

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

V. I. Arnol'd

Přežije matematika? Zpráva o kongresu v Curychu

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 41 (1996), No. 1, 38--44

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139721>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1996

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>

Přežije matematika?

Zpráva o kongresu v Curychu

V. I. Arnold

Každé čtyři roky se matematici celého světa setkávají na mezinárodních matematických kongresech, aby zjistili, kdo jsou noví šampióni (jako na olympijských hrách).

V srpnu 1994 se takový kongres konal v Curychu. (Bylo to potřetí, co se zde konal; vůbec první kongres byl v Curychu v r. 1897.) Kongresy se nečíslijí, protože ne všichni se shodují na tom, které z minulých kongresů se mají započítat.

V letech kongresu předcházejících vybírá speciálně vybraná komise mezinárodního programu (členství v ní se tají až do zahájení kongresu) pozvané přednášející. Letos bylo 16 pozvaných pro hodinová plenární zasedání a 156 pro 45minutová vystoupení v sekcích. Sekcí bylo 19 (matematická logika, teorie čísel, ... až historie matematiky a vyučování matematice); přednášky se konaly současně v sedmi sálech. Každý den bylo možné se zúčastnit šesti přednášek. Pozvání k přednášce na kongresu se pokládá za velkou čest; může být (naneštěstí?) velmi významné pro kariéru matematika na velmi limitovaném světovém trhu práce.

Letos byli mezi 16 plenárními řečníky tři z ruské matematické školy (v Kjótu v r. 1990 byli 4 z 15). Mezi 156 řečníky v sekcích jsem napočítal 14 z ruské školy (v Kjótu jich bylo 19 ze 139). Při tomto počítání nehledím na to, kde jsou nyní zaměstnáni. Proč naše postavení kleslo za čtyři roky ze 14% na 9% — řekněme o třetinu — zbývá vysvětlit.

Na kongresu byla oznámena jména těch, kterým byla udělena Fieldsova medaile: J. Bourgain (Francie a USA), E. Zelmanov (Rusko a USA), J.-C. Yoccoz (Francie), P.-L. Lions (Francie). Tyto medaile, udělované matematikům mladším čtyřiceti let, se často přirovnávají k Nobelovým cenám (neexistuje žádná Nobelova cena za matematiku). Toto srovnání je nezasloužené: na rozdíl od Nobelových cen pominuly Fieldsovy medaile mnoho opravdu vynikajících lidí, zvláště pak Rusů.

Udělit naráz tři medaile představitelům francouzské matematické školy a všechny tři za umění manipulovat s nerovnostmi, stěží napomůže mezinárodní prestiži francouzské matematiky¹⁾ — zvláště dojde-li k tomu v době, kdy prezidentem Mezinárodní matematické unie (organizace, která nominuje Fieldsův výbor) je velmi známý francouzský

¹⁾ Zde se můj názor rozchází s názorem Pierra Cartiera.

Will Mathematics Survive? Report on the Zurich Congress. The Mathematical Intelligencer Vol. 17, No. 3, 1995, str. 6–10.

Anglický text je překladem z ruštiny z časopisu Eureka, byl však autorem poněkud rozšířen. V The Mathematical Intelligencer je článek otištěn v rubrice *Opinions*; příspěvky v této rubrice vyjadřují výlučně názory autora a ani vydavatel ani redakce za ně nepřijímá odpovědnost.

Přeložil JIŘÍ FIALA.

© 1995 Springer-Verlag New York

analytik. Je obtížné prokázat kauzální vztah mezi těmito okolnostmi; znamenalo by to však zcela neslýchaný stupeň korupce. Je to další připomenutí toho, jak nesprávné je srovnávat Fieldsovy medaile s Nobelovými cenami. Nobelovský výbor požaduje názory od mnohem větší skupiny specialistů, než jak to činí Fieldsův výbor, a zpravidla tak neponechává otevřené pole pochybnostem (byť bezdůvodným) toho druhu, na něž jsem výše poukázal. (Obávám se, že jsem tyto pochybnosti slyšel od příliš mnoha účastníků kongresu, z mnoha zemí i rozličných specializací.)

