

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI, NOSITELKA ŽÍROV PRÁCE
Fakulta strojní
obor 23-34-8
výrobní stroje a zařízení
zaměření
sklářské a keramické stroje

HELIOTY KRYOSTAT

Libor Slezák
OP - 349/80

Vedoucí práce: ing. Vladimír Klobas, CSc., VŠST Liberec
Konzultant: ing. Stanislav Surž, Forex, n. p., Džbín

Rozsah práce a příloh

Počet stran: 69
Počet příloh a tabulek: 6
Počet obrázků: 18
Počet výkresů: 2

³
MOT 660 . 17 : 621 . 720 . 16

Datum: 23. května 1980

KSK SK

Vysoká škola: strojní a textilní

Katedra: sklář. a keram. strojů

Fakulta: strojní

Školní rok: 1979/80

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro Libora S l e z á k a

obor 23-34-8 Výrobní stroje a zařízení

Zaměření sklářské a keramické stroje

Protože jste splnil..... požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství a kultury o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol:

Název tématu: Heliový kryostat

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte návrh kryostatu supravodivého magnetu použitelný pro magnetický separátor linky na úpravu kaolinu. Průměr pracovního prostoru kryostatu je 1000 mm.

V práci se zaměřte na:

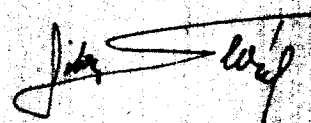
1. Rešerši současného stavu
2. Tepelný a pevnostní výpočet
3. Výkres sestavy zařízení.

Autorské právo se řídí ustanovením
MŠK pro státní školy, část 24, odst. 2
727/1962 ze dne 12. 11. 1962
1962-Věstník MŠK XVII, část 24 ze
dne 31. 8. 1962 § 17 aut. z. č. 115/1962.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Střední knihovna
LIT. 21, STUDENTSKÁ
ČČ 461 17

Nístopřímě prohlásuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval sám a použitím uvedených literatury a filmů se připouštím svých konzultantů.

V Liberci 23. května 1980



Libor Slonák

Rozsah grafických laboratorních prací: cca 40 stran textu doložených příslušnými výpočty a výkresovou dokumentací

Rozsah průvodní zprávy:

Seznam odborné literatury: Sborník ref. zesemináře "Využití supravodivosti v magnetické separaci"

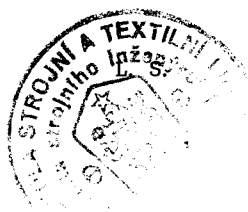
Firemní literatura.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Klebsa, CSc

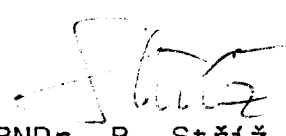
Konsultanti: Ing. Stanislav Smrž, Ferox Děčín

Datum zahájení diplomové práce: 8. 10. 1979

Datum odevzdání diplomové práce: 23. 5. 1980



Ing. Jaroslav Belda, CSc
Vedoucí katedry


Doc. RNDr. B. Stříž, CSc
Děkan

TITULNÍ LIST

ZÁKLADNÍ DEPLEČOVÉ PRÁCE

MISTOVKOVÉ PRÁCE

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLOV

	strana
1. Úvod	13
2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU	15
2.1 Magnetická separace s vysokým gradientem pole a výsledky využití superovodivosti v této oblasti	19
2.2 Využití magnetické separace při čistění kautčuků	20
2.3 Superovodivé nádobky pro separaci	23
2.4 Technické a ekonomické porovnání separace nerušími a superovodivými separátory	27
3. VLASTNÍ VÝPOČTY	30
3.1 Rovnostní výpočet kryostatů	32
3.1.1 Výpočet plochy	33
3.1.2 Výpočet výkonu	34
3.2 Tepelný výpočet kryostatů	43
3.2.1 Tepelný výpočet heliové nádoby	41
3.2.2 Tepelný výpočet dusíkové nádoby	50
3.3 Doplnějící výpočty	55
3.3.1 Výpočet třecích momentů na šachty	55
3.3.2 Výpočet závitů šachty	56
3.3.3 Výpočet ověru šachty	58

	strana
3.4 Zabezpečení krycího prostoru proti ohřevu	60
3.5 Technický popis navrženého krycího prostoru	62
3.6 Zohlednění krycího prostoru	64
4. ZÁVĚR	67
5. POUŽITÁ LITERATURA	68
6. SEZNAM PŘÍLOH	69

SEZNAM ZNAČEK, SYMBOLŮ A JEDNOTEK

k	vlnka tělesa	(m)
k	magnetická indukce	(T)
k	přídavek tloušťky stěny	(m)
k_1	tepelná těleso	(m)
k_2	konstrukční součinitel	
ϵ	absorpční koeficient difúze černého tělesa ($\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	
$\epsilon_{1,2}$	součinitel vzájemného odrazu	
d	poloměr otvoru ve vlně	(m)
d_1	vlnový poloměr zářivého žerouku	(m)
d_2	poloměr žerou	(m)
D_1	vlnový poloměr zářivého světla	(m)
D_2	poloměr žerou krychle	(m)
D_{11}	poloměr kulové nádoby	(m)
D_{12}	poloměr vlny krychle	(m)
D_{13}	poloměr sférického vlny	(m)
D_{14}	poloměr kruhové nádoby	(m)
D_{15}	poloměr kulové nádoby	(m)
D_{16}	poloměr vlny na nádoby	(m)
E	vlnový proudění v těle	(W/m²)
E	energie, vyzařování černého tělesa	(W/m²)
f	součinitel tření	
F	síla v těle	(N)
F_{1m}	vlnitá plocha kruhové nádoby	(m²)
F_{1v}	vlnitá plocha kulové nádoby	(m²)
F_2	vlnitá plocha kruhové nádoby	(m²)
F_{2v}	vlnitá plocha kruhové nádoby	(m²)
F_x	síla, působící ve směru x	(N)

P_1	rovnovážná síla	(N)
P_1	hustota síla	(N)
P	gravitační zrychlení	(m.s ⁻²)
P_{tot}	celková síla	(N)
P_{H_0}	tíhová síla	(N)
P_H	tíhová síla	(N)
P_{rad}	tíhová síla	(N)
P_{vis}	tíhová síla	(N)
H	intenzita magnetického pole	(A.m ⁻¹)
H_{K1}	výška kuličky	(m)
t	časový tok	(N.s ⁻¹)
t_p	časopis v bodu přechodu	(0.5g ⁻¹)
t_1, t_1', t_1''	časopis kuličky v pod. bodě	(0.5g ⁻¹)
t_1	časopis kuličky	(N)
t	časopis, více časopisů	(N)
$t_1 = t_{K1}$	délka kuličky	(m)
Δt_{K1}	časopis kuličky	(m)
t_{K1}	délka kuličky v radiální směru	(m)
Δt_{K1}	časopis kuličky v radiální směru	(m)
t_1	délka vodiče	(m)
t_H	délka přímky kuličky směry	(m)
t_H	délka dvojitě kuličky	(m)
t_{K1}	délka obvodového kuličky	(m)
t_v	délka přímky vodiče směry	(m)
m_H	hmotnost kuličky	(kg)
m_H	hmotnost kuličky	(kg)
m	celková hmotnost kuličky	(kg)
m'	hmotnost vlny kuličky	(kg)
m''	hmotnost kuličky	(kg)

M_m	momentální výkon	
M_{max}	maximální obtočový moment	(N.m)
M_t	tíže moment	(N.m)
P	podtlak, přetlak	(Pa)
P_z	magnetický moment částice	($m^2 \cdot kg \cdot s^{-1} \cdot A^{-1}$)
P_{dev}	deviační tlak	(Pa)
P_{krit}	okružní tlak	(Pa)
P_{kr}	kritický tlak	(Pa)
P_s	tlak v bodě přechodu	(Pa)
r_s	poloměr tlustého válce	(m)
Q_s	účinná teplo	(J.kg ⁻¹)
Q_{st}	výšinné teplo	(J)
Q_p	teplo, přivedené přívody proudů	(J)
Q_n	teplo, přivedené kapalnými látkami	(J)
Q_s	teplo, přivedené superizolací	(J)
Q_u	teplo, přivedené akustikou	(J)
Q_z	teplo, přivedené akustickým plynným	(J)
Q_{sd}	tepelná tloušťka desky	(m)
Q_{sn}	výšinné tloušťky stěny ze stěny	(m)
Q_{sv}	výšinné tloušťky stěny vlny	(m)
Q_{sz}	tepelná tloušťka stěny vlny	(m)
Q_{sn}	výšinné tloušťky stěny z stěny	(m)
Q_{sv}	výšinné tloušťky stěny vlny z stěny	(m)
Q_p	tloušťka desky krytů	(m)
Q_{pn}	tloušťka stěny ze stěny	(m)
Q_{pv}	tloušťka stěny z stěny	(m)
Q_{pz}	tloušťka stěny vlny z stěny	(m)
Q_{pz}	tloušťka stěny vlny krytů	(m)
Q_{sn}	výšinné tloušťky desky	(m)

s_{vx}	výpočtová tloušťka víka He nádoby	(m)
s_x	tloušťka víka He nádoby	(m)
S	průřez táhla	(m ²)
S_i	pracovní průřez	(m ²)
S_v	průřez vodičů	(m ²)
t	reztečná vzdálenost úchytů	(m)
Δt	změna reztečné vzdálenosti	(m)
T	absolutní teplota	(K)
T_0	okolní teplota	(K)
ΔT_1	teplotní spád na táhlu	(K)
T_{He}	teplota kapalného helia	(K)
T_N	teplota kapalného dusíku	(K)
T_{kr}	kritická teplota	(K)
u_0, u'_0, u''_0	měrná tepelná energie	(J.kg ⁻¹)
u_p	měrná tepel. energie v bodu přechodu	(J.kg ⁻¹)
v	výsledný měrný objem helia	(m ³ .kg ⁻¹)
v'_0	měrný objem vreucího helia	(m ³ .kg ⁻¹)
v''_0	měrný objem heliových par	(m ³ .kg ⁻¹)
v'_p, v''_p	měrný objem v bodu přechodu	(m ³ .kg ⁻¹)
V	objem částice	(m ³)
V_{He}	celkový objem kapalného helia	(m ³)
V_N	objem kapalného dusíku	(m ³)
V'	objem vreucího helia	(m ³)
V''	objem heliových par	(m ³)
W_0	modul průřezu v ohybu	(m ³)
x	předepsaná bezpečnost	
x_0	suchostheliových par ve výchozím bodě	
α_1, α_2	koefficient akomodace	
α_N	součinitel tepelné roztažnosti nerezů	

α_{SK}	součinitel tepelné roztažnosti sklolaminátu	
α_u	úhel úchytu před dilatací	(deg)
β	součinitel tvaru víka	
β_u	úhel úchytu	(deg)
β_{sv}	součinitel tloušťky svaru	
γ	korekční součinitel otvorů	
α_1, α_n	převodní součinitel	
$\frac{\partial H}{\partial x}$	gradient intenzity pole	(A.m ⁻¹)
λ_{SK}	tepelná vodivost sklolaminátu	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
λ_v	tepelná vodivost vodičů	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
μ_0	permeabilita vakua	(m.kg.s ⁻² .Å ⁻²)
ϵ	poměrná sálavost	
φ	úhel kuželu	(deg)
$\mathcal{H}$	poměr specifických tepel	
χ_c	magnetická susceptibilita částice	
ρ_{He}	měrná hmotnost kapalného He	(kg.m ⁻³)
ρ_N	měrná hmotnost kapalného N	(kg.m ⁻³)
ρ_{kr}	kritická měrná hmotnost	(kg.m ⁻³)
$\sigma_{Dov,0}$	devoleté napětí v ohybu	(MPa)
$\sigma_{Dov,t}$	devoleté napětí v tahu	(MPa)
σ_0	napětí v ohybu	(MPa)
σ_{P20}	mez pevnosti při 20 °C	(MPa)
σ_{P4K}	mez pevnosti při 4 K	(MPa)
σ_{Kt}	mez kluzu	(MPa)
τ_s	srovnávací napětí	(MPa)
$\tau_{ }$	rovnoběžné smykové napětí	(MPa)
$\tau_{\perp}$	kolmé smykové napětí	(MPa)

1. ÚVOD

V poslední době je v celém světě stále aktuálnější otázka výroby a využití energie. Klasických zdrojů energie, jako je uhlí, nafta, plyn, stále ubývá. Využívání jiných zdrojů (jaderné energie, slunečního záření, teplo zemského jádra) je stále ještě ve vývoji. Výroba energie má tedy dnes své omezení. Z tohoto důvodu je důležité její hospodárné využívání.

XV. sjezd KSČ určil směr, kterým se v této oblasti bude řídit náš průmysl, 14. plénium ÚV KSČ z prosince 1979 tento směr potvrdilo. Je to maximální možné racionální hospodaření s energií současně s vývojem výrobní techniky. V souladu s touto tendencí je nutné věnovat značnou pozornost vlastnosti, která se nazývá supravodivost.

Je to vlastnost některých látek, kterou nabývají při překročení určité hluboké teploty, tzv. "přechodové". V tomto stavu látka skokem pozbude svůj elektrický odpor, ztráty vzniklé v supravodiči nejsou prakticky změřitelné. Dnes je známo asi 30 čistých kovových prvků (Hg, Pb, Sn, In, Nb, Ti aj.) a více než 1 000 slitin a intermetalických sloučenin, u kterých tento jev probíhá.

Aplikací supravodivosti v praxi se zabývá kryogenní technika. Je to oblast techniky zabývající se chlazením na teploty pod 20 K. Jako fyzikální jev je supravodivost známa již 69 let, avšak teprve technický pokrok v posledních 15 letech ukázal, že supravodivost je jedním z nejvýznamnějších objevů tohoto století. Aplikace supravodivosti v

silnoproudé elektrotechnice však vyžadují zpravidla řešení celého kryogenního systému, který se skládá ze zdroje chladu, zásobní nádrže na kapalný plyn a kryostatu.

V současné době je kryogenní technika průmyslovým odvětvím s dynamickým rozvojem. Důležitá je výroba kyslíku nízkoteplotním dělením vzduchu. Zkapalnění vzduchu se dosáhne pomocí chladicího cyklu, ve kterém probíhá škrcení vzduchu nebo expanze. Využitím různých bodů varu u jednotlivých složek je možno vzduch rozdělit v rektifikačních kolonách na kyslík, dusík, argon a další plyny. V hutnictví se vhnáním vzduchu obohaceného kyslíkem zvýší produktivita práce a sníží se výrobní náklady (např. ve VSŽ Košice o 93 miliónů Kčs ročně).

Využitím supravodivosti by bylo možno zlikvidovat ztráty vznikající ve vedení při přenosu elektrické energie. Ztráty jsou značné, vždyť například v SSSR je "cestovní spotřeba" více než 10 % veškerého elektrického výkonu. Snížení ztrát je možné řešit zvyšováním napětí ve vodiči, to je ale omezeno kvalitou izolátoru a tím i spolehlivostí. Radikálním řešením je vést elektrický proud kabelem ze supravodivých materiálů. Takový kabel byl už sovětskými vědci vynalezen.

Další uplatnění supravodivosti je v elektromagnetické separaci látek. V tradiční podobě se tak efektivně rozdělují jen nemagnetické a magnetické rudy, což má význam pro obohacování méně bohatých rud v hornictví. Chceme-li ale vyčlenit jednu nemagnetickou látku z druhé, musíme rapidně zvýšit intenzitu magnetického pole. Tudiž i na tomto poli techniky vzniká potřeba supravodivosti. Pokusy se ale uká-

zalo, že supravodivost je úzce závislá na intenzitě magnetického pole a na proudu procházejícím vodičem. Zvýšením intenzity magnetického pole na kritickou hodnotu supravodivost zmizí a rovněž vodič přejde do normálního stavu při překročení určité intenzity proudu.

