

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Matej Florek

Súčasný stav a vývoj jadrovej energetiky

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 21 (1976), No. 2, 71--83

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139251>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1976

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>

kteřá se mohou smršťovat — nebudou uměle připravena v laboratoři. Pak teprve bude možno považovat tyto procesy za rozluštěné.

V molekulárních řetězcích se dá očekávat mnoho nových jevů, nejen jev supravodivý, ale i supradielektrický. Supradielektrika s dostatečně vysokou permitivitou by dokázala zcela beze ztrát odrážet vysokofrekvenční pole. Jejich objev by měl velký praktický význam nejen pro přenos informací vlnovody na velké vzdálenosti, ale i v energetice velkých výkonů.

Zájem o tuto oblast zkoumání se rozvíjí teprve v posledních letech.

Vědci by měli mít na paměti, že nejdůležitější a nejzajímavější objevy jsou ty, které nelze předvídat.

Už Shakespeare řekl Hamletovými ústy:

„. . . Více, věř,
je toho na zemi a na nebesích,
než se vám filozofům ve snu zdá!“*)

Proto se není třeba obávat, že nadejde doba, kdy na konferencích o magnetismu nebudou žádná zajímavá témata.

Když tedy zahajují konferenci o magnetismu, nepochybují, že bude zajímavá. Přeji vám, aby vaše práce byla úspěšná a plodná.

Přeložil Vladimír Roskovec

Súčasný stav a vývoj jadrovej energetiky

Matej Florek, Bratislava

Před dvadsiatimi rokmi (17. III. 1956) Sovietsky zväz a ČSSR uzavreli zmluvu o spolupráci pri výstavbe prvej čs. jadrovej elektrárne v Jaslovských Bohuniciach. Predmetom tejto zmluvy bola úzka spolupráca sovietskych a našich vedcov a inžinierov pri projektovaní, výstavbe a uvádzaní do prevádzky čs. jadrovej elektrárne, výmena informácií a technickej dokumentácie, ako i vývoj niektorých častí reaktora vo výskumných ústavoch Sovietskeho zväzu.

Počas spolupráce boli vyriešené zložité technické problémy a prvá čs. jadrová elektrárňa A-1 je už niekoľko rokov v energetickej prevádzke. O zložitosti problémov svedčí ten fakt, že koncepcia A-1 je ojedinelá, je jediná prevádzkyschopná jadrová elektrárňa na svete s ťažkovodným, plynom chladeným reaktorom, s použitím prírodného kovového uránu ako paliva.

Počas uplynulých dvadsiatich rokov v jadrovej energetike nastali podstatné zmeny. V predkladanom článku autor sa pokúša načrtnúť súčasný stav v tejto oblasti.

Od doby keď začala pracovať prvá jadrová elektrárňa na svete (Obninsk, 1954) uplynuli iba dve desaťročia, ale už v minulom roku na celom svete pracovalo 135 jadrových elektrární (JE) s celkovým výkonom 50 000 MWe. V súčasnej dobe sa budujú alebo pripravujú k výstavbe ďalšie, len do r. 1980 sa odovzdá do prevádzky 270 JE s celkovým

*) *Hamlet* [I. 5.]; preklad E. A. SAUDEK

výkonom 220 000 MWe*) ([1]), čo je asi toľko, ako terajší výkon všetkých elektrární ZSSR. Jadrová energetika v ďalších dvoch desaťročiach v podstatnej miere ovplyvní palivovoenergetickú bilanciu väčšiny priemyselne rozvitých krajín a v r. 2000 bude sa podieľať 50% vo výrobe elektrickej energie. Očakáva sa, že vtedy na celom svete bude pracovať okolo 5 500 reaktorov ([2]).

Do energetickej krízy sa na uvedené prognózne údaje pozeralo so značnou dávkou pesimizmu. Avšak energetická kríza veľmi dôrazne pripomenula, že zásoby fosílnych palív sú ohraničené, že doterajšia orientácia na ropu a plyn ako na základný zdroj energie odporuje reálnym možnostiam a že je nevyhnutné urýchlene využívať nové zdroje energie.

O zásobách fosílnych a jadrových palív už pojednával článok KRLÍNA v predchádzajúcom čísle ([3]). Na doplnenie považujem za vhodné uviesť (bez komentáru) tab. I., v ktorej hodnoverné zásoby fosílnych palív v rôznych regionálnych oblastiach sú vyjadrené v jednotkách Q ($1Q = 1,055 \cdot 10^{21} \text{ J}$). Vyjadrenie zásob a spotreby palív v týchto jednotkách je veľmi prehľadné, palivá rôzneho druhu sa ľahko porovnávajú, a preto uvedená jednotka sa k tomuto účelu v poslednej dobe bežne používa.

Tab. I.: Zásoby fosílnych palív v jednotkách Q ([4]).

Regionálna oblasť	ropa	plyn	uhlie
Severná Amerika	0,28	0,32	21
Ostatná Amerika	0,34	0,13	0
Západná Európa	0,08	0,18	4
Japonsko	0	0	—
Krajiny RVHP	0,47	0,64	72
Stredný východ	2,63	0,48	0
Južná Ázia	0,08	0,05	2
Čína	0,12	0,02	23
Ostatné rozvojové krajiny	0,01	0,05	3
Sumárne svetové zásoby	4,01	1,87	125
Svetová spotreba v r. 1970	0,11	0,05	0,07
Pomer zásob k spotrebe	~40	~40	2000

Zásoby jadrového paliva – uránu a tória – pravdepodobne dosahujú hodnoty 10^6 Q. Veľká časť uránu a tória je rozptýlená v horninách ($\sim 10^{14}$ ton) a vo väčšine prípadov nevhodná pre ťažbu, druhá časť vo vodách morských oceánov ($\sim 4 \cdot 10^9$ ton) ([5]). Dostupných zásob uránu (v cene pod 33 dol. za 1 kg U_3O_8) podľa Alexandrova ([6]) je na našej Zemi asi 30 mil. ton, čo predstavuje 15 Q, ak sa urán bude „spaľovať“ v tepelných reaktoroch a 10^3 Q ak z ^{238}U sa bude získavať nové jadrové palivo ^{239}Pu . Z ľahko dostupného tória možno získať ďalších 1000 Q po predbežnej konverzii nuklidu ^{232}Th v nuklid ^{233}U .

