

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2018

**TOMÁŠ
NIKL**

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Problematika těžkých havárií se zachycením roztaveného paliva pro zmírnění následků havárie“ vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a ostatních pramenů.

V Praze, dne 11. 6. 2018

.....

Tomáš Nikl

Anotační list

Jméno autora	Tomáš Nikl
Název BP	Problematika těžkých havárií se zachycením roztaveného paliva pro zmírnění následků havárie
Anglický název:	Problems of severe accidents with the capture of the molten fuel for mitigation of consequences of accident
Akademický rok:	2017/2018
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky, Jaderná energetická zařízení
Vedoucí BP/DP:	Ing. Václav Železný
Konzultant:	Ing. Václav Železný, Ing. Jiří Duspiva
Bibliografické údaje:	Počet stran: 29 Počet obrázků: 8 Počet tabulek: 1 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Těžké havárie, roztavení aktivní zóny, zachycení taveniny
Keyword:	Severe accidents, core melting, molten fuel capture
Anotace:	Práce se zabývá problematikou těžkých havárií a zmírněním jejich následků zachycením taveniny uvnitř nebo vně nádoby. Poslední část práce se zabývá citlivostním výpočtem vlivu hlavních veličin na délku rozlivu.
Abstract:	This work describes problems of severe accidents and mitigation of their consequences. It deals with capturing of the molten fuel inside the reactor vessel or outside the reactor vessel (Ex-vessel). Last chapter of this work deals with the sensitivity analysis of impact of the main values on the length of molten fuel spread.

Obsah

Obsah.....	2
Použité zkratky	3
Seznam obrázků	4
Jaderná bezpečnost – úvod.....	5
1. Průběh těžké havárie	6
1.1 Definice těžké havárie	6
1.2 Jevy v reaktoru a primárním okruhu v průběhu těžké havárie	7
1.2.1 Vliv tepelného výkonu	11
1.2.2 Termohydraulika primárního a sekundárního okruhu	11
1.2.3 Počáteční fáze poškození paliva	12
1.2.4 Uvolňování štěpných produktů.....	13
1.2.5 Vytváření bazénu taveniny	13
2. Možnosti zachycení taveniny	14
2.1 Zachycení taveniny v reaktorové nádobě (In-vessel).....	14
2.1.1 Formování bazénu taveniny	14
2.1.2 Tvorba bazénu taveniny na dně nádoby	15
2.1.3 Odvádění tepla z bazénu taveniny	17
2.1.4 Napadení dna reaktorové nádoby	18
2.2 Zachycení taveniny v šachtě reaktoru (Ex-vessel)	19
2.2.1 Vytvoření bazénu taveniny v šachtě reaktoru.....	19
2.2.2 Interakce mezi betonem a taveninou	20
2.2.3 Tepelné procesy.....	21
2.2.4 Zalévání taveniny vodou shora.....	22
2.2.5 Rozlití taveniny do EPR „lapače“ (EPR catcher).....	23
3. Citlivostní výpočet	25
3.1 Výpočet délky rozlivu taveniny.....	25
3.1.1 Vzorec korelace na délku rozlivu taveniny v 1-D	25
3.1.2 Výpočet délky rozlivu	26
3.2 Vliv hlavních veličin na délku rozlivu taveniny.....	27
3.2.1 Hlavní veličiny:	27
3.2.2 Úprava výše uvedené korelace jako funkce hlavních veličin:.....	27
3.2.3 Vypočtené hodnoty rozlivu v závislosti na hlavních veličinách	28
3.2.4 Graf závislosti:	28
Závěr.....	29
Použitá literatura.....	30

Použité zkratky

AZ – aktivní zóna

BWR – varný reaktor

INEEL – Idaho National Engineering and Environment Laboratory – USA

IRSN – L'Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire – Francie

JE – Jaderná elektrárna

KIT – Karlsruhe Institute of Technology – Německo dříve Forschungszentrum Karlsruhe – FZKA

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development

PWR – Tlakovodní reaktor

SNL – Sandia National Laboratories – USA

VVER – Vodo-vodní energetický reaktor

TMI-2 – Three Mile Island NPP

Seznam obrázků

1- JE Three Mile Island a řez reaktorovou nádobou po zachycení taveniny na dně [2].....	7
2- obrázek znázorňující přirozenou cirkulaci v bazénu taveniny [2]	15
3- Způsoby výtoku taveniny po porušení krusty [3].....	16
4-Rozčlenění proudu taveniny [3].....	17
5-Znázornění maximálního tepelného toku při zachycení taveniny uvnitř nádoby [2].....	18
6- Obrázek rozlivu taveniny po vypadnutí z reaktorové nádoby a možnosti jejího chlazení [5]	22
7- Schéma plochy pro rozliv taveniny a chladicích elementů [7]	24
8- Schéma 1-D rozlivu - D_0 = šířka rozlivu, L = délka rozlivu, r_0 = poloměr taveniny [4]	25

Jaderná bezpečnost – úvod

Jaderné elektrárny jsou jedním z nejčistších zdrojů získávání elektrické energie, ale část veřejnosti zaujímá proti získávání energie z jádra negativní postoj. Může za to riziko havárie, která u jaderných elektráren může potenciálně mít mnohem větší následky než havárie jakékoliv jiné elektrárny. K tomuto špatnému pohledu na jadernou energetiku v minulosti přispěly převážně havárie na druhém bloku JE Three Mile Island v USA, na čtvrtém bloku JE Černobyl v SSSR a na elektrárně Fukušima v Japonsku. U posledních dvou došlo k úniku radioaktivních látek do okolí. Proto je zapotřebí se u jaderných elektráren věnovat jejich bezpečnosti co nejvíce. Je nutné jakýmkoliv haváriím zabránit, a proto se i kromě poznatků z minulých havárií využívají různé simulace, které mají za úkol předpovídat chování roztavené aktivní zóny, pokud k němu dojde, a na základě jejich výsledků se provádějí bezpečnostní opatření.

Pokud však tyto opatření selžou a dojde k havárii, je nutné posoudit závažnost situace. K tomu slouží mezinárodní stupnice INES, která byla v březnu 1990 společně zavedena Mezinárodní agenturou pro jadernou energii (IAEA) a Agenturou pro jadernou energii Organizace pro ekonomickou spolupráci a rozvoj (OECD/NEA). Stupnice rozděluje události do sedmi stupňů: stupně 1-3 se označují jako nehody, stupně 4-7 se označují jako havárie. Stupeň 0 označuje odchylku od normální činnosti elektrárny.

Tato práce se bude zabývat těžkými haváriemi, u kterých dojde ke ztrátě chladiva a tavení aktivní zóny, což může vést k porušení tlakové nádoby reaktoru a k následnému úniku radioaktivního materiálu. (stupně 5- havárie s rizikem vně zařízení, 6- těžká havárie, 7- velmi těžká havárie) První část práce se bude zabývat definicí těžké havárie a jejím průběhem, ve druhé části budou popisovány principy možnosti zachycení taveniny uvnitř tlakové nádoby a vně tlakové nádoby v důsledku zmírnění následků. Třetí část práce bude zaměřena na korelační výpočet rozlivu taveniny po porušení nádoby reaktoru a následném „vypadnutí“ do šachty reaktoru.