Výzkumy bylo zjištěno, že se daří očistit pomocí supravodivého magnetu uhlí a naftu od síry, získat z hliněných směsí vysoce kvalitní suroviny pro keramický a papírenský průmysl.

V této diplomové práci je navázáno na využití supravodivosti při řešení magnetické separace kaolínu s ohledem na potřeby n. p. Ferex Děčín, kde se bude kryostat pro supravodivý magnet řešit jako součást státního úkolu.

2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

2.1 Magnetická separace s vysokým gradientem pole a výhledy využití supravodivosti v této oblasti

Dosavadní využití magnetické separace feromagnetických látek o poměrně hrubém zrnění vystačilo s magnetickými poli o nízké indukci (do 1 T) a nízkém gradientu (do 10^5 Am^{-2}). Typy separátorů, které jsou používány: bubnový, pásový, talířový.

Používané elektromagnety: vinutí měděné, hliníkové, chlazené vodou nebo vzduchem. Velké zásoby nerostných surovin v zemské kůře zůstáva-

ly nevyužity, protože žádoucí látky jsou v nich příliš jemně rozptýleny, než aby mohly být hospodárně izolovány desavadními metodami separace.

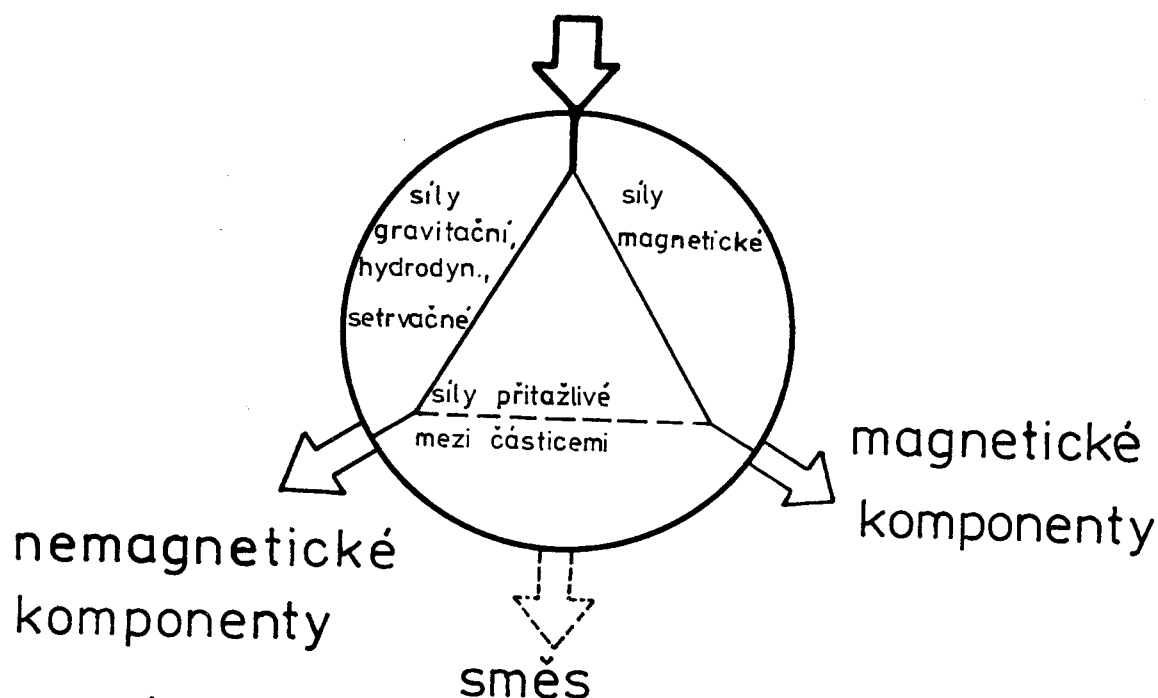
Podmínky magnetické separace částic s různou susceptibilitou.

Při rozboru silového účinku na pohyblivé částice s různými magnetickými momenty v magnetickém poli zjistíme, že se jedná v podstatě o superpozici tří druhů sil:

- a) přitažlivé síly mezi částicemi
- b) magnetické síly
- c) gravitační, setrvačné, hydrodynamické, třecí

Přitažlivé síly separaci omezují, další dva druhy sil způsobují oddělování částic.

Principiální schéma magnetické separace :



obr. 1

Magnetická separace ve vodních suspenzích využívá kromě gravitace i tahu kapaliny, jehož vliv převažuje se zmenšující se velikostí částic.

Při magnetické separaci v kapalině je třeba, aby magnetický tok vyvolal nezávislé přemístění některých částic ve vodní suspenzi. Při malých rozměrech částice (např. 25 μm) se stane převažujícím tok kapaliny a zabrání se tak tomu, aby magnetická akcelerace částic dosáhla potřebné hodnoty za krátkou dobu pobytu v magnetickém poli. Kdyby byl proto malý průtok, neexistovala by prakticky hranice spodního rozměru částic, výkon separátoru by byl však velmi malý.

Tah kapaliny, který závisí na povrchu částice, tedy vytváří spodní limit velikosti částice v mokré separaci. Podstatným zvýšením magnetické tažné síly nad meze dosahované v dosavadních konvenčních separátorech lze rozšířit použitelnost magnetické separace směrem k jemnějším částicím.

Vložíme-li zmagnetovanou částici do homogenního magnetického pole, budou na oba póly působit stejně velké síly opačného směru a po natočení částice do směru pole bude výsledná magnetická síla nulová. Liší-li se ale intenzita magnetického pole v místech obou magnetických pólů částice, vznikne nerovnováha sil a na částici bude působit výsledná síla.

Síla F_x , působící na částici ve směru x v nehomogenním magnetickém poli ve vakuu:

$$F_x = p_z \frac{\partial H}{\partial x} = \mu_0 \cdot \chi_z \cdot V \cdot H \cdot \frac{\partial H}{\partial x}$$

Je tedy zřejmé, že pro danou látku (χ), velikost částic (V) můžeme ovlivnit pouze H a $\frac{\partial H}{\partial x}$ (gradient intenzity magnetického pole). Zvyšování H má význam jen tehdy, způsobí-li zvýšení p_z . Klasickými prostředky se získá jen za cenu vysokých energetických nákladů. Zvýšení gradientu pole je účinné vždy a je poměrně snadno realizovatelné.

Nejsnazší cesta k vytvoření vysoké nehomogenity pole je vložení jemnozrnného nebo jemně vláknitého feromagnetického filtru do prostoru magnetického pole, v němž má dojít k separaci.

Základním požadavkem na filtr je dostatek ploch k zachycení magnetických částic a vytvoření lokálních vysokých gradientů intenzity magnetického pole. Náplň filtrů musí tedy obsahovat velké množství drobných, magneticky nasycených tělísek, obsahujících plochy s malým poloměrem křivosti a dostatečným prostorem pro průtok rmutu. Filtry bývají železné. Jsou-li tvořeny kuličkami, mají výhodu vhodné dráhy pro magnetický tek, avšak nízký gradient. Filtry z ocelové nerezové vlny utvoří na povrchu vysoký gradient po nasycení. Je ale obtížné magnetického nasycení dosáhnout. I při stlačení vlny je 90 % objemu volným prostorem; pro průtek je to vhodné, ale většina vláken je orientována kolmo k poli. Tato vlákna, aby se

zmagnetovala do nasycení, potřebují 10x silnější pole, než kompaktní materiál.

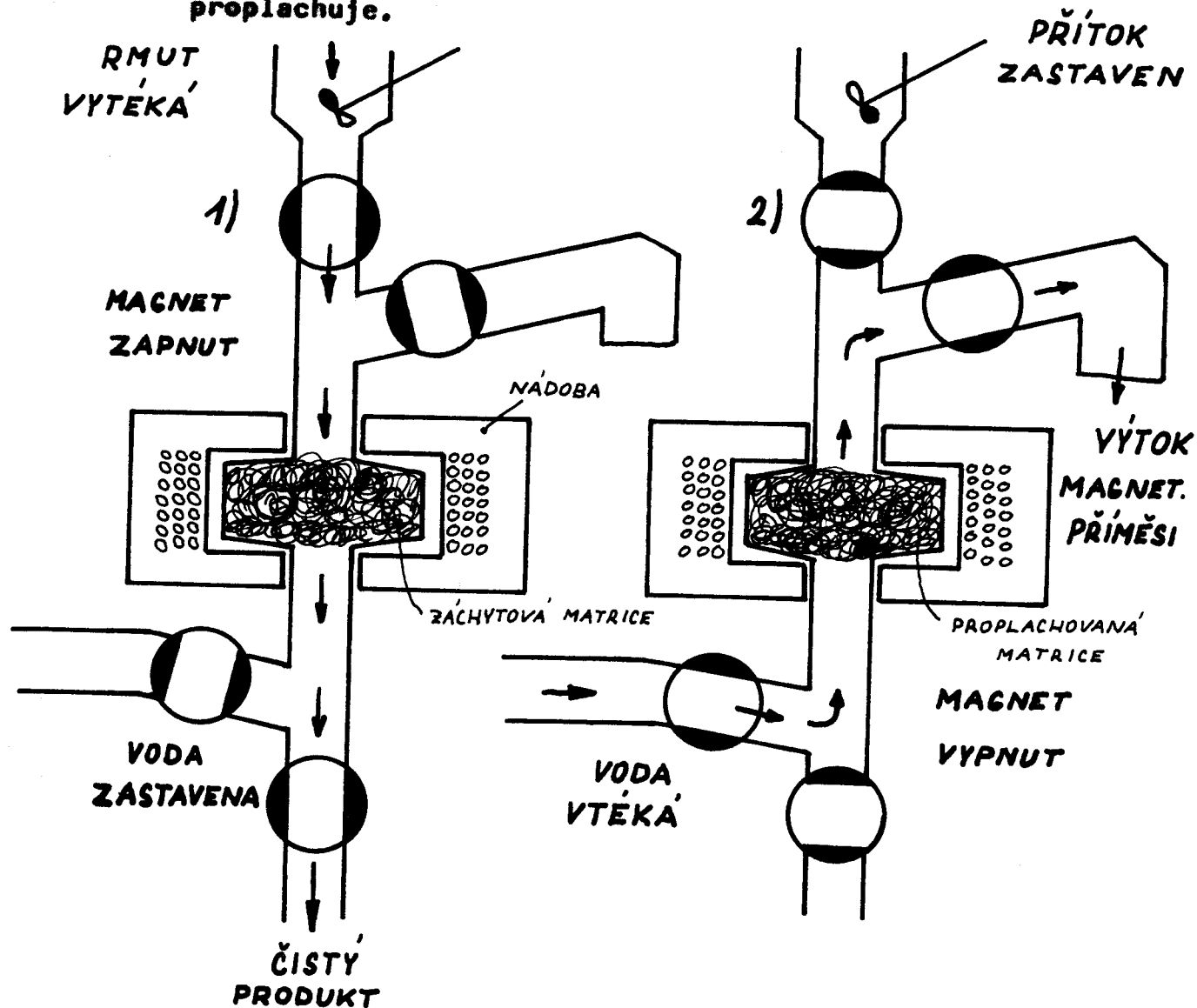
Typy separátorů s vysokým gradientem

Vysoký gradient magnetického pole může obecně existovat jen v malém objemu, jeho vytvoření na plochách dostatečně rozměrných k zachycení praktického množství částic je značným problémem.

Od použití drážkovaných desek, mezi nimiž se vytvářela indukčnost maximálně 1,3 T, se upustilo. Významného pokroku se totiž dosáhlo aplikací separátoru, který vyvinula skupina pracovníků na Massachusetts Institute of Technology pod vedením H. Kolma.

Matricí je feromagnetická nerezová vlna. K jejímu zmagnetování do nasycení je použit solenoid, jehož průměr je větší než délka. Solenoid je uzavřen v železném plášti. Tímto obvodem lze vytvářet pole až 2 T v poměrně velkém prostoru. Ve srovnání s konvenčními separátory tento obvod vyžaduje desetinu investic a spotřebuje desetinu elektrické energie. Separátor typu Kolm-Marsten byl zkonstruován nejprve pro diskontinuální, později pro kontinuální provoz. Úpravny kaolínu jsou zatím vybaveny diskontinuálními separátory. U nás v ČSSR je takový separátor instalován v závodě Kaznějov pro úpravu kaolínů. Výrobce separátoru je švédská firma SALA. Nevýhodou diskontinuálního separátoru (obr. 2) je přetržitý provoz. V Kaznějově má přístroj osmiminutový cyklus,

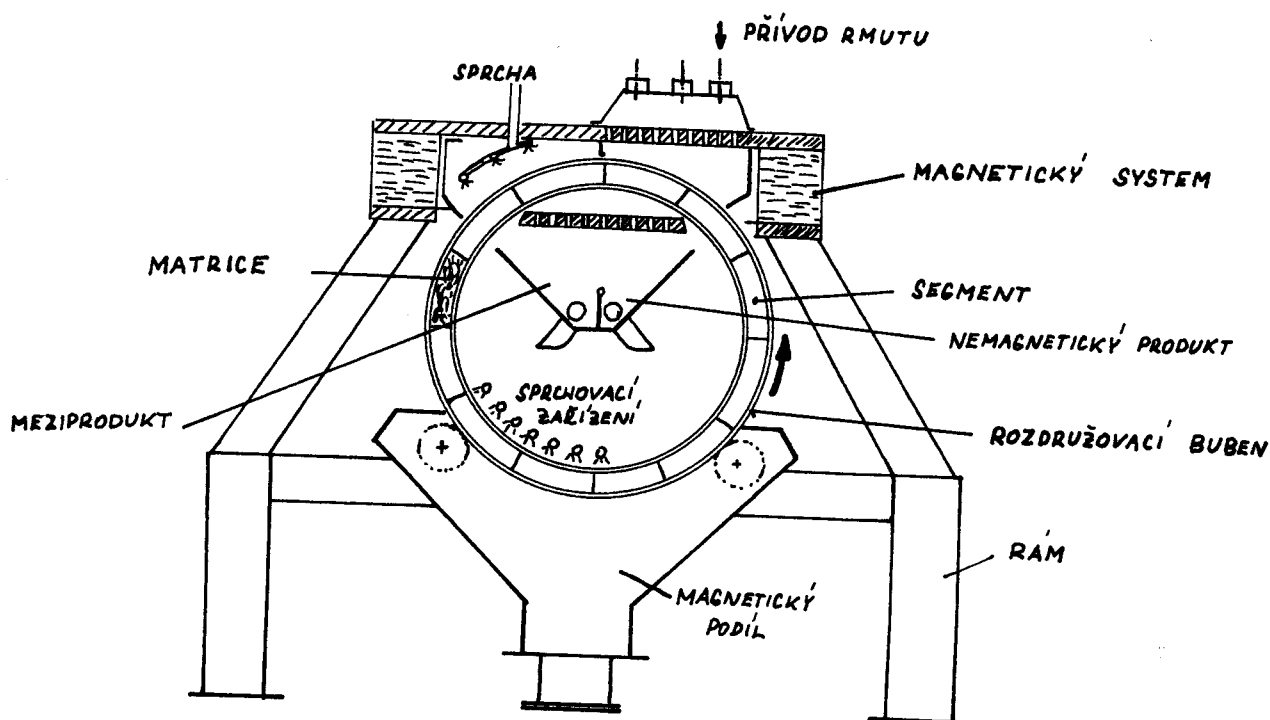
z toho šest minut je v provozu a dvě minuty se matrice
proplachuje.



obr. 2

Přetržitost provozu se odstraní aplikací kontinuálního typu vysokogradientního magnetického separátoru druhé generace (obr. 3). Matrice z nerezové ocelové vlny je uložena v segmentech retujícího mezikruží. Když daný segment naje-
de do první části magnetického obvodu, kterou protéká rmut,

matrice se zmagnetuje a zaplní se v proudu rmutu postupně magnetickými částicemi. V druhé části magnetického obvodu je matrice proplachována vedou, aby byly vyplaveny nemagnetické částice, které se na matici mechanicky zachytily. Když segment vyjede z magnetického obvodu, jsou proplachovací vedou z matrice odstraněny magnetické částice a matrice je připravena pro další použití.



obr. 3

Separátory s maticí se nazývají usazovací. Matrice má ovšem nevýhodu v přerušovaném provozu; ať je diskontinuální nebo kontinuální, vždy se musí po zanesení vyčistit. Nejvýhodnější by proto bylo použít separátor bez matrice, průtokový. V něm je podstatný tvar budícího

magnetického pole, které samotné vytváří magnetickou sílu působící na separovanou částici. Pro tento typ separátorů by se zvláště dobře hodily supravodivé magnety, protože se jimi dají vytvořit silná nehomogenní pole ve velkých objemech.