*) MWe – elektrický výkon reaktora, MWt – tepelný výkon reaktora.

Ako už bolo spomenuté v článku [3] najmohútnejšie sú zásoby jadrového paliva vhodného pre termojaderné reaktory. Pomocou reakcie $T(d, n)^4\text{He}$ je možné získať energiu rovnú $10^6 Q$ a pomocou reakcie $D(d, n)^3\text{He}$ až $10^9 Q$ ([7]). Ďalším mohutným zdrojom energie je Slnko. Ročný príkon slnečnej energie na našu Zem je asi $3000 Q$ ([8]). Zatiaľ sú to len perspektívne zdroje energie. V našom a pravdepodobne i v prvej polovici budúceho storočia jediným ekonomicky opodstatneným zdrojom energie je jadrová energia uvoľňovaná pri štiepení atómových jadier.

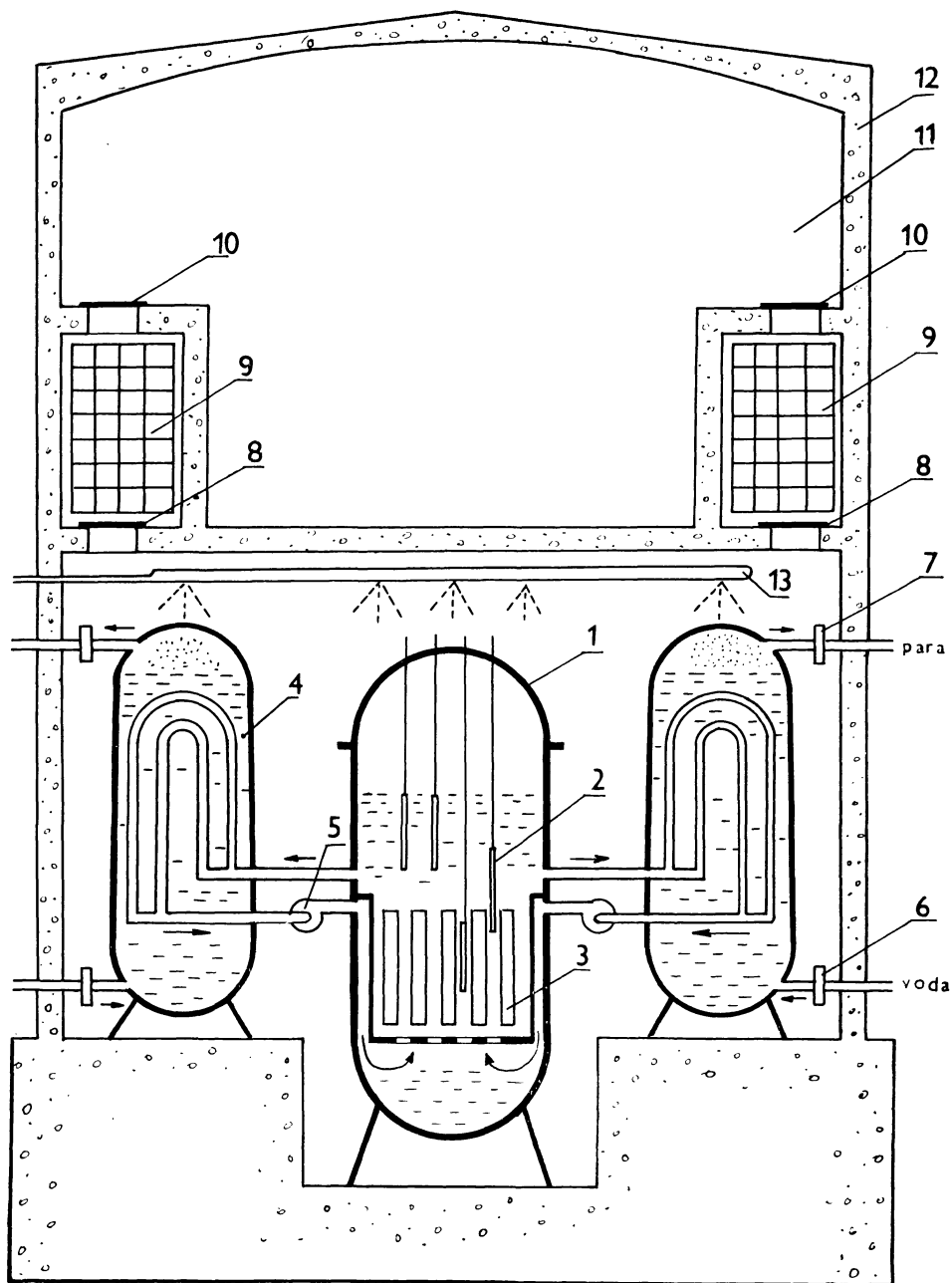
Tepelné reaktory. Kontrolované uvoľňovanie jadrovej energie prebieha v jadrovom reaktore. Podľa hrubej klasifikácie reaktory rozdeľujeme na tepelné a rýchle, v závislosti od toho, či štiepenie atómových jadier vyvolávajú v prevážnej miere spomalené (tepelné) neutróny, alebo nespomalené (rýchle) neutróny.

S prírodným uránom (0,72% izotopu ^{235}U) môže prebiehať reťazová reakcia iba v tepelnom reaktore, v homogénnom usporiadaní môže pracovať len s ťažkovodným moderátorom, v heterogénnom usporiadaní aj s grafitovým moderátorom. So slabo obohateným uránom ($\sim 3\%$ ^{235}U) je možné vytvoriť reaktor aj s ľahkovodným moderátorom. Ako chladiace médium sa používa D_2O , H_2O , He, CO_2 a Na.

