g \quad \tau \quad - \quad \text{napětí}$$

do níž se dosadí Newtonův vztah

$$\tau = \mu_L \frac{dw}{dy}$$

a dostane se následující diferenciální rovnice

$$\frac{d^2 w}{dy^2} = -\frac{g}{\nu_L}$$

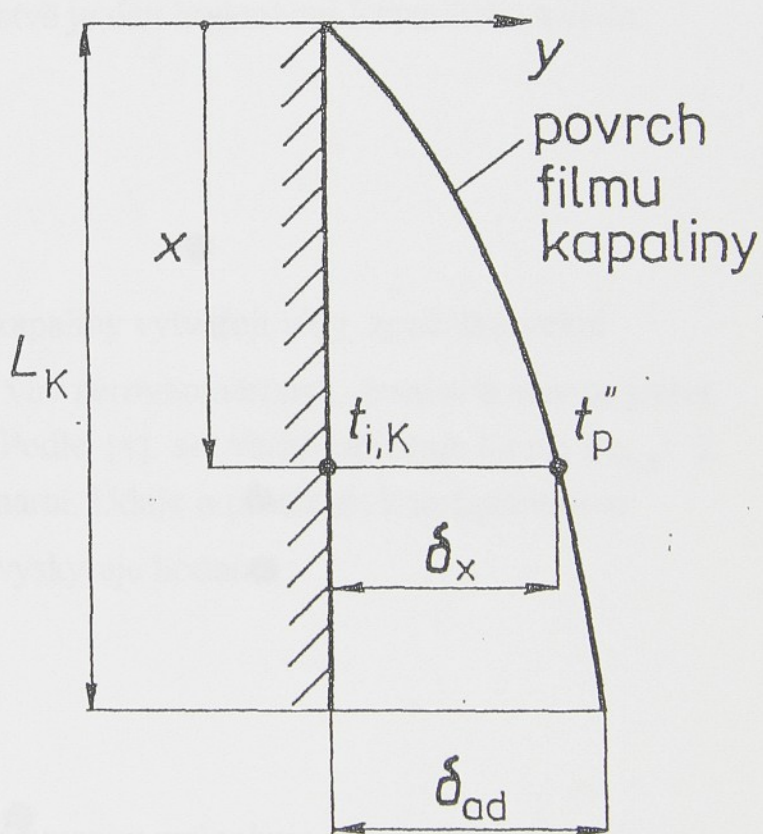
udávající rychlost kapaliny v závislosti na vzdálenosti od stěny (obr. 16).

Platí tyto okrajové podmínky:

$$y = 0 \Rightarrow w = 0 \quad y = \delta_x \Rightarrow \frac{dw}{dy} = 0$$

Řešení lze uvést ve tvaru

$$w = \frac{g\delta_x}{\nu_L} y - \frac{g}{2\nu_L} y^2$$



Obr. 16 Kondenzát stékající po stěně trubice

Střední rychlost kapaliny ve vzdálenosti x od počátku stékající vrstvy určuje integrál

$$w_{L, X} = \frac{1}{\delta_x} \int_0^{\delta_x} w dy = \frac{g}{3\nu_L} \delta_x^2 \quad (3-3)$$

odkud vyplývá vztah pro hmotnostní průtok v místě x

$$\dot{M}_{L,X} = \rho_L \cdot w_{L,X} b \delta_X = \frac{\rho_L g}{3 \nu_L} b \delta_X^3 \quad (3 - 4)$$

kde b je šířka stékající vrstvy (u kruhového průřezu tepelné trubice $b = \pi d_i$).

Charakter proudění

Charakter proudění ve stékající vrstvě je dán hodnotami Reynoldsova čísla.

$$Re_{L,X} = \frac{w_{L,X} \cdot \delta_X}{\nu_L} = \frac{g \delta_X^3}{3 \nu_L^2}$$

Při stékání se na volném povrchu kapaliny vytvářejí vlny, zpočátku velmi povlnné. Na jejich existenci mají vliv nerovnoměrnosti, drsnost a stav povrchu stěny, interakce s parní fází apod. Podle [4] se vlnění objevuje již při $Re_{L,X} = 2$ až 10. Struktura je však stále laminární. Údaje o přechodu k turbulentnímu proudění jsou různé, nejčastěji se vyskytuje hodnota

$$Re_{L,X} = 400,$$

v rozsahu od 250 do 1000. Zvlnění povrchu způsobuje, že tloušťka filmu je asi o 7 až 10 % menší, než při čistě laminárním proudění.

Kondenzace pracovní látky

Vyšetřování tohoto procesu bude prováděno za takovýchto předpokladů:

- teplota povrchu filmu je shodná s teplotou páry t_p''
- teplota kondenzátu u stěny je shodná s teplotou stěny $t_{i,K}$
- hustota páry je zanedbatelně malá ve srovnání s hustotou kapaliny
- přenos tepla ve vrstvě kondenzátu se děje pouze ve směru kolmém ke stěně
- proudění kondenzátu je laminární

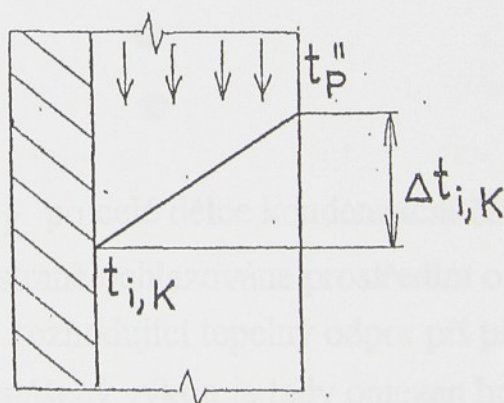
První z předpokladů znamená, že pro sdílení tepla je zde rozhodující tepelný odpor vrstvy kondenzátu, zatímco tepelný odpor na rozhraní pára - kapalina, který závisí na rozdílu v počtu molekul látky pohlcených povrchem nepatrně chladnější kapaliny a uvolněných z tohoto povrchu do parního prostoru, je málo významný a tudíž zanedbatelný.

Průběh teploty ve vrstvě kondenzátu je určen vztahem

$$t_L = t_{i,K} + \frac{\Delta t_{i,K}}{\delta_x} y ,$$

kde dle obr. 17

$$\Delta t_{i,K} = t_p'' - t_{i,K}$$



Obr. 17 Průběh teplot ve vrstvě kondenzátu

Lokální plošná hustota tepelného toku bude definována výrazem

$$\dot{q}_x = \lambda_L \frac{\Delta t_{i,K}}{\delta_x} \quad (3 - 5)$$

Uvažujeme-li elementární úsek vrstvy o výšce dx a šířce b , bude tepelný tok

$$d\dot{Q}_x = d\dot{M}_{L,x} l_v = \dot{q}_x b dx$$

Zkondenzovaná látka způsobí zvýšení hmotnostního průtoku a předá své výparné teplo, které je sdíleno vedením stékající vrstvou kondenzátu směrem ke stěně trubice.

Sem se dosadí ze vztahů (3 - 4) a (3 - 5) a dostane se diferenciální rovnice popisující změnu tloušťky vrstvy kapaliny podél souřadnice x

$$\text{pro } x = 0 \Rightarrow \delta_x = 0 \quad \delta_x = \left(\frac{4\nu_L \lambda_L \Delta t_{i,K} x}{1 \nu_L \rho_L g} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3 - 6)$$

Po dosazení do (3 - 5) bude lokální plošná hustota tepelného toku

$$\dot{q}_x = \left(\frac{1 \nu_L \rho_L g \lambda_L^3}{4 \nu_L x} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \Delta t_{i,K}^{\frac{3}{4}} \quad (3 - 7)$$

Z rovnice (3-7) by pro

$$x \rightarrow 0 \Rightarrow \dot{q}_x \rightarrow \infty$$

V reálných situacích není ovšem $\Delta t_{i,K}$ po celé délce kondenzační části konstantní. Tepelná trubice je na vnější straně ochlazována prostředím o teplotě t_A , pro sdílení tepla je tedy pro malá x rozhodující tepelný odpor při přestupu tepla na vnější ploše tepelné trubice. Přenášený výkon je tedy omezen hodnotou

$$q_{x, \max} = \alpha_A (t_p'' - t_A) \quad (3 - 8)$$

Vypařování pracovní látky

Při nižších tepelných tocích dochází ve výparné části tepelné trubice k povrchovému vypařování pracovní látky. Vztahy pro výpočet jsou podobné jako u kondenzace, tedy

$$\dot{q}_x = \left(\frac{l_v \rho_L g \lambda_L^3}{4 \nu_L (L_v - x)} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \Delta t_i^{\frac{3}{4}}, \quad v \quad (3 - 9)$$

V důsledku pseudolaminárního proudění je vrstva tenčí a tepelný tok je vyšší asi o 30 %.

Při zvýšené intenzitě přenosu tepelného toku nastává větší rozdíl teplot pracovní látky a stěny a dochází k přechodu k bublinkovému a poté i k blánovému varu. Bublinkový var představuje u gravitačních tepelných trubic žádoucí intenzifikaci přenosu tepla, blánový var je pak omezujícím tzv. výparným limitem.

Po zanedbání možných malých změn termofyzikálních vlastností látky plyne z rovnic pro tloušťku filmu - pro kondenzaci (3 - 6), podobně pro vypařování $\delta_x = \delta_{ad}$

$$\Delta t_{i,K} \cdot L_K = \Delta t_{i,V} \cdot L_V$$

$$\Delta t_i = t_{i,V} - t_{i,K} = \Delta t_{i,V} + \Delta t_{i,K}$$

z čehož plyne, že podle tohoto modelu je teplota páry t_p'' v celém parním prostoru stejná. Ve skutečnosti se ovšem mírně liší, tj. liší se i tlak páry, což obstarává její pohyb z výparné do kondenzační části tepelné trubice.

Platí-li

$$\dot{Q} = \dot{M}_{L,ad} l_V = \dot{M}_{P,ad} l_V$$

tj. množství kapalně a plynné fáze procházející adiabatickou částí jsou stejná, lze odtud vyjádřit, jaká je zde rychlost páry. U nízkoteplotních tepelných trubíc není příliš velká (asi do 10 m s^{-1}). Rozdíl středních tlaků ve výparné a kondenzační části se potom pohybuje okolo 100 Pa , čemuž odpovídá rozdíl teploty páry asi $0,1^\circ\text{C}$. Znamená to, že tepelný odpor parní fáze nehraje významnější roli. Nachází-li se uvnitř tepelné trubice současně obě fáze teplotnosné látky, odpovídá tlak v trubici teplotě syté páry. Dojde-li k vypaření veškeré kapaliny, řídí se poměry uvnitř stavovou rovnicí páry. Tento stav ovšem nastává zřídka.

Závislost výkonu na odporu a teplotním spádu

Střední plošná hustota tepelného toku v kondenzační a výparné části je určena integrály

$$\bar{\dot{q}}_K = \frac{1}{L_K} \int_0^{L_K} \dot{q}_x dx, \quad \bar{\dot{q}}_V = \frac{1}{L_V} \int_0^{L_V} \dot{q}_x dx$$

Po dosazení za $\dot{q}_x$ a provedení integrace obdržíme

$$\bar{\dot{q}}_K = 0,943 K_L L_K^{-\frac{1}{4}} \Delta t_i^{\frac{3}{4}} \text{ , } \bar{\dot{q}}_V = 0,943 K_L L_V^{-\frac{1}{4}} \Delta t_i^{\frac{3}{4}} \quad (3 - 10)$$

$$\text{zde } K_L = \left(\frac{1}{v_L \rho_L g \lambda_L^3} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ označíme jako } \underline{\text{látkový faktor}} \text{ přenosu tepla} \quad (3 - 11)$$

Tento faktor je hlavním kritériem hodnocení vhodnosti pracovních látek u tepelných trubíc.

