

# ZÁHADA VÍROVÉ TRUBICE aneb Trubice bláznů



Co je příčinou rozdělení vzduchu v Ranque-Hilscově trubici na horkou a studenou frakci?

Odpověď firmy Vortec: *Maxwellův démon!*

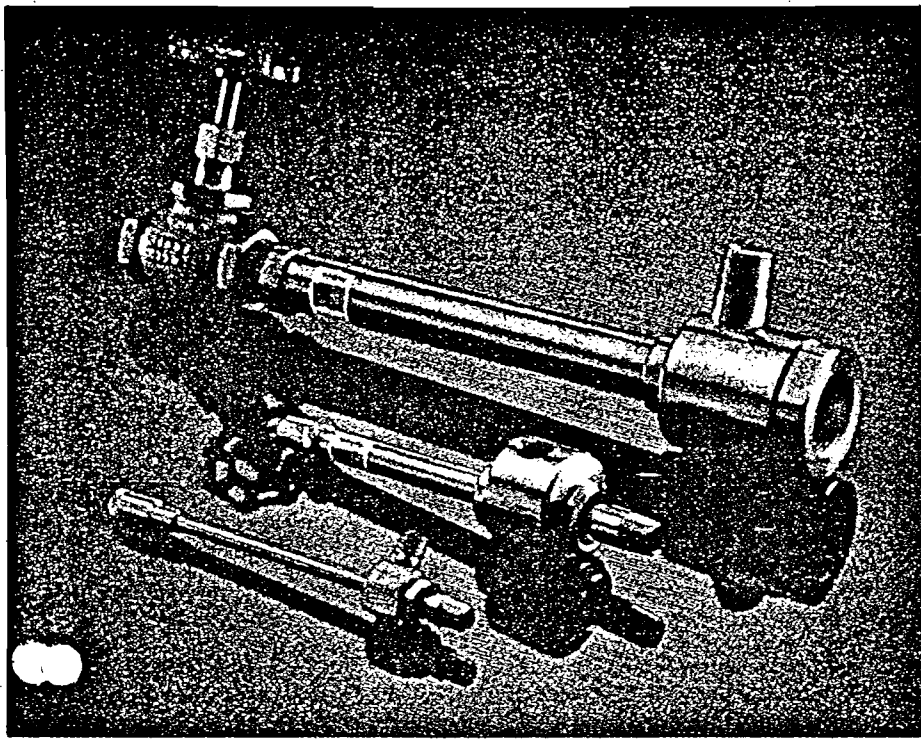
## Historie

Tento článek vznikl na objednávku redakce VTM se zcela určitým záměrem: objasnit a vysvětlit z fyzikálního hlediska problematiku týkající se vírové trubice, a uzavřít tak polemiku, která se na stránkách VTM v průběhu loňského roku rozvinula.

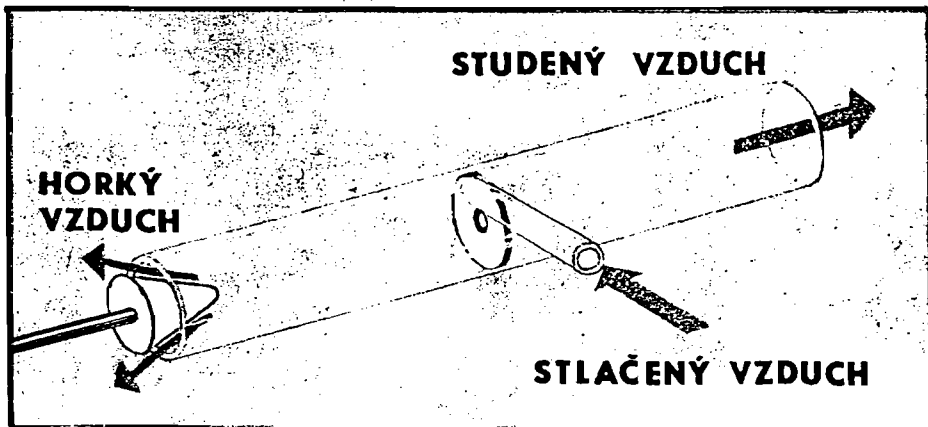
Shánění materiálů nebylo snadné, trubice je přísně utajena i v encyklopediích, takže autorovi tohoto článku trvalo dost dlouho, nežli se danému vynálezu dostal na stopu, která vedla přes knížku *Létající cirkus fyziky* (J. Walker: *The flying circus of physics*; Wiley, New York 1975). Mezitím se ozvali i čtenáři, a tak vznikla druhá stopa vedoucí k firmě Vortec, která tyto trubice skutečně vyrábí a zřejmě dobře prosperuje. Jaká je však tedy skutečná historie vynálezu?

