

Jiří Růžička

Tepelně isolační vlastnosti pěněného polystyrenu při nízkých teplotách

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 4 (1959), No. 1, 67--73

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137857>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1959

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

pre κ_2 neexistuje. Jeťvuje len bod na hornej hraničnej čiare grafu, a to veľmi ďaleko napravo vo vzdialenosti η . Na pr. pri rýsovaní originálu grafu sme mali pri $\alpha = 20$ cm, $\beta = 150$ cm, vzdialenosť $\eta = 208,33$ cm. So spomenutým bodom by sme mali spájať jednotlivé kóty stupnice pre p . Vzhľadom na to, že je veľmi ďaleko, urobíme si radšej vopred osnovu priamok. Pri rýsovaní osnovy priamok treba užiť podobnosti trojuholníkov. Pri grafe obr. 2 je taktiež kľúč. Stupnica pre κ_1 je tu prekreslená na hornom okraji grafu.

Na obr. 1 sú vyznačené riešenie týchto príkladov:

a) koľko % tekutiny o susceptibilitě $\kappa_2 = +0,3 \cdot 10^{-6}$ treba zmiešať s tekutinou o susceptibilitě $\kappa_1 = -0,5 \cdot 10^{-6}$, aby sme dostali tekutinu susceptibility $\kappa = -0,2 \cdot 10^{-6}$. Výsledok získaný numerický dľa vzorca (1) bol $p = 62,50$ %, graficky tiež 62,50 %.

b) Methylalkohol (CH_4O) susceptibility $\kappa_1 = -0,91 \cdot 10^{-6}$ smiešame s vodou ($\kappa_2 = -0,72 \cdot 10^{-6}$) vo váhovom pomere 1 : 1 ($p = 50$ %). Aká je výsledná susceptibilita? Výsledok zistený numerický $\kappa = -0,815 \cdot 10^{-6}$, grafický $\kappa = -0,82 \cdot 10^{-6}$.

c) Koľko percent roztoku FeCl_3 ($\kappa_1 = +2 \cdot 10^{-6}$) treba smiešať s vodou ($\kappa_2 = -0,72 \cdot 10^{-6}$), aby výsledný roztok mal nulovú susceptibilitu ($\kappa = 0$)? Výsledok numerický $p = 26,47$ %, grafický $p = 26,5$ %.

Na obr. 2 je vyznačené riešenie týchto príkladov:

a) V literatúre [6] nájdeme, že dľa Königsbergových meraní mal roztok nikelsulfátu pri $p = 12,3$ % susceptibilitu $\kappa = +3,89 \cdot 10^{-6}$. Aká susceptibilita vychádza dľa tohoto merania pre bezvodý nikelsulfát ($\kappa_1 = ?$), keď $\kappa_2 = -0,72 \cdot 10^{-6}$? Výsledok numerický $\kappa_1 = +36,75 \cdot 10^{-6}$, grafický $\kappa_1 = +37 \cdot 10^{-6}$.

b) Graetz [6] udáva pre kupfersulfát susceptibilitu $\kappa_1 = +16,52 \cdot 10^{-6}$. Koľko musí byť rozpustené tejto chemikálie vo vode ($\kappa_2 = -0,72 \cdot 10^{-6}$), aby bola susceptibilita jeho vodného roztoku $\kappa = +6 \cdot 10^{-6}$? Výsledok numerický $p = 38,97$ %, grafický $p = 38,9$ %.

Ako vidno z príkladov, ktoré boli riešené, výpočet je aj dostatočne presný.

Literatúra

- [1] Brož J., *Základy magnetických měření*, Nakl. ČSAV, Praha (1953), str. 245.
- [2] Klemm W., *Magnetochemie*, Akad. Verlagsg., Leipzig (1933), 475.
- [3] Scott A. F., Blair C. M., *J. Phys. Chem.* 37 (1933), 475.
- [4] Seely S., *Phys. Rev.* 49 (1936), 812.
- [5] Venkataraman S., *J. Indian Chem. Soc.* 17 (1940), 297.
- [6] Graetz L., *Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus*, Verl. Barth, Leipzig (1920), str. 783—824.

