

Co to je jaderná energetika

Václav Železný*, *Fakulta strojní, ČVUT v Praze*

ÚVOD

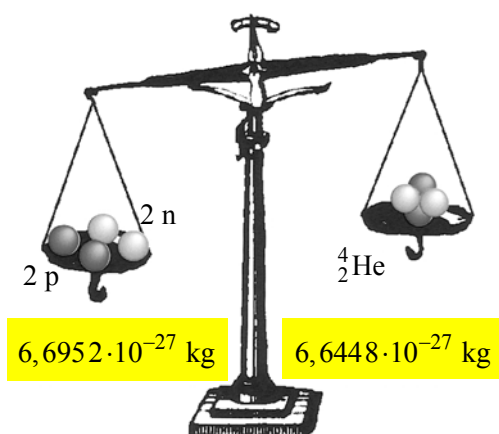
Výhody jaderné energetiky i důvody, proč stavět či alespoň definitivně nezavrhnout jaderné elektrárny, byly již popsány v úvodním článku prezidentem České nukleární společnosti panem Václavem Hanusem. V následující části tohoto časopisu se nyní budeme věnovat popisu jaderné energetiky jako takové, historii jaderné energetiky, v současnosti nejvíce rozšířeným tlakovodním reaktorům a srovnání tlakovodního reaktoru s černobylským reaktorem RBMK, a to zejména z hlediska provozu a bezpečnosti. Nyní se tedy věnujme jaderné energetice samotné a stručnému vysvětlení základních principů získávání energie z atomového jádra.

TAJEMSTVÍ ENERGIE Z JÁDRA HMOTY

Lidé si často kladou otázku, jak je možné, že i v poměrně malém množství hmoty je ukryto značné množství energie, a co způsobuje, že se tato energie při jaderných reakcích uvolňuje. Po dlouhou dobu se předpokládalo, že hmota a energie existují nezávisle na sobě a není mezi nimi žádný vztah. Tuto vazbu objevil teprve Albert Einstein. V tehdy publikovaných statích se také téměř mimochodem objevil dnes již přímo kultovní vzorec $E = m \cdot c^2$. Rychlost světla c je sama o sobě velmi velká a c^2 tudíž představuje obrovské číslo $\approx 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. To vysvětluje, proč je v hmotě skryto tak velké množství energie. Slavný Einsteinův vztah však dává odpověď pouze na první část otázky. Ta druhá část zůstává, neboť na první pohled by součet hmotností elementárních částic účastnících se reakce měl zůstat stejný a nemělo by docházet k jakémukoliv hmotnostnímu deficitu. Ve skutečnosti je tomu ovšem jinak.

Tuto skutečnost objevil v roce 1919 britský chemik F. W. Aston. Pomocí nově sestaveného hmotnostního spektrografu zjistil, že součet hmotností všech nukleonů (protonů a neutronů), což jsou stavební kameny atomového jádra, je o něco větší nežli hmotnost výsledného atomového jádra, viz obrázek 1. A protože hmota se nemůže nikam ztratit, hledejme vysvětlení v Einsteinově rovnici. Chybějící hmota se přeměnila na energii, která se uvolnila při hypotetické jaderné reakci. V jádru tuto energii nyní nahrazují vazebné jaderné síly, které drží jádro pohromadě. Tím je zaručeno, že množství energie připadající na jeden nukleon zůstává konstantní. Pokud bychom chtěli jádro zpětně rozbít na jednotlivé nukleony, museli bychom onu energii opět dodat. To však stále ještě nedává vysvětlení na druhou část otázky.

To se objeví teprve, když si zmíněný hmotnostní deficit vztáhneme na jednotlivé nukleony. Zjistíme, že tento deficit je odlišný prvek od prvku. Nejprve poměrně rychle narůstá od nejlehčích jader směrem k železu, kde dosahuje maxima, a poté nastává pozvolný pokles směrem k nejtěžším jádrům. Termojaderná syntéza probíhající na hvězdách tedy může teoreticky dosáhnout ma-



Obrázek 1 Rozdíl hmotností atomového jádra a nukleonů tvořících jádro

* Vaclav.Zelezny@fs.cvut.cz

ximálně železa, neboť pro syntézu těžších prvků už je třeba naopak energii dodávat. Ke vzniku těžších prvků tak podle astronomů docházelo zejména při kosmických katastrofách, jako jsou například výbuchy supernov, kdy byla k dispozici dostatečná energie, aby se jádra lehčích prvků mohla sloučit na těžší. Zde tedy máme vysvětlení, jak lze při jaderných reakcích získávat energii. Je to možné buďto slučováním lehkých jader, kdy napodobíme to, co příroda provozuje v nitru hvězd, anebo štěpením velmi těžkých jader, kdy naopak využijeme energii, která musela být dodána při tvorbě těchto jader v raných dobách vesmíru. V obou případech je celková hmotnost jader vstupujících do reakce vyšší nežli hmotnost jader z ní vystupujících a tento hmotnostní deficit se přeměňuje na energii. Aby však bylo možné tuto energii využít musí být možné tyto reakce udržovat a řídit a to se prozatím daří pouze v případě štěpení těžkých jader.

ŠTĚPNÁ ŘETĚZOVÁ REAKCE

Italský vědec Enrico Fermi bombardoval jádra jednotlivých prvků neutrony s cílem vyvolat radioaktivní přeměny. V případě nejtěžšího tehdy známého prvku – uranu – však nastal do té doby neznámý jev – štěpení. Tento jev později vysvětlili Hahn, Meitnerová a Strassmann, Otto Hahn za objev štěpení uranu dostal Nobelovu cenu. Bylo potvrzeno, že jádro uranu je schopno se při ostřelování neutrony rozštěpit na dvě lehčí jádra. Ukázalo se, že tato reakce je výrazně exotermická, tedy uvolňuje se při ní značné množství energie. Navíc bylo zjištěno, že se při rozštěpení jádra uranu uvolňují dva až tři neutrony, které jsou schopné štěpit další jádra uranu. Tato zjištění představovala první krok na cestě k využití energie z atomového jádra. Ke skutečnému využití jaderné energie bylo však ještě daleko, neboť je velký rozdíl vyvolat v malém množství uranu štěpení pomocí neutronů z cizího zdroje a vytvořením takového zařízení, ve kterém je možné udržovat a řídit samovolnou štěpnou řetězovou reakci.

Základním problémem je to, že uran se v přírodě vyskytuje jako směs dvou izotopů ^{235}U a ^{238}U . Označení izotopy se používá pro atomy jednoho a téhož prvku, jejichž jádra se však liší počtem neutronů, a tedy i atomovou hmotností. Snadno štěpitelný je však pouze ^{235}U , který lze štěpit neutrony celého energetického spektra od rychlých až po pomalé. Tohoto izotopu je ovšem pouhých 0,7 % z celkového množství. Zbýlých 99,3 % tvoří ^{238}U , který je štěpitelný pouze omezeně, a to neutrony s velkou energií. Pro uskutečnění štěpné řetězové reakce je tedy nutné zvýšit pravděpodobnost, že letící neutron zasáhne jádro ^{235}U a způsobí štěpení. To je v zásadě možné realizovat dvěma způsoby. Tím prvním je umělé zvýšení koncentrace ^{235}U , které se v jaderné technice označuje termínem obohacení paliva. Zde je však třeba podotknout, že obohacování uranu je technologicky složitý a finančně náročný proces. Palivo s vyšším stupněm obohacení se proto zatím využívá zejména v menších výzkumných reaktorech a pak také v takzvaných rychlých množivých reaktorech, které se ovšem v jaderné energetice dosud sériově nerozšířily. Druhou možností je zpomalení neutronů. Bylo zjištěno, že pomaleji letící neutrony mají o dva až tři řády větší pravděpodobnost, že zasáhnou jádro ^{235}U a způsobí jeho rozštěpení. Celková pravděpodobnost štěpení pak v takovém případě výrazně převyšuje pravděpodobnost jiných jaderných reakcí a je možné dosáhnout toho, aby se štěpná řetězová reakce udržela. U většiny současných energetických reaktorů se oba způsoby do určité míry kombinují tak, že zpomalujeme neutrony a zároveň mírně obohacujeme palivo.

