

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Petr L. Kapica  
Energie a fyzika

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 22 (1977), No. 4, 181--189

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138141>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1977

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>

## Energie a fyzika\*)

*Petr Leonidovič Kapica, Moskva\*\*)*

Je všeobecně známo, že základním faktorem určujícím rozvoj hmotné kultury lidí je vytvoření a využití zdrojů energie. Práce jimi vykonaná mnohokrát převyšuje svalovou práci. V nejrozvinutějších zemích připadá na jednoho obyvatele až 10 kW výkonu různých zdrojů energie. To je alespoň 100krát více než střední svalový výkon jednoho člověka.

Role energie v národním hospodářství je dobře ilustrována křivkou na obrázku. Na vodorovné ose je vynesena hodnota celkového národního důchodu připadajícího na jednoho obyvatele v různých zemích, na svislé ose jsou energetické zdroje rovněž připadající na jednoho obyvatele. V mezích přirozené fluktuaace je vidět, že existuje přímá úměrnost. Takže jestli budou lidé postrádat energetické zdroje, jejich životní úroveň bude nepochybně klesat.

Získání, přeměna a zachování energie jsou základní procesy zkoumané fyzikou. Hlavní zákonitost, kterou fyzika stanovila, je zákon zachování energie. Na základě tohoto zákona je předpovězena globální krize v získávání energie [1]. V současné době se využívají jako základní zdroje energie rašelina, uhlí, nafta a zemní plyn. Bylo zjištěno, že chemická energie v nich uložená byla nashromážděna za tisíciletí díky biologickým procesům. Statistické údaje o využití těchto zdrojů ukazují, že v nejbližších stoletích budou vyčerpány [2].

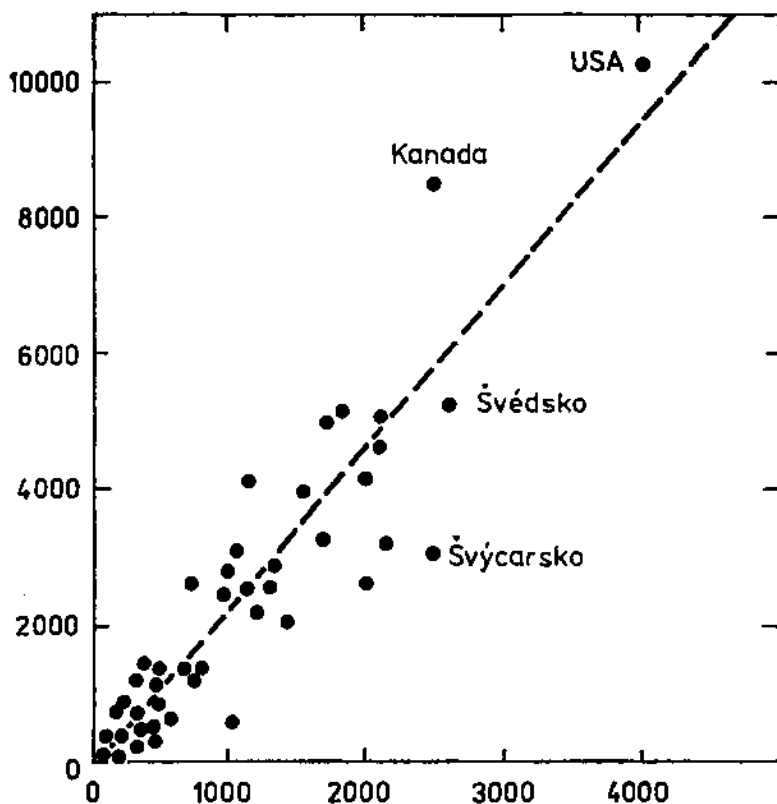
Proto pokud lidstvo nenajde nové zdroje energie, bude na základě zákona zachování energie postaveno před nutnost omezit její užívání, a to povede ke snížení životní úrovně lidí.

\*) Z časopisu *Priroda* 1976 č. 2 str. 70—77 přeložila JANA EXNEROVÁ.

