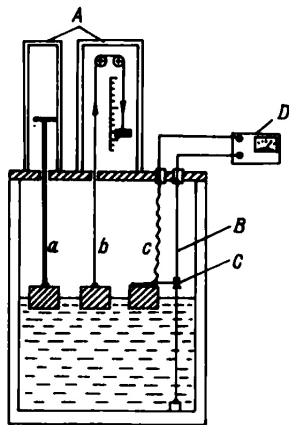


Tepelné izolace a hladinoměry kryokapalin

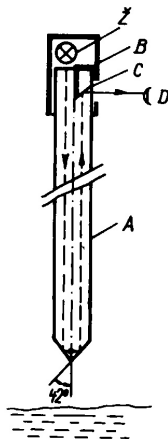
- Různé typy hladinoměrů pro kryokapaliny
- Doplnění kryokapalin
- Dewarova nádoba
- Přenos tepla vedením, zářením,...
- Tepelné izolace - vakuová, superizolace, pěnová,....

Plovákové hladinoměry



Obr. 55. Plovákové hladinoměry:
a – tyčinkový, *b* – s vláknovým převodem,
c – s elektrickým vyhodnocováním

Optické hladinoměry

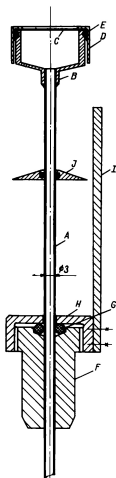


Obr. 56. Optický hladinoměr

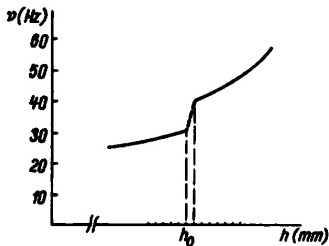
hodí se pro LN_2 , ne pro LHe ²

²J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Termoakustický hladinoměr pro LHe

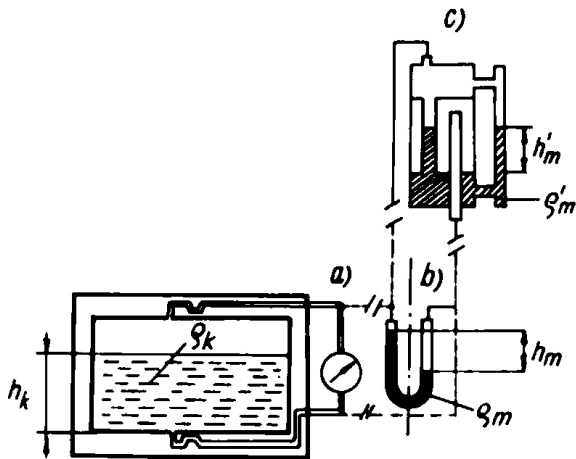


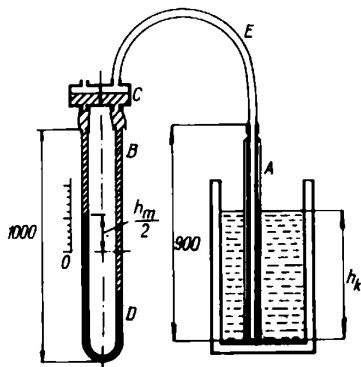
Obr. 57. Termoakustický hladinoměr



Obr. 58. Frekvence termoakustických kmitů v závislosti na vzdálenosti h ode dna nádoby s LHe (h_0 výška hladiny)

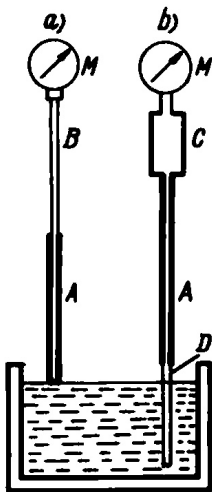
Hladinoměry založené na měření tlaku





Obr. 60. Hladinoměr LN_2 pro měření v nádobách s přímým hrdlem [A tepelně vodivá trubice s izolačním pouzdrém, B diferenciální tlakoměr, C dvoukomorový zásobník lehčí kapaliny (voda) s relativně velkým průřezem komor, D těžší kapalina (obarvený dichlormethan), E spojovací hadička. h_k výška sloupce LN_2 , $h_m/2$ měřený údaj; v případě uvedených kapalin je $h_m = 2,4 h_k$]