Je známo, že supravodivý magnet má při silnějších magnetických polích a větších separačních objemech menší rozměry a hmotnost, než magnet normální. Z hlediska celkových nákladů jsou supravodivé magnety jednoznačně výhodnější, protože spotřeba energie je u normálních magnetů nepoměrně vyšší a po zavedení velkovýroby supravodičů může být porovnatelná i cena magnetů supravodivých s normálními. Z technického hlediska je pozoruhodné, že v supravodiči může být velká proudová hustota při prakticky nulovém elektrickém odporu (až 10^{40} A . m⁻²). Tím se vyvine tak velká magnetomotorická síla, že je možno dosáhnout ve vzduchu indukci až 17 T.

2.2 Využití magnetické separace při čištění kaolínů

Československo patří k nejvýznamnějším producentům a vývozcům kaolínů. Objemem výroby kaolínu jsme na pátém, exportem kaolínu na třetím místě ve světě.

V období minulých dvaceti let se světová produkce kaolínu ztrojnásobila a kaolín se používá ve více a více průmyslových odvětvích.

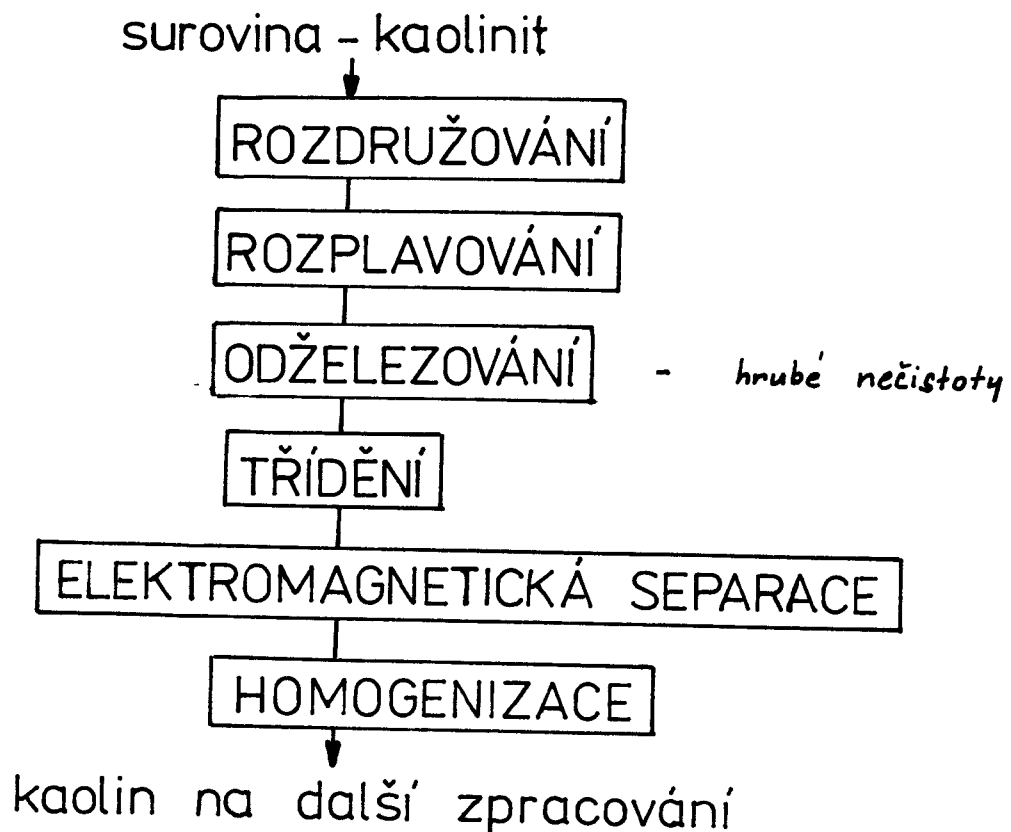
K nejdůležitějším jakostním parametrům kaolínu, určujícím jeho použitelnost v průmyslu keramickém, papírenském aj., patří množství pigmentujících příměsí, obsahujících Fe a Ti. Jedná se především o muskovit, biotit, siderit, pyrit, granát, rutil, přírodní kysličníky a hydroxidy železa. Tyto znečišťující příměsí jsou rozptýleny v řadě kaolínů i v nejjemnějších frakcích v částicích o velikostech několika mikrometrů, takže běžné separační postupy jsou neúčinné. Ohromné zásoby keramických a papírenských kaolínů musí být proto vykazovány jako nebilanční, přičemž stávající ložiska jakostních surovin jsou vyčerpávána mnohem rychleji, než se původně předpokládalo. Za nebilanční se považují kaolíny s obsahem Fe + Ti větším, než 1,1 %.

Při separaci těchto kaolínů bylo ale dosaženo úspěchů použitím separace při vysoké intenzitě magnetického pole. Touto metodou bude možné nahradit dosavadní selektivní těžbu surovinových partií s nižšími obsahy železa těžbou hromadnou s následnou magnetickou separací. Bude to mít velký ekologický vliv, protože se nezničí tvářnost krajiny místními nálezy, ale postupně se bude odebírat celé ložisko.

Výroba keramické plastické hmoty - kaolínu - bude probíhat obvyklým mokrým způsobem, po rozplavení ale surovina projde magnetickým separátorem (viz obr. 4).

Magnetický separátor firmy SALA, který je instalován v úpravně kaolínu Kaznějov, má ale příkon 400 kW. Modelové

zařízení SALA, jež mají ve VÚK Karlovy Vary, má příkon 100 kW. Přitom maximální jmenovitý výkon v Kaznějově je 30 - 40 t/hod.



obr. 4

ČSSR, jako jediný stát v RVHP, má pro členské státy RVHP dodat počínaje rokem 1982 100 - 200 kusů separátorů s vysokým gradientem o jmenovitém výkonu 80 - 100 t/h. Vzhledem k velkému příkonu vzniká nezbytnost aplikace superovodivého magnetu v těchto separátorech.

2.3 Supravodivé magnety pro separaci

Supravodivý magnetický systém je zařízení, které má tyto hlavní části:

- supravodivé vinutí a jeho nosná konstrukce
- železný magnetický obvod (případně)
- kryostat
- přívody proudu
- ochranné odpory
- náplň chladicí kapaliny
- napájecí zdroj
- měřicí, ochranné a ovládací přístroje.

Chladí se buď pouhým ponořením do lázně kapalného helia vroucího při atmosférickém tlaku ($T = 4,2 \text{ K}$) nebo proudem dvoufázového nebo nadkritického helia kolem vodičů nebo uvnitř dutých vodičů ($T = 4,4 - 5 \text{ K}$ při tlaku vyšším, než atmosférickém).

Železný magnetický obvod má dvě funkce: přispívá k zvýšení indukce magnetického pole v pracovním prostoru a vede zpětný magnetický tok, čímž stíní okolí od magnetického pole vinutí. Železo nemá výrazně lepší magnetické vlastnosti při heliové teplotě. Vzniká tím problém zachycení sil mezi vinutím a železem v prostoru tepelné izolace, je-li železný magnetický obvod na normální teplotě mimo kryostat.

Kryostat má vakuovou tepelnou izolaci, ve které se nachází soustava stěn odrážejících sálání. Vakuum se vytvoří

buď jednorázovým čerpáním, což vyžaduje vakuotěsné svary a těsnění rozebíratelných částí a ventilů, nebo se zajišťuje trvalým čerpáním vývěvou. Kryostat musí být opatřen bezpečnostními ventily pro případ náhlého stoupnutí vnitřního tlaku nad přípustnou hodnotu.

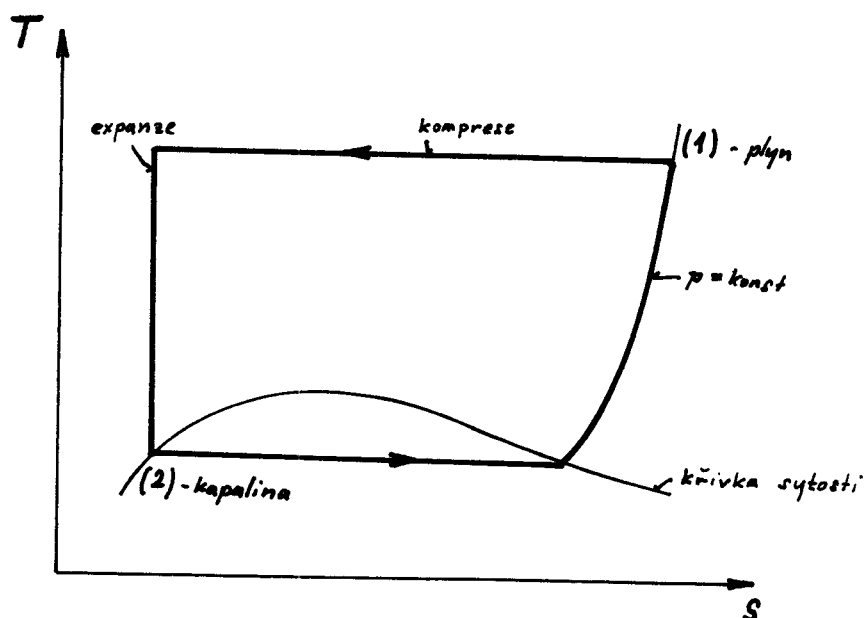
Přívody proudu jsou konstruovány tak, aby přiváděly co nejméně tepla do chladicí kapaliny.

Ochranné odpory slouží k rychlému odvedení energie magnetického pole vinutí v havarijním stavu. Tím se chrání vinutí před nadměrným ohřevem a kapalina před rychlým odpařením při zániku supravodivého stavu. Tyto ochranné odpory se umísťují mimo kryostat nebo nad vinutím v parách helia, když se proudové přívody přerušují.

Při otevřeném způsobu chlazení se kapalně helium musí do kryostatu trvale doplňovat ze zásobníku tak, aby se jeho hladina udržovala na předepsané úrovni. Kapalně helium se vyrábí ve zkapalňovači. Jeho princip je znázorněn v T - s diagramu (obr. 5).

Je to teoretický ideální cyklus zkapalnění plynu. Plyn, vstupující do cyklu (1) se izotermicky stlačuje od počátečního tlaku do konečného. Teplo, vzniklé stlačením, se odvádí ve výměníku do obíhající látky. Po stlačení následuje izoentropická expanze. Práce, vzniklá v tomto procesu v expanderu (detanderu) se použije pro stlačení plynu. Konečný tlak se volí takový, aby po expanzi

v detanderu byl plyn zcela zkapalněn.



obr. 5

Napájecí zdroj slouží k zavedení energie magnetického pole do vinutí při prvním nabuzení, na udržení stálého proudu v provozu a na pomalé vyvedení energie z vinutí podle předepsaného programu provozu. Proudově musí být dimenzován na největší proud vinutí a napětově na předepsanou rychlost nabuzení. Moderní napájecí zdroje jsou v podstatě ze sítě napájené, diodově usměrněné a tranzistory nebo tyristory regulovatelné, vodou nebo vzduchem chlazené přístroje.

Celý provozní pracovní cyklus supravodivého magnetu, vč. doplňování chladicí kapaliny a ochrany, je možno automatizovat.

Z hlediska provozní spolehlivosti při nepřerušném chodu separátoru jsou v supravodivém magnetickém systému

tato kritická místa: dodávka chladicí kapaliny, porušení vakua, přechod supravodivého vinutí do normálního stavu, porucha napájecího zdroje, přerušení dodávky elektrické energie. Poslední dvě okolnosti se mohou vyskytnout i v provozu normálních separátorů a proto nebudou z tohoto důvodu supravodivé separátory o nic poruchovější. Naopak, v perzistentním chodu nemůže krátkodobé přerušení dodávky elektrické energie ovlivnit chod samotného magnetu. Dodávka chladicí kapaliny je závislá na bezporuchovém chodu zkapalňovače nebo refrigerátoru. S dlouhodobým provozem těchto zařízení jsou již určité zkušenosti a je třeba přiznat, že se nedá zaručit jejich 100 % dlouhodobá provozní schopnost a bezporuchovost. Mimo to vyžaduje obsluha těchto zařízení - i když jsou plně automatizované - kvalifikovaný personál. V tomto směru se očekává postupný vývoj k lepšímu, jestliže objem objednávek zajistí návratnost prostředků věnovaných zdokonalování těchto zařízení. K porušení vakua a k přechodu supravodivého vinutí do normálního stavu může dojít nejpravděpodobněji při nějakém mechanickém působení. Pro nedostatek zkušeností s provozem supravodivých magnetů v průmyslových podmínkách nelze tento problém ještě jednoznačně posoudit. Je možné vyslovit jen předpoklad, že součinností praktiků v separaci a konstruktérů supravodivých magnetů a kryostatů bude možné poruchovost z tohoto důvodu vyloučit téměř úplně. Nesporné je, že supravodivý separátor je složitější zařízení než normální separátor a jeho obsluha a kontrola bude vyžadovat vyšší kvalifi-

kací. Nejméně spolehlivé prvky kryogenního chladicího systému, expandery a kompresory, se většinou kvůli převozní spolehlivosti zdvojují.

2.4 Technické a ekonomické porovnání separace normálními a supravodivými separátory

V případě silně magnetických materiálů (ferromagnetických) lze s úspěchem využívat poměrně slabých magnetických polí buzených např. permanentními magnety. Podstatně širší škála fyzikálních a technických problémů se objeví u skupiny slabě magnetických materiálů. Dřívější technika úpravy slabě magnetických materiálů byla zdokonalena rozvinutím metody magnetického mokrého rozdružování. Uspokojivé vlastností rozdružovačů se dosahují vytvořením poměrně vysoké intenzity magnetické indukce (okolo 1 T) a jejího gradientu.

Klasické typy separátorů mají své jméno pravděpodobně od klasického způsobu výroby magnetického pole. Na konstrukci běžného separátoru s matricí navázal J. H. Watson, který klasický magnet nahradil supravodivým solenoidem navínutým supravodičem Nb - Ti. Maximální pole dosažené v tomto magnetu bylo 5 T. Jako matrice byla použita nerezová ocelová ferromagnetická vlna s průměrem vlákna okolo $70 \mu\text{m}$.

Supravodivé magnetické systémy svými vlastnostmi (dosahováním vysokých hodnot indukce ve značném objemu a relativ-

ně vysokého gradientu) dovolí v budoucnu vyloučit pracovní element - matici a tím odstraní všechny s ní spojené potíže. Navíc hodnoty magnetické indukce nejsou omezeny shora hodnotou magnetického sycení železa (tj. 2 T). Takové magnetické systémy jsou již navrženy a jsou to v podstatě různé konfigurace kvadrupólu.