Neuvažujeme-li tepelné ztráty, potom

$\dot{Q} = \pi d_i L_k \cdot \bar{q}_K = \pi d_i L_v \cdot \bar{q}_V$. Po dosazení (3 - 10) po úpravě dostaneme

$$\dot{Q} = K_Q \Delta t_i^{\frac{3}{4}}, \quad \text{kde } \Delta t_i = t_{i,V} - t_{i,K} \quad (3 - 12)$$

je rozdíl středních teplot výparné a kondenzační části a

z $t_{i,V}$, $t_{i,K}$ se vyloučí tp'' ;

$$K_Q = K_G \cdot K_L$$

$$K_G = 0,943 \cdot \pi d_i \cdot \left(\frac{L_K L_V}{L_K + L_V} \right)^{\frac{3}{4}} \text{ označíme jako } \underline{\text{geometrický faktor přenosu tepla}} \quad (3 - 13)$$

Termodynamické vlastnosti vztahujeme pro jednoduchost k pracovní teplotě tepelné trubice tp'' .

Významnou charakteristickou veličinou u tepelných trubíc je jejich vnitřní tepelný odpor R_i definovaný

$$R_i = \frac{\Delta t_i}{\dot{Q}} \quad (3 - 14)$$

Pomocí vztahu (3-12) dostaneme následující vzorce

$$R_i = K_Q^{-1} \Delta t_i^{\frac{1}{4}}, \quad \Delta t_i^{\frac{1}{4}} = K_Q^{-\frac{4}{3}} \cdot \dot{Q}^{\frac{1}{3}}$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta t_i}{R_i} = K_Q^4 R_i^3 \quad (3 - 15)$$

Je zde tedy nutno provádět výpočet iteračním postupem. Ukazuje se, že při $\Delta t_i < 8$ až 10° je možné použít místo rovnice (3 - 12) jednodušší závislost.

$$\dot{Q} = 0,72 K_Q \Delta t_i \quad (3 - 16)$$

Potom je vnitřní odpor určen vztahem

$$R_i = 1,4 \text{ K}_Q^{-1} \quad (3 - 17)$$

Ukazuje se při experimentech, že přijatý postup vede k výsledkům nevykazujícím příliš velké chyby.

Byly provedeny četné zkoušky se skloněnými tepelnými trubicemi z nichž plyne, že tepelný výkon se příliš nesnižuje až do odklonu 75° od vertikály.

Poměrně nízké hodnoty vnitřního odporu (při výpočtu výměníků z tepelných trubic se při prvním kroku považují za rovny nule) způsobují, že se, jak již bylo řečeno, tepelná trubice chová, jakoby byla zhotovena z materiálu s velmi vysokou tepelnou vodivostí. Vnitřní tepelnou vodivost lze definovat např. rovností

$$\frac{\Delta t_i}{R_i} = \frac{\pi d_i^2}{4} \frac{\lambda_i}{0,5(L_K + L_V)} \Delta t_i$$

odkud plyne

$$\lambda_i = \frac{2(L_K + L_V)}{\pi d_i^2 R_i} \quad (3 - 18)$$

3.1.2 Ostatní druhy tepelných trubic

Poměry v kapilárních, popř. rotačních tepelných trubicích jsou většinou stejné jako v gravitačních, rozdílný je především způsob dopravy kondenzátu zpět do výparné části.

Kapilární tepelné trubice

Dopravu kondenzátu z kondenzační do výparné části zde zajišťuje kapilární soustava. Povrch kapaliny v kapiláře vnořené do kapaliny vytváří tzv. meniskus. Při vydutém (konkávním) menisku vystoupí kapalina v kapiláře do výšky vztlínání H nad povrch ostatní kapaliny (kapilární elevace) a působí na ostatní kapalinu přidavným tzv. kapilárním tlakem, což je důsledkem povrchového napětí kapaliny. Kapilární tlak závisí hlavně na druhu materiálu použitého k výrobě kapilární soustavy. Výška vztlínání H a kapilární tlak rostou také se zmenšující se velikostí pórů, zároveň vzrůstá odpor průtoku a tlaková ztráta, jež je charakterizována tzv. permeabilitou kapilární soustavy.

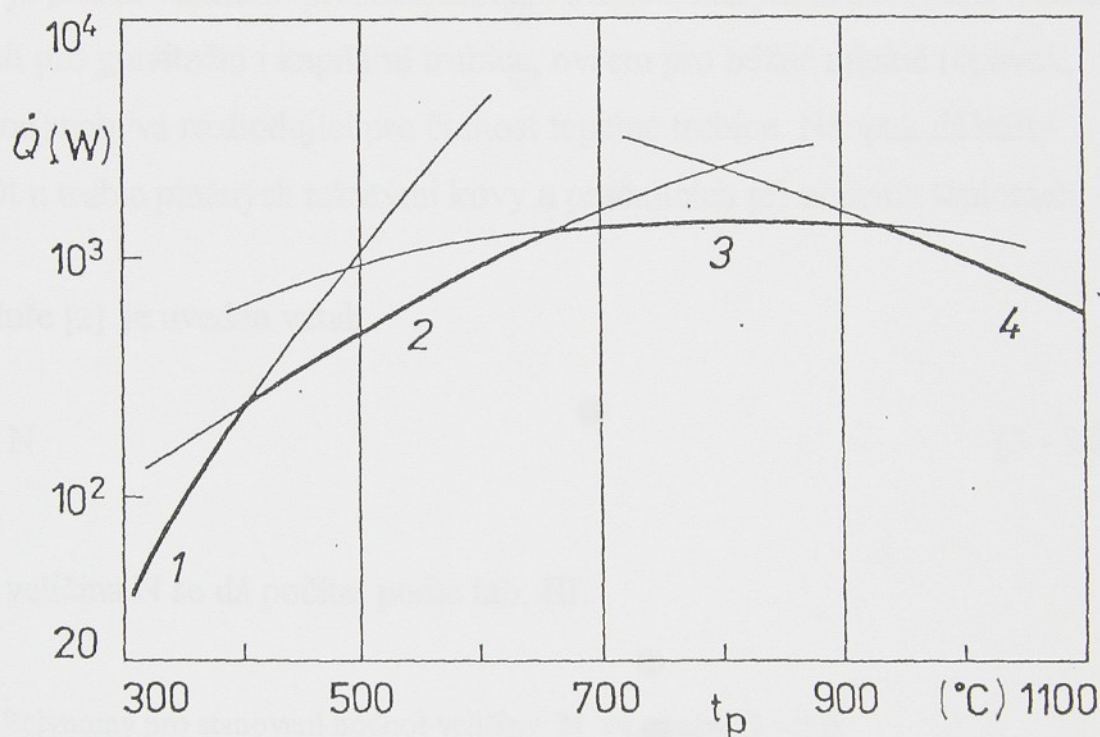
Přenos tepla mezi parní fází a stěnou trubice je dán kondenzací pracovní látky na povrchu kapilární soustavy. Při optimálním množství látky je kapilární soustava touto zcela zaplněna. Převládajícím mechanismem sdílení tepla je vedení kapilární soustavou směrem kolmým ke stěně. Výsledná tepelná vodivost leží mezi hodnotami pro pracovní látku a materiál kapilární soustavy. Definuje se proto tzv. efektivní tepelná vodivost λ_{ef} , jejíž výpočet pro běžně používané kapilární soustavy je např. v literatuře [3].

Rotační tepelné trubice

Pracovní látka v kapalné fázi se dopravuje působením odstředivých sil rychle rotující tepelné trubice. Hlavním tepelným odporem je opět odpor vedení tepla vrstvou kapaliny kolmo ke stěně.

3.2 VÝPOČET LIMITŮ TEPELNÉHO VÝKONU

Podle rovnice (3 - 1) roste tepelnou trubicí přenášený tepelný výkon především s rozdílem teplot, ovšem nikoliv donekonečna, růst je shora omezen tzv. limity tepelného výkonu. To, který z těchto limitů se uplatní, závisí především na pracovní teplotě trubice. Příklad takové závislosti je na obr. 18.



Obr. 18 Limity tepelného výkonu, 1 - sonický, 2 - interakční, 3 - kapilární, 4 - výparný

3.2.1 Sonický limit

Při zvyšování tepelného toku do výparné části tepelné trubice během startu trubic s náplní tekutých kovů nebo při nízkém tlaku nasycené páry může rychlost proudění páry v tepelné trubicí dosáhnout maximální rychlosti, tj. rychlosti zvuku. Vrchní hodnota tepelného výkonu při této rychlosti se označuje jako sonický limit.

Za předpokladu, že pára v tepelné trubici se chová jako ideální plyn a rychlost zvuku je dosažena v celém průřezu trubice rovnoměrně, určí se sonický limit vztahem

$$\dot{Q}_S = S_p \rho_P l_V \left[\frac{\kappa R T_P}{2 (\kappa + 1) M} \right]^{0,5}, \tag{3 - 19}$$

kde S_p je průřez vnitřního prostoru tepelné trubice, kterým proudí pára. Tento limit platí pro gravitační i kapilární trubice, ovšem pro běžné náplně (čpavek, voda apod) nebývá rozhodující pro činnost tepelné trubice. Naopak důležitý může být u trubic plněných tekutými kovy a pracujících při nízkých teplotách.

V literatuře [2] je uveden vztah

$$\dot{Q}_S = S_p \cdot N \tag{3 - 20}$$

přičemž veličina N se dá počítat podle tab. III.

Tab. III. Polynomy pro stanovení hodnot veličiny N ve vztahu (3 - 20)

Pracovní látka	koeficienty polynomu $N(t_p) = A + B t_p - C t_p^2$			teplotní rozmezí (° C)
	A	B	C	
čpavek	$8,92 \cdot 10^{-8}$	$3,18 \cdot 10^{-7}$	$3,15 \cdot 10^{-5}$	-20 - 90
metanol	$2,83 \cdot 10^{-7}$	$-3,39 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$	-20 - 120
etanol	$-8,57 \cdot 10^{-5}$	$2,02 \cdot 10^{-5}$	$5,19 \cdot 10^{-4}$	0 - 140
voda	$9,18 \cdot 10^{-5}$	$-2,03 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-4}$	40 - 220
toluen	$1,00 \cdot 10^{-8}$	$-2,86 \cdot 10^{-6}$	$2,68 \cdot 10^{-4}$	50 - 160
difyl	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$-2,55 \cdot 10^{-6}$	$8,82 \cdot 10^{-3}$	100 - 300
difenyl	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$-4,26 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	100 - 300

3.2.2 Výparný limit

Při ohřívání teplosměnného povrchu s vrstvou kapaliny na mezi sytosti lze sledovat tři známé základní režimy sdílení tepla. Se zvyšujícím se rozdílem teplot dochází k přechodu od povrchového vypařování k bublinkovému a posléze blánovému varu. Při bublinkovém varu dochází k narušení funkce kapilární soustavy u kapilárních tepelných trubíc, u gravitačních tepelných trubíc dojde při blánovém varu ke snížení intenzity přestupu tepla. Odpovídající mezní tepelné výkony se označují jako výparný limit. Výparný limit kapilárních tepelných trubíc se určuje velmi nesnadno, nejlepší je jeho přímé stanovení. Pro gravitační tepelné trubice je výparný limit určen vztahem

$$\dot{Q}_V = 0,16 \cdot S_{i,V} \cdot l_V \cdot \left[\sigma L g \rho_P^2 (\rho_L - \rho_P) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3 - 21)$$

nebo podle [2]

$$\dot{Q}_V = S_{i,V} \cdot N^* \quad (3 - 22)$$

kde N^* se určí dle tab. IV.