Letos reagovali mnozí na jména medailistů otázkou „Kdo je to?“ Podle Plútarcha není pro mladého člověka medaile odměnou, nýbrž zálohou na budoucí výkony. Doufejme, že letošní laureáti svými výkony zdůvodní to, co do nich bylo vloženo.

Mezi pozvanými přednášejícími jsem napočítal deset žen. Dvě přednášky — zvláštní pocta — byly plenární, při zahájení kongresu (M. Ratnerová, „Interakce mezi ergodickou teorií, Lieovými grupami a teorií čísel“) a při závěrečném zasedání (I. Daubechiesová, „Vlnová klubka (wavelets) a jiné metody lokalizace ve fázovém prostoru“). Mimo pravidelný program se konala zvláštní přednáška — „Emmy Noether Lecture“ — přednesená matematickou-akademičkou O. A. Ladyženskou z Petrohradu.

Na valném shromáždění Mezinárodní matematické unie (něco jako OSN matematiků), konaném v Lucernu těsně před kongresem, navrhovala americká delegace „zvýšit zastoupení žen a dosáhnout lepší rovnováhy etnických skupin“ u pozvaných řečníků. Tento návrh byl shromážděním odmítnut jako skrytá urážka jak žen, tak etnických skupin. Jeden z delegátů tohoto shromáždění poznamenal, že „je divné, že vzdor svým obvyklým praktikám nezmínili Američané sexuální menšiny.“²⁾

Shromáždění přijalo rezoluci, že po jmenování zveřejní jméno předsedy programového výboru (takže se tato osoba mohla dostat pod nátlak). Delegáti z rozvojových zemí doufali, že celé zvažování programového výboru i výborů pro sekce budou zveřejněny. Země bez ustálených matematických tradic měly sklon být ve shromáždění zastoupeny spíše politiky než matematiky. Rezoluce valného shromáždění nese velmi reálné nebezpečí, které by mohlo mít vážné následky pro světovou matematickou obec.

Předpokládalo se, že každý podvýbor pro jednotlivé sekce („panel“) bude jmenovat přibližně deset z přibližně dvaceti neaktivnějších osobností v dané oblasti (kteří neměli pozvané přednášky na předcházejících kongresech). Rozdíl mezi deseti nejlepšími, kteří pozváni budou a jedenáctým, který pozván nebude, je velmi malý. Pokus zveřejnit diskusi o tomto rozdílu dodá jen váhu mimovědeckým úvahám (zastoupení různých zemí, pohlaví, národností atd.). Poměrně málo ženám, které mluvily na curyšském kongresu, se dostalo této pocty ve spravedlivé soutěži s muži bez jakýchkoli ohledů.³⁾

²⁾ Tato poznámka byla mnohými pokládána za urážlivou. Pokusím se vysvětlit proč. Brali ji jako vtipné *reductio ad absurdum*: řečník se chtěl postavit proti úsilí o zastoupení žen a menšin tím, že poukázal na analogii se snahami o zastoupení homosexuálů. Vtip spočíval tudíž na tom, že ten, kdo jej slyšel, pokládal za absurdní obhajovat účast homosexuálů. Urážka homosexuálů byla náhodná vůči řečnickovu záměru vysmát se americkému návrhu, ale zranila. — Poznámka redaktora The Mathematical Intelligencer.

³⁾ Jistě. Ale k této spravedlivé soutěži došlo teprve po hlasitých požadavcích, aby kongresy skoncovaly s malým zastoupením žen. Viz Leonore Blum, *Mathematical Intelligencer* Vol. 9, č. 2 (1987), 28–32. — Poznámka redaktora The Mathematical Intelligencer.

Valné shromáždění věnovalo zvláštní pozornost obrazu matematiky ve veřejnosti.