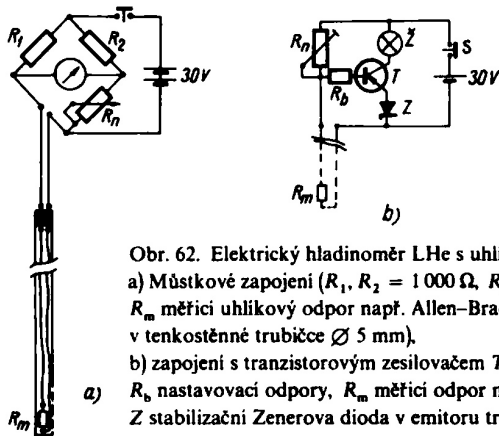
Kondenzační hladinoměry



Obr. 61. Hladinoměry využívající kondenzace par kapaliny:

- a) Hladinoměr indikující dotyk s hladinou poklesem hodnoty tlaku na manometru,
- b) hladinoměr pro kontinuální měření výšky sloupce kryokapaliny

Elektrické odporové hladinoměry

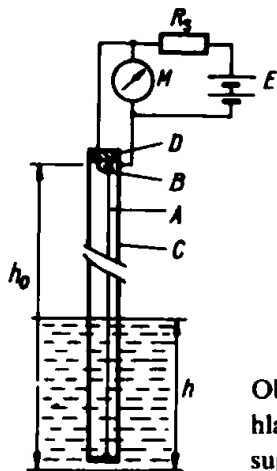


Obr. 62. Elektrický hladinoměr LHe s uhlíkovým odporem:

a) Můstkové zapojení ($R_1, R_2 = 1\,000\ \Omega$, R_n nastavovací odpor $> 1\,000\ \Omega$, R_m měřicí uhlíkový odpor např. Allen-Bradley 50 Ω /250 mW umístěný v tenkostěnné trubičce $\varnothing 5\ \text{mm}$),

b) zapojení s tranzistorovým zesilovačem T a indikační žárovkou Z (R_n, R_b nastavovací odpory, R_m měřicí odpor např. Allen-Bradley 50 Ω , Z stabilizační Zenerova dioda v emitoru tranzistoru T , S spínací tlačítko)

Supravodivý hladinoměr



Obr. 63. Kontinuální hladinoměr LHe se supravodivým vláknem

Kapacitní hladinoměr

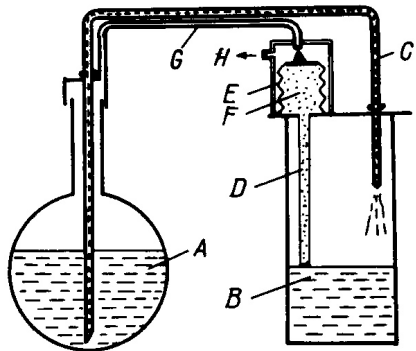
válcový kondenzátor

Kapalina	bod varu [K]	ϵ_r
L^4He	4.21	1.0492
LH_2	20.38	1.230
LNe	27.10	1.187
LN_2	77.35	1.431
LO_2	90.19	1.484

