

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Libor Pátý

Kryogenní vývěvy, kondenzace a vázání plynu při hlubokých teplotách

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 12 (1967), No. 3, 137--153

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139338>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1967

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>

KRYOGENNÍ VÝVĚVY, KONDENZACE A VÁZÁNÍ PLYNU PŘI
HLUBOKÝCH TEPLITÁCH

LIBOR PÁTÝ, Praha

Prof. Dr. VILÉMU KUNZLOVI k šedesátinám věnováno.

V práci je podán rozbor čerpacího efektu kryogenních vývěv. Je odvozen vztah pro čerpací rychlost vývěvy a její závislost na tlaku a parametrech čerpaného plynu. Dále je vymezen obor použití kryogenních vývěv a podrobně je diskutován problém měření rovnovážného tlaku a tenze par při hlubokých teplotách. Popisují se procesy probíhající na kondenzační stěně při dopadu molekul čerpaného plynu, zejména se popisuje mechanismus tvorby kondenzátu a vliv jeho struktury na čerpací efekt. Kromě toho se práce zabývá kondenzačním koeficientem, jeho teplotní závislostí a kryotrapping efektem. Stručně je popsán princip kryogenních vývěv se sorbentem a v závěru jsou uvedeny konstrukční zásady kryogenních vývěv a jejich hlavní typy.

ÚVOD

Studium vlastností pevných látek, zejména jejich povrchu, materiálová technologie a zvláště pak nákladný výzkum vysokých vrstev atmosféry a meziplanetárního prostoru si kladou stále větší nároky na metody získávání nízkých tlaků. Požadavky na velké čerpací rychlosti, na co nejnižší mezní tlak a současně i požadavek vyloučení některých složek zbytkových plynů (např. uhlovodíků) se stále stupňují a ztěžují jim mohou vyhovět dosavadní metody a vývěvy, byť stále zdokonalované. Hledají se metody nové, které by umožnily konstrukci účinnějších vývěv. K nim patří kryogenní metody získávání nízkých tlaků.

Myšlenka získávat nízké tlaky kondenzací zbytkových plynů ve vakuovém systému je velmi stará (DEWAR [1]) a již dlouho se využívá, avšak jen omezeně — ve vymrazovačkách ke kondenzaci rtuťových par a při sorpci aktivním uhlím. Širší využití kondenzace a sorpce zbytkových plynů při hlubokých teplotách je závislé na technice přípravy chladiv, kapalných plynů, jež se teprve v posledních letech rozvinula tak, že jsou k dispozici chladiva v potřebném množství a o přijatelné ceně. Tak byl v roce 1957 prvně získán REDHEADEM [2] tlak 10^{-14} mm Hg v systému nejprve vyčerpaném

difúzní vývěvu a potom ochlazeném kapalným héliem. LAZAROVEM a spol. [3] byla konstruována první kryogenní vývěva chlazená kapalným vodíkem a kryogenních vývěv bylo použito k čerpání velkých komor, např. zkušebních aerodynamických tunelů (BAILEY, CHUAN [4]). Od té doby byla vypracována celá řada kryogenních vývěv, které užívají různých chladiv; využívají jak kondenzace na prostém povrchu, tak persorpce aktivním uhlím nebo molekulárními sítě. Byla věnována pozornost objasnění povrchových procesů probíhajících při hlubokých teplotách a objeven byl proces vázání nekondenzujících složek zbytkových plynů rostoucí vrstvou pevného kondenzátu – kryotrapping efekt.

V dalším se budeme zabývat principem kryogenní metody získávání nízkých tlaků, problematikou měření rovnovážného tlaku a tenze par při hlubokých teplotách, procesy probíhajícími na povrchu kondenzační stěny a jejich charakteristikami, kryotrapping efektem, užitím sorbentů v kryogenních vývěvách a některými konstrukcemi kryogenních vývěv.

KRYOGENNÍ METODA ZÍSKÁVÁNÍ NÍZKÝCH TLAKŮ

Snižíme-li teplotu stěn vakuového systému na velmi nízkou hodnotu, budou molekuly na ni dopadající na ní adsorbovat s dobou pobytu odpovídající adsorpčnímu teplu a teplotě stěny (viz např. [5]). Při dosti nízké teplotě stěny se vytvoří adsorbovaná vrstva tak silná, že dojde ke změně uspořádání adsorbovaných molekul v uspořádání značně těsnější a vznikne tak vrstva kondenzátu. Další dopadající molekuly ulpívají na povrchu kondenzátu, tj. kondenzují. Předpokládáme-li, že každá molekula dopadající na chlazenou (tzv. kondenzační) stěnu na ní kondenzuje, vyjadřuje počet molekul n dopadajících na jednotku plochy stěny za sekundu úbytek počtu molekul z objemu systému za jednotku času

$$(1a) \quad n = \frac{1}{4} v v_a = - \frac{dN}{dt} = -V \frac{dv}{dt},$$

kde v je objemová koncentrace molekul, $v_a = \sqrt{(8kT/\pi m)}$ je střední aritmetická rychlost molekul, N je počet molekul v objemu systému, V je jeho objem, T je teplota a m je hmota molekuly. Pro pokles objemové koncentrace tedy platí

$$(1b) \quad - \frac{dv}{dt} = \frac{1}{V} \frac{1}{4} v_a v = \frac{s_m}{V} v,$$

poněvadž $v_a/4 = s_m$ (s_m je maximální specifická čerpací rychlost, tj. rychlost příslušná jednotce povrchu chlazené stěny [6]). Kondenzované molekuly se však s povrchu uvolňují – vypařují. Počet vypařených molekul z jednotky povrchu kondenzační stěny za sekundu n' určuje hodnotu rovnovážné koncentrace molekul v_r plynu při teplotě kondenzační stěny a tím tenzi par; v_r je vlastně zpětným proudem molekul

charakteristickým pro vývěvu. Platí

$$(2) \quad n' = \frac{1}{4} v_r v_a .$$

Vezmeme-li v úvahu tento počet molekul vracejících se z jednotkové plochy kondenzační stěny za sekundu do objemu, bude pokles koncentrace $-dv/dt$ vyjadřovat vztah

$$(1c) \quad -\frac{dv}{dt} = \frac{1}{V} \frac{1}{4} v_a (v - v_r) = \frac{s_m}{V} (v - v_r)$$

a pokles tlaku p (užitím vztahu $p = \nu kT$)

$$(1d) \quad -\frac{dp}{dt} = \frac{s_m}{V} (p - p_r) ,$$

kde p_r je tlak nasycených par kondenzátu plynu při teplotě kondenzační stěny. Poslední vztah lze psát užitím definice proudu plynu $q = p(dV/dt)$ jako

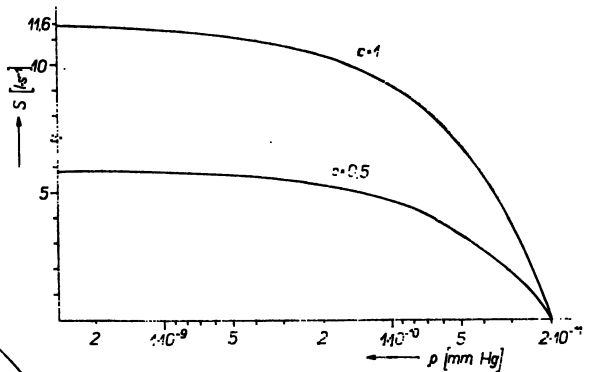
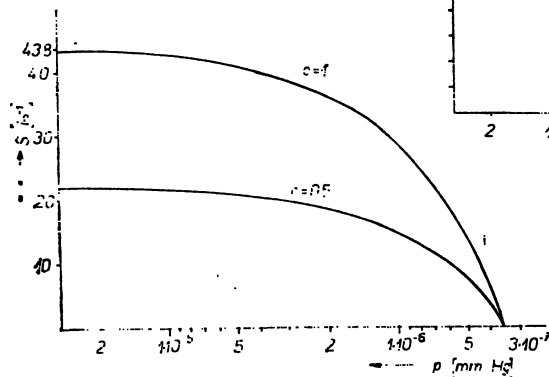
$$(3a) \quad q = s_m(p - p_r) ,$$

kde q je proud plynu odpovídající úbytku tlaku v systému. Pro čerpací rychlost s , do níž je zahrnut zpětný proud vypařovaných molekul, platí

$$(3b) \quad s = s_m \left(1 - \frac{p_r}{p} \right) .$$

Obr. 1a. Závislost čerpací rychlosti →
kryogenní vývěvy na tlaku.

