

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Libor Pátý

Vznik a vývoj fyziky nízkých tlaků

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 12 (1967), No. 6, 334--341

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137936>

## 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>

## VZNIK A VÝVOJ FYZIKY NÍZKÝCH TLAKŮ\*)

LIBOR PÁTÝ, Praha

Fyzika nízkých tlaků je jeden z nejmladších oborů fyziky. V literatuře se s názvem „fyzika nízkých tlaků“ nebo „vakuová fyzika“ setkáváme teprve před několika lety. Prvně se setkáváme s názvem fyzika vysokého vakua v knize A. GAETZE — Physik u. Technik des Hochvakuums, Braunschweig 1925; užití tohoto názvu však zůstalo ojedinělé. Až v letech 1957–58 se začalo názvu stále častěji užívat v odborné literatuře. Fyzika nízkých tlaků je mnohem mladší než jiné fyzikální obory jako např. jaderná fyzika, fyzika výbojů v plynech a fyzika nízkých teplot, jejichž rozvoj patří vesměs do doby mezi dvěma válkami. Přesto se však setkáváme s jejím historickým základem již v 17. století, v němž se zrodila dynamika dílem GALILEIHO (1564–1642), HUYGHENSOVA (1629–1695) a NEWTONOVA (1643–1727). Do té doby byli přírodovědci v souhlase s učením ARISTOTELOVÝM přesvědčeni, že příroda sama se děsí prázdnoty („horror vacui“). Teprve Galileiho žák EVANGELISTA TORRICELLI (1608–1647) ukázal, jak lze vytvořit prázdňý prostor (vacuum), a tím položil základ vakuové fyzice (1643). Několik let předtím byl Galilei žádán o vysvětlení, proč tlakové vodní pumpy nezvednou vodu do větší výše než 10 m. Galilei ve svých úvahách mimo jiné uvádí, že vodní sloupec se sám přetrhne podobně jako se přetrhne vlastní vahou lano, je-li dostatečně dlouhé. Při přetrhnutí vznikne však prázdňý prostor, lze tedy za určitých podmínek „horror vacui“ překonat. Torricelli dal z Galileiho podnětu provést týž pokus se rtuť (rtuť má specifickou hmotu  $13,45 \text{ g/cm}^3$ ; je tedy mnohem těžší než voda a ve smyslu Galileiho výkladu by se měl její sloupec přetrhnout při mnohem kratší délce než sloupec vody). Dal naplnit na jednom konci uzavřenou trubici rtuť, vložit ji otevřeným koncem do nádoby se rtuť a zvolna ji obrátil do svislé polohy tak, aby uzavřený konec byl nakonec nahoře. Při pokusu se ukázalo, že rtuť se skutečně odtrhne od horního konce trubice a poklesne tak, že za normálních podmínek jsou výškové odlehlosti hladin rtuť v nádobě a trubici 76 cm. Tím se vytvoří v horní části prostor, o němž se Torricelli domníval, že je zcela prázdňý. Dnes víme, že v tomto prostoru jsou páry a plyny uvolněné ze rtuť a z vnitřních povrchů trubice. Jsou to páry rtuť, vzduch a obvykle vodní pára o celkovém tlaku několika tisícín mm Hg. Torricelli správně vysvětlil příčinu vzniku vakua v trubici působením barometrického tlaku atmosféry. Torricelliho pokus má proto velký význam nejen pro fyziku nízkých tlaků, ale i pro poznání atmosféry; uspořádání tohoto pokusu bylo využito při konstrukci barometru. Trvalo však delší čas, než byl Torricelliho objev obecně přijat; i PASCAL zpočátku vykládal své pokusy týkající se tlaku vzduchu starým způsobem. Torricelliho výklad přijal až tehdy, když zjistil z pokusu, který z jeho návodu provedl PERRIER, že výška barometrického sloupce se mění s nadmořskou výš-

\*) Referát přednesený na 2. konferenci čs. historiků věd a techniky v Liblicích v listopadu 1966.

kou místa pozorování, takže podle dosavadních představ by se měl i „horror vacui“ měnit s výškou.