1. Průběh těžké havárie

1.1 Definice těžké havárie

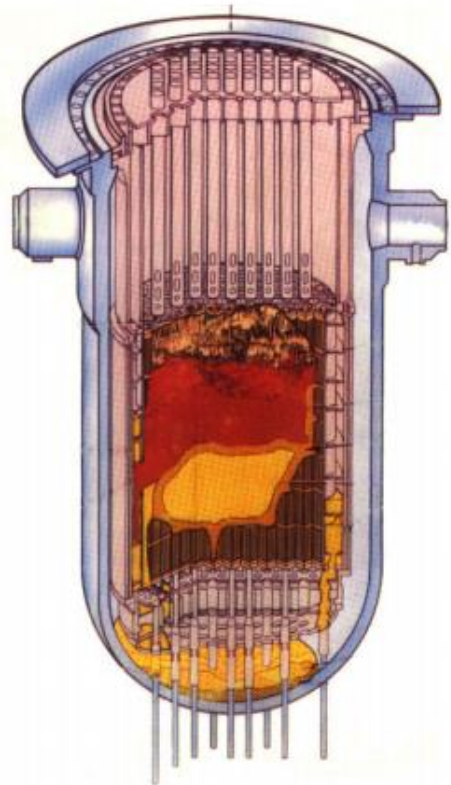
Pro definici těžké havárie je nejprve nutné definovat pojmy jako projektová havárie a nadprojektová havárie. Termín projektová havárie znamená havárii, která je uvažována v návrhu jaderného energetického zařízení. Jaderná elektrárna má proto pro tyto případy různé bezpečnostní systémy, které bývají zpravidla jištěny 3 na sobě nezávislými větvemi pro případ selhání některé z nich. Ze zkušenosti z předchozích havárií se tyto větve oddělují i konstrukčně, například bezpečnou vzdáleností mezi vodiči nebo instalací nehořlavých přepážek. Projektová havárie se může rozvinout v nadprojektovou až těžkou havárii po překročení určitých kritérií. Těmi nejdůležitějšími kritérii jsou:

- Teplota pokrytí paliva nesmí přesáhnout 1200 °C
- Nesmí naoxidovat více než 1 % z celkového obsahu pokrytí paliva (vyjádřeno množstvím generovaného vodíku)
- Nesmí dojít k lokálnímu naoxidování pokrytí více než 17 % jeho tloušťky [1]

Nadprojektová havárie nastává, když je překročeno některé z výše jmenovaných kritérií, ale bezpečnostní systémy jsou schopny vrátit celý blok do bezpečného kontrolovatelného stavu. Těžká havárie nastane, pokud bezpečnostní systémy selžou a blok se stává nekontrolovatelným. To vede k velkému poškození a natavení paliva, což může v nejhorším případě vyústit k poškození tlakové nádoby a kontejnmentu a následnému úniku radioaktivních látek do okolí.

V minulosti došlo ke třem těžkým haváriím na jaderných reaktorech. První v roce 1979 na druhém bloku JE Three Mile Island, kde sice došlo k úniku radioaktivních látek do okolí, ale velmi malému, druhá v roce 1986 na čtvrtém bloku černobylské JE a třetí na JE Fukušima v roce 2011. Havárie na Three Mile Island byla podnětem k dalšímu výzkumu možných následků těžkých havárií a k dalšímu přehodnocení bezpečnostních systémů, protože zde při havárii nastaly všechny jevy charakterizující těžkou havárii kromě protavení tlakové nádoby.

Tavenina byla zachycena na dně nádoby, kde byla uchlazena zbývající vodou, jednalo se o zachycení uvnitř nádoby tzv. „in-vessel“.



1- JE Three Mile Island a řez reaktorovou nádobou po zachycení taveniny na dně [2]

1.2 Jevy v reaktoru a primárním okruhu v průběhu těžké havárie

Počátek těžké havárie je stejný jako u projektové havárie, k následnému rozvinutí do těžké havárie je nutná nějaká rozvíjející událost, která má za následek přerušení odvodu tepla z aktivní zóny. To vede k přehřívání paliva a jeho následné degradaci.

Palivo začíná degradovat po ztrátě chladiva v aktivní zóně, zatímco klesá hladina chladiva v důsledku jeho vyvařování. Z počátku je palivo ochlazováno proudícími parami chladiva, jehož hladina neustále klesá, což vede k postupné převaze produkce tepla nad jeho odvodem. Následuje degradace paliva v důsledku jeho přehřátí.

Chronologicky seřazené procesy degradace aktivní zóny, které jsou ovšem ovlivněny podmínkami, za kterých k procesu dojde, provedenými bezpečnostními opatřeními a také typem reaktoru (PWR, BWR), jsou:

- Oxidace zirkoniového materiálu pokrytí paliva a současně produkce vodíku
- Ztráta integrity pokrytí v důsledku jeho vydouvání (balooning) a lokální perforace v oblasti distančních mřížek v důsledku tvorby eutektických slitin vedoucí k uvolnění štěpných produktů (plynné a vysoce těkavé) z mezery mezi tabletou a povlakem do primárního okruhu
- Poškození řídicích tyčí vedoucí k první relokaci roztaveného materiálu do nižších a chladnějších částí aktivní zóny
- Tavení zirkoniových materiálů pokrytí a jejich následná relokace do nižších částí aktivní zóny
- Uvolňování plynných a těkavých štěpných produktů do primárního okruhu (xenon, jód, cesium)
- Degradace a uvolňování keramických materiálů paliva v horní části aktivní zóny, kde je vyšší teplota
- Uvolňování méně těkavých štěpných produktů do primárního okruhu (Sr, Ba, Ce, La, U)
- Utváření bazénu taveniny z keramických materiálů s vysokou teplotou v oblasti aktivní zóny, bazén je zadržován krustou taveniny
- Postupné přemísťování bazénu taveniny směrem dolů a po porušení integrity krusty výtok taveniny do nižších částí reaktorové nádoby
- Interakce taveniny se zbývajícím chladivem na dně reaktorové nádoby
- Tvorba bazénu taveniny na spodním dně reaktorové nádoby
- Interakce taveniny se stěnou dna reaktorové nádoby a jeho následné poškození [1]

Celý proces poškození bývá někdy (zpravidla v reportech OECD) rozdělen do dvou fází: časné a pozdní.

Časná fáze je souhrn událostí od počátku oxidace zirkoniového pokrytí až po roztavení kovových materiálů. Na základě různých experimentů (PBF-SFD (INEEL, USA), ACRR DF a ST (SNL, USA), PHEBUS-SFD (IPSN, Francie) a CORA (KIT, Německo)) se podařilo popsat chování aktivní zóny během časné fáze. Nejprve se začne přehřívat palivo po odkrytí horní části aktivní zóny a po překročení teploty okolo 1000 K začíná paro-zirkoniová oxidační reakce. Současně je produkován vodík. Protože je oxidační reakce zirkonia vysoce exotermická, produkuje se velké množství tepla, což působí jako kladná zpětná vazba a dochází k dalšímu zvyšování intenzity oxidace. V rozmezí teplot mezi 1500 K a 1700

K tepelný výkon produkovaný oxidační reakcí odpovídá zbytkovému tepelnému výkonu, což má za následek prudký nárůst rychlosti procesu nahřívání (z 1 K/s na 10-20 K/s).

V této fázi také dochází k počátku poškození komponent: řídicích tyčí a inconelových distančních mřížek. Při teplotě okolo 1500 K dochází také v případě řídicích tyčí tlakovodních reaktorů k uvolňování slitiny Ag-In-Cd v důsledku penetrace ocelových povlakových materiálů, která je následkem eutektické reakce se zirkonem obsaženým ve vodících trubkách. V případě, že by nedošlo ke kontaktu se zirkonem, nastalo by uvolnění taveniny až při 1700 K (teplota tavení oceli). V případě varných reaktorů je kritická teplota také 1500 K, dochází zde ovšem k jiné eutektické reakci mezi karbidem boru a ocelí. V obou případech se však řídicí komponenty taví jako první.

Jako další ztrácí svoji integritu pokrytí paliva. K jeho poškození dochází v místech inconelových mřížek v důsledku tvorby eutektické směsi. Tuto interakci může utlmit přítomnost oxidické vrstvy na pokrytí paliva, což znemožňuje přesně odhadnout teplotu poškození pokrytí, lze ale předpokládat, že k prvnímu poškození dochází okolo 1200 K, po kterém následuje únik radioaktivních látek (plynné a těkavé štěpné produkty), které se nacházejí mezi pokrytím a palivovou tabletou. Okolo 2000 K dochází vlivem postupující oxidické reakce ke zvyšování tloušťky oxidické vrstvy, která zadržuje roztavený kovový materiál. V těchto teplotách rychlý proces oxidace spotřebovává téměř všechnu páru v aktivní zóně a produkuje velké množství vodíku. Tento jev je rozhodující pro další teplotní vývoj, neboť zvyšuje teplotní maximum paliva. Po proniknutí taveniny skrz oxidickou vrstvu dochází k jeho stékání do nižších a chladnějších částí reaktoru a jeho následnému tuhnutí, což způsobuje blokování průtočné plochy. Tímto dochází k částečné separaci kovových a keramických materiálů. Ovšem část kovových materiálů stále zůstává v horní části aktivní zóny jako součást eutektických směsí a část keramických a oxidických materiálů stéká spolu s kovovými materiály do nižších vrstev aktivní zóny.