Čerpaný plyn dusík, teplota kondenzační stěny 20,4°K
křivka 1 ... $C = 1$,
křivka 2 ... $C = 0,5$.



← Obr. 1b. Závislost čerpací rychlosti
kryogenní vývěvy na tlaku.

Čerpaný plyn vodík, teplota kondenzační stěny 4,2°K.
křivka 1 ... $C = 1$,
křivka 2 ... $C = 0,5$.

Tlak p v systému klesne až na hodnotu $p = p_r$, kdy efektivní čerpací rychlost klesne na nulu. Ze vztahu vyplývá, že čerpací rychlost závisí na tlaku a na druhu čerpaného plynu, a to na hodnotě s_m , jež je úměrná $\sqrt{(T/m)}$, na tenzi par p_r a jí též na teplotě. Pokud je tlak v systému značně větší než tenze par kondenzátu, příslušející teplotě jeho povrchu T_k , je čerpací rychlost rovna maximální čerpací rychlosti (obr. 1a, b). Hodnoty maximální specifické čerpací rychlosti pro různé plyny uvádí tabulka 1.

Tabulka I

Maximální čerpací rychlost pro různé plyny. Zastoupení plynů v suchém vzduchu a hodnoty tenze par při bodu varu kapalného dusíku, vodíku a hélia. Body varu a tání

Plyn	s_m l sec ⁻¹ cm ⁻²	$p_{\text{parc}}/p_{\text{atm}}$ %	p_{parc} mm Hg	p_r při 77°K mm Hg	p_r při 20,4°K mm Hg	p_r při 4,2°K mm Hg	T_v °K	T_t °K
He	30,5	0,0005	$3,8 \cdot 10^{-3}$	∞	∞	760	4,2	—
H ₂	44	0,01	$7,6 \cdot 10^{-2}$	∞	760	$3,5 \cdot 10^{-7}$	20,4	14,2
Ne	13,9	0,0018	$1,3 \cdot 10^{-2}$	∞	45	10^{-17}	27,3	24,2
N ₂	11,62	78,1	593,5	760	$2 \cdot 10^{-11}$	\emptyset	77,4	63,2
CO	11,62	0	0	500	$4 \cdot 10^{-13}$	\emptyset	81,2	66,2
Ar	9,9	0,933	7,1	230	$5 \cdot 10^{-13}$	\emptyset	87,2	83,9
O ₂	11,0	20,93	159	180	$1 \cdot 10^{-13}$	\emptyset	80,2	54,2
Kr	6,8	0,0001	$7,6 \cdot 10^{-4}$	2	10^{-17}	\emptyset	120,2	116,2
Xe	5,4	0,000009	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$	\emptyset	\emptyset	164,2	161,4
CO ₂	9,4	0,03	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-8}$	\emptyset	\emptyset	—	195,2
H ₂ O	14,6	0	0	\emptyset	\emptyset	\emptyset	373,2	273,2

Poznámka: Symbol ∞ značí hodnoty značně větší než 760 mm Hg, symbol \emptyset značí hodnoty velmi malé, současnými měřicími metodami neměřitelné.

Závislost čerpací rychlosti na teplotě je na obr. 2; křivky příslušejí čerpání dusíku, parametrem je tlak v systému.

Dosud užívaný předpoklad, že každá molekula dopadající na stěnu na ní kondenzuje, je však splněn jen za zvláštních podmínek. Obvykle jen část C molekul z celkového počtu dopadajících molekul kondenzuje a ostatní molekuly se od povrchu kondenzátu pružně odrážejí. Veličina C , definovaná jako

$$(4) \quad C = \frac{n_{\text{kond}}}{n},$$

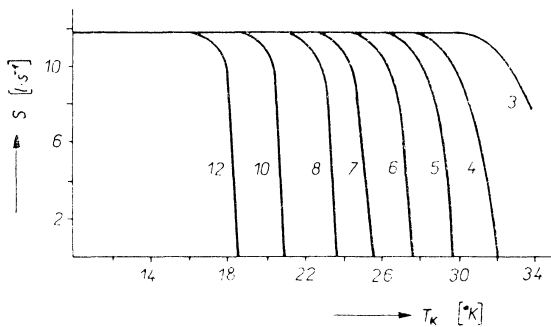
se nazývá kondenzační koeficient. Veličina n_{kond} je počet molekul kondenzujících na jednotkové ploše stěny za sekundu. Rovnici (1a) je nutno doplnit vztahem (4).

Tím i výsledné vztahy (1d) a (3b) obsahují kondenzační koeficient:

$$(1e) \quad -\frac{dp}{dt} = C \frac{s_m}{V} (p - p_r)$$

$$(3c) \quad s = C s_m \left(1 - \frac{p_r}{p}\right).$$

Kondenzační koeficient závisí na druhu kondenzujícího plynu, jeho teplotě a teplotě kondenzační stěny. Jeho hodnota je nejvýše rovna jedné a o teplotní závislosti v oboru hlubokých teplot je poměrně málo údajů. Zejména je málo známa jeho střední hodnota pro různé směsi plynů, jež má velký význam právě při použití kryogenních vývěv k čerpání zbytkových plynů.



Obr. 2. Závislost čerpací rychlosti kryogenní vývěvy na teplotě při stálém tlaku. Čerpaný plyn dusík. Čísla u jednotlivých křivek jsou záporným exponentem čísla 10 mm Hg. Křivky jsou vypočteny ze vztahu (3b).

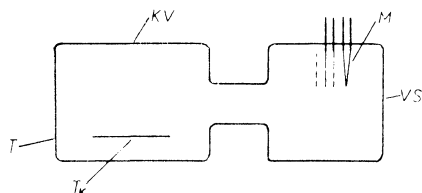
Mezní tlak vývěvy je dán tenzí par čerpaného plynu při teplotě kondenzační stěny. Chladiva, která připadají v úvahu k použití, jsou kapalný vodík a hélium. Jejich body varu jsou při atmosférickém tlaku 20,4°K a 4,2°K. Užití nižší teploty než 4,2°K je příliš nákladné, i když technicky možné (např. snižováním tlaku nad hladinou hélia (LAZAREV, ŠVEC [7]), než aby přicházelo v přítomné době v úvahu. Mezní tlak závisí při těchto dvou pevných teplotách velmi značně na druhu čerpaného plynu. Jak je patrné z tabulky 1., je mezní tlak vývěvy pro dusík při chlazení kapalným vodíkem $2 \cdot 10^{-11}$ mm Hg, což je hodnota, s kterou se lze ve velké většině případů spokojit. Podstatně vyšší mezní tlak má vývěva při čerpání vzduchu, a to proto, že vzduch obsahuje složky, které mají i při hlubokých teplotách velkou tenzi par. Čerpá-li kryogenní vývěva chlazená kapalným vodíkem uzavřený systém počínaje atmosférickým tlakem, je mezní tlak jen $9,3 \cdot 10^{-2}$ mm Hg, což je součet tenzí par neónu, vodíku a hélia. U vývěvy chlazené kapalným héliem je za stejných podmínek mezní tlak $3,8 \cdot 10^{-3}$ mm Hg. Pro některé účely (u nichž se pouze požaduje nízká hodnota součtu parciálních tlaků aktivních složek) má kryogenní vývěva za těchto okolností již postačující vlastnosti, její obecnější použití však nepřichází v úvahu.