Tabl. IV. Polynomy pro stanovení hodnot veličiny - N^* ve vztahu (3 - 22)

Pracovní látka	Koeficienty polynomu $N^*(t_p) = A + B t_p + C t_p^2$			Teplotní rozmezí (°C)
	A	B	C	
čpavek	1 039 867,800	13 707,700	-119,300	0 - 80
metanol	154 989,900	4 831,700	23,990	20 - 120
etanol	64 164,600	8 802,700	-12,770	20 - 120
voda	-399 919,700	17 191,100	-31,020	40 - 120
toluen	72 915,400	1 054,900	3,560	50 - 160
difyl	4 674,100	224,200	2,530	100 - 300
difenyl	139 832,000	-1 060,300	3,700	100 - 300

Výparné limity bývají značně vysoké.

3.2.3 Interakční limit

S rostoucí rychlostí průtoku páry uvnitř tepelné trubice dochází k větší interakci parní a kapalné fáze. Třecí síly na povrchu kapaliny převyšují síly povrchového napětí, povrch je nestabilní, objevují se na něm vlny, později se z nich odtrhávají kapky. Od určité rychlosti páry proudění kapaliny do výparné části přestane, dojde k tzv. tepelnému zahlcení tepelné trubice, kdy ve výparné části se objevují suchá místa a tato se přehřívá. Odpovídající mezní tepelný výkon se nazývá interakční limit.

U gravitačních tepelných trubic se určí [2]

$$\dot{Q}_I = 26,6 \cdot \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot \dot{q}_V \cdot \Psi \quad (3 - 23)$$

Ψ je rovněž možno podle [2] určit z tab. V.

Tab. V. Polynomy pro stanovení hodnot veličiny Ψ ve vztahu (3 - 23)					
Pracovní látka	vnitřní rozměr d_i (m)	koeficient polynomu $\Psi(t_p) = A + Bt_p + Ct_p^2$			teplotní rozmezí (°C)
		A	B	C	
čpavek	0,015	0,283	-8,080	$2,634 \cdot 10^{-5}$	-20 - 80
metanol	0,015	0,393	$-7,00 \cdot 10^{-4}$	$-1,280 \cdot 10^{-6}$	20 - 120
etanol	0,015	0,422	$-1,98 \cdot 10^{-3}$	$6,79 \cdot 10^{-6}$	20 - 120
voda	0,015	0,393	-0,001	$1,913 \cdot 10^{-5}$	40 - 200
toluen	0,015	0,403	$-8,70 \cdot 10^{-4}$	$1,295 \cdot 10^{-6}$	50 - 160
difyl	0,015	0,437	$-3,9 \cdot 10^{-4}$	$-9,5 \cdot 10^{-8}$	100 - 300
difenyl	0,015	0,468	$-5,7 \cdot 10^{-4}$	0	150 - 300

Ukazuje se, že interakční limit silně závisí na termofyzikálních vlastnostech látek. Je vhodné vždy ho kontrolovat.

Při výpočtu interakčního limitu u kapilárních tepelných trubíc se vychází z Weberova čísla (We), které určuje poměr setrvačných sil parní fáze a síly povrchového napětí kapaliny.

Rovněž zde bývá interakční limit významný a je vhodné jej kontrolovat.

3.2.4 Kapilární limit

Z velikosti rozdílů kapilárních tlaků u kapilárních tepelných trubíc lze s ohledem na směr tíhového zrychlení a tlakovou ztrátu určit maximální možný průtok kapaliny kapilární soustavou v adiabatické části. Vynásobením měrným výparným teplem se dostane odpovídající přenášený tepelný výkon, jenž se označuje jako kapilární limit.

3.3 VYUŽITÍ POČÍTAČE PRO VÝPOČET VÝKONU GRAVITAČNÍ TEPELNÉ TRUBICE

3.3.1 Rozbor úlohy

Častým požadavkem při návrhu výkonové gravitační tepelné trubice je určení jí přenášeného tepelného výkonu při určité pracovní teplotě, pro určitou tepelnou trubici a při zadaných středních teplotách vnějšího povrchu výparné a kondenzační části. Je tedy zapotřebí určit podle (3 - 1) odpor R , který se v tomto případě skládá podle (3 - 2) z odporu vnitřního a odporu stěn. Není tedy možné využít jednodušší vztah (3 - 12), ale vztah (3 - 14) resp. (3 - 1), kde nastává nutnost provádět iterační výpočet. Zároveň je ve výsledném vztahu velké množství různých parametrů, často závislých na teplotě. Ukazuje se tedy vhodnost provádět tento výpočet s využitím počítače.

Shrňme-li si situaci, máme gravitační výkonovou tepelnou trubici naplněnou optimálním množstvím látky a pracující ve svislé poloze, kde je dáno:

- rozměry L_K, L_V, d_e, d_i
- materiál pláště
- druh pracovní látky
- střední teploty vnějšího povrchu výparné a kondenzační části $t_{e,V}, t_{e,K}$

Je třeba tepelný výkon $\dot{Q}$ přenášený tepelnou trubicí v ustáleném stavu.

Všechny veličiny závislé na teplotě se vztahují k pracovní teplotě tepelné trubice t_p

$$t_p = \frac{t_{e,V} + t_{e,K}}{2} \quad \text{pro} \quad L_K = L_V$$

Ze zadaného materiálu pláště se určí jeho tepelná vodivost $\lambda(t)$, podle druhu pracovní látky se určí veličiny $l_v, \lambda_L, v_L, \rho_L$, které jsou rovněž závislé na teplotě.

Platí následující vztahy : (3 - 1) , (3 - 2) , (3 - 15) $\Rightarrow$

$$\dot{Q} = \frac{t_{e,V} - t_{e,K}}{\frac{1}{\dot{Q}^3 K_Q^3} + R_{KV}} \quad \text{a} \quad (3 - 11) , \quad (3 - 13) :$$

$$K_G = 0,943 \pi d_i \left(\frac{L_K L_V}{L_K + L_V} \right) \quad K_L = \left(\frac{1}{v_L} \frac{\rho_L g \lambda_L^3}{v_L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad K_Q = K_G K_L$$

Ze známé rovnice pro vedení tepla stěnou plyne vztah pro tepelný odpor pláště

$$R_{KV} = \frac{d_e - d_i}{2 \pi d_i \lambda (L_K + L_V)}$$

Aby se plně využila výhodnost počítačového zpracování, je výhodné naprogramovat určení parametrů λ , l_v , λ_L , v_L , ρ_L , pro nejběžnější materiály a látky, tedy mít možnost obejít se bez použití tabulek.

V tab.VI jsou hodnoty látkového faktoru K_L pro nejběžnější pracovní látky při různých teplotách K_L pro ostatní teploty (tj. pracovní teploty) se určí interpolací.

Jelikož při běžných pracovních podmínkách pro většinu látek nedochází zpravidla k překročení výparného ani sonického limitu [2] , je kontrolován pouze interakční limit tepelného výkonu.

Tab VI. Hodnota látkového parametru K_L [$Wm^{-1,75} . K^{-0,75}$] pro náplně tepelných trubíc

Teplota °C	-20	0	20	40	60	80	100	150	200	250	300
Čpavek	8 320	7 690	7 060	6 440	5 810	5 180					
Metanol	2 810	2 900	3 080	3 310	3 550	3 750	3 850				
Etanol	1 830	1 980	2 220	2 475	2 690	2 780	2 735	1 870			
Aceton	2 760	2 770	2 810	2 800	2 770	2 700	2 550	2 200			
Voda				9 790	10 820	11 670	12 360	13 290	13 180		
Toluen					1 910	1 930	1 920	1 820			
Difyl							1 750	1 750	1 740	1 720	1 690
Difenylyl							1 765	1 810	1 875	1 890	1 810

Ze vztahů (3 - 22) a (3 - 23) plyne

$$\dot{Q}_I = \pi d_i^2 \cdot 6,68 \cdot \psi \cdot N^*$$

přičemž parametry ψ a N^* jsou určovány dle tab. IV a tab. V

Program je sestaven v jazyce Turbopascal.

3.3.2 Výpis programu

POPIS PROGRAMU

Program slouží k výpočtu výkonu gravitační tepelné trubice.
Je použita numerická iterační metoda.

Výpis proměnných:

KG geometrický faktor přenosu tepla
KL látkový faktor přenosu tepla
KQ parametr (KG.KL)
LK délka kondenzační části tepelné trubice (m)
LV délka výparné části tepelné trubice (m)
Q tepelný výkon přenášení tepelnou trubicí (W)
Q1 první hodnota iterace
RKV tepelný odpor pláště tepelné trubice
LAMBDA ... tepelná vodivost materiálu pláště ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
LAMBDAL .. tepelná vodivost materiálu látky ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
mi kinematická viskozita látky ($m^2.s^{-1}$)
roL hustota látky ($kg.m^{-3}$)
dl vnější průměr pláště tepelné trubice (mm)
di vnitřní průměr pláště tepelné trubice (mm)
g tíhové zrychlení ($9.81 m.s^{-2}$)
l měrné výparné teplo látky ($J.kg^{-1}$)
tek střední teplota vnějšího povrchu pláště tepelné trubice
v kondenzační části ($^{\circ}C$)
tev střední teplota vnějšího povrchu pláště tepelné trubice
ve výparné části ($^{\circ}C$)
TP pracovní teplota trubice
pi Ludolfovo číslo 3.1415927
eps přesnost iterace
N hodnota polynomu pro výpočet interakčního limitu
PSI hodnota polynomu pro výpočet interakčního limitu
QI interakční limit (W)
K vyjadřuje hodnotu sloupce v poli KPN charakterizující
hodnotu látkového parametru (je to celočíselná vzdálenost
teploty TP od $-20^{\circ}C$ na číselné ose po deseti stupních)
I hodnota řádku v poli KPN. Je to vlastně typ pracovní látky.
klavesa .. proměnná obsahující stisknutou klávesu
soubor ... název vstupního souboru dat definovaný překladačem
cesta cesta k souboru převzata z operačního systému
fileinfo.. informace o cestě k souboru dat
podmínka.. nabývá hodnoty pravda (True) a nepravda (False) dle splnění
podmínky doporučené pracovní teploty
oprava ... nabývá hodnoty pravda (True) a nepravda (False) dle splnění
podmínky opakovaného zadání (opravy)
rucne návěští (pro příkaz skoku) na ruční zadání hodnot, přehledu
prehled ... zadáných hodnot, opravy hodnot tepelné vodivosti a pracov
tepvod ... látky
pl
TDZ pomocná proměnná pro dimenzování pole hodnot
KPN pole obsahující tab. I: "Hodnota látkového parametru KPN
náplně tepelných trubic"
řádky obsahují typ náplně, sloupce obsahují hodnoty KPN po
 $10^{\circ}C$ tabulka byla rozšířena z důvodu konstantní posloup
nosti teplot u všech látek a tím jednoduššího zadávání.
Hodnoty nedefinované pro danou látku byly z formálního
hlediska nahrazeny nulami a rozmezí teplot je ošetřeno
podmínkou (viz proměnná podmínka)

V první části programu zabývající se zadáním se hledá soubor "data.dat" sloužící k rychlému zadání základních hodnot i jako přenos vstupních dat z jiných programů. Konvence zápisu v datovém souboru je následující: hodnoty jsou zadány po řádcích v pořadí de, di, LV, LK, tek, tev, lambda, l, lambdal, mi, rol. V případě nálezů souboru je nabídnuto, zda se má ze souboru číst. Pokud ne, zadávají se potřebné hodnoty ručně.