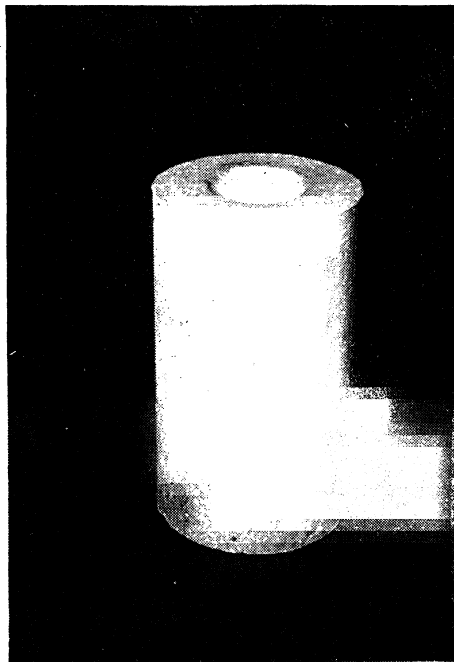
TEPELNĚ ISOLAČNÍ VLASTNOSTI PĚNĚNÉHO POLYSTYRENU PŘI NÍZKÝCH TEPLOTÁCH

Inž. Jiří Růžička,
ÚJF ČSAV Praha

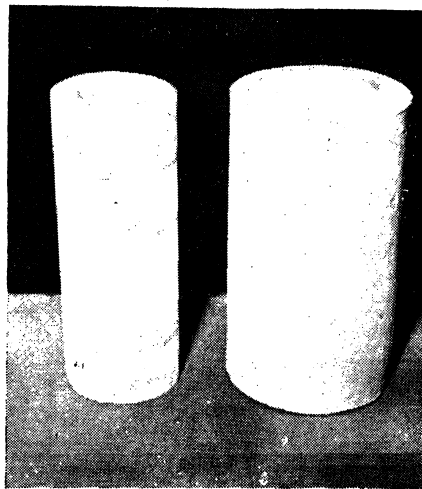
Problém tepelné izolace je v technice a fyzice nízkých teplot prvořadou záležitostí. Při laboratorní práci za teplot kapalného vzduchu a teplot nižších používá se běžně skleněných Dewarových nádob, u nichž je jako tepelné izolace použito vysokého vakua. U těchto nádob záleží především na jakosti použitého skla a na jeho technologickém zpracování, neboť teplotní rozdíly, které musí tento materiál snášet při plnění kapalnými plyny, jsou značně vysoké. Protože materiál ani technologické zpracování běžně používaných Dewarových nádob nebývá dostatečně kvalitní, dochází v důsledku prudkých teplotních změn ke značnému vnitřnímu pnutí skla, jež má velmi často za následek vznik prasklin a destrukci celé nádoby. Z tohoto důvodu je práce s těmito nádobami značně nebezpečná a při provádění pokusů jsou tyto destrukce velmi nepříjemné a ohrožují často zdárný průběh pokusu.

Při hledání náhrady za tento křehký a snadno rozbitelný materiál dospělo se ke kovovým Dewarovým nádobám, jejichž použití však při mnoha pokusech není buď možné, nebo není nejvýhodnější. Moderní chemie přinesla však i do tepelných izolací materiály o malých tepelných vodivostech, při současně malé specifické váze, malé nasákavosti a poměrně vysoké pevnosti v tlaku. Typickým představitelem těchto materiálů je pěněný polystyren, kterého bylo použito v laboratořích Ústavu jaderné fyziky ČSAV v Praze ke konstrukci válcových nádob pro přechovávání zkapalněných nízkotlakých plynů.

Použitý polystyren byl vyroben ve Výzkumném ústavu plastikářské a gumárenské technologie v Praze a jeho charakteristickou hodnotou je měrná váha, která u nízkotlakého polystyrenu činila $\gamma = 26 \text{ kg/m}^3$, a u vysokotlakého $\gamma = 27 \text{ kg/m}^3$.



Obr. 1. Nádoba pro kapalný vzduch z nízkotlakého polystyrenu.



Obr. 2. Nádoby pro kapalný vzduch: vpravo z nízkotlakého polystyrenu, vlevo z vysokotlakého polystyrenu.

