

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Ladislav Zobač

Nové principy a směry v konstrukci vysokovakuových vývěv

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 7 (1962), No. 6, 328--345

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138805>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1962

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>

# NOVÉ PRINCIPY A SMĚRY V KONSTRUKCI VYSOKOVAKUOVÝCH VÝVĚV

LADISLAV ZOBAČ, Brno

## 1. ÚVOD

Vývoj vysokovakuových vývĚv úzce souvisí se vzrůstem jejich potřeby a s požadavky kladenými na čerpací zařízení, tj. s rozvojem přístrojů, průmyslových zařízení a různých výrobních procesů, které vyžadují snížení hustoty plynu v pracovním prostoru na velmi nízkou hodnotu. Pomineme-li využití tzv. nízkého vakua, o kterém můžeme najít zmínky v literatuře už v první polovině minulého století (The Annals of Philosophy, 1821), můžeme říci, že prvním velkým spotřebitelem vysokovakuových vývĚv byly závody na výrobu žárovek a elektronek. Zde kromě mechanických rotačních vývĚv našly uplatnění hlavně difúzní vývĚvy, které pro hromadnou výrobu elektronek nejlépe vyhovovaly svou robustností, spolehlivostí a dostatečným výkonem při poměrně malých rozměrech. Efektivnost difúzních vývĚv v tomto období jejich vývoje nebyla rozhodujícím činitelem, protože malý objem a způsob čerpání elektronek (čerpací trubičkou malého průměru) nedovolovaly využít větší čerpací rychlosti vývĚvy. Ani na mezní tlak vývĚv nebyly kladeny zvlášť přísné požadavky, poněvadž potřebného nízkého tlaku v elektronce se dosáhlo použitím tzv. getrů po jejím odtavení od čerpacího zařízení.

Rtuť, používaná v prvních difúzních vývĚvách, byla po roce 1930 postupně nahrazována oleji s nízkou tenzí par, se kterými se podařilo brzy dosáhnout tlaků nižších než  $10^{-5}$  mm Hg i bez vymrazovačů nezbytných u rtuťových vývĚv.

V menším měřítku byly pro laboratorní účely již po roce 1930 sestrojeny výkonné difúzní vývĚvy s čerpací rychlostí řádu  $10^3$  l/s a s mezním tlakem nižším než  $10^{-5}$  mm Hg. Tyto výsledky přispěly k rozvoji atomové fyziky, která naopak zase urychlila vývoj vysokovakuových vývĚv. Byla to např. potřeba velmi nízkých tlaků (řádu  $10^{-6}$  mm Hg) ve velkých objemech (řádu  $10^1$  m<sup>3</sup>) pracovního prostoru urychlovačů částic, která si vynutila stavbu vysokovakuových vývĚv s čerpací rychlostí několika desítek tisíc l/sec. Tyto extrémní požadavky se daly nejnadhěji splnit u difúzních vývĚv, které proto v posledních 25 letech prodělaly bouřlivý vývoj.

V prvních poválečných letech se zdálo, že difúzní olejové vývĚvy zcela ovládnou vysokovakuovou techniku, protože kromě vývĚv s extrémně vysokou čerpací rychlostí nabízeli výrobci i vývĚvy s velmi nízkým mezním tlakem řádu  $10^{-8}$  mm Hg i nižším. Ukázalo se však, že v některých případech mohou nepříznivě ovlivnit nebo i znemožnit činnost čerpaného přístroje páry oleje pronikající tam z difúzní vývĚvy, a to i tehdy, když mezní tlak vývĚvy je nižší, než vyžaduje činnost přístroje.

Tento nedostatek olejových difúzních vývĚv se snažili výrobci překonat různým způsobem. Především se snažili různými úpravami vývĚv snížit difúzi olejových par

z vývěvy do čerpaného prostoru. Někteří výrobci se vrátili ke rtuťovým vývěvám, které nabízeli v moderní koncepci a doplněné účinnými vymrazovači místo olejových vývěv. Také molekulární vývěva nové koncepce měla být jedním z řešení tohoto problému.

Většina výrobců se však dříve nebo později zaměřila na vývoj zcela nového typu vývěv, které jsou v literatuře nejčastěji nazývány iontové. Různé koncepce těchto vývěv se pak označují různými názvy, např. elektronické, evaporační (evapor pump), getrové, titanové apod. Mezi nejrozličnějšími konstrukcemi těchto vývěv můžeme rozlišit dva principiálně různé typy.

U jednoho z nich je čerpaný plyn v pracovním prostoru vývěvy vhodným způsobem ionizován a vzniklé ionty plynu jsou elektrickým polem přemisťovány směrem k výstupnímu potrubí, odkud se odčerpávají pomocnou (např. rotační) vývěvou.

Druhý typ iontových vývěv můžeme nazvat sorpční, poněvadž tyto vývěvy využívají známé velké sorpční schopnosti čerstvě napařených vrstev některých látek (getrů). U sorpčních vývěv se využívá kromě toho také poznatku, že pohlcování plynů se zvýší, jsou-li ionizovány.

Přestože jevy, na nichž jsou založeny iontové vývěvy, jsou známy již delší dobu, došlo k jejich technickému využití teprve v posledním desetiletí. Vývoj druhého typu iontových vývěv, které budeme dále označovat názvem sorpční, však rychle a slibně pokračuje a jsou již nabízeny v přijatelném komerčním provedení několika výrobců.

V oboru mechanických vývěv jsou novinkou rotační vývěvy založené na Rootsově principu. Samotný princip je sice znám již delší dobu, avšak teprve v posledních desíti letech došel k širšímu technickému uplatnění. Přispěla k tomu rostoucí potřeba odsávání velkých množství plynů v oboru středních tlaků ( $1 \text{ až } 10^{-3} \text{ mm Hg}$ ), ve kterém Rootsovy vývěvy pracují hospodárněji než vývěvy ostatních typů.

V kategorii nejrozšířenějších rotačních olejových vývěv nepřinesl vývoj v posledních letech kromě různých konstrukčních úprav vedoucích ke zlepšení provozních vlastností nic zásadně nového.

Molekulární vývěvy patří sice k nejméně používanému druhu vývěv, přesto však byly obohaceny o novou konstrukci. Ta sice odstraňuje některé nevýhody starších typů, sotva však přispěje k širšímu uplatnění molekulárních vývěv.

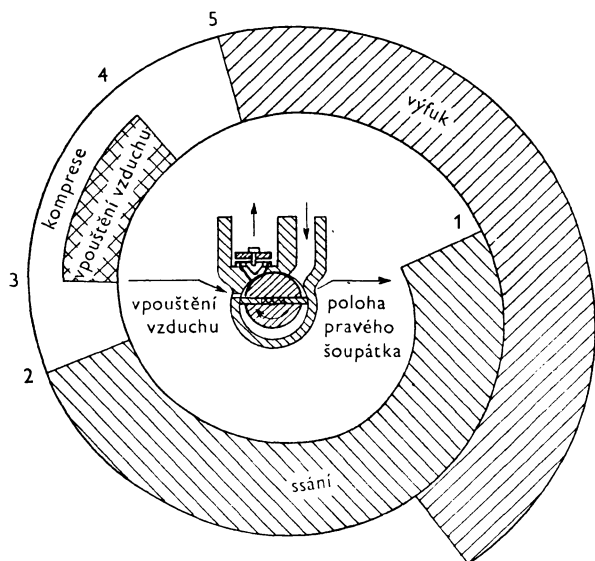
Pro úplnost je třeba se zmínit v tomto přehledu vývoje o novém, zvláštním způsobu získání nízkých tlaků, který je v literatuře označován názvem „cryopumping“, tzn. čerpání zmrazováním. Čerpací zařízení je vlastně velkým vymrazovačem, který je chlazen kapalným héliem na teplotu nižší, než je bod zkapalnění čerpaného plynu.

Uvádí se, že tímto způsobem se dosáhlo tlaků řádu  $10^{-4} \text{ mm Hg}$ . Tento způsob sloužil k vytvoření „dynamického vakua“ při zkouškách raket, není však vyloučeno, že se ho v budoucnu využije i k jiným účelům.