Dále přichází na řadu zadání hodnot. Je zde použita možnost výběru typické látky pro snazší zadání základních parametrů nejběžnějších médií. Zde je použito tabulky hodnot látkového parametru KPN pro naplně tepelných trubíc.

Ve třetí fázi je nabídnut přehled zadaných hodnot pro případnou opravu. Pokud je vybrána oprava části zadání ovlivňující i ostatní veličiny, v programu jsou nabídnuty i hodnoty původní nevybrané k opravě.

Následuje část vlastního výpočtu výkonu Q a interakčního limitu QI s výpisem hodnot po bloku, zabírající jednu obrazovku. Je zde kontrolována chyba při odmocnině záporného čísla, protože n -tá odmocnina je nahrazena logaritmem. V případě, že hodnota interakčního limitu není známa, je nahrazena upozorněním. Smyčka iterace je uzavřena a opakuje se na žádost obsluhy.


```
PROGRAM ITERACE;
uses Dos,Crt;
var
KG,KL,KQ,LK,LV,Q,q1,RKV,lambd,lambdL,mi,roL,de,di,g,l,tek,tev:real;
TP,pi,eps,N,PSI,QI:real;
K,I,zmena,prlatka:integer;
klavesa:char;
soubor:text;
cesta:PathStr;
fileinfo:SearchRec;
podminka,oprava:Boolean;
label rucne,prehled,tepvod,pl;
TYPE
TD2 = ARRAY[1..8,1..33] OF REAL;
CONST
KPN : TD2 = (
{1}(8320,8005,7690,7375,7060,6750,6440,6125,5810,5495,5180,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0),
{2}(2810,2855,2900,2990,3080,3195,3310,3430,3550,3650,3750,3800,3850,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0),
{3}(1830,1905,1980,2100,2220,2347.50,2475,2582.50,2690,2735,2780,2757.50,2735,2518.75,2302.50,2086.25,1870,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0),
{4}(2760,2765,2770,2790,2810,2805,2800,2785,2770,2735,2700,2625,2550,2462.50,2375,2287.50,2200,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0),
{5}(0,0,0,0,0,0,9790,10305,10820,11245,11670,12015,12360,12546,12732,12918,13104,13290,13268,13246,13224,13202,13180,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0),
(0,0,0,0,0,0,0,1910,1920,1930,1925,1920,1900,1880,1860,1840,1820,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0),
(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1750,1750,1750,1750,1750,1750,1748,1746,1744,1742,1740,1736,1732,1728,1724,1720,1714,1708,1702,1696,1690),
(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1765,1774,1783,1792,1801,1810,1823,1836,1849,1862,1875,1878,1881,1884,1887,1890,1874,1858,1842,1826,1810)
);
begin
ClrScr;
g:=9.81;
pi:=3.1415927;
zmena:=1;
oprava:=False;
FindFirst('data.dat',Archive,fileinfo);
if (DosError > 0) then goto rucne;
Assign(soubor,fileinfo.Name);
Writeln ('EXISTUJE DATOVÝ SOUBOR MÁM JEJ POUŽÍT ???? A/N');
klavesa:=Readkey;
if ((klavesa='N') OR (klavesa='n')) then goto rucne;
Reset (soubor);
Read (soubor,de);
Read (soubor,di);
Read (soubor,LV);
Read (soubor,LK);
```



```

Read (soubor,tek);
Read (soubor,tev);
Read (soubor,lambda);
Read (soubor,l);
Read (soubor,lambdaL);
Read (soubor,mi);
Read (soubor,roL);
podminka:=False;
prlatka:=9;
TP:=(tek+tev)/2;
KL:=((l*roL*g*lambdaL*lambdaL*lambdaL)/mi);
KL:=exp(1/4*ln(KL));
goto prehled;
rucne:
ClrScr;
Writeln ('VÝPOČET VÝKONU GRAVITAČNÍ TEPELNÉ TRUBICE');
Writeln ('-----');
Writeln ('Zadej hodnoty:');
Writeln ('Vnější průměr pláště tepelné trubice de [mm] ');
Read (de);
Writeln ('Vnitřní průměr pláště tepelné trubice di [mm]');
Read (di);
Writeln ('Délka výparné části tepelné trubice Lv [m]');
Read (LV);
Writeln ('Délka kondenzační části tepelné trubice Lk [m] ');
Read (LK);
Writeln ('Střední teplota vnějšího povrchu pláště ');
Writeln ('tepelné trubice v kondenzační části [ C]');
Read (tek);
Writeln ('Střední teplota vnějšího povrchu pláště ');
Writeln ('tepelné trubice ve výparné části [ C]');
Read (tev);
tepvod:
ClrScr;
Writeln ('Tepelná vodivost materiálu pláště [W/m.K]');
Writeln ('-----');
Writeln (' Materiál                lambda');
Writeln (' 1-Měď ..... 394');
Writeln (' 2-Hliník ..... 209');
Writeln (' 3-Ocel ..... 47');
Writeln (' 4-Mosaz ..... 112');
Writeln (' 5-Nikl ..... 87');
Writeln (' 6-Jiný materiál');
Write ('Vyber si: ');
Read(zmena);
case zmena of
    1:lambda:=394;
    2:lambda:=209;
    3:lambda:=47;
    4:lambda:=112;

```



```

5:lambda:=87;
6:BEGIN
    Write('Napiš hodnotu');
    Read(lambda);
    END;
end;
IF (oprava=true)then goto prehled;
pl:
TP:=(tek+tev)/2;
ClrScr;
Writeln ('Zadání pracovní látky - pracovní teplota tp:',tp:3:1,[' C']);
Writeln ('-----');
Writeln ('prac.látka           doporučená prac. teplota [ C]');
Writeln (' 1-Čpavek ..... -20 až 80');
Writeln (' 2-Metanol ..... -20 až 100');
Writeln (' 3-Etanol ..... -20 až 140');
Writeln (' 4-Aceton ..... -20 až 140');
Writeln (' 5-Voda ..... 40 až 200');
Writeln (' 6-Toluen..... 60 až 150');
Writeln (' 7-Difyl ..... 100 až 300');
Writeln (' 8-Difenyl ..... 100 až 300');
Writeln (' 9-Jiná látka');
Write ('Vyber si: ');
Read(prlatka);
podminka:=False;
case prlatka of
    1:IF ((tp >= -20) AND (tp <= 80)) THEN podminka:=True;
    2:IF ((tp >= -20) AND (tp <= 100)) THEN podminka:=True;
    3:IF ((tp >= -20) AND (tp <= 140)) THEN podminka:=True;
    4:IF ((tp >= -20) AND (tp <= 140)) THEN podminka:=True;
    5:IF ((tp >= 40) AND (tp <= 200)) THEN podminka:=True;
    6:IF ((tp >= 60) AND (tp <= 150)) THEN podminka:=True;
    7:IF ((tp >= 100) AND (tp <= 300)) THEN podminka:=True;
    8:IF ((tp >= 100) AND (tp <= 300)) THEN podminka:=True;
end;
IF (podminka = True) THEN begin
    K:=ROUND(INT((TP+30)/10));
    I:=prlatka;
    KL:=KPN[I,K]+( KPN[I,K+1]-KPN[I,K])/10*(TP-(K*10-30));
    end;
IF (podminka = False) THEN begin
    Writeln ('Měrné výparné teplo látky [J/kg]');
    Read (l);
    Writeln ('Tepelná vodivost látky [W/m.K]');
    Read (lambdaL);
    Writeln ('Kinematická viskozita látky [m^2/s]');
    Read (mi);
    Writeln ('Hustota látky [kg/m^3]');
    Read (roL);
    KL:=(l*roL*g*lambdaL*lambdaL*lambdaL)/mi);

```



```

KL:=exp(1/4*ln(KL));

end;

ClrScr;
While zmena > 0 do begin
prehled:
clrScr;
Writeln ('Zadané hodnoty:');
Writeln ('-----');
Writeln (' 1-Vnější průměr pláště tepelné trubice ..... de=',de:5:2,' [mm]');
Writeln (' 2-Vnitřní průměr pláště tepelné trubice ..... di=',di:5:2,' [mm]');
Writeln (' 3-Délka výparné části tepelné trubice ..... Lv=',LV:5:2,' [m]');
Writeln (' 4-Délka kondenzační části tepelné trubice ... Lk=',LK:5:2,' [m]');
Writeln (' 5-Střední teplota vnějšího povrchu pláště');
Writeln ('   tepelné trubice v kondenzační části ..... tek=',tek:5:2,' [ C]');
Writeln (' 6-Střední teplota vnějšího povrchu pláště');
Writeln ('   tepelné trubice ve výparné části .....tev=',tev:5:2,' [ C]');
Writeln (' 7-Tepelná vodivost materiálu pláště ..... ',lambda:5:2,' [W/m.K]');
IF ( (podminka = False) OR (prlatka = 9)) THEN begin
  Writeln (' 8-Měrné výparné teplo látky ..... l=',l:5:2,' [J/kg]');
  Writeln (' 9-Tepelná vodivost látky ..... ',lambdaL:5:2,' [W/m.K]');
  Writeln ('10-Kinematická viskozita látky ..... ',mi:5:2,' [m^2/s]');
  Writeln ('11-Hustota látky ..... ',roL:5:2,' [kg/m^3]');
  END;
  case prlatka of
    1:Writeln ('12-Pracovní látka .....Čpavek');
    2:Writeln ('12-Pracovní látka .....Metanol');
    3:Writeln ('12-Pracovní látka .....Etanol');
    4:Writeln ('12-Pracovní látka .....Aceton');
    5:Writeln ('12-Pracovní látka .....Voda');
    6:Writeln ('12-Pracovní látka .....Toluen');
    7:Writeln ('12-Pracovní látka .....Difyl');
    8:Writeln ('12-Pracovní látka .....Difenyl');
    9:Writeln ('12-Pracovní látka .....Vlastní hodnoty');
  end;
Writeln ('0-Ukončení změn');
  Writeln;
  Writeln ('Zapiš číslo požadované změny');
  Read(zmena);
  if zmena > 0 then
  begin;
  Write ('zadej novou hodnotu');
  case zmena of
    1:Read (de);
    2:Read (di);
    3:Read (LV);
    4:Read (LK);
    5:begin
      Read (tek);