Rozvoj jadrovej energetiky sa začínal tepelnými reaktormi. Kombináciou moderátora a chladiva sa získali najrozmanitejšie typy tepelných reaktorov. V päťdesiatich a do polovice šesťdesiatich rokov sa hľadal vhodný typ reaktora pre účely jadrovej energetiky. V obchodnej konkurencii najlepšie obstál tlakový ľahkovodný reaktor, v ktorom slabo obohatený urán je hermeticky uzavretý v tzv. palivových tyčiach a tieto sú umiestené v tlakovej nádobe. V tlakovej nádobe sa nachádza aj ľahká voda, ktorá cirkuluje v primárnom okruhu a plní úlohu moderátora i chladiva. K tomuto typu reaktorov patria sovietske VVER/Vodno-Vodjanov Energetičeskij Reaktor) a v americkej literatúre sa označujú skratkou LWR (Light Water Reactor). Konštrukcia ľahkovodných reaktorov je relatívne jednoduchá a veľmi kompaktná, preto sa použili aj v mobilných zariadeniach (ľadoborce Lenin a Arktika, atómové ponorky). Už v r. 1965 JE s týmto typom reaktora v USA sa stali schopné konkurovať tepelným elektrárnam. Ľahkovodné reaktory sú spoľahlivé a bezpečné v prevádzke, majú vysoký koeficient využitia inštalovaného výkonu, nevyžadujú si deficitné materiály a náklady na ich výstavbu sú relatívne najnižšie. Tieto výhody ľahkovodných reaktorov sa budú ešte dlhú dobu zachovávať, a preto sa počíta, že v najbližších 25 rokoch jadrová energetika sa bude rozvíjať hlavne na báze ľahkovodných reaktorov.

Charakteristickým prvkom ľahkovodného reaktora je reaktorová nádoba, v ktorej je umiestená aktívna zóna. Na získanie pary s vhodnými teploenergetickými parametrami musí chladivo z reaktora vystupovať s dostatočne vysokou teplotou. Táto požiadavka vyplýva zo vzťahu medzi účinnosťou premeny tepelnej energie v energiu mechanickú a teplotu pary na vstupe parnej turbíny. Spravidla čím väčšia je teplota pary na vstupe, tým je väčšia účinnosť.

Para sa môže vyrábať priamo v reaktore (jednookruhový systém), alebo v parogenerátore, ak sa používa dvojokruhový systém. Reaktory prvého typu sa nazývajú varné, druhého typu tlakové. Aby teplota vody v tlakovom reaktore alebo pary vo varnom reaktore bola vysoká ($\sim 300^\circ\text{C}$), musí sa nachádzať pod vysokým tlakom, a preto plášť



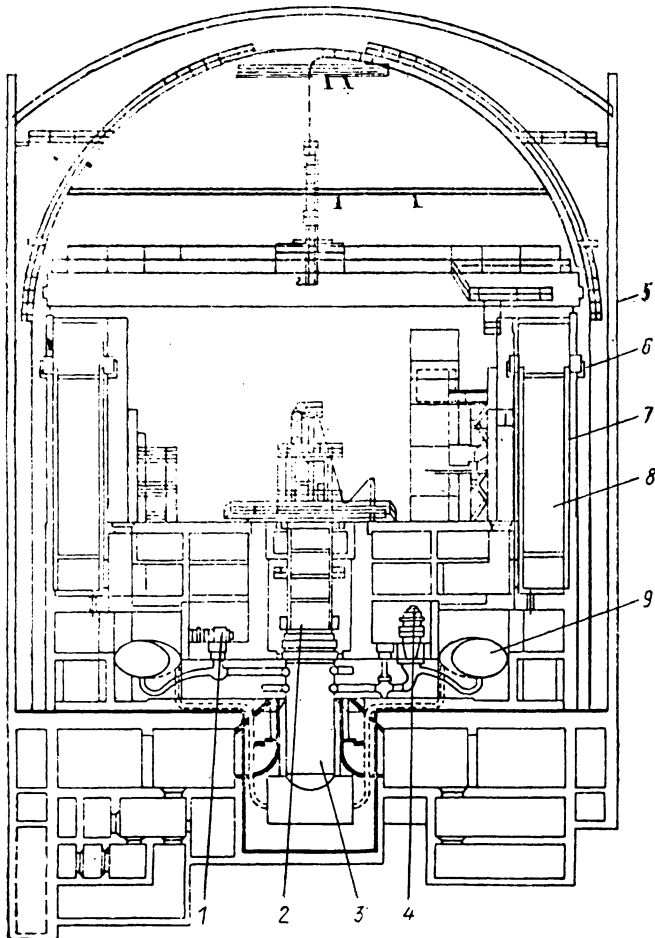
Obr. 1.

reaktora (priemer 3–5 m, výška 10–20 m) musí byť konštruovaný ako vysokotlaková nádoba. V dvojokruhovom reaktore tlak dosahuje hodnotu až 15 MPa*), v jednookruhovom, varnom reaktore 6–7 MPa. Konštrukcia a výroba tak veľkých tlakových

*) 1 MPa = 10,197 at

Obr. 1. Zjednodušená schéma tlakového ľahkovodného reaktoru s vertikálnymi parogenerátormi. Reaktor a parogenerátory sú umiestené v hermeticky uzavretej oceľovo-betónovej konštrukcii (tzv. kontejnment), ktorá aj v prípade vážnej havárie reaktora alebo potrubia primárneho okruhu má zabrániť nebezpečnému úniku rádioaktívnych látok do biosféry.

1 — reaktorová nádoba; 2 — regulačné tyče; 3 — palivové súbory; 4 — parogenerátor; 5 — čerpadlo, zabezpečujúce cirkuláciu chladiva; 6, 7 — poistné ventily; 8 — vstupná klapka; 9 — ľadový kondenzátor granulovalý ľad, potrebný na kondenzáciu pary pri jej značnom úniku z primárneho okruhu); 10 — výstupná klapka; 11 — expanzný priestor; 12 — betónový plášť; 13 — sprchy (v činnosti len počas havárie).