## 2. MECHANICKÉ VÝVĚVY

### a) Rotační olejové vývěvy

Nejrozšířenější typ mechanických vývěv založených na známém principu vytlačování plynu rotujícím tělesem je znám a využíván již půl století. Za tuto dobu byla



Obr. 1. Schéma činnosti rotační vývěvy pro čerpání par.

vytvořena řada konstrukcí dobře známých z literatury, které byly brzy propracovány do značné dokonalosti. Vývoj této kategorie vývěv v posledních letech se omezuje pouze na úpravy známých konstrukcí, které mají jednak usnadnit výrobu, jednak zlepšit provozní vlastnosti vývěv. Klade se důraz na odstranění hluku a vibrací, které způsobují vývěvy starší konstrukce; kromě toho se konstruktéři snaží zmenšit rozměry a váhu, zvýšit spolehlivost a snížit mezní tlak vývěv. Někteří výrobci dodávají vývěvy vybavené samočinným ochran-

ným zařízením, které zabraňuje vytlačení oleje z vývěvy do čerpaného přístroje po jejím zastavení.

Pro čerpání kondenzujících par se používá (v Evropě již přes dvacet let, v USA v posledních šesti letech) zvláště upravených rotačních vývěv označovaných „Gasballast Pumpen“, v ruštině „nasosy s produvkoj“. Úprava je poměrně jednoduchá, takže někteří výrobci (např. Balzers) jí vybavují všechny rotační vývěvy. Úprava zabraňuje kondenzaci par v kompresním prostoru vývěvy tím, že dříve než dojde ke kondenzaci, vpustí se do tohoto prostoru zvláštním ventilem takové množství vzduchu, aby parciální tlak páry ve vzniklé směsi nepřekročil při dalším stlačení na tlak 1 atm tlak nasycených par při dané teplotě. Tímto způsobem je pára vytlačena spolu se vpuštěným vzduchem do atmosféry, aniž by kondenzovala.

Pochody odehrávající se v rotační vývěvě během jednoho cyklu znázorňuje obr. 1. Při poloze 1 pravého šoupátka začíná nasávání páry vstupním potrubím, v poloze 2 se začne nasátá pára stlačovat. Při pohybu šoupátka od polohy 3 do polohy 4 je otevřen ventil, kterým se přivádí vpouštěný vzduch. Při dalším pohybu rotoru se směs páry a vpuštěného vzduchu dále stlačuje a když dosáhne (v poloze 5) atmosférického tlaku, otevře se výfukový ventil a směs je vytlačována z vývěvy.

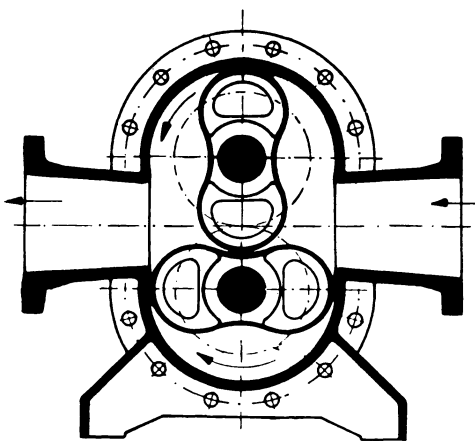
Vývěvy opatřené popsaným zařízením mohou odsávat z čerpaného prostoru např. vodní páry do tlaku až 25 mm Hg, který odpovídá tlaku nasycených par při teplotě 30°C.

Nevýhodou popsaného principu je, že zvyšuje 10krát až 100krát mezní tlak vývěvy (viz obr. 2).

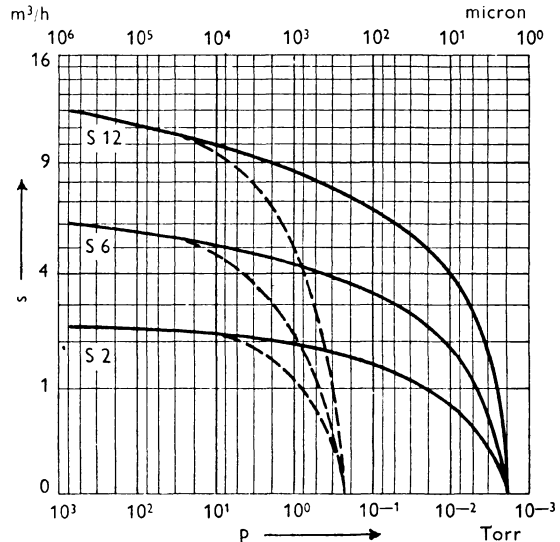
### b) Rootsovy rotační vývěvy

Je známo, že čerpací rychlost rotačních vývěv klesá s klesajícím tlakem a že při hodnotách blízkých se meznímu tlaku je jen zlomek jmenovité čerpací rychlosti. V oblasti tlaků od 1 mm Hg do  $10^{-3}$  mm Hg pracují tyto vývěvy značně nevhodně. Čerpací rychlost difúzních vývěv dosahuje maxima teprve při tlacích nižších než  $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  mm Hg. V celé řadě technických aplikací, např. při tavení, odplyňování, sintrování, vakuovém sušení atd., je třeba odsávat velká množství plynů a par právě v oblasti tlaků od 1 do  $10^{-3}$  mm Hg. Dříve se v těchto

případech používalo tzv. ejektorových vývěv, které však mají různé nevýhody: rozměry a spotřeba energie v poměru k čerpacímu výkonu jsou velké a pracují s



Obr. 3. Schéma Rootsovy vývěvy.



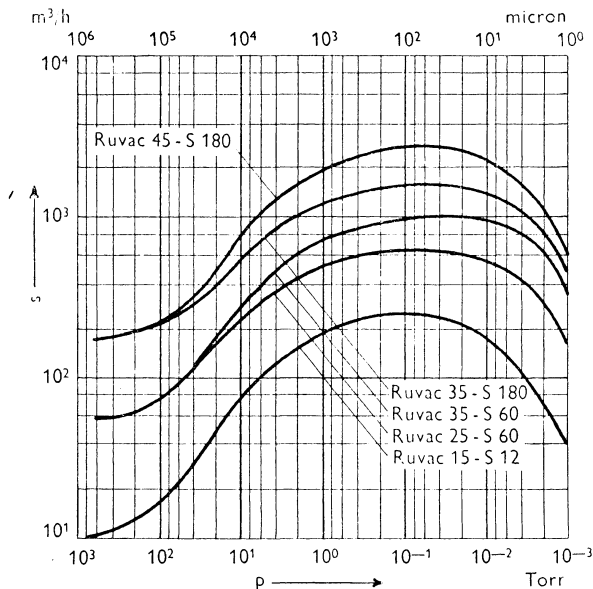
Obr. 2. Závislost čerpací rychlosti  $s$  na vstupním tlaku  $p$  dvoustupňové rotační vývěvy (plná čára: bez vpouštění vzduchu, čárkovaně: se vpouštěním vzduchu).

maximální čerpací rychlostí jen ve velmi úzkém rozsahu vstupního tlaku. Stále rostoucí potřeba vývěv s vhodnějšími vlastnostmi vedla konstruktéry k myšlence využít známého principu Rootsových čerpadel, používaných dříve jen k přemísťování plynů při vyšším tlaku.