Na začátku tohoto století nastoupil v matematice sebezničující demokratický princip (zvláště u Hilberta), podle něž mají všechny axiomatické systémy rovná práva na to, aby byly analyzovány. Hodnota matematického výsledku je podle tohoto principu určována nikoli jeho významem a užitečností, jako je tomu v jiných vědách, nýbrž pouze jeho obtížností, jako je tomu v horolezectví. Tento princip vedl rychle k roztržce mezi matematikou a fyzikou a k oddělení od jiných věd. V očích normálních lidí se matematici proměnili ve zlověstnou kněžskou kastu vymírajícího náboženství, něco jako druidové, parazitující na vědě a technologii, rekrutující akolyty do matematických škol zombiovským způsobem naprostého duchovního područenství. Bizarní otázky typu Fermatova problému nebo problémů o součtech prvočísel byly povýšeny na domnělé centrální problémy matematiky. („Proč *sečítat* prvočísla?“ divil se velký fyzik Lev Landau. „Prvočísla jsou tady od toho, aby se násobila, a ne sečítala!“)

Matematici sami bohužel hodně přispěli k upevnění tohoto obrazu své vědy, zvláště k upevnění mýtu její nedostupnosti nezasevěným.

Hermann Weyl, jeden z největších matematiků naší doby (který mimochodem pracoval v Curychu), řekl: „V těchto dnech anděl topologie a ďábel abstraktní algebry zápasí o duši každé jednotlivé oblasti matematiky.“⁴⁾

V první polovině tohoto století ďábel vítězil. Byla vynalezena speciální „axiomatiko-bourbakistická“ metoda výzkumu matematiky, jejímž cílem byla dokonalá čistota. Dejme tomu, například, že říkáme, že hodnota součinu nezávisí na pořadí činitelů. Chceme-li, můžeme definovat násobení pomocí „pravidel pro sečítání sloupců“. To, že je výsledek nezávislý na pořadí násobení, lze vyvodit čistě formálně z jednoho z těchto pravidel, aniž bychom cokoli věděli o obsahu operace násobení. Tento formální důkaz se sločinnými bourbakizátory a algebraizátory matematiky vyžaduje od studentů.

Kdybychom neznali obsah ideje sečítání — jestliže jsme například nejprve nepočítali jablka nebo oblázky nebo (s Majakovským) vajgly nebo lokomotivy — je jasné, že bychom nemohli chápat tento formální důkaz. Ten je přesvědčivý jen pro toho, kdo podstoupil zvláštní algebraickou perverzi ducha, a je bezcenný pro vyučování i všechny aplikace. Vážné následky této perverze pro vyučování matematiky v Rusku i jinde jsou dobře známy. Celé generace matematiků vyrůstaly, aniž by znaly nějaký jiný styl matematiky — a ovšem bez znalosti jakékoli jiné vědy. Jako pomstu za svou pokořující zkušenost ve škole plánovali a uskutečňovali představitelé většiny zemí, podobní příslovecnému vepři pod dubem, vyhlazení matematiky. Podle amerických dat bude tento proces trvat 10 až 15 let.

Jejích logika je jednoduchá. Anglie nezískala nic z Newtonova objevu kalkulu; nebo Německo z Leibnizova zavedení způsobu zápisu, který používá celý svět; nebo Francie z Poincarého vytvoření nové matematiky (topologie a dynamických systémů), nezbytné řekněme pro rozhlas. Američtí vůdci v souladu s míněním svých voličů a daňových poplatníků nehodlají financovat základní výzkum (jako je třeba matematika), pokud se neprokáže, že ty země, kde základní výzkum financován je (Rusko, Francie), jsou lepší než ty země, kde základní výzkum nedostává téměř nic.

⁴⁾ „Invariants“, Duke Math. J. 5 (1939), str. 500.

Sobecké kalkulace jednotlivých států vedly ke škrtům v základním výzkumu, potřebném lidstvu jakožto celku (zvláště pak u matematiky), jen co skončily vojenské konfrontace: žádné hvězdné války, žádné supercollidery — žádná matematika.

Návrat současné matematiky do hlavního proudu přírodních věd, který lze vidět všude v posledních několika desetiletích, se neodrazil v pojetí matematiky a matematika „mužem z ulice“. To platí jako pro „čistou“, tak pro „aplikovanou“ matematiku.

Neexistuje žádné vědecké rozlišení mezi čistou a aplikovanou matematikou, kromě rozlišení společenského. „Čistý“ matematik je placen za to, že dělá matematiku, „aplikovaný“ matematik za řešení určitého problému. Kdyby byl matematik, zabývající se teorií čísel, placen za řešení Fermatova problému, pak by teorie čísel byla aplikovanou matematikou — tak, jako je tomu u Galoisových těles a křivek nad konečnými tělesy, kde jsou výzkumy financovány CIA, KGB a podobnými agenturami kvůli kryptografii.

