Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti (JOSRA). JOSRA 1-2 - 2012, roč. 5.

Analýza možného vzniku explozivní směsi vodíku v primárním okruhu s ohledem na bezpečnost provozu jaderné elektrárny

30.07.2012

Analysis of possible generating of explosive mixture with hydrogen in primary circuit in nuclear power plant as regards safety in service

František Houser, Jiří Nehněvský a kol.

VÚJE Česká republika s.r.o., Jaderná elektrárna Dukovany; houser@vuje.cz

jaderná bezpečnost | nekondenzovatelné plyny | jaderné elektrárny | bezpečnost provozu | vodík

Abstrakt

Ve společnosti VÚJE Česká republika probíhal od poloviny roku 2009 do konce roku 2011 projekt se státní účastí s názvem *Bezpečnostní aspekty vzniku vodíku v primárním okruhu za provozu jaderné elektrárny*. Mezi hlavními cíli tohoto projektu bylo komplexní zmapování problematiky vzniku a vývoje vodíku za normálního provozu jaderné elektrárny s lehkovodním reaktorem. Byly provedeny analýzy uvolňování a shromažďování vodíku ve vytipovaných místech primárního okruhu ve všech provozních režimech. Při těchto analýzách se vycházelo z modelu vývinu vodíku, který byl sestaven na základě bilance odplyňovací stanice. Dále byly popsány procesy důležité z hlediska tvorby bubliny nekondenzovatelných plynů, které probíhají v kompenzátoru objemu. Mezi nejdůležitějšími závěry projektu je uvedeno, že při nominálním provozu a normálním odstavování se vodík nemůže uvolňovat a shromažďovat ani v nejvyšších místech primárního okruhu (kromě kompenzátoru objemu), ale při nestandardním odstavování a při setrvání v odstávce po delší dobu nelze vyloučit tvorbu vodíku a je potřeba udržovat v provozu odvětrávání primárního okruhu. Na základě analýz a závěrů byla navržena technologická doporučení, při jejichž dodržení nemůže dojít ke vzniku a případné iniciaci výbušné směsi. V kompenzátoru objemu by mohlo vlivem gravitace docházet k soustřeďování lehkého vodíku v horním prostoru a v potrubí, které vede k odlehčovacím ventilům. Řešitelé projektu vyřešili tento problém návrhem labyrintového odvaděče, který by měl vodík a ostatní nekondenzovatelné plyny odvádět do barbotážní nádrže.

Klíčová slova: labyrintový odvaděč, primární okruh, explozivní směs, radiolýza vody, nekondenzovatelné plyny, tvrdá bublina, rozpuštěné plyny, chladivo primárního okruhu, bezpečnost provozu, jaderná bezpečnost

Abstract

A project was undertaken in VÚJE CZ with state involvement from halfway through 2009 until 2011 which was called *Safety Aspects of Creation Hydrogen in Primary Circuit During Operation of Nuclear Power Plant.* The main aim of this project was the complex exploration of the problematic creation of hydrogen during regular operation of a nuclear power plant with a light-water reactor. The creation and release of hydrogen from the coolant in the most important parts of primary circuit were analysed in all operating regimes. These analyses were based on a model of the creation of hydrogen which was created according to data from a degassing plant. Moreover the processes were described from the point of view of creation a bubble of undissolvable gasses in the expander. Among the most important conclusions is hydrogen cannot be released from coolant either in the highest parts of the primary circuit during normal operation and during normal shut down. But during nonstandard long time taking shut down or when staying long time in shut down, it is not possible to eliminate the release of hydrogen and venting of primary circuit must be working. Consequently technological suggestions were proposed, which prevent the creation and ignition of an explosive mixture of gases. In high part of expander and in tubes which lead to expander's valves could separate light hydrogen. This problem was solved by the design of the labyrinth conduit which should drain hydrogen and other undissolvable gases to the bubbler.