```

```

        GOTO PL;
    end;
6:begin
    Read (tev);
    GOTO PL;
end;
7:GOTO PL;
8:GOTO PL;
9:GOTO PL;
10:GOTO PL;
11:GOTO PL;
12:GOTO PL;
end;
end;
end;
{VYPOCET}
de:=de/1000;
di:=di/1000;
    { limit}
if (podminka=true) then begin
    case prlatka of
        1:begin
            N:=1039867.8+13707.7*TP-119.3*TP*TP;
            PSI:=0.283-8.08*TP+2.634E-5*TP*TP;
            IF (di > 0.015) THEN PSI:=0.75*PSI;
            QI:=pi*di*di*6.68*PSI*N;
            END;
        2:begin
            N:=154989.9+4831.7*TP+27.99*TP*TP;
            PSI:=0.393-7.00E-4*TP-1.280E-6*TP*TP;
            IF (di > 0.015) THEN PSI:=0.75*PSI;
            QI:=pi*di*di*6.68*PSI*N;
            END;
        3:begin
            N:=64164.6+8802.7*TP-12.77*TP*TP;
            PSI:=0.422-1.98E-3*TP+6.790E-6*TP*TP;
            IF (di > 0.015) THEN PSI:=0.75*PSI;
            QI:=pi*di*di*6.68*PSI*N;
            END;
        5:begin
            N:=-399919.8+17191.1*TP-31.02*TP*TP;
            PSI:=0.393-0.001*TP+1.913E-5*TP*TP;
            IF (di > 0.015) THEN PSI:=0.75*PSI;
            QI:=pi*di*di*6.68*PSI*N;
            END;
        6:begin
            N:=72915.4+1054.9*TP+5.56*TP*TP;
            PSI:=0.403-8.7E-4*TP+1.295E-6*TP*TP;
            IF (di > 0.015) THEN PSI:=0.75*PSI;
            QI:=pi*di*di*6.68*PSI*N;

```



```

    END;
7:begin
    N:=4674.1+224.2*TP+2.53*TP*TP;
    PSI:=0.437-3.90E-4*TP-9.5E-8*TP*TP;
    IF (di > 0.015) THEN PSI:=0.75*PSI;
    QI:=pi*di*di*6.68*PSI*N;
    END;
8:begin
    N:=139832-1060.3*TP+5.70*TP*TP;
    PSI:=0.468-5.70E-4*TP;
    IF (di > 0.015) THEN PSI:=0.75*PSI;
    QI:=pi*di*di*6.68*PSI*N;
    END;
    END;{CASE}
    END;{IF}

TP:=(tek+tev)/2;
KG:=0.943*pi*di*exp(3/4*ln((LK*LV)/(LK+LV)));
KQ:=KG*KL;
RKV:=(de-di)/((2*pi*di*lambda)*(LK+LV));

Writeln ('Zadej první hodnotu iterace');
Read (Q1);
ClrScr;
Writeln ('vypočtená hodnota      přesnost      interakční limit');
Writeln (' Q [W]                eps            Qi [W] ');
Writeln ('-----');
I:=1;
repeat
IF (I=21) THEN
    BEGIN
        Writeln ('Pokračování iterace A/N');
        klavesa:=ReadKey;
        IF ((klavesa='a') OR (klavesa='A')) THEN
            BEGIN
                ClrScr;
                I:=1;
                Writeln ('vypočtená hodnota      přesnost      interakční limit');
                Writeln (' Q [W]                eps            Qi [W] ');
                Writeln ('-----');
            end
        else
            begin
                halt;
            end
        end;
    if ((q1 <= 0) or (kq <= 0)) THEN
        BEGIN
            Writeln ('CHYBA V ITERACI,ODMOCNINA ZE ZÁPORNÉHO ČÍSLA');
            HALT;

```

```

END;
Q:=(tev-tek)/(exp(1/3*ln(Q1))*exp(-4/3*ln(KQ))+RKV);
eps:=q1-q;
GotoXY(0,I+3);
Writeln (Q:9:4);
GotoXY(27,I+3);
Writeln (eps:5:4);
GotoXY(47,I+3);
IF (QI=0) THEN
  BEGIN
    Writeln ('NENÍ DEFINOVÁN');
  END
ELSE
  BEGIN
    Writeln (QI:9:4);
  END;

q1:=q;
I:=I+1;
until False;
end.

```

4.1 NÁVRH MĚŘENÍ

4.1.1 Popis tepelné trubice používané k experimentům

Pro zkoušky je k dispozici tepelná trubice s ventilem pro plošný, objemový ohřev a vodním chladičem.

Plošná tepelná trubice je z mědi.

Výparník čisti je tvořená odporovým topným drátem sje sálá ohřevná zbrusovou šňárou. Elektrický odpor topné spřáhy čisti 36Ω. Vodní chladič je součástí měř. Na vstupu a výstupu má umístěny termočlánky Cu-Cu pro měření teploty chladičí vody. Tepelná povrchná trubice je zbrusena termočlánky Cu-Cu v určitéch místech, která zřejmě mají teplotu, což je možno považovat za střední. Vedení termočlánků k místům měření má kovový obal, je přidržen u stěhy trubice srovnky, aby nedocházelo k rozlišování měření. Konstrukci tepelné trubice možno vidět na obr. 19. Tepelná trubice má na konci výparník čisti plněl trubku se závitem, kterou je možno uzavřít ventilem. Schéma tepelné trubice s hlavnými rozměry je na obr. 19.

4. MĚŘENÍ Vlivu Množství Náplně na Činnost Tepelné Trubice

Z předcházejících kapitol jasně vyplývá, že velmi důležitým parametrem pro činnost tepelné trubice je množství náplně. Proto se provádí měření, pomocí něhož se ověřuje činnost tepelné trubice, tj. zjišťuje se velikost přenášeného tepelného výkonu v závislosti na množství náplně a při určitých podmínkách, čímž se má určit optimální množství pracovní látky v tepelné trubici.

Jak již bylo zmíněno, běžně se za optimální množství náplně považuje 10÷20% vnitřního objemu tepelné trubice, ovšem je zřejmé, že dané množství pracovní látky je optimální vždy pro určité podmínky a přenášený tepelný výkon.

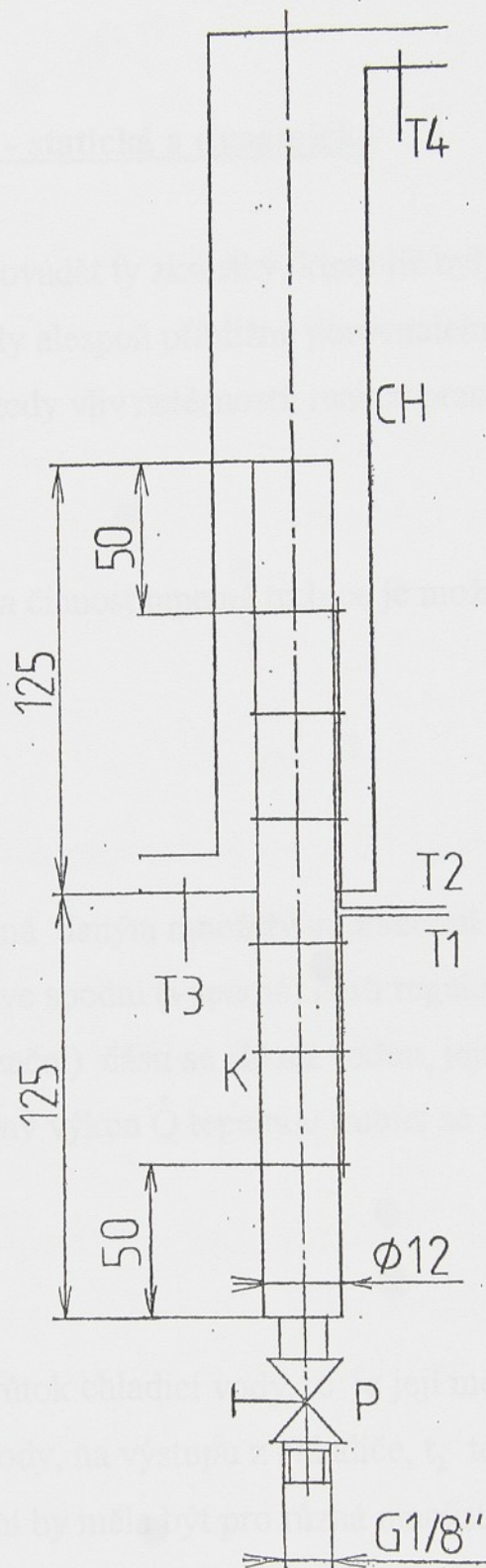
4.1 NÁVRH MĚŘENÍ

4.1.1 Popis tepelné trubice používané k experimentům

Pro zkoušky je k dispozici tepelná trubice s ventilem pro plnění, odporovým ohřevem a vodním chladičem.

Plášť tepelné trubice je z mědi.

Výparná část je opatřena odporovým topným drátem a je celá obalena azbestovou šňůrou. Elektrický odpor topné spirály činí 38Ω . Vodní chladič je snímatelný. Na vstupu a výstupu má umístěny termočlánky Cu-Co pro měření teploty chladicí vody. Teplota povrchu trubice je měřena termočlánky Cu-Co v určitých místech, která zřejmě mají teploty, jež je možno považovat za střední. Vedení termočlánků k místům měření má kovový obal, je přidržováno u stěny trubice kroužky, aby nedocházelo k ovlivňování měření kondukci tepla dráty. Tepelná trubice má na konci výparné části plnicí trubičku se závitem, kterou je možno uzavírat ventilem. Schéma tepelné trubice s hlavními rozměry je na obr. 19.



Obr. 19 Schéma tepelné trubice, T - termočlánky, K - kroužky, CH - chladič,
P - plnicí trubička s ventilem

4.1.2 Prováděné zkoušky - statická a dynamická

Je vhodné pokusit se provádět ty zkoušky, které již byly popsány v odborné literatuře, aby výsledky byly alespoň přibližně porovnatelné. Zkoušky jsou krátkodobé, nezkoumá se tedy vliv netěsností, reakce pracovní látky s pláštěm tepelné trubice apod.

Vliv množství náplně na činnost tepelné trubice je možno posuzovat v zásadě staticky nebo dynamicky.

Statická zkouška

Tepelná trubice naplněná daným množstvím pracovní látky a upevněná v určité poloze se ohřívá ve spodní (výparné) části regulovatelným odporovým topením, v horní (kondenzační) části se chladí vodou, jejíž průtok je rovněž možno regulovat. Přenášený výkon $\dot{Q}$ tepelnou trubicí se určí ze vztahu

$$\dot{Q} = \dot{m} c (t_3 - t_2) \quad (4 - 1)$$

kde $\dot{m}$ je hmotnostní průtok chladicí vody, c je její měrná tepelná kapacita, t_3 značí teplotu chladicí vody, na výstupu z chladiče, t_2 teplotu chladicí vody na vstupu do něho. Měření by měla být pro různá množství pracovní látky prováděna vždy při stejném rozdílu středních teplot výparné a kondenzační části tepelné trubice

$$t_{ev} - t_{ek} = \text{kont.}$$

$$t_p = \frac{t_{ey} - t_{ek}}{2} = \text{kont.}$$

rovněž pracovní teplota tepelné trubice by měla být pro všechna měření stejná.