Seriózní ekonomické porovnání klasických a supravodivých separátorů je v současné době značně obtížné. Obtížnost spočívá v tom, že dosud není publikováno průmyslové nasazení supravodivého separátoru, takže podklady pro ekonomiky provozu existují pouze u klasických separátorů a obdobné charakteristiky supravodivých separátorů jsou získány pomocí teoretických předpokladů odvozených z provozu malého počtu laboratorních modelů.

Nejobecnější hodnotící kritéria podal R. Arvidsen. Ekonomické hodnocení rozdělit na čtyři části:

A) investice - materiál

práce (návrh magnetu, obvodu, matrice, karusel ap.)

B) provoz - cena elektrické energie

vlastní provoz (pohon pohyblivých částí)

C) údržba - u kontinuálních klasických separátorů je zvýšená údržba pohyblivých součástí, pozornost věnována matici

D) důchod - zahrnuje cenu výrobku, exploatace ložisek nerostných surovin, nové druhy dosud nezískaných materiálů ap.

Podrobný postup dodržel P. G. Marston, který shrnul data o dosud nejužívanějších úpravách kaolínu. Srovnání klasického separátoru se supravodivým založil na podmínce stejného výkonu separátoru, kdy předpokládá, že platí pro indukce B a pracovní průřezy S vztah:

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{S_1}{S_2}$$

Toto srovnání je uvedeno v tabulce 1:

	SUPRAVODIVÝ φ61cm ; B=6T	KLASICKÝ φ107cm ; B=2T
Instalovaná cena [mil. \$]	0,5	0,25
Příkon magnetu [kW]	0	100
Výkon [t/hod]	20	20
Cena měrného příkonu [\$/(t)]	0	0,10
Celková cena [\$/(t)]	10 ÷ 20	10 ÷ 20
Cena příkonu : cena celková	0	1 ÷ 0,5 %

Při bližším studiu je ale zřejmé, že autor použil pro ekonomické porovnání jedno z hledisek, které se zdá být zatíženo subjektivním přístupem. Klasické separátory mají totiž příkon elektrické energie větší, např. SALA Magnetics uvádí pro separátor typu HGMS 107 - 1 M - 19 příkon 400 kW při výkonu 20 t/h kaolinové suspenze, tozn. že oproti údajům v tabulce 1 je příkon 4x větší.

Je zřejmé, že do ekonomického rozboru by bylo nutné zahrnout další hlediska než pouze pořizovací náklady a náklady na energii. Vhodným začleněním magnetické separace do úpravnických linek je možné podstatně ekonomičtěji využít naší surovinovou základnu. Dále zhodnotit dosavadní

náklady na geologický průzkum, který některá ložiska označil za netěžitelná při současném stavu zpracování suroviny. V neposlední řadě je velká naděje na získání surovin s mnohem vyššími kvalitativními parametry, které mohou omezit, případně úplně zastavit dovoz těchto surovin zvláště ze států devizové oblasti.

Všechny tyto vlivy působí při vytváření komplexního ekonomického hodnocení, avšak za současného stavu znalostí je velice obtížné je všechny správně zhodnotit.

3. VLASTNÍ ŘEŠENÍ

Na základě dosavadních poznatků je úkolem předložené diplomové práce vypracovat návrh kryostatu supravodivého magnetu použitelného pro magnetický separátor linky na úpravu kaolínu.

Při řešení úkolu se vychází jednak ze známých poznatků, uvedených v předchozí části práce, jednak z připomínek a poznatků pracovníků n. p. Ferox, Děčín, kde má být řešení realizováno.

Navržený kryostat, jehož podrobný mechanický a tepelný výpočet je hlavní částí předložené diplomové práce, je tvořen následujícími prvky, které jsou navrhovány postupně:

Plášť kryostatu

Je to část vnější, největší nádoby zařízení. Z ní je odčerpáván vzduch vývěvou, aby byly co nejmenší přívody tepla vedením vzduchu mezi nádobou vnější a dusíkovou, také mezi dusí-

kovou nádobou a heliovou. Plášť musí být tedy vakuotěsný, odolný proti vnitřnímu podtlaku (tj. vnějšímu přetlaku) po stránce pevnostní i stabilní.

Plášť dusíkové nádoby

Jsou součástí dusíkové stínící nádoby, mezi nimi je kapalný dusík. Plášť proto musí být opět vakuotěsný, musí zajišťovat pevnost a stabilitu nádoby.

Plášť heliové nádoby

Jsou součástí hlavní heliové nádoby, ve které je supravodivý magnet. Plášť musí být dostatečně pevný a stabilní, svary vakuotěsné.

Víko kryostatů

Je přišroubováno k přírubám plášťů. Jsou na něm úchyty pro vnitřní nádoby, hrdlo heliové a dusíkové. Musí být proto dostatečně pevné a stabilní, vakuotěsné.

Dno kryostatů

Je opět přišroubováno k přírubám plášťů. Je důležité pro vytvoření stability při transportu i při provozu.

Víko heliové nádoby

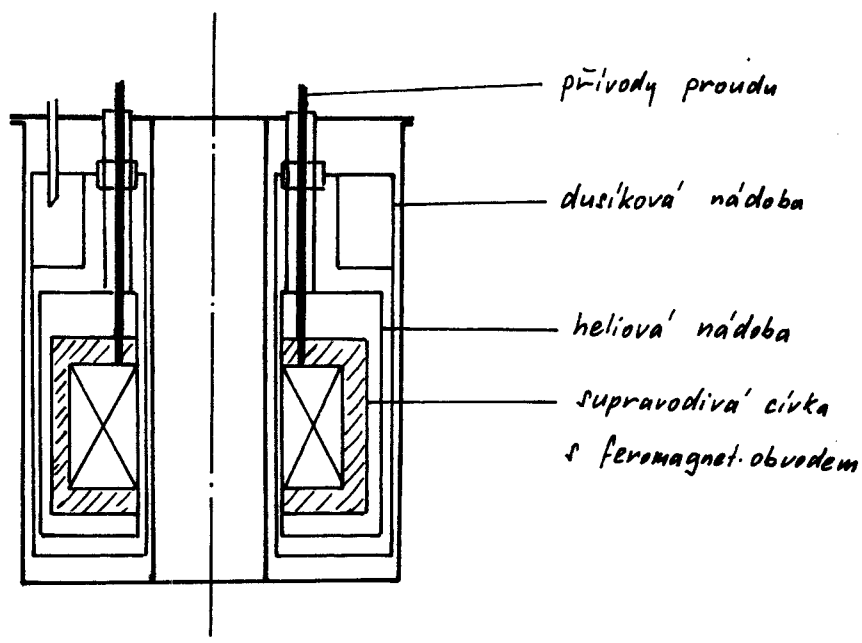
Musí být pevná, zajišťující co nejmenší přestup záření. Je nutno uvažovat výrobní jednoduchost i snadnou případnou demontáž.

Úchyty dusíkové a heliové nádoby

Je u nich nutná vysoká pevnost, tuhost, malá tepelná vodivost. Zajišťují pevné ustavení nádob.

Návrh kryostatu

Kryostat je složen ze tří soustředných válcových nádob, které jsou od sebe vzájemně tepelně izolovány. Ve vnitřní heliové nádobě je umístěno supravodivé vinutí magnetu. Aby se co nejvíce zamezilo přivedu tepla k lázni kapalného helia, které je výrobně drahé, je heliová nádoba obklopena tepelným stíněním tvořeným dusíkovou nádobou (plněnou kapalným dusíkem) viz obr. 6. Prestor mezi heliovou a dusíkovou nádobou a vnějším pláštěm kryostatu je odčerpán na vakuum.



obr. 6 - ideový návrh kryostatu

3.1 Pevnostní výpočet kryostatu

Použité materiály:

Austenitická nerezavějící ocel 17246.1

$$\sigma_{p20} = 550 \text{ MPa}; \sigma_{kt} = 230 \text{ MPa}; E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

Hliníková slitina (Al-Mn) 424432.9

$$\sigma_{pt} = 500 \text{ MPa}; E = 0,71 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

Sklotextit

$$\sigma_{pt} = 200 \text{ MPa}; E = 1 \cdot 10^4 \text{ MPa}$$

Austenitické oceli mají při teplotě 293 K nejmenší pevnost. S klesající teplotou jejich pevnost vzrůstá. Může to být až 2,7krát, to znamená že při 4 K je pevnost

$$\sigma_{pt_{4K}} = 550 \cdot 2,7 = 1\,485 \text{ MPa}$$

3.1.1 Výpočet pláště

Výpočet pláště kryostatů

Plášť je zkoušen na vnitřní podtlak (vakuum), tj. na vnější přetlak. Výpočet na pevnost je založen na membránové teorii válcové skořepiny velké délky. Výpočet na stabilitu vychází z Misesovy teorie.

Lze počítat dle normy ČSN 690011, je-li

$$\frac{D_v}{D_v - 2s_{pv}} \leq 1,2$$

Rozměry pláště: délka

$$L_v = 600 \text{ mm}$$

průměr

$$D_v = 1\,720 \text{ mm}$$

tloušťka stěny

$$s_{pv} = 10 \text{ mm}$$

podtlak

$$p = 0,1 \text{ MPa}$$

Materiálem pláště je volena hliníková slitina 424432.9. Je odolná proti korozi, lehká, dobře svařitelná, není drahá.

$$\frac{D_v}{D_v - 2s_{pv}} = \frac{1\,720}{1\,720 - 2 \cdot 10} = 1,01 < 1,2$$

Předepsaná nerovnost vyhovuje, proto je možno počítat dle normy (3).

Dovolená nekruhovost:

$$\frac{L_v}{D_v} = \frac{600}{1720} = 0,349$$

$$\frac{s_{rv}}{D_v} = \frac{10}{1720} = 0,0058$$

Pro tyto hodnoty je dovolená nekruhovost

$$N = 0,5 s_{rv} = 0,5 \cdot 10 = 5 \text{ mm}$$

Tloušťka pláště: $s_{pv} = s_{rv} + C$

Z hlediska pevnosti

$$s_{rv} = \frac{p \cdot D_v}{2 \sigma_p + p} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 1,72}{2 \cdot 142 \cdot 10^3 + 0,1 \cdot 10^6} = 6,05 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$\text{když } \sigma_p = \frac{\sigma_{pt}}{x} ; x = 3,5 ; \sigma_{pt} = 500 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow \sigma_p = \frac{500}{3,5} = 142 \text{ MPa}$$

Z hlediska stability

$$A = \frac{p \cdot 10^6}{E} = \frac{0,1 \cdot 10^6}{0,71 \cdot 10^4} = 1,408$$

pro daný poměr

$$\frac{L_v}{D_v} \text{ je } s_{rv} = 0,0035 D_v = 0,0035 \cdot 1720 = 6,02 \text{ mm}$$

Je zvolena tloušťka pláště $s = 10 \text{ mm}$.

Výpočet plášťů dusíkové nádoby

Rozměry plášťů:

vnější průměr dusíkové nádoby $D_{N1} = 1630 \text{ mm}$

vnitřní průměr dusík. nádoby $D_{N2} = 1490 \text{ mm}$

délka dutého pláště nádoby $L_N = 550 \text{ mm}$

Materiálem je volena hliníková slitina 424432.9 - leštěno.

Podtlak $p = 0,1 \text{ MPa}$

A) Výpočet vnitřního pláště

Plášť je zkoumán na vnější přetlak $0,1 \text{ MPa}$. Vzhledem k předchozímu výpočtu bude opět rozhodující pro výpočet tloušťky stěny pláště ztráta stability.

$$\frac{L_N}{D_{N1}} = \frac{500}{1490} = 0,369$$

Z hlediska pevnostního

$$s_{DN1} = \frac{p \cdot D_{N1}}{2 \sigma_D + p} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 1,49}{2 \cdot 142 \cdot 10^6 + 0,1 \cdot 10^6} = 5,24 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Z hlediska stability

$$A = \frac{p \cdot 10^6}{E} = \frac{0,1 \cdot 10^{11}}{0,71 \cdot 10^{11}} = 1,408$$

pro daný poměr

$$\frac{L_N}{D_{N1}} \text{ je } s_{DN1} = 0,004 \quad D_{N1} = 0,004 \cdot 1490 = 5,96 \text{ mm}$$

Protože tento plášť nebude vystaven povětrnostním vlivům, na rozdíl od vnějšího pláště kryostatu, je volena jeho tloušťka $s_{PN} = 6 \text{ mm}$.

B) Výpočet vnějšího pláště

Plášť je zkoumán také na vnitřní podtlak, tj. vnější přetlak $0,1 \text{ MPa}$.

Výpočet tloušťky z hlediska pevnostního

$$s_{DN1} = \frac{p \cdot D_{N1}}{2 \sigma_D + p} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 1,63}{2 \cdot 142 \cdot 10^6 + 0,1 \cdot 10^6} = 5,86 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Z hlediska stability

$$A = \frac{p \cdot 10^6}{E} = \frac{0,1 \cdot 10^{12}}{0,71 \cdot 10^{11}} = 1,408$$

$$\frac{L_N}{D_{N1}} = \frac{550}{1\,630} = 0,337$$

Pro tyto hodnoty je

$$s_{N1} = 0,0035 D_{N1} = 0,0035 \cdot 1\,630 = 5,71 \text{ mm}$$

Tloušťka vnějšího pláště je zvolena také 6 mm.

Výpočet plášťů heliové nádoby

Heliová nádoba má vnější plášť odstupňovaný.

Rozměry plášťů:

vnější menší průměr	$D_{N1} = 1\,360 \text{ mm}$
délka pláště na tomto průměru	$L_{N2} = 400 \text{ mm}$
vnější větší průměr	$D_{N4} = 1\,440 \text{ mm}$
délka pláště na tomto průměru	$L_{N4} = 120 \text{ mm}$
vnitřní průměr	$D_{N3} = 1\,085 \text{ mm}$
délka vnitřního pláště	$L_{N3} = 520 \text{ mm}$

Materiálem bude nerezavějící ocel 17246.1 z důvodů vysoké odolnosti a pevnosti.

Podtlak $p = 0,1 \text{ MPa}$

Rozměry heliové nádoby, tím ale i samozřejmě rozměry nádoby dusíkové a vnější, jsou závislé na rozměrech supravodivého magnetu, který dodá n. p. Škoda Plzeň. Jeho vnější průměr bude 1 300 mm, délka 300 mm.

A) Výpočet vnitřního pláště

Plášť bude zkoumán na vnější přetlak 0,1 MPa.

Tloušťka pláště: $s_{pH3} = s_{oH3} + c$

Výpočet tloušťky pláště z hlediska pevnostního

$$s_{oH3} = \frac{p \cdot D_{H3}}{2 \sigma_p + p} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 1,085}{(2 \cdot 153,3 + 0,1) \cdot 10^6} = 3,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$\text{kdýž } \sigma_p = \frac{\sigma_{kt}}{x} = \frac{230}{1,5} = 153,3 \text{ MPa}$$

x je míra bezpečnosti, dle normy je $x = 1,5$.

Z hlediska stability

$$A = \frac{p \cdot 10^6}{E} = \frac{0,1 \cdot 10^{12}}{2,1 \cdot 10^{11}} = 0,476$$

$$\frac{L_{H3}}{D_{H3}} = \frac{520}{1085} = 0,479$$

Z těchto hodnot je normou určeno $s_{oH3} = 0,0025 D_{H3}$

$$s_{oH3} = 0,0025 \cdot 1085 = 2,71 \text{ mm.}$$

B) Výpočet vnějšího pláště

Plášť bude zkoumán na vnější přetlak 0,1 MPa.