Keywords: labirinth diverter, primary cicuit, explosive mixture, radiolyses of water, uncondensable gases, hard bubble phenomenon, dissolved gases, primary circuit coolant, safety in service, nuclear safety

Úvod

Při zvyšujících se nárocích na bezpečnost jaderných elektráren je potřeba věnovat pozornost i vodíku, který se uvolňuje z chladiva primárního okruhu a dávkovaných chemikálií. Zdrojem tohoto plynu je voda, která podléhá radiolýze v aktivní zóně reaktoru, a rozkládá se na vodík a kyslík. Pro technologické součásti primárního okruhu je nebezpečný zejména kyslík, protože způsobuje korozi. Aby bylo korozi zabráněno, je do chladiva dávkován amoniak, jež podléhá také radiolýze a rozkládá se na vodík a dusík. Dusík je pro kovové součástí zařízení neškodný a vodík rekombinuje s rozpuštěným kyslíkem. Koncentrace vodíku je tedy úmyslně udržována vyšší, aby byla snížena koncentrace rozpuštěného kyslíku na minimum a bylo tak co možná nejvíce zabráněno korozi zařízení.

K požáru nebo výbuchu vodíku v primárním okruhu může dojít, pokud je současně splněno několik nezbytných podmínek: vodík (uvolněný z vody ve formě oblaku – bubliny), přítomnost okysličovadla, kterým může být kyslík uvolněný z vody obdobně jako vodík, vzdušný kyslík dopravený do primárního okruhu při chybné manipulaci nebo vzdušný kyslík z okolí při otevírání reaktoru nebo jiné vysoko položené části primárního okruhu, iniciační zdroj a určitá vlhkost a teplota

Plyny v chladivu primárního okruhu jaderných elektráren s tlakovodním reaktorem

Z hlediska bezpečnosti provozu musí být zajištěno, aby v žádném případě nevznikaly v primárním okruhu parní oblasti (s výjimkou kompenzátoru objemu), aby v proudící kapalině nevznikaly nežádoucí rázy kvůli poškození zařízení, a aby nedocházelo ke zhoršení přenosu tepla na povrchu paliva kvůli tepelně izolačním vlastnostem plynů. Toto je zajištěno tak, že tlak v primárním okruhu musí být s dostatečnou rezervou vyšší než tlak , než je tlak sytých par vody při dané teplotě. Při provozu elektrárny na výkonu tak dosahuje tlak v primárním okruhu téměř 16 MPa.

Rozpustnost plynů v kapalinách v nádobách s fázovým rozhranním popisuje Henryho zákon. Uvolňování rozpuštěných plynů začíná od malých bublinek, které vznikají na vhodných jádrech. V důsledku turbulencí a proudění kapaliny se malé bublinky směšují ve větší a stoupají k hladině. Uvolňování plynů probíhá na hladině a těsně pod hladinou, kde je tlak sytosti roven parciálnímu tlaku plynu nad hladinou. [1]

Transport tepla i hmotnosti je odlišný pro stagnující a promíchávající se kapalinu, a to v závislosti na způsobu promíchávání, jestli jde o nucenou nebo stagnující kapalinu. Minimální tlak potřebný pro zabránění tvorby vodní hladiny a vzniku paroplynové směsi nad hladinou poměrně rychle klesá se snižující se teplotou vody. Podle dostupných pramenů vykazují vodík i dusík minimální rozpustnost ve vodě kolem teploty 80 °C.

Popsané procesy se různě uplatňují v kompenzátoru objemu, v částech primárního okruhu s definovaným prouděním chladiva a v součástech napojených na nejvyšší místa primárního okruhu se stagnující kapalinou nebo nedefinovaným prouděním (pod víkem reaktoru a přívodními kolektory parogenerátorů).

Rozpustnost vodíku je ovlivňována přítomností ostatních plynů [1]. Protože tlak nad hladinou je dán součtem parciálních tlaků jednotlivých složek, je zřejmé, že čím více složek bude tvořit paroplynovou směs, tím bude parciální tlak jednotlivé složky menší. Proto se bude zmenšovat i rozpustnost jednotlivých složek. Pro zpřesnění modelu rozpustnosti vodíku v chladivu primárního okruhu je potřeba se zabývat možnostmi ohodnocení zejména vlivu dusíku.