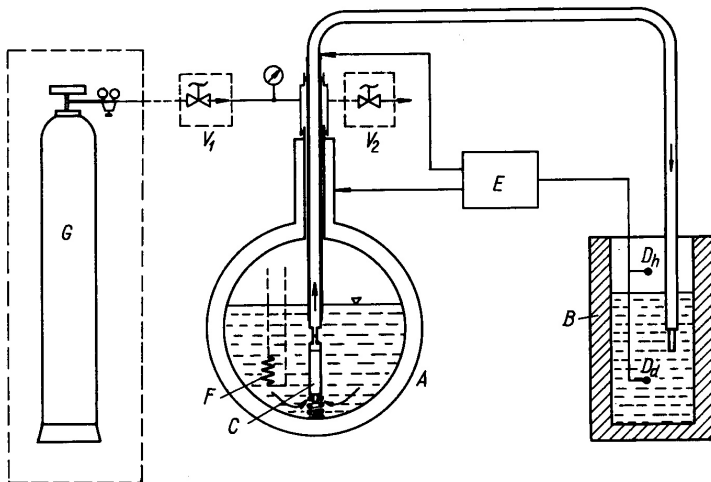
Další typy hladinoměřů

- ultrazvuk
- optický absorpční
- radar
- vážení

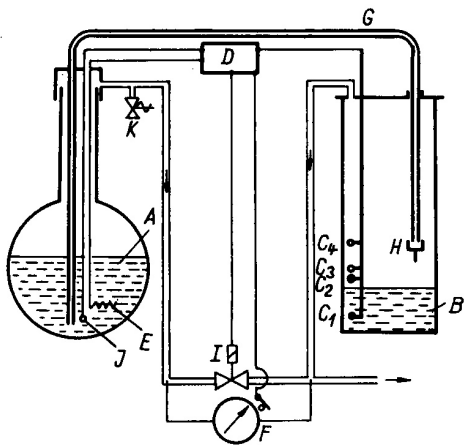
Automatické doplňování kryokapalin



Obr. 64. Automatické zařízení pro doplňování LN₂ s vlnovcovým ventilem



Obr. 65. Automatický regulátor hladiny LN_2 s miniaturním ponorným elektromagnetickým kryoventilem



Obr. 66. Automatické zařízení pro udržování hladiny LHe v požadovaném rozmezí

Tepelné izolace

- přenos tepla zářením
- přenos tepla konvekcí (proudění plynu)
- přenos tepla zbytkovým plynem
- vedení tepla pevnými látkami

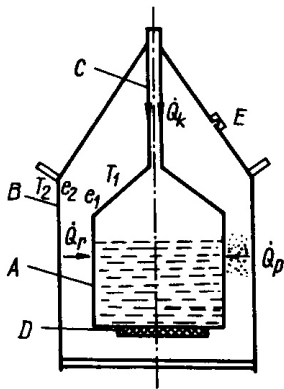
Pro mili- a mikro-kelvinovou oblast - mechanické a akustické kmity, vířivé proudy, elektromagnetické záření,...

Příklad: špendlík z výšky 3 mm na 100 g Cu blok o teplotě $10^{-6} K$ způsobí vzrůst teploty na $10^{-2} K$

Odpar kryokapalin

Kapalina	bod varu [K]	odpar [$cm^3 h^{-1}$] příkonem 1 mW
L^3He	3.19	7.2
L^4He	4.21	1.40
LH_2	20.38	1.15×10^{-2}
LNe	27.10	3.46×10^{-2}
LN_2	77.35	2.26×10^{-2}
LO_2	90.19	1.48×10^{-2}

Dewarova nádoba na LN_2



Obr. 67. Jednoduchá
Dewarova nádoba pro
přechovávání LN_2

Přenos tepla zářením

černé těleso - šedé těleso - záření v široké frekvenční oblasti

Wienův zákon:

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} \quad [\mu m, K]$$

Stefan-Boltzmanův zákon:

$$q = \sigma T^4 \quad [W/m^2]$$

dvě plochy s různou teplotou:

$$Q_{21} = \sigma E_{21} A_{21} (T_2^4 - T_1^4) \quad [W]$$

$$A_{21} \approx A_1 ; E_{21} = \frac{e_1 e_2}{e_2 + (1 - e_2) e_1}$$

e_1, e_2 - emisivity povrchů s teplotou T_1 a T_2

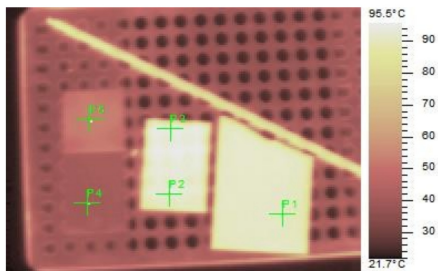
Záření černého tělesa

$T[K]$	$T^4[K^4]$	$q[Wm^{-2}]$	$\lambda_m[\mu m]$
300	8.1×10^9	460	9.66
77	3.51×10^7	1.99	37.6
20	1.60×10^5	9.1×10^{-3}	144.9
4	2.56×10^2	1.45×10^{-5}	724.5
1	1	5.67×10^{-8}	2898
0.1	1×10^{-4}	5.67×10^{-12}	28980

Součinitel poměrné pohltivosti

Látka	$T[K]$	a
Al elektrolyticky leštěný	300	0.03
	76	0.018
	4	0.011
Al s vrstvou oxidů $1\mu m$	300	0.30
Ag	76	0.01
Au	76	0.01
Cu oxidovaný	300	0.78
Cu leštěná	300	0.03
Sn	76	0.013
Ni leštěný	75	0.016
nerez	76	0.048
sklo	293	0.94

tloušťka vrstvy alespoň 1% z λ_m



Bod	a	teplota	a=1	materiál
P1	0.73	103.0 °C	90.8 °C	korund
P2	0.77	102.8 °C	93.2 °C	sklo
P3	0.79	103.0 °C	94.9 °C	sklo pískované
P4	0.07	100.0 °C	40.4 °C	Al leštěný
P5	0.21	101.9 °C	53.2 °C	Al leštěný, pískovaný

Snížení radiačního tepelného toku pomocnými mezistěnami

n- tepelně izolovaných mezistěn

$$Q = \frac{\sigma E_{21} A_1 (T_2^4 - T_1^4)}{n + 1}$$

reálně 2-3 krát větší tepelný tok
je to princip mnohvrstevné izolace

Příklad:

$$e_1 = e_2 \ll 1, E_{21} = \frac{e}{2}, T_2 \gg T_1$$

$$Q = \sigma A_1 T_2^4 \frac{e}{2}$$

$$T_2 = 300K, T_1 = 4.2K, e = 0.04, A_1 = 1m^2 \Rightarrow Q = 9 W$$

to je odpar asi 12 lh^{-1} LHe

$$T_2 = 77K \Rightarrow Q = 39 \text{ mW}$$

to je odpar asi $52 \text{ cm}^3\text{h}^{-1}$

Vedení tepla konvekcí - prouděním plynu

$$Q = C \rho^{1/2} (T_2 - T_1)^{5/4}$$

ρ je hustota, C je konstanta
zabránit konvekci můžeme:

- rozdělení prostoru na malé komůrky
- snížením tlaku pod 10 Pa

Vedení tepla zbytkovým plynem

pro vzduch při atm. tlaku:

$$Q = \frac{\lambda A_1}{d} (T_2 - T_1)$$

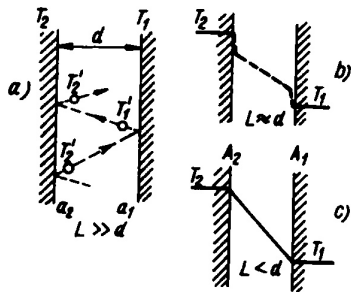
pro molekulární proudění a sousedé válcové plochy:

$$Q = \left(\frac{R}{8\pi} \right)^{1/2} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} a_c \frac{T_2 - T_1}{(MT)^{1/2}} p A_1$$

kde $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, a_c je koeficient akomodace

$$a_c = \frac{a_1 a_2}{a_2 + a_1 (1 - a_2) \frac{A_2}{A_1}}$$

$$a_1 = \frac{T_2' - T_1'}{T_2' - T_1}, \quad a_2 = \frac{T_2' - T_1'}{T_2 - T_1'}$$