I) Menší průměr

pevnostní hledisko

$$s_{oH2} = \frac{p \cdot D_{H2}}{2 \sigma_p + p} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 1,36}{2 \cdot 153,3 \cdot 10^6 + 0,1 \cdot 10^6} = 4,43 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

hledisko stability

$$\frac{L_{H2}}{D_{H2}} = \frac{400}{1360} = 0,294$$

$$A = \frac{p \cdot 10^6}{E} = \frac{0,1 \cdot 10^{12}}{2,1 \cdot 10^{11}} = 0,476$$

Dle těchto hodnot je

$$s_{0H1} = 0,0025 \quad D_{H1} = 0,0025 \cdot 1\,360 = 3,4 \text{ mm.}$$

II) Větší průměr

pevnostní hledisko

$$s_{0H1} = \frac{p \cdot D_{H1}}{2\sigma_p + p} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 1,44}{2 \cdot 153,3 \cdot 10^6 + 0,1 \cdot 10^6} = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

hledisko stability

$$A = \frac{p \cdot 10^6}{E} = \frac{0,1 \cdot 10^{12}}{2,1 \cdot 10^{11}} = 0,476$$

$$\frac{L_{H1}}{D_{H1}} = \frac{120}{1\,440} = 0,0833$$

Dle těchto hodnot je

$$s_{0H1} = 0,0015 \quad D_{H1} = 0,0015 \cdot 1\,440 = 2,16 \text{ mm.}$$

Z konstrukčních důvodů je volena tloušťka pláště (vnitřního i vnějšího) $s_{pH} = 4 \text{ mm.}$

3.1.2 Výpočet vík

Víko kryostatu

Toto víko je voleno z hliníkové slitiny 424432.9 svařované z plechů. Svary budou provedeny v ochranné atmosféře. Ve víku budou otvory, jejich uvažování je nutné pro výpočet tloušťky stěny.

Otvory pro úchyty	6 x Ø	60 mm
Otvory pro výstup a vstup dusíku	3 x Ø	45 mm
Otvor pro přívod proudu a hel.hrdla	Ø	290 mm
Otvor pro trubku pracovního prostoru	Ø	1 020 mm

Výpočet tloušťky stěny víka vychází z membránové teorie, opravené na ohybové namáhání součinitelem β . Pro hledisko stability, při vnějším přetlaku, byl určen vztah ze stabilitní teorie velkých průhybů a ověřen měřením. Víko má vnější průměr $D_k = 1\,800\text{ mm}$, výšku 280 mm . Zkoušeno bude vnitřním podtlakem, tj. vnějším přetlakem $p = 0,1\text{ MPa}$.

Výpočet tloušťky stěny

Z pevnostního hlediska

$$s_{ik} = \frac{D_k \cdot p \cdot \beta}{4 \cdot \sigma_p} + 0,003 = \frac{1,80 \cdot 0,1 \cdot 10^6 \cdot 2}{4 \cdot 104 \cdot 10^6} + 0,003 = 0,0038\text{ m}$$

když součinitel tvaru víka $\beta = 2$

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{pl}}{x} = \frac{500}{4,8} = 104\text{ MPa}$$

součinitel bezpečnosti $x = 4,8$.

Ze stabilního hlediska

Kuželeová stěna víka se počítá jako válec s vnějším přetlakem o průměru

$$D_{k1} = \frac{D_k}{\cos \varphi} = \frac{1\,800}{\cos 45^\circ} = 2\,546\text{ mm}$$

a délce

$$L_{k1} = 1,25 H_k = 1,25 \cdot 220 = 275\text{ mm}$$

$$\frac{L_{k1}}{D_{k1}} = \frac{275}{2\,546} = 0,11$$

$$A = \frac{p \cdot 10^6}{E} = \frac{0,1 \cdot 10^{12}}{0,71 \cdot 10^{11}} = 1,408$$

Pro tyto hodnoty je

$$s_{OK} = 0,0022 D_{K1} = 0,0022 \cdot 2\,546 = 5,6 \text{ mm.}$$

Je nutno ale ještě přihlédnout na otvory ve víku.

$$\sum d = 6 \cdot 60 + 3 \cdot 45 + 290 + 1\,020 = 1\,645 \text{ mm}$$

$$\frac{\sum d}{D_{K1}} = 0,803$$

tomu odpovídá korekční součinitel $\gamma = 1,8$

$$s'_{OK} = s_{OK} \cdot \gamma = 5,6 \cdot 1,8 = 10,08 \text{ mm}$$

Z důvodu, že toto víko kryostatu je svařované, vystavené vlivům povětrnosti a eventuálně i povrch znečištěn kaolínem, přičemž zachycuje i určité síly od úchytů, je volena tloušťka stěny víka $s_{PK} = 20 \text{ mm}$.

Dno kryostatu

Je voleno z hliníkové slitiny Al-Mn 424432.9, k plášti je přivařeno. Výpočet kruhových vík vychází z teorie kruhové desky. Dno má 1 centrický otvor o průměru 1 020 mm a 6 kuželových otvorů $\varnothing 70 \text{ mm}$. Průměr dna je 1 720 mm, zkoušeno bude tlakem $p = 0,1 \text{ MPa}$.

$$\frac{\sum d}{D_D} = \frac{1\,440}{1\,720} = 0,83 \quad \text{korekční součinitel } \gamma = 1,3$$

Konstrukční součinitel $c_3 = 0,5$

Tloušťka dna $s_D = s_{VD} + c$; s ohledem na otvory $s_{VD} = \gamma \cdot s_{OD}$

$$s_{VD} = c_3 \cdot \gamma \cdot D_D \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_D}} = 0,5 \cdot 1,3 \cdot 1,72 \cdot \sqrt{\frac{0,1 \cdot 10^6}{104 \cdot 10^6}} = 0,0298 \text{ m}$$

Tloušťka dna je volena 30 mm.

Víko heliové nádoby

Toto víko je z nerezavějící oceli (17246.1), k plášti z téhož materiálu je přivařeno. Výpočet opět vychází

z teorie kruhové desky.

Víko má centrický otvor o průměru 1 050 mm.

Průměr víka je 1 430 mm, další excentrický otvor má průměr 140 mm. Tlak je 0,1 MPa.

Nejmenší tloušťka víka: $s_x = s_{vx} + c$

Otvory ve víku: $\Sigma d = 1\,050 + 140 = 1\,190$ mm

$$\frac{\Sigma d}{D_x} = \frac{1\,190}{1\,430} = 0,832$$

Tomu odpovídá korekční součinitel $\gamma = 1,65$

Konstrukční součinitel $c_3 = 0,5$

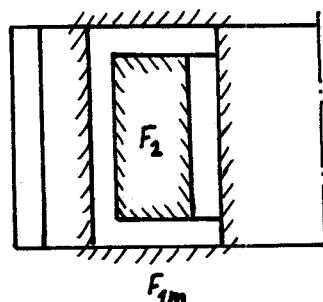
$$s_{vx} = c_3 \cdot \gamma \cdot D_x \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_p}} = 0,5 \cdot 1,65 \cdot 1,43 \cdot \sqrt{\frac{0,1 \cdot 10^6}{153,3 \cdot 10^3}} = 3,01 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Tloušťka víka heliové nádoby je zvolena 32 mm.

3.2 Tepelný výpočet kryostatu

3.2.1 Tepelný výpočet heliové nádoby

1) Sálání



Plocha F_{1m} - dusíková nádoba:

$$F_{1m} = \pi (1,49 \cdot 0,55 + 1,05 \cdot 0,55 + \frac{1,43^2 - 1,05^2}{2}) = 6,14 \text{ m}^2$$

Plocha F_2 - heliová nádoba:

$$F_2 = \pi (1,085 \cdot 0,52 + 1,36 \cdot 0,4 + 1,44 \cdot 0,12 + \frac{1,36^2 + 1,44^2 - 2,35^2}{4}) = 5,26 \text{ m}^2$$

Dokonale černé těleso vyzáří energii:

$$E_0 = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^2)$$

C_0 ... součinitel sálání dokonale černého tělesa

$$C_0 = 5,7 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-4})$$

Při reálném, nečerném tělese je vyzářená energie

$$E_r = \epsilon \cdot E_0 = C_r \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^2)$$

ϵ = poměrná sálavost;

pro leštěný hliník je 0,018 při 76 K = ϵ_1

pro leštěný nerez je 0,048 při 4 K = ϵ_2

Součinitel vzájemného sálání

$$C_{1,2} = \frac{C_0}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_{1,2}}{F_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} = \frac{5,7}{\frac{1}{0,048} + \frac{6,12}{5,26} \left(\frac{1}{0,018} - 1\right)} = 0,084 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-4})$$

Teple, vysálané z dusíkové nádoby na heliovou:

$$Q_{1,2} = C_{1,2} \cdot F_1 \cdot \left[\left(\frac{T_{N_2}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{He}}{100}\right)^4 \right] = 0,084 \cdot 6,14 \cdot \left[\left(\frac{77}{100}\right)^4 - \left(\frac{4,2}{100}\right)^4 \right] = 0,175 \text{ W}$$

Bez použití stínění by toto teplo bylo:

$$Q_{1,2} = 0,0843 \cdot 6,14 \cdot \left[\left(\frac{293}{100}\right)^4 - \left(\frac{4,2}{100}\right)^4 \right] = 32,6 \text{ W}$$

Toto teplo je v porovnání s teplem vysálaným stínící nádobou s kapalným dusíkem značné, odpařilo by 45 l kapalného helia, což je mnoho. Z tohoto důvodu je zřejmá důležitost stínění teplotou kapalného dusíku, který je výrobně podstatně levnější než kapalně helium.

2) Přívody proudu

Výpočet tepla, dodaného heliové nádobě přívody proudu, je značně komplikovaný a výsledky bývají obvykle nepřesné. Proto je lépe navrhované přívody vyzkoušet přímo laboratorně. Přívody proudu navrhované pro tento kryostat jsou vyráběny v n. p. Škoda Plzeň a mají při proudovém zatížení $I = 500 \text{ A}$ dle laboratorních zkoušek v nejhorším případě přivést do heliové nádoby 4 W , dle sdělení pracovníků vývojového oddělení n. p. Škoda Plzeň.

3) Hrdlem

Při uvažování hrdla jež je ochlazováno odcházejícími parami, které mají teplotu téměř stejnou jako kapalně He , je přívod tepla hrdlem zanedbatelný.

4) Úchyty - vedením

Heliová nádoba je zavěšena na třech úchytech. Těmi je nesena na vnější nádobě. Úchyty jsou kotveny na dusíkovou teplotu, aby přívod tepla byl co nejmenší. Viz obr. 7.

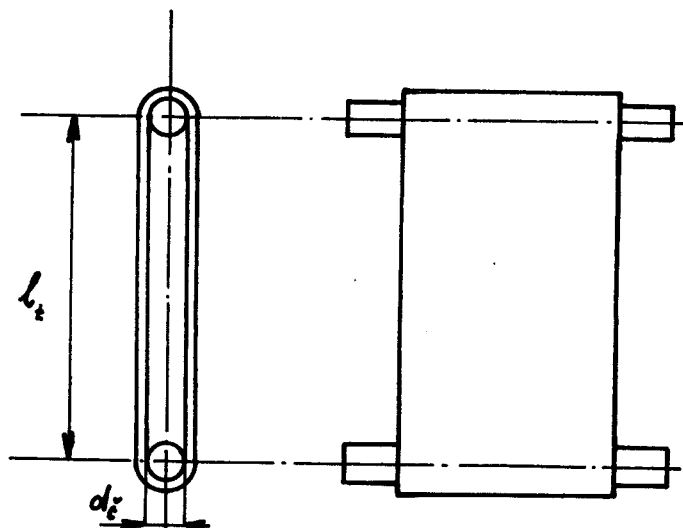
Úchyt se skládá z oka, vyrobeného ze sklolaminátu a dvou čepů (viz obr. 7). Sklolaminát je velen pro svoji malou tepelnou vodivost a velkou pevnost.

Výpočet sklolaminátového oka

Pevnostní výpočet

$$\sigma_{\text{pr,t}} = \frac{\sigma_{\text{pr}}}{k} = \frac{200}{3} = 66,7 \text{ MPa}$$

když bezpečnost k je volena $k = 3$.



obr. 7

Úchyt je zatížen silou způsobenou tíhou nádoby, supravodivého vinutí a náplní kapalného helia.

Heliová náplň:

objem náplně je $V_{He} = 0,147 \text{ m}^3$; $\rho_{He} = 125 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

hmotnost helia $m_{He} = V_{He} \cdot \rho_{He} = 0,147 \cdot 125 = 18,375 \text{ kg}$

tíha helia $G_{He} = m_{He} \cdot g = 18,375 \cdot 9,81 = 179,9 \text{ N}$

Heliová nádoba:

skládá se ze dvou vík, pláště, hrdla. Nádoba je

celonerezová, hustota tohoto materiálu je

$7\,800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Tíha celé nádoba je $8\,867 \text{ N}$.

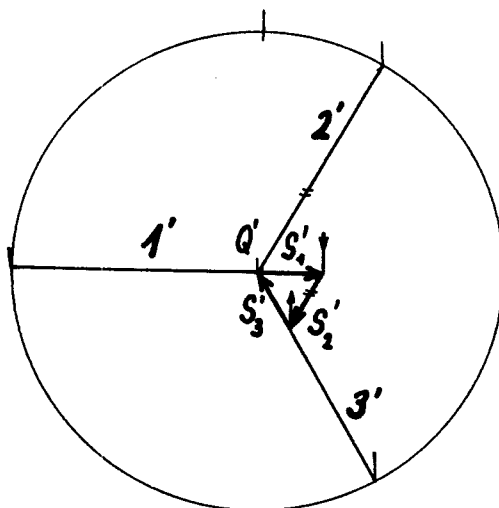
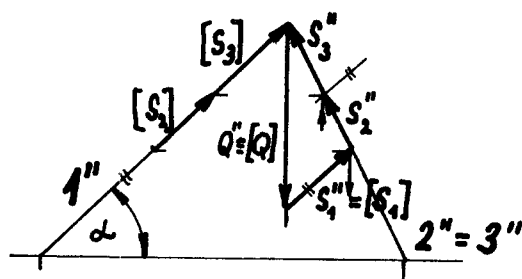
Supravodivé vinutí:

je tvořeno válcovým mezikružím, tvoří je feromagnetický obvod a supravodiče. Jeho celková tíha je $9\,040 \text{ N}$.

Celková tíha, která bude přenášena na úchyty, tedy bude

$$G_{\text{celk}} = G_{He} + G_{\text{nád}} + G_{\text{vin}} = 179,9 + 8\,867 + 9\,040 = 18\,087 \text{ N}$$

Protože je předpoklad, že hmota je rozložena souměrně, bude zatížení všech tří úchytů stejné. Řešení sil v úchytech je možno převést na řešení kozlíku se třemi pruty, metodou neurčitého měřítka zjistíme poměr sil v jednotlivých prutech (úchytech) - viz obr. 8.



obr. 8

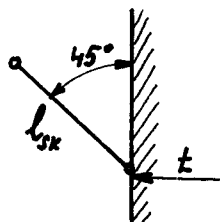
Úhel α je volen 45° .

Síla, která bude v jednom oku, je tedy

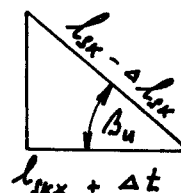
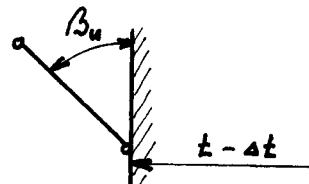
$$F = \frac{G_{\text{celk}}}{3 \cdot \sin 45^\circ} = \frac{18\,087}{3 \cdot \sin 45^\circ} = 8\,522 \text{ N}$$

Po ochlazení se ale geometrické poměry změni vlivem dilatací. Táhllo (oko) se zkrátí, průměr nádoby se zmenší (viz obr. 9).