Měření objemového průtoku chladicí vody se nejjednodušším způsobem a zároveň velmi přesně provádí odměřením objemu přitekajícího do odměrné nádoby v určitém časovém intervalu za ustáleného stavu, z čehož se dále určí známým způsobem hmotnostní průtok.

Výsledkem těchto experimentů mají být křivky závislosti tepelného výkonu přenášeného tepelnou trubicí při určitých podmínkách v ustáleném stavu na množství náplně.

Dynamická zkouška

Ve skutečných provozních podmínkách ovšem často dochází k nestacionárním dějům při činnosti systémů s tepelnými trubicemi. K přednostem tepelných trubic patří nízká měrná tepelná kapacita a tedy velká rychlost reakce na změněné teploty. Cílem zkoušek je ověřit, jaký vliv zde mají různá množství náplně.

Uskutečňují se proto měření náběhových charakteristik tepelných trubic (viz. obr. 9), což jsou přechodové charakteristiky dynamického systému, tj. reakce systému na jednotkovou změnu vstupní veličiny. Touto vstupní veličinou je v našem případě střední teplota výparné části tepelné trubice, výstupní veličinou, jejíž změnu v čase sledujeme, je střední teplota kondenzační části tepelné trubice. Chlazení kondenzační části se provádí zpravidla volnou konvekcí do okolního prostředí.

Žádoucí je, aby tepelná trubice rychle reagovala na skokovou změnu a aby se velikost střední teploty v kondenzační části rychle ustálila na hodnotě blízké se střední teplotě výparné části (zpravidla je teplotní rozdíl menší než 5°C).

4.2 NÁVRH MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

Úkolem této kapitoly je navrhnout takové , s ním ž by bylo možno realizovat výše popsané zkoušky.

4.2.1 Statická zkouška

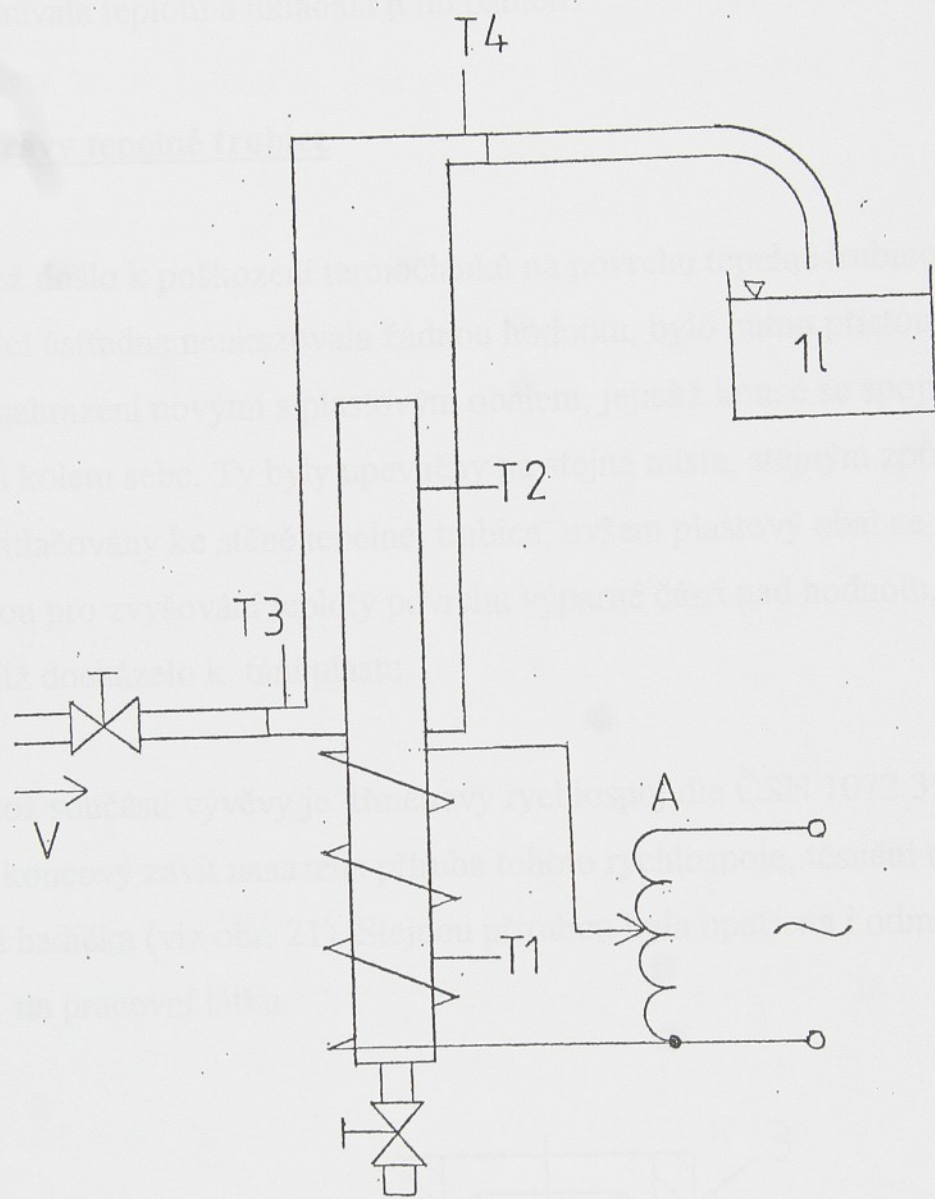
Využije se již hotové zařízení u tepelné trubice, tj. odporový drát a vodní chladič. Zdrojem elektrického napětí je ručně regulovaný autotransformátor. Dodávaný výkon potom bude

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (4 - 2)$$

kde U je elektrické napětí na svorkách, R značí elektrický odpor topného drátu. Jelikož však dochází ke ztrátám tepla do okolí, je vhodnější určovat výkon přenášený tepelnou trubicí podle vztahu (4 - 1). Termočlánky jsou připojeny na měřicí ústřednu typ THERM 3280-8M, měřicí kanály se přepínají podle potřeby ručně. Schéma celého zařízení je na obr. 20.

4.2.2 Dynamická zkouška

Pokud by bylo k dispozici automatické termoregulační zařízení udržující konstantní teplotu ve výparné části tepelné trubice regulací odporového topení, bylo by možno po demontáži vodního chladiče přímo provádět měření náběhové charakteristiky. Jelikož však k dispozici není, zajistí se teplotní skok ponořením výparné části tepelné trubice do vroucí vody, jak je to popisováno v [7]. Předtím je ovšem nutné odstranit topnou spirálu a azbestové obložení z povrchu tepelné trubice. V kondenzační části se potom měří přechodová charakteristika termočlánkem připojeným opět na měřicí ústřednu.



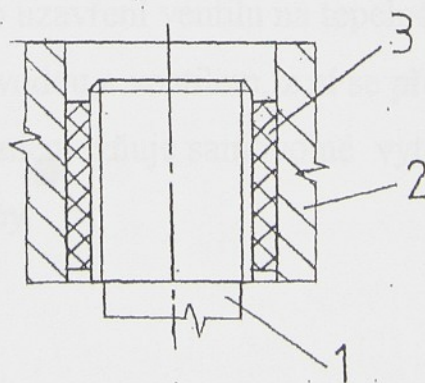
Obr. 20 Zařízení pro statickou zkoušku, T - termočlánky, V - chladicí voda,
A - autotransformátor

Jelikož dochází zpočátku k velmi rychlým změnám teploty, je výhodné naprogramovat měřicí ústřednu tak, aby sama po určitých intervalech (2 s) zaznamenávala teplotu a ukládala ji do paměti.

4.2.3 Úpravy tepelné trubice

Jelikož došlo k poškození termočlánků na povrchu tepelné trubice, kdy měřicí ústředna neukazovala žádnou hodnotu, bylo nutno přistoupit k jejich nahrazení novými s plastovým obalem, jejichž konce se spojily stočením kolem sebe. Ty byly upevněny na stejná místa, stejným způsobem byly i přitlačovány ke stěně tepelné trubice, ovšem plastový obal se stal překážkou pro zvyšování teploty povrchu výparné části nad hodnotu, kdy by již docházelo k tání plastu.

Jelikož součástí vývěvy je třmenový rychlospoj dle ČSN 1072 35, byla na koncový závit nasazena příruba tohoto rychlospoje, těsnění tvoří pryžová hadička (viz obr. 21). Stejnou přírubou byla opatřena i odměrná nádoba na pracovní látku.



Obr. 21 Nasazení příruby rychlospoje, 1 - tepelná trubice, 2 - příruba, 3 - těsnění

4.3 POSTUP ZKOUŠEK A JEJICH PRŮBĚH

Prvním krokem při měření je ověření některých jevů při činnosti tepelné trubice, které jsou popisovány v odborné literatuře, tedy zjištění chování tepelné trubice.

Zaplněním celého vnitřku tepelné trubice vodou byl zjištěn její vnitřní objem, $V = 7,4 \text{ cm}^3$ a odtud optimální objem pracovní látky, $V_{15} = 1,1 \text{ cm}^3$, činící 15% z vnitřního objemu.

Plnění

Pracovní látkou je destilovaná voda. Tepelná trubice je vždy plněna stejným způsobem, zvoleným na základě [1].

Vnitřní prostor je vývěvou evakuován. Ukazatelem dosažení maximálního podtlaku je neznatelná rychlost čerpání vzduchu na výstupu z vývěvy. Je použita rotační jednostupňová vývěva VR 1,5 - 12, mezní totální tlak je 10 Pa. Tento podtlak činí přibližně 100 kPa. Pro větší přesnost určení podtlaku není k dispozici vhodné měřicí zařízení, navíc větší přesnost není pro danou úlohu pravděpodobně ani zapotřebí. Po uzavření ventilu na tepelné trubici je připojena odměrná nádoba s destilovanou vodou a ventilem, z ní se přepustí potřebné množství pracovní látky. Ventil znemožňuje samovolné vytečení náplně, je nutno ji odsát v případě potřeby.

Předběžné zkoušky

První zkouškou je měření rozložení povrchových teplot po délce kondenzační části dotykovým elektronickým teploměrem typ ALMEMO 2290-8 v ustáleném stavu.

Výparná část je ohřívána odporovým topením s výkonem P . Měření bylo provedeno s tepelnou trubicí optimálně plněnou.

Rovněž se prověřuje činnost tepelné trubice ve sklopené poloze, aby se zjistilo, zda jde o gravitační typ.

Statická zkouška

Tepelná trubice je naplněna vždy určitým množstvím pracovní látky. Pomocí autotransformátoru se postupně zvyšuje teplota výparné části až na konečnou hodnotu (60°C). Regulací průtoku chladicí vody se dosáhne zvolená teplota kondenzační části (15°C). Celý postup je nutno vždy několikrát opakovat. Po ustálení teplot se odečtou výsledky, tj. teplota výstupní vody z vodního chladiče a čas potřebný k naplnění odměrné nádoby o objemu 1 l chladicí vodou. Za vstupní teplotu do chladiče je považována teplota vody změřená přímo u vodovodu ($9,2^{\circ}\text{C}$), neboť při malých průtocích dochází k ovlivňování teploty měřené termočlánkem u vstupu do vodního chladiče. Rovněž je pro informaci vždy zaznamenáno elektrické napětí na transformátoru U .

V některých případech se toto měření provádí i se skloněnou trubicí.

