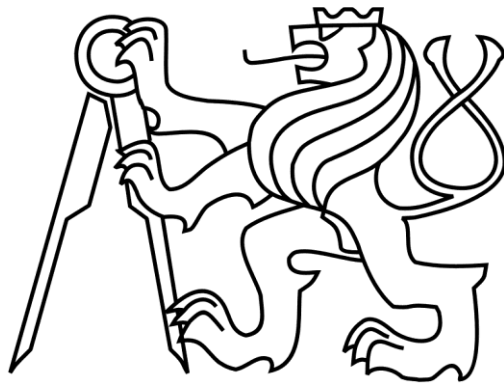


Fakulta stavební
ČVUT



**HAVÁRIE JADERNÉ
ELEKTRÁRNY ČERNOBYL**

Vypracovala:

Kristýna Chromá

Dominika Šnobltová

Předmět:

133YBEX

Akademický rok:

2016/2017

1. PŘÍČINY HAVÁRIE



Obr. 1. Pohled na elektrárnu[8]

Černobyľská havárie (Obr. 2.) se stala 26. dubna 1986 v jaderné elektrárně (Obr. 1.) na severu Ukrajiny. V sobotu v noci při pokusu na 4. reaktoru došlo k jeho přehřátí, protavení a výbuchu, při kterém se do ovzduší uvolnily radioaktivní látky. Exploze, která odtrhla víko reaktoru, vyústila v požár, sérii dalších explozí a roztavení reaktoru. Jádro reaktoru, bezpečnostní systémy a většina konstrukcí nesoucích jádro reaktoru byly zničeny nebo těžce poškozeny. Okolí reaktoru bylo kontaminováno aktivními úlomky jádra a kusy palivových tyčí. Naměřené dávky gama záření byly odstrašující – v reaktoru překročily hodnotu 5 000 R (rentgenů) za hodinu, v okolí bloku číslo 4 dosáhlo hodnot 2 000 R za hodinu. Do vzduchu se uvolnil radioaktivní mrak, který postupoval západní částí Sovětského svazu, Východní Evropou a Skandinávií, do celé severní polokoule. [1][5]



Obr. 2. Pohled na elektrárnu po havárii[7]

Katastrofa je přisuzována špatné konstrukci reaktoru, nedodržení podmínek, na které byl plánovaný pokus připraven, a obecného nedostatku bezpečnostní kultury. Druhotným faktorem přispívajícím k havárii byl fakt, že elektrárenští operátoři nebyli dostatečně vyškoleni a obeznámeni s mnoha charakteristikami reaktoru.

Jedním z problémů byla nedostatečná komunikace mezi vedoucími bezpečnostními pracovníky a operátory ohledně příkazu vykonat noční experiment. Navíc kvůli nedostatečnému proškolení operátoři dostatečně nechápali, jak reaktor pracuje pod nízkým stupněm reaktivity. V souladu

s podmínkami experimentu bylo několik bezpečnostních systémů vyřazeno z provozu. Experiment totiž měl ověřit, jestli bude elektrický generátor (poháněný parní turbínou) po rychlém uzavření přívodu páry do turbíny schopen při svém setrvačném doběhu ještě zhruba 40 sekund napájet čerpadla havarijního chlazení.

Mnoho technických rysů reaktoru bylo považováno za vojenská tajemství a operátoři o nich neměli ponětí. Reaktor měl především nebezpečně velký kladný dutinový koeficient reaktivity. Velmi významnou vadou reaktoru byla také konstrukce jeho regulačních tyčí. Regulační tyče nebyly zcela naplněné; ve chvíli, kdy se zasouvaly, byla na prvních pár sekund chladicí kapalina nahrazena dutými částmi regulačních tyčí. Jelikož chladicí kapalina (voda) je pohlcovač neutronů, výkon reaktoru v té chvíli stoupl. Toto neintuitivní chování reaktoru při zasouvání regulačních tyčí nebylo operátorům vůbec známo.

V důsledku snižování nákladů na výstavbu nebyla konstrukce jeho protihavarijního pláště – v poměru k velikosti reaktoru – dostatečně dimenzována. Tato úsporná opatření umožnila únik radiací kontaminovaných látek do atmosféry bezprostředně poté, co parní expanze způsobila porušení integrity primární tlakové nádrže. Jakmile byla odhozena část střechy, zahájil příval kyslíku, kombinovaný s extrémně vysokou teplotou paliva a grafitového moderátoru reaktoru, hoření grafitu. Tento požár velkou měrou přispěl k rozptýlení radioaktivního materiálu a celkové kontaminaci vnějších oblastí.[\[2\]\[3\]](#)

2. KONSTRUKCE ELEKTRÁRNY

Černobylská elektrárna disponovala čtyřmi bloky (při elektrickém výkonu každého bloku 1000 MW) vybavenými reaktory RBMK -1000 (každý s tepelným výkonem 3200 MW).