\*\*\*) Akademik PETR LEONIDovič KAPICA je ředitelem Ústavu fyzikálních problémů AV SSSR, členem prezidia AV SSSR, předsedou koordinační rady Moskevského fyzikálně technického institutu, šéfredaktorem časopisu *Žurnál eksperimentalnoj i teoretičeskoj fiziki*. Vypracoval impulsní metodu vytváření silných magnetických polí a dosáhl pole až 3,2 T; objevil zákon lineární závislosti odporu kovů na poli; vytvořil novou metodu pro stlačení vzduchu a získání plynného i tekutého kyslíku ve velkém množství; v letech 1938—1941 objevil a prostudoval jev, který nazval supratekutostí hélia; pozoroval vysokofrekvenční výboj v koncentrovaných plynech se vznikem stabilního plazmového provazce, v němž je předpokládaná teplota  $\sim 10^5 - 10^6$  K; tato práce (z r. 1969) otevřela nový směr výzkumů v oblasti uskutečňování řízené termojaderné syntézy. Je členem Královské společnosti v Londýně, zahraničním nebo čestným členem mnoha akademií a vědeckých společností ve světě, doktorem věd honoris causa řady univerzit v různých zemích světa, laureátem státních cen, dvojnásobným hrdinou socialistické práce.

Nevyhnutelnost globální energetické krize je nyní dostatečně známa, a proto se energetický problém stal pro vědu i techniku prvořadým problémem. V předních zemích se nyní vynakládají velké prostředky na vědeckotechnický výzkum v této oblasti. Hlavní směr tohoto zkoumání se obvykle vede úzce technickou cestou, bez dostatečného uvážení těch zákonitostí, které stanovila fyzika. Život ukázal, že efektivnost výzkumů značně roste, pokud se dělají s důkladnějším uvážением základních fyzikálních zákonů. Ve své zprávě chci zdůraznit ty zákonitosti fyziky, které by měly hrát rozhodující roli při řešení energetických problémů.

Energie, kterou lidé používají, je nyní rozdělena na dvě části. První je tzv. spotřební; ta bezprostředně zabezpečuje kulturní způsob života. Používá se pro osvětlení, pro napájení ledniček, televizorů, holicích strojků, vysavačů a velkého množství dalších přístrojů, které se denně používají. Výkon spotřebovaný v domácnosti se obvykle udává v kW. Druhá část je průmyslová energie neboli energie vysokých výkonů. Používá se v hutnictví, dopravě, strojírenství, v mechanizaci výstavby, zemědělství a v řadě dalších oblastí. Této energii je podstatně více než spotřební, udává se v MW a její množství



Spotřeba energie a celkový národní důchod na jednoho obyvatele. Na svislé ose je ekvivalent energie v kg černého uhlí na jednoho obyvatele, na vodorovné ose je celkový národní důchod v dolarech na jednoho obyvatele za rok. Údaje jsou z r. 1968, sestavené podle materiálů OSN a Mezinárodní banky pro obnovu a rozvoj [1].

a hodnota určují úroveň celkového národního důchodu země. Samozřejmě předpovídaná krize bude vyvolána nedostatkem zdrojů jen v energetice vysokých výkonů. Zajistit dostatek této energie je základním problémem postaveným před vědu.

Už jsem řekl, že se předpovědi nastávající energetické krize činí na podkladě zákona zachování energie. Jak je známo, druhý zákon, který je rovněž velmi důležitý pro omezení možnosti použití energetických zdrojů, je zákon vyžadující růst entropie ve všech procesech přeměny energie. Oba tyto zákony vetují možnost překonání krize cestou vytvoření perpetua mobile. Zákon zachování energie vetuje perpetuum mobile 1. druhu a zákon zachování entropie vetuje tzv. perpetuum mobile 2. druhu. Je zajímavé poznamenat, že tento druhý typ perpetua mobile stále znovu navrhuji vynálezaví inženýři a často je vyvrácení takových druhů zařízení spojeno s velkými obtížemi. Tato oblast patří k termodynamice, je dobře prostudovaná, a proto se u ní zastavovat nebudu.

Omezím se na zkoumání zákonitostí, které určují rozvoj energetiky vysokých výkonů a jsou spojeny s existencí přírodních hranic hustoty toku energie. Jak bude patrné, často se tyto hranice neberou v úvahu, což vede k výdajům na projekty neperspektivní. A to bude také základní téma mé zprávy.