Effekt, na němž je vírová trubice založena, byl poprvé pozorován francouzským fyzikem Georgem Ranquem kolem roku 1930. Již on chtěl vytvořit malou firmu pro využití efektu, ale rychle zkrachoval. Když pak předložil svoji práci francouzské vědecké společnosti, byla přijata s nedůvěrou a nezájmem a jeho článek z roku 1933 byl dlouho ignorován.

Poté vírová trubice zmizela na léta z obzoru. Až ve čtyřicátých letech se jeven opět začal zabývat v USA Rudolf Hilsc, který nakonec publikoval první známý článek o jevu s názvem *Použití expanze plynů v centrifugálním poli v chladicích procesech*. (*Rev. Sci. Instr.* 18 (1947), 108). Mě větší štěstí a dokonce byl nějakou dobu považován za autora, takže se trubici začalo říkat Hilscova trubice. Od té doby bylo n toto téma publikováno značné množství článků, které jsou však dosti roztržité p různých vědeckých a inženýrských časopisech. Později se pro přístroj začal používat



1



2

název Ranque-Hilschova nebo vírová trubice. Dnes se vývojem a využitím těchto trubíc zabývá několik výzkumných i aplikačních skupin na světě a z výrobců je asi nejznámější firma Vortec Corporation z Cincinnati (Ohio, USA), která má dnes již 27letou tradici. Na obr. 1 vám tedy představujeme tři vírové trubice této firmy, určené pro tři různé oblasti použití.

#### Pohyb vzduchu v Ranque-Hilschově trubici

Původní uspořádání Ranquova experimentu (obr. 2) je velmi prosté. Skleněná trubice je rozdělena přepážkou s otvorem na dvě části. V těsné blízkosti přepážky je umístěna vstupní tryska (na obr. 2 zleva), kterou se do trubice vhání stlačený vzduch ve směru tečném k povrchu trubice. Levý

konec je částečně uzavřen ventilem. Překvapivým výsledkem takového uspořádání experimentu je to, že z levé strany trubice vychází vzduch ohřátý, z pravé vzduch ochlazený. Efekt je velmi silný, vzduch se zahřívá až na 200 °C a ochlazuje až na -50 °C.

Na obr. 3a je průřez modernizované trubice, odpovídající schématu užitému v průmyslově vyráběných trubcích z obr. 1. Pravá část zobrazuje komoru se vstupem stlačeného vzduchu, vírovou komůrkou a uzavěrem, který tvoří chladný konec trubice. Levá část zobrazuje výstup z trubice na horkém konci uzavřeném ventilem s regulačním šroubem. Na obr. 3b je řez vstupní komory s vírovou komůrkou. Ve vírových trubcích firmy Vortec je komůrka vytvořena vložkou, vylisovanou z plastické hmoty (na

obou obrázcích je zobrazena světle hnědou barvou). Vnitřní prostor vírové komůrky tvoří vybrání v této vložce. Na obr. 3b vidíte přední stěnu vložky, která se při vložení do trubice přitiskne ke stěně vstupní komory, a spojí tak vírovou komůrku s vlastní trubicí, která je na obrázku 3a zkrácena. Vzduch postupuje do vírové komůrky zářezy v její stěně (na obr. 3b je jich šest); tyto zářezy slouží jako trysky, kterými vzduch vniká přibližně tangenciálně do vírové komůrky rychlostí blízkou rychlosti zvuku. S chladným koncem je komůrka spojena otvorem v zadní (pravé) části výlisku, který musí být menší nežli vstupní otvor do vlastní trubice. Vzhledem k tečnému pohybu vhněděného vzduchu stačí poměrně malý rozdíl v těchto rozměrech, aby všechen vzduch postupoval do levé části, tj. do vlastní trubice.