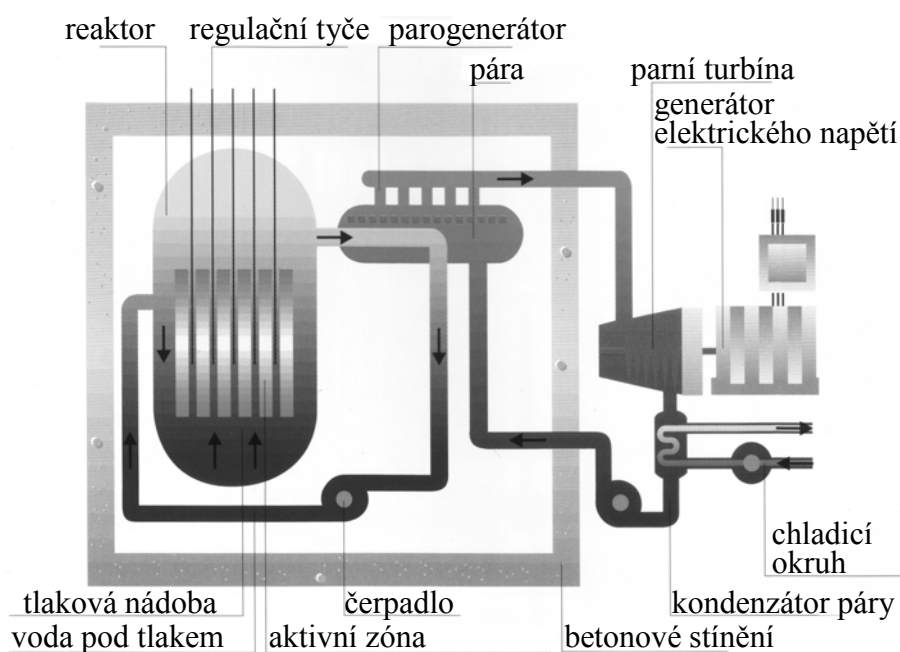
Podmínkou pro zpomalení neutronů ovšem je, že palivo musí být v reaktoru obklopeno látkou, která je schopná neutrony co nejlépe zpomalovat a přitom je co nejméně pohlcuje, abychom je neztráceli parazitní absorpcí, nýbrž aby se pohlcovaly v palivu, kde způsobí další štěpení. Takovouto látku nazýváme moderátor. Požadavkům na dobrou schopnost zpomalování a nízkou absorpci vyhovují pouze některé látky, přičemž v jaderné energetice se nejvíce rozšířily obyčejná (lehká) voda, těžká voda a grafit. Reaktory podle typu používaného mode-

rátoru pak označujeme za lehkovodní, těžkovodní a grafitové. Lehká voda však zcela nesplňuje podmínku nízké absorpce neutronů, a tak reaktory, které ji využívají jako moderátor, musí mít alespoň mírně (okolo 4 %) obohacené palivo, zatímco reaktory využívající jako moderátor těžkou vodu či grafit jsou z hlediska hospodaření s neutrony úspornější a jsou schopné pracovat i s neobohaceným palivem vyrobeným z přírodního uranu.

JAK PRACUJE JADERNÁ ELEKTRÁRNA

Na obrázku 2 je zjednodušené schéma jaderné elektrárny s reaktorem typu VVER (vodo-voděnnj eněrgetičeskij reaktor), které provozujeme i v našich jaderných elektrárnách. Reaktory VVER obecně patří do kategorie takzvaných tlakovodních reaktorů, které se do současnosti ve světě nejvíce rozšířily.

Základem fungování jaderné elektrárny je štěpná řetězová reakce probíhající v palivu. Zpomalený neutron zasáhne jádro ^{235}U , to se stává nestabilním a ve velmi krátkém časovém intervalu se rozpadá na dvě menší jádra, což je doprovázeno uvolněním energie a emisí dvou až tří rychlých štěpných neutronů doprovázenou rovněž emisí záření gama.



Obrázek 2 Zjednodušené schéma jaderné elektrárny

Emitované štěpné neutrony o velké energii vylétají z paliva a dostávají se do moderátoru. Zde narážejí do jader moderátoru, kterým při srážkách předávají část energie, čímž postupně snižují svou rychlost. Účinnost tohoto brždění je dána atomovou hmotností jader moderátoru a obecně platí, že čím lehčí je jádro, tím účinnější je brždění. Ideálním moderátorem by tedy z tohoto pohledu byl vodík, neboť zde by mohl neutron ztratit veškerou svou energii při jediné srážce prostřednictvím pružného rázu, jaký známe třeba při srážce kulečnickových koulí. Vodík však nelze použít, neboť moderátor nemůže být plynného skupenství, a kapalný vodík existuje pouze při teplotách velmi hluboko pod bodem mrazu, při kterých by ovšem žádné energetické zařízení nemohlo pracovat. Z tohoto důvodu používáme jeho kapalnou sloučeninu s kyslíkem – vodu. U tohoto typu reaktoru má voda navíc i funkci chladiwa, které zajišťuje odvod tepla z aktivní zóny a reaktoru. Ruský název vodo-vodní tedy nemá nic společného s vodovodem, ale znamená vodou moderovaný – vodou chlazený.

Po několika desítkách srážek ztratí neutron veškerou přebytkovou kinetickou energii. Takový neutron pak označujeme jako pomalý nebo také tepelný, neboť jeho energie je

v rovnováze s tepelným pohybem molekul prostředí. V prostředí reaktoru se takový neutron nadále pohybuje prostřednictvím difúze. Posléze vniká zpět do paliva, kde dochází ke štěpení jádra ^{235}U , a tím se celý cyklus uzavírá.

Energie uvolněná při štěpení se z velké části předává nově vzniklým jádrům – takzvaným fragmentům, další části energie odnášejí emitované neutrony a záření gama. Zbývající energie připadá na neutrina. V případě fragmentů i neutronů má tato energie formu kinetické energie. Avšak jaderné palivo je pevná látka, ve které se fragmenty, jenž se při štěpení velkou rychlostí rozlétnou od sebe, téměř nemají možnost pohybovat, a tak svou energii prakticky okamžitě předávají okolnímu materiálu, čímž dochází k ohřevu paliva. Neutrony předávají svou energii z velké části v moderátoru, který, jak už bylo řečeno, je u lehkovodních reaktorů zároveň i chladivem a odebírá i teplo uvolňované v palivových tyčích.

Ohřáté chladivo posléze proudí ven z reaktoru do zařízení nazývaného parogenerátor, což není nic jiného než velký tepelný výměník, kde se teplo předává vodě sekundárního okruhu. Poté je chladivo, jehož teplota poklesne zhruba o $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, hnáno hlavními cirkulačními čerpadly zpět do reaktoru. Tento okruh označujeme jako primární. Pára vzniklá v něm na sekundární straně parogenerátoru se po separaci zbývajících vodních kapiček vede do parní turbíny, kde postupně expanduje a předává svou energii rotoru turbíny. Po průchodu turbínou se pára odvádí do kondenzátoru, kde přechází zpět do kapalného skupenství. Vzniklá voda se prostřednictvím napájecích čerpadel vrací zpět do parogenerátoru, přičemž tento okruh označujeme jako sekundární. Takovéto uspořádání elektrárny nazýváme jako dvouokruhové. Můžeme mít i jadernou elektrárnu s jednookruhovým uspořádáním. V takovém případě se ovšem musí použít odlišný typ reaktoru, a to takzvaný reaktor varný. Zde dochází k varu vody přímo v reaktoru a vzniklá pára se rovnou vede do turbíny. Toto uspořádání je sice poněkud snadnější z konstrukčního hlediska, a tudíž i méně nákladné, ale za provozu má určitou nevýhodu, neboť zde dochází k zanášení radioaktivity do turbíny a kondenzátoru. U dvouokruhového uspořádání s tlakovodními reaktory zůstává radioaktivita uzavřena pouze v primárním okruhu, což má z hlediska provozu a údržby zbylých částí zařízení své nezanedbatelné výhody. Mimo jiné i z tohoto důvodu se tyto reaktory doposud využívají nejvíce.