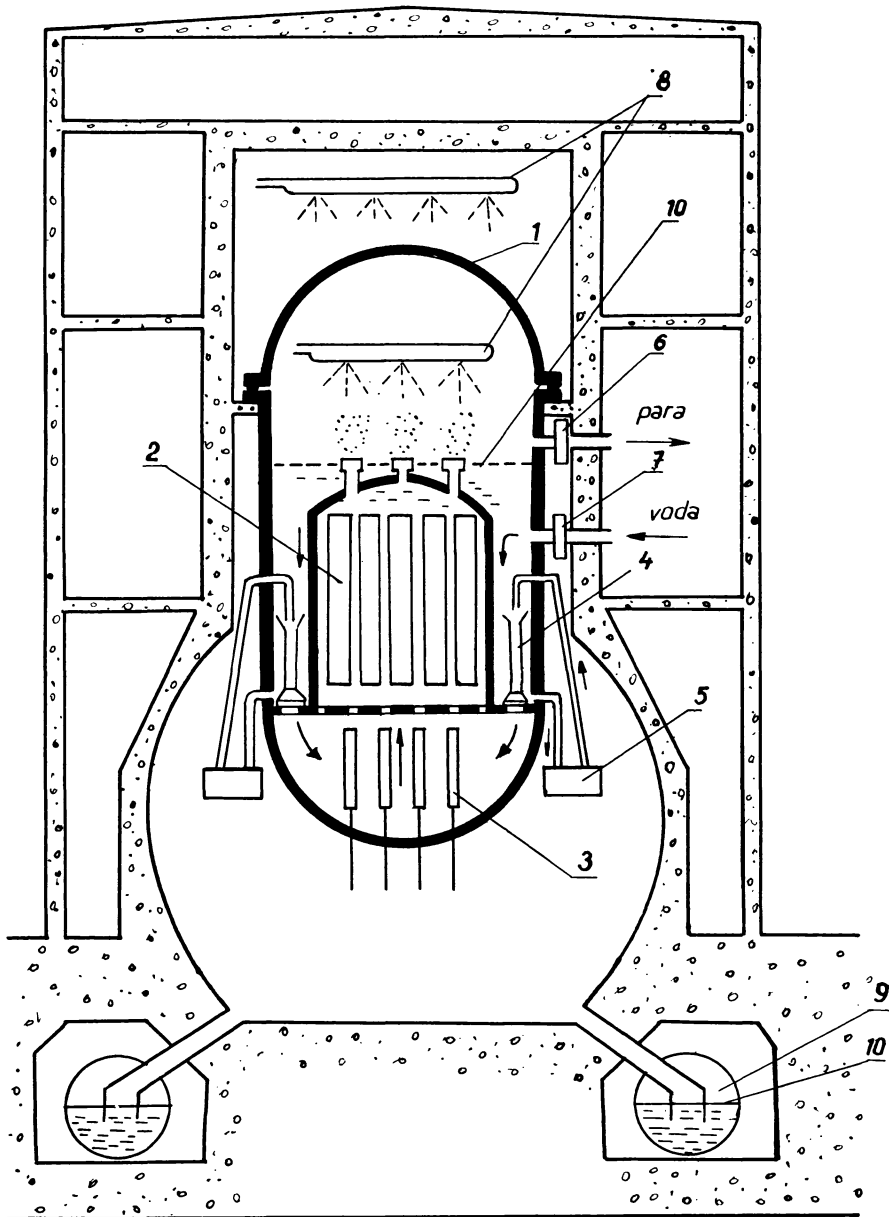


Obr. 2.

Obr. 2. Prierez reaktorovou budovou s dvojším kontejnmentom (fínska jadrová elektrárňa Loviisa s VVER-440).

1 — oddeľovací ventil; 2 — pohony regulačných tyčí; 3 — reaktorová nádoba; 4 — čerpadlo; 5 — vonkajší betónový plášť; 6 — oceľový plášť; 7 — vnútorná betónová stena; 8 — ľadový kondenzátor; 9 — horizontálne umiestnené parogenerátory.

nádob je zložitá úloha, najmä keď si uvedomíme, že počas 30ročnej práce JE plášť reaktora nesmie v žiadnom prípade prasknúť. Z tohoto dôvodu je ťažko očakávať podstatné zvýšenie tlaku a tým aj teploty chladiva. Preto hrubá účinnosť JE s ľahkovodným reak-



Obr. 3. Zjednodušená schéma varného ľahkovodného reaktoru s kontejnmentom.

1 — reaktorová nádoba; 2 — palivové súbory; 3 — regulačné tyče; 4, 5 — systém zabezpečujúci cirkuláciu chladiva; 6, 7 — poistné ventily; 8 — sprchy; 9 — nádrž na zníženie tlaku v prípade úniku pary z primárneho okruhu; 10 — hladina vody.

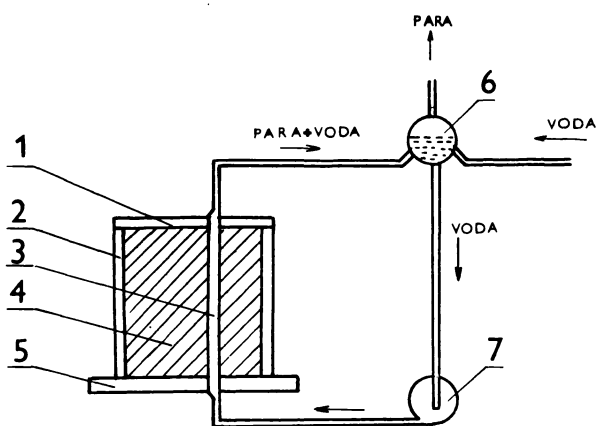
torom neprevýši hodnotu 33–34%. V tomto smere tieto JE ustupujú klasickým tepelným elektrárnám, kde teplota pary dosahuje hodnoty až 560 °C a účinnosť 40%.

V krajinách RVHP sa v najbližšom období budú stavať sériové JE s dvoma reaktormi VVER-440 o jednotkovom výkone 440 MWe. Takáto elektráreň už pracuje na Koľskom poloostrove v ZSSR, v BLR („Kozloduj“), v NDR („Nord“) a sú vo výstavbe aj v ostatných socialistických krajinách a vo Fínsku. V neskoršom období (po r. 1980) majú sa stavať elektrárne s reaktormi VVER-1000 o jednotkovom výkone 1000 MWe. Tieto reaktory budú pracovať s dvoma 500 MW turbínami a neskoršie majú byť vytvorené monobloky reaktor-turbína o výkone 1000 MWe. Prototypy týchto reaktorov boli vyvíjané v Novovoronežskej jadrovej elektrárni.