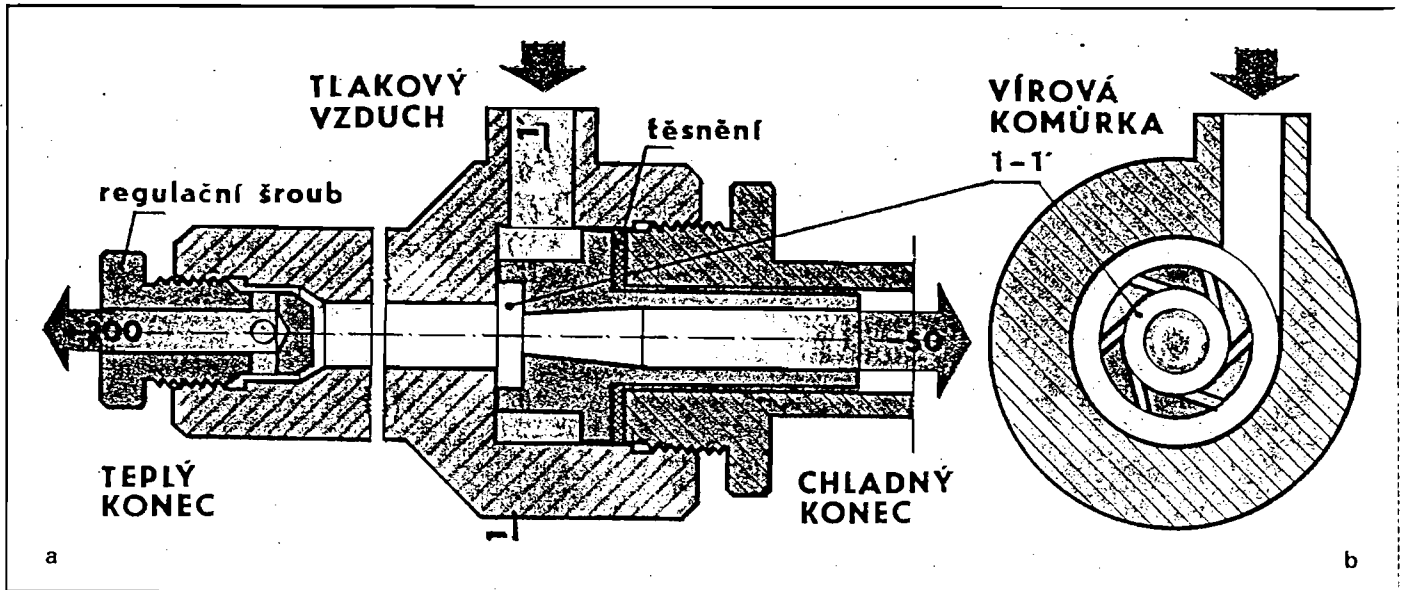
Po zapojení přívodu vzduchu je velmi rychle dosažen stacionární stav — tedy stav dynamické rovnováhy, který lze popsat takto: Proud vzduchu je odstředivou silou držen v blízkosti stěn trubice a postupuje po spirále směrem doleva, přičemž rotuje velkou úhlovou rychlostí dosahující až desítek tisíc otáček za sekundu. Na levém konci trubice je umístěn výstupní ventil, kterým je možné regulovat množství vzduchu odcházejícího tímto koncem trubice, takzvaným „horkým“ koncem, neboť vzduch zde vystupuje silně zahřátý. Část vzduchu se však odráží směrem zpět k pravému konci, takzvanému „studenému“ konci trubice, neboť na této straně vychází vzduch silně ochlazený. Tato část proudu postupuje doprava opět za současného vířivého pohybu, prochází vírovou komůrkou a otvorem na jejím opačném konci vychází z přístroje. Regulace chlazení a ohřívání, jakož i poměrné množství obou složek se provádí výstupním ventilem.

Ve stacionárním pracovním režimu se tedy v trubici pohybují dva proudy vzduchu; horká a studená frakce. Oba tyto proudy rotují ve stejném směru kolem osy trubice, ale horká frakce, která tvoří vnější obal proudu, se přitom posunuje směrem doleva podél této osy, kdežto studená frakce, tvořící vnitřní část proudu, směrem doprava. Schematicky jsme to zobrazili na obr. 4a, b, ze kterých budeme dále vycházet.

#### Tajemství vírové trubice

Popis je sice pěkná věc, ale není z něj zřejmě to základní, co nás zajímá: Proč? Proč se vzduch na jednom konci tohoto uspořádání zahřívá a na druhém chladí? My zde podáme vysvětlení, které uvádí výrobce ve svém prospektu; vysvětlení, které je sice dosti plausibilní, ale není zcela uspokojivé. Celé tajemství vírové trubice prý spočívá v tom, že silná turbulence sevře obě rotující frakce, studenou a horkou, do jednoho rotujícího proudu plynové hmoty tak, že obě frakce rotují stejnou úhlovou rychlostí. Na obr. 4b je tento pohyb znázorněn v řezu, kolmém na osu přístroje.