Pozdní fáze je souhrn událostí od částečné separace kovových a keramických materiálů až k případné interakci bazénu taveniny se spodním dnem reaktorové nádoby a jeho případnému poškození. Na začátku pozdní fáze se dostávají roztavené kovové materiály do nižších vrstev, kde začínají zamrzat. V horní části aktivní zóny začínají palivové proutky ztrácet proutkovou geometrii a padat do lože trosek. Následným tavením lože trosek, které obsahuje keramické materiály, se vytváří krusta, která je po určitý čas schopna zadržet bazén taveniny. Experimenty „molten pool“ provedené v SNL v USA ukázaly, že:

- Pozdní fáze je charakterizována postupným posouváním okrajové krusty radiálně a směrem dolů
- Okrajová krusta je složena z materiálů, které postupující bazén taveniny pohlcuje cestou a které zůstávají na okraji bazénu. Jedná se o zatuhlé části taveniny a neroztavené keramické materiály (palivo)
- K úniku taveniny z bazénu dojde, pokud hranice-krusta se dostane do oblasti, kde již není žádná struktura, která je schopna absorbovat tak velké množství energie, což vede k zatuhnutí taveniny

Jedním z hlavních efektů pozdní fáze je tvorba eutektické slitiny mezi uranem a zbytky zoxidovaného pokrytí, která způsobuje kapalnění paliva již při 2800 K a nikoliv při 3100 K (čistý UO₂).

Předpokladem pro takovéto chování bazénu taveniny v tlakovodním reaktoru, je podmínka, že tavenina stéká do zbytkové vody na dně reaktoru, kde je dále chlazena (mokrá zóna – „wet core“). V případě varného reaktoru se všechna voda vyvaří a jedná se o tzv. podmínku suché aktivní zóny- „dry core“. Výsledky experimentů ukázaly, že stékání taveniny kovového materiálu lze aplikovat také na roztavené keramické materiály. Stékání je však ovlivněno různými podmínkami uvnitř aktivní zóny, jako je například konfigurace opěrných struktur aktivní zóny po odečtení znovuroztaveného kovového materiálu. Pokud jsou tyto struktury ve spodní části aktivní zóny velmi poškozeny a zbývající části struktur jsou nahřáté, není zde možnost, že by se utvořil bazén taveniny paliva, ale materiál může propadávat rovnou do spodní části reaktoru až na spodní dno přes tyto vzniklá místa poškození.

Z tohoto jevu se dají odvodit dva možné způsoby relokace taveniny: souvislý a postupný. Souvislý způsob relokace je tvořen jedním masivním proudem taveniny, který vzniká po průniku bazénu taveniny do zbytkové vody na dně reaktoru, nebo při porušení krusty na okraji bazénu a následném úniku taveniny. Je typický pro mokrou aktivní zónu („wet core“). Postupný způsob relokace taveniny je charakterizován rozdělením proudu na několik menších proudů vlivem různých překážek v aktivní zóně (trosky, částečně zatuhlá tavenina, různé vestavby, které mají za úkol rozdělit proud). Je charakteristický pro suchou aktivní zónu („dry core“).

1.2.1 Vliv tepelného výkonu

Celkový tepelný výkon je určen teplem generovaným štěpením paliva a následným rozpadem štěpných produktů. Celý tento tepelný výkon musí být odveden do chladiva, jinak dojde k přehřátí paliva a možné havárii. Tepelný výkon je ovlivněn několika faktory, jako čas od odstavení reaktoru a míra vyhoření paliva a možnost vzniku rekritičnosti. Pokud nastane rekritičnost, je dominantním prvkem celého tepelného výkonu pouze teplo ze štěpné reakce. Rekritičnost může nastat vlivem poklesu koncentrace kyseliny borité nebo separací materiálů řídicích prvků a paliva.

1.2.2 Termohydraulika primárního a sekundárního okruhu

Podmínky v primárním okruhu jsou klíčové k přechodu od havarijní situace k těžké havárii, protože rozhodují o přenosu tepla z aktivní zóny. Jedná se hlavně o tlak v primárním okruhu, hladinu chladiva v aktivní zóně, geometrii a chemické složení plynů v primárním okruhu.

Tlak v primárním okruhu má vliv na chování paliva. Pokud je tlak vysoký, proudění páry v aktivní zóně je pomalejší a je umožněna větší absorpce sálaného tepla z paliva. Pokud je tlak páry nízký, proudění je rychlejší a absorpce sálaného tepla není tak vysoká. Snížený tlak také umožnění napuchnutí pokrytí paliva – „balooning“.

Hladina chladiva v aktivní zóně je ovlivněna podmínkami jak v primárním, tak v sekundárním okruhu. Pokles hladiny může být buď rychlý, což se stane při odstavení hlavních čerpadel, přičemž primární okruh je již z velké části naplněn párou, nebo může být pomalý, pokud je tlak v primárním okruhu stabilizovaný a dochází k postupnému vyvařování zbytku chladiva. To vede k vytvoření gradientu teploty po výšce.

Plynná atmosféra v primárním okruhu a zejména její složení může několika způsoby ovlivnit chování aktivní zóny. Jedná se hlavně o rozpouštění plynů v kovové matici pokrytí. Např. absorpce vodíku zircaloyovým pokrytím vede ke křehnutí materiálu. Další způsob ovlivnění aktivní zóny může být chemická reakce mezi některých plynů s materiálem pokrytí. To může nastat například při porušení primárního okruhu a nasátím okolní atmosféry.

1.2.3 Počáteční fáze poškození paliva

Přenos tepla lze rozdělit do 3 základních fází: var chladiva, suchá aktivní zóna a zaplavení aktivní zóny. Události, kterými palivo prochází, lze popsat jako: kontakt materiálů pokrytí s palivem, vydouvání, koroze povlaku, křehnutí, vliv ozáření, rozpouštění nepalivových materiálů, rozpouštění paliva a poškození oxidické skořepiny.

K významnému urychlení zahřívání pokrytí paliva přispívá odhalení části aktivní zóny a další pokles hladiny v důsledku vyvařování zbytku chladiva, protože přestup tepla do páry je mnohem nižší, než přestup tepla do vody. Pokud hladina chladiva klesne pod úroveň spodní opěrné desky aktivní zóny, tvoří se blokáže ve spodní části nastává situace „steam starvation“. To znamená, že v zóně je stále oxidovatelný materiál, ale není zde již žádná pára, protože byla oxidací spotřebována a nová v důsledku blokáží nepřitéká.

Pokud je do zóny dále dopravována voda, zvyšuje se schopnost absorpce sálaného tepla a zároveň dochází k produkci další páry, což vede k urychlení oxidace pokrytí paliva a k nárůstu produkce vodíku. Vysoká produkce vodíku je důsledkem praskání oxidických vrstev vlivem tepleného pnutí při postupu zaplavovací fronty a průniku páry k nezoxidovanému materiálu.

Prvním příznakem mechanické degradace paliva je kontakt mezi tabletou a pokrytím, způsobený předchozím zahříváním paliva a následným tepelným roztažením tablet (tepelná roztažnost materiálu tablety je mnohonásobně vyšší než roztažnost materiálu pokrytí). V místě kontaktu tablety a pokrytí (při teplotě okolo 1400 K) je při interakci UO_2 a Zr uvolňován kapalný uran. [1]

Dalším příznakem je vydutí pokrytí, které nastává při velkém rozdílu tlaků uvnitř a vně pokrytí. Vydutí může způsobit blokáži průtoku paliva nebo atmosféry. Vydutí vlivem zvyšování teploty vede až k jeho roztržení. Celý proces vydutí přestává být významným již při 1300 K, kdy převládá proces tvorby vrstvy oxidických materiálů a formování trhlin.

Oxidace zirkoniových materiálů pokrytí a jejich interakce s materiálem paliva vede k tvorbě keramických sloučenin s nízkou tažností a odolností proti teplotním rázům. Při náhlém tepelném skoku proto dochází k jejich odlupování a formování trosk.