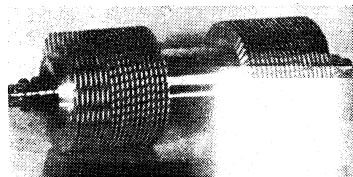
Princip Rootsova čerpadla ukazuje obr. 3. Ve vzduchotěsné komoře oválného průřezu jsou umístěny dva shodné válcové rotory, jejichž průřez má tvar osmičky. Oba rotory jsou vně vakuové komory otáčivě spojeny ozubeným soukolím s poměrem

1 : 1, takže se otáčejí v opačném směru stejnou úhlovou rychlostí. Jejich tvar se volí tak, že vzdálenosti povrchů obou rotorů se během otáčky nemění. Rotory se nedotýkají svým povrchem ani vakuové komory, běží tedy zcela volně, bez tření. Při otáčení rotorů ve směru naznačeném šipkami v obr. 3 se přemísťuje plyn zprava

doleva. Mezera mezi rotorem a vakuovou komorou se volí co nejmenší (několik desetin mm), poněvadž způsobuje, že čerpaný plyn proniká z výstupní strany zpět na vstupní. To je jistá nevýhoda, která by se dala odstranit např. utěsněním mezer vrstvou oleje podobně jako u olejových rotačních vývěv. Od této možnosti se však upouští, poně-



Obr. 4. Závislost čerpací rychlosti  $s$  na vstupním tlaku  $p$  několika Rootsových vývěv (Leybold).



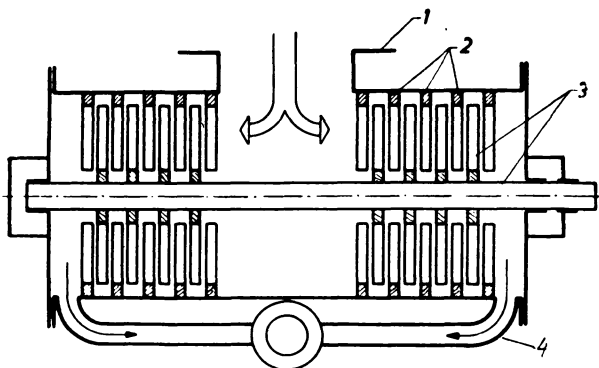
Obr. 5. Rotor nové molekulární vývěvy.

vadž zcela volný běh rotorů Rootsovy vývěvy přináší jiné cenné výhody. Především je možno volit značně vysoké otáčky rotorů (několik tisíc za minutu), takže vývěva při malých rozměrech může přemístit velké objemy plynu (má velkou čerpací rychlost). Odstraněním tření v Rootsově vývěvě se zabrání opotřebení a zahřívání, takže ani vývěvy velkého čerpacího výkonu nemusí být chlazeny vodou. Pro pohon vývěvy stačí poměrně malý motor, jehož výkon se spotřebuje převážně na stlačení plynu, nikoliv na krytí ztrát třením.

Nepříznivým důsledkem zpětného proudění plynu nezbytnými mezerami kolem rotorů Rootsovy vývěvy je poměrně malý kompresní poměr, který při vyšším tlaku je jen asi 3 : 1. To znamená, že při tlaku 1 atm na výstupní straně by se dosáhlo na vstupní straně nejnižšího tlaku asi 250 mm Hg. Rootsova vývěva musí být proto předčerpávána vývěvou s vyšším kompresním poměrem, např. olejovou rotační vývěvou.

Výhodných vlastností Rootsovy vývěvy se nejlépe využije, pracuje-li v mezích vstupního tlaku asi od 10 mm Hg do  $10^{-3}$  mm Hg. V této oblasti tlaků dosahuje totiž Rootsova vývěva maximální čerpací rychlosti (viz obr. 4) a také nejvyššího

kompresního poměru (asi 70 : 1), poněvadž odpor mezery roste s klesajícím tlakem. Mezní tlak Rootsových vývěv je udáván výrobcí hodnotou  $10^{-4}$  mm Hg za předpokladu, že předčerpávací olejová vývěva je dvoustupňová. Křivky čerpací rychlosti v obr. 4 však ukazují, že při tak nízkém vstupním tlaku pracuje již Rootsova vývěva neekonomicky. Je ovšem možno zařadit dvě Rootsovy vývěvy do série podobně jako klasické olejové vývěvy. Někteří výrobci dodávají také dvoustupňové Rootsovy vývěvy, které pracují s optimální čerpací rychlostí do vstupního tlaku  $10^{-4}$  mm Hg a jejich mezní tlak je řádu  $10^{-5}$ .

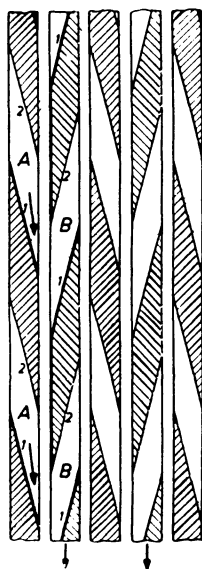


Obr. 6. Schéma nové molekulární vývěvy.

### c) Molekulární vývěvy

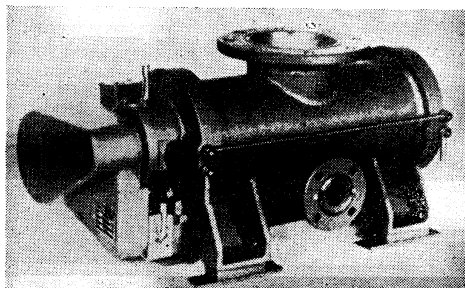
Molekulární vývěvy můžeme zařadit též do kategorie mechanických vývěv, přestože pracují na jiném principu než rotační olejové nebo Rootsovy vývěvy. V molekulárních vývěvách je čerpaný plyn transportován povrchem rychle se otáčejícího tělesa. Molekulární vývěvy známé již téměř půl století znamenaly ve své době velký pokrok v technice vysokého vakua, poněvadž s nimi bylo možno dosáhnout tlaků řádu  $10^{-7}$  mm Hg.

Princip činnosti molekulární vývěvy vyžaduje vysokou obvodovou rychlost rotoru, tzn. velký průměr a vysoké otáčky. Přitom vzduchová mezera mezi rotorem a statorem je jen několik setin milimetru. Z toho vyplývají různé nevýhody (vysoká cena, váha a rozměry) molekulárních vývěv, které zabránily širšímu praktickému využití jejich výhodných vakuových vlastností. Rychlý vývoj difúzních vývěv, které byly objeveny téměř současně, způsobil, že užití molekulárních vývěv nepřekročilo ve větším měřítku nikdy rámec vakuových laboratoří a donedávna se zdálo, že jejich vývoj se zcela zastavil. Naléhavá potřeba vývěv s extrémně nízkým mezním tlakem obrátila však pozornost i k těmto téměř zapomenutým čerpacím přístrojům.

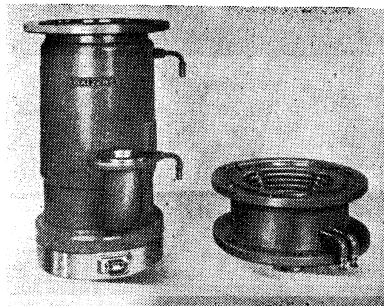


Obr. 7. K principu činnosti „turbínové“ molekulární vývěvy.

Před několika lety byla v literatuře popsána nová koncepce molekulární vývěvy, která znamená značný pokrok v jejich konstrukci. Nová molekulární vývěva připomíná parní turbinu. Její rotor (obr. 5) i stator je tvořen řadou kotoučů (obr. 6), které jsou opatřeny šikmými kanálky, jak je naznačeno na obr. 7. Molekuly plynu vstupujícího kanálkem *A* ve statoru jsou strženy rychle se otáčejícím rotorem a



Obr. 8. Pohled na turbínovou molekulární vývěvu.



Obr. 9. Pohled na standardní olejo-  
vou difúzní vývěvu. Vpravo: vodou  
chlazený srážecí par.

kanálkem *B* jsou přemístěny k dalšímu statorovému kotouči, kde se pochod opakuje. Plyn nasávaný z prostoru připojeného k přírubě *1* (viz obr. 6) je takto přemísťován soustavou statorových kotoučů *2* a rotorových kotoučů *3* k výstupnímu potrubí *4*, odkud je odsáván předčerpávací vývěvou.

Výhody nové molekulární vývěvy vyplývají z nové konstrukce statoru a rotoru. Axiální mezera mezi rotorovými a statorovými kotouči může být až 1 mm. Tím jsou nároky na výrobu podstatně ulehčeny a vývěva je v provozu mnohem spolehlivější. Při průměru rotoru 170 mm a 16 000 ot/min má nová molekulární vývěva (obr. 8) čerpací rychlost 140 l/sec stálou v rozsahu vstupního tlaku od  $10^{-2}$  do  $10^{-8}$  mm Hg. Při pokusech se s ní dosáhlo nejnižšího tlaku  $5 \cdot 10^{-10}$  mm Hg.

