

# Tlakovodní reaktor z Petrohradu patří mezi světovou extratřídou

V tomto článku přinášíme informace o tlakovodním reaktoru AES-2006/VVER-1200 vyvinutém petrohradskou společností Atomenergoprojekt. Jeho cílem je optimální kombinace aktivních a pasivních bezpečnostních systémů. První bloky se již staví, přičemž tato technologie bojuje o vítězství ve velkých projektech i jinde, mimo jiné v České republice a ve Finsku. Článek byl připraven týmem specialistů - D. E. Kolčínským, A. V. Molčanovem, V. V. Bezlepkinem, A. M. Altschullerem a ve spolupráci s J. Laaksonenem.

Projekt elektrárny AES-2006 s tlakovodním reaktorem VVER-1200 navazuje na více než 1 300 reaktorových let provozu reaktorů typu VVER v Rusku a v jiných zemích, z toho 500 reaktorových roků provozu VVER-1000. V současné době je v různých fázích výstavby šest bloků VVER-1200 na elektrárnách Leningradská II, Novovoronežská II, Kaliningradská (Baltská).

V podstatě existují dvě skupiny projektů AES-2006/VVER-1200. První byl vyvinutý moskevským Atomenergoprojektem (Moskevský AEP) na základě projektu AES-92 (který byl postaven na jaderné elektrárně Kudankulam v Indii a byl nabízen pro dostavbu jaderné elektrárny Belene v Bulharsku). Tato verze je ve výstavbě na Novovoronežské JE, fáze II. Je to rovněž projekt, který je nabízen pro projekt JE Akkuyu v Turecku.

Druhá skupina projektu AES-2006/VVER-1200 byla vyvinuta petrohradským Atomenergoprojektem (SPbAEP) na základě o málo menší verze AES-91 vyvinuté pro Čínu, kde byla úspěšně realizována na JE Tianwan. Projekt SPbAEP je ve výstavbě na Leningradské JE, fáze II a na Kaliningradské JE (Baltský projekt). Byl rovněž vybrán pro JE Ostrovec v Bělorusku (kde je zahájení výstavby těsně před začátkem). Zároveň je posledním zbývajícím účastníkem v tendru o dostavbu JE Hanhikivi ve Finsku a rovněž v tendru na dostavbu 3. a 4. bloku JE Temelín.

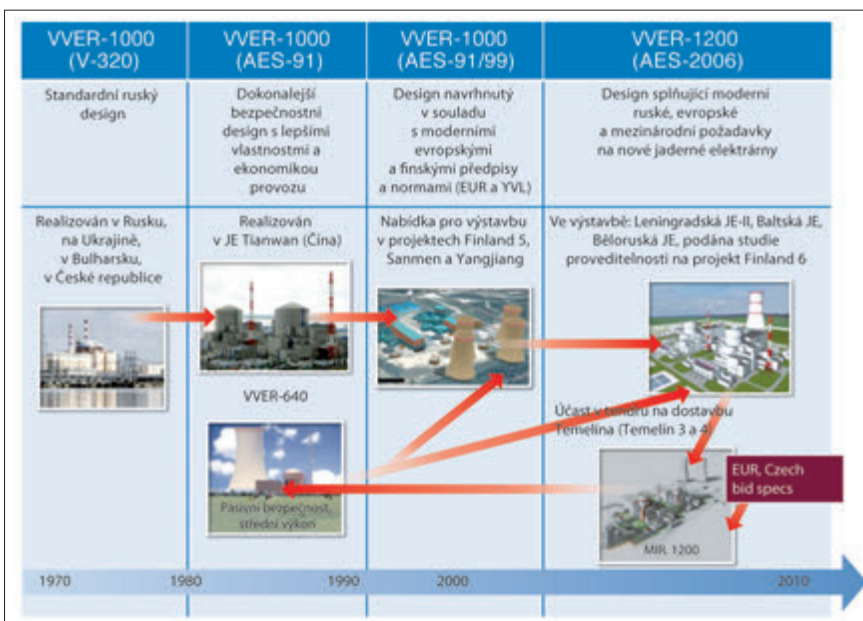
Aktuální stav posledních projektů VVER-1000/1200 z SPbAEP je shrnut v tabulce 1. Projekt AES-91 s reaktorem V-428 realizovaný na JE Tianwan byl vyvinut z projektu AES-91, původně navrženého (ale nerealizovaného) pro Finsko, který odrážel finské požadavky státního dozoru, provozní zkušenosti s JE Loviisa s bloky VVER-440 a osvědčenou mezinárodní praxí. Projekt AES-91 čerpal také významnou část zkušeností z provozu osvědčených reaktorů VVER-1000/V-320.