Srovnajme nyní pohyb plynu v trubici s obyčejným vírem, který vytvoří voda ve vaně, když vytéká do odpadu. Víte ze zkušenosti, že se ve středu víru otáčí voda rychle-

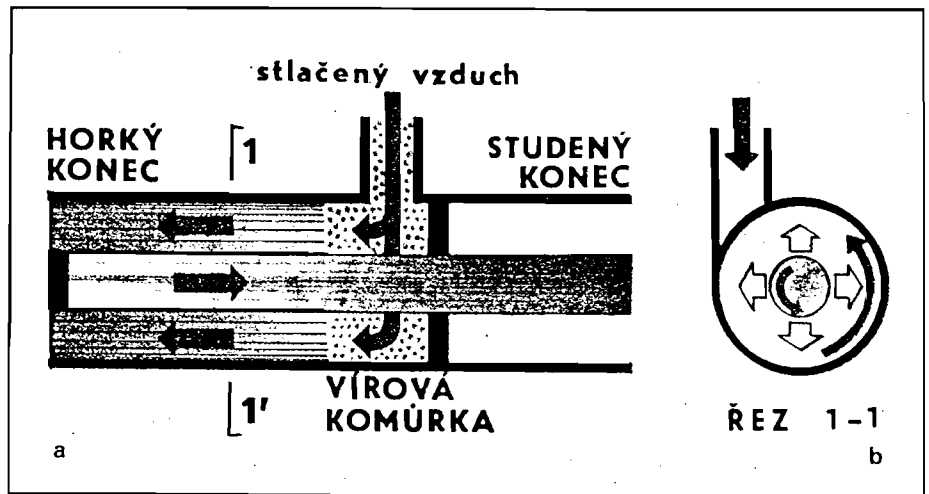


3

ji nežli na jeho okrajích. Je to důsledek zákona zachování momentu hybnosti: součin tangenciální složky rychlosti a poloměru musí zůstat konstantní. Jestliže se tedy zmenší poloměr na polovinu, musí se tangenciální rychlost zvýšit na dvojnásobek. Takový vír autor popisu nazývá volným vírem na rozdíl od víru vynuceného, kterým je vnitřní vír studené frakce ve vírové trubici, jehož rotace je vázána interakcí s vnějším vírem horké frakce. V této situaci je v důsledku vazby přes turbulenci úhlová rychlost konstantní a zmenšení poloměru na polovinu vede ke zmenšení tangenciální složky rychlosti rovněž na polovinu, tedy na čtvrtinu rychlosti, kterou by měl volný vír. Protože je kinetická energie úměrná čtvrtci rychlosti, je kinetická energie vynuceného víru šestnáctkrát menší ve srovnání s kinetickou energií volného víru (počítáno na stejné jednotky hmotnosti).

Kam se tedy poděje oněch  $15/16$  kinetické energie, které ztrácí studená frakce? To je údajně ta energie, která se promění v teplo a ohřeje horkou frakci. Na obr. 4b je zobrazena bílými šipkami ze středu k okraji. Zde ovšem můžeme namítnout, že samotná studená frakce musí nejprve projít vnějším vírem, takže vlastně jen vrací energii, kterou dříve dostala od předcházející porce plynu. Tato energie se však rozdělí do dvou částí, z nichž jednu s sebou odnese vystupující horká frakce a jen zbytek se vrátí spolu s plynem do frakce studené. Odsud plyne: čím více odchází horké frakce z trubice, tím je účinnější chlazení studené frakce; ale také: čím více odchází studené frakce, tím vyšší je teplota na horkém konci.

Výstupním ventilem je tedy možné činnost trubice regulovat. Pro vztahy mezi teplotami a množstvím plynu v obou frakcích existují vzorečky, ale firma dodává ke každé trubici početní pravítka, která nejspíše vycházejí z empirických údajů a umožňují rychle zjištění vhodného režimu.



4

#### Fyzikální pohled na problém

Výše uvedené vysvětlení strádá řadou závad, přestože pochází z laboratoře firmy, která má s přístrojem zřejmě největší zkušenosti. S velkou pravděpodobností jde o vysvětlení určené zákazníkovi, pro kterého je konečnou nejdůležitější, že se empiricky chová přístroj zhruba tak, jak to firmní expert předpovídá. První slabinou je již to, že takový model vůbec nic neříká o mechanismu, kterým se kinetická energie studené frakce mění na vnitřní energii frakce horké. A vůbec již není jasné, proč se také studená frakce ochlazuje. Ztráta kinetické energie plynu jako spojitěho pohybujícího se prostředí totiž vůbec neznamená snížení jeho teploty.