Z tohoto zjištění vyplývá závěr, že je nutno čerpaný systém před uvedením kryogenní vývěvy v činnost vyčerpat pomocnou vývěvou založenou na jiném principu nebo systém naplnit snadno kondenzujícím čistým plynem (dusíkem). Tak lze snížit parciální tlak těžko kondenzovatelných plynů a i mezní tlak o 6 až 9 řádů.

Závěrem je nutno poznamenat, že ve vývěvě během její činnosti narůstá na kondenzační stěně vrstva kondenzátu a tím v důsledku jeho tepelné vodivosti i teplota jeho povrchu. Proto klesá čerpací rychlost vývěvy a vzrůstá její mezní tlak. Dále je nutno poznamenat, že užitý předpoklad, že celý povrch čerpaného systému vytváří kondenzační stěnu, je jen zřídka splněn. Pouze tehdy, když je celá komora vakuového systému chlazena, jak je tomu u tzv. simulátorů kosmického prostoru, je tento předpoklad splněn. U vlastních kryogenních vývěv je kondenzační stěna jen velmi malou částí celkového povrchu vnitřních stěn vývěvy a čerpaného systému. V těchto případech je rovnovážný tlak v systému větší než je tenze par a i čerpací rychlost je nižší. Tyto vlivy jsou v dalším blíže diskutovány,

MĚŘENÍ ROVNOVÁŽNÉHO TLAKU A TENZE PŘI HLUBOKÝCH TEPLOTÁCH

V kryogenní vývěvě (obr. 3), skládající se z komory vývěvy o teplotě T (obvykle je T teplota laboratoře) a z kondenzační stěny o teplotě T_k , je v ustáleném stavu za podmínky $\lambda \gg d$ (λ je střední volná dráha molekul, d je největší lineární rozměr



Obr. 3. Schematické znázornění kryogenní vývěvy. KV -- kryogenní vývěva, M -- vnořený manometr, T -- teplota stěn vývěvy, T_k -- teplota kondenzační stěny, VS -- vakuový systém čerpaný vývěvou.

vývěvy) plyn v tepelně nerovnovážném stavu. V každém okamžiku existuje ve vývěvě soubor molekul o střední rychlosti odpovídající teplotě T (pokud je koeficient akomodace roven jedné), tj. molekuly, které absolvovaly poslední srážku se stěnou komory a druhý soubor molekul o střední rychlosti odpovídající teplotě T_k , tj. molekuly, které absolvovaly poslední srážku s kondenzační stěnou. Dále bývají ve vývěvách plochy stínící kondenzační stěnu před dopadem záření, které jsou na teplotě ležící mezi teplotou T a T_k . V takovémto systému není teplota plynu a tím ani tlak definován. Problém lze řešit jen tehdy, je-li plocha kondenzační stěny značně menší než celková plocha ostatních povrchů, tj. tehdy, zanedbáme-li vliv druhého souboru molekul na teplotu a tlak. Tento předpoklad je dobře splněn tehdy, měříme-li tlak

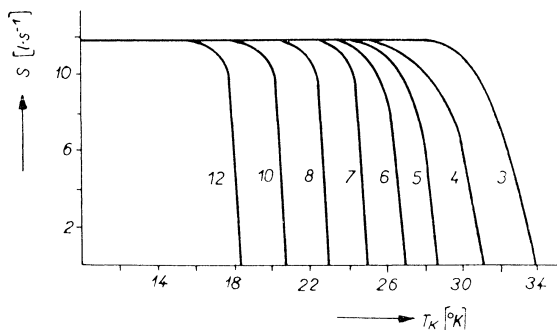
v čerpaném systému vnořeným manometrem (ionizačním). V tomto případě určují koncentraci molekul v ionizačním prostoru manometru molekuly, které do něho dopadají ze všech směrů. Prostorový úhel, v němž dopadají molekuly do tohoto prostoru z kondenzační stěny, je zpravidla zanedbatelný, neboť je jen malou částí prostorového úhlu příslušného směrům, z nichž přicházejí všechny ostatní molekuly. Rovnovážný tlak p_0 v čerpaném systému je dán zákony tepelné transpirace, tj.

$$(5) \quad \frac{p_0}{\sqrt{T}} = \kappa \frac{p_r}{\sqrt{T_k}},$$

kde p_r je tenze par čerpaného plynu při teplotě T_k , κ je faktor zahrnující geometrické uspořádání systému, který lze stanovit pouze experimentálně (8), (9). Přitom je samozřejmou podmínka, že byl manometr kalibrován při teplotě T . Rovnice (3c) má v tomto případě tvar

$$(3d) \quad s = C s_m \left[1 - \kappa \sqrt{\left(\frac{T}{T_k}\right) \frac{p_r}{p}} \right].$$

Obrázky 4a, b uvádějí závislost čerpací rychlosti na teplotě; rychlost se vypočte podle této rovnice. Z rovnice i z křivek jsou patrné menší hodnoty čerpací rychlosti ve srovnání s (3c) a obr. 2.



Obr. 4. Závislost čerpací rychlosti kryogenní vývěvy na teplotě při stálém tlaku.

Čerpaný plyn dusík o teplotě $T = 300^\circ\text{K}$, $\kappa = 1$. Čísla u jednotlivých křivek jsou záporným exponentem čísla 10 mm Hg. Křivky jsou vypočteny ze vztahu (3c).

Při měření tlaku uvnitř vývěvy vnořeným manometrem, který byl kalibrován při jiné teplotě, zpravidla vyšší, než je teplota stěn vývěvy T , se korekce tlaku provádí opět za předpokladu, že plocha kondenzační stěny je značně menší než plocha ostatních stěn na základě stavové rovnice

$$(6) \quad p = p' \frac{T}{T'},$$

kde p je skutečný tlak ve vývěvě, p' je údaj manometru a T' je teplota, pro niž byl manometr kalibrován.