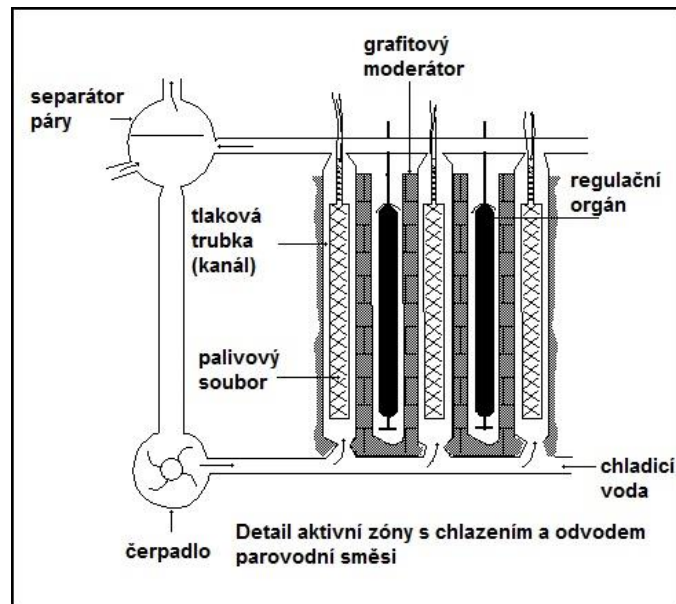
Reaktor typu RBMK

„Reaktor BolšojMoščnostiKanalnyj“ známý také pod zkratkou LWGR → „Light-Water-cooled Graphite-moderated Reactor“, česky „Kanálový varný reaktor s uranovo-grafitovým moderátorem“, je sovětský jaderný reaktor, který se stavěl jen na území bývalého SSSR.

Jedná se o **grafitem moderovaný a vodou chlazený reaktor**, ve kterém jsou palivové tyče s přírodním nebo slabě obohaceným uranem uloženy v kanálech. Jimi proudí voda, která slouží kromě chlazení po přeměně na páru k pohonu turbíny.

Jako moderátor jaderné reakce slouží grafitová vyzdívka - grafitové nitro reaktoru. K regulaci výkonu jsou použity řídicí tyče, které se zasouvají do aktivní zóny a regulují tok neutronů. Tento typ reaktoru má však v některých specifických podmínkách kladnou hodnotu reaktivity, což znamená, že reaktor může zvyšovat svůj výkon bez zásahu z vnějšku. To je způsobeno tím, že, jak se voda mění v páru, přestává pohlcovat neutrony, štěpná reakce se díky moderujícímu grafitu zrychluje, teplota dále stoupá a stále více vody se mění na páru.

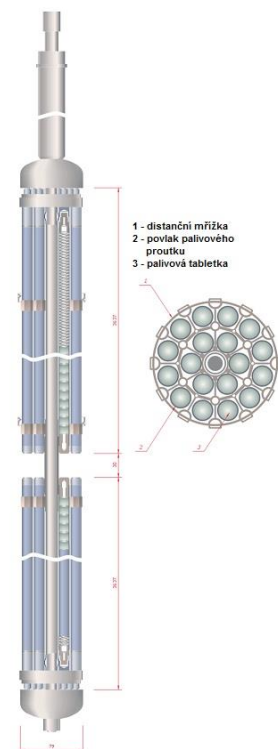
Dále jsou v jádře umístěny přídavné chladicí kanály a kanály regulačních tyčí. Všechny tyto kanály jsou vlastně dutiny v masivní grafitové vyzdívce reaktoru. Z toho vyplývá, že celé řešení má velké nároky na prostor - v případě Černobylské elektrárny průměr cca 12 m a výška cca 7 m.[\[11\]](#)

Aktivní zóna reaktoru RBMK

Obr. 3. Detail aktivní zóny s chlazením a odvodem parovodní směsi[11]