Nová molekulární vývěva je sice podstatným zdokonalením starších konstrukcí, sotva však přispěje k širšímu využití tohoto druhu, poněvadž cena, váha a rozměry jsou stále větší než u vývěv sorpčních, kterými se dá dosáhnout nejen velmi nízkých tlaků, ale i vysokých hodnot čerpací rychlosti při menších rozměrech, váze a ceně, a to již nyní, v počátečním stadiu jejich vývoje.

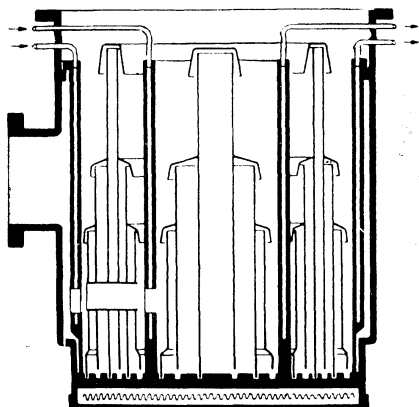
### 3. DIFÚZNÍ A EJEKTOROVÉ VÝVĚVY

Tímto názvem se označují vývěvy, ve kterých se molekuly čerpaného plynu transportují proudem páry vhodné kapaliny. Oba typy se liší obvykle svou konstrukcí, hlavně však různým pracovním tlakem páry, a v důsledku toho i svými vlastnostmi.

Vývoj těchto vývěv můžeme rozdělit na dvě etapy. V první z nich, od objevení



difúzní vývěvy v r. 1913 asi do roku 1935, šel vývoj převážně experimentální cestou. V této době byla vytvořena řada vývěv nejrůznějších konstrukcí. Většina z nich



Obr. 10. Schéma frakční difúzní vývěvy s velkou čerpací rychlostí (Balzers).

vycházela ze dvou základních koncepcí, LANGMUIROVY nebo CRAWFORDOVY; jiné konstrukce byly značně svérázné, nepřinášely však obvykle zvláštní výhody. Většina vývěv z tohoto období měla poměrně malou čerpací rychlost, a to několik desítek l/s, která pro tehdejší potřeby plně postačovala.

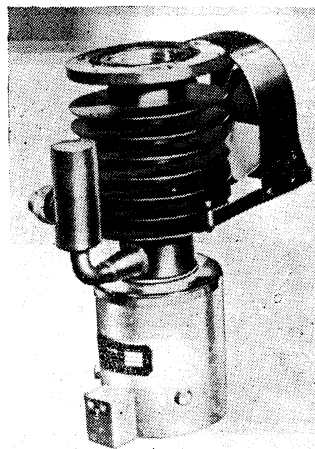
V druhé vývojové etapě, kdy požadavky kladené na vývěvy velmi rychle rostly, konstruktéři brzy poznali, že zlepšení vlastností vývěv nelze očekávat od nových originálních konstrukcí, ale že je třeba činnost difúzních vývěv podrobit důkladnějšímu teoretickému rozboru a podle jeho výsledků zlepšovat nejvhodnější známou konstrukci. Tou byla konstrukce vycházející z koncepce Langmuirovy.

Úsilí konstruktérů v druhé etapě vývoje paroproudových vývěv sledovalo tyto cíle:

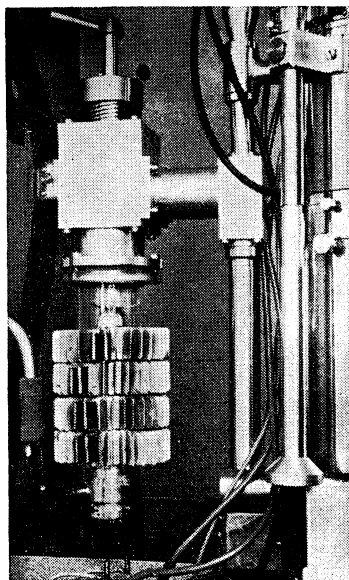
1. Sestrojení řady vývěv s čerpací rychlostí od několika l/s do několika desítek tisíc l/s, které při minimálních rozměrech, váze a ceně pracují s maximální hospodárností a spolehlivostí.

2. Snížení mezního tlaku a zvýšení přípustného výstupního tlaku.

3. Snížení zpětné difúze par z vývěvy do čerpaného zařízení.



Obr. 11. Kovová difúzní vývěva chlazená vzduchem z elektrického větráku (Edwards).

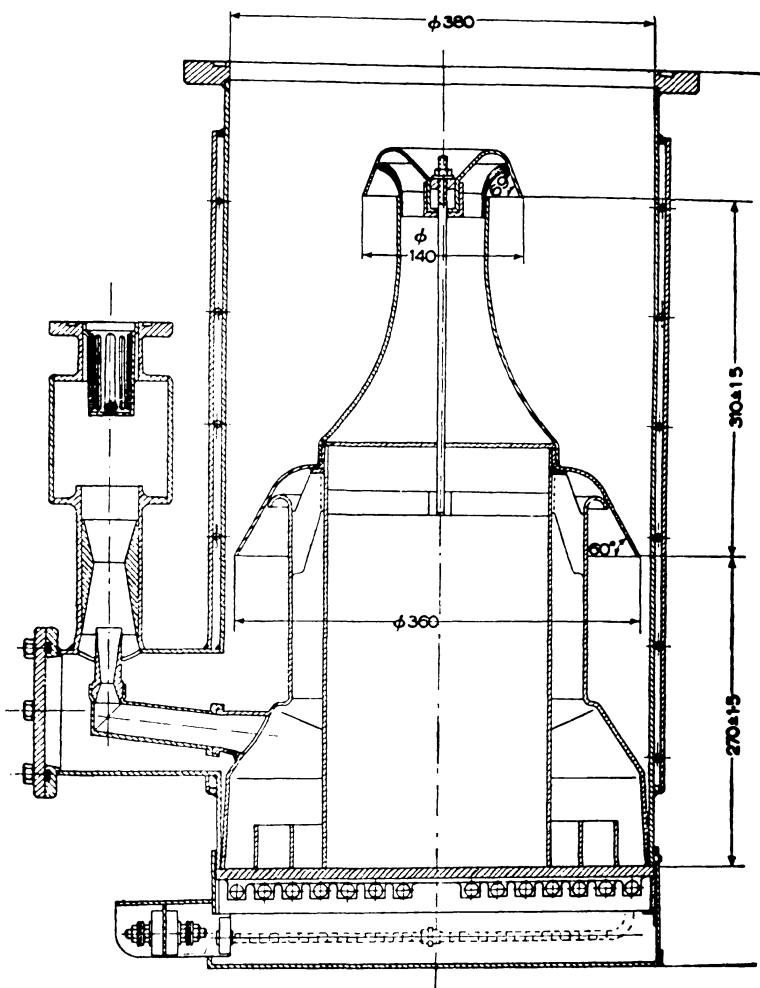


Obr. 12. Skleněná difúzní vývěva chlazená vzduchem při použití pro čerpání elektronového mikroskopu.

Pro speciální účely byla sestrojena celá řada zvláštních vývěv, např. celoskleněné vývěvy, vývěvy chlazené vzduchem apod. Zvláštní skupinu vývěv pracujících s proudem páry tvoří tzv. pomocné vývěvy (boostry) a ejektorové vývěvy, které jsou určeny pro čerpání plynů při středním tlaku (od několika mm Hg do  $10^{-3}$ ).

Novější myšlenky v konstrukci difúzních vývěv ukážeme na několika typických příkladech.