Popsat fyzikálně dobře jevy v Ranque-Hilschově trubici ovšem není vůbec jednoduché. Přes svoji konstrukční a uživatelskou jednoduchost jde o přístroj, jehož funkce je fyzikálně dosti složitá a hraje v ní řada jevů. To ale není v technické praxi ani u pří-

rozených přírodních jevů nic neobvyklého. Základní zákony fyziky popisují jevy většinou v čisté formě a experimenty k jejich zkoumání jsou upravovány tak, abychom se zbavili vedlejších efektů. Inženýři jsou při konstrukci strojů a přístrojové techniky vázáni praktickou potřebou a funkcí svých zařízení často studují poloempiricky. Trubici bylo v tomto směru věnováno mnoho prací, a tak si teď můžeme udělat malou exkurzi do těch oborů fyziky, které hrají v její činnosti roli.

**Hydrodynamický pohled:** Popis proudění v trubici je záležitostí hydrodynamiky, která vychází ze dvou rovnic: skutečnosti, že hmota kapaliny nemůže nikam zmizet, a Bernoulliovy rovnice, která vyjadřuje vztahy mezi tlaky a rychlostmi pohybu. Praktický závěr, který nám z teorie plyne, se pro naše účely dá vyjádřit dosti lapidárně: proudící kapalina nebo plyn s sebou strhávají okolní materiál vytvářeným podtlakem. Kdybychom trubici na horkém konci zcela

otevřeli, pak by rotující plyn vysál vzduch z okolí. Na horkém konci by pak proudil vzduch s horkou obálkou a chladným středem.

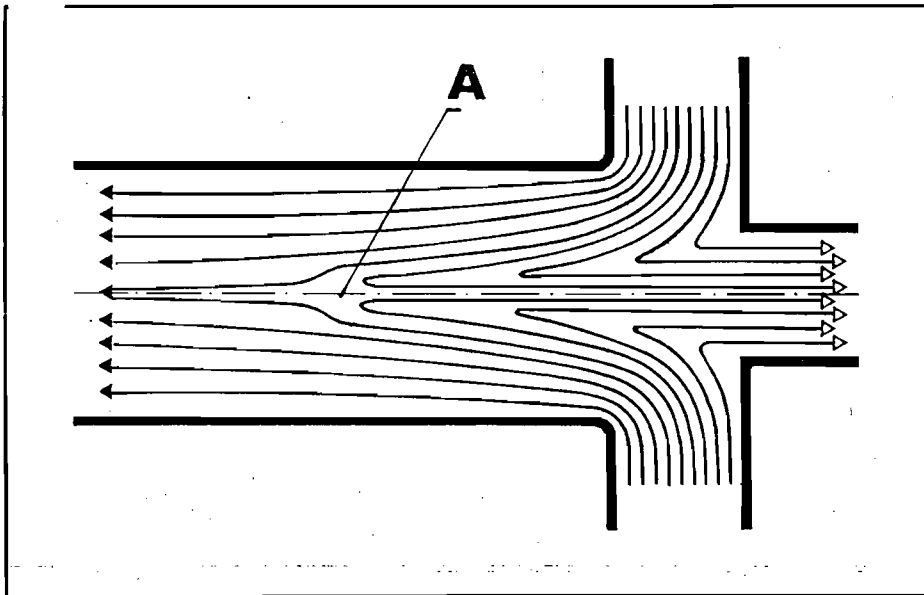
Ale pozor! Uvažujme, co by se stalo, kdybychom horký konec nekonečně prodlužovali? Odpověď zní, že při určité délce trubice by došlo k tomu, že by se část vzduchu z obálky začala stahovat k ose s tendencí k návratu plynu do opačného směru. Nakonec by také k proudění v opačném směru došlo i bez regulačního ventilu. Ve čtyřicátých a padesátých letech se našli nadšenci, kteří experimentálně ověřovali proudění krásnou, rafinovanou a přitom jednoduchou metodou — do trubice zavedli tenký drátek opatřený jemnými vlásky, které proud vzduchu orientoval ve směru svého pohybu. Tímto způsobem byl charakter proudění zmapován. Na obr. 5 je zobrazena mapa proudění pro teoretický model s nekonečnou otevřenou trubicí, dobře odpovídající realitě. Příčina k návratu plynu do

protisměru je ve ztrátě rychlosti rotujícího proudu v důsledku vnitřního tření (viskozity) a oslabení sacího efektu. Regulační ventil jen jakoby efektivně prodlužuje trubici a zároveň umožňuje proces řídit. Bod A na obrázku je zvláštním (singulárním) bodem, v němž je laminární proudění narušeno turbulencemi.