Při měření tlaku nasycených par kondenzátu je nutno vzít v úvahu existenci dvou souborů molekul v systému. Rovnovážný tlak měřený manometrem není roven tlaku nasycených par. V rovnováze je počet molekul kondenzujících za jednotku času roven počtu molekul vypařujících se. Tenzi par odpovídající teplotě T_k je možno vypočíst z hodnoty rovnovážného tlaku odpovídajícího teplotě T , jestliže stanovíme požadavek, aby zůstal nezměněn počet kondenzujících molekul při teplotě T ($n_{\text{kond } T}$) a při teplotě T_k ($n_{\text{kond } T_k}$):

$$(7a) \quad n_{\text{kond } T} = n_{\text{kond } T_k} \cdot$$

Dosazením za tlak do této rovnice s přihlédnutím k definici kondenzačního koeficientu (4) obdržíme

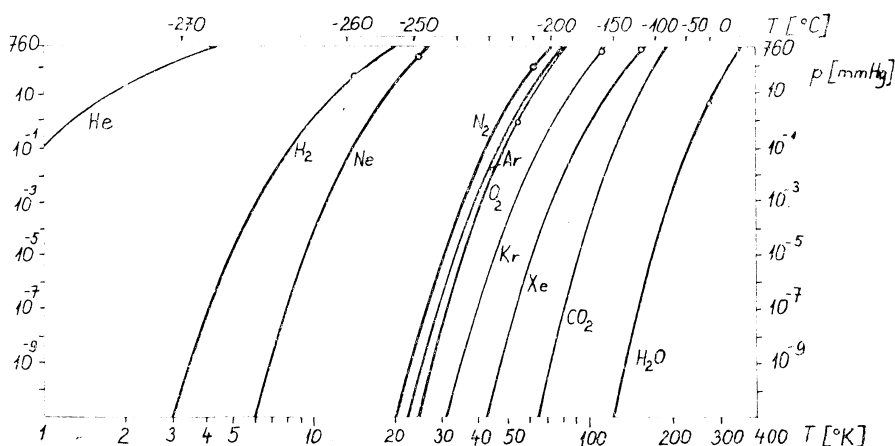
$$(7b) \quad \frac{C_T p_T}{\sqrt{(2\pi m k T)}} = \frac{C_{T_k} p_r}{\sqrt{(2\pi m k T_k)}}$$

a z ní pro hodnotu tenze par p_r příslušnou teplotě T_k :

$$(8) \quad p_r = p_T \frac{C_T}{C_{T_k}} \sqrt{\frac{T_k}{T}}$$

Kondenzační koeficienty C_T a C_{T_k} přísluší teplotě plynu a teplotě kondenzační stěny. K přesnému stanovení tenze par při hlubokých teplotách je proto nutno brát v úvahu teplotní závislost kondenzačního koeficientu. Pokud tato závislost není známa, je nutno vypustit korekční člen obsahující kondenzační koeficienty a spokojit se s určitou chybou při stanovení hodnoty tenze.

Znalost teplotní závislosti tenze par v oboru nízkých tlaků je velmi důležitá pro studium procesů v kryogenních vývěvách. Pokud se užívá k výpočtu tenze extra-



Obr. 5. Tenze par některých plynů podle práce (10); body tání označeny o.

polačního způsobu, je nutno velmi přesně znát analytickou formuli pro teplotní závislost tenze, např. jak uvádějí HONIG a HOOK [10], jinak je získaná hodnota jen přibližná. Obr. 5 uvádí takto vypočtené hodnoty. Z obr. je zřejmé, že tenze par hélia má při určité teplotě největší hodnoty. Ostatní plyny mají tenze par v pořadí uvedeném v tabulce 1. Experimentální hodnoty tenze par v oboru nízkých teplot, které uvádějí různí autoři [11], [12] a [13], jsou v poměrně dobrém souhlasu s uvedenými křivkami. Pokud se vzájemně údaje těchto autorů liší, je to tím, že při nich byla teplota měřicího systému T různá a při výpočtu hodnoty tenze nebyla uvažována teplotní závislost koeficientu kondenzace.

PROCESY PROBÍHAJÍCÍ NA KONDENZAČNÍ STĚŇE

Molekuly plynu dopadající na kondenzační stěnu na ní adsorbují s dobou pobytu

$$(9) \quad \tau = \tau_p \exp(Q/RT_k),$$

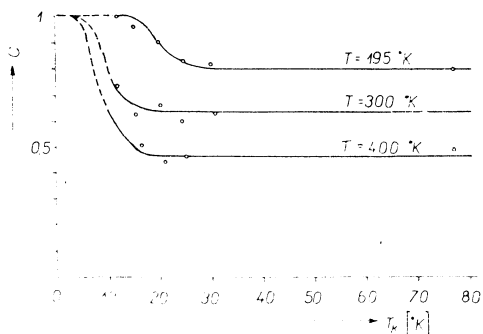
kde τ_p je perioda kmitů krystalické mříže kondenzační stěny, Q je adsorpční teplo a R je plynová konstanta. Na kondenzační stěně je při hluboké teplotě doba pobytu i u velmi slabě adsorbovatelných plynů poměrně dlouhá (doba pobytu vodíku je při teplotě 20,4°K řádově 10^3 sec a doba pobytu hélia je při teplotě 4,23°K řádově 10^{-6} sec, jak ukázali STOUT a GIAQUE [14], a proto se od okamžiku ochlazení kondenzační stěny při dosti velké objemové koncentraci rychle zvětšuje množství adsorbovaných molekul a na povrchu vzniká kondenzát zpravidla pevného skupenství, poněvadž body tání všech plynů leží na křivkách teplotní závislosti tenze par nad hodnotou tlaku 10^{-3} mm Hg. Další molekuly dopadající na kondenzát na něm kondenzují, poněvadž jsou vázány kondenzátem a nikoliv kondenzační stěnou. Doba pobytu kondenzovaných molekul je dána výrazem (9), v němž Q je vypařovací teplo. Tato doba pobytu příslušející teplotě povrchu kondenzátu určuje počet vypařovaných molekul z jednotky povrchu za sekundu a tím i zpětný proud plynu a v rovnovážním stavu ($n_{\text{kond}} = n_{\text{vypař}}$) tenzi par.

Kondenzované molekuly mohou při povrchu kondenzátu migrovat, pokud není teplota povrchu příliš nízká. Molekuly, které mohou migrovat, přecházejí na místa s vyšší vazební energií. Tak se vytváří krystalická struktura kondenzátu. Při dosti nízkých teplotách povrchu kondenzátu nedochází k migraci a kondenzát je amorfní. I při velmi nízkých teplotách kondenzační stěny T_k však může docházet k vzniku krystalického kondenzátu, a to při velkém počtu dopadů molekul na povrch. Přitom se totiž poměrně brzy vytvoří tak tlustá vrstva kondenzátu, že kondenzující molekuly předávají povrchu energii, která se nestačí odvést vrstvou. Těto energie využívají molekuly k migraci.

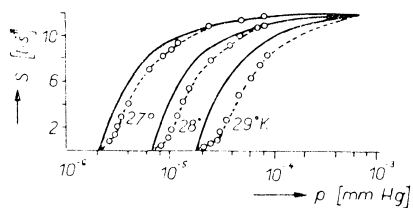
Struktura kondenzátu je velmi důležitá pro čerpací efekt vývěvy. Údaje o teplotním oboru existence amorfní modifikace a krystalické struktury jsou k dispozici jen u vody

[15]. Pevný kondenzát vody – led – má při teplotách kondenzačního povrchu nad 193°K hexagonální strukturu, v intervalu 123 až 193°K kubickou a pod hodnotou 123°K je led amorfni. O struktuře ostatních kondenzátů při hlubokých teplotách je jen málo informací. Struktura kondenzátu má vliv na hodnotu tenze par; se zvětšujícím se uspořádáním kondenzátu vzrůstá vazební energie a tím [5] se zmenšuje tenze par. Dále struktura kondenzátu značně ovlivňuje adsorpci a persorpci při teplotě povrchu kondenzátu nekondenzovatelných plynů. Amorfni kondenzáty jsou porézní, mají větší povrch a tím i větší sorpční kapacitu.