Uvedený pokus byl prvním způsobem získání vakua a první experimenty s nízkými tlaky se konaly přímo v Torricelliho prostoru; tak bylo např. ukázáno, že ve vakuu kouř ze smůly zahříváné slunečním zářením pomocí dutého zrcadla padá dolů, a že měchýřek s uzavřeným nepatrným množstvím vzduchu se napne ve vakuu jako balón (publikováno Accademií del Cimento v roce 1667). Torricelliho pokus dal fyzice nízkých tlaků a současně i meteorologii jednotku tlaku plynu dodnes užívanou. (V současné době bylo navrženo, aby byla na paměť Torricelliho tato jednotka nazvána torrem a je již některými autory užívána.)

Za několik let potom magdeburský OTTO v. GUERICKE, snad ani neznaje Torricelliho objev, konstruoval první vývěvu s dřevěným pístem a válcem těsněným vodou. Pokusem s polokoulemi (tzv. magdeburskými), které po vyčerpání od sebe nemohlo odtrhnout ani několik párů koní (prý 1654), předvedl jev v té době překvapující. Guericke své pokusy uveřejnil v roce 1672 ve spisu „*Experimenta Nova (ut vocantur) Magdeburgica de Vacuo Spatio*“. V té době již konstruovali R. HOOKE pod Boylevým vedením vývěvu podobnou Guericckově, avšak bez vodního těsnění a BOYLE s PAPINEM vývěvu dvouválcovou. Boyle vývěvu potřeboval pro své pokusy týkající se mechaniky plynů, z nichž vyplynul známý Boyleův zákon. Dlouhou dobu potom bylo vakuum vždy spíše objektem artistických hříček pro pobavení společnosti než předmětem vědecké práce. Objekty bádání fyziků a přírodovědců NEWTONA, LAPLACEA, PRIESTLEYE, LAVOISIERA a FARADAYE byly zcela jiné než problematika procesů v plynech o nízkém tlaku. Tato skutečnost se projevila i ve vývoji vývěv, které ustrnuly až do poloviny minulého století. Tak ještě Bianchiho vývěva (1856) nepřináší žádnou novou myšlenku a využívá jen dokonalejší řemeslné techniky. Rozvoj ostatních fyzikálních disciplín však mezitím přinesl mnohé poznatky, které v současné době fyzika nízkých tlaků přejímá buď jako výchozí (kinetická teorie plynů), nebo jako okrajové, jimiž navazuje na obory ostatní (fyzika výbojů v plynech, fyzikální chemie). Tak v 18. století položil D. BERNOULLI (1738) základy kinetické teorii plynů výkladem tepla na základě zákonů mechaniky. Předpokládal, že teplo je kinetickou energií jednotlivých molekul pohybujících se zcela chaoticky s rychlostí tím větší, čím je plyn teplejší. Dále ukázal, že je možno tlak plynu vyložit silovým působením molekul při dopadu na stěnu. Potvrzení těchto hypotéz a další rozvoj poznatků o vlastnostech plynů závisely na experimentálních možnostech, jež v té době zcela nepostačovaly k řešení těchto problémů. Proto teprve v první polovině minulého století dostala kinetická teorie pevný základ v principu ekvivalence tepla a práce, který podpořil Bernoulliho hypotézy o podstatě tepla. Vznikl nový fyzikální obor – termodynamika, zabývající se vztahy mezi energií tepelnou a mechanickou a zákonitostmi jejich vzájemné přeměny. Rozvoj termodynamiky v minulém století je významný pro fyziku nízkých tlaků i v ostatních směrech (např. termodynamika fázových změn, termodynamika chemické rovnováhy).