Obr. 72. Vedení tepla zbytkovým plynem:
 a) $L \gg d$, molekuly plynu mají po srážce se stěnami A_1 a A_2 energie odpovídající teplotám T_1 a T_2 .
 b) $L \approx d$, závislost teploty plynu mezi oběma stěnami schématicky znázorňuje náčrt,
 c) $L < d$, průběh teploty mezi stěnami je přibližně lineární

Akomodační koeficient - orientační hodnoty

Teplota [K]	He	H ₂	vzduch
300	0.3	0.3	0.8-0.9
77	0.4	0.5	1
20	0.6	1	1
4	1	1	1

Vedení tepla pevnými látkami

$$Q = \frac{\lambda A (T_2 - T_1)}{d} \quad [W]$$

n-vrstev různých materiálů

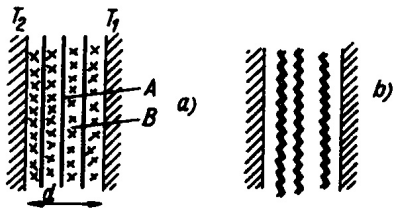
$$Q = \frac{A (T_2 - T_1)}{\sum_{i=1}^n R_i}, \quad R_i = \frac{d_i}{\lambda_i}$$

Vakuová izolace - Dewarova nádoba

- tlak asi 10^{-3} Pa
- materiál tvrdé sklo, nerez,...
- Ag - kvůli radiaci
- difuze He přes sklo
- kombinace vakua a jiných druhů izolace

Při tlaku 10^{-3} Pa je střední volná dráha pro vzduch a teplotu 300 K asi 6.6 m.

Mnohovrstevná izolace - superizolace

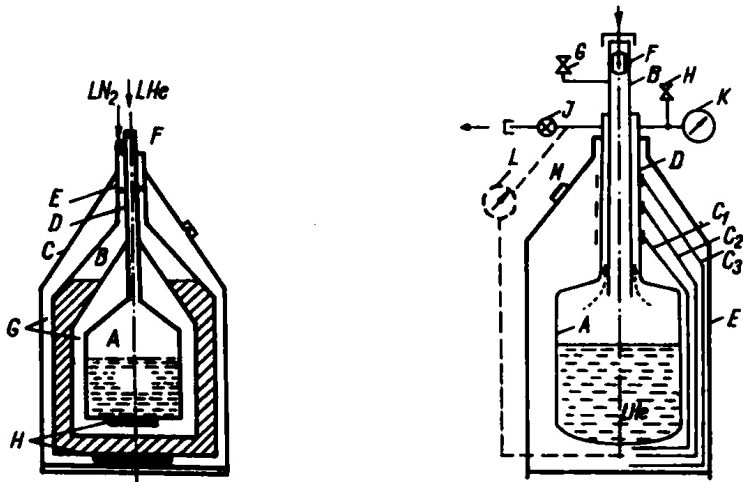


Obr. 75. Příklady dvou typů mnohovrstvé izolace (superizolace):

a) *A* hliníková fólie, *B* skelná tkanina,

b) fólie z plastické hmoty (např. z mylaru) jednostranně pokovená Al

Dewarova nádoba na LHe

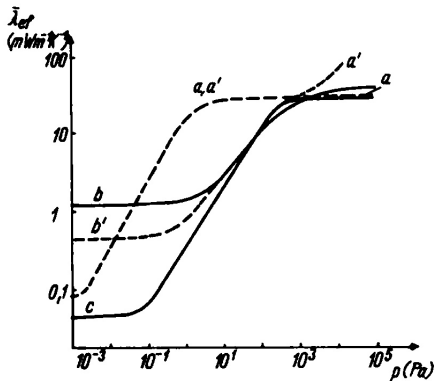


15

¹⁵J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Prášková izolace

- jemný prášek z tepelně nevodivého materiálu
- snížení tlaku
- nesmí se mechanicky stlačit
- perlit, silikagel, ...