Před dilatací :



Po dilataci :



obr. 9

Pro sklotextit je součinitel tepelné roztažnosti z 300 na 77 K

$$\alpha_{SK} = \frac{\Delta l}{l_0} = 9,8 \cdot 10^{-4}$$

pro nerez je součinitel tepelné roztažnosti z 300 na 4 K

$$\alpha_N = \frac{\Delta l}{l_0} = 3,04 \cdot 10^{-3}$$

Změny rozměrů tedy budou:

$$\Delta l_{SK} = \alpha_{SK} \cdot l_{SK} = 9,8 \cdot 10^{-4} \cdot 320 = 0,3136 \text{ mm}$$

$$\Delta t = \alpha_N \cdot t = 3,04 \cdot 10^{-3} \cdot 660 = 2,0064 \text{ mm}$$

$$l_{SKx} = l_{SK} \cdot \cos 45^\circ = 320 \cdot \cos 45^\circ = 226 \text{ mm}$$

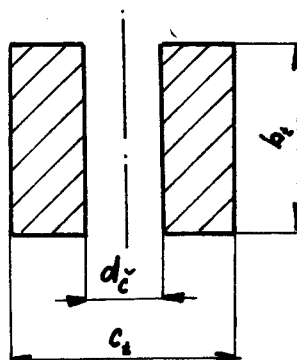
$$\beta_u = \arccos \frac{l_{SKx} + \Delta t}{l_{SK} - \Delta l_{SK}} = \arccos \frac{226 + 2,0064}{320 - 0,3136} = 44^\circ 30' 10''$$

Vlivem dilatací tedy nastane změna úhlu táhla o necelých 30', která je při dalším pevnostním výpočtu zanedbatelná.

Táhle (oko) je namáháno na tah :

$$\sigma_z = \frac{F}{S} \leq \sigma_{\text{dov},t} \Rightarrow S \geq \frac{F}{\sigma_{\text{dov},t}} = \frac{8\,522}{66,7 \cdot 10^6} = 1,278 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Průřez táhla:



obr. 10

Dle obr. 10 jsou veleny rozměry $d_z = 20 \text{ mm}$

$$c_t = 30 \text{ mm}$$

$$b_t = 40 \text{ mm}$$

Průřez táhla tedy je

$$\begin{aligned} S &= b_t \cdot (c_t - d_z) = 40 \cdot (30 - 20) = 400 \text{ mm}^2 = \\ &= 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Tepelný výpočet

Úchyty jsou kotveny na dusíkovou teplotu, takže tepelný spád:

$$\Delta T_1 = T_0 - T_N = 300 - 77 = 223 \text{ K}$$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{sk} = 0,28 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Teplo, přivedené úchytem (okem):

$$Q_{u1} = \lambda_{sk} \cdot \frac{S}{l_{sk}} \cdot \Delta T_1 = 0,28 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-4}}{0,32} \cdot 223 = 0,078 \text{ W}$$

Do heliové nádoby se třemi úchyty přivede teplo

$$Q_u = 3 \cdot Q_{u1} = 0,234 \text{ W.}$$

Výpočet a kontrola čepu :

Čep je namáhán na ohyb (viz obr. 11) - dle [6] :

$$M_{0max} = 8522 \cdot \frac{27,5}{55} \cdot 7,5 + \frac{40 \cdot 27,5}{55} = 106\,525 \text{ Nm} = 106,525 \text{ Nm}$$

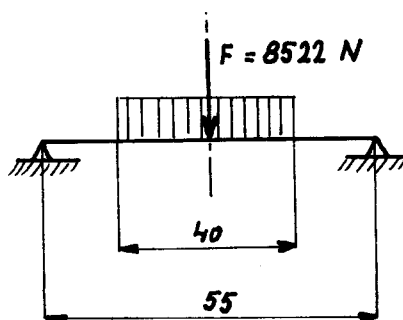
$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \leq \sigma_{\text{dov},o}$$

Pro daný materiál (17246.1) je $\sigma_{\text{dov},o} = 200 \text{ MPa}$.

Kruhový průřez má modul průřezu $W_o = \frac{\pi d^3}{32}$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 M_o}{\pi \cdot \sigma_{\text{dov},o}}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 106,525}{\pi \cdot 200 \cdot 10^6}} = 0,0175 \text{ m}$$

Je zvolen čep o průměru $d = 20 \text{ mm}$.



obr. 11

Kontrola na otlačení :

Dosedací plocha čepu v misce uložení je $7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

$$\text{Tlak } p_{\text{skut}} = \frac{F}{S} = \frac{8\,522}{7 \cdot 10^{-4}} = 12\,174\,286 \text{ Pa} \approx 12,2 \text{ MPa}$$

Čep na otlačení vyhovuje, protože $p_{\text{pr}} = 60 \text{ MPa} > p_{\text{skut}}$.

5) Vedením zbytkovým plynem

Povrch heliové nádoby je $F_2 = 5,26 \text{ m}^2$.

Povrch sálající dusíkové nádoby je $F_{\text{m}} = 6,12 \text{ m}^2$.

Koeficient akomodace vnitřního povrchu pro vzduch při T_{He} : $\alpha_1 = 1$

Koeficient akomodace vnějšího povrchu pro vzduch

při T_N : $\alpha_1 = 1$; $\Delta T_1 = T_N - T_{Ne} = 77,4 - 4,2 = 73,2 \text{ K}$

poměr specifických tepel pro vzduch $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$

Molekulová váha pro vzduch $M_m = 28,96$

Tlak měřený manometrem při teplotě $T_0 = 300 \text{ K}$: $p = 1 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}$

Konstanta 18 196,546 obsahuje převod koeficientů.

$$Q_2 = 18\,196,546 \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_2 + \alpha_1 (1 - \alpha_2)} \cdot \frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} \cdot \frac{F_2}{F_{1m}} \cdot \frac{p}{\sqrt{M_m \cdot T_0}} \cdot \Delta T_1 = 18\,196,546 \cdot \frac{1 \cdot 1}{1 + 1(1 - 1)} \cdot \frac{5,26}{6,14} \cdot \frac{1,4 + 1}{1,4 - 1} \cdot \frac{5,26 \cdot 10}{\sqrt{28,96 \cdot 300}} \cdot 73,2 = 4,51 \cdot 10^{-5} \text{ W}$$

6) Vedením teplotními čidly

Bude vyvedeno z 40 měřicích přívodů Cu $\varnothing 0,2 \text{ mm}$.

Budou to čidla hladiny a tepné odpory. Tři vývody

budou lankem Ag $0,14 \text{ mm}$ a teflonovou izolací

pro ochranu supravodivé cívky. Celkový průřez vo-

dičů je $S_v = 1,6 \text{ mm}^2$, délka $l_v = 1,3 \text{ m}$. Je-li uvažována střední tepelná vodivost $\lambda_v = 800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, bude

$$Q_M = \lambda_v \cdot \frac{S_v}{l_v} \cdot \Delta T_2 = 800 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-6}}{1,3} \cdot 289 = 0,29 \text{ W}$$

Celkové ztráty na kapalném heliu

$$Q = Q_{q1} + Q_p + Q_M + Q_2 + Q_M$$

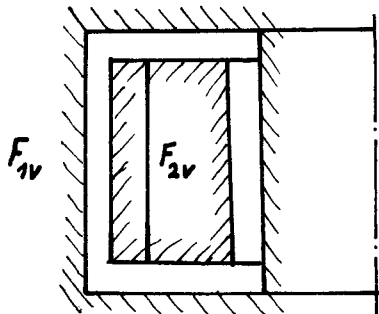
$$= 0,175 + 4 + 0,234 + 4,5 \cdot 10^{-5} + 0,29 = 4,699 \text{ W}$$

Celkové ztráty na kapalném heliu budou za hodinu

0,822 kg, tj. 6,58 l.

3.2.2 Tepelný výpočet dusíkové nádoby

1) Sálání



Plocha F_{1v} - vnější nádoba

$$F_{1v} = \pi (1,72 \cdot 0,6 + 1,02 \cdot 0,6 + \frac{1,72^2 - 1,02^2}{2}) = 8,18 \text{ m}^2$$

Plocha F_{2v} - dusíková nádoba

$$F_{2v} = \pi (1,63 \cdot 0,55 + 1,05 \cdot 0,55 + \frac{1,63^2 - 1,05^2}{2}) = 7,07 \text{ m}^2$$

Poměrná sálavost

pro leštěný hliník při 77 K je $\epsilon_2 = 0,018$

při 300 K je $\epsilon_1 = 0,030$

Součinitel vzájemného sálání

$$C_{12} = \frac{C_0}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_{1v}}{F_{2v}} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} = \frac{5,7}{0,03 + \frac{8,18}{7,07} \left(\frac{1}{0,018} - 1 \right)} = 0,068 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Teplo, vysálané z vnější nádoby na dusíkovou

$$Q_{12} = C_{12} \cdot F_{1v} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0,068 \cdot 8,18 \cdot \left[\left(\frac{293}{100} \right)^4 - \left(\frac{77}{100} \right)^4 \right] = 40,800 \text{ W}$$

Tyto ztráty jsou příliš velké, proto je pouhé vy-
leštění ploch nedostačující.

Pro tento druh tepelného izolování je vhodné použít superizolace. Je to polyetylen-tereftalová folie oboustranně napařená hliníkem. Tloušťka jedné takové vrstvy je 12 μ m, superizolace bude složena z 20 vrstev. Tato superizolace propustí tepelný tok $i = 2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Do superizolace bude obalena celá dusíková nádoba, tj. 8,18 m^2 plochy. Teplo, které superizolací projde je

$$Q_s = F_{iv} \cdot i = 8,18 \cdot 2 = 16,36 \text{ W}$$

Tyto ztráty jsou také velké. V porovnání s přestupem tepla sáláním vyleštěných ploch je ale možno brát je jako vyhovující, kapalný dusík je mnohem levnější než kapalně helium.

2) Vedením zbytkovým plynem

Povrch dusíkové nádoby je $F_{iv} = 7,07 \text{ m}^2$

Povrch sálající vnější nádoby je $F_{av} = 8,18 \text{ m}^2$

Koeficient akomodace vnějšího povrchu pro vzduch při $T_0 = 293 \text{ K}$ $\alpha_1 = 0,85$

Koeficient akomodace vnitřního povrchu pro vzduch při $T = 77 \text{ K}$ $\alpha_2 = 1$; $\Delta T = T_0 - T_N = 293 - 77 = 216 \text{ K}$

Poměr specifických tepel pro vzduch $\gamma = 1,4$.

Molekulová váha vzduchu $M_m = 28,96$.

Tlak měřený manometrem při teplotě

$$T = 300 \text{ K} : p = 1 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}.$$

Konstanta 18 196,546 obsahuje převod koeficientů.

$$Q_E = 18\,196,546 \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2(1-\alpha_2)} \cdot \frac{F_{2v}}{F_{1v}} \cdot \frac{n+1}{n-1} \cdot \frac{F_{1v} \cdot p}{\sqrt{M_n \cdot T_0}} \cdot \Delta T = 18\,196,546 \cdot \frac{1 \cdot 0,85}{0,85 + 1(1-0,85)} \cdot \frac{7,07}{8,18} \cdot \frac{2,4}{0,4} \cdot \frac{7,07 \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{28,96 \cdot 300}} \cdot 216 = 1,55 \cdot 10^{-4} \text{ W}$$

3) Vedením úchyty

Dusíková nádobka je zavěšena na třech úchytech, kterými je nesena na vnější nádobě. Úchyt se skládá z oka, vyrobeného ze sklolaminátu a dvou čepů (viz obr. 7). Sklolaminát je volen pro svoji malou tepelnou vodivost a velkou pevnost.

Výpočet sklolaminátového oka

Pevnostní výpočet

$$\sigma_{m,t} = \frac{\sigma_{p,t}}{k} = \frac{200}{3} = 66,7 \text{ MPa, když bezpečnost } k = 3.$$

Úchyt je zatížen silou, způsobenou tíhou nádoby a náplní kapalného dusíku.

Dusíková náplň:

$$\text{objem náplně je } V_N = 0,189 \text{ m}^3; \rho_N = 808 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

$$\begin{aligned} \text{hmotnost dusíku } m_N &= V_N \cdot \rho_N = 0,189 \cdot 808 = \\ &= 148,232 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{tíha dusíku } G_N = m_N \cdot g = 148,232 \cdot 9,81 = 1\,498,1 \text{ N}$$

Dusíková nádobka:

skládá se ze dvou vík, pláště, hrdel. Je svařovaná z hliníku, hustota tohoto materiálu je $2\,700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
Tíha celé nádoby je $G_{nád} = 4\,821 \text{ N}$.

Celková tíha, která bude přenášena na úchyty, tedy

bude

$$G_{celk} = G_N + G_{nad} = 1\,498,1 + 4\,821 = 6\,319,1 \text{ N}$$

Protože je možné předpokládat, že hmota je rozložena souměrně, bude zatížení všech tří úchyťů stejné. Řešení sil v úchytech je možno převést (stejně jako u heliové nádoby) na řešení kozlíku se třemi pruty, metodou neurčitého měřítka se zjistí poměr sil v jednotlivých prutech (úchytech) viz obr. 8.

Úhel α je volen 45° .

Síla, která bude v jednom oku, je tedy

$$F = \frac{G_{celk}}{3 \cdot \sin \alpha} = \frac{6\,319,1}{3 \cdot \sin 45^\circ} = 2\,978,8 \text{ N}$$

Táhlo (oko) je namáháno na tah.

$$\sigma_t = \frac{F}{S} \leq \sigma_{dov,t}; \Rightarrow S \geq \frac{F}{\sigma_{dov,t}} = \frac{2\,978,8}{66,7 \cdot 10^6} = 4,47 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Průřez táhla: dle obr. 10 jsou voleny rozměry

$$d_t = 15 \text{ mm}$$

$$c_t = 25 \text{ mm}$$

$$b_t = 30 \text{ mm}$$

Skutečný průřez táhla je tedy

$$S = b_t \cdot (c_t - d_t) = 30 (25 - 15) = 300 \text{ mm}^2 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Tepelný výpočet

Tepelný spád na úchytech:

$$\Delta T_1 = T_o - T_N = 300 - 77 = 223 \text{ K}$$

Součinitel tepelné vodivosti:

$$\lambda_{sk} = 0,28 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Teple, přivedené úchytem (okem):

$$Q_{u1} = \lambda_{sk} \cdot \frac{S}{l_u} \cdot \Delta T_1 = 0,28 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-4}}{0,28} \cdot 223 = 0,0669 \text{ W}$$

Do dusíkové nádoby se třemi úchyty přivede teplo

$$Q_u = 3 \cdot Q_{u1} = 0,2007 \text{ W.}$$

Výpočet a kontrola čepu

Čep je namáhán na ohyb (viz obr. 12)

$$M_{max} = 2\,978,8 \cdot \frac{22,5}{45} \cdot 7,5 + \frac{30 \cdot 22,5}{45} = 25\,560 \text{ Nm} = 25,56 \text{ Nm}$$

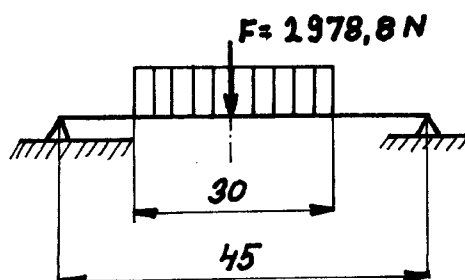
$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \leq \sigma_{ov,o}$$

Pro daný materiál (17246.1) je $\sigma_{ov,o} = 200 \text{ MPa}$.