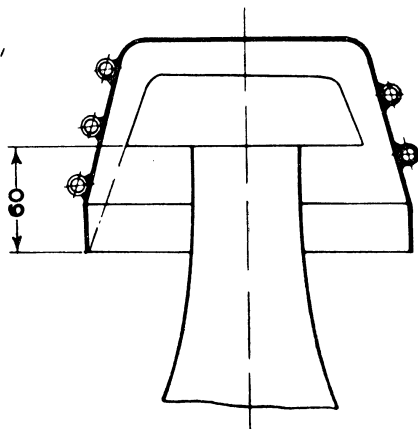
Ukázka moderního provedení difúzní vývěvy je na obr. 9, kde vidíme také vodou chlazený srážecí par, dodávaný jako standardní součást vývěvy. Jeho účelem je snížit zpětnou difúzi par z vývěvy do čerpaného prostoru. Schematický řez na obr. 10 ukazuje zajímavou konstrukci tryskového systému velké difúzní vývěvy fy Balzers, kterou se dosáhlo značného zmenšení výšky vývěvy. Na obr. 11 je ukázka menší



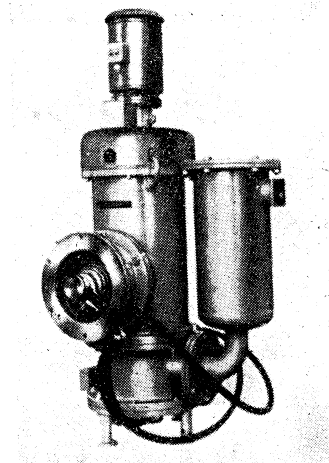
Obr. 13. Frakční difúzní vývěva s čerpací rychlostí 5 000 l/s (SSSR).

vývěvy chlazené vzduchem z elektrického větráku, který je namontován přímo na vývěvu.

Pro čerpání přístrojů, jako je např. elektronový mikroskop, u kterého není možno použít pro chlazení vývěvy elektrického větráku (otřesy a rozptylová pole motorku), byla sestrojena skleněná vývěva, která pracuje bez jakéhokoliv umělého chlazení. Konstrukci takové vývěvy ukazuje obr. 12. Její topné těleso je ponořeno přímo v čerpací kapalině na dně varné nádoby, takže ztráty tepla jsou minimální a vývěva pracuje velmi hospodárně. Stejně myšlenky se využívá i u větších kovových vývěv, aby se snížil potřebný topný příkon.



Obr. 14. Opatření pro snížení zpětné difúze par z vývěvy do čerpaného prostoru.



Obr. 15. Ejektorová vývěva (Balzers).

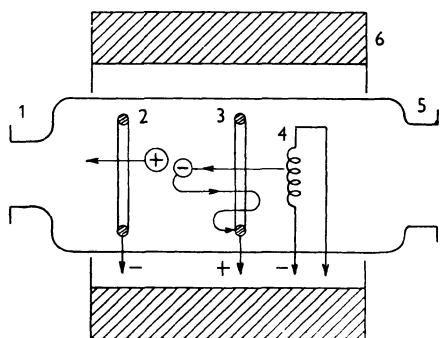
Ke snížení mezního tlaku olejových difúzních vývěv se využívá známého frakčního zařízení, které zbavuje olej ve varné nádobě pohlčených plynů a těkavých složek. Novější pokusy ukázaly, že frakčního účinku se plně využije jen tehdy, jsou-li trubky přivádějící páru k jednotlivým tryskám odděleny ve varné nádobě dostatečně vysokými příčkami. Frakční účinek se dá zvýšit také tím, že plášť vývěvy není chlazen pod spodní tryskou.

Úspěšnou konstrukci moderní difúzní vývěvy s velkým výkonem ukazuje obr. 13. Vtipně je zde řešen problém zvýšení přípustného výstupního tlaku pomocnou tryskou umístěnou v předčerpávacím potrubí. Snížení zpětné difúze par je u této vývěvy vyřešeno krytem, který je umístěn nad horní tryskou a je chlazen vodou (viz obr. 14). Ukázka moderního provedení ejektorové olejové vývěvy je na obr. 15.

#### 4. IONTOVÉ VÝVĚVY

Vývěvy, které jsme označili názvem iontové, jsou nejmladší kategorií vysokovakuumových vývěv. Možnost čerpání plynů elektrickou cestou je sice známa již více než

dvacet let, avšak teprve v posledních deseti letech byly učiněny pokusy o její praktické využití v širším technickém měřítku. Výsledky dosažené zvláště v poslední době přesvědčivě dokazují, že iontové vývěvy dosahují nejen výhodných vlastností difúzních nebo molekulárních vývěv, ale že je v mnohém směru i předčí.



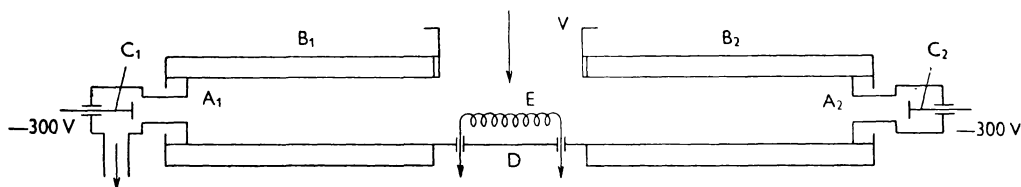
Obr. 16. Princip iontové vývěvy.

Čerpání plynů elektrickou cestou bylo pozorováno u výbojek a ionizačních vakuometrů jako nežádoucí jev. Tento jev byl vysvětlen zvýšeným pohlcováním ionizovaného plynu na elektrodách nebo na stěnách výbojového prostoru. Pokusy o jeho využití vedly k vývoji jednoho typu iontových vývěv, který jsme již v úvodu označili názvem „sorpční“, a to na rozdíl od druhého typu, který využívá myšlenky přemisťovat ionizovaný plyn elektrickým polem do prostoru, odkud se pak odčerpává pomocnou (předčerpávací) vývěvou.

Nebudeme se zde zabývat výsledky z počáteční etapy vývoje těchto přístrojů, zato si však všimneme podrobněji nejnovějších úspěchů na tomto poli aplikované fyziky.

#### a) Iontové vývěvy s transportem ionizovaného plynu elektrickým polem

Princip iontové vývěvy tohoto typu je znázorněn na obr. 16. Ve skleněné baňce opatřené přírubami 1 a 5 je zatavena wolframová spirála 4 a prstencové elektrody 2 a 3. Baňka s elektrodami je vsunuta do cívky 6, která vytváří axiální magnetické pole. Je-li wolframová spirála 4 nažhavena, emituje elektrony, které jsou přitahovány kladnou elektrodou 3. Působením magnetického pole jsou však soustředěny



Obr. 17. Iontová vývěva s čerpací rychlostí asi 7 000 l/s.

k ose trubky, takže nedostihnou anody 3 přímo, nýbrž teprve po několika kmitavých pohybech mezi katodou 4 a zápornou elektrodou 2. Kladné ionty vytvořené srážkami elektronů s molekulami plynu v prostoru mezi elektrodami 2 a 3 jsou přitahovány k elektrodě 2. Ionizovaný plyn je tímto způsobem přemisťován směrem od příruby 5 k přírubě 1.

Nutnou podmínkou k tomu, aby popsané zařízení mohlo působit jako vývěva, je, aby proud ionizovaného plynu vyvolaný elektrickým polem byl větší než difúzní proud iontů a neutrálních částic v opačném směru. Jedním z prvních pokusů o praktické využití tohoto principu byla vývěva popsaná J. H. SCHWARZEM, jejíž čerpací rychlost byla asi 10 l/s, mezní tlak asi  $2 \cdot 10^{-7}$  mm Hg.