Obr. 74. Závislosti efektivní tepelné vodivosti λ_{ef} na tlaku p zbytkových plynů pro různé typy prakticky užívaných izolací:

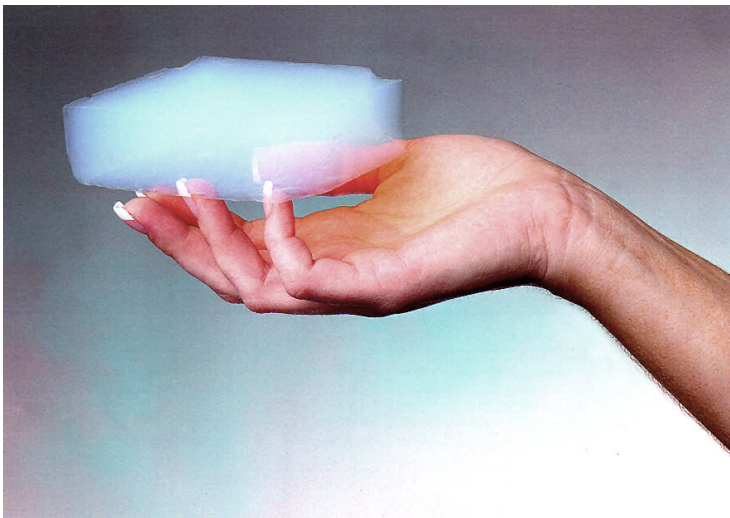
- a) Idealizovaný případ vakuové izolace ($d = 1$ cm), kde nemůže vznikat konvekce.
- a') vakuová izolace ($d = 1$ cm) s možností vzniku konvekce při tlaku $p > 10$ Pa,
- b) vakuoprášková izolace,
- b') vakuoprášková izolace s příměsí kovových vloček,
- c) mnohovrstvá izolace (superizolace)

Pěnová izolace

- malé uzavřené, nebo otevřené komůrky
- polystyren, polyuretan, epoxid, sklo,...
- malá hustota
- vakuum
- polystyren 4l LN₂, síla stěny 3 cm, odpaření asi za 14 h
- raketová technika - STS 107, start 16.1.2003, 1.2.2003 Columbia, 60x38x7.5 cm, rychlost 185-255 m/s

Aerogel

- Si, C, Al_2O_3 , ...
- póry 30 nm
- nižší tepelná vodivost než vzduch
- hustota asi 1900 g/m^3
- nejmenší hustota 2013 aerographene 160 g/m^3 , vzduch 1200 g/m^3
- využití: tepelná izolace - raketová technika, vesmírné sondy, oblečení, budovy,...; absorpční materiál; léčiva- je biokompatibilní;...



17

¹⁷en.wikipedia.org



Látka	$[Wm^{-1}K^{-1}]$
graphene	4840
c-BN	740
Ag	429
Cu	401
Au	318
Ni	90.9
korund	30
nerez	18
a-BN	3
sklo	0.8-1.4
polyethylen HDPE	0.5
plexisklo	0.2
korek	0.04-0.07
papír	0.05
polystyren	0.033
aerogel	0.03 - 0.004
vzduch	0.026

LN₂

Typ	objem [l]	odpar [%/den]	materiál
IKL32	31.5	1.8	Al + nerez
Bo 50	50	3.5	nerez
EC 75	75	1.25	nerez
T600	632	1	nerez

He

Typ	objem [l]	stínění	odpar He [%/den]	materiál
He50	50	LN2	3.5	nerez
STG40	40	LN2	1	nerez
STG100	100	S	1.5	nerez
LHe	500	S	0.75	nerez