Predsedníctvo vlády ČSSR v r. 1971 prerokovalo dlhodobý program rozvoja čs. elektrizačnej sústavy a v jeho rámci prijalo program rozvoja jadrovej energetiky do r. 1990. Podľa tohto programu v ČSSR sa vybudujú JE s celkovým výkonom 10 000–12 000 MW ([9], [10]) vybavené výhradne reaktormi VVER-440 a VVER-1000. Ich podiel na celkovej výrobe elektrickej energie v roku 1990 bude 30%.

Druhú, veľmi perspektívnu skupinu tepelných reaktorov tvoria tzv. kanálové reaktory (reaktory s tlakovými rúrkami). V kanálových reaktoroch sa používajú tyčové palivové články (konštrukčne podobné ako v ľahkovodných reaktoroch), zoskupené v palivové súbory, ktoré sa vkladajú do technologických kanálov. Posledné sú umiestnené v moderátore, ktorým je grafit, alebo ťažká voda. Chladiace médium cirkuluje len cez technologický kanál.

Hlavnou prednosťou kanálových reaktorov je možnosť výmeny paliva za prevádzky a zvyšovania jednotkového výkonu pridávaním opakujúcich sa konštrukčných prvkov (modulov), ako i možnosť výberu typu chladiva nezávisle od typu moderátora. Ich nevýhodou je zložitý cirkulačný obvod chladiva.



Obr. 4. Zjednodušená schéma kanálového varného reaktoru.

1 – vrchná platňa; 2 – stena reaktoru; 3 – jeden z množstva technologických kanálov, do ktorých sa umiestňujú palivové súbory; 4 – moderátor; 5 – spodná platňa; 6 – separátor pary; 7 – čerpadlo.

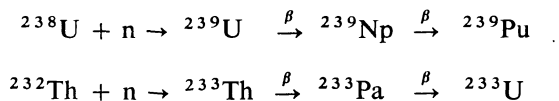
Konštrukcia kanálového grafitového reaktora si nevyžaduje tlakovú nádobu. Reaktor pozostáva z grafitových blokov, v ktorých sú cylindrické otvory pre technologické kanály. Grafitové bloky obklopuje kovový cylindrický plášť, ktorý sa opiera o kovovú platňu. Horný kovový kryt hermeticky uzatvára priestor reaktora.

V ZSSR bol rozpracovaný kanálový urán-grafitový reaktor RBMK-1000 (Reaktor Boľšoj Mošnosti Kipjaščij) o jednotkovom výkone 1000 MWe. Reaktor je varný, chladený obyčajnou vodou, a preto vyžaduje mierne obohatené palivo (1,8% ^{235}U). V sériových jadrových elektrárnach sú dva reaktory RBMK-1000. Prvá takáto elektráreň pracuje v oblasti Leningradu a ďalšie sú vo výstavbe (Kurská, Černobyľská a Smolenská JE).

Ak je moderátorom ťažká voda, je možné použiť v reaktore prírodný, neobohatený urán. K tomuto typu patrí kanadský reaktor CANDU (Canada Deutérium Uranium), chladený buď ťažkou, alebo ľahkou vodou. V reaktore CANDU vyrástol silný konkurent ľahkovodnému energetickému reaktoru, pretože JE s týmto reaktorom v poslednom období poskytuje veľmi lacnú elektrickú energiu ([12]). Reaktor 1. čs. jadrovej elektrárne v Jaslovských Bohuniciach je tiež ťažkovodný, ale s tlakovou nádobou a chladený CO_2 .

Reprodukcia paliva. Ako bolo spomínané, potenciálne zásoby lacného uránu na našej Zemi sa odhadujú na 30 mil. ton. Zatiaľ sú nám známe lokality, v ktorých je okolo 3 mil. ton uránu v cene pod 33 dol./kg U_3O_8 ([6]). Toto množstvo paliva je dostatočné pre JE s tepelnými reaktormi iba do r. 2000 ([12]). Z toho vyplýva, že ak by sa jadrová energetika vyvíjala len na báze tepelných reaktorov, mohlo by nastať zdraženie uránu už vo veľmi blízkej budúcnosti.

Kardinálnym riešením problému jadrového paliva sú tzv. množivé reaktory, v ktorých v značnom množstve vzniká nové palivo. Princíp reprodukcie sa zakladá na dvoch reakciách, ktoré prebiehajú pri interakcii neutrónov s nuklidmi ^{238}U a ^{232}Th .



Vďaka týmto reakciám izotopy ^{238}U , ktorého je v prírodnom uráne viacej ako 99% a ^{232}Th sa premenia v jadrové palivo ^{239}Pu (^{233}U). Dôležitejšia je prvá reakcia, pretože „surovinou“ je izotop, ktorý je v podstate odpadový produkt pri spracovaní paliva pre súčasné tepelné reaktory. Už len z doterajšieho odpadu by bolo možné vyrobiť také množstvo ^{239}Pu , ktoré by bolo dostatočné na zásobovanie reaktorov palivom až do r. 2000.

Účinnosť procesu reprodukcie paliva v podstatnej miere bude závisieť od priemerného počtu v procese štiepenia uvoľnených sekundárnych neutrónov η , prepočítaných na jeden absorbovaný neutrón v palive. Zo sekundárnych neutrónov jeden je nevyhnutný na udržanie stacionárnej reťazovej reakcie, ostatné môžu byť využité na reprodukciu paliva, a to tým väčšia časť, čím je väčšia veličina η a čím je menší parazitný záchyt neutrónov v konštrukčných materiáloch reaktora. Z tohoto hľadiska je výhodnejšie, keď štiepenie vyvolávajú rýchle neutróny než tepelné, pretože:

1. Veličina η , ako to ukazuje tab. II., rastie so zväčšovaním energie provokujúcich neutrónov.

Tab. II.: Hodnoty veličiny η pre rôzne palivá a energiu provokujúcich neutrónov ([6]).