Thoušťka vrstvy kondenzátu na kondenzační stěně ovlivňuje mezní tlak a čerpací rychlost vývěvy tím, že s jejím růstem roste teplota jejího povrchu. Při stálém pracovním tlaku dusíku 10^{-6} mm Hg ve vývěvě trvá při kondenzačním koeficientu rovném jedné přibližně 10^4 hodin, než se na povrchu vytvoří vrstva 1 mm tlustá. S pracovním tlakem lineárně vzrůstá rychlost tvorby kondenzátu. I když vezmeme v úvahu nepříznivou hodnotu tepelné vodivosti kondenzátu zbytkových plynů (je asi desetkrát menší než vodního ledu), je v oboru tlaku nižších než 10^{-6} mm Hg vzrůst teploty s pracovní dobou vývěvy zanedbatelný. Při vyšších pracovních tlacích (10^{-3} mm Hg a vyšších) má růst thoušťky kondenzátu na čerpací efekt vývěvy podstatný vliv. Lze tomu čelit jednak tím, že se omezuje přenos tepla na kondenzační povrch zářením a kondenzujícími molekulami pomocí chlazených stínících ploch, jednak dvojčinným uspořádáním kryogenní vývěvy, kdy jedna její část čerpá systém, druhá pak je od systému oddělena a kondenzát se za zvýšené teploty kondenzační stěny vypařuje a připravuje se tak k dalšímu čerpání. Přímou měřit teplotu kondenzačního povrchu je prakticky nemožné, nepřímou ji lze stanovit z tenze par.



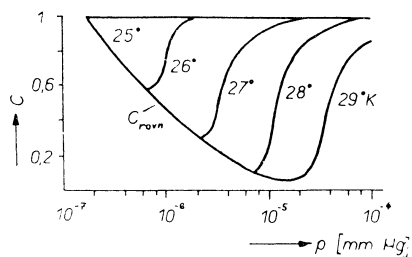
Obr. 6. Teplotní závislost kondenzačního koeficientu pro různé teploty plynu. plyn: CO_2 . Podle práce (16).



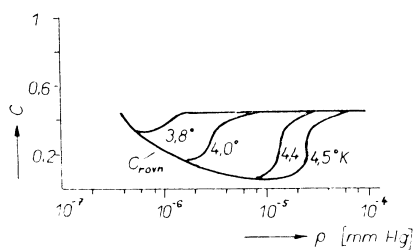
Obr. 7. Srovnání závislosti čerpací rychlosti na tlaku teoretické (plně křivky) a experimentální (čárkované křivky). Podle práce (17).

Podstatnou okolností pro čerpací rychlost kryogenní vývěvy je počet molekul, které z celkového počtu dopadajících molekul kondenzují (viz křivky 1 a 2 v obr. 1a), tj. počet charakterizovaný kondenzačním koeficientem C (4). Proces kondenzace je možno popsat tzv. modelem kritické rychlosti, který záleží v předpokladu existence kritické hodnoty k povrchu kolmé složky rychlosti dopadající molekuly v_{krit} , pro

niž platí, že všechny molekuly, které dopadají s rychlostí o kolmé složce menší než kritická, kondenzují na povrchu. Všechny ostatní molekuly se pružně odrážejí. Vezmeme-li v úvahu Boltzmannovo rozdělení rychlosti dopadajících molekul, je při dané teplotě plynu T relativní počet molekul, které mají rychlost větší než kritickou, úměrný výrazu $\exp(-\text{konst}/T)$ a tento charakter má mít i teplotní závislost kondenzačního koeficientu. Na obr. 6 jsou uvedeny experimentální výsledky [16] pro kysličník uhličitý, které jsou v dobrém souhlasu s tímto modelem. Experimentálně je možno kondenzační koeficient stanovit tak, že se měří čerpací rychlost vývěvy a po dosažení za maximální čerpací rychlost do vztahu (3c) se koeficient vypočte. Tak měřili kondenzační koeficient KLIPPING a MASCHER [17] a při normální teplotě plynu



Obr. 8a. Závislost kondenzačního koeficientu pro dusík na tlaku pro různé hodnoty teploty kondenzační stěny. Podle práce (17).



Obr. 8b. Závislost kondenzačního koeficientu pro vodík na tlaku pro různé hodnoty teploty kondenzační stěny. Podle práce (17).

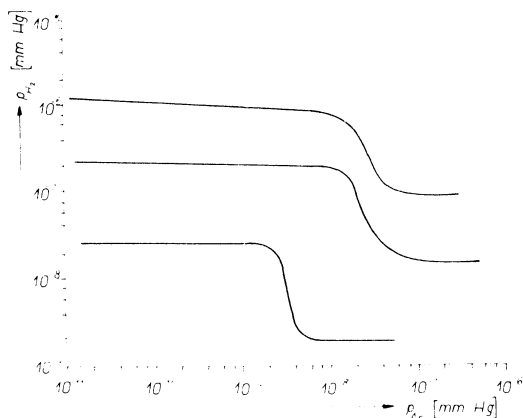
zjistili vedle teplotní závislosti koeficientu též závislost na tlaku (obr. 7). Na obr. 8a a b jsou uvedeny hodnoty vypočtené z měření uvedených v obr. 7 pro dusík a vodík. Z obrázků je zřejmá i závislost koeficientu na teplotě v rovnovážném stavu. Z křivek je patrné, že zatímco kondenzační koeficient dusíku nabývá při tlacích $p \gg p_c$ hodnoty $C = 1$, kondenzační koeficient vodíku dosahuje i při hlubokých teplotách T_k hodnoty maximálně 0,5. Autoři nijak nevykládají závislost kondenzačního koeficientu na tlaku, konstatují jen, že tato závislost je u vodíku mnohem méně výrazná [18]. Na základě průběhu křivek v části $A - B$ v obr. 7 a 8 lze vyjádřit domněnku, že vedle počtu vypařovaných molekul daného tenzí par při teplotě kondenzační stěny, který je příčinou, že křivka s_m konverguje k nule, existuje určitý počet molekul, i když relativně malý, které jsou při dopadu na kondenzační stěnu pružně odráženy. Vliv počtu n těchto odražených molekul na hodnotu kondenzačního koeficientu je tím větší, čím menší je celkový počet dopadajících molekul, tj. i tlak. Pružný odraz n molekul může být způsoben dopadem molekul na molekulu, která se z povrchu právě uvolňuje. Tomuto výkladu stojí v cestě průběh experimentálních křivek v části $B - C$; je však otázka, do jaké míry jsou experimentální hodnoty příslušné těmto částem křivek spolehlivé. Měření malých hodnot čerpací rychlosti, jak známo, je obvykle zatíženo značnou chybou. V užitém měřicím systému [17] nebyla přísně splněna podmínka zanedbatelnosti velikosti plochy kondenzační stěny vzhledem

k ploše ostatních stěn. Proto bylo měření tlaku i čerpací rychlosti zatíženo chybou, která se projevovala tím více, čím menší hodnoty byly měřeny. Pomocí modelu kritické rychlosti nelze závislost kondenzačního koeficientu na tlaku vyložit. Kondenzační koeficient měřili též HENGEVOSS a TRENDELENBURG [12] při teplotě plynu 83°K. Dospěli k výsledkům, které odpovídají výsledkům autorů [17] až na odchylky, které lze vysvětlit různými teplotami plynu.