Obr. 1: Rozpustnost vodíku při teplotách odpovídajícím reálným tlakům dosahovaným v primárním okruhu jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem

Protože primární okruh jaderné elektrárny je složitý systém, je nutné zhodnotit z hlediska tvorby vodíku všechna jeho zařízení postupně a to ve všech provozních režimech. Všechny uvedené analýzy vytváření vodíku radiolýzou při odstavování a po odstavení jaderného reaktoru a příslušné hodnoty koncentrace vodíku v chladivu primárního okruhu jsou založeny na modelových situacích, vycházejících z odhadu hmotnostního toku vodíku vznikajícího radiolýzou v závislosti na hodnotě zbytkového tepelného výkonu přepočtem z bilančně určeného hmotnostního toku vodíku vznikajícího při nominálním provozu jaderného energetického bloku (bilance odplyňovací stanice) a na modelovém procesu odstavování bloku.

Cílem této analýzy bylo pomocí skutečného prostorového modelu potrubního zařízení primárního okruhu vytipovat a provést ověřovací rozbor možného vzniku explozivní směsi. Pro účel této analýzy byl použit 3-D model dispozičního řešení vytvořený pomocí softwarového systému firmy AVEVA skutečného primárního okruhu v referenční JE Temelín z r. 2000. Na základě tohoto modelu byly vyhodnoceny systémy: reaktor a hlavní cirkulační smyčky, systém kompenzace

objemu, systémy havarijního doplňování primárního okruhu, pomocné systémy hlavních cirkulačních čerpadel, pomocné systémy primárního okruhu, systémy technologických odvzdušnění a havarijního odvodu plynů, primární kolektory parogenerátorů a navazující části hlavního cirkulačního potrubí studené a horké větve [4].

Obr. 2: Společný sací potrubní řád čerpadel systémů havarijního doplňování z horké a studené větve smyčky č. 4 (fialově je vyznačena úroveň hladiny při otevření reaktoru)

Vyhodnocením byla vytipována místa potrubních větví primárního okruhu, v nichž se při poddrenážování hlavní dělící roviny reaktoru (např. za účelem výměny paliva v reaktoru) mohou vytvářet volné hladiny chladiva. Za nejvýznamnější části byla vytipována potrubí nízkotlakých systémů doplňování, potrubí uzlu normálního dochlazování a vodní prostor primární strany parogenerátoru.

Obr 3: Výškové schéma hlavních zařízení primárního okruhu

Procesy v kompenzátoru objemu

Kompenzátor objemu kompenzuje teplotní změny vody v primárním okruhu a udržuje v něm požadovaný tlak v jednotlivých provozních režimech bloku. Kompenzátor objemu tvoří vertikální válcová tlaková nádoba výšky asi 13 m připojená na horkou větev 4. hlavní cirkulační smyčky primárního okruhu (320^{o}C). Při výkonovém provozním režimu je v dolní části 55 m^{3} vody a v horní části 24 m^{3} vodní páry s příměsí nekodenzovatelných plynů.

Přetlak v kompenzátoru objemu je při jmenovitém režimu je 15,7ą 0,3 MPa a teplota vody 346 ą 2^{o}C. Pro udržování tohoto přetlaku je v parním prostoru umístěný sprchový systém a ve vodním prostoru jsou umístěná elektrická topná tělesa. Tyto systémy mají udržovat tlak a teplotu vody v kompenzátoru konstantní tak, že se při poklesu tlaku zvýší topný výkon ohříváků, čímž se do parního prostoru uvolní určité množství páry a tlak se opět zvýší a při nadměrném růstu tlaku se zvýší průtok vody do sprchového systému ze studené větve primárního okruhu (290^{o}C), čímž část páry zkondenzuje a tlak opět poklesne na požadovanou hodnotu.

Z horní části kompenzátoru objemu je vyvedeno potrubí ke sběrně, z níž je napojen odlehčovací ventil a dva hlavní pojistné ventily. Celkový vnitřní objem potrubí nad kompenzátorem objemu až k odlehčovacímu ventilu a ke dvěma pojišťovacím ventilům činí 0,266 m^{3}. Výfuková potrubí odlehčovacího ventilu a obou hlavních pojišťovacích ventilů jsou napojena na společné potrubí, které je připojeno na barbotážní nádrž. Barbotážní nádrž slouží ke shromažďování a kondenzaci páry přepouštěné souborem pojistných ventilů při překročení tlaku v kompenzátoru objemu. Tato pára je v barbotážní nádrži zavedena do rozváděcího registru s otvory pod hladinou.