Když Kolumbus vyplul, byl v postavení aplikovaného matematika: byl placen za řešení speciálního problému, totiž nalezení cesty do Indie. Objev Nového světa se však podobal spíše matematice čisté. Plavby podél pobřeží přinesly španělské ekonomice daleko vyšší krátkodobý zisk než nevýnosné Kolumbovy cesty.

Současné aplikace matematiky, včetně „computer science“ a aplikací počítačů, čerpají z bohatých zásob, nashromážděných „čistou“ matematikou předcházejícími generacemi. Na rozdíl od zeměpisu jsou objevy Kolumbova řádu stále možné — a každoročně k nim dochází.

Vysvětlit tyto objevy nezasvěceným je jistě nesnadné. Pohleďte, jak se s tímto problémem vypořádal před třítisícovým publikem v curyšském Kongresshausu Princetonův matematik John Conway. Objevil se na jasně osvětleném pódiu v šortkách, sandálech a větrovce. „Nikdo neví,“ řekl, „jak zaplnit náš obyčejný třírozměrný prostor totožnými koulemi tak hustě, jak je to jen možné. Předpokládá se, že nejlepší je poskládat koule do řad a vrstev, jak vám teď ukáží.“ Vytáhl z kapsy větrovky něco zcela zmačkaného jako kapesník. Ukázalo se, že je to kus nějaké umělé hmoty, která se rychle roztáhla a vytvořila modrý míč velikosti dětské hlavy. „Položme vedle něj několik dalších koulí,“ řekl Conway a vytáhl nějakých deset dalších míčů z kapsy. Poskládal je na stůl tak, že vytvořily mřížku rovnostranných trojúhelníků. „Teď,“ říká přednášející, „položme další vrstvu nahoru“ — a z další kapsy loví červené míče. Když umístil třetí vrstvu (zelených) míčů (ze třetí kapsy větrovky), pochopil každý vrstvené zaplnění celého prostoru. „Teď už ty míčky nepotřebuji,“ říká Conway a bere míč s vrcholu a hází jej do sálu někam mezi dvanáctou a čtrnáctou řadu. „Tyto také nepotřebuji“ a pokračuje v házení barevných míčů do všech koutů sálu. Když hodil všechny míče (chytané posluchači s výkřiky radosti), poznamenal: „A teď u nepotřebuji ani větrovku,“ svlékl ji a odhodil na podlahu. Šortky si po dobu přednášky nechal.

Přes svou výstřednost patřila Conwayova přednáška na kongresu k nejsrozumitelnějším.

Trapná je stupňující se proměna kongresů v trhy reputace: přednášející se snaží ukázat, jak velkými vědci jsou, místo toho, aby posluchačům něco sdělili, a domnívají se, že toho dosáhnou nejlépe nesrozumitelnou přednáškou. (Tak tomu bylo zvláště v přednáškách v sekcích.)

Podle mého názoru měli nejlepší přednášky na kongresu Clifford Taubes (Harvard, USA), který podal přehled geometrie čtyřrozměrných variet (v souvislosti s fyzikou kalibračních polí), a Jürg Fröhlich z Curychu o jedné nedávné teorii kvantového Hallova jevu.

Topologie tří a čtyř dimenzí se ukázala být složitější než topologie křivek a ploch i než topologie pěti a více dimenzí. Například jen ve 4 dimenzích existují „falešné eukleidovské prostory“, topologicky ekvivalentní obyčejnému prostoru, nepřipouštějící však globální hladký souřadnicový systém. Všechny tyto 4-prostory mají mimochodem pěkný popis v termínech dynamických systémů: jsou to orbitální prostory určitých hladkých vektorových polí (bez nul) v obyčejném eukleidovském 5-prostoru. Přesto, pokud je mi známo, nikdo nikdy nepopsal takové vektorové pole explicitně. Jsou jejich složky elementárními funkcemi? Polynomy?