V Černobylské elektrárně tento **reaktor sestával z 1661 palivových souborů** z UO₂, umístěných v individuálních vertikálních (tlakových) kanálech. Každý grafitový blok, kromě grafitových bloků tvořících boční reflektor neutronů, je uprostřed opatřen válcovým otvorem, vytvářejícím prostor pro palivové kanály (tlakové trubky) nebo pro kanály s absorbčními tyčemi (regulačními orgány). Grafitová sestava aktivní zóny (Obr. 3.), tvořená grafitovými bloky, byla umístěna v hermetických prostorech vytvořených válcovou šachtou, spodní nosnou konstrukcí a horním ocelovým pláštěm. Tato ochranná obálka, vystavěná z oceli a betonu, se jinak nazývá kontejnment. Spojuje funkci hermetického prostoru pro ochranu před únikem nebezpečných látek do vnějšího prostředí a mechanické ochrany proti vnějším vlivům. Uzavírá reaktor a zařízení zajišťující odvod tepla z reaktoru primárním chladivem (tzv. primární okruh).

Na obrázku níže je znázorněn **palivový soubor** (obr. 4.), který je tvořen 18 palivovými proutky, uspořádanými kolem centrální trubky a drženy v požadovaných pozicích 10 ocelovými distančními mřížkami. Celková hmotnost uranu v palivovém souboru je 114,7 kg.



Obr. 4. Palivový kanálek[11]

V aktivní zóně bylo umístěno celkem 211 regulačních orgánů (absorbčních tyčí), které byly funkčně rozděleny do skupin pro automatické a ruční řízení a pro havarijní ochranu. [11]

Přednosti tohoto typu reaktoru?

→ možnost výrazné kolísavosti rozložení neutronového toku v reaktoru - za určitých podmínek mohou současně existovat oblasti, kde probíhá bouřlivá štěpná reakce a oblasti s prakticky nulovou

aktivitou - výhoda při výměně paliva → není nutná kompletní odstávka. Na druhou stranu tato vlastnost zvyšuje reakční nestabilitu reaktoru a zvyšuje nároky na obsluhu.

→ reaktor je tzv. plodivého typu, čili při reakci vzniká, krom jiných produktů, plutonium, které je možné z vyhořelého paliva extrahovat a použít pro výrobu jaderných zbraní.

→ připojení turbíny na primární chladicí okruh → levnější stavba a efektivnější využití vzniklého tepla, ale v případě poruchy na turbínové sekci může dojít daleko snáze k úniku radioaktivních látek do objektu elektrárny, případně do okolí, než je tomu u elektrárny typu VVER[11]

Nedostatky tohoto typu reaktoru?

→ **možnost samovolného vzrůstu rychlosti řetězové reakce vlivem odpařování chladiva v aktivní zóně** (kladný koeficient reaktivity), který je způsoben snížením absorpce neutronů ve vodě při její snížené hustotě (vůči grafitu je voda silnějším absorbérem neutronů)

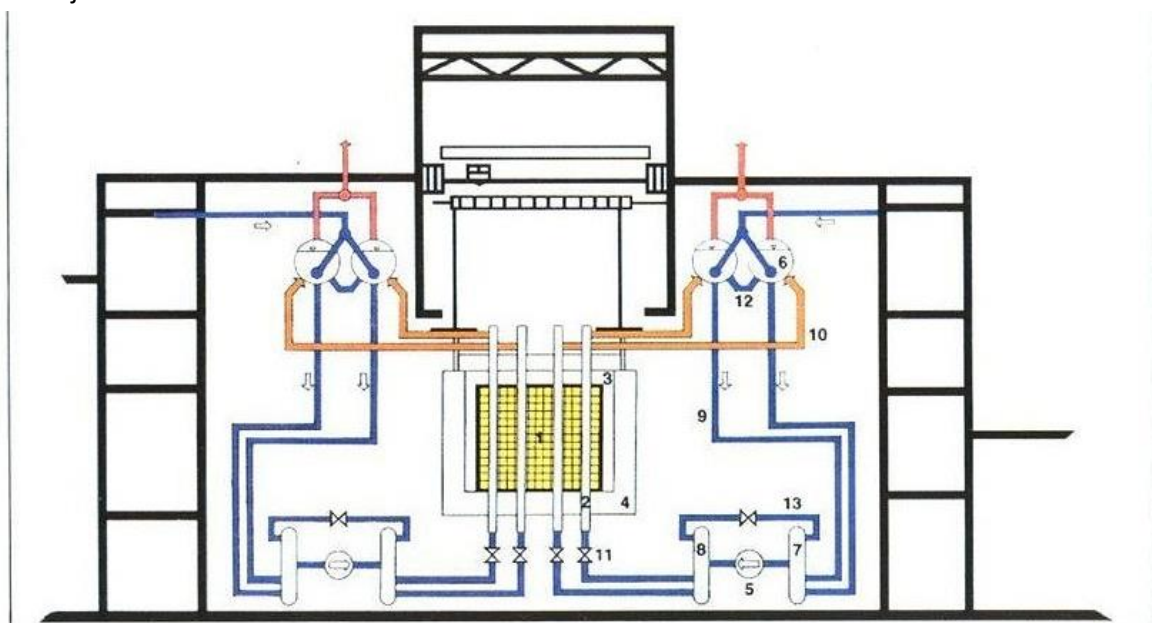
→ složitý systém řízení stabilního rozložení výkonu v aktivní zóně a citlivost neutronového toku k poruchám