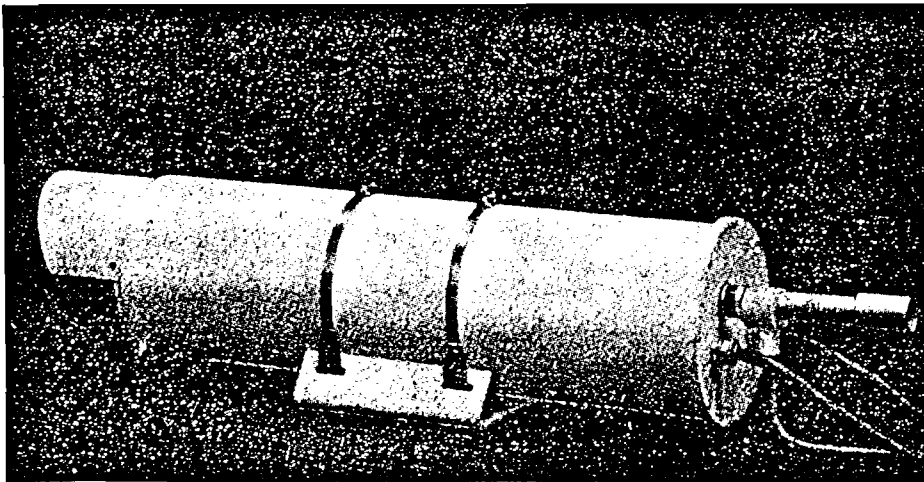
**Termodynamika** by nám měla pomoci odhadnout, jaké tepelné výměny se mohou v trubici dít. Podívejme se nejprve na první větu termodynamickou, což není nic jiného nežli zákon zachování energie pro procesy zahrnující výměnu tepla. Zapisujeme jej ve tvaru  $U = -pV + Q$ , kde  $U$  je přírůstek vnitřní energie systému,  $-pV$  je práce, kterou koná systém, jestliže vzroste jeho objem o  $V$  při tlaku  $p$ , a konečně  $Q$  je teplo dodané systému. Víme-li ještě, že vnitřní energie je pro ideální plyn rostoucí funkcí teploty  $T$ , vidíme okamžitě, co se děje při adiabatických procesech, jak se nazývají procesy s nulovou tepelnou výměnou ( $Q =$



6



7



0). Přírůstek vnitřní energie je v těchto procesech roven práci vykonané nad systémem, takže teplota roste, jestliže vnější síly konají práci nad systémem, a klesá, jestliže naopak koná práci systém. U ideálního plynu tedy dochází nutně k ochlazení, jestliže se plyn adiabaticky rozpíná, a k ohřátí, jestliže je plyn adiabaticky stlačován. U neideálních plynů k tomu přistupuje Joule-Thomsonův jev, ke kterému dochází, když se plyn rozpíná skrze škrticí klapku. V závislosti na složení plynu a jeho stavu pak může dojít při expanzi jak k dalšímu ochlazení, tak i k ohřátí.

**Maxwellův démon:** Víte, co je to za ďáblíka? Druhá věta termodynamická nám říká, že v přírodě nejsou možné procesy, při kterých by se pouze předávalo teplo od studenějšího objektu k teplejšímu. Maxwellův démon je modelová představa zařízení, které by pracovalo v otvoru spojujícím dva objemy plynu o různých teplotách tak, že by identifikovalo každý atom (molekulu) a otvíralo by dvířka jen těm molekulám, které by měly velkou kinetickou energii a směřovaly od studenějšího plynu k teplejšímu. Tím by se teplota studeného objemu snižovala a teplota horkého by rostla. Získali bychom tím takzvané perpetuum mobile druhého druhu, pracující v rozporu s druhým zákonem termodynamickým, neboť zvýšený rozdíl teplot bychom mohli využít k práci. Bohužel by přitom ďáblík spotřeboval více užitečné energie, nežli bychom ji byli schopni získat.