V případě počátku rozpouštění paliva roztaveným materiálem pokrytí se z paliva začínají uvolňovat štěpné produkty.

Teplota tavení paliva může být velmi snížena (až o 1000 K) reakcí mezi UO_2 a roztaveným zirkonem. Což dále usnadňuje relokaci paliva za nižších teplot. Pokud je zoxidovaná vrstva na pokrytí dostatečně silná, může zachytit roztavenou směs $\text{U}/\text{Zr}/\text{O}$ až do jejího vlastního porušení, po kterém následuje stékání roztaveného materiálu („candling“) po vnějšku palivové tyče až do chladnějších částí aktivní zóny, kde dochází k jeho zatuhnutí a formování blokáží. Směs $\text{U}/\text{Zr}/\text{O}$ zamrzá o něco dříve než kovové materiály, proto se v nižších vrstvách aktivní zóny tvoří blokace z kovových materiálů a ve vyšších vrstvách z eutektických materiálů. Relokace paliva vede k redistribuci tepelného výkonu.

1.2.4 Uvolňování štěpných produktů

Uvolňování je svázáno s celkovým chováním aktivní zóny a poskytuje zpětnou vazbu procesu rozvoje jejího poškození. Štěpné produkty jsou nositeli zbytkového výkonu v aktivní zóně. S rostoucím nahříváním dochází k jejich intenzivnějšímu úniku, což vede ke ztrátě tepelných zdrojů a následnému zpomalení rozvoje degradace aktivní zóny.

Uvolnění štěpných produktů ovlivňuje jejich počáteční inventář v palivu, který je přímo úměrný vyhoření a klesá s časem od odstavení. Isotopy vzniklé štěpením paliva se rozdělují do skupin prvků podle jejich chemického chování: vzácné plyny, vysoce těkavé, středně těkavé a málo těkavé prvky. Jejich rozložení v palivu v pevném stavu je ovlivněno výkonovou historií. Nalézají se ve struktuře zrn, mezi zrny a na jejich hranici. Štěpné plyny zvyšují tlak mezi palivem a pokrytím a přispívají ke ztrátě integrity pokrytí.

1.2.5 Vytváření bazénu taveniny

Relokaci tavenin kovových a keramických materiálů lze rozdělit na dva způsoby: radiální roztékání a axiální stékání.

Radiální roztékání je jev, který je řízen rozdílem tlaků nebo hydrostatickým tlakem. Je přenášeno malé množství materiálu, ale mohou být napadeny komponenty na okrajích aktivní zóny.

Axiální stékání je v největší míře zastoupeno tzv. „candlingem“, což je stékání malého množství materiálu po nějaké svislé struktuře, například palivové tyče. Tavenina, která takto

stéká následně v nižších vrstvách tuhne. Řídicími mechanismy stékání jsou: gravitace, povrchové napětí taveniny, tepelná vodivost a oxidace. Může také docházet k interakcím mezi taveninou a materiálem, po kterém tavenina stéká. Axiální transport taveniny může být zastaven buď zatuhnutím nebo naražením na překážku. (blokáž průtoku nebo konstrukční prvky ve spodní části reaktoru)

V důsledku tuhnutí kovových materiálů se utvářejí lokální blokáže, tzv. kelímky pro další taveninu. Rozlití taveniny také radiálně podpoří vytvoření krusty, která se dalším nahříváním znovu roztaví a proniká hlouběji do chladnějších vrstev, kde znovu vytvoří novou krustu a novou blokáž. Oxidace povrchu může vést k zhroucení palivových tyčí, které budou v nižších vrstvách formovat lože trosek, které může být znovu roztaveno v důsledku špatného odvodu tepla přes krustu na okraji a žádnému proudění chladícího média.

2. Možnosti zachycení taveniny

2.1 Zachycení taveniny v reaktorové nádobě (In-vessel)

K roztavení výše uvedeného lože trosek nedojde, pokud bude dostatečně ochlazováno proudícím chladivem a zároveň nedosáhne kritického tepelného toku a tok chladiva nebude omežován porozitou způsobenou blokážemi. Tento jev se nazývá „quench“ – hašení. V momentě kdy je produkované teplo větší než možný tepelný přenos chladiva, dochází k opětovnému zahřívání lože trosek, vyvaření vody a odhalení lože trosek. Poté znovu následuje další nahřívání lože trosek a tvorba bazénu taveniny. [1]

2.1.1 Formování bazénu taveniny

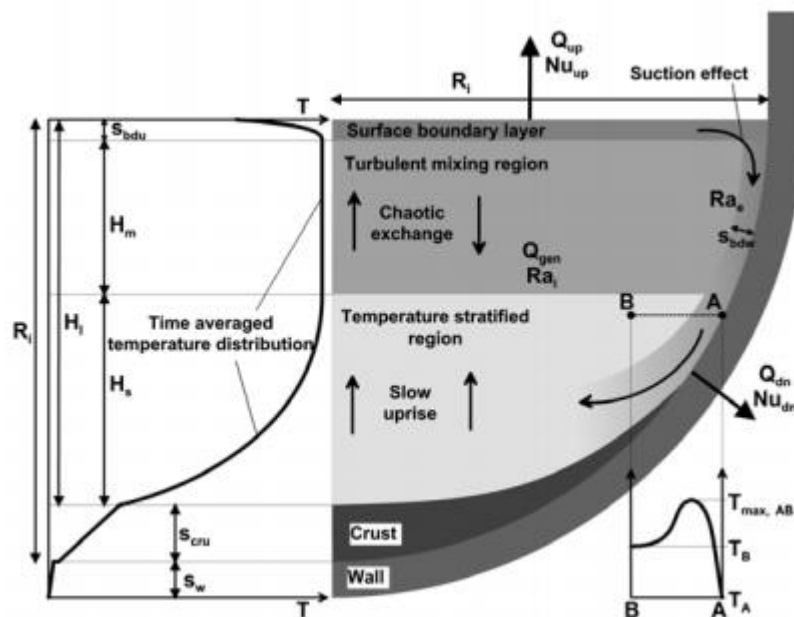
Je ovlivněno vnějším přenosem tepla, jsou známy tři stabilní konfigurace:

- Velmi vysoké teplotné toky nebo akumulace materiálu s nízkou teplotou tavení, přičemž je tavenina v přímém kontaktu s parou nebo vodíkem atmosféry. Je zde dominantní tepelný přenos sáláním.
- Teplota povrchu je pod teplotou likvida a zformuje se stabilní krusta na povrchu. V závislosti na teplotě je možný jedno nebo dvoufázový přenos tepla do okolních struktur. Přenos tepla sáláním je důležitý.

- Krusta je pokryta ložem trosek, které mohou být zaplaveny. Vnější přestup tepla je závislý na podmínkách v loži trosek. [1]

Pokud je bazén taveniny shora zaplaven vodou, dochází k blánovému varu s tvorbou krusty a jejím možným opětovným roztavením. Odvod tepla z bazénu taveniny přes horní a boční stěnu způsobuje přirozenou cirkulaci v bazénu taveniny. Teplo je odváděno z bazénu do krusty. Tento přenos je popsán korelacemi v závislosti na Rayleighově čísle (Ra), velikosti, tvaru, tepelných zdrojích a termodynamických vlastnostech taveniny. Pokud dojde k oddělení horní kovové vrstvy, bude tepelný tok soustředěn k tomuto zdroji.

Chování krusty: je závislé na vnitřních zdrojích tepla v bazénu taveniny, podmínkách přestupu tepla na obou stranách krusty, vedením tepla v krustě a teplotním poli vně krusty a bazénu taveniny. Teplený tok z taveniny je proměnlivý. Napětí v krustě závisí na tlakovém spádu, hydrostatickém tlaku v bazénu taveniny, teplotním napětí a na vnějších podporách krusty. K narušení krusty může dojít dvěma způsoby: Tvorbou lokálních poškození a rozšiřováním drobných prasklin nebo celková destrukce krusty a následný výtok taveniny.