Všechny energetické procesy, které nás zajímají, vedou k transformaci jednoho druhu energie na druhý, což probíhá v soulase se zákonem zachování energie. Nejpoužívanější druhy energie jsou elektrická, tepelná, chemická, mechanická a nyní i tzv. jaderná. Transformaci energie si lze obvykle představovat v určitém objemu, do něž povrchem vstupuje jeden druh energie a vystupuje energie přeměněná.

Hustota vstupující energie je omezena fyzikálními vlastnostmi toho prostředí, kterým protéká. V hmotném prostředí je hustota toku energie  $U$  omezena výrazem  $U < vF$ , kde  $v$  je rychlost šíření deformace, obvykle rovná rychlosti zvuku,  $F$  může být buď energie pružných deformací, nebo tepelná energie.  $U$  je vektor. Při stacionárních procesech  $\text{div } U$  určuje velikost přeměny energie na jiný druh. Vektor  $U$  je velice vhodný pro studium přeměny energie. Poprvé byl navržen před sto lety, roku 1874, moskevským fyzikem N. A. UMOMEM. O deset let později stejným vektorem popsal D. POYNTING energetické procesy v elektromagnetickém poli. Proto se často nazývá Umovým-Poyntingovým vektorem.

V plynném prostředí dostaneme výraz pro  $U$  ve tvaru:

$$U = AT^{1/2}P,$$

kde  $A$  je koeficient závislý na molekulové struktuře plynu,  $T$  jeho teplota a  $P$  tlak.

Takový výraz například určuje mezní výkon, který může předat palivo na jednotku plochy povrchu pístu motoru nebo lopatek turbíny. Jak je patrné, tento výkon klesá s tlakem, proto takový výraz určuje i mezní výšku, ve které může létat turboreaktivní letadlo.

S použitím Umovova-Poyntingova vektoru lze popsat i takové procesy, při nichž se energie přenáší řemenovými převody. Tentokrát součin rychlosti řemenu a jeho pružného napětí dává transmisní výkon. Tímto způsobem lze určit i mezní výkon předaný pásem ve van-de-Graafově generátoru.

V praxi jsem se setkal s takovým technickým problémem, že tok elektrické energie omezoval možnost jejího získání. Došlo k tomu za poučných okolností.

V třicátých letech se můj učitel A. F. JOFFE zabýval uskutečněním originální konstrukce elektrostatičké gnerátoru, který napájel nevelké rentgenové zařízení. Tento generátor měl jednoduchou konstrukci a nepracoval špatně. Tehdy Joffeho napadlo nahradit ve velkém měřítku elektromagnetické generátory elektrostatičkými a převést na ně veškerou výrobu elektrické energie vysokých výkonů. Hlavním důvodem bylo to, že elektrostatičké generátory mají nejen jednodušší konstrukci, ale mohou dodávat rovnou vysoké napětí do přenosových vedení. Musel jsem tehdy vyvrátit uskutečnitelnost tohoto projektu, vycházející z vyhodnocení hustoty toku elektrické energie při její transformaci v mechanickou.

Určíme podle výrazu pro  $U$  hustotu toku energie, která se v mezeře mezi rotorem a statorem přeměňuje z mechanické na elektrickou a naopak. Pak  $v$  bude rovno obvodové rychlosti rotoru generátoru. V konstrukčních úvahách je tato rychlost obvykle okolo 100 m/s. Tangenciální síly vzájemného působení mezi statorem a rotorem v elektromagnetickém generátoru jsou určeny energií magnetického pole, takže platí

$$F = \alpha \cdot \mu_0 H^2.$$

Koeficient  $\alpha$  je dán konstrukcí generátoru: je charakterizován kosinem úhlu, který svírá síla  $F$  s rychlostí  $v$ . Magnetické pole  $H$  závisí na nasycení železa a nepřevyšuje  $1,6 \cdot 10^6$  A/m;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Ωs/m. Transformuje-li se tok elektrické energie v energii mechanickou nebo obráceně, dostáváme asi 1 kW/cm<sup>2</sup>. Proto u generátoru na 100 MW bude mít rotor pracovní povrch průměrně okolo 10 m<sup>2</sup>.