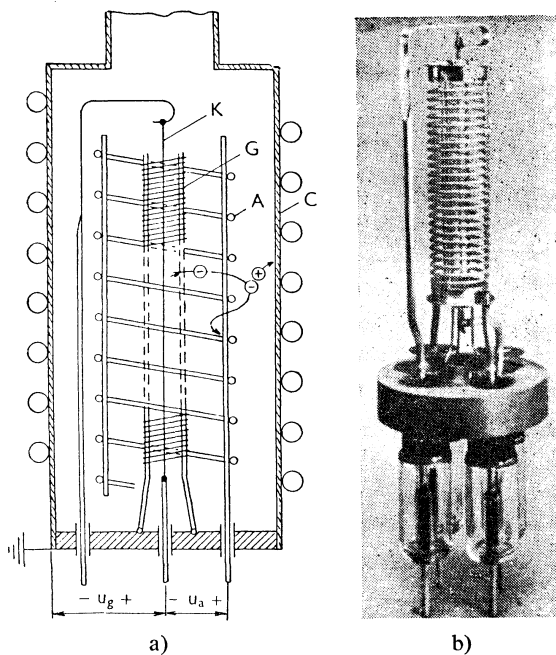
Výsledek pokusu o konstrukci vývěvy s velkou čerpací rychlostí založené na stejném principu ukazuje schematický obr. 17. Vývěva se skládá z dlouhé kovové trubky *D*, jejíž zúžení na obou koncích tvoří anody *A*<sub>1</sub> a *A*<sub>2</sub>. V blízkosti anod jsou izolovaně upevněny katody *C*<sub>1</sub>, *C*<sub>2</sub> připojené na  $-300$  V. Elektrony emitované žhavenou spirálou *E* jsou udržovány magnetickým polem vytvořeným cívkami *B*<sub>1</sub> a *B*<sub>2</sub> v ose trubky a působením elektrického pole oscilují mezi katodami *C*<sub>1</sub> a *C*<sub>2</sub>. Tím je zaručena účinná ionizace plynu. Ionty jsou přitahovány ke katodám, kde jsou buď chemicky vázány, adsorbovány nebo po ztrátě náboje odsávány předčerpávací vývěvou.

Autoři udávají, že čerpací rychlost popsané vývěvy je 3000 až 7000 l/s, mezní tlak řádu  $10^{-7}$  mm Hg. Její délka je však přes 4 m a spotřeba elektrické energie 25 až 42 kW. Velké rozměry a příkon této vývěvy ve srovnání s vývěvami jiných typů (difúzní nebo sorpční) jasně ukazují, že transport ionizovaného plynu elektrickým polem není prakticky příliš výhodný. Vývěvy tohoto typu nemají proto velkou naději na další rozvoj a uplatnění ve vakuové technice. Nejlepším důkazem toho je vývoj v poslední době.

### b) Sorpční vývěvy

Podle dosavadních výsledků je možno soudit, že tento typ iontových vývěv má největší naději na širší praktické uplatnění, poněvadž skýtá velké možnosti dalšímu vývoji a dobře vyhovuje praktickým požadavkům. V soulasu s historií svého vzniku jsou sorpční vývěvy (stejně jako ionizační vakuometry) dvou odlišných typů. Jedny vycházejí z triodového vakuometru (se žhavou katodou), druhé z výbojového vakuometru (PENNINGOVA).

Jednou z prvních sorpčních „vývěv“ byl přímo ionizační triodový vakuometr, kterého použil při známých pokusech ALPERT k získání tlaků nižších než  $10^{-10}$



Obr. 18. Titanová sorpční vývěva; a) schéma, b) tovární provedení (CSF, Francie).

mm Hg. Podobná sorpční vývěva byla vyvinuta pracovníky francouzské společnosti CSF pro udržování vakua ve výkonných mikrovlnných elektronkách (klystry, magnetrony apod.). Její schéma je na obr. 18a, fotografie ionizačního systému vývěvy na obr. 18b. Vývěva se skládá z wolframové katody  $K$ , „řídící“ mřížky  $G$  a „anody“  $A$ . Anoda má tvar spirály, která je pokryta vrstvou titanu, a je možno ji zahřívát elektricky na teplotu asi  $1\,000^\circ\text{C}$ . Řídící mřížka je spojena s nádobou vývěvy  $C$ , která je chlazená vodou.

Je-li wolframové vlákno  $K$  vyžhaveno, emituje elektrony, které jsou přitahovány k anodě  $A$ . Většina jich ji nedostihne přímo, nýbrž prolétne do prostoru mezi anodou a stěnou nádoby  $C$ , odkud se vrátí vlivem záporného potenciálu nádoby  $C$  zpět. Ionty, které vzniknou srážkami elektronů s molekulami plynu vně anody, jsou přitahovány ke stěně nádoby. Zde jsou adsorbovány vrstvou titanu, který se odpařuje z anody zahříváné dopadajícími elektrony na teplotu asi  $1\,000^\circ\text{C}$ . Teplota anody, na níž závisí rychlost odpařování titanu, se může řídit jednak velikostí emisního proudu (napětím řídící mřížky  $u_g$ ), jednak urychlovacím napětím elektronů  $u_a$ . Uvádějí se hodnoty  $u_g = -20\text{ V}$ ,  $u_a = 1\,750\text{ V}$ .

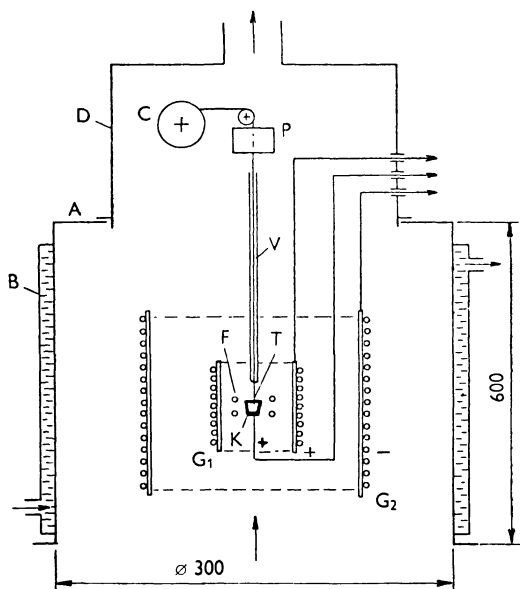
Popsaná vývěva se vyrábí v různých velikostech s čerpací rychlostí od 1 do 20 l/s. Jedna z těchto vývěv je popsána podrobněji v práci [1]. Zde se uvádí spotřeba titanu asi  $1,4\ \mu\text{g}/\text{min}$  při výkonu 300 W, mezní tlak  $10^{-9}$  až  $5 \cdot 10^{-10}$  mm Hg a čerpací rychlost pro různé plyny (vzduch — 19 l/s,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$  — 50 l/s). Čerpací rychlost pro vzácné plyny Ar, Ne, He je menší než 0,3 l/s. Obecně malá čerpací rychlost titanových sorpčních vývěv pro vzácné plyny se vysvětluje tím, že pohlcování plynů vrstvou Ti je v podstatě chemická absorpce. Pohlcování chemicky netečných plynů je proto malé. Z uvedené rychlosti odpařování titanu je vypočteno, že se zásobou 5 až 6 gramů (tj. množství nanesené na anodě) by mohla vývěva pracovat bez přerušení 7 000 hodin s příkonem 450 W nebo 60 000 hodin s příkonem 300 W.

Sorpční vývěvy popsaného typu mají ve srovnání s jinými iontovými vývěvami, které dále popíšeme, některé cenné výhody: jsou značně jednoduché, mohou být před uvedením v činnost odplyněny podobně jako elektronky, neobsahují žádné pohyblivé části, jejich rozměry i váha jsou malé. Otázkou je, zda tato koncepce vývěv bude výhodná i pro sorpční vývěvy velkého čerpacího výkonu řádu  $10^3$  až  $10^4$  l/s.