Projekt AES-91 s reaktorem V-428 byl v roce 1997 vybrán pro výstavbu v Číně. Kromě splnění požadavků čínské strany (například požadavky týkající se rizika zemětřesení) tento projekt také zahrnul doporučení z více než dvaceti odborných kontrol provedených Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (IAEA) v letech 1995 až 2005. Ve srovnání se standardním reaktorem V-320 obsahuje lepší fyzické oddělení redundantních bezpečnostních systémů a dvojitý kontejnment, zálohování i 4 × 100 % hlavních bezpečnostních systémů, lapač taveniny, pasivní rekombinátory vodíku a moderní, vodou chlazená a vodou mazaná cirkulační čerpadla reaktoru, která zamezují úniku přes uc-pávky při ztrátě napájení.

Současně s projektem AES-91 byl společností SPbAEP vyvíjen rovněž projekt VVER-640. V tomto

| Země                                       | Typ reaktoru         | Současný stav   |
|--|----------------------|---|
| JE Tianwan (Čína)                          | VVER-1000/428        | 1. blok spuštěn 17 května 2007, 2. blok 16. srpna 2007. Další dva bloky typu AES-91 jsou ve výstavbě s komerčním spuštěním prvního z nich - Tianwan 3 - ve roce 2018. |
| Leningradská JE 2 (Ruská federace)         | VVER-1200/491        | Výstavba 1. bloku začala 24. června 2008, začala výstavba i 2. bloku. Komerční spuštění 1. bloku plánováno na rok 2016.   |
| Baltská JE (Ruská federace)                | VVER-1200/491        | Probíhá výstavba 1. bloku, jehož komerční spuštění se plánuje v roce 2018.  |
| Běloruská JE (Bělorusko)                   | VVER-1200/491        | Podepsány smlouvy, řeší se spuštění výstavby. Komerční provoz 1. bloku se očekává v roce 2018.  |
| JE Hanhikivi (Finsko)                      | VVER-1200/491        | Probíhá posouzení studie proveditelnosti. Komerční provoz se očekává v roce 2023.   |
| JE Temelín, 3. a 4. blok (Česká republika) | MIR.1200 (VVER-1200) | Odložení rozhodnutí na rok 2014/2015.   |

Tab. 1 – Současný stav projektů VVER-1000/1200



Obr. 1 – Evoluce projektu SPbAEP VVER

případě se jedná o elektrárnu o středním výkonu s cílem spojit pasivní bezpečnostní systémy sefektivním vynaložením nákladů. Vzhledem ke změnám na trhu byl tento projekt dočasně pozastaven. Práce provedené na ověření pasivních bezpečnostních systémů (výpočty i zkouškami) byly však později využity v projektu AES-2006/VVER-1200.

V roce 1999 z důvodu účasti v tendru na novou jadernou elektrárnu ve Finsku byl zahájen vývoj modernizované verze projektu AES-91 pod názvem AES-91/99 s reaktorem V-466. Projekt AES-91/99 představoval další evoluční krok pro VVER-1000, který nabízí životnost reaktoru 60 let.

Koncept bezpečnosti byl založen na přednostním využití aktivních bezpečnostních systémů při řízení projektových havárií a na optimální kombinaci aktivních a pasivních systémů pro řízení těžkých havárií. Zvláštní pozornost byla věnována takovým otázkám, jako je např. náraz velkého letadla, použití pasivních prostředků pro odvod tepla z kontejnmentu, poruchy se společnou příčinou a realistické posouzení pravděpodobnosti chyb obsluhy. Nutnou podmínkou pro finskou nabídkovou řízení bylo splnění požadavků EUR (European Utility Requirements).

Vývoj modernizovaného projektu, verze AES-2006 s reaktorem V-491, začal v roce 2005.