Ranque-Hilschova trubice vzbuzuje nedůvěru právě proto, že se zdá, jako by v ní docházelo k něčemu podobnému. Vždyť i my jsme mluvili o tom, že v ní studená frakce předává teplo horké. Vypadá to, jako by bílé šipky na obr. 4b řídil právě náš ďá-

blik. Není to ovšem pravda. V řadě prací byly měřeny teplotní a tlakové poměry v trubici jak podél osy, tak i napříč a ukázalo se, že tlak plynu směrem od středu k okrajům zhruba roste. S tepelnou výměnou mezi studenou a horkou frakcí tedy souvisí práce, kterou v konečné bilanci dodává kompresor. Není to také jev výjimečný; k podobné situaci dochází v takzvaném Couetově proudění, kdy plyn proudí ve vrstvě nad plochou. V tomto případě se naopak zahřívá vzduch proudící vrstvy a vzduch v blízkosti plochy se ochlazuje. Ostatně i obyčejná lednička svědčí o tom, že teplo může proudit od studenějšího objektu k teplejšímu, jestliže do tohoto procesu investujeme práci.

Jak tedy pracuje trubice: Především si řekněme, že k chladicímu efektu by došlo i při prostém rozpínání plynu. V trubici však plyn nejprve prochází fází, kdy ztrácí kinetickou energii na účet vnitřního tření (viskozity) při cestě k horkému konci. To je, společně s třením o stěnu trubice a s tepelnou výměnou od zpětné frakce, příčinou ohřevu horké části. Plyn vracející se ke studenému konci se nejprve rozpíná a poté předává část své tepelné energie horké frakci na tlakovém spádu. To je příčinou ochlazování studené frakce. Nejzajímavější by asi byl detailní popis tepelné výměny mezi oběma frakcemi na molekulární úrovni. K tomu zatím nemáme dostatek informace.

#### Aplikace vírových trubíc

Většinou jsou použity vírových trubíc založena na jejich chladicím efektu; oproti konvenčním chladicím metodám a přístrojům poskytují tyto trubice některé výhody. Patří k nim za prvé to, že ke chladicímu efektu dochází okamžitě, provoz trubíc je čistý, údržba jednoduchá, neboť neobsahují žádné pohyblivé části, mohou být tedy použity i v provozech, kde je nebezpečí vznícení od jiskry a kde tudíž jsou nevhodné přístroje s elektrickými spínači. Široké uplatnění našly tyto trubice v průmyslu jako chladicí přístroje při obrábění materiálů, broušení nástrojů, kde dobré chlazení zabírá vznik mikrotrhlín; byly například použity pro chlazení jehel průmyslových šicích strojů. V průmyslové praxi se vůbec často vyskytuje potřeba chlazení výrobků nebo jejich částí a v takových případech jsou mnohdy vírové trubice vhodným řešením. Jako příklad firma uvádí chlazení hrdel plastických lahví před jejich dalším zpracováním.

Výkonné vírové trubice jsou užívány pro chlazení ochranných helem, vest nebo celých obleků (obr. 6), kde slouží pro osobní chlazení pracovníka v horkém provozu. Malé trubice mohou být použity pro skoro bodové chlazení při testování a teplotním cyklování součástek a spojí v elektronických zařízeních. V jemné přístrojové technice mohou být trubice použity k odstranění vlhkosti vzorků vymrazením; takto byly užity u indikátoru rosného bodu a plynového chromatografu. Námraza, která se může tvořit na studeném konci trubice, naopak často komplikuje její použití, proto by

vzduch, který je do trubice vháněn, měl být pokud možno suchý. Trubice jsou také vhodné pro chlazení kontrolních a řídicích panelů nebo rozvodů, pro něž není vhodné ochlazování přímým větráním, které může vnést prach. Z exotičtějších příkladů použití uvedeme nakonec chlazení průmyslových televizních kamer (obr. 7). Je zde i možnost využití téhož principu s poněkud jiným konstrukčním řešením pro řešení klimatizace automobilů; jde zřejmě o velmi zajímavý, ale dosud asi nepoužitý a v praxi neprozkoumaný námět.

Zdá se také, že jako tepelný stroj je trubice poměrně málo efektivní, zvláště proto, že většinou bývá využit jen chladicí efekt. O jedné aplikaci, v níž jsou využity oba proudy vzduchu současně, jsem se dozvěděl od ing. Masáka. Jde o využití výkonné trubice v masokombinatech, kde se na jedné straně ochlazují prostory pro zpracování masa, na druhé se vyhřívají kanceláře. Závěr:

Trubice tedy existuje a není na ní nic fantastického ani protifyzikálního. K rozdělení vzduchu na horkou a studenou frakci dojde jako vždy na účet práce, která zde má svůj zdroj ve stlačeném vzduchu. Termodynamické zákony tedy prozatím nerušíme. V trubici probíhá současně řada elementárních fyzikálních dějů a jejich komplexní popis je mnohparametrická úloha, kterou můžeme řešit poloempirickými, poloteoretickými metodami. Takových dějů ovšem existuje v současných fyzikálních aplikacích na tisíce.