PROVOZOVANÉ JADERNÉ ELEKTRÁRNY

Ze statistik uváděných mezinárodní agenturou pro atomovou energii lze zjistit, že z více než 440 reaktorů, které jsou v současné době v provozu po celém světě, je skoro 270 reaktorů tlakovodních. Druhým nejvíce rozšířeným typem jsou zmíněné varné reaktory, kterých je kolem 90. Všechny tyto reaktory, dohromady více než tři čtvrtiny z celkového počtu, patří mezi reaktory chlazené a moderované obyčejnou lehkou vodou. Z ostatních v současnosti provozovaných typů lze ještě zmínit kanadské reaktory CANDU, které jsou chlazené i moderované těžkou vodou, a kterých je v provozu přes 40. Dále pak jsou to britské grafitem moderované a plynem chlazené reaktory Magnox a jejich modernější verze reaktory AGR, kterých je dohromady 22. A posledním typem pak jsou neblaze proslulé ruské grafitem moderované a vodou chlazené reaktory RBMK (Černobyl), kterých do současnosti zbývá v provozu 16. U ostatních typů lze říci, že se neprosadily pro opakované průmyslové použití a nemá význam je zde uvádět. Sem patří zejména prototypové rychlé reaktory a některé další.

Historie jaderné energetiky ve světě

ZAČALO TO V CHICAGU

Desítky let bádání a práci mnoha vynikajících vědců završil v roce 1942 Enrico Fermi, když poprvé v historii úspěšně spustil řízenou štěpnou řetězovou reakci. Bylo to 2. prosince krátce po půl čtvrté odpoledne, když se v jím zkonstruovaném experimentálním reaktoru Chi-

cago Pile 1, umístěném v podzemí opuštěného sportovního stadionu chicagské university, podařilo takovouto reakci nejen nastartovat, ale také udržovat a řídit. Tento okamžik je označován za počátek jaderné éry lidské civilizace. Do povědomí lidstva tak začal vstupovat nový pojem „jaderná energie“.

RANÉ OBDOBÍ

Ačkoliv byla štěpná řetězová reakce poprvé spuštěna kontrolovaným způsobem, jaký známe z dnešních jaderných elektráren, další vývoj kolem jaderné energie rozhodně nezapřel fakt, že se tak stalo v rámci amerického atomového projektu Manhattan, jehož hlavním úkolem bylo získání jaderné zbraně. To se také v průběhu roku 1945 skutečně podařilo. Jaderná energie se tak nejprve představila jako obrovská ničivá síla při explozích atomových bomb nad japonskými městy Hirošima a Nagasaki. Obě jaderné exploze však byly pro lidstvo významným poučením. Jaderná energie dokázala, že se při nevhodném zacházení může z očekávaného nositele pokroku stát pohádkovým zlým džinem, což bylo důrazným varováním pro budoucnost.

I po druhé světové válce výzkum pokračoval nadále zejména pro vojenské využití. V tomto případě však už nelze říci, že by to bylo ke škodě budoucí jaderné energetice. Dnes nejrozšířenější typ jaderného reaktoru, tj. lehkovodní tlakovodní reaktor, byl totiž původně vyvíjen pro pohon vojenských námořních plavidel, a to zejména ponorek a letadlových lodí. Lze říci, že určité zásluhy na vzniku tohoto spolehlivého typu jaderného reaktoru tak má i tehdejší ministr námořnictva admirál Rickover, který zastával vizi moderního námořnictva, jehož páteří jednotky budou mít jaderný pohon propůjčující plavidlům prakticky neomezený operační dojezd a vysokou rychlost danou velkým výkonem hnacích agregátů. Za zmínku rovněž stojí, že již v této vizi byl kladen velký ohled na bezpečnost takovýchto zařízení, přičemž ohledy na bezpečnost bohužel nejsou pro vojáky vždy typické.

Jestliže za počátek jaderné éry je označován prosinec 1942, pak datem narození jaderné energetiky by byl 8. prosinec 1953, neboť právě v tento den přednesl tehdejší americký prezident Dwight Eisenhower svůj slavný projev nazývaný „Atomy pro mír“, ve kterém mimo jiné navrhoval i vznik pozdější Mezinárodní agentury pro atomovou energii. Krátce poté bylo rozhodnuto o výstavbě první „komerční“ jaderné elektrárny Shippingport ve státě Pennsylvania. Dodavatelem reaktoru se stala firma Westinghouse, která se opírala o zkušenosti svých vědců a inženýrů, kteří je nasbírali ve vojenských projektech. Elektrárna Shippingport byla k elektrizační síti připojena v roce 1957. Pomyslné prvenství však tento projekt nezískal, neboť již v roce 1954 byla v tehdejší SSSR připojena k síti jaderná elektrárna Obninsk s první generací reaktoru RBMK a v roce 1956 britská jaderná elektrárna Calder Hall s grafitovými reaktory Magnox. Evropa tedy v tomto případě USA o něco předběhla.

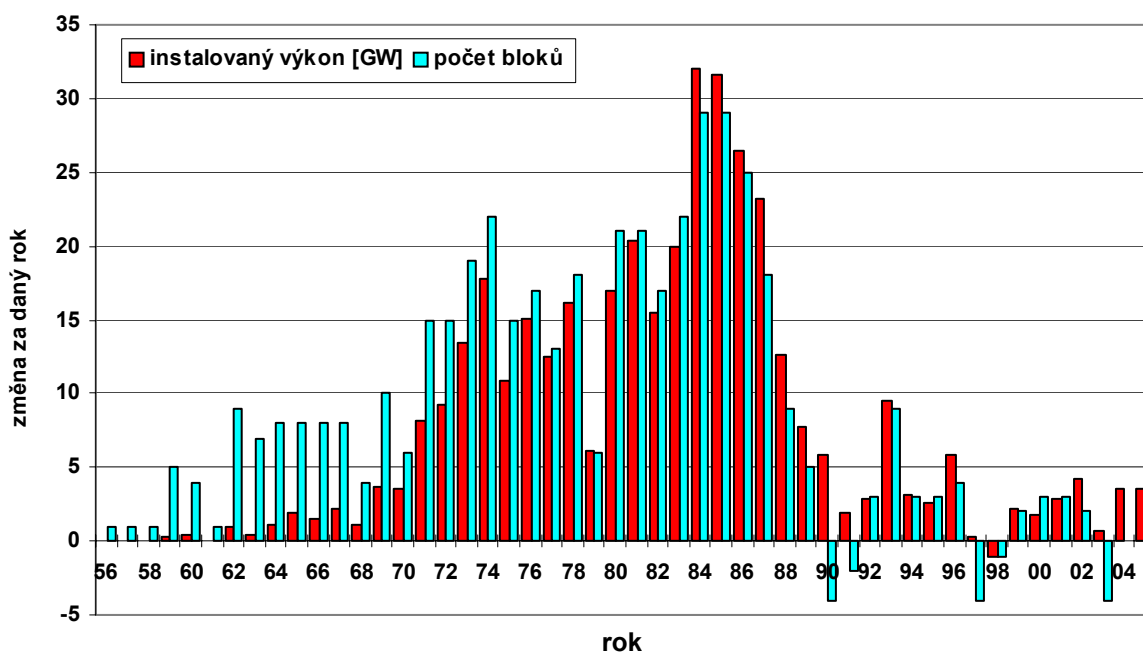
ROZVOJ JADERNÉ ENERGETIKY

Rozvoj jaderné energetiky v prvních letech byl spíše ve znamení experimentování a hledání vhodných typů reaktorů, o čemž svědčí nízký celkový výkon elektráren uváděných do provozu v průběhu šedesátých let. Jaderná energetika však v této době získávala výrazně na popularitě. Bylo to dáno poměrně zřetelnou orientací zájmu veřejnosti na životní prostředí, díky čemuž upadala obliba elektráren spalujících uhlí a další fosilní paliva. V důsledku toho vzrůstal počet rozestavěných bloků, které pak byly dokončovány a uváděny do provozu v sedmdesátých letech. Na grafu 1 je v tomto období patrný výrazný přírůstek, a to jak počtu instalovaných bloků, tak i celkového instalovaného výkonu. To značí, že do provozu uváděné bloky byly již ryze komerční a měly větší výkony, nežli bloky z šedesátých let.