Při delším ustáleném provozu bloku dojde k určitému rozvrstvení složek paroplynové směsi v závislosti na molárních hmotnostech jednotlivých složek (nikoli však s hranicemi) [3]. Nejvýše je vrstva s větší koncentrací vodíku než průměrná hodnota, nejníže vrstva dusíku, obě s větší koncentrací než průměrné hodnoty. Mezi vrstvou vodíku a vrstvou dusíku se vytvoří rozsáhlá vrstva páry se sníženou koncentrací vodíku a dusíku. Hustota paroplynové směsi v kompenzátoru objemu je vzhledem k vysokému tlaku (i přes dosti vysokou teplotu) velká, a proto je střední volná dráha molekul velmi malá. Na druhé straně při velké hustotě paroplynové směsi je počet srážek molekul velký a to vyvolává tendenci každé složky rozšířit se do celého prostoru. Proto se vodík nachází v paroplynové směsi v celém

parním prostoru kompenzátoru objemu, ale v nejvyšších místech je jeho koncentrace větší než průměrná. Obdobně dusík se nachází v celém prostoru, ale v blízkosti hladiny je jeho koncentrace větší než průměrná.

Určité rozvrstvení složek paroplynové směsi vytváří problém pro určení množství jednotlivých složek paroplynové směsi v parním prostoru kompenzátoru objemu, protože není splněn předpoklad homogenního složení paroplynné směsi [3]. Při poněkud větší koncentraci dusíku v blízkosti hladiny je zde také poněkud větší parciální tlak dusíku. Tato okolnost způsobuje menší uvolňování dusíku z vody do parního prostoru, než by odpovídalo homogennímu složení paroplynové směsi. Opačné důsledky má určité rozvrstvení složek pro vodík. Jeho parciální tlak v blízkosti hladiny je menší než by odpovídalo tlaku v homogenní směsi v důsledku větší koncentrace dusíku v tomto prostoru. To způsobuje větší uvolňování vodíku z vody, než by odpovídalo stavu s homogenní paroplynovou směsí. Vodík se pak postupně přemisťuje do výše položených částí parního prostoru kompenzátoru objemu.

Samotné sprchování v kompenzátoru objemu ovlivňuje množství nekondenzovatelných plynů jen nepatrně [3]. Pod sprchami se vytváří oblast chladnější vody, která v důsledku větší hmotnosti klesá, a tak při postupném směšování s teplou vodou zanáší nekondenzovatelné plyny přiváděné sprchovou vodou dosti hluboko pod hladinu a odtud potrubím do primárního okruhu.

Ostavování energetického bloku

Obdobné fyzikální procesy v kompenzátoru objemu, jako při nominálním provozním režimu, probíhají při vychlazování primárního okruhu. Tyto procesy sice probíhají krátkou dobu, ale s přibližně desetinásobným průtokem vstřikové vody a za snižování hladiny, tlaku a teploty. Za počátek vychlazování kompenzátoru objemu je považováno první snížení teploty ve vodním prostoru z 346-348 ^{O}C na cca 332 ^{O}C. Časový interval od zastavení štěpné reakce je asi 7 hodin. V průběhu předcházejících asi 25 hodin byla snížena koncentrace vodíku ve vodě z 22 Nml/l na 4,2 Nml/l. Současně se tlak v kompenzátoru objemu sníží na cca 13,2 MPa(a).

Během dalších etap odstavování dochází ke zkoušce odlehčovacího ventilu a na konci při tlaku asi 4 MPa se provádí zkouška pojišťovacích ventilů na kompenzátoru objemu. Při obou zkouškách dojde k odpuštění vodíku z nejvyšších míst kompenzátoru objemu do barbotážní nádrže. Dále se pokračuje ve vychlazování primárního okruhu. Na konci této etapy vzrůstá koncentrace vodíku v primárním okruhu na lokální špičkovou hodnotu 16 Nml/l. V dalším průběhu vychlazování se však koncentrace vodíku rychle snižuje na hodnotu kolem 5 Nml/l. Při dosažení popsaného stavu začíná plnění kompenzátoru objemu dusíkem (asi 24 hod od zastavení štěpné reakce). Přitom v tomto období je v provozu odplyňovací stanice [2].