→ složitost a velká rozčleněnost chladicího systému (celkově až 1690 tlakových kanálů);




→ velké množství tepelné energie akumulované v grafitu

→ mírně radioaktivní pára postupující na turbíny

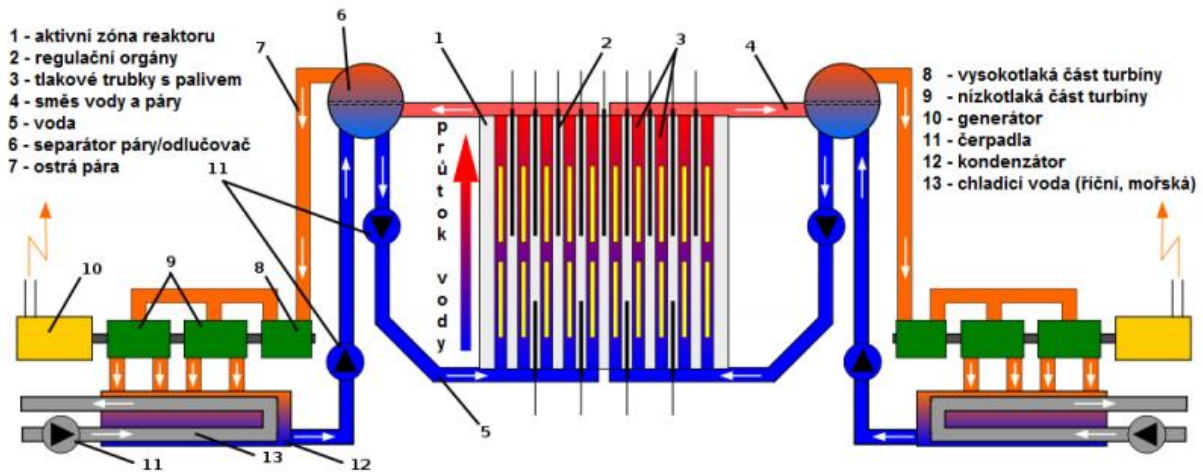
Základní funkční a konstrukční charakteristiky elektrárny Černobyl (Obr. 5.) jsou znázorněny na následujícím obrázku.



Legenda

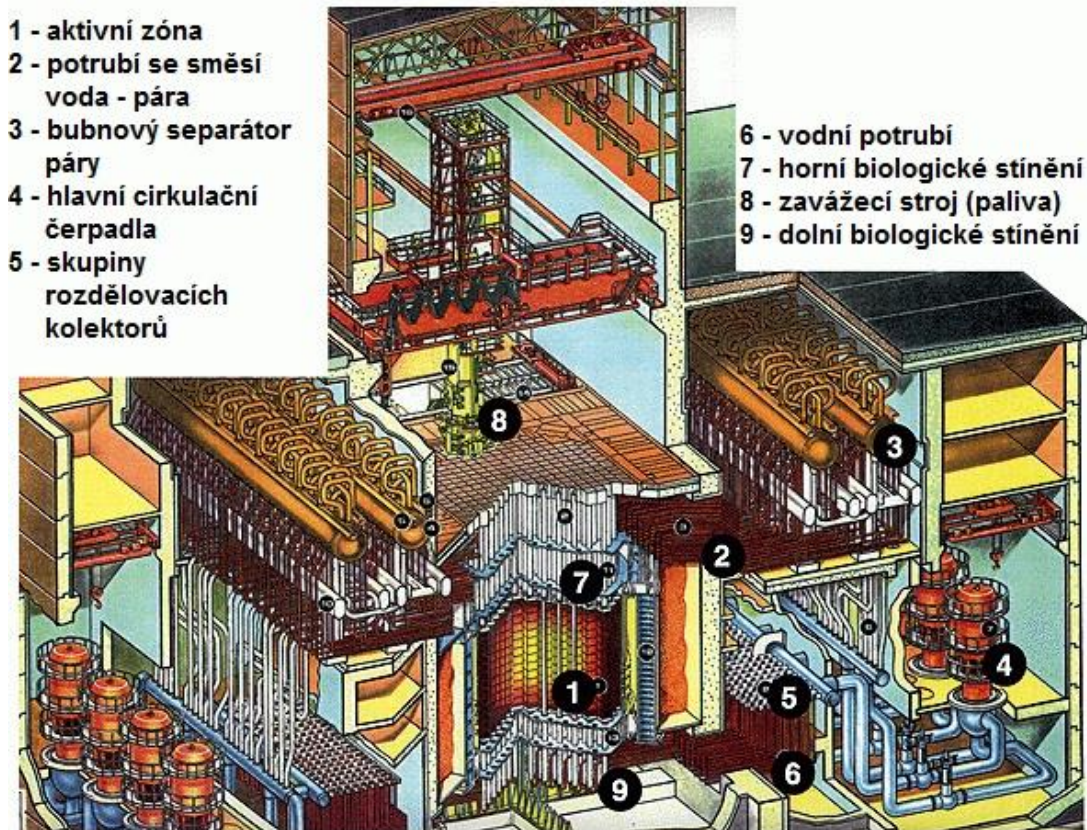
	 Pára	 Parovodní směs	 Voda
1	Aktivní zóna (grafitová stavebnice)	8	Výtlačný kolektor HCČ
2	Palivový kanál	9	Vratné potrubí
3	Ocelový hermetický plášť	10	Odvod parovodní směsi
4	Betonové stínění	11	Uzavírací a regulační ventil
5	Hlavní cirkulační čerpadlo (HCČ)	12	Vyrovnávací potrubí vodního potrubí
6	Bubnový separátor páry	13	Obtok mezi sacím a výtlačným kolektorem HCČ
7	Sací kolektor HCČ		