Při výrobě těchto nádob z nízkotlakého pěněného polystyrenu bylo nutno nejdříve vyrobti vhodnou kovovou formu, která dovolila expandovati výchozímu materiálu, styroporu, do žádaného válcovitého tvaru, patrného z obr. 1 a z obr. 2 (pravá část). Tak byly vytvořeny nádoby o vnitřním průměru $d_1 = 65 \text{ mm}$, vnějším průměru $d_2 = 143 \text{ mm}$ a hloubce $h = 211 \text{ mm}$, které byly plněny kapalným vzduchem. Byla zkoumána závislost množství kapalného vzduchu M , zbývajícího v nádobě na čase τ . Výsledky těchto měření jsou graficky vyneseny na obr. 3. Naměřené hodnoty, vynesené v grafu na obr. 3, umožňují získati analytické vyjádření výšky hladiny kapalného vzduchu x v nádobě (obr. 4) v závislosti na čase τ , nutné k výpočtu střední hodnoty koeficientu tepelné vodivosti λ nízkotlakého pěněného polystyrenu mezi teplotou okolí a teplotou kapalného vzduchu (-193°C), provedeného v následující části.

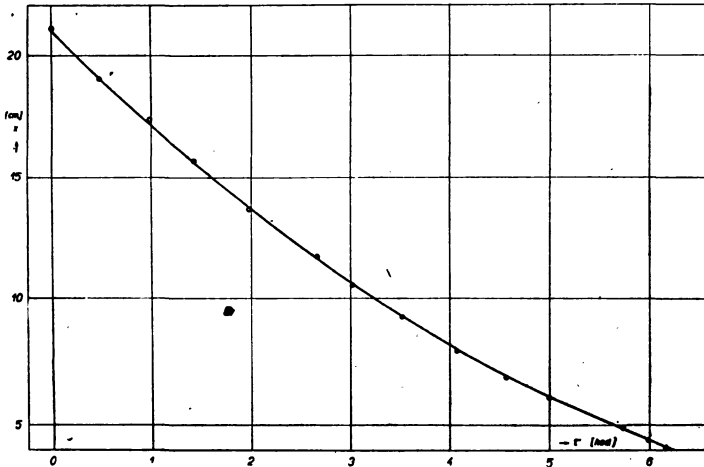
Do lázně kapalného plynu, nacházející se v nádobě, naznačené schematicky v řezu na obr. 4, vnikne za okamžik dt z okolí množství tepla dQ . Toto množství tepla dQ se skládá:

1. z množství tepla dQ_{v1} , vnikajícího do nádoby průchodem válcovou stěnou o výšce x v naznačeném směru,
2. z množství tepla dQ_{v2} , pronikajícího válcovou stěnou o výšce $(h - x)$,
3. z množství tepla dQ_d , vnikajícího do nádoby dnem,
4. z množství tepla dQ_s , sdíleného sáláním mezi víčkem v a volnou hladinou kapaliny a
5. z množství tepla dQ_p , vnikajícího do lázně prouděním vznikajících par a prouděním dovnitř difundujícího vzduchu z okolí.

Množství tepla dQ_{v1} , procházející vřícovou stěnou o výšce x můžeme vyjádřit vztahem:

$$dQ_{v1} = \left[\int_0^x \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} \cdot \pi \cdot (t_0 - t_v) \cdot dx \right] \cdot d\tau, \dots \quad (1)$$

v němž značí α_1 koeficient přestupu tepla z vroucí kapaliny do vnitřního povrchu vřícové stěny v $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$, α_2 koeficient přestupu tepla s vnějšího povrchu vřícové stěny do okolního vzduchu v $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$, λ střední hodnotu koeficientu tepelné vodivosti vřícové stěny mezi teplotami t_v' a t_0' v $\text{kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$, d_1, d_2 vnitřní a vnější průměr vřícové stěny v m, t_0 teplotu okolí ve stupních $^\circ\text{C}$, t_v teplotu vroucí kapalné lázně ve $^\circ\text{C}$, t_v', t_0' teplotu vnitřního a vnějšího povrchu vřícové stěny ve $^\circ\text{C}$.