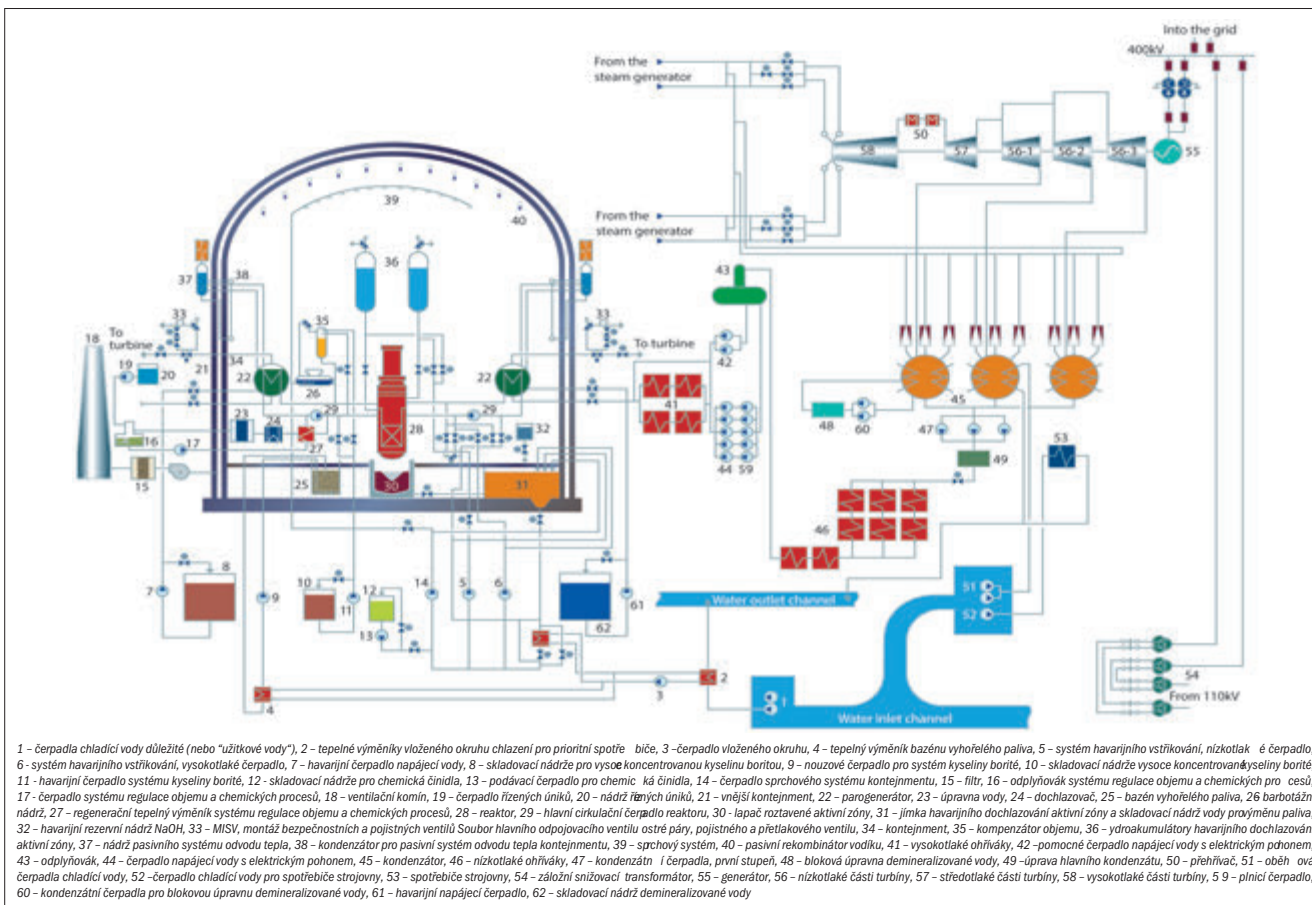
|  | VER-640 | AES-91 | AES-2006              |
|--|---------|--------|-----------------------|
| Tepelný výkon reaktoru (MWt)   | 1800    | 3000   | 3200                  |
| Instalovaný výkon bloku (MWe)  | 700     | 1060   | 1197                  |
| Životnost zařízení bez záměny (počet let)                              | 60      | 40/60  | 60                    |
| Vnitřní průměr nádoby reaktoru (mm)                                    | 4101    | 4150   | 4250                  |
| Průtočné množství chladiva reaktorem (m <sup>3</sup> /h)               | 53800   | 86000  | 86000                 |
| Teplota chladiva na vstupu do reaktoru (°C)                            | 293,9   | 291    | 298,2                 |
| Teplota chladiva na výstupu z reaktoru (°C)                            | 323,3   | 321    | 328,9                 |
| Tlak chladiva v reaktoru (MPa)   | 15,7    | 15,7   | 16,2                  |
| Tlak páry na výstupu z parogenerátoru (MPa)                            | 7,06    | 6,27   | 7                     |
| Projektové zemitřesení (zrychlení zemského povrchu, m/s <sup>2</sup> ) | 0,2 g   | 0,2 g  | 0,25 g                |
| Ochrana proti nárazu "těžkého" (tj. typ 747) letadla                   | Ne      | Ne     | podle volby zákazníka |