Obr. 5. Základní funkční a konstrukční charakteristiky elektrárny Černobyl[13]



Obr. 6. Funkční schéma bloku s reaktorem RBMK[11]

Jak plyne ze schématu (Obr. 6.), chladicí systém reaktoru sestává z **dvou smyček**. Chladivo vstupuje do **palivových (tlakových) kanálů** spodku aktivní zóny s teplotou 270 °C, při postupu směrem vzhůru podél paliva se ohřívá a částečně vypařuje. Vlhká pára je z každého kanálu odváděna do **separátorů** (každá chladicí smyčka má dva separátory páry). Odseparovaná suchá pára je odváděna dvěma parními potrubími ke **dvěma turbínám** výkonu 500 MW, zatímco voda smíchaná s kondenzátem z turbín postupuje do **sacích kolektorů** hlavních cirkulačních čerpadel. Cirkulační čerpadla podávají chladivo do kolektorů, které jej dále rozdělují do jednotlivých **palivových kanálů** aktivní zóny. Kondenzátory turbín jsou chlazeny odděleným chladicím okruhem (říční, případně mořskou vodou). Dispozičně je popsán schéma odvodu tepla a výroby páry (Obr. 7.) znázorněno na následujícím obrázku.



Obr. 7. Schéma odvodu tepla a výroby páry[11]

Bezpečnostní systémy bloku s reaktorem RBMK-1000

Černobylská jaderná elektrárna byla vybavena následujícími bezpečnostními systémy:

- systémem havarijního chlazení reaktoru s tlakovými hydroakumulátory s tlakem 10 MPa
- systémem lokalizace havárií (hermetické prostory a barbotážní nádrží pod reaktorem)
- systémem pro snížení tlaku v primárním okruhu (pojistné ventily s nastavením na různé tlaky a celkovou přepouštěcí kapacitou odpovídající projektovému průtoku páry.

Vzhledem k charakteru havarijní situace se uvedené bezpečnostní systémy prakticky neuplatnily.

Výše popsané charakteristiky reaktoru RBMK-1000 platí pro stav bloků černobylské jaderné elektrárny v době nehody, následně na dalších blocích došlo k výrazným modifikacím, které měly podobné události předejít. [\[11\]](#)[\[12\]](#)

3. VLIV RADIACE NA VLASTNOSTI BETONU A VÝZTUŽE

Štěpení jaderného paliva v reaktorech s sebou přináší zatížení konstrukčních materiálů ionizujícím zářením. Jde o specifický problém, který se v podobném měřítku nikde jinde v průmyslové praxi neobjevuje. Různé druhy zářičů jsou používány v průmyslu, zemědělství i zdravotnictví, nikde se však nenachází takové množství radioaktivních materiálů jako právě v jaderných elektrárnách. [\[14\]](#)