Z druhé strany poskytují metody získávání nízkých tlaků možnosti experimentální

práce v jiných fyzikálních oborech. Pokusy GEISSLEROVY, HITTORFOVY a PLÜCKEROVY s průchodem elektrického proudu zředěnými plyny ukázaly začátkem druhé poloviny minulého století na praktické použití nízkých tlaků a daly tím nový podnět k další práci. Tak Plücker v roce 1859 objevil nové (později zvané „katodové“) paprsky. Současně přitom zjistil pokles tlaku v trubici, v níž probíhá výboj; v dnešní době se tohoto efektu využívá v iontových vývěvách jako nové metody pro získávání nízkých tlaků. Experimenty se zředěnými plyny s sebou přinesly i vyšší nároky na vývěvy. Proto byla obrácena pozornost k jejich zdokonalení. Tehdejšími vývěvami bylo možno získat nízký tlak přibližně 10 mm Hg, což naprosto nepostačovalo při pokusech s výbojem v plynu. Geissler proto použil vlastní vývěvy se rtuť (1855), která myšlenkově vycházela z Torricelliho pokusu: ve skleněném válci se pohybovala střídavě nahoru a dolů rtuť vhaněná do něho z pomocné nádoby zdvihané a spouštěné. Experimentální prostor byl s vývěvou spojen přes dvojcestný kohout, kterým se otáčelo tak, aby při pohybu rtuť dolů proudil vzduch do vývěvy a při pohybu nahoru byl vzduch vytlačován ven do atmosféry. Vývěvu zdokonalil TÖPLER (1862), a to tak, že v ní užil barometrického uzávěru a připojil s výhodou čerpaný prostor k spodnímu konci válce, čímž nahradil nespolehlivý kohout samočinně působícím uzávěrem. Těmito vývěvami bylo možno snadno získat tlaky plynů nižší než je tlak par rtuť (přibližně  $1 \cdot 10^{-3}$  mm Hg při 20°C) ovšem až po delší době čerpání. Tyto vývěvy čerpají pouze plyny a ty páry, které nekondenzují při stlačení nasátého objemu na atmosférický tlak, nutný k vytlačení plynu ven do atmosféry; tak např. vodní páru nečerpají, a bylo proto nezbytné vodní páru odstraňovat jiným způsobem (např. vysušováním koncentrovanou kyselinou sírovou). Díky těmto vývěvám byly získány první poznatky z výbojů v plynech při nižších tlacích (doutnavý výboj), byly objeveny vedle „katodových paprsků“ (elektronů) též „kanálové paprsky“ (ionty) a tím získány základní poznatky o stavbě hmoty. V roce 1879 získal CROOKES celkový tlak  $3 \cdot 10^{-3}$  mm Hg rtuťovou vývěvou (Sprengelovou, založenou na odvádění plynu pomocí sloupečků rtuť, klesajících v barometrickém uzávěru), kysličníkem fosforečným (k vazbě vodních par), sírou (k vazbě rtuťových par) a mědí (k vazbě par síry) a provedl pokusy s katodovými paprsky (*Strahlende Materie, oder der vierte Aggregatzustand – Zářící hmota nebo čtvrté skupenství*, Lipsko 1894, 4. vydání) a radiometrem – 1873. Současně s těmito pokusy vzrůstaly i zkušenosti s materiály vhodnými ke konstrukci vývěv, spojovacích částí a vlastních experimentálních trubic, jakož i zkušenosti s jejich zpracováním. Tak např. Geissler prováděl sám první vakuové sklářské práce a HITTORF první zatavil kov do skla. Získání tlaků nižších než 1 mm Hg přineslo problém jejich měření. Torricelliho prostý manometr se pro měření nízkých tlaků nedá použít. V roce 1874 vypracoval MCLEOD metodu měření velmi nízkých tlaků pomocí tzv. kompresního manometru, kterého se užívá dodnes jako přesné kalibrační metody.

Tyto technické a technologické poznatky, i když skrovné, umožnily EDISONOVI konstruovat s úspěchem první žárovku s uhlíkovým vláknem, žhaveným v evakuované skleněné baňce. Díky Edisonově houževnatosti a podnikavosti se z primitivní meto-

díky čerpání výbojových trubic sloužících výhradně experimentu stal technický obor, který se velmi rychle rozvíjel. V roce 1892 konstruoval FLEUSS kovovou vývěvu s pístem těsněným olejem, v níž olej vyplňoval škodlivý prostor; tato vývěva byla schopná dosahovat, byť s ještě malou čerpací rychlostí, tlaků řádově  $10^{-4}$  mm Hg (tlaku permanentních plynů, tj. bez složek par vody a oleje užitého ve vývěvě), a uplatnila se jak v průmyslu žárovek, tak později i v průmyslu vyrábějícím elektronky. V posledním desetiletí minulého století přichází objev za objevem: ROENTGENŮV objev *X*-paprsků, objev emise elektronů z kovu při ozáření světlem (fotoemise elektronů), Edisonův objev emise elektronů z rozžhaveného kovu (termoemise) a výklad jevu RICHARDSONEM. Aby bylo možno blíže vysvětlit tyto dva různé jevy emise, provedli LANGMUIR a SCHOTTKY řadu experimentů, při nichž bylo zvlášť nutné použít co nejnižších tlaků. Experimenty ukázaly, že emise elektronů je specifickou vlastností kovů a že při dostatečně nízkém tlaku v okolí kovu je stálá a na tlaku nezávislá. Tyto objevy otevřely cestu ke COOLIDGEOVĚ konstrukci rentgenky se žhavým vláknem a k vynálezu první elektronky – diody FLEMINGEM roku 1904.