Tři zajímavé přednášky byly věnovány teorii *zrcadlové symetrie*, pozoruhodné souvislosti objevené nedávno fyziky mezi zdánlivě nesouvisejícími matematickými teoriemi, náležejícími algebraické geometrii, teorii singularit, topologii a kombinatorice konvexních mnohostěnů. Mnohá tvrzení této teorie zůstávají pouhými hypotézami (potvrzovanými rozsáhlými experimentálními daty a rovností mnohamístných celých čísel, vyskytujících se v různých teoriích). Přesto bylo možné získat v přednáškách M. Konsetiče („Homologická algebra zrcadlové symetrie“), A. B. Giventala („Homologická geometrie a zrcadlová symetrie“) a D. R. Morrisona („Zrcadlová symetrie a modulové prostory teorie konformních polí“) poměrně harmonický obraz budoucí teorie.

V přednášce Föllmera (Bonn) o finanční matematice bylo potěšující slyšet o „ruských výběrech (options)“, zavedených Širjajevem a Šepem. Dosud jsem slýchal jen o „evropských a amerických výběrech (options)“...

Velký dojem na mne udělal stručný popis díla nositele Nevanlinnovy ceny A. Wigder-sona, podaný v zahajovacím zasedání Ju. Matijasevičem (Petrohrad). Je to o nových idejích komplexity řešení matematických problémů a aplikacích pravděpodobnostních idejí na teorii důkazu. Konečně máme možnost v přesné matematice nacházet důkazy, které jsou správné, nikoli s jistotou, ale s nemírně malou pravděpodobností chyby (řekněme 10^{-500}).

Každý ví, že některé problémy mají řešení, která se snadno ověří, ale obtížně nacházejí. Příkladem je rozklad přirozeného čísla na prvočísla. Je-li znám nějaký součinitel, pak lze dělitelnost ověřit velmi rychle (i kdyby měl dělenec dvě stě číslic a dělitel sto). Nalézt ale nějakého součinitele je velmi obtížné: musí se prostě projít všechny možnosti a k tomu je zapotřebí obrovského času (rostoucího exponenciálně s počtem číslic daného čísla). Exponenciálně složité problémy jsou mimo dosah počítačů v praxi a zůstanou jimi, ať se technologie jakkoli zlepší. To činí faktorizaci čísel užitečnou pro schémata přenosu tajných informací veřejnými komunikačními kanály.

Zůstává však nedokázaná hypotéza, že tyto třídy jsou opravdu více než polynomiálně složité (ačkoli byl pořízen seznam tisíců problémů, o nichž se ví, že jsou „těžké“, pokud je jeden z nich těžký). Nový pokrok spočívá ve vypracování široké teorie založené na stále nedokázané hypotéze existence těžkých problémů. Zvláště zajímavé je studium randomizovaných algoritmů — algoritmů obsahujících náhodné testy — a možných

prostředků pro jejich derandomizaci — to jest náhradu jejich stochastických prvků generátory pseudonáhodných čísel. Ukazuje se pak zvláště, že libovolně složitý důkaz je možné verifikovat libovolně rychle.

Všechna tato aktivita, založená na nedokázané hypotéze (s poněkud paradoxními důsledky), mi připomíná dílo Lobačevského, který sestavil krásnou teorii své geometrie a nenechal se odstrašit nedokázanou hypotézou v jejích základech. Teď víme, že existují dvě geometrie, jedna, v níž je Lobačevského hypotéza splněna, a druhá, v níž splněna není. Prostě popisují geometrii různých ploch.

Zdá se být pochybné, že by mohla existovat matematika, která by obsahovala exponenciálně složitě problémy (které nelze řešit bez kombinatorického prohledávání), a jiná matematika, kde takové problémy nejsou. V každém případě různé aspekty deterministických, randomizovaných a derandomizovaných algoritmů poskytly mnoho zajímavých přednášek v Curychu (v sekci o informatice).

Většina přednášek na kongresu však byla jako kázání. Přednášející prostě vůbec nepředpokládali, že by posluchači něčemu měli rozumět. Někdy to zašlo až tak daleko, že předkládali zjevně nepravdivé věty publiku, sedícímu v mlčenlivém respektu. Kazatelská nálada natolik převládala, že většina těch, kteří přednášky uváděli, ani nevyzvala k otázkám. A když někteří staromódní profesori, jako J. Moser (ředitel matematického ústavu na ETH v Curychu, hlavního matematického střediska ve Švýcarsku) vyzvali k otázkám, jen pár posluchačů překonalo svůj strach projevit svou ignoranci.