Druhy záření, které při radioaktivním přeměně vzniká

- **záření alfa** - proud jader helia (částic alfa), má nejkratší dosah (lze ho zastavit např. i listem papíru)
- **Záření β** - proud specificky nabitých elektronů/pozitronů, lze ho odstínit 1 cm plexiskla nebo 1 mm olova, avšak při stínění urychlených elektronů těžkým materiálem (kovy) vzniká brzdné záření neboli rentgenové záření
- **Záření γ** - elektromagnetické záření vysoké frekvence neboli proud velmi energetických fotonů. Nemá elektrický náboj, a proto nereaguje na elektrické pole. Jeho pronikavost je velmi vysoká, pro odstínění se používají velmi tlusté štíty z kovů velké hustoty (např. olovo), anebo slitin kovů velké hustoty
- **Neutronové záření** – z rozpadu některých prvků, iniciují štěpnou reakci, proud elektricky neutrálních neutronů pohltí např. materiály bohaté na vodík, bor, nebo tlustá vrstva betonu

Při interakci částic s látkou může dojít v atomárním měřítku ke změně struktury materiálu. Jak významná změna bude, záleží především na druhu materiálu, typu dopadajícího záření a jeho energii. [\[14\]](#)

Stínící konstrukce

Gama záření je účinně stíněno těžkými atomovými jádry. Proto se pro primární stínící konstrukce používají materiály s vysokou objemovou hmotností, jako jsou například těžké betony ($\rho > 2600 \text{ kg/m}^3$) nebo velmi těžké betony ($\rho > 4000 \text{ kg/m}^3$). Sekundární stínící konstrukce mohou být i z obyčejného betonu. [\[15\]](#)

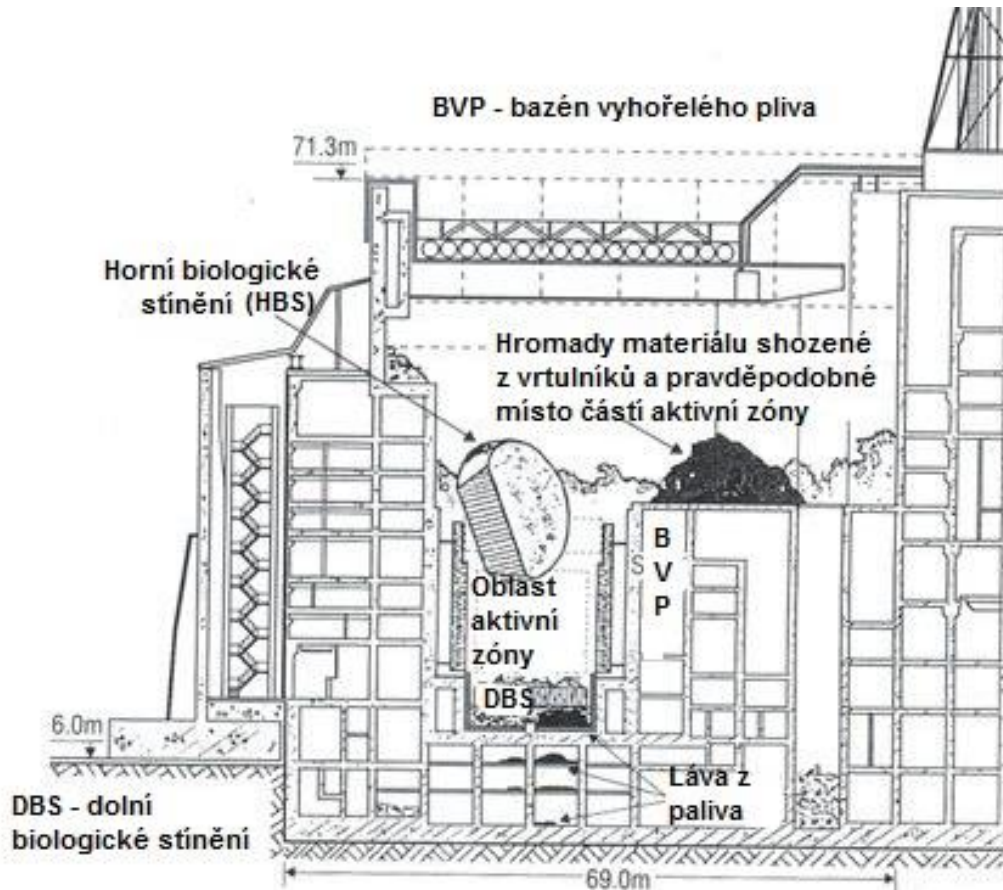
Vliv radiace na vlastnosti betonu a výztuže

Vlivem záření dochází k zvětšení objemu kameniva v betonu v důsledku vzniku mikrotrhlin, k snížení pevnosti betonu v tlaku i v tahu a k snížení modulu pružnosti. Cementový kámen betonu je ovlivněn jen minimálně.