Druhá polovina minulého století přinesla další rozvoj kinetické teorie plynů. KRÖNIG a CLAUSIUS ukázali užitím impulsové věty za předpokladu, že se molekuly pohybují přímočaře mezi dvěma srážkami, na úměrnost tlaku se součinem kinetické energie molekul a jejich koncentrace. Z výpočtu této energie ( $E_k = \frac{3}{2}kT$ , kde  $k$  je konstanta, později nazvaná podle Boltzmannova a  $T$  je absolutní teplota plynu) na základě stavové rovnice plynů, bylo možno určit rychlost molekul. Tato rychlost byla překvapivě velká (stovky metrů za vteřinu) a zdálo se na základě srovnání této rychlosti se známou mnohem menší rychlostí difúze dvou plynů nebo s tepelnou vodivostí plynů, že běží o chybný výpočet a mylné předpoklady. CLAUSIUS (1858) ukázal, že v těchto jevech se významně uplatní tzv. střední volná dráha molekul (tj. střední hodnota drah molekul mezi dvěma srážkami) a brzy nato MAXWELL její hodnotu vypočítal a současně podrobně vypracoval teorii rozdělení rychlostí molekul (do té doby se předpokládalo, že všechny molekuly mají co do velikosti stejnou rychlost). Hodnotu střední volné dráhy za různých podmínek experimentálně ověřil až M. BORN v roce 1920. LOSCHMIDT za zjednodušujících předpokladů o kulovém tvaru molekul vypočítal jejich velikost a koncentraci na základě vztahu pro střední volnou dráhu a specifické váhy kapalného plynu. Velkým úspěchem kinetické teorie byl experimentální průkaz, že viskozita a tepelná vodivost plynu jsou za středních tlaků na tlaku nezávislé. Tato nezávislost byla předpověděna kinetickou teorií a odpůrci této teorie jí používali jako hlavního argumentu proti kinetické teorii. V dalším byly představy kinetické teorie rozšířeny i na plyny s molekulami se složitější stavbou (na molekuly víceatomové, jejichž energie zahrnovala i energii rotační a vibrační atomů tvořících molekulu). Kinetickou teorii dovedl k vrcholu BOLTZMANN, který vyložil její souvislosti s termodynamikou, zejména vztah mezi entropií termodynamického děje a pravděpodobností stavů, jimiž děj prochází. Teoretické vývody kinetické teorie trpěly nedostatkem experimentálního ověření, který byl způsoben tehdejší nepostačující experimentální technikou.