Množství vodíku, který se může uvolnit v kompenzátoru objemu v procesu vychlazování do zkoušky pojišťovacích ventilů je velmi malé a nemůže znatelněji ovlivnit množství vodíku shromážděného v nejvyšších místech v průběhu nominálního provozního režimu.

Příprava na roztěsnění reaktoru

Před roztěsněním proběhne odplyňování chladiva primárního okruhu. Na počátku je teplota nižší než 60 ^{O}C a postupně se snižuje na cca 40 ^{O}C. Přetlak se pohybuje okolo 1,2 MPa = 1,3 MPa(a). V průběhu fáze koncentrace vodíku klesá z cca 5 Nml/l na hodnotu pod 1 Nml/l. Prostor nad hladinou v kompenzátoru objemu je zaplněn dusíkem. Jsou odstavena všechna hlavní cirkulační čerpadla a v provozu zůstává jedna větev pro odvod zbytkového tepla z aktivní zóny. K zastavení přívodu páry do odplyňovací stanice dochází po poklesu koncentrace vodíku ve vodě primárního okruhu pod 1 Nml/l.

Následuje odpouštění dusíku z kompenzátoru objemu, čímž se sníží tlak v primárním okruhu na 0,4 až 0,5 MPa(a). Přitom pro tento tlak a teplotu v primárním okruhu je rozpustnost vodíku ve vodě nejméně 70 Nml/l. V důsledku snížení

tlaku je rozpustnost vodíku ve vodě snížena, ale je stále několikanásobně větší než jeho koncentrace ve vodě. Konec odvzdušňování nastává asi 35 až 40 hodin od zastavení řetězové štěpné reakce při úrovni zbytkového výkonu cca 19 až 20 MWt. Dále následuje drenážování primárního okruhu a pokles hladiny v kompenzátoru objemu na úroveň 459-469 cm, což je 25-35 cm pod hlavní dělicí rovinou reaktor. [4].

Analýza procesů po uzavření reaktoru

Plocha hladiny chladiva v reaktoru nad nátrubky hlavního cirkulačního potrubí činí asi 12,2 m^2. Pokud by po uzavření reaktoru zůstal nad hladinou vzduch, docházelo by i při malé koncentraci vodíku v chladivu v této fázi k uvolňování vodíku. Intenzita uvolňování vodíku by byla malá, ale byla by tím větší, čím menší by byl tlak v primárním okruhu. Důsledky tohoto procesu by vzrůstaly úměrně časovému intervalu. Nelze proto vyloučit vznik a iniciaci směsi vzduchu s vodíkem obdobně jako se stalo na Kalininské JE v roce 1989. Pokud by odvzdušnění z nejvyššího místa víka reaktoru nebylo otevřeno, byla by rychlost vytváření vrstvy zápalné/detonační směsi značně větší. Ihned po uzavření reaktoru by mělo být otevřeno kontinuální odvzdušňování z nejvyššího vnitřního místa pod víkem reaktoru až do postupného zaplnění primárního okruhu [4].

Rizikové prostory primárního okruhu

Řešením programové náplně řešitelé dospěli k závěru, že při standardním provozu a odstavování (vychlazování) jaderného energetického bloku se v nejvyšších místech cirkulačních smyček primárního okruhu kromě kompenzátoru objemu, nemůže vytvořit paroplynová směs. Toto zjištění nemusí platit zejména v režimu odstaveného a dochlazeného reaktoru ve slepých větvích napojených na cirkulační okruh a v systémech, kde se mohou v režimu odstavení vytvářet volné hladiny [2].

Po odstavení odplyňování při snížení koncentrace vodíku v chladivu pod 1 Nml/l se koncentrace vodíku postupně, ale pomalu, zvyšuje v důsledku vývinu vodíku radiolýzou v aktivní zóně reaktoru. Před roztěsněním může dosáhnout koncentrace vodíku méně než 2,1 až 5,7 Nml/l, přičemž při atmosférickém tlaku při teplotě chladiva 55 ^oC činí rozpustnost vodíku 11,8 Nml/l, takže intenzita uvolňování vodíku přes hladinu je malá a je závislá na parciálním tlaku vodíku v paroplynové směsi nad hladinou. Z kvantitativního hodnocení uvolňování vodíku v systémech havarijního doplňování vyplývá, že v průběhu desítek hodin po vytvoření hladiny koncentrace vodíku ve vzduchu nad hladinou nedosáhne ani koncentrace odpovídající spodní mezi zápalnosti.