Ve výztuži vlivem záření dochází ke zvýšení pevnosti, ke zvýšení meze kluzu a k snížení tažnosti v důsledku mikrostrukturálních změn.[\[15\]](#)

4. SANACE

Reaktor sám byl pokryt pytli s pískem shazovanými z vrtulníků, přičemž poškozená střecha nevydržela takové zatížení a část se jí propadla, čímž se uvolnila další radiace (Obr. 8.). Únikům radioaktivního materiálu do ovzduší se podařilo zamezit až po devíti dnech od havárie. Aby byl zapečetěn reaktor a jeho obsah, byl kolem něj rychle vytvořen velký betonový sarkofág.



Obr. 8. Stav budovy reaktoru po počátečních zásazích po havárii [\[11\]](#)

Původní sarkofág

Sarkofág je masivní ocelová a betonová konstrukce, kterou je překryt jaderný reaktor. Byl navržen tak, aby omezil radioaktivní kontaminaci životního prostředí ohraničením nejnebezpečnější oblasti reaktoru a chránil ji tak před klimatickými vlivy. Nachází se ve velké omezené oblasti známé jako Černobylská Zakázaná Zóna. V sarkofágu je uzavřeno 200 tun radioaktivního koria, 30 tun vysoce kontaminovaného prachu a 16 tun uranu a plutonia. Ještě v roce 1996 bylo považováno za nemožné, aby probíhaly opravy uvnitř sarkofágu vzhledem k odhadu radiace na 10 000 rentgenů za hodinu (běžné radiační pozadí v městech je kolem 20–50 mikrorentgenů za hodinu, a smrtelná dávka je 500 rentgenů pod dobu více než 5 hodin). Bylo však přijato rozhodnutí o nahrazení sarkofágu novým ochranným pláštěm a projekt na rekonstrukci prostoru je v plném proudu.

Navrhování sarkofágu začalo 20. května 1986. Následná výstavba trvala 206 dní, od června do konce listopadu téhož roku. Prvním úkolem ještě před zahájením stavby, bylo vybudování chladicí desky pod reaktorem, aby se zabránilo protavení jaderného paliva z hořícího otvoru v základně. Byli povoláni horníci, aby vykopali tunel pod reaktor a 24. června 1986 čtyři sta horníků opravdu začalo kopat 168 m dlouhý tunel. Když se budova stala příliš radioaktivní, začalo být nemožné přímo našroubovat matice a šrouby nebo použít jakékoli přímé navaření do sarkofágu, takže tato práce byla provedena pomocí robotů. Sváry sarkofágu však nebyly řádně utěsněny. Celý proces výstavby se skládal z osmi etap: vyčištění a betonáž území kolem reaktoru číslo 4, montáž původní železobetonové ochranné zdi kolem obvodu, výstavba separační zdi mezi bloky 3 a 4, výstavba kaskádové stěnové konstrukce, překrytí turbínové haly, montáž výškové opěrné zdi, montáž podpěr a zpevnění, montáž krytiny reaktoru a konečně instalace ventilačního systému.

Bylo použito více než 400 000 m³ betonu a 7 300 tun kovu během stavby sarkofágu. Sarkofág uzavřel více 740 000 m³ silně kontaminovaných trosků, spolu s kontaminovanou půdou. Má více než 60 otvorů umožňujících pozorování vnitřku jádra. Filtrační systémy byly zavedeny tak, že žádný radioaktivní materiál nebude unikat těmito otvory.

Sarkofág nedokáže trvale účinně uzavřít zničený čtvrtý reaktor. Jeho chvatná konstrukce, v mnoha případech prováděna na dálku průmyslovými roboty, má za následek jeho rychlé stárnutí, a pokud by se zhroutil, mohl by se uvolnit další mrak radioaktivního prachu.