Růst pevného kondenzátu na kondenzační stěně umožňuje sorpci při teplotě kondenzátu nekondenzovatelných plynů. Sorpce na neustále narůstajícím kondenzátu má za následek čerpací efekt nekondenzovatelných plynů a tím i zvýšený čerpací efekt vývěvy. Proces vázání molekul nekondenzovatelných plynů kondenzátem nese název „cryotrapping effect“. Prvně tento efekt pozorovali FITE a BRACKMANN [19]. Při experimentální práci s molekulárními svazky vodíku zjistili úbytek koncentrace odražených molekul vodíku od plochy, na niž kondenzovala vodní pára při teplotě 20°K. Tohoto efektu využili k návrhu získávání nízkých tlaků pomocí kondenzující vodní páry. Při chlazení kondenzační stěny na teplotu kapalného dusíku je touto metodou možno získat mezní tlak 10^{-5} mm Hg. HAYGOOD [20] studoval kryotrapping efekt dusíku na kondenzátu vodních par a navrhl popis efektu založený na Langmuirových představách o monomolekulární adsorpci. Předpokládal přitom, že molekula dusíku dopadající na povrch ledu je adsorbována; dopadá-li na obsazenou pozici, odráží se. Z těchto předpokladů plyne, že pro kryotrapping efekt je důležitý počet molekul vody, kterého je zapotřebí k překrytí jedné molekuly dusíku tak, aby vznikl povrch, na němž mohou adsorbovat další molekuly. Tento poměr n_{N_2}/n_{H_2O} klesá v oboru tlaků nižších než 10^{-3} mm Hg přibližně lineárně s tlakem vázaného plynu a je při parciálním tlaku dusíku 1 mm Hg roven $2 \cdot 10^{-2}$ a při tlaku 10^{-5} mm Hg $1,4 \cdot 10^{-5}$.

Popsaný efekt je velmi významný pro funkci kryogenních vývěv v oboru ultravysokého vakua. Při teplotách kondenzační stěny nižších než 20,4°K mají tenzi par vyšší než 10^{-10} mm Hg pouze hélium, vodík a neón. Neón přitom jako složka zbytkových plynů prakticky nepřichází v úvahu. Studium kryotrapping efektu kondenzátem dusíku při teplotě 20,4°K (HEMSTREET [21]) ukázalo, že hélium je překrýváno molekulami dusíku. Na počátku kondenzačního procesu se vytváří porézní kondenzát dusíku, jímž héliové atomy velmi snadno zpětně difundují. Teprve po vytvoření tlustší vrstvy, kdy díky vyšší teplotě povrchu kondenzátu a tím migraci molekul dusíku vzniká kompaktnější kondenzát, zmenšuje se zpětná difúze hélia a zvětšuje se kryotrapping efekt. Při čerpání vodíku bylo zjištěno, že efekt je velký, dokud je kondenzát porézní, kdežto při změně struktury kondenzátu v kompaktnější se efekt zmenšuje. To lze vyložit tím, že kryotrapping efekt vodíku je jiného charakteru než u hélia. U vodíku hraje roli především persorpce vodíku na porézním sorbentu, kdežto proces překrývání vodíku kondenzátem dusíku má jen nepatrný vliv na celkový čerpací efekt. Při teplotě 4,2°K lze využít k čerpání vodíku kondenzátu argonu. Hengevoss a Trendelenburg [12] studovali tento efekt dynamickou metodou. Do kryogenní vývěvy s kondenzační stěnou chlazenou kapalným héliem vpouštěli směs

vodíku s argonem o teplotě 83°K. Obr. 9 uvádí výsledky měření – závislost rovnovážného parciálního tlaku vodíku na parciálním tlaku argonu pro tři různá množství vypouštěného vodíku. Z křivek je zřejmé, že kryotrapping efekt nastává teprve počinaje určitou hodnotou koncentrace argonu. Maximální efekt nastává při poměru přibližně rovném jedné. Poněkud přesnějším způsobem stanovil poměr $n_{\text{H}_2}/n_{\text{Ar}}$ MASCHER; podle něho je roven při teplotě 4,8°K hodnotě 0,5. Na základě dosavadních experimentálních výsledků je těžko rozhodnout, zda je kryotrapping efekt v tomto případě způsoben adsorpcí na stále se obnovující vrstvičce kondenzátu, či dochází-li k vzniku chemické sloučeniny Ar-H, nebo zda je způsoben pouhým vznikem pevného roztoku vodíku v kondenzátu argonu, což je příčinou poklesu tenze par vodíku. Přesto, že fyzikální objasnění efektu dosud chybí a chybí i experimentální údaje o kryotrapping efektu při čerpání směsi plynů, což je velmi podstatná okolnost při praktickém využití tohoto efektu, lze říci, že má naději na praktické využití.



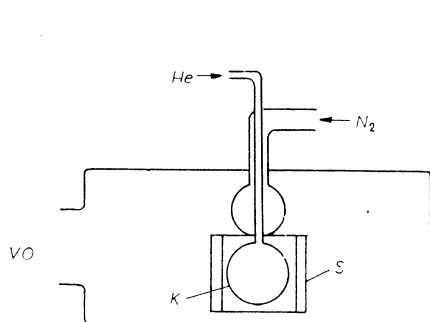
Obr. 9. Závislost rovnovážného parciálního tlaku vodíku v systému čerpaném difúzní vývěvou a obsahujícím kondenzační stěnu o teplotě 4,2°K na parciálním tlaku argonu. Podle práce (12). Tři křivky příslušejí třem různým hodnotám proudu vypouštěného vodíku.

Vázání nekondenzovatelných složek v kryogenních vývěvách lze kromě popsaného efektu dosáhnout užitím sorbentů, které jsou chlazeny na velmi nízkou teplotu. Jako sorbentů lze užít aktivního uhlí (LAZAREV a FEDOROVA [22] nebo molekulárních sít (NARCISI a spol [23]). Oba tyto druhy sorbentů jsou porézní látky; na povrchu pórů, jehož celková plocha je značně velká (celková plocha pórů 1 g sorbentu činí až několik m²), probíhá sorpce. Díky velkému sorbujícímu povrchu mají tyto sorbenty velkou sorpční kapacitu a vyznačují se dále poměrně velkou vazební energií. Při adsorpci molekuly v mikropórech na procesu vazby podílí se totiž větší počet částic povrchu než v případě adsorpcie molekul na rovinném povrchu (viz DE BOER [24]). Persorpce molekul aktivním uhlím a zvláště molekulárními sít, která mají podle svého druhu pevnou krystalickou strukturu (BARRER [25]), se vyznačuje značnou selektivitou. Čerpací rychlost kryogenních vývěv s adsorbenty (často jsou nazývány kryosorpčními vývěvami) je značně závislá na druhu čerpaného plynu. Protože u těchto vývěv je čerpací efekt způsoben nikoliv kondenzací, nýbrž persorpcí, je

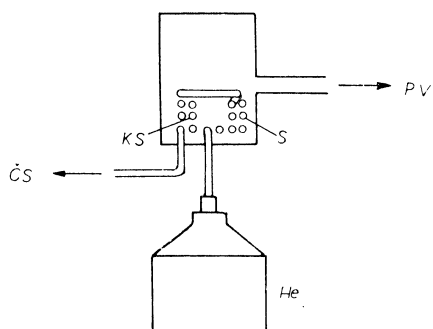
rovnovážný tlak pro určitý plyn vývěvy značně nižší než tenze par. To ovšem platí jen tehdy, není-li adsorbent nasycen. Velká výhoda kryogenních vývěv s adsorbentem záleží v tom, že čerpaný plyn je v dostatečné míře vázán již při teplotě rovné bodu varu tohoto plynu. Tak např. dusík je čerpán sorbentem chlazeným na teplotu 77°K, vodík sorbentem při teplotě 20,4°K. Nevýhodou vývěv je jejich omezená kapacita ve srovnání s kryogenními vývěvami bez sorbentu, jež vyžaduje po nasycení sorbentu odplynění za normální nebo zvýšené teploty. Kromě toho činí potíž i malá tepelná vodivost sorbentu. Je proto nutno užívat jen poměrně tenkých vrstev sorbentu a tím je opět omezeno množství užitého sorbentu a kapacita vývěvy. Vývěv tohoto druhu se s velkým úspěchem používá k předčerpávání systémů počínaje atmosférickým tlakem, u nichž je nutno vyloučit kontaminaci molekulami uhlovodíků.