Průměr čepu

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 M_o}{\pi \cdot \sigma_{ov,o}}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 25,56}{\pi \cdot 200 \cdot 10^6}} = 0,011 \text{ m}$$

Je zvolen čep o průměru $d = 20 \text{ mm}$.



obr. 12

Kontrola na otlačení

Dosedací plocha čepu v misce uložení je $5,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

$$\text{Tlak } p_{skt} = \frac{F}{S} = \frac{2\,978,8}{5,25 \cdot 10^{-4}} = 5\,673\,905 \text{ Pa} \approx 5,7 \text{ MPa}$$

Čep na otlačení vyhovuje, protože $p_{dv} = 60 \text{ MPa} > p_{skt}$.

4) Vedením hrdlem

Hrdlo je zároveň chlazeno odcházejícími parami.

Z literatury (11) ale plyne, že ztráty budou menší, než 10 W, proto je možno je zanedbat s ohledem na velikost ztrát jiných.

Celkové tepelné ztráty dusíkové nádoby

$$Q = Q_s + Q_z + Q_u = 16,36 + 1,55 \cdot 10^{-4} + 0,20 = 16,56 \text{ W.}$$

Celkové ztráty na kapalném dusíku budou za hodinu 0,303 kg, tj. 0,38 l.

3.3 Doplnující výpočty

3.3.1 Výpočet třecího momentu na úchytu

Při ustavování nádob se bude táhlo posouvat vlivem zasouvání šroubu. Ten se pohybuje v matici, která je utahována ručně. Matice má dosedací plochu na třecí podložce z bronzu. Při utahování se musí překonat třecí moment na této ploše vznikající.

Protože je heliová nádoba těžší než dusíková, je postačující zkontrolovat třecí moment vznikající při ustavování heliové nádoby. Poleměr třecího momentu $r_t = 0,085 \text{ m}$. Součinitel tření ocel - bronz je 0,05. Třecí moment:

$$M_t = F \cdot r_t \cdot f = 8\,522 \cdot 0,085 \cdot 0,05 = 36,22 \text{ Nm.}$$

Tento třecí moment lze ručně klíčem překonat.

3.3.2 Výpočet závitů úchytu

Síla v táhlu se bude přenášet přes závit na víko vnější nádoby, proto je třeba zkontrolovat závit na otlačení. Je volen závit M 125 x 4. Velký průměr závitu šroubu je $d_1 = 125 \text{ mm}$, malý průměr závitu matice je $D_1 = 120,67 \text{ mm}$. Dovolené tlaky dle (1) bývají 15 - 20 MPa.

Postačující je zkontrolovat závit úchyty heliové nádoby, který je při stejných rozměrech namáhán větší silou.

$$p = \frac{F}{\frac{\pi}{4} (d_1^2 - D_1^2) \cdot i} \leq p; \text{ je voleno } p_{dov} = 10^7 \text{ Pa}$$

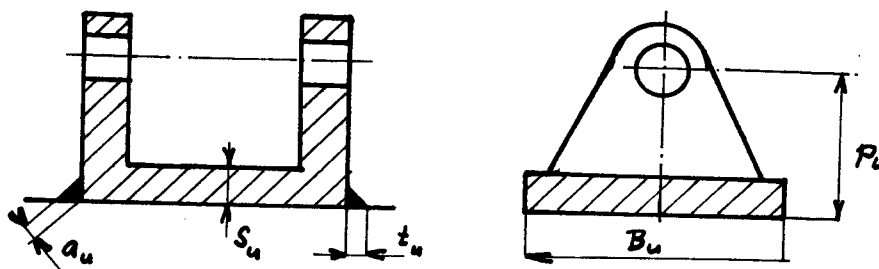
Potřebný počet závitů

$$i_z \geq \frac{F}{\frac{\pi}{4} (d_1^2 - D_1^2) p_{dov}} = \frac{8\,522}{\frac{\pi}{4} (0,125^2 - 0,12067^2) \cdot 10^7} = 1,019$$

Protože v konstrukčním řešení je $i_z = 7$ závitů, závity na otláčení vyhovují.

3.3.3 Výpočet svaru úchyty

Čepy jsou na nádobě heliové i dusíkové zalícovány do otvorů ve výstupcích, přivařených k příslušejícímu víku. Svary budou tedy namáhány na smyk a je třeba provést jejich pevnostní kontrolu. Opět je rozhodující kontrola u mnohem těžší heliové nádoby.

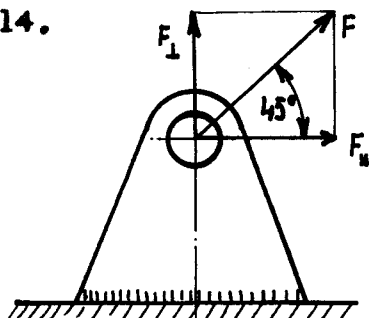


obr. 13

$B_u = 60 \text{ mm}$; $s_u = 15 \text{ mm}$; $t_u = 10 \text{ mm}$; $a_u = 7 \text{ mm}$;
 $p_u = 40 \text{ mm}$.

Výpočet koutového svaru je prováděn v souladu s nor-

meu ČSN 05 0120. Bezpečnost svaru $k = 2$, materiál sva-
ru má $\sigma_{kt} = 300$ MPa. Rozměry a silové poměry viz obr.
13, 14.



obr. 14

$$F = 8\,522 \text{ N}$$

$$F_{\perp} = F_{\parallel} = F \cdot \sin 45^{\circ} = 6\,026 \text{ N}$$

$$b_u = B_u - 2 \cdot a_u = 60 - 2 \cdot 15 = 30 \text{ mm}$$

Revnoběžné smykové napětí:

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{\parallel}}{2 \cdot a_u \cdot b_u} = \frac{6\,026}{2 \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-2}} = 14 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 14 \text{ MPa}$$

Kolmé smykové napětí:

$$\tau_{\perp} = \frac{F_{\parallel} \cdot \frac{D}{2}}{2 \cdot \frac{a_u^2}{6}} + \frac{F_{\perp}}{2 \cdot a_u \cdot b_u} = \frac{6\,026 \cdot 0,04 \cdot 3}{7 \cdot 10^{-3} \cdot (0,03)^2} + \frac{6\,026}{2 \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-2}} = 1,28 \cdot 10^8 \text{ Pa} = 128 \text{ MPa}$$

Srovnávací napětí:

$$\tau_s = \sqrt{\left(\frac{\tau_{\perp}}{\alpha_{\perp}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\parallel}}\right)^2} \leq \beta_{sv} \cdot \frac{\sigma_{kt}}{k}$$

$$\text{Součinitel tloušťky koutového svaru } \beta_{sv} = 1,3 - 0,03 t_u = 1,12$$

Převodní součinitele: $\alpha_{\perp} = 0,75$; $\alpha_{\parallel} = 0,65$;

$$\tau_s = \sqrt{\left(\frac{128}{0,75}\right)^2 + \left(\frac{14}{0,65}\right)^2} = 172 \text{ MPa};$$

$$\beta_{sv} \cdot \frac{\sigma_{kt}}{k} = 1,12 \cdot \frac{300}{1,5} = 224 \text{ MPa}$$

Srovnávací napětí je menší než povolené, takže svar vyhovuje.

3.4 Zabezpečení kryostatu proti možnosti havárie

Magnetické pole supravodivého vinutí představuje nahromadění značné energie, která by mohla při přechodu zařízení do normálního stavu ohrozit funkci zařízení, popřípadě způsobit destrukci. Je proto třeba stavy v zařízení sledovat a při překročení mezních hodnot vyvést energii mimo prostor kryostatu.

Předpokládá se, že cívka supravodivého vinutí bude zhotovena z materiálu dostatečně kryostaticky stabilizovaného, tj. z materiálu, kde mimo supravodiče Nb - Ti bude ještě dostatečný průřez čisté mědi, který bude ve styku s kapalným heliem. V případě přechodu některé části vinutí do odporového stavu bude schopen po snížení proudu obnovit supravodivý stav. Přesto však je třeba v případě potřeby umožnit vyvedení energie na vnější odpor, kde se zmaří.

Možnost zvýšení tlaku v kryostatu při uvolnění určitého množství tepla

Uvažuje se krajní případ, kdy je výstup páry z kryostatu uzavřen a je přivedeno určité množství tepla. Objem kryostatu zaujímá vroucí helium - V' , zbytek pak heliové páry pod tlakem 0,1 MPa - V'' . Přivedením tepla vzroste teplota i tlak v nádobě, jedná se o změnu isochorickou.

Při výpočtu se postupuje tak, že se ke zvolené teplotě a tlaku najde potřebné množství tepla.

Střední měrný objem dvojfázové směsi:

hmotnost vroucího helia

$$V' = 0,147 \text{ m}^3; V'' = 0,031 \text{ m}^3$$

$$v'_0 = 7,99 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}; v''_0 = 60,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$M' = \frac{V'}{v'_0} = \frac{0,147}{7,99 \cdot 10^{-3}} = 18,40 \text{ kg}$$

hmotnost heliových par

$$M'' = \frac{V''}{v''_0} = \frac{0,031}{60,6 \cdot 10^{-3}} = 0,52 \text{ kg}$$

$$M = M' + M'' = 18,40 + 0,52 = 18,92 \text{ kg}$$

$$V_{He} = V' + V'' = 0,147 + 0,031 = 0,178 \text{ m}^3$$

$$v = \frac{V_{He}}{M} = \frac{0,178}{18,92} = 9,43 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Suchost páry ve výchozím bode (viz obr. 15) bude

$$x_0 = \frac{v - v'_0}{v''_0 - v'_0} = \frac{(9,43 - 7,99) \cdot 10^{-3}}{(60,6 - 7,99) \cdot 10^{-3}} = 0,0273$$

Měrná tepelná energie směsi ve výchozím bode 0 bude

$$u_0 = (1 - x_0) \cdot u'_0 + x_0 \cdot u''_0, \text{ kde } u'_0 = i'_0 - p_0 \cdot v'_0 \\ u''_0 = i''_0 - p_0 \cdot v''_0$$

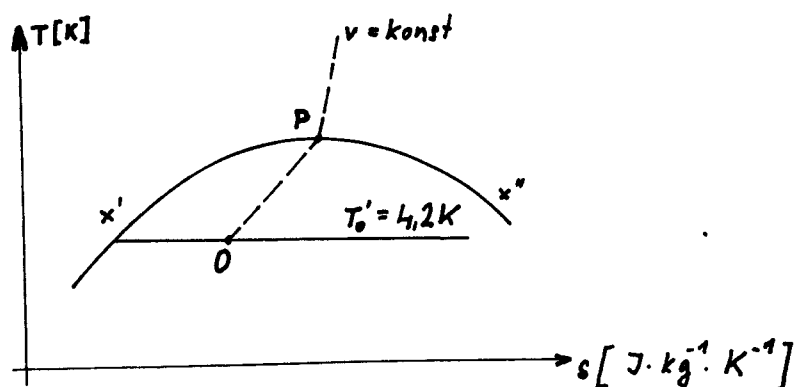
$$\text{Po úpravě lze psát, je-li } i'_0 = 9,85 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i''_0 = 30,79 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$u_0 = (1 - x_0) i'_0 + x_0 i''_0 - p_0 \cdot v = (1 - 0,0273) \cdot 9,85 \cdot 10^3 + \\ + 0,0273 \cdot 30,79 \cdot 10^3 - 0,1 \cdot 10^6 \cdot 9,43 \cdot 10^{-3} = \\ = 11,36 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Dle interpolace z tabulek je bod přechodu dvoufázové směsi do jednofázového stavu ten, kde $v = v'_0$ nebo $v = v''_0$. Pro

možnost určení jsou vyneseny průběhy měrného objemu v , tlaku p a entalpie i' vreucího helia v závislosti na teplotě v obr. 16.



obr. 15

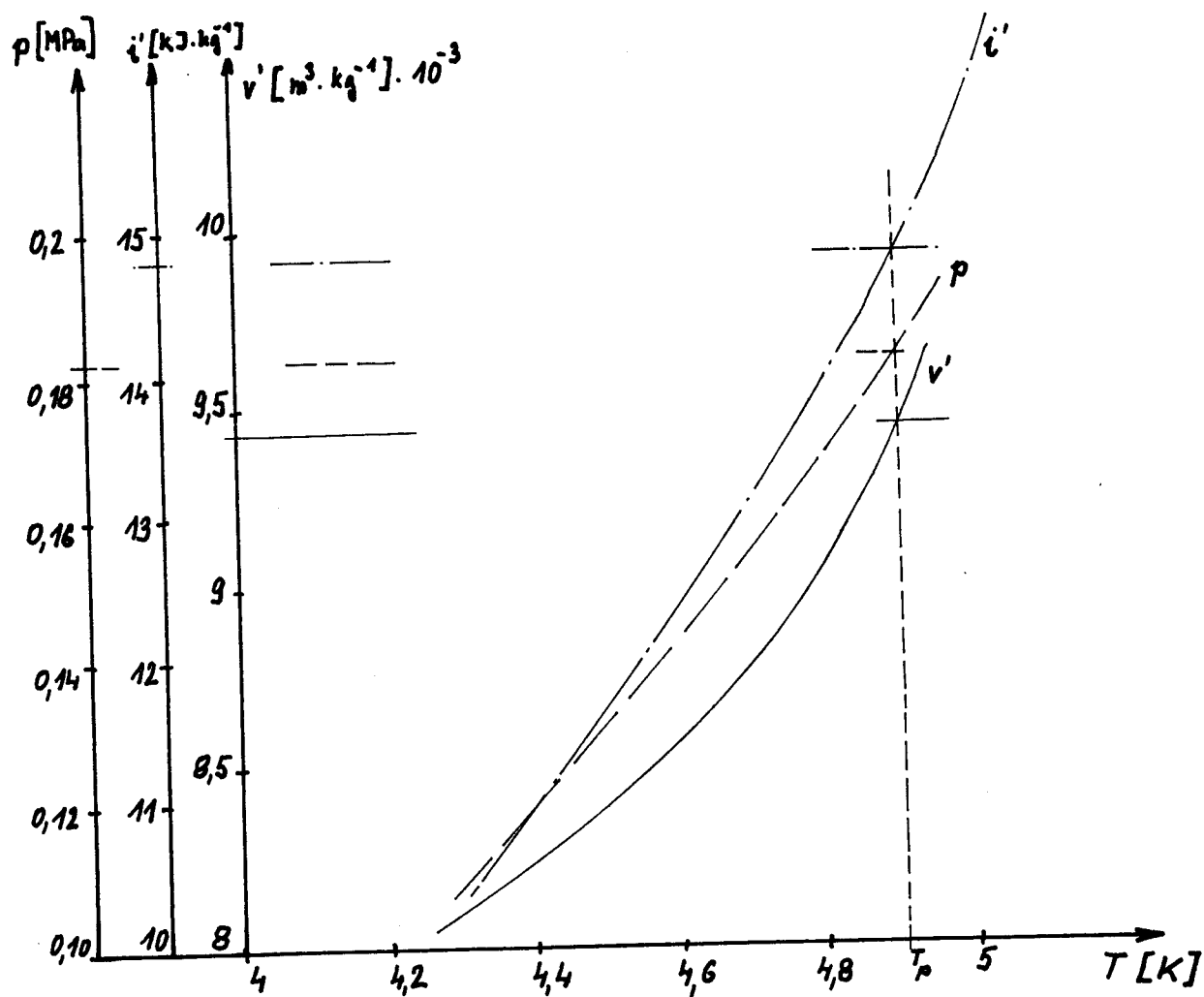
Teplota při níž $v' = v = 9,43 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, je $T_p = 4,90 \text{ K}$; $p_p = 0,182 \text{ MPa}$; $i'_p = 14,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Množství tepla potřebného na převedení 1 kg směsi z bodu O do bodu P bude

$$\begin{aligned} q_p &= u_p - u_o, \text{ kde } u_p = i_p'' - p_p \cdot v = \\ &= 14,8 \cdot 10^3 - 0,182 \cdot 10^6 \cdot 9,43 \cdot 10^{-3} = \\ &= 13,09 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned}$$

$$q_p - 13,09 - 11,36 = 1,73 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Je tedy nutné, aby se při havárii magnetického obvodu uvelnilo do lázně helia maximálně $1,73 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, aby nestoupl tlak nad $0,182 \text{ MPa}$.



obr. 16

3.5 Technický popis navrhovaného kryostatu

Kryostat je složen ze tří nádob: heliové, kterou obklopuje dusíková a vnější, která obklopuje dusíkovou.