Obr. 3. Závislost $M - \tau(x - \tau)$ pro nádobu z nízkotlakého polystyrenu pro kapalný vzduch.

Množství tepla dQ_{v2} , vnikajícího do nádoby vřícovou stěnou o výšce $(h - x)$, lze vyjádřit vztahem:

$$dQ_{v2} = \left[\int_{r_1}^{r_2} \frac{\lambda}{h - x} \cdot (t_0' - t_{rx}') \cdot 2\pi r \cdot dr \right] \cdot d\tau, \dots \quad (2)$$

v němž značí h výšku vnitřního válce v m, r libovolný poloměr mezi poloměry r_1 a r_2 v m, t_{rx} teplotu v místě o poloměru r a výšce x ve $^\circ\text{C}$.

Na velikost t_{rx} má vliv teplo, pronikající s povrchu válce ve směru axiálním shora, ve směru šikmém s povrchu válce nad výšce x a teplo, pronikající s vnějšího povrchu válce ve směru radiálním, jež bude mít v proměřovaných částech zřejmě vliv největší. Předpokládáme proto $t_{rx} = f(r)$ ve tvaru:

$$t_{rx} = k \cdot \ln r + c, \quad (3)$$

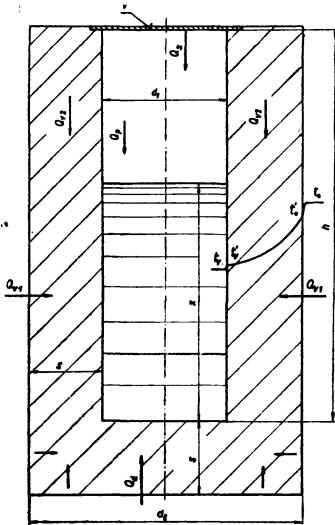
jež pro mezní podmínky ($r = r_1, t_1 = t_v'$ a $r = r_2, t_2 = t_0'$) poskytuje hodnoty pro k a c .

Po dosazení (3) do (2) obdržíme výraz pro dQ_{v2} ve tvaru:

$$dQ_{v2} = 2 \cdot \pi \left[\int_{r_1}^{r_2} \frac{\lambda}{h - x} \cdot (t_0' - k \ln r - c) r \cdot dr \right] d\tau. \quad (4)$$

Množství tepla dQ_d , vnikajícího do kapalného vzduchu dnem, lze u nádoby, znázorněné v obr. 4, vzhledem ke stejné tloušťce válcové stěny a stěny dna s , s dostatečnou přesností vyjádřit výrazem:

$$dQ_d = \frac{\pi \cdot (d_1 + s)^2}{4} \cdot \frac{\lambda}{s} \cdot (t_0' - t_v') \cdot d\tau. \quad (5)$$



Množství tepla dQ_s , sdíleného sáláním mezi volnou hladinou kapalného vzduchu a víčkem v , je:

$$dQ_s = \varepsilon \cdot C \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_v}{100} \right)^4 \right] \cdot d\tau, \quad (6)$$

kde

$$\varepsilon \cdot C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot C \quad (7)$$

značí koeficient sálavosti systému při stejných velikostech sálajících ploch. Ve výrazu (7) značí $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ koeficienty poměrné sálavosti sálajících ploch, C koeficient sálavosti absolutně černého tělesa $4,9 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{°K}^4 \cdot \text{h}$.

Množství tepla dQ_p , přiváděného kapalného vzduchu prouděním ohřátých par od stěn a víčka nádoby, je vzhledem k ostatním ztrátám chladu nepatrné a je možno je při výpočtu zanedbat.

Obr. 4. Schematický řez nádobou z nízkotlakého polystyrenu.