Energia bombardujúcich neutrónov	Palivo		
	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu
$E = 1 \text{ MeV}$ (rýchle neutróny)	2,45	2,3	2,7
$E = 0,025 \text{ eV}$ (tepelné neutróny)	2,28	2,07	2,09

2. Izotop ^{238}U i keď nemôže plniť funkciu jadrového paliva, štiepi sa pôsobením rýchlych neutrónov, ktoré sú prítomné v štiepnom spektre, v dôsledku čoho počet sekundárnych neutrónov sa zvyšuje μ krát. Hodnota veličiny μ (multiplikačný faktor rýchlych neutrónov) je v medziach 1,1 – 1,3 pre rýchly reaktor a 1,01 – 1,04 pre tepelný reaktor.

3. Účinný prierez absorpcie neutrónov v konštrukčných materiáloch klesá s rastom energie neutrónov zhruba ako $\pi\lambda^2$, kde λ je vlnová dĺžka neutrónu. To má za následok, že z hľadiska absorpcie neutrónov výber konštrukčných materiálov pre rýchly reaktor je menej kritický než pre tepelný reaktor.

Počet sekundárnych neutrónov R , ktoré môžu byť v ideálnom prípade využité na reprodukciu paliva ($R = \eta\mu - 1$) má maximálnu hodnotu (2,5) v rýchlym reaktore pre kombináciu ^{239}Pu a ^{238}U . To znamená, že pri „spálení“ jedného jadra plutónia-239 vznikne v priemere 2,5 nových jadier plutónia-239. Postupným opakovaním procesu sa dá 50 – 70% izotopu uránu-238 konvertovať v štiepny materiál.

Produkcia nového paliva prebieha aj v tepelných reaktoroch. Pre ľahkovodný reaktor hodnota R je rovná 0,5 – 0,7 ([12]), čím zásoby jadrového paliva sa zväčšujú 2 – 3krát v porovnaní s množstvom štiepneho izotopu v prírodnom uráne. Aby vznikla reprodukcia paliva, musí byť $R > 1$. Ako vyplýva z tab. II., v tepelnom reaktore je to možné prakticky len s kombináciou $^{233}\text{U} + ^{232}\text{Th}$ ($R = 1,3$). Pre malú hodnotu R tieto reaktory sa nepovažujú za perspektívne. V súčasnej dobe sa rozpracováva zaujímavý tepelný reaktor s uran-tóriovým cyklom, reaktor MSBR v Oak-Ridge, USA, ktorý má tú zvláštnosť, že bude pracovať s roztavenými uránovými a tóriovými soľami cirkulujúcimi v primárnom okruhu.

Vysoká hodnota R pre ideálny rýchly reaktor s Pu-U cyklom dovoľuje používať v tomto reaktore aj materiály s väčším účinným prierezom absorpcie neutrónov (napr. nehrdzavejúcu oceľ) a týmto vylepšiť mechanické a tepelné vlastnosti konštrukčných uzlov reaktora. V tomto smere rýchle reaktory sú vo výhode pred tepelnými reaktormi, v ktorých sa musia používať zirkoniové, hliníkové a horčíkové zliatiny. Absorbcia neutrónov v konštrukčných materiáloch, v chladive, v neštiepných materiáloch paliva a únik neutrónov znižuje veličinu R v súčasných rýchlych energetických reaktoroch na hodnotu 1,3 – 1,4, v tepelných reaktoroch s U-Th cyklom sa predpokladá dosiahnuť 1,1 – 1,15 ([12]).

Rýchle reaktory. V rýchlom reaktore moderátor sa nepoužíva. Aktívna zóna rýchleho reaktora sa odlišuje od aktívnej zóny ľahkovodného reaktora tým, že je objemove menšia, že musí byť použité palivo s vysokou koncentráciou (~15%) štípiteľných materiálov, sú tam ďaleko väčšie hustoty tokov neutrónov. Aktívna zóna rýchleho reaktora je obklopená plášťom z tyčí obsahujúcich prírodný alebo ochudobnený urán, čím sa vytvára tzv. zóna reprodukcie.

V dôsledku vysokej koncentrácie paliva v rýchlom reaktore ako chladiace médium najlepšie vyhovuje sodík. Použitie Na v úlohe chladiča kladie na konštrukciu reaktora špecifické požiadavky. Z jednej strany vysoký bod varu Na dovoľuje konštruovať reaktorovú nádobu na mierne vysoký tlak (< 1 MPa), z druhej strany vysoká rádioaktivita Na v primárnom okruhu a intenzívna chemická reakcia sodíka s vodou zapríčinili, že v JE s rýchlym reaktorom sa používa až trojokruhový systém chladenia. V primárnom okruhu je rádioaktívny sodík, v medziokruhu je nerádioaktívny Na a tretí okruh je parovodový. Množstvo Na používaného na prenos tepla od rýchleho reaktora k parogenerátorom dosahuje objem 1000 m³.

V súčasnej dobe dosiahla technika sodíkom chladených množivých reaktorov takého stavu, že sa už prišlo k projektovaniu komerčných rýchlych reaktorov o výkone 1000 MWe ([13]). Zatiaľ úspešne pracuje pokusná JE s rýchlym reaktorom BN-350 (150 MWe + odsoľovanie morskej vody o kapacite 120 000 m³/deň). V roku 1973 začala pracovať JE vo Francúzsku s reaktorom Phénix (250 MWe) a neskôr aj vo V. Británii s reaktorom PFR (250 MWe). Vo výstavbe sú ďalšie. Tak v ZSSR sa buduje energetický reaktor BN-600, v NSR reaktor SNR-300, v Taliansku PEC, v USA FTE a v Japonsku MONJU.

Vývoj rýchlych reaktorov je zložitejší problém ako vývoj tepelných reaktorov. Jedným zo základných problémov v technike rýchlych reaktorov je dosiahnutie prijateľnej doby zdvojnásobenia výroby sekundárneho paliva $T_{1/2}$. Rýchly reaktor s palivovým cyklom Pu-U je z hľadiska reprodukcie paliva najperspektívnejším reaktorom a musí vyrábať Pu v takom tempe, aby bol dostatok Pu pre vlastný reaktor i na prvú náplň novobudovaných rýchlych reaktorov.