Obdobně se vytvoří hladiny v potrubích pod primárními kolektory parogenerátorů. Vodní prostor parogenerátorů by měl být trvale odvzdušněný z nejvyšších míst (tedy z nejvyšších míst primárních kolektorů), a proto by vodík, vyznačující se tendencí ke shromažďování v nejvyšším místě, měl být trvale odváděn. Proto lze vyloučit, že by se na primární straně parogenerátorů mohla vytvořit koncentrace vodíku na úrovni spodní meze zápalnosti ve směsi se vzduchem i po dlouhém trvání odstavení.

Značně odlišný stav by se na primární straně parogenerátorů vytvořil v případě, že by po drenážování chladiva došlo k uzavření odvzdušnění. V tomto případě by se většina vodíku uvolněného z vody shromaždovala v poměrně malém prostoru v nejvyšších částech primárních kolektorů a zde by se mohla vytvořit vysoká koncentrace vodíku ve vzduchu, která by mohla překročit nejen koncentraci odpovídající spodní mezi zápalnosti, ale koncentrace by mohla zasáhnout i do detonační oblasti. Proto je nezbytné při odvodněných parogenerátorech udržovat trvale otevřené odvzdušnění [4]. Pokud z nějakých důvodů nelze trvale udržovat odvzdušnění, pak je třeba se před jakoukoli demontáží a v průběhu demontáže vík primárních kolektorů počínat velmi opatrně. Vzducho-vodíková směs by měla být odpouštěna velmi pomalu a v okolí se nesmí vyskytovat zdroje, které by mohly vyvolat vznícení nebo detonaci směsi.

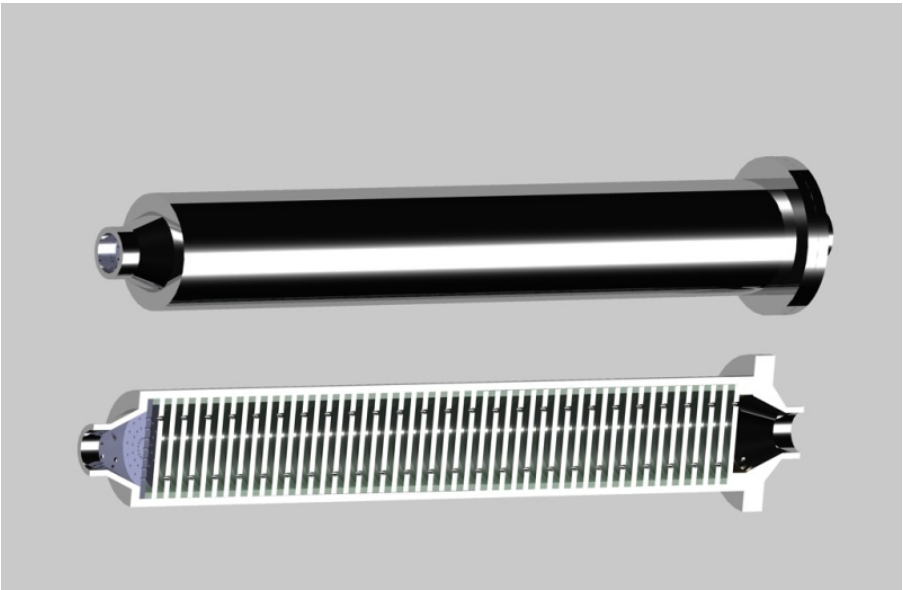
Vznik „tvrdé bubliny“ nekondenzovatelných plynů

Vodík se shromažďuje ve větší míře v nejvyšších místech kompenzátoru objemu, tedy dosti daleko od vodní hladiny, přes kterou by mohl být do vody pohlcován a z horního prostoru není odváděný. Výše uvedené mechanismy uvolňování vodíku separovaného v nejvýše položených místech kompenzátoru objemu lze chápat jako ilustraci důsledků analyzovaných fyzikálních procesů, proto je třeba se zaměřit na provozní sledování měřitelného ukazatele. Takovým indikátorem narůstajícího množství nekondenzovatelných plynů je zvyšování rozdílu teploty ve vodním prostoru a teploty v parním prostoru kompenzátoru objemu v průběhu provozu jaderného energetického bloku [3].