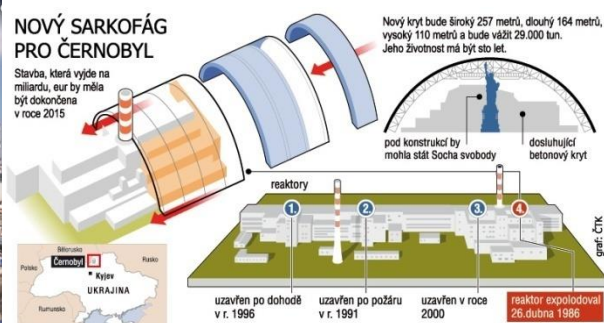
Do betonu pokrývajícího reaktor prosakuje voda a vyplavuje radioaktivní materiály do okolních podzemních vod. Vysoká vlhkost uvnitř krytu přispívá k další erozi jeho ocelové konstrukce a následnému úniku radioaktivity. [6][5]

Nový kryt

Nová kovová kopule v odstavené jaderné elektrárně v Černobylu zakryla havarovaný čtvrtý reaktor. Nový sarkofág (Obr. 9, Obr. 10) by měl vydržet 100 let a měl by zabezpečit, že do atmosféry nebudou unikat radioaktivní látky ze starého sarkofágu z roku 1986. Kritici ale tvrdí, že konstrukce neřeší problém zbytků radioaktivního paliva v původním úkrytu. To tam mezitím reaguje a nikdo neví, v jakém je stavu.



Obr. 9 Výstavba nového krytu [9]



Obr. 10. Schéma nového krytu [10]

Stejně jako další experti upozorňuje, že původní projekt vypadal jinak. Vycházel z představy, že bude vybudován hermetický sarkofág, který bude uvnitř vybaven technologiemi, jež by dokázaly rozebrat starou budovu a zpracovat rozteklé jaderné palivo z vybuchlého reaktoru. [17]

Seznam použitých zdrojů

- [1] Interactive Investment, Černobyl-1986 [online]. 2010 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://www.cernobyl-1986.eu/>
- [2] Interactive Investment, Černobyl-1986 [online]. 2010 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://www.cernobyl-1986.eu/havarie-jaderne-elektrarny-cernobyl-likvidace.html>
- [3] BUREAU, S.R.O, CHERNOBYLWEL.COME [online]. 2016 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <https://www.chernobylwel.com/CZ/724/cernobyl/>
- [4] EuropeanComputerDriving Licence. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. Stránka byla naposledy editována 25. 2. 2015 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kontejnment>
- [5] EuropeanComputerDriving Licence. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. Stránka byla naposledy editována 4. 12. 2016 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cernobylsk%C3%A1_hav%C3%A1rie
- [6] EuropeanComputerDriving Licence. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. Stránka byla naposledy editována 1. 12. 2016 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sarkof%C3%A1g_%C4%8Dernobylsk%C3%A9_jadern%C3%A9_elektr%C3%A1rny
- [7] iDNES.cz, MAFRA, a. s., [online]. 1999–2016 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://zpravy.idnes.cz/30-vyroci-havarie-jaderne-elektrarny-cernobyl-fn6-/domaci.aspx?c=A160422_162555_domaci_hro
- [8] Česká televize, ČT 24, [online]. 1996 – 2016 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/svet/1456402-katastrofu-v-cernobylu-priznal-gorbacov-az-tri-tydny-pote>
- [9] Český informační portál, Průmysl, [online]. 21. 10. 2015 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://www.prumysl.cz/havarovany-reaktor-v-cernobylu-dostane-novy-sarkofag/>
- [10] Borgis, a.s., Novinky [online]. 2003–2016 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/ekonomika/265976-radioaktivni-cernobylsky-reaktor-ma-pohrbit-novy-sarkofag.html>
- [11] Klub Praha 7, Pro občany Prahy 7 [online]. 26.4.2011 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://www.klubpraha7.cz/?p=1836>
- [12] EuropeanComputerDriving Licence. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. Stránka byla naposledy editována 6. 12. 2016 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/RBMK>
- [13] OEnergetice, ČTK [online]. 30. 3. 2016 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/letos-uplyne-30-let-od-havarie-v-cernobylu-muze-se-podobna-situace-opakovat/>

- [14] EuropeanComputerDriving Licence. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. Stránka byla naposledy editována 6. 12. 2016 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Radioaktivita>
- [15] ŠTEFAN, Radek, Beton v extrémních podmínkách, Účinky radiačního záření - *přednáška* [online]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/FRVS_2013/Prednaska_5.pdf
- [16] ŘÍHA, Tomáš, Studium radiačního poškození nádoby reaktoru VVER-440 jaderné elektrárny Dukovany – *díplomová práce* [online]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38979
- [17] Atlas, © Economia, a.s [online]. 1999 – 2016 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/zahranici/jak-pohrbit-smrt-nad-cernobylem-se-uzavre-novy-sarkofag-vydr/r~f6103aueb62111e6b5600025900fea04/>