2- obrázek znázorňující přirozenou cirkulaci v bazénu taveniny [2]

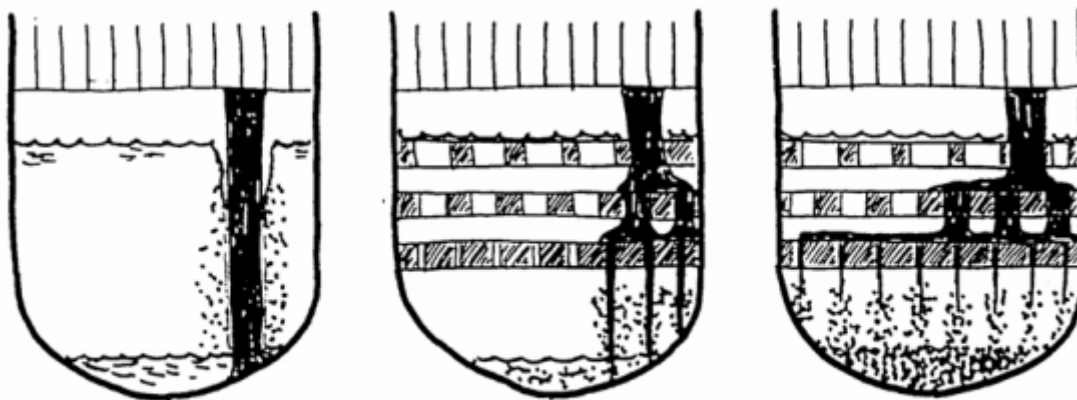
2.1.2 Tvorba bazénu taveniny na dně nádoby

Po destrukci krusty a je možný výtok taveniny několika způsoby. Předpokladem je, že tavenina vstupuje do vody, která zbyla na dně reaktoru. Rozdíl mezi jednotlivými způsoby pronikání taveniny na dno je dán rozdílnými konfiguracemi struktur ve spodní části reaktoru.

Pokud proud po výtoku není rozdělen, může na dně zformovat další bazén taveniny. Pokud je po výtoku proud rozdělen na několik menších pramenů, může zformovat částečně bazén taveniny a částečně lože trosk.

V případě jednoho silného proudu taveniny dojde k okamžitému formování bazénu taveniny na dně nádoby a zároveň dojde k utvoření krusty na horním i dolním okraji bazénu, který je nahoře ochlazován vytlačenou vodou, která se nacházela na dně reaktorové nádoby, a dole stěnou reaktoru, která měla teplotu zbývající vody. Tato zbytková voda, která byla vytlačena nad bazén s taveninou, se postupně vyvařuje, takže zůstane jen bazén taveniny s krustou.

- V případě rozčleněných pramenů, dochází převážně k tvorbě lože trosk, které je vyplněno parovodní směsí. Po vyvaření této směsi dochází k roztavení lože trosk a následnému zformování bazénu taveniny na dně nádoby.



Tvorba bazénu taveniny

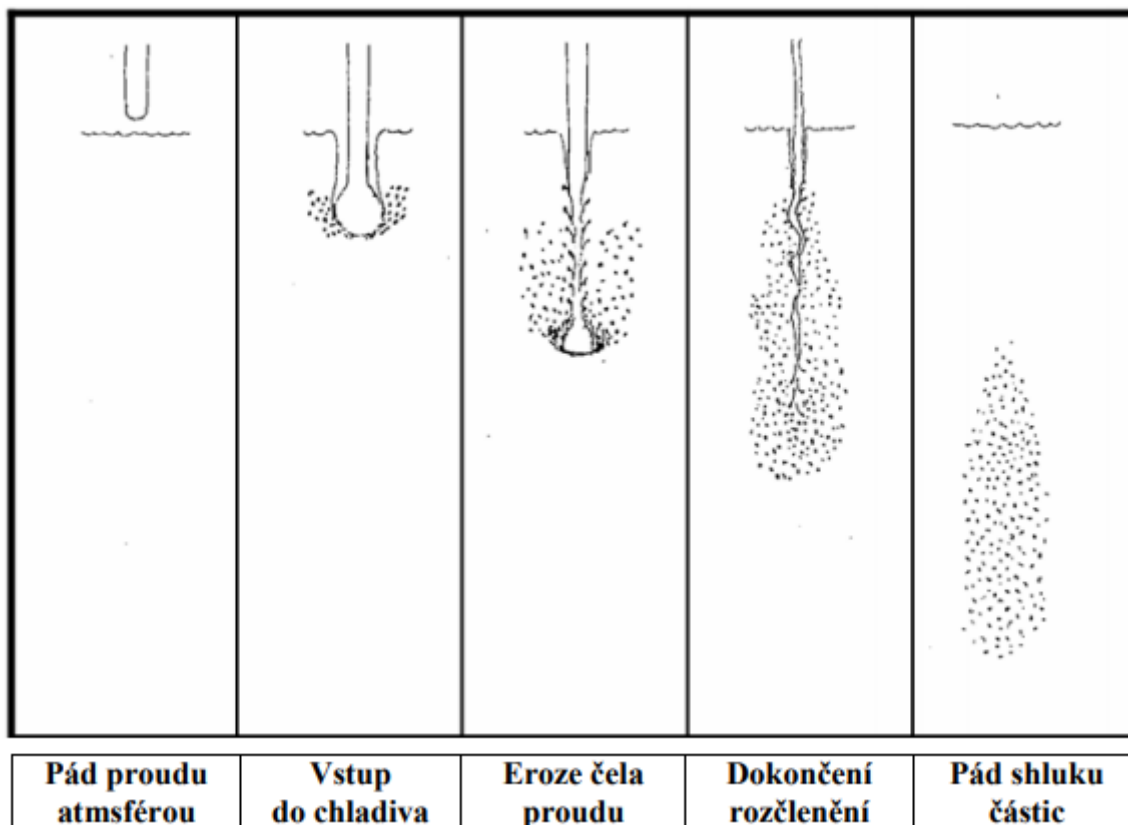
Tvorba částečně bazénu taveniny a lože trosk

Tvorba lože trosk

3- Způsoby výtoku taveniny po porušení krusty [3]

Pokud je výtok rozdělen na množství menších pramínek, dojde pouze k vytvoření shluku částic. K tomu dojde rozčleněním pramínku erozí na několik menších částí a následně tvorbě shluku částic, které dopadají na dno. Ve všech případech dochází k intenzivní tepelné výměně a zvýšené produkci vodíku, pokud byla v tavenině přítomna kovová fáze.

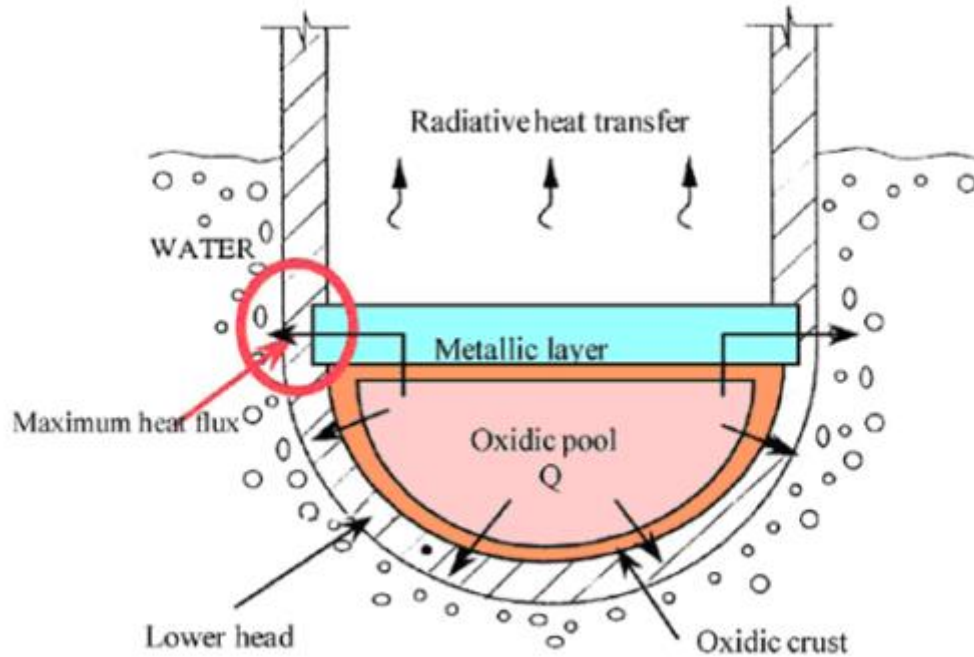
K následnému vytvoření bazénu taveniny na dně reaktorové nádoby může dojít následujícími dvěma způsoby:



4-Rozčlenění proudu taveniny [3]

2.1.3 Odvádění tepla z bazénu taveniny

Tepelný tok ovlivňuje vznik mezery mezi krustou na okraji bazénu taveniny a vlastní stěnou reaktorové nádoby. Mezera je daná jednak výskytem zbytkové vody, která se nacházela na dně reaktorové nádoby, a která se později přeměnila na páru, a jako následek tečení materiálu stěny reaktoru („creep“). Tato mezera funguje jako izolant a snižuje schopnost odvodu tepla z taveniny přes stěnu reaktoru. Zároveň však umožňuje odvod tepla v případě obnovení dodávky vody do reaktoru. Pokud tepelný výkon reaktoru nepřekračuje určitou úroveň, lze zbytkové teplo odvádět přes stěnu reaktoru do vody v případě zaplavení šachty reaktoru. To může být jeden ze způsobů, jak zastavit rozvoj těžké havárie. Dalším způsobem může být instalace různých struktur na dno nádoby, které mají za úkol zabránit zformování bazénu taveniny.



5-Znázornění maximálního tepelného toku při zachycení taveniny uvnitř nádoby [2]

2.1.4 Napadení dna reaktorové nádoby

Napadení nádoby lze rozdělit na dva způsoby: prvním způsobem je eroze materiálu způsobená přímo vytékající taveninou na dno nádoby, která není rozdělena na menší proudy při průniku zbývající vodou. Druhým způsobem je nahřívání dna reaktorové nádoby tepelným přenosem z taveniny nebo lože trosk a případné odtavování materiálu dna reaktorové nádoby. Může též dojít k specifickému narušení dna nádoby v důsledku jeho rozpouštění tvorbou eutektických slitin. Avšak předpokladem k tomuto narušení je separace kovových a oxidických slitin a porušení krusty, která v tomto případě dno reaktoru chrání.

Může dojít ke dvěma způsobům poškození dna:

Časné poškození – Může k němu dojít napadením dna proudem taveniny, které je nepravděpodobné díky různým bezpečnostním opatřením. Další možností je parní exploze v reaktorové nádobě.

Pozdní poškození – Dochází k němu vlivem postupného nahřívání dna nádoby s následným creepovým poškozením. Pozdní poškození může mít nízkotlaký nebo vysokotlaký charakter. Při nízkotlakém poškození je dominantní odtavení dna a k porušení dojde tepelným creepem ve zbývajícím neodtaveném materiálu stěny dna. Napětí ve stěně je

minimálně ovlivněno rozdílem tlaků vevnitř a vně reaktorové nádoby, naopak je velmi ovlivněno vahou bazénu taveniny a vahou vlastního dna. Následný otvor bývá mnohem větších rozměrů než otvor způsobený vysokotlakým poškozením. Existuje i možnost utržení celého dna.

Při vysokotlakém poškození je dominantním mechanismem tepelný creep, vyvolaný velkým rozdílem tlaků vevnitř a vně primárního okruhu. K pnutí také přispívá tíha bazénu taveniny a vlastní váha dna jako v případě nízkotlakého poškození, ale ne v tak velké míře. Následně vzniklý otvor bývá menších rozměrů než u nízkotlakého poškození.

Oba případy však vedou k vypadnutí taveniny do šachty reaktoru, kde utváří nový bazén taveniny. Jejím zachycením v šachtě reaktoru se zabývá následující kapitola.

2.2 Zachycení taveniny v šachtě reaktoru (Ex-vessel)

2.2.1 Vytvoření bazénu taveniny v šachtě reaktoru

Po selhání dna tlakové nádoby, popsáném v předchozí kapitole, se bazén taveniny přemístí do spodní části šachty reaktoru spolu s částí lože trosk. O způsobu přemístění na dno šachty rozhoduje tlak v primárním okruhu v momentu selhání dna. Pokud je tlak v reaktorové nádobě stejný jako tlak v kontejnmentu, dojde pouze k vypadnutí taveniny s troskami na dno šachty reaktoru. Pokud je v momentě selhání dna reaktorové nádoby v primárním okruhu přetlak, je jeho obsah vymrštěn ven, což může vést k přímému ohřevu kontejnmentu, jelikož je většina materiálu rozptýlena.

V obou případech dochází k nahřívání trosk a utváření bazénu taveniny na dně šachty reaktoru, v druhém případě je však kvůli rozptýlení materiálu do kontejnmentu bazén taveniny menší. Po vytvoření bazénu taveniny spolu s ložem trosk na dně šachty reaktoru dochází k interakci mezi taveninou a betonem. Následuje uvolňování vody z betonu (volné i chemicky vázané), která následně reaguje s nezoxidovaným zirkonem obsaženým v troskách. Teplem získaným z chemické reakce a rozpadovým teplem se roztaví původně pevné části trosk a dále se zvyšuje teplota taveniny.

2.2.2 Interakce mezi betonem a taveninou

Lze ji rozdělit na procesy rozkladu betonu a procesy probíhající v bazénu taveniny a popsat následujícími body.

Procesy rozkladu betonu:

- Přenos tepla z taveniny do betonu, tepelný tok je příčina rozpadu betonu
- Uvolňování a vypařování vody obsažené v betonu (volná voda)
- Uvolňování chemicky vázané vody
- Rozklad uhličitánů obsažených v betonu a následné uvolňování CO a CO₂
- Tavení zbylé kysličnickové matrice a tavení armovacího materiálu

Procesy v bazénu taveniny:

- Probublávání plynů a páry skrz bazén taveniny
- chemické reakce mezi plyny, parou a taveninou: oxidační reakce, redukční reakce, vznik vodíku
- vznik aerosolových částic na hladině bazénu taveniny
- vytváření a opětovné míšení vrstev o různé hustotě v bazénu taveniny, sdílení tepla a hmoty mezi nimi.
- Tepelné ztráty z hladiny bazénu roztaveného materiálu
- Výměna tepla mezi bazénem taveniny a případnou vrstvou vody pokrývající jeho hladinu
- Vytváření vytavené dutiny v betonu
- Únik zreagovaných a nezreagovaných plynů a aerosolů z bazénu do atmosféry v šachtě reaktoru
- Únik štěpných produktů z bazénu v plynném skupenství nebo jako usazeniny na aerosolových částicích.

Bazén taveniny může být utvořen následujícími pěti vrstvami:

- Vrstva čistých lehkých kysličníků, které mají menší hustotu než čisté kovy
- Smíšená fáze složená z kysličníků a kovů, lehčí než čisté kovy
- Kovová fáze
- Smíšená fáze složená z kysličníků a kovů, avšak těžší než čisté kovy
- Vrstva těžkých kysličníků, s hustotou větší než čisté kovy

2.2.3 Tepelné procesy

Během počáteční oxidace zirkonu v tavenině dochází k prudkému nárůstu teploty taveniny. Po odeznění této reakce nastává pozvolný pokles teploty taveniny a snižuje se rychlost rozkladu betonu. V důsledku pomalejšího rozkladu klesá objemová koncentrace plynů v tavenině, což má za následek snížení intenzity promíchávání taveniny a oddělení jednotlivých fází. Produkty vzniklé chemickou reakcí mezi betonem a taveninou přecházejí do taveniny a mění její vlastnosti, dochází k naředování smíšené fáze. Snižuje se hustota taveniny, narůstá objem a hmotnost. Během tohoto poklesu teploty taveniny se zvyšuje její viskozita a objevují se částičky ztuhlého materiálu. Po dosažení teploty solida tavenina postupně zatuhne. Tepelné procesy se dají popsat následujícími body:

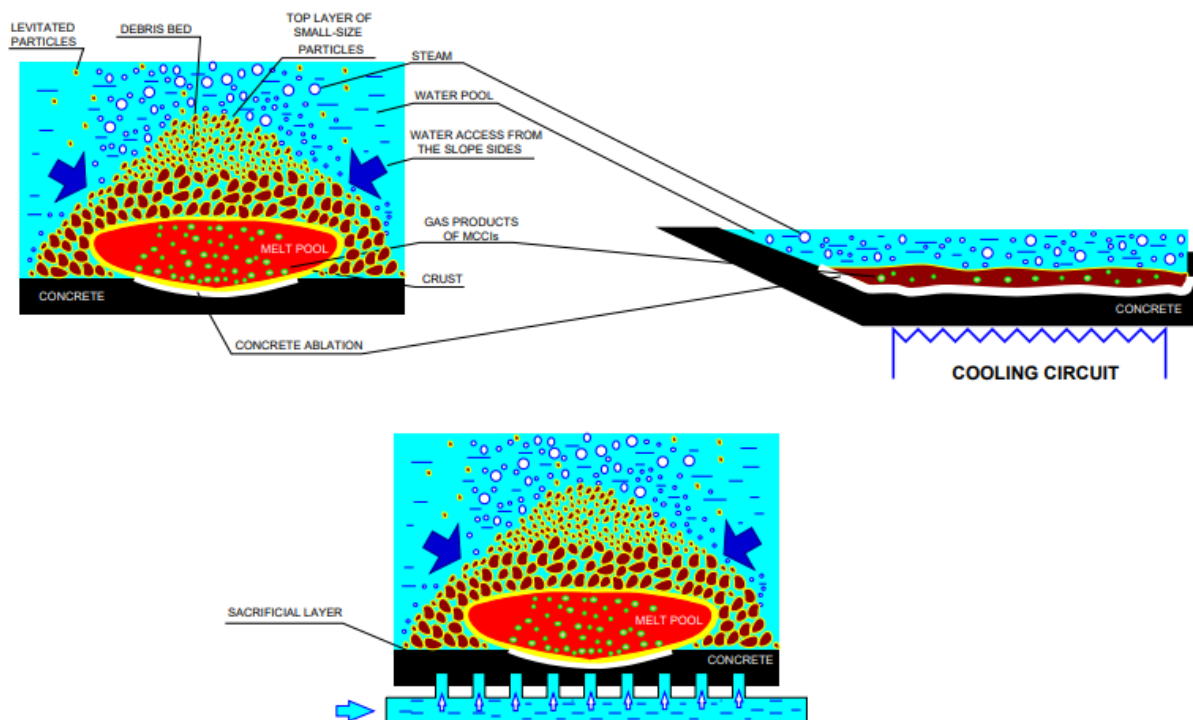
- Dodávání tepla rozpadem štěpných produktů v tavenině
- Dodávání nebo odebírání tepla vlivem chemických reakcí (záleží na charakteru chemických reakcí, zda jsou exotermické nebo endotermické)
- Předávání tepla do betonu
- Odebírání tepla přes hladinu bazénu taveniny

Teplo dodávané rozpadem štěpných produktů je charakterizováno výkonem reaktoru, délkou kampaně a aktuálním podílem štěpných produktů v tavenině. V závislosti na čase vykazuje exponenciální pokles.

Teplo dodávané/odebírané vlivem chemických reakcí zpočátku dosahuje vyšších hodnot než teplo uvolňované rozpadem štěpných produktů. Počáteční nárůst je dán zejména oxidací zirkonu. Po odeznění oxidace postupně klesá a může se dostat i do záporných hodnot díky endotermickým reakcím uvnitř taveniny.

Teplo předávané do betonu závisí na ploše kontaktu mezi bazénem taveniny a betonem a na součiniteli prostupu tepla na hranici taveniny s bazénem. V místě kontaktu může být plynová mezera nebo směs taveniny a roztaveného betonu.

Odvod tepla z taveniny přes hladinu může být uskutečněn buď sáláním nebo přirozenou konvekcí do atmosféry reaktorové šachty. Odvod tepla z taveniny lze zvýšit zaléváním vodou shora. Žádoucím jevem při havárii je zvýšení odvodu tepla přes hladinu, což má za následek snížení napadání betonu a jeho rozklad, a jedná se tak o jeden z účinných mechanismů zastavení rozvoje těžké havárie. Při ochlazování taveniny je důležitý var vody.



6- Obrázek rozlivu taveniny po vypadnutí z reaktorové nádoby a možnosti jejího chlazení [5]

2.2.4 Zalévání taveniny vodou shora

Při zalití povrchu taveniny vodou je hlavním principem přenosu tepla var. Je zde možnost všech režimů varu: blánového varu, bublinkového varu i přechodových režimů. Na základě výsledků výpočtu, který se zabýval možností chlazení bazénu taveniny zalévaného shora a možností tímto způsobem zastavit rozklad betonu, bylo zjištěno, že toto řešení je účinné pouze do určité kritické tloušťky bazénu taveniny, jelikož hlavním problémem je transport tepla směrem k teplosměnnému povrchu. Reálná tloušťka bazénu taveniny je však po vypadnutí do šachty reaktoru mnohonásobně vyšší.

Experimentálně se tímto problémem zabýval program MACE a později programy OECD-MCCI a OECD-MCCI2 (všechny v USA). Výsledky experimentů by se daly shrnout do následujících bodů:

- Zalití taveniny vodou snížilo teplotu taveniny o 300 K
- Tepelný tok je závislý na čase a je ovlivněn tvorbou krusty na hladině, která snižuje tepelný tok. (jeho hodnoty se pohybovaly od 3MW/m^2 na počátku až pod 100kW/m^2)

- Docházelo k dočasnému zvýšení tepelného toku v důsledku erupcí taveniny skrz krustu
- Došlo ke snížení rychlosti pronikání taveniny betonem (od 0,4m/hod pod 0,02m/hod)
- Krusta byla stabilní (zakotvena ve stěnách šachty reaktoru) a významně snižovala tepelný tok z taveniny
- Fyzikální vlastnosti taveniny se měnily vlivem absorpce produktů rozkladu betonu do taveniny. Klesly teploty likvida a solida, změnila se viskozita taveniny. (tavenina je ne-newtonská kapalina)

Nejdůležitějším výsledkem těchto v USA provedených experimentů bylo zjištění, že tímto způsobem se nedá zcela zastavit rozklad betonu. Avšak podařilo se celý proces rozkladu významně zpomalit.

Na stejné téma se zaměřovaly také série japonských experimentů COTELS, které byly prováděny ve výzkumném centru v Kazachstánu. Jejich výsledkem bylo zjištění, že tímto způsobem je možné zastavit rozklad betonu, jelikož při těchto experimentech nedošlo k zakotvení stěny na stěnách šachty reaktoru a bylo tak zajištěno dostatečné odvádění tepla z taveniny. [1],[2]

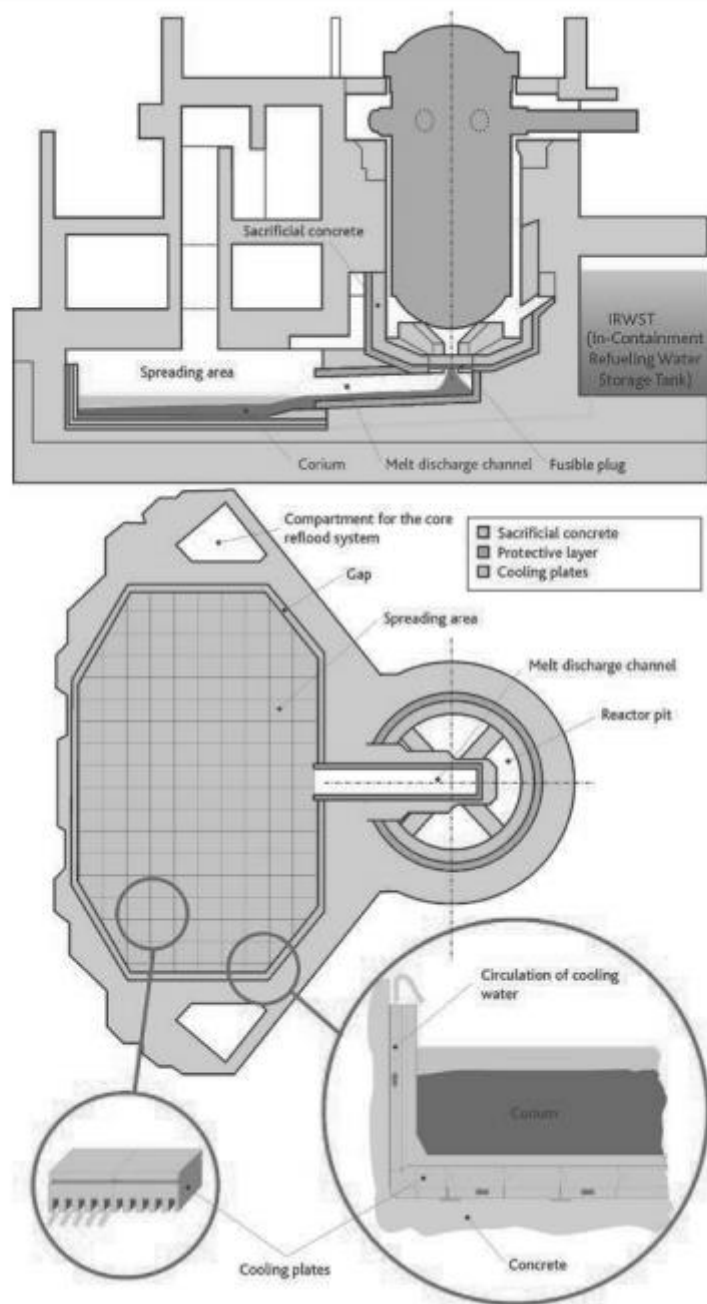
2.2.5 Rozlití taveniny do EPR „lapače“ (EPR catcher)