NĚKTERÉ KONSTRUKCE KRYOGENNÍCH VÝVĚV

Největším problémem kryogenních vývěv je hospodárnost provozu, což směřuje k snaze omezit spotřebu chladiva na nejmenší míru. Proto se kryogenní vývěvy konstruuji tak, že se vlastní kondenzační plocha obklopuje stínícími plochami chlazenými levnějším chladivem, než je chladivo užívané k chlazení vlastní kondenzační stěny nebo se k jejich chlazení používá plynného chladiva hlavního, které se vypařuje v hlavní chladicí lázni. Tyto stínící plochy musí být geometricky uspořádány tak, aby na kondenzační stěnu dopadaly pouze molekuly po odrazu od nich. Stejně tak má být kondenzační stěna vystavena záření pouze stínících ploch. Dále je výhodné ve vývěvě využít celého chladicího obsahu chladiva, a to nejen jeho vypařovacího tepla.



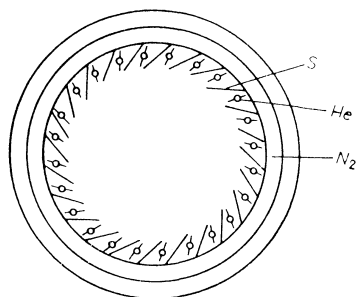
Obr. 10. Kryogenní vývěva chlazená vodíkem; podle práce (3). H₂ — otvor k plnění vodíku; N₂ — otvor k plnění dusíku; K — kondenzační stěna; S — stínění; VO — vstupní otvor.



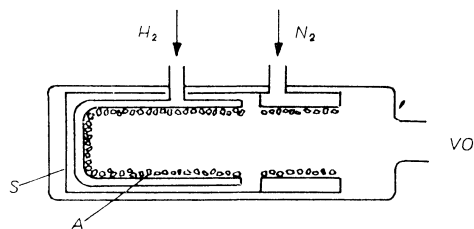
Obr. 11. Kryogenní vývěva chlazená héliem; podle práce (13). PV — k pomocné vývěvě; KS — kondenzační stěna; S — stínění; He — zásoba héliu, ČS — k čerpacímu systému plynného héliu.

Toho lze jen z části dosáhnout využitím plynného chladiva vypařeného z hlavní chladicí lázně k chlazení stínících ploch. Proto je výhodné využít plynu vypařeného

v zkapařovači k jeho chlazení, to znamená konstruovat vývěvu spolu se zkapařovačem jako jeden celek. Tím vstupuje do bilance kryogenní vývěvy hospodárnost zkapařovače. Poněvadž zkapařovač plynu pracuje hospodárně až určitým hodinovým výkonem chladiva počínaje (např. 4 l chladiva za hodinu), má smysl užít vývěvy s vlastním zkapařovačem až od určité velikosti vývěvy. Tak např. BOROVÍK a spol. [26] konstruoval kryogenní vývěvu s vlastním zkapařovačem vodíku, jejíž čerpací rychlost byla $3,7 \cdot 10^4$ l/sec, mezní tlak 10^{-8} až 10^{-9} mm Hg a celkový příkon 17 kW, což je hodnota menší než příkon difúzní vývěvy o téže čerpací rychlosti.



Obr. 12. Řez komorou simulátoru čerpaného kryogenní metodou. *S* — stínění chlazené kapalným dusíkem N_2 ; *He* — kondenzační stěny chlazené kapalným *He*.



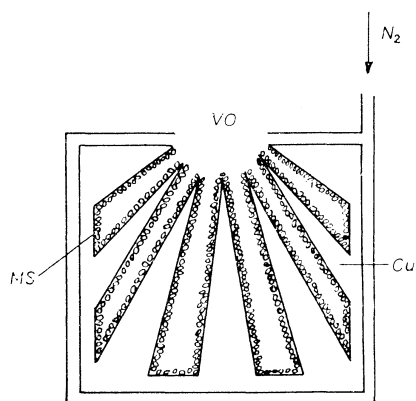
Obr. 13. Vývěva s aktivním uhlím; podle práce (23). *A* — aktivní uhlí upevněné na ploše chlazené kapalným vodíkem; *S* — stínění chlazené kapalným dusíkem; *VO* — vstupní otvor.

Kryogenní vývěvy se konstruují obvykle ve tvaru válce z nekorodujícího kovu, jehož otevřená podstava je vstupním otvorem vývěvy. Uvnitř válce je kondenzační element, kterým je obvykle kulová nádoba naplněná chladivem (obr. 10 [3]) — kapalným vodíkem nebo héliem. Kulová nádoba je obklopena soustavou stínících ploch, které jsou spojeny s nádobou chlazenou pomocným chladivem — kapalným dusíkem, resp. vodíkem. Stínící plochy podstatně zmenšují spotřebu chladiva, avšak zmenšují čerpací rychlost vývěvy. Na obr. 11 je schéma vývěvy [17], v níž jsou stínící plochy chlazeny plynným chladivem, které se v hlavním kondenzačním elementu vypařuje. Plynné chladivo se čerpá vývěvou přes škrtecí ventil. Tímto ventilem se reguluje tlak nad povrchem kapalného chladiva, a tím i teplota kondenzační stěny a stínících ploch. Prvních kryogenních vývěv se užívalo k čerpání systému společně s difúzními vývěvami, které čerpaly nekondenzovatelné složky. Nověji se od této kombinace upouští, poněvadž difúzní vývěvy vnášejí do čerpaného systému uhlovodíky.

Zvláštní použití mají kryogenní vývěvy při čerpání velkých zkušebních komor, jichž se užívá k měření v podmínkách vysokých vrstev atmosféry (tzv. simulátory kosmického prostoru). Tyto komory mají obvykle velké rozměry ($10-100$ m³), a k jejich čerpání je proto nutno užívat velkých čerpacích rychlostí. Toho lze dosáhnout jen tím, že se podél celého vnitřního povrchu komory umístí kondenzační stěny spolu

se stínicí plochou. Obr. 12. znázorňuje takový případ, kdy je uvnitř komory při jejích stěnách soustava kondenzačních a stínících ploch chlazených héliem a dusíkem. Tak lze dosáhnout čerpacích rychlostí řádově 10^6 l/sec. Při konstrukci těchto vývěv je výhodné, aby povrch všech vnitřních stěn systému byl opticky lesklý, aby byl zmenšen přenos tepla zářením na minimum.