Velmi rozdílné molární hmotnosti vodíku a dusíku vedou k určité separaci a většímu soustřeďování vodíku v nejvyšších místech parního prostoru kompenzátoru objemu, tedy v místech bez možného odvádění. Naopak u dusíku se projevuje tendence k většímu soustřeďování se nad hladinou, přes kterou se při poněkud větším parciálním tlaku částečně rozpouští ve vodě a je strháván studenými proudy hlouběji pod hladinu. Pokud není část paroplynové směsi z nejvyšších míst průběžně odváděná, oblast s větším podílem vodíku v paroplynové směsi postupně rozšiřuje směrem k hladině.

Pokud se množství těchto plynů příliš zvýší, může nastat stav, který je označován jako „tvrdá bublina“ („hard bubble phenomenon“). V takovém případě zaplňují nekondenzovatelné plyny, a zejména vodík, velkou část parního prostoru a v případě vzrůstu tlaku, protože nezpůsobí dostatečně rozsáhlou kondenzaci vodní páry, nemůže spuštění sprchového systému zajistit správnou odezvu, a proto se parní prostor kompenzátoru objemu chová „jako by byl tuhý“. Prameny doporučují jednoduchý návod na rozpoznání, „tvrdé bubliny“: rozdíl absolutního tlaku v kompenzátoru objemu a tlaku sytosti odpovídajícího teplotě v parním prostoru, který je větší než 60 psig = 0,414 MPa. [3] Tomuto tlakovému rozdílu odpovídá teplotní rozdíl mezi teplotou vodního prostoru a parního prostoru kompenzátoru objemu 2,12 ^{o}C. Vzhledem k malému teplotnímu rozdílu v porovnání a teplotami v daných prostorách není pravděpodobně dostatečně přesné měření samostatnými teploměry. Proto by bylo pravděpodobně nutné měřit přímo teplotní rozdíl. Chyba měření by měla dosahovat nejvýše okolo ±0,1 ^{o}C.

Paroplynovou směsí s velkým podílem vodíku je zaplněno výstupní potrubí napojené na horní části kompenzátoru objemu - sběrnice a potrubí vedoucí k odlehčovacímu a ke dvěma pojišťovacím ventilům. Tento systém má, i s přihlédnutím k tepelné izolaci, teplotu blízkou teplotě okolí, a proto zde dochází ke kondenzaci většiny páry (vzniklý kondenzát stéká zpět do kompenzátoru objemu). Stejnou teplotu mají také sedla a kuželky pojišťovacích ventilů a odlehčovacího ventilu. V případě otevření těchto ventilů pronikne k jejich sedlům a kuželkám ventilů paroplynová směs o teplotě okolo 345°C. To vyvolá teplotní šok v materiálu, který může vést ke ztrátě těsnosti těchto ventilů. Odstranit toto nebezpečí je možné vytvořením trvale otevřených obtoků těchto ventilů malého průměru s vestavěným omezovačem průtoku, například na principu labyrintové ucpávky. Tímto opatřením lze rovněž zabránit hromadění nekondenzovatelných plynů v horní části parního prostoru kompenzátoru objemu a vyloučit nebezpečí vytvoření „tvrdé bubliny“. Energetická ztráta vyplývající z tohoto odběru paroplynové směsi by byla nepatrná [4].



Obr. 4: Labyrintová ucpávka do obtoků pojišťovacích a odlehčovacích ventilů

Souhrnné závěry a provozní doporučení pro minimalizaci rizika tvorby a vznícení směsi vodíku v primárním okruhu jaderné elektrárny

Při standardním provozu a odstavování jaderného energetického bloku v ETE podle provozních režimů se v nejvyšších místech cirkulačních smyček primárního okruhu, ani v kompenzátoru objemu, nemůže vytvořit explozivní paroplynová směs [4].

Vytvořením obtoků (pomocí labyrintového odvaděče) pojišťovacích ventilů a odlehčovacího ventilu s malým trvalým průtokem je možné zabránit teplotním šokům na sedlech a kuželkách ventilů při jejich otevření a navíc zajistit trvalé odvádění nekondenzovatelných plynů do barbotážní nádrže a vyloučit tak nebezpečí vytvoření „tvrdé bubliny“.