Přednášky se však od kázání lišily v tom, že nebyly zadarmo. Ti, kteří nebyli registrováni jako účastníci, museli zaplatit značné vstupné na přednášku srovnatelné se vstupným na koncert nebo do divadla.

Mám potěšení sdělit, že zástupci ruské školy byli na srozumitelnější straně. Je součástí naší tradice, že přehledové přednášky mají zdůraznit nové ideje a osvětlující příklady a nikoli technické detaily.

Za dost zneklidňující pokládám zřetelný odklon mladých badatelů (zvláště těch, kteří pracují na Západě) od směrů dlouho námi sledovaných ke směrům módním v USA. Takový posun zájmů (nepochybně související s těžkými podmínkami pro získání míst na amerických univerzitách, z nichž některé se vychloubají tím, které ze slavných ruských matematiků odmítly), je nevyhnutelně záporná. Světově významní představitelé jedné oblasti tuto oblast opouštějí a ženou se ve smečce soupeřících matematiků za jiným vůdcem.

Mohlo by to vysvětlit zřetelný pokles našich matematiků mezi přednášejícími na kongresu?

Radost je všimnout si velkého počtu mladých účastníků kongresu včetně studentů z Ruska i jiných zemí bývalého Sovětského svazu. Jejich účast byla umožněna velkorysou podporou ze strany švýcarského organizačního výboru kongresu a Sorosovy nadace.

Švýcarští matematici udělali vše možné, aby nám pobyt zpříjemnili: účastníkům se nabízely výlety po celém Švýcarsku (Lucern, Interlaken, Bern atd.), výlety do hor (na Rigi Kulm s výhledy na Vierwaldstätter See), k vodopádům Rýna (srovnatelným s Niagarou), koncerty klasické i lidové hudby. Velký dojem na mne udělala malá a málo

známá galerie umění Bürlet v Curychu — Rembrandt a Frans Hals, El Greco a Goya, Canaletto a Tiepolo, Greuze a Ingres, Corot a Courbet, Cézanne, van Gogh, Matisse, Pissarro, Picasso.

Po skončení únavného kongresu jsem strávil den v domě mého starého přítele A. Haefligerova poblíž Ženevy. Vyšplhali jsme se z 1500 m do 3000 m do hor poblíž údolí Rhôny, na půli cesty mezi Jungfrau a Matterhornem, a vykoupali jsme se v glaciálním jezeře. Cestou zpět jsem sbíral houby, borůvky, lesní jahody a svým hostitelům jsem z těchto darů přírody připravil večeři (a překonal jejich pochybnosti co do jedlosti těchto plodů). Následujícího dne jsem se vrátil do Moskvy.

Odstranění polutantů z plynných a kapalných médií radiačními technologiemi

Petr Otčenášek, Praha

Ozáření elektronovým svazkem je jednou z nejefektivnějších metod odstranění SO_2 a NO_x z průmyslových plynných spalin. Tato ekologicky orientovaná radiační technologie je hodnocena jako součást druhé nastupující generace čištění plynů a kapalin [1]. Proces zpracování plynných spalin vyžaduje odstranění co největšího podílu popílku ze spalin, zvlhčení a následné přidání malého množství amoniaku do plynných výpustí. Ozáření plynu elektronovým svazkem vyvolá reakce konvertující SO_2 a NO_x na amonium sulfát $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ a amonium sulfát-nitrát $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{NH}_4\text{NO}_3]$. Tyto soli mohou být separovány konvenčními kolektory. Proces má mnoho výhod v porovnání se současnými způsoby čištění plynů:

- 1) odstraňuje současně SO_2 a NO_x s vysokou účinností (obr. 1),
- 2) je suchý, snadno regulovatelný a ovladatelný z hlediska vstupů i vyvedení produktů vzniklých přeměnou SO_2 a NO_x ,
- 3) není nutné přehřívání plynných výpustí,
- 4) polutanty konvertují na tržně využitelné hnojivo,
- 5) má nízké investiční a provozní náklady.

Doc. Ing. PETR OTČENÁŠEK, CSc. (1937), katedra jaderné fyziky MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8.