Druhé období, ve kterém se jaderná energetika znovu dostala do popředí zájmu politických činitelů i energetických společností, bylo v sedmdesátých letech, kdy byl zejména tehdejší

kapitalistický svět tvrdě zasažen ropnou krizí v roce 1973. V USA pak byla podobným šokem neočekávaně krutá zima 1976–1977, která způsobila problémy se zásobováním zemním plynem a silně ochromila celý americký středozápad. Tyto palivo-energetické šoky znovu posílily tendence zvýšit podíl jaderných elektráren na výrobě elektřiny, neboť jsou nezávislé na fosilních palivech a relativně i na klimatických extrémech. Odezva této změny orientace energetiky je patrná v dalším výrazném nárůstu počtu bloků i výkonu instalovaného v jaderných elektrárnách v průběhu osmdesátých let.

V té době vcelku příznivý obraz jaderné energetiky však byl narušen již 28. března 1979, kdy došlo k havárii na druhém bloku elektrárny Three Mile Island nedaleko Harrisburgu ve státě Pennsylvania. Ačkoliv při této havárii došlo jen k velmi malému úniku radiace a tudíž k zanedbatelným škodám na životní prostředí, utrpěla jaderná energetika poměrně značné škody na své pověsti a na důvěře občanů i politiků. Skutečnou katastrofu však pro jadernou energetiku znamenala havárie čtvrtého bloku ukrajinské jaderné elektrárny Černobyl v dubnu 1986. Na rozdíl od havárie na TMI 2, zde došlo prakticky k úplné destrukci jak reaktoru, tak i velké části reaktorového bloku a k masivnímu úniku radioaktivních látek, kterými bylo na různé úrovni zasaženo rozsáhlé území. Protijaderná hysterie, která se po havárii v Černobylu rozpoutala, měla pro jadernou energetiku jako obor katastrofální následky. S odstupem bezmála dvaceti let se však na základě výsledků rozsáhlých výzkumů prováděných WHO a UNSCEAR ukazuje, že například psychóza rozpoutaná v období bezprostředně po havárii měla pro lidi daleko horší následky než samotná havárie. Nezměnitelným faktem už bohužel zůstane, že tato havárie znamenala pro jadernou energetiku na více než deset let prakticky zmrtnění dalšího rozvoje.



Obrázek 3 Změny počtu provozovaných jaderných bloků a celkového instalovaného výkonu v jednotlivých letech

Vývoj v posledních několika letech se vyznačuje tím, že počet provozovaných reaktorových bloků kolísá na přibližně konstantní úrovni. Instalovaný výkon však prakticky neustále vykazuje přírůstky. Je to dáno tím, že i když je v současné době uváděno do provozu poměrně málo nových bloků, pohybují se jejich výkony v průměru okolo tisíce megawattů, zatímco z provozu jsou vyřazovány staré bloky z šedesátých let, jejichž výkon je mnohem menší. Úbytek instalovaného výkonu způsobený vyřazením několika starých bloků je tak kompenzo-

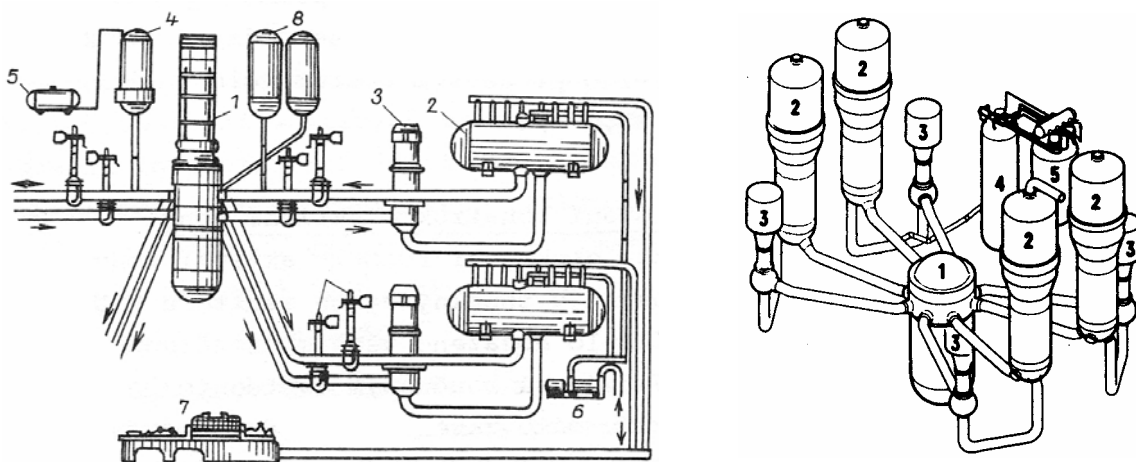
ván spuštěním jednoho či dvou moderních. Roční produkce elektřiny neustále stoupá, a to i v letech, kdy celkový instalovaný výkon stagnuje. Příčinou je skutečnost, že jaderné elektrárny prakticky soustavně zlepšují provozní výsledky.

V posledních letech se navíc také začíná stále silněji hovořit o další renesanci jaderné energetiky, coby jedné z variant řešení problémů s neustále stoupající poptávkou po elektrické energii na straně jedné, a obavami z nárůstu emisí skleníkových plynů a s tím souvisejícím rizikem globálního oteplování planety v důsledku skleníkového efektu na straně druhé. Jaderná energetika tak už není na pořadu dne pouze v Japonsku a Jižní Koreji, ale ambiciózní plán rozvoje začíná realizovat také Čína, nový jaderný blok se začíná stavět ve Finsku, uvažuje se o tom i ve Francii a konečně i v USA se intenzívně pracuje na vytipování vhodných typů reaktorů pro budoucí jaderné elektrárny a do roku 2020 se plánuje dokonce 50 GW výkonu v nových jaderných blocích.

Elektrárny s tlakovodními reaktory

ÚVOD

Již bylo uvedeno, že zdaleka nejrozšířenějším typem jaderného reaktoru je v současné době tlakovodní reaktor. Označení tlakovodní je odvozeno od skutečnosti, že chladivo (voda) je v primárním okruhu udržováno pod vysokým tlakem. Z fyziky víme, že teplota varu vody s rostoucím tlakem stoupá, a právě tohoto faktu bylo využito při konstrukci tlakovodního reaktoru. Chladivo je v reaktoru udržováno pod takovým tlakem proto, aby nedocházelo k jeho varu – odtud tedy název tlakovodní. Úkolem této kapitoly je poskytnout stručný popis jaderné elektrárny s tímto typem reaktoru.



