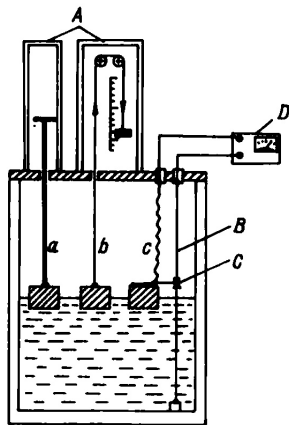


# Tepelné izolace a hladinoměry kryokapalin

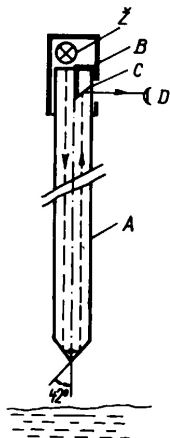
- Různé typy hladinměřů pro kryokapaliny
- Doplnění kryokapalin
- Dewarova nádoba
- Přenos tepla vedením, zářením,...
- Tepelné izolace - vakuová, superizolace, pěnová,....

# Plovákové hladinoměry



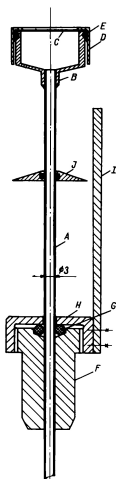
Obr. 55. Plovákové hladinoměry:  
*a* – tyčinkový, *b* – s vláknovým převodem,  
*c* – s elektrickým vyhodnocováním

# Optické hladinoměry

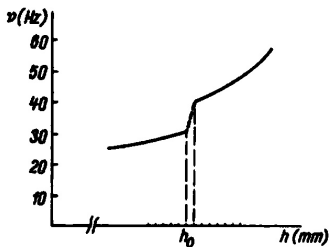


Obr. 56. Optický hladinoměr

# Termoakustický hladinoměr

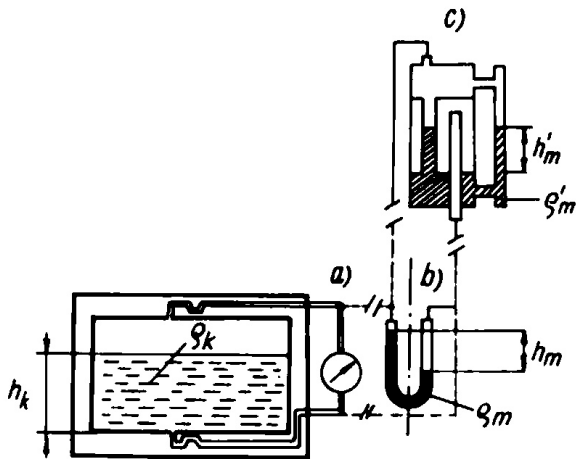


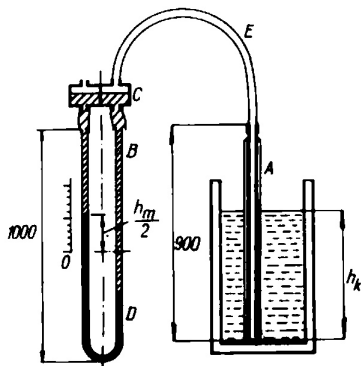
Obr. 57. Termoakustický hladinoměr



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

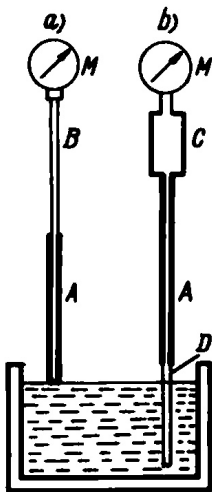
# Hladinoměry založené na měření tlaku





Obr. 60. Hladinoměr  $\text{LN}_2$  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  $\text{LN}_2$ ,  $h_m/2$  měřený údaj; v případě uvedených kapalin je  $h_m = 2,4 h_k$ ]

# Kondenzační hladinoměry

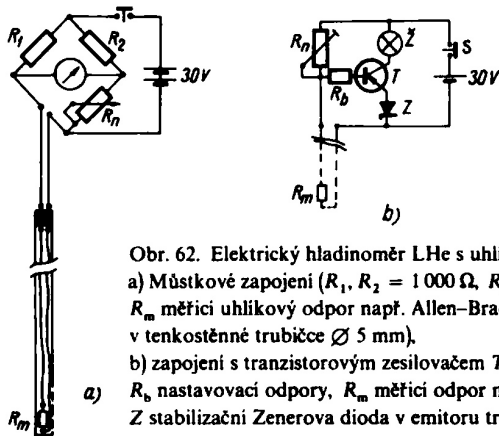


Obr. 61. Hladinoměry využívající kondenzace par kapaliny:

a) Hladinoměr indikující dotyk s hladinou poklesem hodnoty tlaku na manometru,

b) hladinoměr pro kontinuální měření výšky sloupce kryokapaliny

# Elektrické odporové hladinoměry



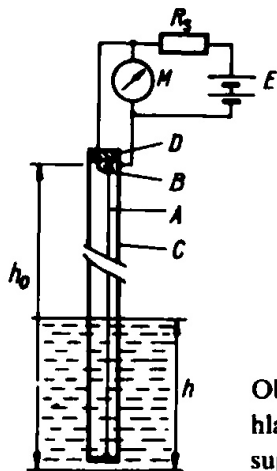
Obr. 62. Elektrický hladinoměr LHe s uhlíkovým odporem:

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  $50\ \Omega/250\ \text{mW}$  umístěný v tenkostěnné trubičce  $\varnothing 5\ \text{mm}$ ).

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



# Supravodivý hladinoměr



Obr. 63. Kontinuální hladinoměr LHe se supravodivým vláknem

# Kapacitní hladinoměr

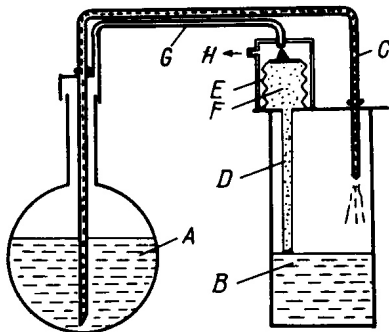
válcový kondenzátor

Kapalina	bod varu [K]	$\epsilon_r$
$L^4He$	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

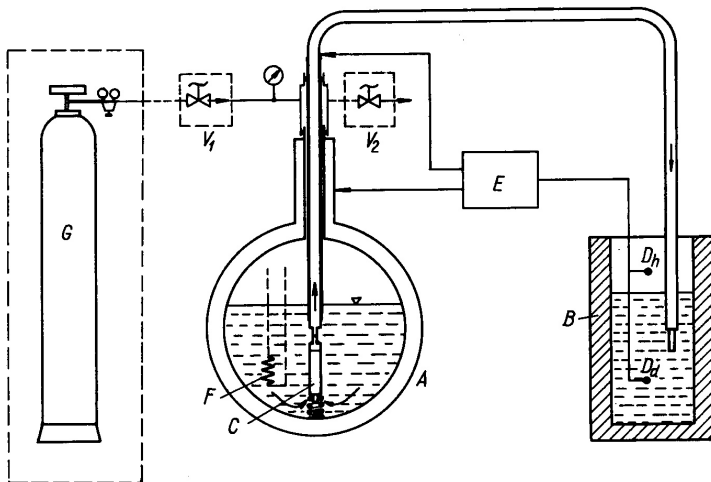
# Další typy hladinoměřů

- ultrazvuk
- optický absorpční
- radar
- vážení

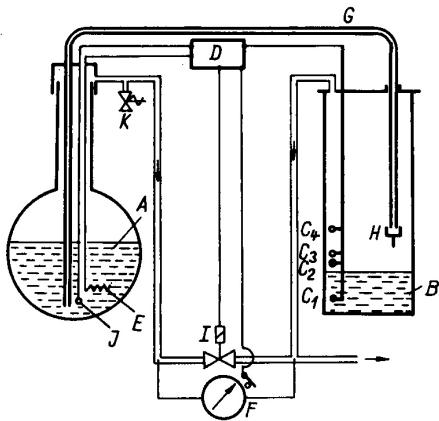
# Automatické doplňování kryokapalin



Obr. 64. Automatické zařízení pro doplňování LN<sub>2</sub> s vlnovcovým ventilem



Obr. 65. Automatický regulátor hladiny  $\text{LN}_2$  s miniaturním ponorným elektromagnetickým kryventilem



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 kustické kmity, vířivé proudy, elektromagnetické záření,...