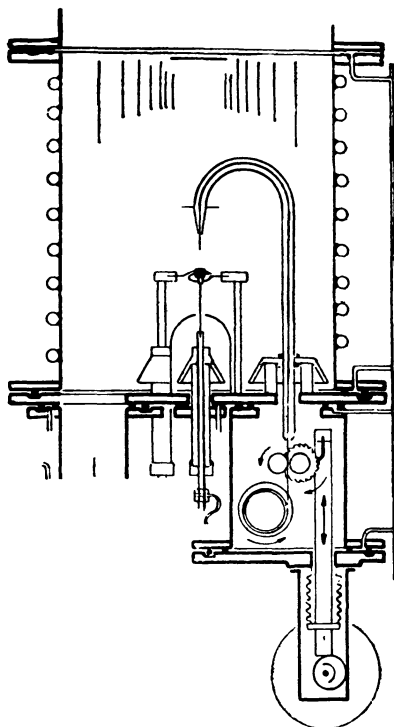
Hlavním konstrukčním problémem u sorpčních vývěv s vysokou čerpací rychlostí je nalézt vhodný způsob plynulého odpařování většího množství titanu, jehož spotřeba je řádu  $10^1$  mg/min. Při této rychlosti odpařování se spotřebuje za 1 000 pracovních hodin množství řádu  $10^2$  g. Aby nebylo nutno zásobu titanu ve vývěvě často doplňovat, používá se ho u velkých vývěv ve formě tenkého drátu navinutého na cívce, ze které se vhodným automatickým mechanismem odvíjí a posouvá potřebnou rychlostí k odpařovacímu zařízení. Konstrukci velkých sorpčních vývěv ukážeme na dvou typických příkladech.

Na obr. 19 je schéma velké sorpční vývěvy, která při udaných rozměrech dosahuje čerpací rychlosti několika tisíc l/s. V kovové trubce  $A$  chlazené vodním pláštěm  $B$  jsou umístěny mřížky  $G_1$ ,  $G_2$ , wolframové žhavené vlákno  $F$  a malá grafitová ty-

činka *K*. V horní části vývěvy *D* je cívka *C* se zásobou titanového drátu ( $\varnothing$  asi 0,5 mm). Mechanismus *P* odvíjí drát *T* z cívky a posouvá jej vodící trubkou *V* ke grafitové tyčince, která se zahřívá na teplotu asi 2 000°C dopadem elektronů emitovaných žhaveným vláknem *F*. Totéž vlákno dodává elektrony potřebné k ionizaci plynu, které jsou „odsávány“ kladnou mřížkou *G*<sub>1</sub>. Napětí mřížky *G*<sub>2</sub> je voleno tak, aby elektrony oscilovaly mezi *G*<sub>1</sub> a *G*<sub>2</sub>, čímž se zvýší jejich ionizační účinek. Vzniklé



Obr. 19. Zjednodušené schéma velké sorpční vývěvy (čerpací rychlost pro vzduch 1000 l/s; autoři: Divatia a Davis, USA).

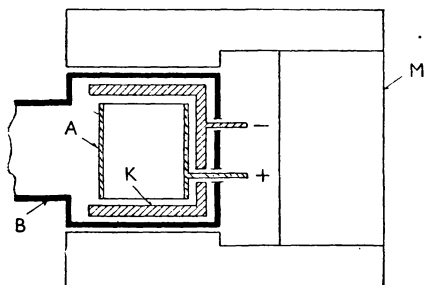


Obr. 20. Sorpční titanová vývěva s vymrazováním (Degras, CSF, Francie).

kladné ionty jsou elektrickým polem mezi mřížkami urychlovány směrem k chlazenému plášti, kde jsou pohlcovány vrstvou napařeného titanu. Nejdůležitější charakteristické hodnoty této vývěvy jsou:

celková spotřeba .....	1 kW,
mezní tlak .....	$2 \cdot 10^{-7}$ mm Hg,
rychlost odpařování titanu .....	7 mg/min,
čerpací rychlost: vzduch .....	1 000 l/s,
H <sub>2</sub> .....	7 000—8 000 l/s,
N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> .....	6 500—7 500 l/s,
Ar, He .....	10 l/s.

Podrobnější schéma jiné sorpční vývěvy je na obr. 20. Z něho je patrna konstrukce mechanismu pro automatické posouvání titanového drátu ze zásobní cívky ke žhavenému kelímku zhotovenému z grafitu, wolframu nebo karbidu tantalů. Kelímek se zahřívá asi na 2000°C proudem elektronů z wolframového vlákna obepínajícího kelímek. Souosé kovové válce ve vstupním hrdle vývěvy zabraňují vnikání par titanu do čerpaného prostoru. Zvláštností této vývěvy je to, že nepoužívá zvláštních elektrod (mřížek) ke zvýšení ionizace plynu a k usměrnění iontů ke stěně vývěvy. Místo toho je k vývěvě připojen vymrazovač chlazený kapalným héliem nebo vodíkem. Autor vývěvy uvádí, že vymrazování plynů a par je účinnější než zvyšování jejich adsorpce ionizací. Křivka čerpací rychlosti ukazuje maximum při tlaku asi  $3 \cdot 10^{-6}$  mm Hg, které se pro různé plyny (vzduch, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) pohybuje kolem 1000 l/s. Mezní tlak vývěvy je asi  $1 \cdot 10^{-7}$  mm Hg.



Obr. 21. Schéma výbojové sorpční vývěvy.

Konstrukčním problémem velkých sorpčních vývěv je odpařování titanu. Odpařování jeho přímým stykem s kelímek nebo tyčinkou zahřivanou na teplotu kolem 2000°C má dvě nevýhody: 1. životnost odpařovacího tělesa je omezená, poněvadž vytváří s titanem slitiny; 2. většina tepla se neúčinně vyzáří.

Proto se hledaly jiné způsoby plynulého odpařování. Jeden z nich navrhuje přímé zahřívání konce titanového drátu úzkým paprskem elektronů. Obtíže, které se vyskytují při realizaci této myšlenky, jsou popsány v práci [2], kde je též uveden nový způsob odpařování titanu (z kapičky přitavené k masívní měděné elektrodě).

Výsledky pokusů o využití čerpací schopnosti výbojového vakuometru jsou popsány v práci [3] a [4]. Konstrukce tohoto zvláštního typu sorpční vývěvy se v principu ničím neliší od novější koncepce Penningova vakuometru, schematicky naznačeného na obr. 21. Ve vzduchotěsné komůrce B spojené s čerpaným prostorem jsou umístěny dvě kovové destičky K spojené se záporným pólem a válcová trubka A spojená s kladným pólem zdroje 2000 ÷ 10 000 V. Komůrka s elektrodami je vložena mezi pólové nástavce permanentního magnetu M. Při nízkém tlaku plynu v komůrce vznikne doutnavý výboj, který se zásluhou magnetického pole udrží do tlaků řádu  $10^{-9}$  mm Hg.

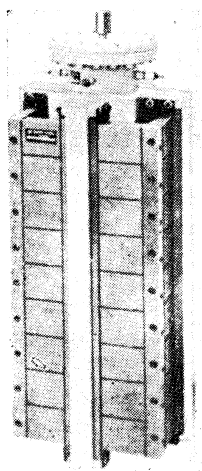
Čerpací proces v tomto typu sorpční vývěvy nebyl dosud v literatuře přesně vysvětlen, předpokládá se však, že je značně složitý. Může se zde uplatňovat pohlcování ionizovaného plynu na katodách i na anodě, na které se usazují molekuly uvolněné z katody tzv. rozprašováním (tj. dopadem kladných iontů). Důležitou roli může hrát též disociace molekul plynu, záporné ionty a jiné jevy.

Bez ohledu na stav teorie byly magnetické sorpční vývěvy propracovány pokusně již natolik, že mohla být zahájena jejich tovární výroba (fa Varian Associates v USA).

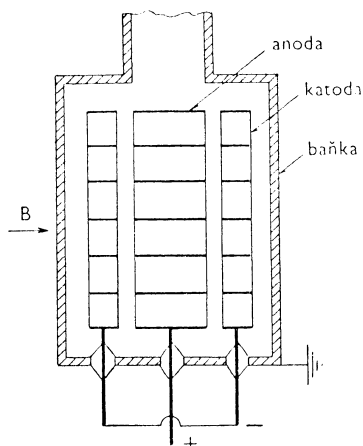


V práci [3] jsou popsány vlastnosti dvou typů, a to s čerpací rychlostí 5 l/s a 250 l/s. Provedení druhé vývěvy ukazuje fotografie na obr. 22. Vývěva je složena z řady paralelně spojených článků a příslušných magnetů. Toto řešení je nutné pro získání větší čerpací rychlosti, poněvadž rozměry použitého systému (viz obr. 21) nelze neomezeně zvyšovat.