1 – reaktor, 2 – parogenerátor, 3 – hlavní cirkulační čerpadlo, 4 – kompenzátor objemu, 5 - barbotážní nádrž, 6 – napájecí nádrž, 7 – parní turbína, 8 – hydroakumulátor

Obrázek 4 Zjednodušené schéma jaderných elektráren typu VVER a PWR

Současné tlakovodní reaktory dělíme do dvou základních skupin, a to podle oblasti jejich původu. První tlakovodní reaktory byly vyvinuty v USA a tento typ reaktoru se posléze s drobnými obměnami rozšířil do dalších zemí tehdejšího kapitalistického světa. V SSSR ovšem v té době probíhal paralelně vývoj vlastního tlakovodního reaktoru a v roce 1964 byl první takový reaktor připojen k síti v Novovoronežské jaderné elektrárně. Vývoj těchto reaktorů pak pokračoval dále a posléze se tyto reaktory rozšířily převážně do zemí tehdejšího socialistického tábora. I v současné době se tak používá rozdělení na tlakovodní reaktory typu VVER a tlakovodní reaktory západního typu označované jako PWR. Základní princip je u obou skupin shodný, ale

je zde řada konstrukčních odlišností. O těch hlavních se postupně zmíníme. Zjednodušená schémata obou typů jaderných elektráren jsou znázorněna na obrázku 4.

ZÁKLADNÍ SOUČÁSTI TLAKOVODNÍHO JADERNÉHO REAKTORU

Tlaková nádoba

Stěžejní součástí tlakovodního jaderného reaktoru je tlaková nádoba. Je to silnostěnná ocelová válcová nádoba vyrobená ze svařených kovaných prstenců a zakončená eliptickým dnem. V horní části nádoby jsou takzvané hrdlové prstence obsahující hrdla pro připojení potrubí primárního okruhu. Na víku nádoby jsou nátrubky pro připojení pohonů regulačních tyčí. Vnitřní povrch tlakové nádoby je z důvodu lepší odolnosti vůči prostředí chráněn navařenou výstelkou z nerezové oceli. Tlaková nádoba je stěžejní součástí celé elektrárny, neboť ji nelze vyměnit ani nějakým zásadnějším způsobem opravovat, a tudíž se od životnosti tlakové nádoby odvíjí životnost celé jaderné elektrárny. Tlaková nádoba je nejen namáhána značným vnitřním přetlakem a teplotou, ale navíc je v oblasti aktivní zóny vystavena vysokému toku neutronů, které způsobují poruchy v krystalické mřížce a dochází tak k postupnému křehnutí materiálu. Kvalitě výroby musí proto být věnována maximální péče a stejně tak musí být stav nádoby pečlivě kontrolován po celou dobu provozu elektrárny. Tlakové nádoby reaktorů VVER i reaktorů západní koncepce nemají zásadní technické odlišnosti.

Palivové články

V současných jaderných reaktorech je nejvíce rozšířeno palivo na bázi oxidů uranu, konkrétně oxidu uraničitého UO_2 . Oxid uranický je pevná keramickým materiálům podobná hmota s velmi vysokou teplotou tavení, která se pohybuje okolo $2800\text{ }^\circ\text{C}$. Palivo se v reaktoru nachází ve formě malých tablet. Jejich průměr činí u našich reaktorů $7,55\text{ mm}$ a výška může být $10\text{--}30\text{ mm}$ v závislosti na typu reaktoru a paliva. Vysoká tepelná odolnost je u jaderného paliva velmi důležitá, neboť pracovní teplota na povrchu tablet se pohybuje vysoko v řádu stovek stupňů a v centrální části tablet může běžně přesahovat i $2000\text{ }^\circ\text{C}$.

V reaktoru jsou palivové tablety uloženy ve speciální povlakové trubce, která je na koncích hermeticky uzavřena koncovkami a kterou označujeme jako palivovou tyč. Palivové tyče se většinou vyrábějí z vysoce kvalitních slitin na bázi zirkonia a tloušťka stěny se pohybuje okolo $0,8\text{ mm}$. V horní části tyče je umístěna distanční pružina, která tablety tlačí na sebe a tím pomáhá stabilizovat v pracovní poloze. Při výrobě se volné prostory uvnitř tyče plní heliem o tlaku do $0,7\text{ MPa}$. Helium se používá pro zlepšení přestupu tepla mezi povrchem palivové tablety a vnitřním povrchem palivové tyče. Během provozu reaktoru do tohoto prostoru postupně difundují plynné produkty štěpení a také ty produkty, které se nacházejí v plynném stavu díky vysokým teplotám.

Počet palivových tyčí se v našich reaktorech pohybuje mezi 44 až 48 tisíci. Kvůli snadnější manipulaci a lepší možnosti upevnění v reaktoru jsou tyče sestaveny do větších celků, které nazýváme palivové kazety či soubory. Počty palivových tyčí v kazetě se dost výrazně liší podle typu reaktoru, 126 u VVER 440 (Dukovany), resp. 312 u VVER 1000 (Temelín). Skelet palivové kazety fixuje palivové tyče ve správné pozici a snižuje riziko nežádoucích průhybů tyčí a vibrací v důsledku intenzivního proudění okolo nich. Podle typu reaktoru se liší i konstrukce kazet. Kazety VVER 440 mají vnější obálku, zatímco kazety VVER 1000 mají pouze skelet, takže chladivo se může promíchávat i mezi jednotlivými kazetami. Kazety výrazně zrychlují i manipulaci s palivem, neboť manipulovat a upevňovat každou tyč samostatně by nebylo technicky možné. Rozteč palivových tyčí v kazetě se u našich reaktorů pohybuje mezi 12 a 13 mm . Palivové kazety jsou pak v reaktoru naskládány podle přesně definovaného kartogramu a tvoří aktivní zónu. Tak označujeme prostor, kde probíhá vlastní štěpná řetězová reakce.

U jaderného paliva najdeme mnohem výraznější odlišnosti mezi reaktory VVER a reaktory západní koncepce. Nejde přitom ani tak o odlišnosti v palivu samotném nebo v konstrukci palivových tyčí, ale o jejich uspořádání v reaktoru. Reaktory VVER mají palivové tyče v kazetě uspořádané tak, že osy tyčí tvoří vrcholy rovnostranného trojúhelníku. Toto uspořádání označujeme jako trojúhelníkovou palivovou mříž. Palivová mříž reaktorů západní koncepce je naproti tomu čtvercová. Kazety reaktorů VVER jsou pak šestihranné a u reaktorů západní koncepce čtyřhranné. To ovlivňuje i celkové uspořádání kazet v aktivní zóně reaktoru. Podrobnější rozbor vlivu těchto odlišností zde nebudeme provádět.

Vnitřní části reaktoru

V jaderném reaktoru najdeme ještě další důležité vnitřní vestavby a komponenty, bez kterých by reaktor nemohl fungovat. Za zmínku stojí například: nosný válec aktivní zóny, ochranný plášť aktivní zóny, blok ochranných trub.

Nosný válec aktivní zóny je válcová skořepina s děrovaným eliptickým dnem, na němž jsou přivařeny podpory, do kterých se přesně usazují konce palivových kazet. Je zavěšen na vnitřním osazení hrdlového prstence nádoby a přitlačován víkem reaktoru. Dno nosného válce je opatřeno čepy, které zajistí nezbytný průtok chladiva i v případě, kdy by došlo k utržení nosného válce a dosednutí na dno nádoby. Děrované dno slouží k co nejpřesnějšímu rozdělení a usměrnění proudu chladiva pod aktivní zónou.

Ochranný plášť aktivní zóny slouží k vnějšímu ohraničení aktivní zóny, aby nedocházelo k nežádoucímu průtoku chladiva prostorem mezi palivovými kazetami a nosným válcem. Skládá se z ocelových prstenců vykovaných tak, aby z vnějšku přesně dosedaly k nosnému válci a z vnitřku odpovídaly vnějšímu obrysu krajních palivových kazet v aktivní zóně, přičemž spodní díl je upevněn na dno nosného válce.

Blok ochranných trub je umístěn nad aktivní zónou. Snižuje vibrace konstrukčních částí uložených v horní části reaktoru a přitlačuje palivové kazety k podporám na spodku nosného válce. Další důležitá funkce bloku ochranných trub je vedení regulačních tyčí a vyvedení kabelů vnitroreaktorové instrumentace z prostoru reaktoru, přičemž zajišťuje jejich ochranu před účinky proudu chladiva.