| Bezpečnostní systémy                      |         |                 |                 |
|---|---------|-----------------|-----------------|
| Vnitřní kontejnment                       | ocel    | beton+obličovka | beton+obličovka |
| Počet bezpečnostních tras                 | 4       | 4               | 4               |
| Princip rychlého odstavení reaktoru       | pasivní | pasivní         | pasivní         |
| Princip havarijního vstříkávání           | pasivní | aktivní         | aktivní         |
| Princip havarijního chlazení aktivní zóny | pasivní | aktivní         | aktivní         |
| Princip havarijního chlazení kontejnmentu | pasivní | aktivní         | aktivní         |

| Řízení nadprojektové havárie            |      |     |     |
|---|------|-----|-----|
| Lokalizace taveniny v reaktorové nádobě | ano  | ne  | ne  |
| Lapač taveniny                          | ne   | ano | ano |
| Pasivní vstříkávání                     | ano  | ne  | ne  |
| Pasivní odvod tepla z aktivní zóny      | ano  | ne  | ano |
| Pasivní odvod tepla z kontejnmentu      | ano* | ne  | ano |
| Systém odstraňování vodíku              | ano  | ano | ano |

\*K dispozici na základě projektovaných vlastností

Tab. 2 – Porovnání reaktorů VER-640, AES-91 a AES-2006



Obr. 2 – Základní technologické schéma



Obr. 3 – Dispozice jaderné elektrárny

1 – budova reaktoru, 2 – strojovna, 3 – větrací komín, 4 – úpravna, 5 – dieselgenerátorová stanice  
6 – budova pro jaderný servis, 7 – budova pomocných provozů, 8 – havarijní dieselgenerátorová stanice  
9 – budova bezpečnostních provozů (4 trasy), 10 – transportní podpěra a uzávěr, 11 – parní komora  
12 – budova úpravy vody, 13 – budova dodávky elektrické energie, 14 – blokové transformátory  
15 – sklad paliva, 16 – budova dozorní

|  |                          |
|--|--------------------------|
| Životnost (roky)   | 60                       |
| Elektrický výkon bloku, lokalita s nízkou teplotou mořské vody (bruto MWe)   | 1198                     |
| Tepelný výkon reaktoru (MWt)   | 3212                     |
| Kapacita dodávky tepla (MWt)   | 300                      |
| Pohotovost (%)   | > 90                     |
| Vlastní spotřeba (včetně energie pro recirkulaci chladicí vody) (%)  | 7                        |
| Účinnost elektrárny (turbína v kondenzačním režimu) (%)  | 37,0 hrubá<br>34,5 čistá |
| Neplánované rychlé odstavení reaktoru za rok   | <1                       |
| Délka (roční) plánované odstávky za sedm let provozu (dny, maximum)  | 4 x 16, 2 x 24, 1 x 30   |
| Délka nutné odstávky opakující se každých osm let pro potřeby demontáže turbíny (dny, maximum)                         | 40                       |
| Počet obsluhujícího personálu (personál/MW)  | 0,42                     |
| Projektové maximální vyhoření paliva (průměrně na palivový soubor) (MWd/kgU)   | 60                       |
| Délka palivové kampaně /tj. životnost paliva v aktivní zóně) (roky)  | 4                        |
| Frekvence výměny paliva (v měsících)   | 12 (18)                  |
| Teplota chladiva primárního okruhu na vstupu do aktivní zóny (°C)  | 298,2                    |
| Teplota chladiva primárního okruhu na výstupu z aktivní zóny (°C)  | 328,9                    |
| Průtočné množství chladiva primárního okruhu reaktorovou nádobou (m <sup>3</sup> /hodina)                              | 86 000                   |
| Tlak chladiva primárního okruhu na výstupu z nádoby reaktoru (MPa)   | 16,2                     |
| Tlak páry na výstupu z parogenerátoru (MPa)  | 7                        |
| Množství vyrobené páry v parogenerátoru (t/hodinu)   | 1602                     |
| Teplota napájecí vody při vstupu do parogenerátoru (°C)  | 225                      |
| Obsah vlhkosti páry na výstupu z parogenerátoru (%)  | < 0,2                    |
| Celková pravděpodobnost poškození aktivní zóny v důsledku vnitřních iniciačních událostí (za reaktorový rok)           | <7,37 x 10 <sup>-7</sup> |
| Celková pravděpodobnost náhodných sekvencí zahrnující velké úniky způsobené obtokem reaktoru nebo počáteční netěsností | <3,71 x 10 <sup>-9</sup> |