Pro elektrostatičký generátor bude  $F = \alpha \cdot \varepsilon_0 E^2$ , kde elektrostatičké pole  $E$  je omezeno dielektrickou pevností vzduchu a nepřevyšuje hodnotu  $3 \cdot 10^6$  V/m;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  s/Ωm. Proto abychom získali stejný výkon 100 MW, potřebujeme rotor s povrchem  $\mu_0 H^2 / \varepsilon_0 E^2 \sim 4 \cdot 10^4$  krát větším, tj.  $4 \cdot 10^5$  m<sup>2</sup>, neboli polovina čtverečního kilometru. Z toho vyplývá, že elektrostatičký generátor vysokých výkonů by měl prakticky nerealizovatelné rozměry.

Analogická analýza ukazuje, že omezení hustoty toku energie vede k tomu, že v energetice vysokých výkonů je nutno vyloučit četné velmi efektivní procesy transformace energie. Například v plynových člancích, kde dochází k přímé přeměně chemické energie oxidování vodíku na elektrickou energii, je možné v současnosti dosáhnout vysoké účinnosti, až 70%. Možnost použití plynových článků v energetice vysokých výkonů je ale omezena velmi malou rychlostí difúze v elektrolytech, takže v soulase s výrazem pro  $U$  je v praxi hustota jejich energie velice malá; z 1 m<sup>2</sup> elektrody lze snímat jen 200 W. Pro 100 MW výkonu by pracovní plocha elektrod dosahovala 1 km<sup>2</sup> a není naděje, že by se investiční náklady na postavení takové elektrárny daly ospravedlnit získanou energií.

Podobně by se zdál perspektivní směr přímé přeměny chemické energie v mechanickou, ale nelze v něj skládat naděje z téhož důvodu. Je známo, že tyto procesy se ve velkém uskutečňují v živé přírodě, ve svalech živočichů.

K ostudě biofyziků nejsou tyto procesy v současné době ještě prostudovány, ale je dobře známo, že jejich účinnost je značně vysoká. A i když budou v budoucnu tyto procesy uskutečněny uměle, nemohou být použity pro energetiku vysokých výkonů,

protože i tady bude hustota toku energie malá, neboť je omezena malou rychlostí difúzních procesů probíhajících membránami nebo povrchy svalových vláken. Rychlost difúze není v tomto případě vyšší než u elektrolytů. Proto hustota energetického toku nemůže být větší než v plynných člancích.

Hlavní pozornost nyní upoutávají ty metody generace energie, které jsou nezávislé na množství zásob energie uloženém v palivech různého druhu, které se nashromáždilo v minulých dobách. Za hlavní z nich se považuje přímá přeměna sluneční energie na elektrickou a mechanickou ve velkém množství. Opět uskutečnění tohoto procesu v energetice vysokých výkonů souvisí s omezenou velikostí hustoty toku energie. Optimální výpočet v současné době ukazuje, že výkon získaný z 1 m<sup>2</sup> osvětleného povrchu v průměru nepřevyšuje 100 W. Takže pro generaci 100 MW potřebujeme povrch 1 km<sup>2</sup>. Ani jedna z dosud navržených metod přeměny sluneční energie tento proces nemůže realizovat tak, aby se investiční náklady daly ospravedlnit získanou energií. Aby využití sluneční energie bylo rentabilní, je třeba snížit náklady o několik řádů, a zatím není cesty, která by k tomu vedla. Proto musíme počítat s tím, že přímé využití sluneční energie ve velkých množstvích není reálné. Stále ale zůstane možná cesta její přeměny na chemickou energii, jak se to celé věky děje s pomocí rostlinného světa. Není vyloučeno, že se v budoucnu najde fotochemický proces, který otevře možnost efektivněji a jednodušeji měnit sluneční energii na chemickou, než se to děje v přírodě. Takový proces chemické akumulace bude mít ještě tu velkou přednost, že umožní použít sluneční energii nezávisle na změně její intenzity s délkou dne nebo ročním obdobím.