Systém řízení

Systém kontroly a řízení je další velmi důležitou součástí, na které závisí spolehlivý chod jaderného reaktoru a tedy i jeho bezpečnost. Systém sestává jednak z komponent vykonávajících vlastní regulaci, tzv. regulační tyče s jejich pohony, a poté z komponent, které zajišťují pro tuto regulaci nezbytné údaje, což je velké množství čidel, jako jsou měřiče rychlosti proudícího chladiva, termočlánky měřící teploty, detektory neutronů a záření gama, a další. Toto vybavení označujeme jako vnitroreaktorovou instrumentaci.

Vlastní regulaci zajišťují v aktivní zóně absorpční tyče, které jsou obvykle vyráběny z oceli s příměsí materiálů silně absorbujících neutrony, jako je například bór či kadmium. Zásuneme-li regulační tyče hlouběji do aktivní zóny, pohltí větší počet neutronů a ty se pak už neúčastní dalšího štěpení. Intenzita reakce se snižuje a s ní i výkon reaktoru. Při vysouvání regulačních tyčí z aktivní zóny naopak počet jimi pohlcených neutronů klesá, více neutronů se účastní štěpení a reaktor se rozbíhá. V případě, kdy je kupříkladu z bezpečnostních důvodů potřeba rychle odstavit reaktor, sjedou všechny regulační tyče do aktivní zóny a řetězová reakce se zastaví. Reaktory typu VVER mají navíc ještě takzvanou bórovou regulaci, která spočívá v dávkování bóru v podobě vodného roztoku kyseliny borité přímo do chladiva, což snižuje nároky na regulaci prostřednictvím tyčí. Tento systém navíc poskytuje i záložní možnost odstavení reaktoru v případě velmi nepravděpodobného selhání regulačních tyčí.

HLAVNÍ SOUČÁSTI PRIMÁRNÍHO OKRUHU

Kompenzátor objemu je další důležitou součástí, kterou lze zpravidla vidět i na zjednodušeném schématu primárního okruhu. Z fyziky víme, že voda s narůstající teplotou zvětšuje svůj objem a tento nárůst je třeba nějakým způsobem kompenzovat. Například součástí běžného domácího teplovodního topení je proto expanzní nádrž umístěná na půdě či v nejvyšším patře domu, anebo modernější zařízení zvané expanzomat. Kompenzátor objemu na jaderné elektrárně si v podstatě lze představit jako větší a dokonalejší expanzní nádrž. Tato nádrž je ovšem uzavřená a doplněná o systémy, jejichž prostřednictvím je možné regulovat tlak v primárním okruhu. Kompenzátor objemu je připojený k jedné z tzv. horkých – tedy z reaktoru vystupujících – větví primárního potrubí a je do určité výšky naplněn vodou, nad jejíž hladinou je parní polštář. Je to jediné místo primárního okruhu, kde smí být volná hladina, jinak musí být celý okruh zaplněn vodou. Regulace tlaku v primárním okruhu se realizuje pomocí elektrických ohříváků a sprchových trysek umístěných v kompenzátoru objemu. Je-li třeba zvýšit tlak, zapnou se ohříváky, v důsledku čehož dojde v kompenzátoru k lokálnímu varu a narůstající množství páry v prostoru nad hladinou vede ke zvýšení tlaku. Je-li naopak potřeba dosáhnout snížení tlaku, zapnou se sprchové trysky, do kterých se přivádí voda ze studené větve primárního okruhu. Vstříkneme-li tuto o přibližně 30 stupňů chladnější vodu do prostoru parního polštáře nad hladinou, dojde k rychlé kondenzaci páry, a tím i k poklesu tlaku.

Parogenerátory, kde se vyrábí pára pohánějící turbínu, jsou dalším důležitým zařízením, o kterém jsme se již zmínili při popisu fungování jaderné elektrárny. Parogenerátor není ve své podstatě nic jiného nežli velký výměník tepla, kde uvnitř trubkových svazků proudí horké chladivo primárního okruhu a skrze ocelové stěny trubek ohřívá vodu sekundárního okruhu. Zde dochází k varu a produkovaná pára proudí do turbíny. Parogenerátory jsou další komponentou, u níž se výrazně liší primární okruhy typu VVER, které používají horizontální parogenerátory, a primární okruhy západního typu, které používají vertikální parogenerátory. Odlišná přitom pochopitelně není jen poloha parogenerátoru, ale i celá konstrukce parogenerátoru a zejména pak uspořádání trubkových svazků.

Teplosměnnou plochu horizontálního parogenerátoru tvoří horizontálně orientované nesy-metrické U-trubice, jejichž konce jsou zaústěny do stěn válcových kolektorů, které odspodu procházejí skrze parogenerátor a představují rozváděcí a sběrnou komoru primárního chladi-va. U vertikálního parogenerátoru pak teplosměnnou plochu tvoří vertikálně orientované sy-metrické U-trubice, které jsou na koncích zaústěny do tzv. trubkovnic. Trubkovnice jsou silné ocelové desky ve spodní části parogenerátoru a prostor pod nimi zde představuje rozváděcí komory. Součástí obou typů parogenerátorů jsou dále zařízení na rozvod sekundární napájecí vody a zařízení na separaci kapiček vody, strhávaných z hladiny vystupující párou.

Obě koncepce parogenerátorů mají své výhody i nevýhody, jež si zde stručně uvedeme. Vý-hodou horizontálních parogenerátorů je větší objem vody na sekundární straně, což znamená menší citlivost zařízení na případné provozní výkyvy a větší bezpečnost v případě, že je z něja-kého důvodu nedostatečná dodávka napájecí vody, neboť větší objem vody déle odolává vysu-šení. V případě ztráty nucené cirkulace v primárním okruhu, například v důsledku výpadku hlavních cirkulačních čerpadel, jsou horizontální parogenerátory schopné odvádět větší množ-ství zbytkového tepla v režimu přirozené cirkulace nežli vertikální, což znamená přínos z hle-diska bezpečnosti. Zbytkovým teplem nazýváme výkon, který se uvolňuje i v odstaveném reak-toru v důsledku samovolných radioaktivních přeměn probíhajících v použitém palivu.

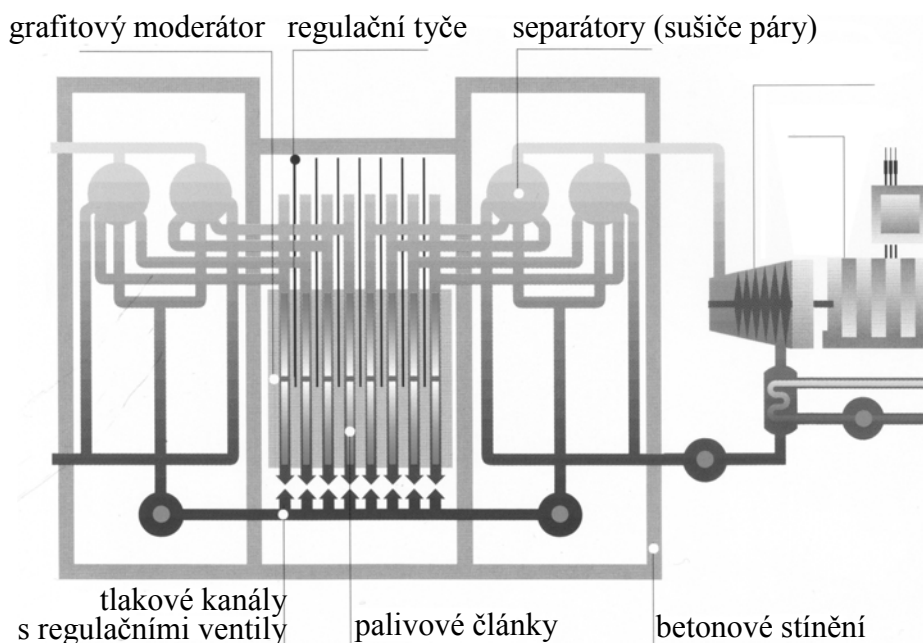
Další výhodou je velká plocha volné hladiny v parogenerátoru, která způsobuje, že pára vystupuje z hladiny relativně nízkou rychlostí, díky čemuž s sebou strhává jen malé množství vodních kapek a není potřeba věnovat takovou péči jejich separaci. Naopak nevýhodou hori-zontálních parogenerátorů je, že zabírají větší plochu, a protože celý primární okruh je z dů-vodu bezpečnosti a ochrany životního prostředí uzavřen v masivní hermetické ochranné obál-

ce – kontejnmentu, musí být tato obálka větší, což zvyšuje náklady na výstavbu. Další nevýhodou je o něco menší jednotkový výkon, což znamená, že na stejný výkon reaktoru je třeba více parogenerátorů. U vertikálních parogenerátorů jsou uvedené výhody a nevýhody prakticky obrácené.