Celkové množství tepla, přivedeného kapalnému vzduchu za časový okamžik $d\tau$ je tedy:

$$dQ = dQ_{v1} + dQ_{v2} + dQ_d + dQ_s \quad (8)$$

a množství tepla, přivedeného v konečném časovém intervalu:

$$Q = Q_{v1} + Q_{v2} + Q_d + Q_s, \quad (9)$$

kde

$$Q_{v1} = \pi \int_{\tau_1}^{\tau_2} \int_0^x \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} \cdot (t_0 - t_v) \cdot dx \cdot d\tau, \quad (10)$$

$$Q_{v2} = 2\pi \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\lambda}{h - x} \cdot (t_0' - k \cdot \ln r - c) \cdot r \cdot dr \cdot d\tau, \quad (11)$$

$$Q_d = \frac{\pi(d_1 + s)^2}{4} \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{\lambda}{s} (t_0' - t_v') \cdot d\tau, \quad (12)$$

$$Q_s = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_2} \varepsilon \cdot C \cdot \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_v}{100} \right)^4 \right] \cdot d\tau. \quad (13)$$

Z výsledku měření závislosti výšky hladiny kapalného vzduchu x v nádobě z nízkotlakého pěněného polystyrenu, patrné z obr. 1, na čase τ vyplynul následující analytický vztah:

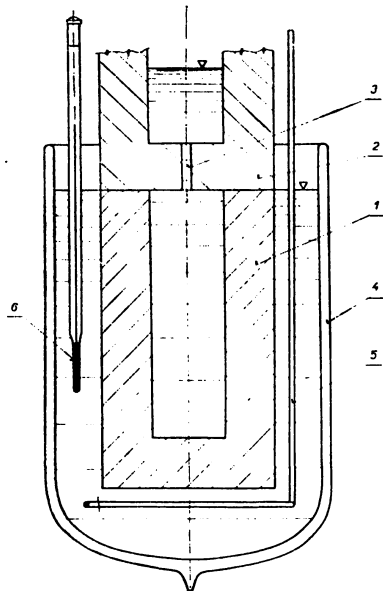
$$x = 0,211 - 0,0415\tau + 0,00228\tau^2. \quad (14)$$

Provedeme-li nyní dosazení hodnot do výše uvedených rovnic pro měřené podmínky, poskytneme rovnice (9) při měřeném Q hodnotu pro τ_{stf} a to $\lambda_{stf} = 0,0201 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$.

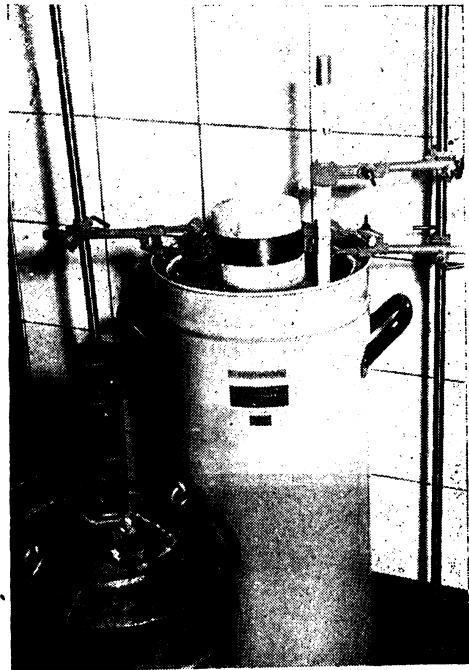
Pro možnost porovnání tohoto výsledku a pro určení střední hodnoty λ mezi teplotami $+16\text{ }^\circ\text{C}$ a $-192\text{ }^\circ\text{C}$ pro nízkotlaký pěněný polystyren o tloušťce $s = 40\text{ mm}$ bylo použito ještě starší varianta kalorimetrické metody měření λ na válci. Schematické znázornění uspořádání při měření je patrné z obr. 5.

Na nádobu 1 byla přilepena spodní část stejné nádoby 2 ze stejného materiálu, v jejímž dně byl otvor 3. Do nádoby 2 byl pak naléván kapalný vzduch, až byla nádoba 1 zcela naplněna a hladina kapaliny v nádobě 2 se ustálila v naznačené poloze. Tento celek byl pak ponořen do vodní lázně v nádobě 4, jež byla dobře tepelně izolována od okolí, až do výše horního okraje nádoby 1. Míchadlem 5 bylo prováděno promíchávání vodní lázně, jejíž teplota byla měřena Beckmanovým teploměrem (6), s přesností $0,01\text{ }^\circ\text{C}$.

Uspořádání při měření je patrné z obr. 6.