V současné době se rovněž posuzuje využití geotermální energie. Jak je známo, v některých místech zemského povrchu, která jsou vulkanické povahy, se úspěšně uskutečňuje, i když v nevelkém množství. Nepochybně značnou výhodou této metody pro energetiku vysokých výkonů je, že zásoby energie jsou v tomto případě nevyčerpatelné a na rozdíl od sluneční energie, která má periody nejen jednodenní, ale i závislé na ročním období a na počasí, geotermální energie se může generovat nepřetržitě. Ještě na počátku tohoto století rozpracoval konkrétní projekt jejího použití geniální vynálezce parní turbíny CH. PEARSON. Nemohl ale předpokládat, jakých rozměrů dnes energetika dosáhne, takže jeho projekt má jen historickou cenu.

Současný přístup k této problematice se zakládá na tom, že v libovolném místě zemské kůry v hloubce 10–15 km dosahuje teplota několik set stupňů, což stačí pro získání páry a generaci energie s dobrou účinností. Při uskutečňování tohoto projektu v praxi opět narážíme na omezení daná hustotou toku energie. Jak je známo, tepelná vodivost hornin je velmi nízká, a pro odvedení dostatečně velkého množství tepla k zahřívání vodě při existujících nevelkých gradientech teploty uvnitř země je potřeba teplo odvádět z hodně velkých ploch, což je v hloubce 10–15 km velice těžko realizovatelné, takže možnost zahřátí potřebného množství vody je sporná.

V současné době se na západě předkládá řada zajímavých návrhů, např. odpalovat v této hloubce atomové bomby a vytvářet tak velkou dutinu nebo velké množství hluboko pronikajících trhlin. Uskutečnění takového projektu bude velmi drahé, ale se zřetelem na vážnost problému a velké přednosti geotermální metody si myslím, že nehledě na tyto výdaje je třeba zřejmě riskovat uskutečnění této metody.

Kromě sluneční a geotermální energie, které nevyčerpávají zásoby, je ještě vodní energie získávaná přehrazováním řek a využíváním mořských přílivů. Takto nahromaděnou energii vody lze velmi efektivně měnit na mechanickou. V současné energetické bilanci představuje využití vodní energie podíl ne více než 5% a bohužel další zvýšení se neočekává. Souvisí to s tím, že přehrady jsou rentabilní jen v horských oblastech, kde na jednotku plochy vodní nádrže připadá velká potenciální energie. Přehrady s nevelkou hloubkou nadržené vody se obvykle ekonomicky nerentují, zejména je-li to spojeno se zatopením úrodné půdy, protože na ní sklizená úroda je značně cennější než získaná energie. Opět tentýž nedostatek hustoty energie.

Využití větru se vzhledem k nedostatečné hustotě energetického toku ukazuje rovněž nerentabilní. Je samozřejmé, že využití sluneční energie, malých vodních toků, větrných mlýnů může být užitečné pro spotřební účely v malém množství.

Z uvedené analýzy vyplývá, že se jeví nemožné najít rentabilní náhradu za vyčerpávané přírodní zásoby chemické energie pro energetiku vysokých výkonů. Zřejmě je také třeba šetrněji zacházet s využíváním energetických zásob. Je např. žádoucí neplýtvat jimi na vojenské účely. Nicméně to pouze odsune vyčerpání zásob paliv, ale neodvrátí krizi.

Jak se už všeobecně uznává, veškerá naděje na řešení globální krize spočívá ve využití jaderné energie. Fyzika plně podporuje předpoklady opodstatněnosti této naděje.

Jak je známo, jaderná fyzika ukazuje dva směry řešení energetického problému. První je už dobře rozpracován, a zakládá se na získání řetězové reakce v uranu probíhající při rozpadu jeho jader s uvolněním neutronů. Je to tentýž proces, který probíhá v atomové bombě, ale zpomalený do stacionárního stavu. Výpočty ukázaly, že při správném využití uranu jsou jeho zásoby tak velké, že se nemusíme obávat jeho vyčerpání v nejbližších tisíciletích. Atomové elektrárny založené na uranu už pracují a dodávají elektrickou energii. Je ale také dobře známo, že v cestě jejich dalšího širokého rozvoje a převedení veškeré energetiky země na atomovou energii leží nezbytnost překonat tři základní potíže.

Za prvé odpad z jaderných elektráren je silně radioaktivní a jeho bezpečné odklizení představuje velké technické problémy, které ještě nejsou všeobecně vyřešeny. Nejlepší by bylo odvézt ho raketami do kosmického prostoru, ale zatím se to nepovažuje za příliš spolehlivé.