Ostatní součásti primárního okruhu jaderné elektrárny si zde už nebudeme podrobněji popisovat. Patří sem například další komponenty, jako jsou cirkulační čerpadla, filtry a různá zařízení hlídající čistotu a správné chemické složení primárního chladiva, atd.

Srovnání tlakovodního reaktoru a reaktoru RBMK

V období hysterické kampaně proti dostavbě a spuštění jaderné elektrárny Temelín často zaznívala i hesla proti stavbě „jihočeského Černobylu“, někteří na slovo vzatí „odborníci“ na jadernou energetiku dokonce mluvili cosi o reaktorech černobylského typu a bylo by možné vzpomenout ještě mnohé podobné dezinformační perličky. Z tohoto důvodu si v této kapitole uvedeme základní srovnání tlakovodního reaktoru a reaktoru typu RBMK. Jak je to tedy s podobností či odlišností obou typů jaderných reaktorů? Určité shodné rysy zde pochopitelně nalezneme, protože obě zařízení jsou jadernými reaktory, takže zcela logicky jisté obecné znaky musí být shodné. To ovšem bude platit třeba i v případě srovnání automobilů Mercedes a Trabant. A přesto ani laik patrně nepochybuje, že mezi oběma typy automobilů je propastný rozdíl. V našem případě je tlakovodní reaktor o mnoho blíže k onomu pomyslnému Mercedesu, nežli reaktor RBMK, a to zejména co se týče bezpečnosti a spolehlivosti.



Obrázek 5 Schéma reaktoru RBMK

Srovnáme-li schémata na obrázcích 2 a 5, je na první pohled patrné, že mezi oběma typy jsou diametrální konstrukční rozdíly. Charakteristickým znakem tlakovodních reaktorů je kompaktní aktivní zóna, ve které se nachází velmi hustě uspořádané palivové tyče. Mezi tyčemi proudí voda, která je zde zároveň chladivem i moderátorem. Celá aktivní zóna je pak uzavřena v ocelové tlakové nádobě. Takovéto uspořádání je však možné pouze v případě, kdy je moderátorem lehká voda. Ta je schopná brzdit neutrony velmi účinně, takže k jejich zpomalení stačí pouze krátká dráha. Poněkud odlišná je situace, pokud se jako moderátor používá grafit. Ten totiž zpomaluje neutrony mnohem méně, takže vzdálenosti mezi palivovými tyčemi musí být mnohem větší. V takovém případě však není možné použít klasickou konstrukci

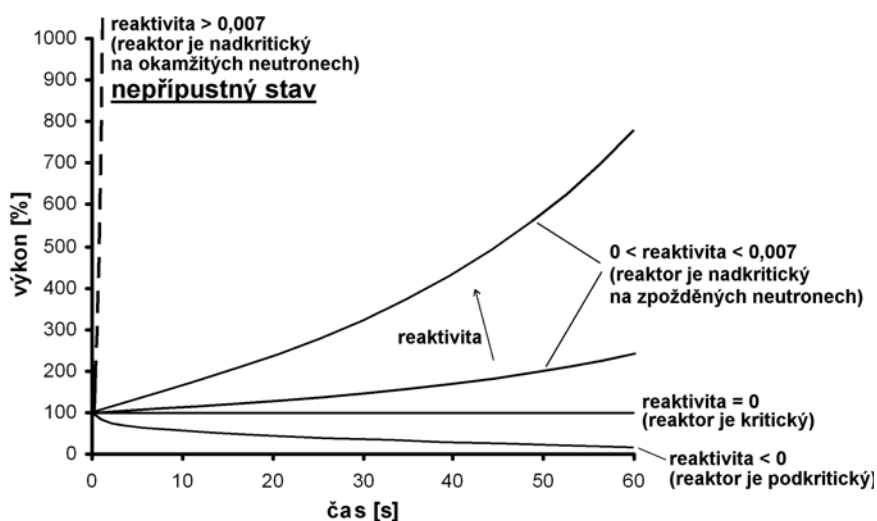
s tlakovou nádobou, neboť její průměr by vycházel příliš velký, a výroba takové nádoby by byla velmi obtížná či spíše nemožná. Zde se tedy používá odlišné konstrukční řešení s takzvanými tlakovými kanály. Toto řešení bylo využito i v případě reaktoru RBMK, jehož schéma je na obrázku 5.

Jako moderátor jsou zde použity grafitové bloky o rozměrech 250 mm x 250 mm x 600 mm. Grafitové bloky mají uprostřed válcový otvor o průměru 114 mm, vytvářející prostor pro palivové kanály nebo kanály s regulačními tyčemi. Vlastní tlakový kanál je tvořen trubkou ze zirkoniové slitiny o průměru 88 mm. Uvnitř tohoto kanálu se pak nachází vlastní palivové články tvořené nosnou centrální trubkou, okolo které je ve dvou koncentrických řadách rozmístěno 18 palivových tyčí. Chladivo je do kanálů přiváděno odspodu trubkami opatřenými regulačními ventily. Reaktor RBMK je koncipován jako reaktor varný, a tudíž z tlakových kanálů vystupuje parovodní směs, která se vede do bubnových separátorů nad reaktorem, kde dochází k separaci vody a páry. Voda se vrací zpět do reaktoru a pára se odvádí do turbíny.

Výhodou této konstrukce je, že odpadá technologicky náročná výroba tlakové nádoby, jejíž rozměry jsou navíc limitující pro výkon reaktoru. Počet tlakových kanálů lze zvyšovat mnohem snáze, což byl jeden z důvodů rozvoje těchto reaktorů v tehdejší SSSR. Kanálové reaktory také není nutné odstavovat kvůli výměně paliva, neboť pomocí speciálního zavážecího stroje je možné provádět v jednotlivých kanálech výměnu paliva za provozu. Použití grafitu, který méně pohlcuje neutrony, navíc umožňuje využívat méně obohacené palivo.

Grafitové reaktory tohoto typu mají ovšem také své nevýhody. Aktivní zóny těchto reaktorů jsou velmi rozměrné, což komplikuje regulaci, neboť regulační tyče mají jen omezený dosah. V takto velkých aktivních zónách navíc dochází k výkonovým oscilacím, které musí být kompenzovány pomocí přídavného regulačního systému. Bezpečnostní odstavení reaktoru je pomalejší nežli u tlakovodních, protože regulačním tyčím trvá delší dobu, nežli sjedou do aktivní zóny. Velmi závažným problémem je však to, že grafitem moderované a vařící se vodou chlazené reaktory typu RBMK vykazují v určitých provozních režimech kladnou výkonovou zpětnou vazbu. A to je v případě jaderného zařízení velký problém, protože v takovém zařízení může dojít i k nekontrolovatelnému růstu výkonu.