VOJTĚCH KOPSKÝ

Kresby Petr Přenosil  
Foto archiv  
Reprofoto Josef Soumar

*Redakce od vás dostala k problému „trubice bláznů“ desítky dopisů. Z nich jsme několik otiskli a na závěr vybrali ještě jeden velmi zajímavý, který objasňuje problematiku vírové trubice z termodynamického hlediska. Uvádíme jej v plném znění:*

#### ARANQUEHO JEV A II. TERMODYNAMICKÝ ZÁKON

Ranqueho jev je možno vysvětlit v souladu s II. termodynamickým zákonem. Vzduch do trubice vstupuje tangenciálně umístěným otvorem. Poměr tlaků za vstupním otvorem a před vstupním otvorem je nižší než poměrové číslo 0,528. Za těchto podmínek vzduch v nejužším místě dosáhne kritické rychlosti a za otvorem dále expanduje a dosáhne nadkritické rychlosti. Teplota proudícího vzduchu se snižuje. Plášť trubice mění směr proudění o 360°. Při nadkritické rychlosti vznikají v proudicím

vzduchu rázové vlny, které jsou termodynamickou změnou tlaku, teploty a entropie. Zvýšení teploty v rázové vlně způsobí sdílení tepla z rázové vlny do okolního proudění. Vzduch, který prochází rázovou vlnou, odevzdává tedy část své vnitřní tepelné energie vzduchu proudícímu v okolí rázové vlny. Po průchodu rázovou vlnou vzduch opět expanduje, ale vzhledem ke snížení jeho vnitřní tepelné energie je i dosažená rychlost nižší než u vzduchu, který procházel pouze okolím rázové vlny.

Tangenciální umístění vtoku způsobuje rotaci proudícího vzduchu. Zakřivení trubice působí prostřednictvím tlaku vzduchu jako odstředivá síla a vyvolává reakci — odstředivou sílu. Tlak vzduchu ve víru je nejvyšší u obvodu a snižuje se směrem ke středu víru. Odstředivá síla působící na molekuly je přímo úměrná hmotnosti a druhé mocnině rychlosti, nepřímou úměrnou poloměru zakřivení dráhy. To znamená, že pro molekuly s určitou rychlostí bude existovat určitá poloha mezi obvodem trubice a jejím středem, ve které bude odstředivá síla tlaku v rovnováze s odstředivou silou. Snižováním rychlosti proudění se mění i stavové hodnoty vzduchu, dochází ke zvýšení teploty. Maximální teplota je závislá na vnitřní tepelné energii molekul. Ta je vyšší u molekul na obvodu trubice a nižší u molekul, které jsou blíže středu. Tím dochází k tomu, že z trubice vychází z otvoru umístěného u obvodu teplejší vzduch než z otvoru umístěného ve středu trubice.

Proudění ve směru osy (axiální proudění) je ovlivněno především Pascalovým zákonem — tlak v tekutinách se šíří všemi směry stejně. Axiální proudění bude tedy směřovat z místa s vyšším tlakem do místa s nižším tlakem. Místo s nižším tlakem bude z tohoto hlediska u otvoru. Má-li tedy trubice otvory dva — jeden u obvodu trubice na jedné straně a druhý ve středu na straně druhé —, bude se vrstva na obvodu pohybovat k otvoru na obvodu a vrstva vzduchu u středu trubice se bude pohybovat k otvoru ve středu trubice. Výsledný pohyb je tedy složen z radiálního (rotačního) pohybu a z axiálního pohybu a pro každý tento pohyb platí jiné zákonitosti.

Ranqueho jev je tedy složitým řetězcem termodynamických změn. Dochází k němu pouze tehdy, když dodanou práci způsobí-

me tlakový spád  $p_2 < p_1 \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$ , tj. ta-

kovy, při kterém může za vstupním otvorem dojít k expanzi do nadkritické rychlosti. Sdílení tepla probíhá z vyšší teploty rázové vlny do nižší teploty okolního proudění.

LADISLAV TRUBAČ

*Redakce tímto považuje celou problematiku vírové trubice za uzavřenou. Děkujeme za projevený zájem. Zajímavých jevů, kterým se chceme věnovat, je celá řada, a proto vás prosíme, abyste nám už své připomínky a podněty k trubici neposílali.*