Obdobná opatření jako po uzavření reaktoru je třeba aplikovat i v dalších částech primárního okruhu, ve kterých došlo při roztěsnění k vytvoření vodní hladiny a zaplnění prostoru nad hladinou vzduchem (primární kolektory parogenerátorů, hydraulická část hlavních cirkulačních čerpadel). Z výše uvedených analýz vyplývá, že vytváření a shromažďování vodíku v kompenzátoru objemu a v dalších částech primárního okruhu při modelovém procesu odstavování nevytváří provozně a manipulačně nebezpečné situace.

Základní podmínkou pro zabránění vznícení a detonaci hořlavé směsi v primárním okruhu je vyloučení vytvoření oblastí zaplněných vodíkem a oblastí zaplněných vzduchem. Při všech provozních režimech a stavech bloku musí být v primárním okruhu takový tlak, aby i v jeho nejvýše položených částech byl tlak s dostatečnou rezervou vyšší než tlak sytosti odpovídající teplotě chladiva. Pokud je tlak v režimech normálního provozu bloku snižován pod tuto úroveň, musí být v provozu zařízení pro odvádění plynů ze všech lokálně nejvyšších míst primárního okruhu. Před uvedením bloku do stavu, v němž se v primárním okruhu vytvářejí hladiny, je třeba zajistit, aby koncentrace vodíku v chladivu byla spolehlivě menší než jeho rozpustnost. Dávkování amoniaku, který je také zdrojem vodíku, v závěru odstavování bloku provádět pokud možno malé, jen pro odůvodněné zabránění nepřijatelného zvýšení koncentrace kyslíku v chladivu. Všechny manipulace na primárním okruhu musí být prováděny tak, aby se do něj nemohl dostat vzduch. Odvzdušnění je třeba provádět s malým tlakovým rozdílem a odvzdušňovací ventily je třeba otevírat velmi zvolna.

Před otvíráním jakýchkoliv částí tlakového systému primárního okruhu musí být v provozu systém odvádění plynů a těsně před otevřením provedeno odvzdušnění nejvyšších částí. I při provedení těchto opatření je při vlastním otevírání žádoucí zvýšená opatrnost se zařízeními, která by mohla způsobit iniciaci zapálení hořlavé směsi. Po uzavření primárního okruhu s palivem v aktivní zóně, je žádoucí co nejdříve uvést do provozu systém technologických odvzdušnění a odvádět plyny do systému čištění plynů. Tyto obecné závěry a doporučení respektují provozní předpisy, ve kterých jsou ošetřeny všechny situace, které lze předpokládat za normálního provozu jaderného bloku.

Zdroje informací

[1] Technická zpráva VÚJE ČR k projektu č. FR-TI1/401: Zdroje a bilance vodíku v primárním systému lehkovodního reaktoru se zaměřením na JE s VVER, prosinec 2009, č. zprávy: 10-20309

[2] Technická zpráva VÚJE ČR k projektu č. FR-TI1/401: Znalostní báze aktuálního stavu problematiky bezpečnosti provozu lehkovodního reaktoru z hlediska vývinu, distribuce a chování vodíku, srpen 2010, č. zprávy: 10-20710

[3] Technická zpráva VÚJE ČR k projektu č. FR-TI1/401: Vývoj podpůrného SW pro výpočtovou simulaci chování vodíku ve vybraných režimech jaderného bloku, prosinec 2010, č. zprávy: 10-21010

[4] Technická zpráva VÚJE ČR k projektu č. FR-TI1/401: Požadavky a technické specifikace na vývoj a zdokonalení systému měření vodíku v primárním systému JE pro zvýšení bezpečnosti provozu, prosinec 2011, č. zprávy: 10-21411

Vzorová citace

HOUSER, František; NEHNĚVSKÝ, Jiří...[et al.]. Analýza možného vzniku explozivní směsi vodíku v primárním okruhu s ohledem na bezpečnost provozu jaderné elektrárny. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online], 2012, roč. 5, č. 1-2. Dostupný z WWW: <http://www.bozpinfo.cz/josra/josra-01-02-2012/vodik-v-jaderne-elektrarne.html>. ISSN 1803-3687.

Autor článku:
Mgr. František Houser
Ing. Jiří Nehněvský, CSc.