Počátkem našeho století vznikají první fyzikální problémy v oboru nízkých tlaků a jsou úspěšně řešeny Wolfgangem GAEDEM a Martinem KNUDSENEM. Experimentální práce Knudsenova, která užívala nových poznatků vakuové techniky, prokázala správnost vývodů kinetické teorie i v podmínkách velmi nízkých tlaků, tj. tlaků, kdy střední volná dráha je větší než rozměry uzavřeného prostoru. Knudsen odvodil zákonitosti proudění plynu při velmi nízkých tlacích a mimo jiné konstruoval tzv. molekulární manometr (1909–1911). V té době vypracoval Gaede v rychlém sledu za sebou rotační rtuťovou vývěvu (1905), molekulární vývěvu (1912), která spočívala na zcela novém principu strhování molekul čerpaného plynu rychle se otáčejícím válcem a konečně difúzní vývěvu (1913), čerpající na základě difúze molekul plynu do proudu páry a jejich transportu proudem páry. Gaede předložil první, i když velmi hrubý rozbor čerpacího mechanismu molekulární a difúzní vývěvy a formuloval pojem čerpací rychlosti vývěvy. Brzy po Gaedem konstruoval vývěvu na témže principu LANGMUIR, avšak ve výhodnější úpravě. Difúzní vývěva přinesla metodice získávání nízkých tlaků zcela nové možnosti v rychlém a pohodlnějším získávání nízkých tlaků i ve větších objemech. Je možno proto považovat dobu jejího zrodu za mezník ve vývoji vakuové techniky. V té době byly současně vypracovány nepřímé měřicí metody, které tvoří základ současných metod k měření nízkých tlaků. Jsou to metody: tepelného manometru (PIRANI 1906), viskozního manometru (LANGMUIR, DUSHMAN 1913–1915) a ionizačního manometru (BUCKLEY 1916). Byly objeveny metody čerpání založené na vazbě plynů chemickou reakcí (MALIGNANI 1894 – vazba kyslíku jako části zbytkových plynů červeným fosforem) a sorpcí na pevné látce za nízké teploty (DEWAR 1904). Konečně uvedme, že v této době prokázal Dunoyer experimentálním studiem molekulárních svazků další, do té doby neověřené důsledky kinetické teorie. Množství těchto nových poznatků, které byly v té době nashromážděny, ještě nevytváří nový fyzikální obor. Jednotlivé práce se většinou konaly izolovaně a bez vědomí vzájemné hlubší souvislosti jednotlivých objevů. Pokud se tyto fyzikální poznatky označovaly společným jménem, byl to název „fyzikální základy vakuové techniky“ a nikoliv „vakuová fyzika“.

Období dalšího rozvoje oboru je vyznačeno rychlým rozvojem průmyslu výroby vakuových systémů – žárovek, elektronek, rentgenek, plynem plněných žárovek, výbojek a ostatních světelných zdrojů. Postupující elektrifikace způsobila velký zájem o produkci světelných zdrojů a brzy nato následovala i velká poptávka po rozhlasových přijímačích s elektronkami. Elektrovakuový průmysl se stal předmětem podnikatelské pozornosti, a proto se fyzikálních poznatků ujali technici a technologové, kteří dosavadní metody značně technicky zdokonalili. Do vakuové techniky vstupují nové materiály a rozvíjí se i průmysl těchto materiálů (např. výroba wolframu a molybdenu, výroba vhodných skel pro vakuové systémy). Období mezi dvěma světovými válkami je poněkud chudší na nové fyzikální poznatky vzhledem k období předcházejícímu. Bylo by však nesprávné domnívat se, že vědecká práce v oboru zcela ustala. Především je nutno uvést dílo Irvinga Langmuira, které se zabývá problematikou sorpce plynů na pevných látkách, přenosem tepla, kondenzací a vypařováním a che-

mickými reakcemi při nízkých tlacích. Nové poznatky z fyziky výbojů v plynech zasáhly podstatně do rozvoje metod měření a získávání nízkých tlaků. Tak je možno připomenout MEYERENOVY, MIERDELOVY a SCHWARZOVY práce týkající se pohlcování plynu ve výboji a práce PENNINGOVY s výbojem v podélném magnetickém poli, z nichž vyplynula konstrukce výbojového manometru s magnetickým polem (1936).

Difúzní vývěvy zdokonalili CRAWFORD (využil Lavalovy trysky ve vývěvě), T. L. HO (systematicky studoval různé tvary trysek) a zejména BURCH (1929), který kromě rtuti použil jako pracovní kapaliny ve vývěvě frakce minerálního oleje s vysokým bodem varu. Tyto vývěvy mají značné výhody vzhledem ke rtuťovým, zejména proto, že nevyžadují užití kondenzace par pracovní kapaliny při velmi nízké teplotě, jako je tomu u rtuťových vývěv. V roce 1936 vývěvu dále zdokonalil HICKMAN uspořádáním tryskového systému tak, že ve vývěvě probíhala při provozu stálá frakční destilace na různé složky, z nichž každé se užívá pro jinou trysku. Mezní tlak této vývěvy je v řádu  $10^{-8}$  mm Hg. U nás konstruoval parafínovou difúzní vývěvu prof. DOLEJŠEK (ve Spektroskopickém ústavu Karlovy university), v níž se jako pracovní kapaliny užilo levného parafínu.