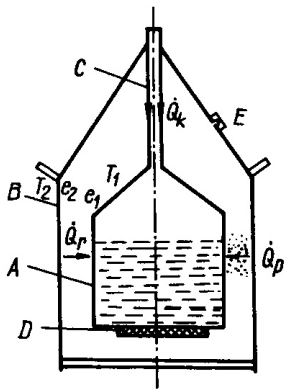
př. špendlík z výšky 3 mm na 100 g Cu blok o teplotě  $10^{-6}K$  způsobí vzrůst teploty na  $10^{-2}K$

# 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	$1.15 \times 10^{-2}$
$LNe$	27.10	$3.46 \times 10^{-2}$
$LN_2$	77.35	$2.26 \times 10^{-2}$
$LO_2$	90.19	$1.48 \times 10^{-2}$



# Dewarova nádoba na $\text{LN}_2$



Obr. 67. Jednoduchá  
Dewarova nádoba pro  
přechovávání  $\text{LN}_2$

# 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	$8.1 \times 10^9$	460	9.66
77	$3.51 \times 10^7$	1.99	37.6
20	$1.60 \times 10^5$	$9.1 \times 10^{-3}$	144.9
4	$2.56 \times 10^2$	$1.45 \times 10^{-5}$	724.5
1	1	$5.67 \times 10^{-8}$	2898
0.1	$1 \times 10^{-4}$	$5.67 \times 10^{-12}$	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  $\lambda_m$

# 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  $12 \text{ lh}^{-1}$  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

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

$\rho$  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:

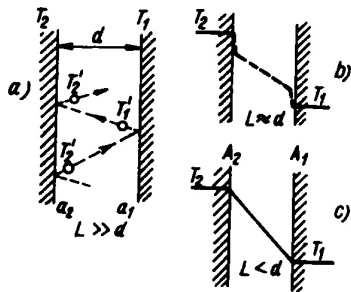
$$Q = \left( \frac{R}{8\pi} \right)^{1/2} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} a_c \frac{T_2 - T_1}{(MT)^{1/2}} p A_1$$

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 <sub>2</sub>	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

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

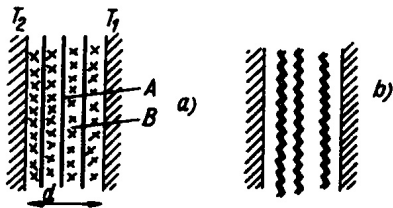
n-vrstev různých materiálů

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

# Vakuová izolace

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

# Mnohovrstevná izolace - superizolace

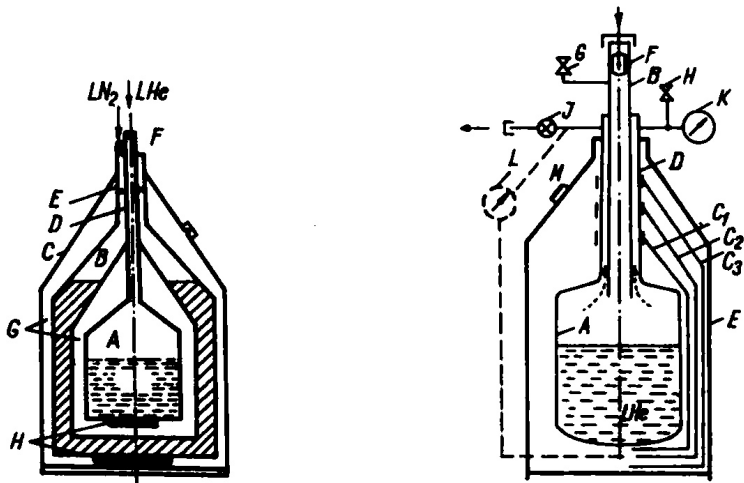


Obr. 75. Příklady dvou typů mnohovrstvé izolace (superizolace):

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

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

# Dewarova nádoba na LHe

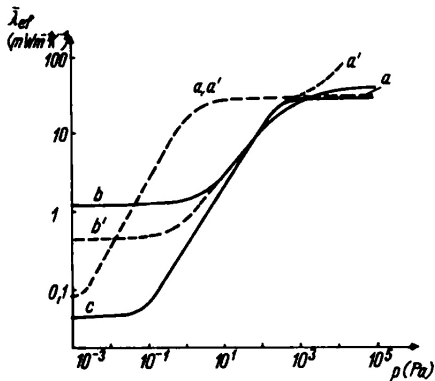


15

<sup>15</sup>J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

# Prášková izolace

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



Obr. 74. Závislosti efektivní tepelné vodivosti  $\lambda_{ef}$  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 LN<sub>2</sub>, 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ...
- póry 30 nm
- nižší tepelná vodivost než vzduch
- hustota asi 1900 g/m<sup>3</sup>
- nejmenší hustota 2013 aerographene 160 g/m<sup>3</sup>, vzduch 1200 g/m<sup>3</sup>
- využití: tepelná izolace - raketová technika, vesmírné sondy, oblečení, budovy,...; absorpční materiál; léčiva- je biokompatibilní;...





Látka	$[Wm^{-1}K^{-1}]$
graphene	4840
c-BN	740
Ag	429
Cu	401
Au	318
Ni	90.9
korund	30
neraz	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

LN<sub>2</sub>

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