K výsledkům uvedeným v této práci nutno poznamenat, že vývoj výbojových sorpčních vývěv v posledních letech bouřlivě pokračuje. Výrobci již nabízejí vývěvy



Obr. 22. Výbojová sorpční vývěva 250 l/s (VacIon, Varian Associates, USA).



Obr. 23. Schéma výbojové sorpční vývěvy pro čerpání netečných plynů.

tohoto typu s čerpací rychlostí od 0,2 l/s do 10 000 l/s a s pracovním rozsahem tlaků od  $10^{-2}$  do  $10^{-10}$  mm Hg.

Mezi přednosti výbojové sorpční vývěvy patří, že neobsahuje žádné pohyblivé části ani žhavené vodiče. Pracuje proto velmi spolehlivě a nemůže být poškozena náhlým vniknutím vzduchu do čerpaného prostoru. Její nespornou výhodou je také velmi hospodárná činnost. Vývěva totiž potřebuje jen zdroj energie pro udržení výboje. Přitom proud odebíraný z tohoto zdroje (při napětí 2—10 kV) klesá lineárně s tlakem (od hodnot  $10^2$  mA při tlaku  $10^{-4}$  do  $10^{-2}$  mA při  $10^{-9}$  mm Hg).

V citované práci je dále uvedena závislost čerpací rychlosti na magnetickém poli, čerpací rychlost pro různé plyny a závislost čerpací rychlosti na tlaku. Pozoruhodné je, že čerpací rychlost je naprosto konstantní ve velmi širokém rozsahu tlaků (od  $10^{-5}$  do  $5 \cdot 10^{-8}$  mm Hg).

Konečně je nutno zmínit se v této souvislosti o novější práci [5], kde se mimo jiné řeší problém malé čerpací rychlosti iontových sorpčních vývěv pro netečné plyny. U výbojové sorpční vývěvy se autorovi podařilo užitím tříelektrodového systému

místo obvyklého dvouelektrodového (kromě stabilizace činnosti vývěvy) podstatně zvýšit její čerpací rychlost pro argon. Použitý tříelektrodový systém této vývěvy je naznačen schematicky na obr. 23. Obě katody, stejně jako anoda, jsou z kovové nádoby vývěvy vyvedeny izolovaně a jejich napětí proti baňce spojené se zemí je  $+4$  kV a  $-4$  kV.

Podle autorova sdělení vyrábějí se takto upravené vývěvy (Varian Ass.) pod komerčním názvem Drivac, resp. Super VacIon. Anoda i katody této vývěvy mají tvar mřížky o 36 komůrkách ležících proti sobě. Jsou vyrobeny z titanového plechu. Čerpací rychlost takové vývěvy je 25 l/s pro vzduch a 8 l/s pro argon.

Zvýšená čerpací schopnost popsané výbojové vývěvy se vysvětluje tím, že mřížkovým tvarem katod se dosáhne účinného rozprašování titanu, který pak při dopadu na stěnu nádoby „překrývá“ molekuly plynů, jež pro svoji chemickou netečnost nemohou být titaniem chemicky vázány.

## 5. ZÁVĚR

Z přehledu vysokovakuových vývěv z posledních let se dá soudit, že mechanické a difúzní vývěvy jsou dnes na vrcholu svého vývoje, avšak budou jistě i v budoucnu nejpoužívanějšími v běžné vakuové technice. Větší rozšíření molekulárních vývěv je málo pravděpodobné pro konkurenci, kterou mají ve vývěvách iontových.

Odhadnout další vývoj iontových vývěv je mnohem obtížnější. Jisté je, že potřeba extrémně nízkých tlaků ve velkých objemech u stále rostoucího počtu přístrojů a zařízení jak laboratorních, tak i průmyslových si vynutí jejich další vývoj. Rostoucí požadavky na čerpací rychlost, hospodárný provoz a mezní vakuum bude nutno řešit nejen konstrukčními úpravami, ale pravděpodobně i hledáním nových principů. Oboje nebude možné bez důkladného studia různých fyzikálních a fyzikálně chemických procesů, na nichž je činnost těchto vývěv založena. Bylo by proto jistě velmi účinné shrnout dosavadní výsledky na tomto poli.

Konečně není možno se nezmínit o stavu vakuové techniky v oboru vakuových čerpadel u nás. V poválečných letech byla v různých našich laboratořích i závodech vyvinuta celá řada moderních a výkonných vývěv jak rotačních, tak i difúzních. Nemohlo tomu být ani jinak, poněvadž s rozvojem socialistické vědy a techniky rostla a roste stále rychleji potřeba nejrůznějších vakuových zařízení. Záslužné práce vývojových pracovníků bylo však dosud málo využito, pokud lze soudit podle nabídky vakuových čerpadel na našem trhu, která je stále naprosto nedostačující. Je jistě přáním nejen autora, ale i mnoha jiných pracovníků z nejrůznějších pracovišť, aby se tato situace změnila k lepšímu co nejdříve.

## Literatura\*)

- [1] HUBER a j.: Pumping of electron tubes with the titanium pump. *Le Vide 14* (1959), 214.
- [2] HOLLAND L., LAURENSEN L.: The performance and design of a titanium getter pump of high pumping speed. *Le Vide 14* (1959), 141.
- [3] JEPSEN R. L.: Important characteristics of a new type Getter ion pump. *Le Vide 14* (1959), 80.
- [4] GUREWITSCH A. M., WESTENDORP W. F.: Ionic pump. *Rev. Sci. Instr.* 25 (1954), 389.
- [5] BRUBAKER W. M.: A methode for greatly enhancing the pumping action of a Penning discharge. *Proceedings of the sixth national Symposium* (1959). Pergamon Press 1960.
- [6] PÁTÝ L.: Iontové vývěvy a fyzikální procesy v nich. *Pokroky MFA 3* (1958), 46.

## ANTIGRAVITACE

ZDENĚK KOS, Praha\*\*)

Z EINSTEINOVY obecné teorie relativity vyplývá několik možností vedoucích k vytvoření gravitačních sil jiných než Newtonových. Při popisu gravitačního působení pohybujících se hmot na testovací částice Einsteinovou gravitační teorií a Newtonovou teorií docházíme v obou případech k odlišným výsledkům. Protože směr působení přídatných sil, jejichž existence vyplývá z obecné teorie relativity, může mířit proti gravitačnímu poli Země, mohou být nazývány antigravitačními. Předem podotkneme, že z praktického hlediska jsou tyto síly naprosto nepoužitelné; již samo dosažení měřitelných výsledků by vyžadovalo neobyčejně velkých hmotných systémů, technicky nerealizovatelných.

Účelem tohoto článku je poukázat na existenci těchto sil a provést řádový odhad jejich velikostí. Použijeme k tomu známých řešení Einsteinových rovnic v lineární aproximaci, jejichž řešením se nebudeme zabývat.<sup>1)</sup>

Aplikováním principu obecné teorie relativity na soustavy pohybujících se hmot zjistíme, že při pohybu hmot vznikají síly, které působí na testovací částice podobně jako síly odstředivé a Coriolisovy. Jejich velikost je ovšem mnohem menší. Protože zrychlení udělovaná pohybujícími se hmotami testovacím částicím jsou nezávislé na hmotách těchto částic, není možno je lokálně odlišit od gravitačních.

1. Vyjdeme-li při vyšetřování působení rotujícího hmotného tělesa na testovací částici z Einsteinovy obecné teorie relativity, zjistíme, že gravitační skalární potenciál obsahuje vedle běžného Newtonova členu ještě členy další, které jsou podmíněny rotací

---

\*) Autorův přehled literatury (celkem 24 prací) byl podle redakčních zvyklostí podstatně zkrácen. Redakce však zašle zájemcům na požádání původní seznam literatury.

\*\*) Zpracováno podle zahraničních pramenů.

<sup>1)</sup> Přesné řešení provedl THIRING v roce 1918; je obsaženo v řadě dosavadních publikací o obecné teorii relativity.