V súčasnej dobe tempo rastu výroby elektrickej energie v celosvetovom meradle je rovné 7%, takže výroba elektrickej energie sa zdvojnásobí každých 10 rokov ([14]). Vzhľadom na perspektívnu bilanciu palivových surovín, kedy jadrové palivá budú postupne vytlačovať fosilné palivá, tempo rastu výkonov JE bude vyššie než tempo rastu výroby elektrickej energie. Z tohoto hľadiska je potrebné, aby doba zdvojnásobenia výroby paliva v rýchlych reaktoroch bola aspoň 6–8 rokov. Súčasný rýchle energetické reaktory môžu dosiahnuť $T_{1/2}$ okolo 12 rokov ([12]). Skrátenie tejto doby je možné doceliť zvýšením veličiny R (očakáva sa, že rýchle energetické reaktory s Pu-U cyklom dosiahnu $R = 1,5–1,8$), zvýšením merného tepelného zaťaženia paliva (MW/kg), ako i skrátením doby chladenia a doby nutnej na chemické spracovanie vyhorého paliva a výrobu nových palivových článkov. Tu treba poznamenať, že čím kratšia doba chladenia, tým je väčšia rádioaktivita vyhorého paliva a transport, ako i chemické spracovanie takýchto látok si vyžaduje svoje technické riešenie.

Očakáva sa, že JE s rýchlym reaktorom ($T_{1/2} < 10$ rokov) budú rozpracované do

r. 1985 a po roku 1990 sa začne ich široké komerčné využívanie. Ich hrubá účinnosť bude okolo 40%.

Vysokoteplotné reaktory. V poslednom období značne vstúpil záujem o vysokoteplotné reaktory. Tento záujem je motivovaný nasledujúcimi dôvodmi:

1. Čím vyššia teplota chladiva, tým je väčšia účinnosť JE. Takto sa dosahuje nielen ekonomické využívanie palív, ale zároveň sa znižuje tepelný odpad. Tepelné „znečistenie“ životného prostredia je jedným z vážnych problémov rozvoja jadrovej energetiky, pretože JE s ľahkovodným reaktorom majú takmer dvojnásobne väčší odpad tepla ako moderné konvenčné elektrárne.

2. Jedným z najväčších súčasných spotrebiteľov vysokohodnotných fosílnych palív je metalurgia. Produkty spracovania fosílnych palív – koks a redukčný plyn – sa používajú v hutníctve ako zdroje tepla a chemické reagenty. Redukcia železa je možná aj pomocou vodíka ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O}$), ale efektívne prebieha len pri vysokých teplotách. Ako zdroje tepla pre získavanie a ohrev vodíka sú perspektívne vysokoteplotné reaktory.

3. Čistý vodík môže byť využitý i ako syntetické palivo, i ako chemická surovina, a preto v budúcnosti jeho spotreba bude značná. I keď je možné známymi spôsobmi vyrábať vodík z fosílnych palív, v perspektívnej bilancii dáva sa prednosť výrobe vodíka z vody, a to buď elektrolýzou, alebo priamo teplom pomocou recyklických chemických činidiel. Prvý spôsob je nákladnejší, čo je spojené s nevyhnutnou stratou energie v procese premeny tepelnej energie v energiu elektrickú, ale i pomerne nízkou účinnosťou pri výrobe H_2 . Druhý spôsob je ekonomicky výhodnejší (asi o 60%), avšak vyžaduje si vysokoteplotný zdroj tepelnej energie a chemicko-inžinierske rozpracovanie.

V súčasnej dobe vývojom vysokoteplotných reaktorov sa intenzívne zaoberá spoločnosť Gulf General Atomic Inc. Touto firmou rozpracovaný demonštračný reaktor HTGR (High Temperature Gas Colled Reactor) je héliom chladený a grafitom moderovaný tepelný reaktor, z ktorého chladiace médium vystupuje s teplotou $\sim 760^\circ\text{C}$. Ich zdokonalenie môže viesť k teplote $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$. JE s týmto typom reaktora môžu dosiahnuť účinnosť nad 40%.

Ekonomické ukazovatele JE. V jadrových elektrárnach podobne ako v konvenčných náklady na výrobu 1 kWh sa rozdeľujú na investičnú, palivovú a prevádzkovú zložku. O reláciách medzi jednotlivými položkami možno súdiť podľa tab. III., v ktorej sa porovnávajú ekonomické ukazovatele kanadskej JE Pickering A so 4 reaktormi CANDU a v blízkosti nej sa nachádzajúcej uhoľnej elektrárne TE.

V minulom roku výrobné náklady na 1 kWh v Novovoronežskej JE, kde sú 4 reaktory VVER s celkovým výkonom 1455 MWe, boli menšie než 0,7 kop. ([15]). Podobne aj americké JE s reaktormi LWR vyrábajú elektrickú energiu v cene 0,7–0,8 cent/kWh.

Merné investičné náklady IV. bloku Novovoronežskej JE s reaktorom VVER-440 boli 200 rub./kW; očakáva sa, že pre V. blok s reaktorom VVER-1000 budú 193 rub./kW ([6]). Merné investičné náklady JE s LWR v r. 1967 boli okolo 130 dol./kW, ale v r. 1971 vzrástli na 400 dol./kW.

Tab. III. Ekonomické ukazovatele jadrovej a uhoľnej elektrárne ([15]).

Ukazovateľ	JE	TE
Výkon, MWe	4 × 514	4 × 495
Trvanlivosť, (rokov)	30	30
Investične náklady (mil. dol.)	746	264
Súčiniteľ využitia inštalovaného výkonu	80%	80%
Náklady na 1 kWh (cent)		
a) palivová zložka	0,088	0,482
b) investičná zložka	0,46	0,169
c) prevádzková zložka	0,054	0,054
d) náklady na D ₂ O	0,20	—
Suma	0,622	0,704

Jadrová energetika a životné prostredie. Rozvoj energetiky je nevyhnutný predpoklad rozvoja ekonomiky. Avšak rozvoj energetiky a ochrana životného prostredia sú navzájom konkurujúce javy. Preto problém vplyvu jadrovej energetiky na životné prostredie nemôže sa stavať absolútne, ale relatívne, a to vo vsľahu k uhoľným elektrárnám ako druhou možnou alternatívou rozvoja energetiky.