#### Rozměry dvojitého kontejnmenu:

|   |      |
|---|------|
| <b>Vnější, ochranná obálka (armovaný beton)</b>         |      |
| Vnitřní průměr (m)                                      | 50   |
| Výška kopule (m)  | 71,4 |
| Tloušťka (válcová část) (m)                             | 2,2  |
| Tloušťka (kopule) (m)                                   | 0,8  |
| <b>Vnitřní, hermetická obálka (také armovaný beton)</b> |      |
| Vnitřní průměr (m)                                      | 44   |
| Výška kopule (m)  | 67,1 |
| Tloušťka (válcová část) (m)                             | 1,2  |
| Tloušťka (kopule) (m)                                   | 1,1  |
| Jmenovitý projektový přetlak (MPa)                      | 0,4  |
| Jmenovitá projektová teplota (°C)                       | 150  |

Tab. 3 – AES-2006, základní data

Hlavním cílem bylo snížit náklady bez podstatných změn základní konfigurace jaderného systému výroby páry (NSSS), ale se současným zvýšením bezpečnosti. Tepelný výkon byl zvýšen na 3 200 MW a byly zavedeny další pasivní bezpečnostní systémy pro řízení nadprojektových havárií. Projekt AES-2006/VVER-1200 využívá rozsáhlé zkušenosti z provozu VVER-1000, ale také poučení z JE Tianwan, expertních hodnocení prováděných v souvislosti s finským výběrovým řízením v roce 2003, a jak již bylo řečeno, rovněž z práce provedené na podporu VVER-640.

V roce 2009 byla zahájena první jednání s ČEZ o nabídkovém řízení na 3. a 4. blok JE Temelín. Konsorcium ŠKODA JS, Atomstrojexport a Hidropress předložilo projekt nazvaný MIR.1200 (Modernized International Reactor - modernizovaný mezinárodní reaktor), který je založen na projektu AES-2006/VVER-1200. Projekt MIR.1200 prokázal, že vyhovuje požadavkům české poptávky, která je v podstatě založena na požadavcích EUR, ale v některých oblastech je náročnější.

Rozsáhlý vývoj projektů VVER od SPbAEP je ukázán na obrázku 1 a v tabulce 2 je uvedeno srovnání projektů AES-91, V-640 a AES-2006. Projekt SPbAEP AES-2006 má dvě varianty parní turbíny: ruský projekt (LMZ) s plošotáčkovou turbínou vyrobenou společností Silovyejje mašiny a turbínu Arabelle od společnosti Alstom s polo-vočnicími otáčkami, která bude použita například pro Baltický projekt a je navržena pro MIR.1200 a JE Hanhikivi.

Hlavní principy, které podporují projekt AES-2006, jsou: maximální využití osvědčených technologií, minimální náklady a doba výstavby, aktivní a pasivní bezpečnostní systémy obecně pro projektové havárie a snížení vlivu lidského faktoru na celkovou bezpečnost. Obrázek 2 znázorňuje základní technologické schéma. Primární okruh se skládá ze čtyř smyček (na obrázku 2 jsou pro přehlednost znázorněny pouze dvě), v každé z nich je hlavní cirkulační čerpadlo reaktoru a parogenerátor. Primární okruh má jeden kompenzátor objemu.