Obr. 5. Schematický řez uspořádání měření λ_{net} nízkotlakého polystyrenu kalorimetrickou metodou.



Obr. 6. Měření λ_{net} nízkotlakého polystyrenu v kalorimetru.

Při známém množství G kg vody poskytlo její měření ochlazení o t $^\circ\text{C}$ určení množství tepla, proniklého dovnitř nádoby 1. Protože tepelné ztráty reservoáru kapalného vzduchu (nádobu 2) byly za těchto podmínek předem ocejchovány, bylo možno provést též kontrolu vniklého tepla na straně odpařivšího se kapalného vzduchu. Pro měření, která byla prováděna v časovém rozmezí 5 hodin, činilo množství tepla, vniklého do nádoby 1, za 1 hod. $Q = 9,63\text{ kcal}$.

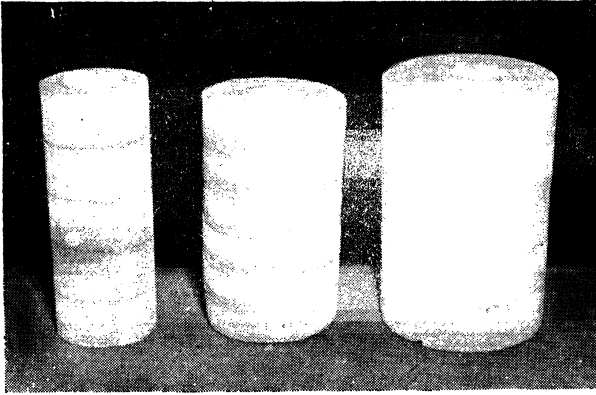
Průchod tepla stěnami válcové nádoby 1 je možno určit z výrazu:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (15)$$

kde

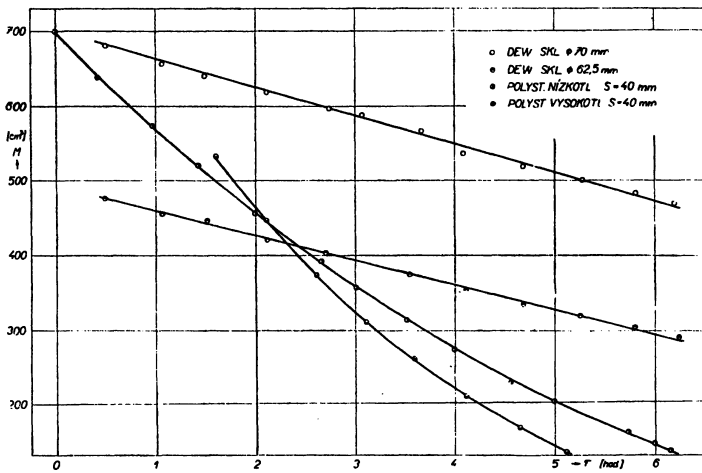
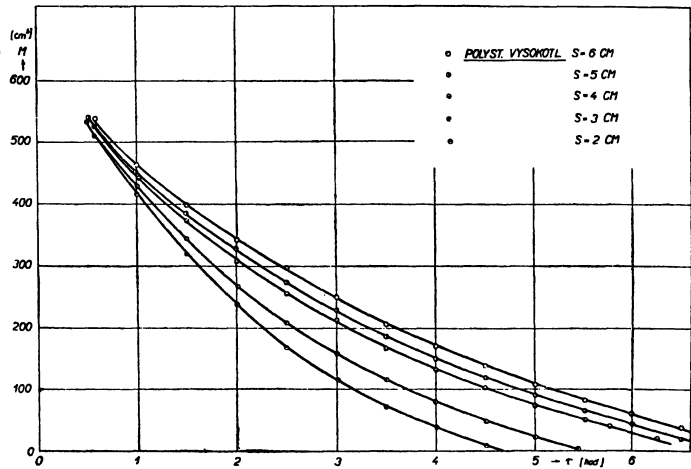
$$Q_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} \cdot \pi \cdot h(t_1 - t_2) \quad (16)$$

značí množství tepla, proniklého válcovou částí nádoby za 1 hod a



Obr. 7. Nádoby pro kapalný vzduch z vysokotlakého polystyrenu $s = 2,4,6$ cm.