Je těžko na základě publikací posoudit, jak pokročil obor během druhé světové války; většina prací se objevuje až s poválečnými daty a není snadné rozlišit rozsah práce během války a v době těsně po ní. Je však jisto, že válka měla velký vliv na rychlejší rozvoj elektrovakuového průmyslu, zejména na konstrukci a výrobu mikrovlnných elektronek, jichž se užívalo v radiolokačních přístrojích prvně za války použitých. Jaderná fyzika ovlivnila v tomto období rozvoj vakuové techniky zejména směrem k problémům konstrukce velkých vakuových systémů urychlovačů (cyklotronů a synchrotronů). Fyzika výbojů v plynech a studium procesů na povrchu pevných látek se zajímaly o metody, které dovolovaly získat co nejnižší tlaky, mnohem nižší než doposud. Oba dva směry vyžadovaly intenzivní experimentální práci, zaměřenou na studium procesů probíhajících ve vývěvách, na nové měřicí metody a v neposlední řadě též na soustavnou práci v technologii vakuových materiálů. Perspektivy široké využitelnosti v nejrůznějších průmyslových odvětvích způsobily příliv hmotných prostředků do dosud skromných laboratoří, jež byly po všech stránkách vybaveny. To podstatně přispělo k získání dalších poznatků v problematice nízkých tlaků.

Především se věnovala pozornost měření nízkých tlaků. Studovaly se starší práce s ionizačním manometrem a byla vyslovena (NOTTINGHAMEM 1949) a brzy ověřena i objasněna (BAYARDEM a ALPERTEM 1950) domněnka o existenci dolní hranice měřicího oboru tohoto manometru. Konstruován byl ionizační manometr, který byl schopen měřit tlaky až  $10^{-11}$  mm Hg. Snaha po dalším snížení této hranice vedla ke konstrukci nového typu výbojového manometru s magnetickým polem (HOBSON a REDHEAD 1958). Současně s tím byly vypracovány první hmotové spektrometry vhodné k měření parciálních tlaků (omegatron — ALPERT a BURITZ 1954). Práce s manometry k měření velmi nízkých tlaků objevila nové sorpční metody pro získávání těchto tlaků (čerpací efekt ionizačního manometru) a dala vznik tzv. metodice ultravysokého vakua. Byly vypracovány nové metody pro získávání nízkých tlaků:

metoda ionizací molekul, jejich přenosem a rekombinací v prostoru výstupního otvoru vývěvy (FOSTER 1953), metoda sorpce molekul na obnovované vrstvičce aktivního kovu (HERB 1953), metoda kondenzace molekul při nejnižších teplotách (JACKSON, LAZAREV 1956). Byly konstruovány vývěvy s dvěma rychle se otáčejícími rotory (Rootesovy), které mají velké čerpací rychlosti a získávají nižší tlaky než dosavadní rotační vývěvy; dále byla konstruována molekulární vývěva, kterou je možno užít k získávání ultravysokého vakua. Staré, ale stále užívané difúzní vývěvy byly podrobně studovány. Byly vypracovány nové teorie čerpacího mechanismu těchto vývěv (JAECKEL 1949, SKOBELKIN a JUŠČENKOVÁ 1954) a byly studovány též vedlejší procesy přidružené k čerpacímu procesu ve vývěvách (HAEFER). Konečně byla v poslední době značně zdokonalena i technika ventilů, konstrukce kovových vakuových systémů a velkých aparatur a ostatního pomocného zařízení, měřicího i ovládacího.

Díky těmto pracím se vzájemně spojil dosud roztříštěný okruh problémů, které tvoří vědní základy vakuové techniky. Metody a zaměření této problematiky se značně liší od vědních oborů, k nimž byla dosud přiřazována (termodynamiky, aerodynamiky). Tak vznikl nový fyzikální obor – fyzika nízkých tlaků –, zabývající se studiem procesů povrchových i objemových, které probíhají v uzavřeném prostoru, v němž je plyn, pára nebo jejich směs o nízkém tlaku (v tzv. vakuovém systému) a způsobujících změny ve výskytu částic v libovolném elementu tohoto prostoru. Výborná monografie S. Dushmana z roku 1949 nese ještě název „Vědní základy vakuové techniky“, v letech 1955–57 se však již v časopisecké literatuře začíná objevovat název „vakuová fyzika“ a „fyzika nízkých tlaků“; v roce 1958 je do kompendia „Handbuch der Physik“ poprvé vložen oddíl pod názvem „Obecná fyzika vakua“ (autor R. Jaeckel), a od té doby je již název fyziky nízkých tlaků užíván obecně, např. pro vědecké konference oboru, jako označení oddílu fyzikálních referativních časopisů apod.