Za druhé velká atomová elektrárna na milióny kW je velmi nebezpečná pro okolní přírodu a zejména pro člověka. V případě havárie nebo sabotáže může uniklá radioaktivita zničit vše živé na ploše mnoha čtverečních kilometrů ne méně než atomová bomba v Hirošimě. Nebezpečí se nyní odhaduje na tak vysoké, že ani jedna pojišťovací společnost v kapitalistickém světě nevezme na sebe risk takových rozměrů.

Za třetí široké využití atomové energie vede také k velkému rozšíření plutonia, které vzniká při jaderné reakci. Takové rozšíření plutonia ve všech zemích světa znesnadňuje kontrolu nad rozšířením atomových zbraní. To může vést k tomu, že atomová bomba se může stát prostředkem vydírání podnikavé skupiny gangsterů.

Jak se zdá, pod hrozbou energetické krize najdou lidé způsoby, jak překonat tyto potíže. Například druhé dvě by bylo možno překonat umístěním atomových elektráren na malých neobydlených ostrovech v oceánech, daleko od hustě osídlených míst. Tyto

stanice by byly pod pečlivou kontrolou a v případě havárie by její následky nepředstavovaly velké nebezpečí pro lidi. Vyrobenou energií by bylo možno například rozkládat vodu a získaný vodík v tekutém stavu transportovat a použít jako palivo, které při hoření neznečistí atmosféru. Je ale třeba přiznat, že za lepší východisko z daného stavu je nutno považovat získání energie termojaderné syntézy deuteria a tritia. Je známo, že tento proces probíhá ve vodíkové bombě, ale pro mírové využití se musí zpomalit do stacionárního stavu. Až se toho dosáhne, žádná z uvedených potíží vznikajících při využití uranu nevznikne, protože termojaderný proces neprodukuje ve znatelné míře radioaktivní odpad, nepředstavuje velké nebezpečí při havárii a nemůže být použit v bombě jako výbušná látka a konečně zásoba deuteria v přírodě, v oceánech je ještě větší než zásoba uranu.

Ale nesnáze při uskutečnění řízené termojaderné reakce nejsou dosud překonány. Budu o nich mluvit, protože, jak se nyní ukazuje, jsou principiálně spojeny také s vytvořením energetických toků dostatečného výkonu v plazmě. U toho se zastavím trochu podrobněji.

Je dobře známo, že pro získání užitečné termojaderné energie musí mít ionty v plazmě velmi vysokou teplotu – více než  $10^8$  K. Největší potíží při zahřátí iontů souvisí s tím, že k zahřátí plazmy dochází v důsledku působení elektrického pole, a přitom se prakticky veškerá energie přenáší elektrony, které ji vzhledem ke své malé hmotě špatně předávají iontům. S růstem teploty se tento přenos stává ještě méně efektivním. Výpočty přenosu energie v plazmě od elektronů k iontům při coulombovské interakci byly spolehlivě popsány už v třicátých letech. L. D. LANDAU [3] odvodil správný výraz pro tuto interakci.

Výkon  $P_a$  předávaný elektrony o teplotě  $T_e$  iontům o teplotě  $T_i$  v objemu  $V$  je roven:

$$P_a = V \cdot n \cdot k \frac{T_e - T_i}{\tau_{eq}},$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta,  $n$  hustota plazmy [4]. Dobu relaxace  $\tau_{eq}$  spočítal Landau na základě coulombovských interakcí a z jeho výrazu vyplývá, že při tak vysokých teplotách  $T_i$  ( $T_i = 10^8 - 10^9$  K), při nichž může termojaderná reakce dát užitečný výkon, je tok energie předaný elektrony příliš malý.