Sekundární okruh obsahuje parní turbogenerátor, kondenzát ní čerpadla, nízkotlaké ohřivače, hlavní systém kondenzátu, odplynovač a systém napájecí vody s vysokotlakými ohřivači. Tabulka 3 uvádí základní údaje. Výkon pro vytápění je do 300 MWt (stejně jako u Leningradské JE, kde je blízkému městu Sosnovyj Bor dodáváno teplo do místního systému vytápění), ten je ale volitelný a místo toho může být zvýšen elektrický výkon. Obrázek 3 ukazuje celkové uspořádání elektrárny.

#### Koncepce bezpečnosti

Elektrárna AES-2006 byla projektována tak, aby vyhověla ruským požadavkům obecné bezpečnosti, které byly vydány v roce 1997 a odpovídají doporučením agentury pro atomovou energii IAEA. Doporučení skupiny INSAG vedla k vývoji takzvaných jaderných elektráren „III. generace“. Aktuální standardy bezpečnosti IAEA pro projektovou bezpečnost jaderných elektráren vydané v roce 2012 jsou založeny na stejných zásadách. Ruské požadavky obecné bezpečnosti jsou rovněž



v souladu s bezpečnostními cíli zadanými podle WENRA (Asociace západoevropských jaderných dozorů) pro nové jaderné elektrárny.

#### Mezi tyto hlavní zásady patří:

- Princip vnitřní vlastní bezpečnosti, tedy schopnost reaktoru zajistit bezpečnost na základě přírodních procesů a charakteristik zpětné vazby.
- Ochrana do hloubky, tedy využití posloupnosti bariér, které brání únikům ionizujícího záření a radioaktivních látek do životního prostředí, a rovněž systémů technických a organizačních opatření na ochranu těchto bariér a pro udržení jejich účinnosti a pro přímou ochranu obyvatelstva.
- Princip jednoduché poruchy, který vyžaduje, aby systém byl schopen plnit funkci podle projektu i v případě poruchy kterékoli aktivní nebo pasivní komponenty bez ohledu na výchozí stav.
- Posouzení rozšířených projektových podmínek, např. poruchy se společnou příčinou, pád velkého letadla, následné chyby operátorů a poruchy zařízení. Projekt obsahuje specifické systémy, které plní bezpečnostní funkce v souladu s hlavními principy bezpečnosti:
- Princip jednoduché poruchy: Je deterministicky použit jako základ pro všechny bezpečnostní systémy díky využití celkového projektu čtyř „kanálů“.
- Pasivita: Pasivní prostředky se používají pro řešení „rozšířených projektových podmínek“ a „nadprojektových havárií“ (pasivní systém chlazení parogenerátorů, pasivní systém chlazení kontejnmentu) a zajišťují tak zálohování kritických bezpečnostních funkcí.
- Vícenásobné zálohování tras: na elektrárně jsou použity čtyři kanály bezpečnostních systémů a jejich řídicích systémů.
- Diverzita: Systémy, které zálohují systémy zajišťující základní bezpečnostní funkce, používají zařízení odlišné od zařízení zálohovaného bezpečnostního systému a případně i jiný princip fungování.
- Fyzické oddělení: Všechny čtyři kanály (trasy) bezpečnostních systémů a jejich ovládací systémy jsou fyzicky odděleny z důvodu zabránění poruchám ze společné příčiny v důsledku požáru, havárie letadla a teroristického činu. Dozorní bloku (bloková dozora a nouzová