Problematiku zpětné vazby si lze zjednodušeně vysvětlit na regulaci běžného domácího kotle. U některých starších typů existovala jednoduchá regulace, která při nárůstu teploty vody na výstupu z kotle nad určitou hranici přivírala vzduchovou klapku. Tím došlo k omezení přívodu vzduchu a ke snížení výkonu kotle. To je příklad záporné zpětné vazby, která má ten-



Obrázek 6 Provozní stavy jaderného reaktoru

denci stabilizovat systém. Kladná zpětná vazba by naopak znamenala, že vzduchová klapka by se v takovém případě stále více otvírala a výkon kotle by dále narůstal. V důsledku toho by mohlo dojít až k poškození kotle nebo k havárii topného systému. U jaderných reaktorů je však tento problém složitější. V jaderné energetice zavádíme pojem reaktivita reaktoru, a můžeme ji definovat jako schopnost reaktoru udržovat, rozvíjet či tlumit štěpnou řetězovou reakci. Zjednodušeně lze říci, že reaktivitu můžeme chápat jako relativní přírůstek počtu neutronů mezi dvěma po sobě následujícími generacemi. Vztah reaktivity a základních provozních stavů reaktoru je znázorněn na obrázku 6.

Na obrázku 6 mimo jiné vidíme i to, že pokud zaslechneme termín, že reaktor dosáhl kritického stavu, tak to neznamena, že máme utíkat do sklepa. Naopak, kritickým stavem nazývá reaktorová fyzika stav, kdy je reaktivita rovna nule a výkon reaktoru je konstantní. Je to tedy stav, při kterém reaktor provozujeme. Při podkritickém stavu se reaktor zastavuje, při nadkritickém naopak rozbíhá. Na obrázku 6 však vidíme, že při rozběhu reaktoru je nutné dbát na to, aby reaktivita nepřekročila hodnotu přibližně 0,007, neboť poté by se reaktor stal takzvaně nadkritický na okamžitých neutronech, a to znamená nesmírně prudký a prakticky nekontrolovatelný nárůst výkonu. V čem spočívá tato hrozba?

Neutrony účastníci se štěpné řetězové reakce se dělí do dvou základních skupin. Zhruba 99,3 % neutronů představují takzvané okamžité neutrony, které se uvolňují přímo při rozpadu uranového jádra. Zbývající neutrony jsou se zpožděním od několika desetin sekundy po několik desítek sekund emitovány fragmenty, tedy jádery vzniklými při rozpadu uranu. Odtud také pochází jejich název – zpožděné neutrony. Okamžité neutrony se vyznačují velmi krátkou dobou života a během zhruba tisíce sekund způsobují štěpení dalších jader uranu a vznik nové generace neutronů. Provozovat reaktor pouze s těmito neutrony by však bylo prakticky nemožné, neboť by na sebemenší změnu podmínek či pohyb regulačních orgánů následovala velmi prudká odezva. Takový reaktor by byl silně nestabilní. Bezpečné řízení výkonu reaktoru nám tedy umožňují právě zpožděné neutrony.

Jde o to, že při konstantním výkonu musí být shodný počet neutronů ve dvou po sobě následujících generacích. A tato podmínka je splněna teprve tehdy, až doběhnou i zpožděné neutrony. Můžeme zjednodušeně říci, že reaktor na ně zkrátka musí „počkat“. Teprve pak je nová generace uzavřena. A právě díky této časové prodlevě jsme schopni reaktor řídit. Musíme ovšem dbát na to, aby reaktivita nepřekročila onu limitní hodnotu. V takovém případě je totiž přírůstek neutronů v nové generaci dost vysoký na to, aby na dosažení shodného počtu s tou předchozí stačily pouze okamžité neutrony. Reaktor se „vysmekne z otěží“ zpožděných neutronů a dojde k velmi prudkému vzrůstu výkonu.

Jak s touto hrozbou souvisí výše zmíněná kladná zpětná vazba od výkonu reaktoru? Jde o to, že u reaktoru RBMK může za určitých provozních režimů začít samovolně narůstat reaktivita. Jako kdybychom vytahovali regulační tyče. Na obrázku 6 je tento trend vyznačen šipkou. To je však velmi nebezpečné, neboť reaktor má tendenci sám od sebe a stále silněji urychlovat svůj rozjezd. Jak tato kladná zpětná vazba vzniká? Jádrem problému je to, že jako moderátor zde slouží grafitové bloky, ale chlazení obstarává vařící se voda. Obyčejná lehká voda je přitom sama dobrý moderátor, ale také má ve srovnání s grafitem poměrně velkou parazitní absorpci neutronů. A právě to může znamenat nebezpečí, pokud nastane v důsledku jakékoliv příčiny stav, kdy reaktor není dostatečně chlazen, takže se sníží množství vody v tlakových kanálech. Z hlediska reaktorové fyziky to znamená, že se z reaktoru ztrácí látka, která současně moderuje i absorbuje neutrony. Ztráta moderačního efektu vody je ovšem málo významná, neboť jako moderátor zde primárně slouží grafit a ten se pochopitelně nikam neztrácí. V důsledku toho převládá ztráta parazitní absorpce a začíná narůstat reaktivita.

Situaci zhoršuje fakt, že intenzita štěpné řetězové reakce v palivu není z hlediska neutronové fyziky prakticky omezena. V reaktorové praxi samozřejmě určité omezující faktory působí, ale přesto může výkon reaktoru v případě kritičnosti na okamžitých neutronech praktic-

ky skokově vzrůst do velmi vysokých hodnot. Odhady uvádějí, že v závěrečné fázi černobylské havárie reaktor RBMK během několika málo sekund doslova „ulétl“ na 100–150násobek nominálního projektového výkonu. Náhlému uvolnění tak obrovského množství energie pochopitelně nemůže odolat ani vlastní palivo ani další konstrukční materiály, takže v krátkém čase dojde k destrukci reaktoru, tak jako se to stalo v Černobylu. Zde ovšem zdůrazníme, že v případě této havárie nešlo o jaderný výbuch, jak by se někdo mohl mylně domnívat, ale o klasickou explozi v důsledku obrovského přetlaku způsobeného prudce se vyvíjející párou a celkového přehřátí reaktoru. Černobylský reaktor vybuchl tak, jako by vybuchl i klasický parní kotel, kdybychom během několika sekund zestonásobili jeho výkon.

Kladná zpětná vazba u reaktoru RBMK tedy představuje poměrně významné bezpečnostní riziko. Provoz reaktoru v tomto nebezpečném režimu byl sice přísně zakázán provozními předpisy, což se ovšem pro zajištění bezpečnosti ukázalo jako zcela nedostačující. Jedním z několika závažných pochybení, kterých se tehdy dopustila obsluha elektrárny, bylo i to, že navzdory předpisům provozovala reaktor v tomto nebezpečném režimu. Reaktor se do tohoto režimu dostal v rámci tehdy prováděného provozního experimentu, ale v takovém případě měl být odstaven a ne dále provozován.

Závěrem je třeba zodpovědět otázku, zda hrozí toto nebezpečí také u tlakovodních reaktorů. Kategoricky lze říci, že nikoliv. A to hned z několika důvodů. Tlakovodní reaktory mají narozdíl od reaktorů RBMK zápornou zpětnou vazbu. S nárůstem teploty zde dochází naopak k poklesu reaktivity, takže reaktor má tendenci se brzdít a nikoli rozbíhat. Má tedy v sobě částečnou schopnost samoregulace. Zásadním důvodem je však sama koncepce reaktoru, kde voda je nejen chladivem ale i moderátorem. Takže pokud se z reaktoru začne ztrácet chladivo, ztrácí se zároveň i moderátor a reaktor se zastaví, neboť bez přítomnosti moderátoru nemůže probíhat štěpná řetězová reakce. Z toho plyne, že u tlakovodního reaktoru není nekontrolovatelný nárůst výkonu možný už na základě zákonů reaktorové fyziky. Z hlediska jaderné bezpečnosti tedy lze tyto dva typy reaktorů jen těžko stavět na stejnou úroveň. A v žádném případě pak nelze hovořit o reaktorech černobylského typu či o riziku podobné havárie. Ta je u tlakovodních reaktorů na základě výše uvedených faktů principiálně nemožná.