Zkoumání výrazu pro  $P_a$  vede ke zjištění, že při teplotě iontů  $T_i = 0,6 T_e$  má požadovaný výkon maximální hodnotu. Tato maximální hodnota výkonu přenesená z elektronů na ionty deuteria bude podle našich výpočtů rovna:

$$P_{max} = 1,57 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{Vn^2}{\sqrt{T_i}} [\text{W}].$$

V plazmě při tlaku jedné atmosféry a teplotě elektronů  $T_e = 10^9$  K v objemu  $1 \text{ m}^3$  bude energie předaná elektrony iontům asi 400 W. To je nevelká hodnota, poněvadž není těžké spočítat, že pro zahřátí  $1 \text{ m}^3$  plazmy na  $6 \cdot 10^8$  K přivedením energie v soulase s výrazem pro  $P_{max}$  potřebujeme asi 300 s.



Nízká hodnota energie předávané iontům se projevuje zejména při realizaci v současnosti nejvíce rozpracovaných termojaderných zařízení tokamak [2]. V nich jsou ionty udržovány v ohraničeném prostoru silným magnetickým polem a proces zahřátí probíhá za pomoci elektronů, které se zpočátku zahřívají krátkým impulsem toku na velmi vysoké teploty, a potom prostřednictvím coulombovských interakcí předávají svou energii iontům. V podmínkách existujících v současných projektech tokamaku dosahuje čas, za který elektrony předají svou energii iontům, podle výpočtů 20–30 s. Ukazuje se, že za tuto dobu se velká část energie elektronů přemění v brzdné záření. Proto se nyní zkoumají prostředky pro efektivní přenos energie od elektronů k iontům s delším působením [5]. Může to být buď vysokofrekvenční ohřátí, nebo injekce rychlých neutrálních atomů deuteria nebo disipace magnetoakustických vln [6]. Všechny tyto metody ohřátí iontů ovšem značně komplikují konstrukci reaktorů typu tokamak.

Z výrazu pro  $P_a$  vyplývá, že efektivnost energetického přenosu od elektronů k iontům roste s hustotou. Proto předpokládejme, že při ohřátí pevného kondenzovaného tritia nebo deuteria laserovým pulsem bude počáteční hustota značně vysoká, o několik řádů vyšší než v tokamaku a pulsy se podaří ohřát ionty v krátkém okamžiku. Naše výpočty však ukázaly, že i když se doba ohřátí zkrátí na  $10^{-8}$  s, nestačí to, protože za tuto dobu se ničím neudržovaná hustá plazma rozletí už do značné vzdálenosti.

Jak je známo z práce F. L. RIBEHO, hledají se nyní pro laserovou termionukleární plazmu metody kolektivní interakce elektronů s ionty, například vytvoření rázových vln, které adiabatickou kompresí zvýší teplotu iontů rychleji než při coulombovské interakci.

Hlavní překážka v současné době je v tom, že fyzikální procesy v plazmě ještě nejsou dost do hloubky prozkoumány. Teorie, která je pro ně dobře rozpracovaná, popisuje jen neturbulentní stav plazmy. Naše pokusy [7] s volným plazmovým provazcem získaným ve vysokofrekvenčním poli začaly ukazovat, že horká plazma, v níž mají elektrony teplotu několik milionů stupňů, je v magnetickém poli v turbulentním stavu. Jak je známo už v obyčejné hydrodynamice, turbulentní procesy nejsou zcela kvantitativně popsány a v principu jsou všechny výpočty založeny na teorii podobnosti. V plazmě jsou nepochybně hydrodynamické procesy značně složitější, takže to znamená jít touž cestou.

Zatím není důvod předpokládat, že nesnáze s ohřátím iontů v plazmě se nepodaří překonat a osobně si myslím, že termojaderný problém získání velkých výkonů bude v budoucnu vyřešen.

Základní úkol stojící před fyzikou je hlouběji experimentálně prozkoumat hydrodynamiku horké plazmy, jak to vyžaduje uskutečnění termojaderné reakce při vysokých tlacích a v silných magnetických polích. Je to velký, obtížný a zajímavý úkol současné fyziky. Jeho vyřešení těsně souvisí s vyřešením energetického problému, který je rozhodující pro naši epochu. Je to tedy problém fyziky číslo jedna.

## Literatura

- [1] MEADOWS D. H., MEADOWS D. L., RANGERS J., BEHRENS W. W. III.: *The limits to growth*. University Books, N. Y., 1972, 70.