| Aktivní bezpečnostní systémy a ochranné systémy pro řízení projektových havárií:   | Počet tras a kapacita   |
|--|---|
| Systém vysokotlakého bezpečnostního vstřikování  | 4 x 100%  |
| Systém nízkotlakého bezpečnostního vstřikování   | 4 x 100%  |
| Havarijní systém   | 4 x 50%   |
| Systém havarijního napájení a odvod tepla přes atmosférické přepouštěcí ventily  | 4 x 100%  |
| Havarijní sprchovací systémy kontejnmentu  | 4 x 50%   |
| Systém odvádění zbytkového tepla a chlazení reaktoru   | 4 trasy   |
| Vložený systém chlazení (chlazení komponent)   | 4 trasy   |
| Systém chladicí vody důležité ("servis")   | 4 trasy   |
| Vzduchotechnický systém pro místnosti bezpečnostních systémů   | 4 x 100%  |
| Systém uzavíracích ventilů kontejnmentu  | 2 x 100%  |
| Systém skladování borované vody  | 2 x 100%  |
| Systém havarijního odvodu plynů  | 2 x 100%  |
| Ochrana primárního okruhu proti přetlaku   | 3 x 50%   |
| Ochrana sekundárního okruhu proti přetlaku (na přívodu páry)   | 2 x 100%  |
| Systém uzavření hlavního parního potrubí (rychločinný uzavírací ventil + ventil s elektrickým pohonem) (na parním potrubí) | 2 x 100%  |
| Dieselgenerátor pro havarijní napájení   | 4 x 100%  |
| Aktivace bezpečnostního systému  | 4 senzory / parametr, 4 logické trasy, z nichž každý má 2/4 polling   |
| Systém havarijního odstavení reaktoru  | 4 senzory / parametr, 4 logické trasy s 2/4 pollingem pro výběr první úrovně a 2 logické trasy s 2/4 pollingem pro výběr druhé úrovně |
| <b>Pasivní bezpečnostní systémy pro zvládnutí projektové havárie:</b>  |   |
| hydroakumulátory systému havarijního chlazení aktivní zóny   | 4 x 33%   |
| Kontejnment  |   |
| Systém odstranění vodíku z kontejnmentu  |   |
| <b>Pomocná opatření pro zvládnutí nadprojektových havárií:</b>   |   |
| Pasivní odvod tepla přes parogenerátory (SG PHRS)  | 4 x 33%   |
| Systém pasivního odvodu tepla z kontejnmentu   | 4 x 33%   |
| Lapač taveniny   |   |
| Systém odstranění vodíku z kontejnmentu/Systém chemické retence těkavého jodu  |   |
| Vzduchotechnický systém pro udržení podtlaku v sekundárním kontejnmentu  | 2 x 100%  |
| Havarijní systém zalití aktivní zóny vodou z šachty revize.  | 2 x 100%  |

Obr. 4 – Bezpečnostní systémy a pomocné prostředky pro řízení nadprojektových havárií

dozorna) jsou rovněž fyzicky umístěny v oddělených místnostech/budovách. Bezpečnostní systémy a pomocné prostředky pro zvládnutí nadprojektových havárií jsou zahrnuty do projektu (jsou uvedené v tabulce 4). Bezpečnostní systémy jsou projektovány tak, aby měly zachovánu schopnost stabilního provozu za nepříznivých podmínek v důsledku přírodních jevů, např. zemětřesení, povodní, bouří, vichřic, silného sněžení, tornád, nízkých a vysokých extrémních teplot atd., a rovněž při událostech vyvolaných

člověkem, např. při havárii letadla (nebo nárazu částí letadla), rázové vlně, požáru, povodni způsobené prasknutím vodního potrubí atd. Z hlediska stavebního projektu jsou budovy a zařízení AES-2006 i technologické systémy a důležité bezpečnostní systémy konstruovány tak, aby vydržely projektové zemětřesení o zrychlení 0,25 g a pád těžkého letadla (např. Boeingu 747).

**Zpracoval tým specialistů společnosti Rosatom**

#### A world-class PWR from St Petersburg

Profile of the AES-2006/VVER-1200 pressurised water reactor developed by St Petersburg Atomenergoproekt. This aims for an optimised combination of active and passive safety features. The first units are under construction in Russia, while the technology is in the running for key projects elsewhere, including in the Czech Republic and Finland. By D. E. Kolchinsky, A. V. Molchanov, V. V. Bezlepkin, A. M. A. Itshuller, with participation of J. Laaksonen.

#### Водо-водяной Санкт-Петербургский ядерный реактор относится к мировому экстраклассу

Ознакомьтесь с водо-водяным реактором АЭС-2006/ВВЭР-1200, созданным петербургской компанией Атомэнергопроект. Его целью является оптимальная комбинация активных и пассивных систем безопасности. Первые блоки уже строятся в России, в то же время эта технология пробивает себе путь и в большие проекты за границей, в том числе в Чешской Республике и в Финляндии. Статья была подготовлена Д.Е. Колчинским, А.В. Молчановым, В.В. Безлепкиным, А.М. Альтшуллером в сотрудничестве с Ю. Лааксоненом.