Celkové porovnanie vplyvu konvenčných a jadrových elektrární na životné prostredie je zložitý problém. V tomto porovnaní nestačí brať do úvahy len množstvo vypustených odpadov za rok, ale aj spôsob ich disperzie, normálne koncentrácie v životnom prostredí, treba poznať vsľah medzi dávkou a účinkom, a to ako u rádioaktívnych, tak i chemických odpadov. Preto porovnania tohto druhu majú často orientačný charakter, avšak i tak jednoznačne dokazujú, že JE znečisťujú životné prostredie menej než elektrárne na fosílné palivá.

Tak LAVE a FREENBURG poukázali ([16]), že úrazovosť a výskyt chronických chorôb v prepočte na jednotku vyrobenej elektrickej energie je pri ťažbe uhlia 10krát vyššia ako pri ťažbe a spracovaní uránovej rudy. Ďalej, priemerné ročné riziko úmrtnosti jednotlivca, ktorý je trvale vystavený pôsobeniu exhalátov vypúšťaných do ovzdušia z uhoľnej elektrárne je 160 a 10⁵krát väčšie než pre JE s varným, resp. s tlakovým ľahkovodným reaktorom. Z hľadiska rizika elektrárne na minerálne oleje sú len trikrát výhodnejšie ako uhoľné elektrárne.

Vysoké riziko úmrtnosti spôsobené elektrárnami na fosílné palivá je zapríčinené tým, že vypúšťajú do ovzdušia veľké množstvo jedovatých látok, ako sú SO₂, NO_x, Hg, atď. Napr. každodenná exhalácia ortute z uhoľnej elektrárne o výkone 1000 MWe je 0,8 – 1 kg. Podľa výpočtov IZRAELA a TEVEROVSKÉHO ([17]) v r. 1970 tepelné elektrárne vypustili do ovzdušia 80 mil. ton toxickej látky SO₂. Okrem chemických látok ako v plynných exhalátoch, tak i v popole sú stopové množstvá prírodných rádioaktívnych látok. Podľa MARTINA a spol. ([18]) rádiologická bezpečnosť pre jednotlivca trvale nachádzajúceho sa v blízkosti uhoľnej elektrárne je menšia než v prípade jadrovej. Tu treba poznamenať, že hlavným zdrojom znečistenia biosféry rádioaktívnymi látkami nie sú JE, ale závody

na spracovanie vyhorených palivových článkov. Ak berieme do úvahy celý technologický palivový cyklus jadrovej energetiky (ťažba, výroba palivových článkov, výroba elektriny, preprava a spracovanie palivových článkov, skladovanie odpadu), tak jadrová energetika znečisťuje rádioaktívnymi látkami biosféru viacej než uhoľné elektrárne ([17]). Avšak bolo spočítané ([19]), že jadrová energetika aj v r. 2000 zvýši priemernú dávku na jedného obyvateľa našej Zeme len o 0,64 mrem/rok, čo predstavuje menej než 1% z priemernej dávky, ktorú spôsobujú prírodné zdroje (kozmicke žiarenie, žiarenie rádionuklidov v zemskej kôre a ľudskom organizme) a podľa odhadu rôznych autorov je rovná 100 až 150 mrem/rok. Ročné radiačné zaťaženie obyvateľstva v dôsledku rozvoja jadrovej energetiky je ďaleko nižšie než od röntgenovej diagnostiky (20–50 mrem), alebo od rádioaktívneho spádu po skúškach jadrových zbraní (5–10 mrem).

Dnes ekológovia sa už jednoznačne zhodujú v tom, že rozvoj jadrovej energetiky je z hľadiska ochrany životného prostredia výhodnejší než rozvoj elektrární na fosilné palivá. A to je ďalší dôvod na podporu rozvoja jadrovej energetiky.

Literatúra

- [1] A. M. PETROSIANC, *Atomnaja energetika zarubežnych stran*. Atomizdat, 1974.
- [2] Nucl. Eng. Int., Jan/Febr. 91, 1971.
- [3] KRLÍN L., *Pokroky mat., fyz. a astronómie*. 1 (1976), str. 22.
- [4] W. HÄFELE, A. MANNE, *Strategies for a transition from fossil to nuclear fuels*. IIASA, 1974.
- [5] S. M. FEJNBURG, *Atomnaja energia*, 25, 1968, str. 363.
- [6] *Zborník XX let jadernoj energetiky*. Atomizdat, 1974.
- [7] J. TUCK, *Nuclear Eng. Int.*, č. 186, 1971, str. 924.
- [8] EKLUND S., *Atomnaja technika za rubežom*, č. 5, 1974, str. 3.
- [9] Uznesenie vlády ČSSR č. 189/71.
- [10] *Dvacet let čsl. jaderného programu*. ČSKAE, 1975.
- [11] S. M. FEJNBURG, M. L. POZNAKOV, *Atomnaja energia*, 36, 1974, str. 469.
- [12] V. V. ORLOV, *Atomnaja energia*, 36, 1974, str. 341.
- [13] INJUTIN, E. I., *Bulletin IAEA*, 16, č. 3, 1974, str. 18.
- [14] V. A. UŠAKOV, *Atomnaja technika za rubežom*, č. 2, 3, 1975.
- [15] L. M. VORONIN, E. J. ŽARKOVSKIJ, *Atomnaja energia*, 38, 1975, str. 113.
- [16] L. B. LAVE, L. C. FREENBURG, *Nuclear Safety*, 14, 1973, str. 409.
- [17] J. A. IZRAEL, E. N. TEVEROVSKIJ, *Atomnaja energia*, 31, 1971, str. 423.
- [18] J. E. MARTIN, E. D. HARWARD, D. T. OAKLEY, *Hearings on Effects of Producing Electric Power*, Vol. 1, pp. 773, Superintendent of Documents, U. S. Government Printing Office, 1969.
- [19] *Atomnaja energia*, 32, č. 4, 1972.

Na teoretické predpovede vo fyzike sa nemôžeme vždy príliš spoliehať. Spravidla sú len náznakmi, kde asi možno nájsť nové javy. V minulosti, ako sa ukázalo, nové objavy boli vždy bohatšie

a hlbšie, než ich predvídali teoretici. Keď Kolumbus opustil Cadiz r. 1492, jeho teoretici mu povedali, že dopláva do Indie. Objavil však nový kontinent!
Victor F. Weisskopf