Obr. 8. Závislost $M - \tau$ pro nádoby z vysokotlakého polystyrenu.



Obr. 9. Závislost $M - \tau$ pro skleněné Dewarovy nádoby a pro nádoby z nízkotlakého a vysokotlakého polystyrenu

$$Q_2 = \frac{\pi \cdot (d_1 + s)^2}{4} \cdot \frac{\lambda}{s} \cdot (t_1' - t_2') \quad (17)$$

představuje množství tepla, proniklého dnem nádoby 1 za tutéž dobu.

Po vyčíslení rovnic (16) a (17) poskytuje rovnice (15) při výše uvedené hodnotě Q hodnotu pro λ a sice $\lambda = 0,0208 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$, což je v dobré shodě s výsledkem výpočtu, výše uvedeným.

Při výrobě nádob z vysokotlakého pěněného polystyrenu výše uvedené výroby bylo nutno vzhledem k technologii výroby tohoto materiálu vycházeti z desek, o rozměrech $50 \times 50 \times 5 \text{ cm}$, z nichž po příslušném opracování byly slepováním jedenotlivých mezi-válců vytvářeny nádoby o stejném vnitřním průměru a různé tloušťce stěny s , viz obr. 7 a obr. 2 (levá část).

Největší potíží se jevila volba správného lepidla, které by umožňovalo dokonalé spojení styčných ploch, aniž by se vzniklým prstencem lepidla vytvářel tzv. tepelný most, který by značně snižoval izolační schopnost stěny nádoby. Byla vyzkoušena celá řada lepidel (BF 2, BF 4, organických lepidel aj.) a jako nejméně výhodnější se ukázala kombinace bukové drti s pryskyřicí a tužidlem. Při provádění zkoušek byla měřena závislost množství odpařeného kapalného vzduchu na tloušťce stěny s a době τ . Výsledky těchto měření jsou graficky vyneseny na obr. 8. Pro srovnání jsou na obr. č. 9 vyneseny tyto závislosti pro nádobu z nízkotlakého pěněného polystyrenu ($s = 40 \text{ mm}$), z vysokotlakého pěněného polystyrenu (slepovaného výše již zmíněným lepidlem) o tloušťce stěny $s = 40 \text{ mm}$, pro skleněnou Dewarovu láhev o vnitřním průměru $d_1 = 70,0 \text{ mm}$ ($V = 770 \text{ cm}^3$) a pro skleněnou Dewarovu láhev o vnitřním průměru $d_1 = 62,5 \text{ mm}$ ($V = 523 \text{ cm}^3$). Z grafu je patrné, že nejméně množství odpařeného kapalného vzduchu za dobu 5 hodin vykázala skleněná Dewarova láhev o vnitřním průměru $62,5 \text{ mm}$. U skleněné Dew. láhve s vnitřním průměrem 70 mm jsou ztráty na množství kapalného vzduchu o málo větších (pravděpodobně způsobeno horším vakuem v mezistěně). Poté následuje nádoba z nízkotlakého polystyrenu a největší ztráty chladu vykázala nádoba z pěněného polystyrenu vysokotlakého.

Tyto horší tepelné izolační vlastnosti nádob z pěněného polystyrenu proti nádobám skleněným jsou však na druhé straně vyváženy výhodami bezpečnosti pracovníků při práci s nimi, daleko menší možností rozbítí ať už při přemísťování nebo používání při vlastních pokusech i možnostmi jejich rychlého zhotovení v žádané velikosti a potřebném tvaru. Výše uvedené výsledky měření izolačních schopností pěněného polystyrenu při teplotách kapalného vzduchu tedy ukazují, že tohoto materiálu lze s výhodou použít v běžné laboratorní práci při nízkých teplotách, a že vzhledem k malému koeficientu tepelné vodivosti je tento materiál velmi dobrou tepelnou izolací i průmyslových zařízení, pracujících při nízkých teplotách.

Literatura

- [1] W. H. Mc. Adams, *Heat Transmission*, New York, 1954.
- [2] M. A. Michejev, *Osnovy teploperedaci*, Moskva-Leningrad, 1956.