Heliová nádoba je svařena z nerezavějící oceli, je prstencového tvaru. Je v ní supravodivý elektromagnetický obvod, ponořený v kapalném heliu. Nádoba se skládá z pláště a z vík. Dolní víko má tři slepé otvory se závitem pro šrouby, které jsou zašroubovány při transportu kryostatu z důvodů absolutní stability nádoby. Na plášti je pouzdro s aktivním uhlím, které pohlcuje vzduch, zlepšuje vakuum. Horní víko má přivařeny tři výstupky s otvory pro čepy. Ty slouží k zavěšení nádoby, k přenesení její tíhy na vnější nádobu. Dále je v horním víku otvor pro heliové hrdlo s přívedy proudu. Toto hrdlo je opatřeno vlnovcem, zachycujícím dilatace nádoby. Svary nádoby jsou vakuotěsné, uzpůsobené eventuálnímu rozebrání nádoby, které by bylo možné po jejich odbroušení.

Dusíková nádoba je svařena z hliníkové slitiny. Je také prstencového tvaru, mezi vnějším a vnitřním pláštěm je kapalný dusík. K plášťové části jsou přišroubována víka, horní a dolní. Dolní víko má připevněné pouzdro s aktivním uhlím na absorbování vzduchu a šest otvorů se závitem. Při transportu se těmito otvory střídavě prostrčí tři šrouby pro stabilizaci heliové nádoby, a přišroubují tři šrouby pro stabilizaci dusíkové nádoby. Po transportu se všechny šrouby vyšroubují a do otvorů v dolním víku dusíkové nádo-

by se zašroubují sklotextitové šrouby. Horní víko má přivařenou vnitřní stěnicí dusíkovou trubku, která je rozřezána na 24 dílů podélnými řezy z důvodů zamezení účinků vířivých magnetických proudů. K hornímu víku jsou přivařeny tři výstupky s otvory pro čepy úchytů dusíkové nádoby. Také je k tomuto víku připevněno ukotvení dusíkové teploty sklolaminátových úchytů heliové nádoby. Tři dusíková hrdla jsou volena z důvodů rychlejšího plnění kapalným dusíkem a jsou také přivařena k hornímu víku dusíkové nádoby. Jsou opatřena vlnovci, zachycujícími tepelné dilatace této nádoby. Nádobu je z vnějšku celá obalena superizolací, vnitřní plocha je stejně jako vnější plocha nádoby heliové vyleštěna z důvodů co nejmenšího přestupu tepla.

Vnější nádoba je složena z pláště, horního víka a dolního víka. K dolnímu víku je přišroubováno dno, spojené s podstavcem, které je z nerezavějící oceli. Dolní víko, vyrobené z hliníkové slitiny (stejně jako plášť a horní víko) má šest kuželových centrických otvorů. V nich je při transportu použito šest podložek - konolých kuželů - pod hlavy šroubů, které přitahují dusíkovou a heliovou nádobu. Po transportu jsou v těchto otvorech pouze kuželové vložky. K plášti je přivařena příruba pro křídlový vakuový ventil.

Horní víko je přišroubováno k plášti. Je k němu přivařena vnitřní trubka. Ta má ještě vložku z nerezavějící oceli, přišroubovanou k víku. Horní víko má také druhou část hrdel dusíkových a heliového s přívody proudů. K víku jsou

přivařeny úchyty dusíkové a heliové nádoby. Úchyty mají sklon 45° k ose kryostatu a jsou střídavě (dusíkový - heliový). Vycentrování nádob je umožněno otáčením čepu, který z válcového tělesa vyčnívá.

Všechny svary vnější nádoby musí být provedeny vakuotěsně, protože z ní je odčerpáván vzduch vývěvou. Pro případ náhlého stoupnutí vnitřního tlaku nad dovolenou hodnotu je na heliovém hrdle pojistná odčerpávací hlavice.

3.6 Zchlazování kryostatu

Způsob dodávky kapalného He

Kryostat bude zásobován chladicím médiem nepřetržitě. Odpar vzniklý tepelnými ztrátami se nahrazuje nepřetržitě chladicí kapalinou. V případě použití zásobní nádoby s kapalným heliem je možné spojení nádoby s kryostatem krátkým potrubím a pomocí jednoduchého regulačního obvodu udržovat hladinu helia v požadované úrovni. Přelévání možno provádět mírným přetlakem do zásobní nádoby a z ní sifonem zavádět kapalně He do kryostatu.

Jako ekonomicky výhodnější se jeví refrigerační způsob chlazení. Trvale se bude do kryostatu přivádět větší množství kapalného He a z kryostatu se potom bude vracet směs kapaliny a páry při 4,2 K a pára o teplotě 300 K, která se bude odebírat z elektrických přívodů, stlačovat a zavádět do refrigerátoru.

Uvažuje se také o užití nadkritického helia. Tento způsob má výhodu v ještě lepších poměrech přenosy tepla a výhodnějším režimu tlakových ztrát. Je však velmi náročný na regulaci a udržení požadovaných parametrů. Kritickému bodu helia přísluší tlak $p_{kr} = 0,24$ MPa, teplota $T_{kr} = 5,2$ K a měrná hmotnost $\rho_{kr} = 69,3$ kg . m³.

Faktory ovlivňující zchlazování

Aby byla spotřeba kryogenní kapaliny při zchlazování co nejmenší, je třeba mít na zřeteli několik důležitých činitelů, z nichž některé lze přímo nebo nepřímo ovlivnit. Jedním z nich je doba zalévání. Ta je závislá na vhodnosti provedení vnitřních (chlazených prostorů kryostatu). Protože je výparné teplo kryogenních látek, zejména pak helia velmi malé, jde při konstrukci o to, aby se co nejlépe využily chladicí schopnosti par. Je proto dobré v některých případech použít vhodné přepážky a výplně nevyužitých prostorů, aby se páry helia co nejvíce stýkaly s povrchem dosud nevychlazené hmoty a neunikaly bez využití do hrdla kryostatu. Při delším zalévání kryogenní kapalinou se již do značné míry projevují tepelné ztráty kryostatu vedení v úchytech a vodičích, popř. sáláním atd.

Kontrola teploty uvnitř heliové nádoby

Pro kontrolu skutečné teploty v různých částech heliové nádoby budou umístěna teplotní čidla. Jedná se o kontrolu teploty u vstupu chladiva do heliové nádoby, vstupu par do hrdla, dále pak na nejvyšším a nejnižším místě feromagnetického obvodu. Nejdůležitějším místem bude kontrola teploty na nejvyšším místě vinutí. Dle potřeby je možné umístit ještě další čidla pro kontrolu prechlazování atd. V ustáleném stavu probíhá v heliové nádobě a na supravodičích vodičích bublinkový var, při teplotách $4,2 \div 5$ K. Při tomto varu musí bublinky bezpečně odcházet a nesmí nikde dojít k hromadění plynu.

Postup při zchlazování

Neuvažuje-li se refrigerační způsob, je výhodné užít postupného zchlazování. Provádí se tím způsobem, že celý "studený" prostor kryostatu včetně heliové nádoby se naplní postupně kapalným dusíkem, který jej zchladí na svoji teplotu varu při atmosferickém tlaku, to je 77,4 K. Kdy se teplotní poměry ustálí a dojde všude k ustálenému stavu, je možné započít s vytlačováním kapalného dusíku z heliové nádoby. Odpařování dusíku tepnými odpary se nedoporučuje, protože na 1 litr je třeba při výkonu 100 W asi 30 min. Vytlačení dusíku se může provést tak, že se heliová nádoba utěsní, dovnitř se vloží malé topné tělísko, které způsobí zvýšení tlaku uvnitř nádoby a tím i přečerpání kapalného dusíku pomocí trubky pro přívod kapalného helia, která je vyvedena na nejnižším místě nádoby. Po vytlačení celého obsahu je možné zbytek odpařit tepným tělískem. Poslední zbytky dusíku je možné odsát rotační vývěvou. Nádobu musí být kapalného dusíku zbavena hlavně proto, že by mohlo dojít k znečištění heliové náplně, popřípadě k poškození vinnutí, kdyby tam zbylý dusík po přivedení kapalného helia zmrzl. Spolehlivě se můžeme o přítomnosti dusíku přesvědčit tím, že při odsávání klesá teplota uvnitř heliové nádoby. Toho se dá využít k dalšímu prochlazení, ale je třeba dbát, aby teplota neklesla pod 65 K, kdy by hrozilo zmrznutí dusíku. Jestliže je nádoba čistá, může se započít s doléváním helia a konečným zchlazením celého vnitřku kryostatu.

Možnost snížení spotřeby kryogenní kapaliny

Sníží-li se tlak nad hladinou kapalného dusíku, umožní se var při nižší teplotě a tím i hlubší ochlazení vnitřku heliové nádoby. Je ale při tom nutno sledovat teploty uvnitř, aby se nepřekročila teplota 65 K, což by mohlo vést k dříve již uvedeným obtížím.

4. ZÁVĚR

Ve své diplomové práci jsem se snažil objasnit problémy, spojené s návrhem kryostatu supravodivého magnetu použitelného pro magnetický separátor linky na úpravu kaolínu. Toto zařízení patří do oblasti techniky, která je teprve ve vývoji a kryostat těchto parametrů je prvním, který je v ČSSR navržen. Proto musí mít nezbytně všechny nedostatky, které každou novou věc převázejí. Na základě rozboru zařízení, která jsou s navrženým systémem částečně příbuzná, jsem se snažil zvolit vhodné konstrukční prvky a spojit je s požadavky kladenými na tento kryostat.

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi byli při řešení této diplomové práce nápomocní. Zejména to byli ing. St. Smrž z n. p. Ferex Děčín, ing. Vladimír Klebsa, CSc., členové katedry sklářských a keramických strojů, katedry částí strojů, katedry mechaniky, pružnosti a pevnosti z VŠST Liberec.

Protože se toto zařízení bude vyrábět v n. p. Ferex Děčín jako součást státního úkolu, doufám, že i moje práce pomůže při řešení tohoto náročného, ale zároveň i velmi zajímavého úkolu.

5. POUŽITÁ LITERATURA

- (1) Černoš, S.: Strojně technická příručka, SNTL, 1968, Praha
- (2) Vrzal, B.: Strojnické tabulky, SNTL, 1971, Praha
- (3) Norma ČSN 690011, ÚNM, 1964, Praha
- (4) Enenkl, V.: Termomechanika, skripta VUT Brno, 1977
- (5) Koller, A.: Základy technologie jemné keramiky, skripta VŠST Liberec, 1971
- (6) Schmidt, Z.: Technická příručka, Práce, 1954, Praha
- (7) Debrevolný, B.: Kapesní strojnická příručka, SNTL, 1967, Praha
- (8) Šuma, J.: Heliový kryostat pro supravodivý kvadrupól urychlovače, diplomová práce, ČVUT Praha, 1976
- (9) Kryogenika 78: Celostátná konference o technice nízkých teplot, sborník, Bratislava, 1978
- (10) Prognostický seminář: využití supravodivosti v magnetické separaci, sborník, Praha, 1979
- (11) Scott, R. B.: Cryogenic engineering, Moskva, 1962
- (12) Mal'kov, M. P.: Spravočnik po fiziko-těchničeskim osnovam glubokogo ochlaždenija, Moskva, 1963
- (13) Cryogenics - the international journal of low temperature engineering and research - November 1978
- (14) Oxford Instrument Co Ltd., Oxford OX2 ODX, England
Oxford Instruments - World
leaders in cryomagnetic
systems - firemní literat.

6. SEZNAM PŘÍLOH

- 1) Výkresy** O-DP-349/80-00-00, list 1/8
O-DP-349/80-00-00, list 2/8
- 2) Kusevníky** O-DP-349/80-00-00, list 3/8, 4/8, 5/8,
6/8, 7/8, 8/8.

512244

120 1081

LIBEREC

KRYOS TAI
MAGNETU
SEPARATORU

Q DE 10-01-17-12-01 5/8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	heliová nádoba	svařenec							1
	aktivní uhlí		supersorbon						2
6	čep Ø 22 - 100	ČSN 42 5516	17246.1		026				3
3	táhlo 320		sklolaminát						4
									X
1	dusíková nádoba	svařenec							5
1	deska s výstupky	svařenec							6
1	dno - plech 12	ČSN 42 7302	42 4432.9		818				7
									8
6	čep Ø 17 - 100	ČSN 42 5516	17 246.1		026				9
3	táhlo 280		sklolaminát						10
3	kotvení-plech 2,0	ČSN 42 8306	42 3004.11		312				11
3	pouzdro-plech 2,0	ČSN 42 8306	42 3004.11		312				12
3	zátky M30		sklolaminát						13
3	vložka Ø 20 - 60	ČSN 42 7510	42 4432.0		818				14
									X
1	deska se stojanem	svařenec							15
									X
1	vnější nádoba	svařenec							16
1	příruba	svařenec							17
3	podložka Ø80-15	ČSN 42 5516	17 246.1		026				18
3	podložka Ø80-15	ČSN 42 5516	17 246.1		026				19

Místo: SLEZÁK Datum: 23. 5. 1980	Podpis: <i>[Signature]</i>
---	----------------------------

VŠST LIBEREC	KRYOSTAT MAGNETU SEPARÁTORU	0-DP-349/80-00-00 3/8
-------------------------	--	------------------------------

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	trubka s přírubou	svařenec							40
2	zaslepovací příruba Ø 110-15	ČSN 42 5516	17 246.1		026				41
1	těleso Ø 220-60		textit						42
2	příruba Ø80 - 40		textit						43
2	přítlačný kroužek Ø 45 - 25	ČSN 42 8511	42 3223.01		365				44
2	těleso hlavice Ø 40 - 130	ČSN 42 5516	17 246.1		026				45
1	trubka 25 x 0,5 - 620	ČSN 42 5750	17 246.1		026				46
1	trubka 25 x 0,5 - 800	ČSN 42 5750	17 246.1		026				47
2	přítlačný kroužek Ø 35 - 15	ČSN 42 8511	42 3223.01		365				48
2	matice s kolíky	svařenec							49
2	zátky Ø 30 - 60	ČSN 42 5516	17 246.4	17 246.1	026				50
									X
3	trubka s přírubou	svařenec							51
									52
6	zaslepovací příruba Ø 80 - 15	ČSN 42 5516	17 246.1		026				53
1	dolévací systém	svařenec							54
1	převlečná matice Ø 50 - 40	ČSN 42 5516	17 246.1		026				55
1	přítlačný kroužek Ø 30 - 12	ČSN 42 8511	42 3223.01		365				56
1	zátky Ø 30 - 60	ČSN 42 5516	17 246.4	17 246.1	026				57
									X
24	šroub M16 - 90 6HR 24 - 110	ČSN 42 5530	17 246.1		026				58
24	matice M16 6HR 24 - 15	ČSN 42 5530	17 246.1		026				59

Jméno: SLEZAK Příjmení: <i>Slepek</i> Datum: 23. 5. 1980		Podpis: _____ Státní znak: _____ Místo: _____ Datum: _____	
VŠST LIBEREC		KRYOSTAT MAGNETU SEPARÁTORU	
0-DP-349/80-00-00 5/8			

VŠST LIBEREC	KRYOSTAT MAGNETU SEPARATORU	0-DP-349/80-00-00 ^{6/8}
-----------------	-----------------------------------	----------------------------------