- [2] Podrobně o problémech energie a energetických zdrojích viz články KRLÍN L.: *Výzkum vysoko-  
teplotního plazmatu a řízené termonukleární reakce*, Pokroky MFA 21 (1976), 22; FLOREK M.:  
*Súčasný stav a vývoj jadrovej energetiky*, Pokroky MFA 21 (1976), 71. (Pozn. red.)
- [3] LANDAU L. D.: *Kinetičeskoje uravnenije v slučaje kulonovskovo vzaimodějstvija*, ŽETF 1937 č. 7,  
203.
- [4] KAPICA P. L.: *Poleznoje polučeniye energii ot termojadernych reaktorov*, Pisma v ŽETF 22 (1975)  
č. 1, 24–25.
- [5] RIBE F. L.: *Fission reactor systems*, Rev. Mod. Phys. 47 (1975), 7.
- [6] KAPICA P. L., PITAJEVSKIJ L. P.: *Nagrev plazmy magnetoakustičeskimi kolebanijami*, ŽETF 67  
(1974), 1411.
- [7] KAPICA P. L.: *Svobodnyj plazmennij šnur v vysokočastotnom pole pri vysokom davlenii*, ŽETF 57  
(1969), 1801.

### Z myšlenek H. Freudenthala o vyučování matematice v r. 2000

Profesor HANS FREUDENTHAL, čelný představitel modernizačního hnutí v Nizozemí, se ve věku 71 let vzdal funkce ředitele Ústavu pro rozvoj matematického vzdělávání, který je zřízen při univerzitě v Utrechtu. Na mezinárodním setkání didaktiků v Utrechtu v srpnu r. 1976 proslavil přednášku nazvanou *Matematické vyučování v r. 2000*, v níž osobitým způsobem ve zkratce zrekapituloval své postoje k přestavbě výuky matematiky a načrtl svou vizi její budoucnosti. Jak známo, prof. Freudenthal vždy odmítal bourbakisticky pojatou „novou matematiku“ (New Math), jeho heslo „Raději moderní vyučování (tradiční) matematice než (tradiční) vyučování moderní matematice“ orientovalo pozornost reformátorů k modernizaci vyučovacích metod. Svůj zájem na prakticky laděné školské matematice dovedl v posledních letech až ke koncepci integrovaného vyučování s výraznými projevy tzv. projektové metody. Toto stanovisko je jistě diskutabilní; seznamme se však s několika citáty z přednášky prof. Freudenthala.

Období let 1954 až 1974 lze nazvat obdobím vzestupu a pádu „nové matematiky“. Po dlouhou dobu lidé nevěřili, že to myslím doopravdy, když jsem měl námitky proti reformování matematické výuky zaváděním takové nové látky, jakou je „nová matematika“. Jeden z mých přátel mne nazval „advokátem ďábla“, ale jiný,

kteřý mne znal lépe, moudře odvětil: „On je ďábel sám“.

Po celou dobu existence ICMI<sup>1)</sup> byla školská matematika napadána, že zaostává o více než sto let za skutečnou matematikou. Felix Klein věřil, že lze tuto trhlinu překlenout, bude-li se pohlížet na elementární matematiku z vyššího hlediska. Soudím, že v zásadě měl pravdu. Ovšem tím, kdo tak vidí matematiku, by měl být učitel spíše než univerzitní profesor; schopnost učitele vidět ji tak by měla být jednou stránkou jeho přípravy.

Jak jistě víte, „nová matematika“ vděčí za svůj zrod vypuštění prvního Sputniku v r. 1957 a úsilí OECD<sup>2)</sup> o ovlivnění výuky technokratickými prostředky. Je škoda, že po padesáti letech činnosti ICMI se OECD podařilo přesvědčit lidi, že staletou trhlinu lze překlenout látkou z posledních sto let. Ale matematika je více než látka, je to způsob myšlení; zaměření pozornosti na obsah výuky je nejlepší cesta, jak dosáhnout toho, že „čím více se to mění, tím více to zůstává stejné“.

<sup>1)</sup> Mezinárodní komise pro vyučování matematice, vytvořená r. 1908 z popudu F. KLEINA.

<sup>2)</sup> Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj, která sdružuje od r. 1961 evropské kapitalistické státy, Kanadu, USA a má koordinovat jejich hospodářský rozvoj. Organizace pořádá též konference věnované školské problematice.