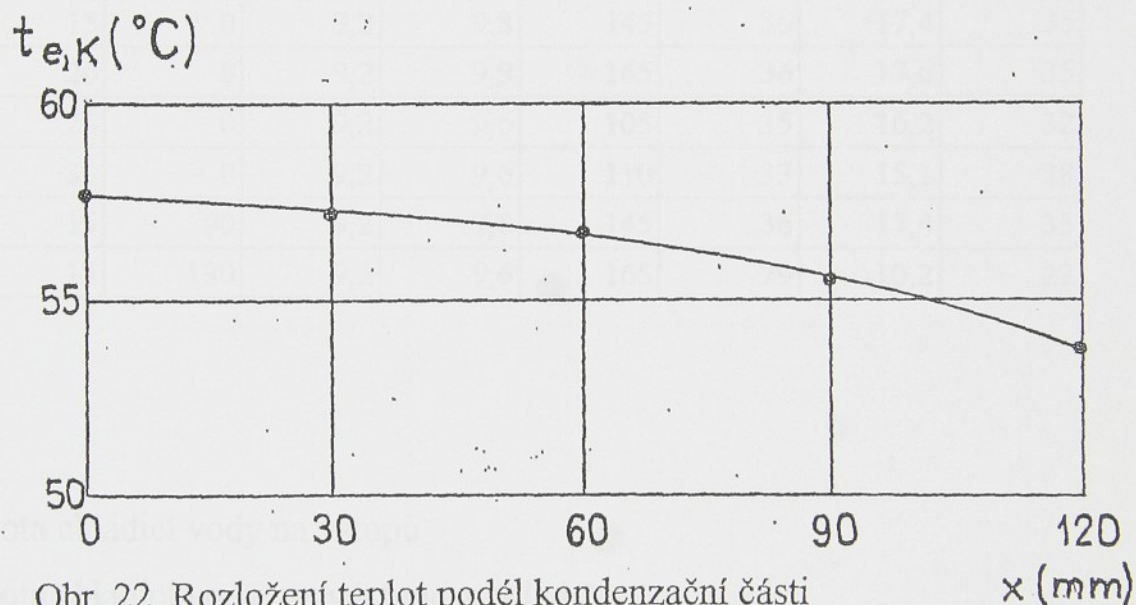
Dynamická zkouška

Tepelná trubice naplněná patřičným množstvím destilované vody má teplotu okolí (asi 24°C). Po vnoření výparné části do vroucí vody (asi 97°C) se pomocí ústředny a termočlánku měří vždy po 5 s, resp. 10 s měnící se teplota kondenzační části až do jejího ustálení. Tepelná trubice se nachází pokaždé ve svislé poloze, provede se měření i s prázdnou a zcela plnou trubicí při atmosférickém tlaku. Každé měření se provede několikrát.

4.4 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Předběžné zkoušky

Kontaktním teploměrem bylo zjištěno v ustáleném stavu při elektrickém výkonu $P=15\text{ W}$ a $t_{e,v}=65,8^\circ\text{C}$ rozložení povrchových teplot podél kondenzační části tepelné trubice, jež je zakresleno na obr. 22. Vzdálenost x se měří od poloviny tepelné trubice směrem ke konci kondenzační části.



Obr. 22 Rozložení teplot podél kondenzační části

V rozmezí úhlu odklonu tepelné trubice od vertikály $0 < \alpha < 90^\circ$ byla teplota povrchu kondenzační části měřená termočlánkem stále přibližně konstantní

$t_{e,k} = 50^\circ\text{C}$. Elektrický výkon byl opět $P = 15\text{ W}$. Tepelná trubice otočená o 180° přenášela nižší výkon, teplota kondenzační části byla $t_{e,k} = 32^\circ\text{C}$.

Statická zkouška

Při měření se zachovávaly konstantní tyto teploty:

střední teplota povrchu výparné části

$$t_{e,v} = 60^\circ\text{C}$$

střední teplota povrchu kondenzační části

$$t_{e,k} = 15^\circ\text{C}$$

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou v tab. VII, k výpočtu byly použity vztahy (4 - 1) a (4 - 2).

Tab. VII Naměřené a vypočtené hodnoty statické zkoušky

číslo měření	zaplnění vnitřního objemu (%)	α (°)	t_2 (°C)	t_3 (°C)	τ (s)	U (V)	$\dot{Q}$ (W)	P (W)
1	0	0	9,2	9,6	112	35	15	32
2	5	0	9,2	9,6	96	36	17,5	35
3	10	0	9,2	9,8	125	38	20	38
4	15	0	9,2	9,8	145	36	17,4	35
5	20	0	9,2	9,9	165	36	17,6	35
6	25	0	9,2	9,6	105	35	16,2	32
7	35	0	9,2	9,6	110	33	15,1	28
8	15	90	9,2	9,8	145	36	17,4	35
9	15	180	9,2	9,6	165	29	10,2	22

t_2 (°C) teplota chladicí vody na vstupu

t_3 (°C) teplota chladicí vody na výstupu z chladiče

τ (s) doba potřebná k naplnění odměrné nádoby o objemu 1 l chladicí vodou

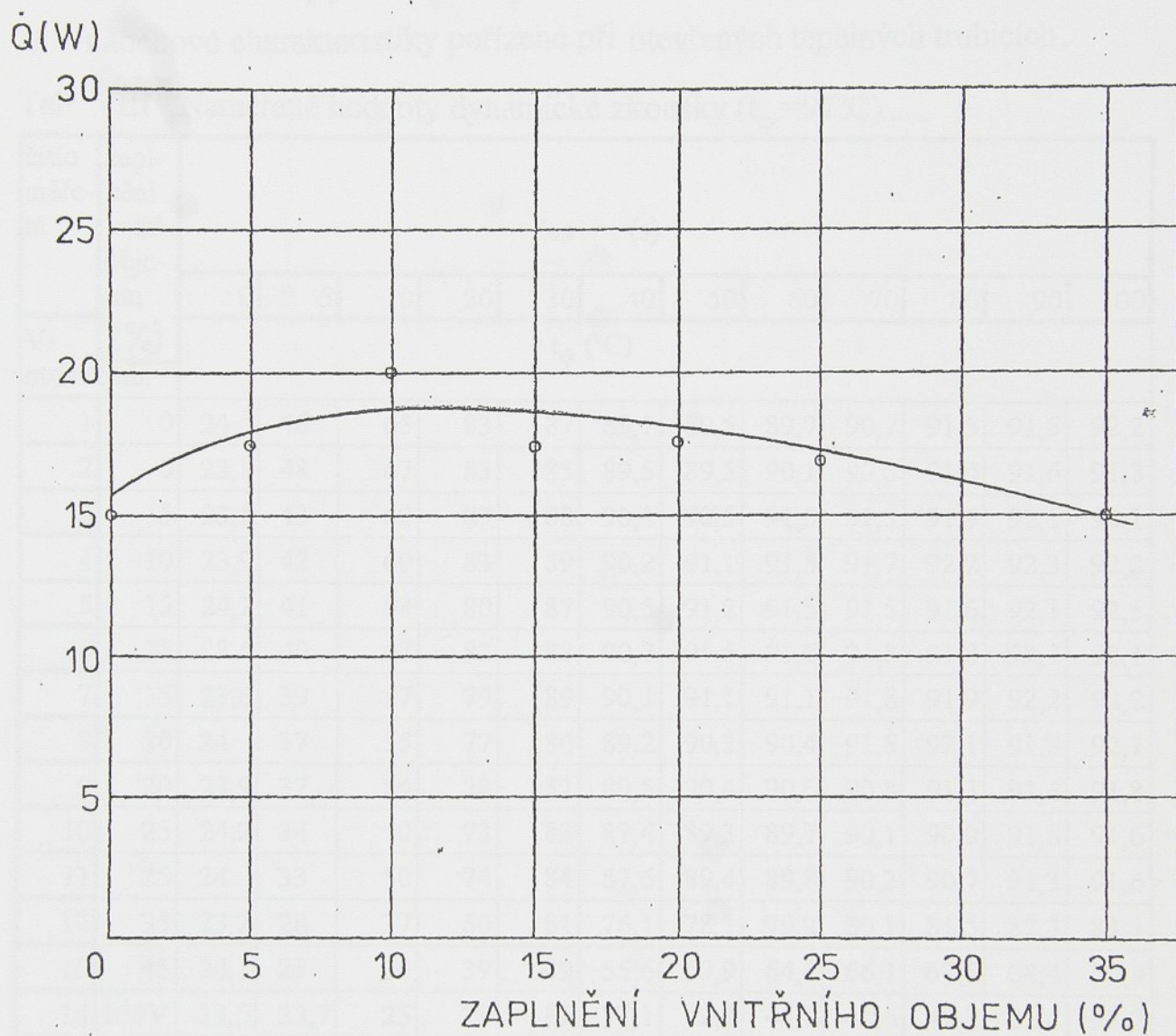
U (V) napětí na autotransformátoru

$\dot{Q}$ (W) tepelný výkon přenášený tepelnou trubicí

P (W) elektrický výkon dodávaný autotransformatorem

α (°) úhel odklonu od vertikály

Na základě měření byla zakreslena závislost výkonu přenášeného tepelnou trubicí na množství pracovní látky (obr. 23).



Obr. 23 Vliv množství náplně tepelné trubice na výkon v ustáleném stavu

Dynamická zkouška

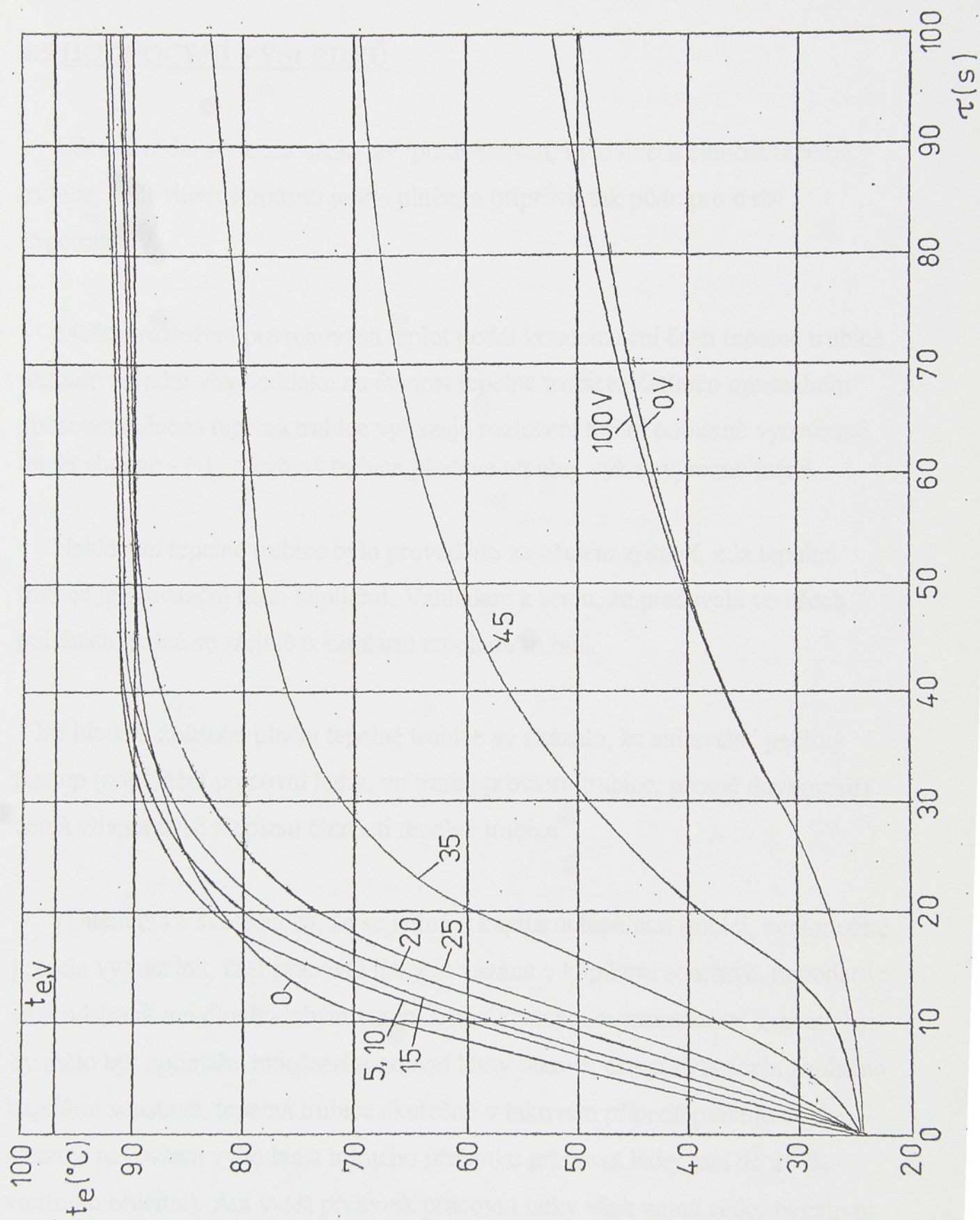
Naměřené hodnoty jsou zaneseny do tab VIII.