Využití dosavadních výsledků fyziky nízkých tlaků, z nich pak metodiky získávání a měření nízkých tlaků, je rozsáhlé jak v různých vědních oborech, tak i v technice. Vakuové metodiky se užívá ze dvou obecných důvodů, a to:

1. Vakuová metodika poskytuje jediný způsob, jak umožnit částicím volný pohyb v prostoru, a to na základě zmenšení koncentrace ostatních částic, jehož důsledkem je zvětšení volné dráhy částice. (Za normálního tlaku může např. elektron urazit beze srážky střední dráhu řádově rovnou desetitisícině milimetru, při tlaku  $10^{-6}$  mm Hg je volná dráha elektronu řádově desítky metrů. Za těchto okolností je možno užívat volného pohybu elektronů k snadno ovladatelnému přenosu náboje, resp. energie např. v experimentálních aparaturách, elektronkách, elektronových mikroskopech apod.)

2. Vakuová metodika umožňuje, aby procesy probíhající v objemu a zvláště pak na povrchu látek probíhaly bez účasti vedlejších, obvykle nežádoucích procesů. (Za normálního tlaku vzduchu se kovové vlákno zahřáté na vysokou teplotu okyslíčí během zlomku sekundy, na jednotku jeho povrchu dopadá za sekundu přibližně  $10^{23}$  molekul kyslíku; při tlaku  $10^{-7}$  mm Hg na něho dopadá jen  $10^{13}$  molekul, a proto okysličení probíhá  $10^{10}$  pomaleji.)



Velmi často se užívá vakuové metodiky z obou důvodů zároveň. Konkrétní uplatnění má vakuová metodika nejen v elektrovakuovém průmyslu, tj. při výrobě elektronek, polovodičových elementů a světelných zdrojů, ale i v průmyslu chemickém, průmyslu optiky a zvláště pronikavé uplatnění má v moderní vakuové metalurgii, která dokáže připravit, resp. zušlechtit kovové materiály o vynikajících vlastnostech. Konečně vakuová metodika se uplatňuje i v potravinářském průmyslu a v lékařských disciplínách.

Závěrem je mi milou povinností vyjádřit dr. J. Smolkovi dík za kritické připomínky k rukopisu tohoto referátu.

## RYCHLOSTNÍ OPTIMALIZACE SLOŽENÝCH RAKET

KAREL MIŠOŇ, ZDENĚK PÍRKO, Praha

V článku se sledují různá hlediska pro dosažení maximální rychlosti složené rakety při pevně předepsané hodnotě úhrnné počáteční hmoty. Pro získání pohledu do problematiky úlohy je prvních pět odstavců věnováno dvoustupňové raketě. Teprve v dalších osmi odstavcích je řešen obecný případ  $n$ -stupňové rakety. Jednotlivá pojetí jak při raketě dvojstupňové, tak i při  $n$ -stupňové uvádějí výsledky pro případ různých výtokových rychlostí v jednotlivých stupních i jejich specializaci pro společnou hodnotu výtokových rychlostí ve všech stupních.

Dva odstavce (9 a 10) jsou věnovány numerické ilustraci zaměřené k dosažení obou prvních kosmických rychlostí. Vedle idemparemetrových raket je zdůrazněn i případ raket ekviparemetrových a význam geometrické standardizace.

Článek dodržuje důsledně dříve užitá označení\*).

Sestavení:

1.  $V$ —optimalizace dvojstupňové rakety
2. Specializace  $U_1 = U_2$ .  $R$ —optimalizace
3. Mezistupňové parametry v podmínkách  $V_2$ —optima
4. Odlehčení z bezimpulsového odpoutání strukturální hmoty
5.  $V$ —optimalizace dvojstupňové  $q$ -idemparemetrové rakety
6.  $V_n$ —optimalizace složené rakety
7. Specializace  $U_i = \text{idem}$  ( $R$ —optimalizace)
8. Specializace  $q_i = \text{idem}$  (Raketa ekviparemetrová)
9. Numerický příklad. Dosažení druhé kosmické rychlosti

---

\*) Pokroky MFA 9 (1964), 223, 267.