Posledním typem jsou kryogenní vývěvy se sorbentem. Obr. 13 [23] uvádí vývěvu s aktivním uhlím, které je připevněno k chlazené stěně kovovou mřížkou. Ve vývěvě je vstupní část chlazená kapalným dusíkem a hraje úlohu stínících ploch, druhá část kapalným vodíkem. Vývěva má čerpací rychlost pro vodík několik set l/sec a mezní tlak 10^{-8} mm Hg. Na obr. 14 [24] je vývěva s molekulárním sítím, jehož granule jsou přilepeny na nosných plochách z mědi, chlazených kapalným dusíkem. Této vývěvy se použilo v sondážních raketách, kdy se měřilo složení vysokých vrstev atmosféry.



Obr. 14. Vývěva s molekulovým sítím, které je chlazené kapalným dusíkem; podle práce (24). *O* -- vstupní otvor; *Cu* -- měděná žebra nesoucí granule molekulového síta; *MS* -- molekulové sito.

ZÁVĚR

Kryogenní vývěvy jsou v současné době neúčinnějšími vývěvami, tj. vývěvami s největší čerpací rychlostí a nejnižším mezním tlakem. Jejich konstrukce je poměrně jednoduchá, neobsahuje žádné rychle se otáčející součásti (jako je tomu např. u vývěv turbomolekulárních) ani jiné choulostivé části (jako jsou tryskové systémy difúzních vývěv nebo vypařovací elementy vývěv s aktivním kovem). Lze proto v budoucnosti očekávat jejich rostoucí uplatnění. Obecnějšímu použití těchto vývěv stojí v cestě — zejména v našich podmínkách — nedostatek chladiv a nákladnost jejich použití. I zde lze však očekávat, že se stálým poklesem cen chladiv kryogenní vývěvy budou v provozu levnější než vývěvy klasické. Soustavná práce na problematice kryogenních vývěv přispěje i k bližšímu poznání procesů, které probíhají na rozhraní mezi kondenzační stěnou a plynnou fází při hlubokých teplotách a nízkých tlacích.

Literatura

- [1] DEWAR J.: Proc. Roy. Inst. 18 (1907), 751.
- [2] REDHEAD P. A., HOBSON J. P.: Canad. J. Phys. 36 (1958), 271.

- [3] BOROVIK E. S., LAZAREV B. G., FEDOROVA M. F., CIN N. M.: Ukraj. Žur. Fiz. 2 (1957), 175.
- [4] BAILEY B. M., CHUAN R. L.: 5. Nat. Symp. Vac. Technol. Trans. 1958, 262.
- [5] PÁTÝ L.: Čs. Čas. Fys. A15 (1965), 368.
- [6] PÁTÝ L.: *Fysika nízkých tlaků*, Praha NČSAV, v tisku.
- [7] ESELSON V. N., LAZAREV V. G., ŠVEC A. D.: Prib. Těchn. Eksper. 1961, No. 5, 160.
- [8] LIANG S. C.: J. Appl. Phys. 22 (1951), 148; J. Phys. Chem. 56 (1952), 660; 57 (1953), 910.
- [9] EDMONDS T., HOBSON J. P., VERREAULT R.: Canad. J. Phys. 41 (1963), 983.
- [10] HONIG R. E., HOOK H. O.: RCA Rev. 21 (1960), 360.
- [11] BOROVIK E. S., GRIŠIN S. F., GRIŠINA E. J.: ŽTF 30 (1960), 539.
- [12] HENGEVOSS J., TRENDELENBURG E. A.: Zs. Naturforschg. 17a (1962), 481.
HENGEVOSS J.: 3. Internat. Vacuum Congress, Stuttgart 1965.
- [13] KLIPPING G., MASCHER W.: Vakuum-Technik 11 (1963), 81.
- [14] STOUT J. W., GIAUQUE W. F.: J. Amer. Chem. Soc. 60 (1938), 393.
- [15] HONJO G., KITAMURA N., SHIMAOKA K.: J. Phys. Soc. Japan 11 (1956), 527.
- [16] DAWSON J. P., HAYGOOD J. D., COLLINS J. A. Jr.: Adv. in Cryogenic Engng. 9 (1963), 443.
- [17] KLIPPING G., MASCHER W.: Zs. angew. Phys. 16 (1964), 471.
- [18] BÄCHLER W., KLIPPING G., MASCHER W.: 9. Nat. Symp. Vac. Technol. Trans. 1962, 216.
- [19] BRACKMANN R. T., FITE W. L.: J. Chem. Phys. 34 (1961), 1572.
- [20] HAYGOOD J. D.: J. Phys. Chem., 67 (1963), 2061.
- [21] HEMSTREET R.: AEDC-TDR 62—200, AEDC-TDR 64—100.
- [22] LAZAREV B. G., FEDOROVA M. F.: ŽTF 31 (1961), 864.
- [23] NARCISI R. S., BRUBAKER W. M., POEHLMANN H. C., FEDCHENKO R. P., WIENS F.: 9. Nat. Vac. Symp. Trans. 1962, 232.
- [24] BOER J. H. DE: *Dynamical Character of Adsorption*, Oxford 1953.
- [25] BARRER R. M.: Endeavour 23 (1964), 122.
- [26] BOROVIK E. S., LAZAREV V. G., MICHAJLOV I. F.: Atomnaja Energ. 7 (1959), 117.

Nejdůležitější součástí moderních vysoce světelných optických monochromátorů s velkou rozlišovací schopností jsou optické mřížky. Jde vždy o otisky (repliky) z originálních mřížek, jejichž rytí je výsadou několika málo světových laboratoří. Rycí stroje musí být z dobře odstárlého materiálu, aby se mechanicky neměnila, a proto základem většiny těchto zařízení jsou odlitky z dob prvopočátků pokusů o rytí optických mřížek. Tak např. pro jeden z nejlepších současných strojů, dovolující rytí mřížek o ploše až 200×350 mm, bylo použito původního podstavce a lože, které vybudoval Michelson před 50 lety. Přesnost vzájemné polohy jednotlivých vrypů na mřížce je dnes řízena interferometricky a požadavky na ni jsou takové, že stroj musí pracovat po dobu několika týdnů při teplotě udržované na konstantní hodnotě s tolerancí 0,01 stupně a s otřesy menšími než 1/40 mikronu. Hustota vrypů se pohybuje mezi 20 až 3600 čarami na mm. Při frekvenci 10 vrypů za minutu trvá vyrytí 100×100 mm velké mřížky o hustotě 3600 čar/mm téměř měsíc. Stroj se přitom nesmí zastavit: jeho rozběhnutí trvá asi den. Diamant, který vytváří jednotlivé vrypy přesně definovaného průřezu, urazí za tu dobu 36 km. Na této dráze se nesmí jeho ostří podstatně změnit. Cena otisku (repliky) z takového vyrytého originálu, jenž se ukázal po přísných zkouškách vyhovující co do homogenity šíře i hloubky vrypů i co do výskytu tzv. Rowlandových duchů ve spektru (souvisí s pravidelností rozestupů vrypů), činí např. u reflexní mřížky 102×102 mm s hustotou 3600 čar/mm asi 3600 dolarů nebo u mřížky 154×206 mm s hustotou 1200 čar/mm asi 3900 dolarů, tj. přesahuje cenu velkého přepychového automobilu nebo 2—3 běžných vozidel. Cena otisků transmisních mřížek, jež samozřejmě nedosahují takových hustot a jejichž použití bylo donedávna v důsledku absorpce ultrafialového záření v materiálu repliky omezeno na viditelný obor, a cena konkávních mřížek dosahuje ještě vyšších hodnot.

-XO-