V - náběhové charakteristiky pořízené při otevřených tepelných trubicích.

Tab. VIII Naměřené hodnoty dynamické zkoušky ($t_{ev}=97^{\circ}\text{C}$)

číslo měře- ní	zapl- nění vnitř. obje- mu	čas (s)											
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
V- otevř.trub.	(%)	$t_{ek} (^{\circ}\text{C})$											
1	0	24	46	65	83	87	89,1	89,5	89,7	90,7	91,5	91,5	92,2
2	0	23,8	48	67	83	85	89,5	89,5	90,1	90,8	91,4	91,6	91,8
3	5	23,5	43	62	83	88	90,1	90,5	91,5	91,5	91,9	92,1	92,1
4	10	23,9	42	60	83	89	90,2	91,1	91,5	91,7	92,2	92,3	92,2
5	15	24,2	41	58	80	87	90,5	91,2	91,5	91,5	91,6	92,1	92,5
6	15	23,6	40	57	82	88	90,7	91,5	91,6	91,8	91,8	92,1	92,1
7	15	23,6	39	57	79	89	90,1	91,1	91,1	91,8	91,9	92,2	92,2
8	20	24	37	55	77	86	89,2	90,3	90,4	91,5	92,1	91,8	92,1
9	20	23,9	37	54	78	87	89,5	90,4	90,6	90,8	91,3	91,4	91,8
10	25	24,2	34	50	73	83	87,4	89,3	89,7	90,1	90,9	91,5	91,6
11	25	24	33	50	74	84	87,6	89,4	89,8	90,2	90,7	91,3	91,6
12	35	23,2	28	37	60	81	76,1	78,1	79,2	80,1	81,5	82,3	83,1
13	45	24,1	25	26	39	49	55,6	60,9	64,1	66,1	67,5	68,4	69,9
14	100V	23,5	23,7	25	28	33	37,1	42,2	44,2	46,6	49,3	51,1	53,2
15	0V	24,1	24,5	25	27	32	36,2	40,1	42,6	44,5	47,1	48,6	50,1

Na základě měření byly zakresleny přechodové charakteristiky tepelné trubice pro jednotlivá množství pracovní látky, tj. časové závislosti teploty v kondenzační části $t_{e,k}$ v reakci na skokovou změnu teploty ve výparné části $t_{e,v}$. Tato se měnila z 24°C na 97°C . Na obr. 24 jsou pro přehlednost zakresleny již výsledné křivky.



Obr. 24 Vliv množství náplně tepelné trubice na její přechodovou charakteristiku

4.5 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Cílem úvodní série zkoušek, tzv. předběžných, bylo ověřit činnost tepelné trubice, najít vhodný způsob jejího plnění a připravit tak půdu pro další experimenty.

Měření rozložení povrchových teplot podél kondenzační části tepelné trubice ukázalo zásadní vliv podtlaku na činnost tepelné trubice. Zatímco optimálním způsobem plněná tepelná trubice vykazuje rozložení teplot poměrně vyrovnané téměř shodné s [1], otevřená trubice předává tepelný výkon výrazně méně.

Naklápění tepelné trubice bylo prováděno za účelem zjištění, zda tepelná trubice je gravitační nebo kapilární. Vzhledem k tomu, že pracovala ve všech polohách, jedná se zřejmě o kapilární tepelnou trubici.

Při hledání způsobu plnění tepelné trubice se ukázalo, že ani zvlášť pečlivý postup (odplynění pracovní látky, vnitřního prostoru trubice, přesné dávkování) nemá vliv na další zlepšení činnosti tepelné trubice.

Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o kapilární tepelnou trubici, není možné ji zcela vyprázdnit, část pracovní látky je vázána v kapilární soustavě, nepodařilo se ji odstranit ani dlouhodobým varem a opakovaným evakuováním. Teoreticky by mělo být optimální množství pracovní látky takové, aby jí byla zcela zaplněna kapilární soustava, tepelná trubice skutečně v takovém případě pracuje dobře, ukazuje se ovšem výhodnost mírného přebytku pracovní látky (asi do 20 % vnitřního objemu). Ani vyšší přebytek pracovní látky však nemá velký negativní vliv na velikost přenášeného výkonu při statických zkouškách. Rovněž při naklápění tepelné trubice až do vodorovné polohy nebyl zjištěn závažný pokles výkonů.

Při provádění dynamických zkoušek ukazují naměřené přechodové charakteristiky, že tepelná trubice pracující bez přebytku pracovní látky zprvu reaguje velmi rychle, později se růst teploty zpomalí. Nejlepší přechodovou charakteristiku vykazovala tepelná trubice pracující s mírným přebytkem pracovní látky (okolo 10 % vnitřního objemu). Větší množství pracovní látky vedlo k pomalejšímu růstu teploty kondenzační části, což bylo způsobeno větší tepelnou kapacitou prvku. I tehdy však tepelná trubice pracovala přijatelným způsobem. Teplota měřená na povrchu kondenzační části se ve všech případech ustálila na hodnotě asi o 4° C nižší, než byla teplota výparné části a to do 60 s. V kontrastu s těmito výsledky jsou náběhové charakteristiky pořízené při otevřených tepelných trubicích, které jsou naprosto nevyhovující.

Na přesnost měření měly dopad některé negativní vlivy. Použití náhradních termočlánků s plastovým obalem způsobilo, že nebylo možno zvýšit pracovní teplotu na hodnoty charakteristické pro použitou pracovní látku - destilovanou vodu. V tom případě by byl větší i přenášený výkon a tím i přesnost měření. Nízká teplota měřená na povrchu kondenzační části tepelné trubice při statické zkoušce ukazuje, že se tato hodnota nedá považovat za teplotu povrchu, došlo zřejmě k porušení teplotní mezní vrstvy vodou proudící v chladiči. Pro tuto zkoušku to však není velký nedostatek, neboť měření teplot na povrchu pláště tepelné trubice mělo pouze zajistit stejné podmínky pro všechna měření. U měření přechodových charakteristik mohlo mít na přesnost měření vliv odečítání hodnot přímo s displeje při jejich rychlých změnách.

Z měření tedy plyne, že tepelná trubice plněná doporučeným množstvím pracovní látky pracuje dobře, je-li uvnitř dostatečný podtlak a nedošlo k znečištění vnitřního prostoru (např. olejem), malé odchylky od optimálního stavu nemají na činnost tepelné trubice zásadní vliv.

5. ZÁVĚR

Tato práce má být shrnutím základních informací o netradičních teplosměnných prvcích - tepelných trubicích.

Bylo použito materiálů z odborné literatury, ale i vlastních zkušeností nabytých při práci s tepelnou trubicí.

Je zde popsán princip činnosti tepelných trubic, jejich rozdělení a nejdůležitější otázky týkající se konstrukce a technologie. Rovněž jsou vyjmenovány charakteristické příklady použití tepelných trubic. Tyto prvky se v dnešní době již běžně vyrábějí, existují vypracované postupy pro jejich zhotovení a zkoušky, celá řada jejich různých typů umožňuje používat tepelné trubice v mnoha zařízeních.

Další kapitola se podrobněji zabývá problematikou teoretického výpočtu především gravitačních tepelných trubic, přičemž je podána i informace o ostatních jejich typech. Postup výpočtu, který je zde popsán, je založen na určitých zjednodušeních skutečnosti, pro potřeby technického přístupu k věci je však dostatečný a již osvědčený. Závěrem je nastíněno, jakým způsobem lze ulehčit výpočet použitím běžně dostupné výpočetní techniky, jež je však efektivní především tehdy, dokáže-li nahradit množství do té doby používaných tabulek, grafů atd..

Experimentální část se týká ověření činnosti tepelné trubice, která je k dispozici a měření vlivu množství pracovní látky na její činnost. K této otázce není k mání příliš hojná literatura. Provedené zkoušky ukázaly, že dosud uváděné rozmezí objemu pracovní látky k plnění tepelné trubice je vyhovující a drobné odchylky vcelku nemají na činnost těchto teplosměnných elementů negativní vliv.

Je možné říci, že tepelné trubice při dobré znalosti jejich specifických vlastností a chování mohou představovat účinný nástroj konstruktéra při navrhování i kvalitativně zcela nových a moderních systémů pro sdílení tepla.

Poděkování

Závěrem děkuji všem zaměstnancům Katedry termomechaniky, kteří mi poskytli rady a připomínky při vypracování diplomové práce, zejména Prof. Ing. Ivo Středovi, CSc. a Doc. Ing. Josefu Olehlovi, CSc., dále potom Ing. Eduardu Rindtovi a panu Barvířovi za pomoc u praktické části.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. Kolektiv autorů : Tepelné trubice a jejich použití v průmyslu,
SVÚSS Praha, 1977
2. Kolektiv autorů: Použití tepelných trubic v technické praxi,
SVÚSS Praha, 1985
3. Sazima, M.: Teplo,
SNTL Praha, 1989
4. Olehla, M.: Počítače a programování,
ES VŠST Liberec, 1992
5. Polášek, F.: Chlazení uzavřených skříní s elektronikou výměníky
tepla z tepelných trubic,
In: Technické zprávy 27/28, ČKD Praha, 1989
6. Hlavačka, V.: Gravitační tepelné trubice pro výměníky tepla,
In: Strojírenství 36, 1986
7. - Tepelné trubice kapilární,
Prospekt firmy KOH-I-NOOR Praha, 1988
8. - Rekuperátory z gravitačních tepelných trubic typu N,
Prospekt firmy Vzduchotechnika Nové Město n. Váhom
9. Šorin, S. : Sdílení tepla, SNTL Praha, 1968