Další možností, jak zabránit úniku taveniny mimo kontejnment je nechat jí po vypadnutí z tlakové nádoby dotéct do speciálně upraveného prostoru v kontejnmentu, kde se nachází obětovaný materiál (beton) a kde je poté zaplavena vodou a chlazena speciálním potrubím v podlaze tohoto prostoru.

Aby bylo dosaženo transportu taveniny do „lapače“, je nutné, aby zůstala ve stavu likvida, čehož je dosaženo interakcí mezi obětovaným materiálem (betonem) a taveninou v šachtě reaktoru během jejího dočasného zachycení. Tato interakce snižuje viskozitu taveniny a ta zůstává ve stavu likvida. Poté tavenina odtéká spojovacím kanálem po nataveném betonu do prostoru, kde se může roztéct na velkou plochu.

Ve fázi, kdy se tavenina nachází ještě v šachtě reaktoru a probíhá interakce mezi betonem a taveninou, je nutné zachovat integritu betonových struktur šachty reaktoru. K tomu slouží tenká vrstva oxidu zirkonu, která je umístěná pod vrstvou obětovaného materiálu (betonu).

Záchytná plocha má obsah zhruba 170 m². Je tvořena různými elementy z litého železa a je protkána systémem chladících trubek. (viz Obr. 6 a Obr 7.) [7]



7- Schéma plochy pro rozliv taveniny a chladících elementů [7]

3. Citlivostní výpočet

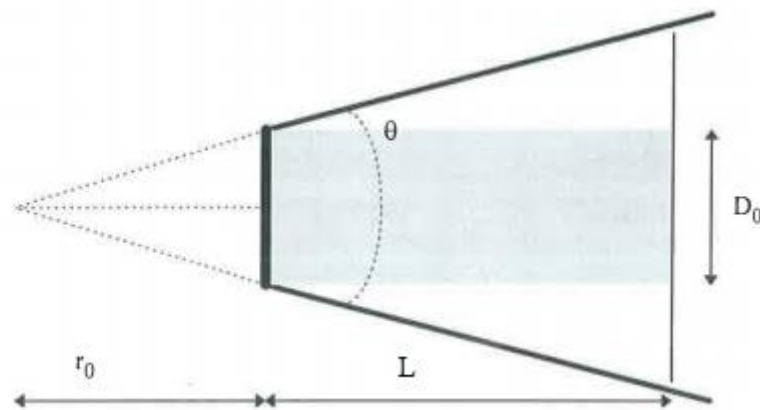
Závěrečnou částí této práce je citlivostní výpočet vlivu hlavních parametrů na délku rozlivu taveniny po vypadnutí z tlakové nádoby reaktoru.

3.1 Výpočet délky rozlivu taveniny

Předpokladem pro následující výpočet je fakt, že se jedná o porušení tlakové nádoby reaktoru VVER 1000 s následným vypadnutím taveniny do šachty reaktoru. Hlavním důvodem výpočtu délky rozlivu je otázka, zda tavenina vyplní prostor šachty reaktoru a spojovacích tunelů pod reaktorem.

3.1.1 Vzorec korelace na délku rozlivu taveniny v 1-D

$$L = \frac{V_{tot}^{1/4} \cdot G^{7/16} \cdot \left(\frac{g}{3 \cdot \nu}\right)^{1/16} \cdot \rho_m^{1/2} \cdot (H(T_m) - H(T_{solid}))^{1/2}}{[q_{rad} + q_{conv} - q_v \delta_{cap}]^{1/2} \cdot D}$$



8- Schéma 1-D rozlivu - D_0 = šířka rozlivu, L = délka rozlivu, r_0 = poloměr taveniny [4]

Význam veličin, uvedených ve vzorci:

- L = délka rozlivu taveniny [m]
 - V_{tot} = celkový objem taveniny [m^3]
 - G = objemová rychlost lití taveniny [m^3/s]
 - v = kinematická viskozita taveniny [m^2/s]
 - g = gravitační zrychlení [m/s^2]
 - ρ = hustota taveniny [kg/m^3]
 - H = měrná entalpie taveniny [J/kg]
 - T_m = teplota taveniny [K]
 - T_{solid} = teplota tuhnutí taveniny [K]
 - q_{rad} = radiační tepelný tok [W/m^2]
 - q_{conv} = konvektivní tepelný tok [W/m^2]
 - q_v = objemový vnitřní tepelný tok [W/m^2]
 - δ_{cap} = kapilární výška vrstvy taveniny [m]
 - D = šířka jednorozměrného rozlivu [m]
- [4],[6]

Hodnoty použité do vzorce:

V_{tot}	G	v	G	ρ	ΔH	q_{rad}	q_{conv}	q_v	δ_{cap}	D
20,72	0,04144	1,22E-4	9,81	7819	2,5E6	1,81E6	1,52E6	4,643E5	0,00617	5,08

Další hodnoty:

Teplota taveniny: $T_m \approx 2800$ K, Teplota solida: $T_{solid} \approx 1750$ K [4],[6]

3.1.2 Výpočet délky rozlivu

$$L = \frac{V_{tot}^{1/4} \cdot G^{7/16} \cdot \left(\frac{g}{3 \cdot v}\right)^{1/16} \cdot \rho_m^{1/2} \cdot (H(T_m) - H(T_{solid}))^{1/2}}{[q_{rad} + q_{conv} - q_v \delta_{cap}]^{1/2} \cdot D}$$

$$= \frac{20,72^{1/4} \cdot 0,04144^{7/16} \cdot \left(\frac{9,81}{3 \cdot 1,22E-4}\right)^{1/16} \cdot 7819^{1/2} \cdot (2,5E6)^{1/2}}{[1,81E6 + 1,52E6 - 4,643E5 \cdot 0,00617]^{1/2} \cdot 5,08}$$

$$= \mathbf{15,109\ m}$$

Ze vstupních veličin do vzorce lze relativně přesně určit šířku rozlivu D , která se dá spočítat z rozměrů prostoru pod tlakovou nádobou reaktoru. Hustota a tepelné toky se dají určit pomocí programu pracující na bázi numerické integrace.

Naopak hodnota G – objemová rychlost lití taveniny je zatížena velkou nepřesností a lze ji pouze odhadnout. To samé platí i pro rozdíl měrných entalpií taveniny ΔH . Jen těžko se dá odhadnout teplota solida taveniny, proto je velmi těžké určit celkový rozdíl entalpií. Tudiž

je nutné provést následující citlivostní výpočet závislosti délky rozlivu na těchto dvou veličinách.

3.2 Vliv hlavních veličin na délku rozlivu taveniny

3.2.1 Hlavní veličiny:

G – Objemová rychlost lití taveniny – je závislá na celkové době výtoku taveniny z nádoby reaktoru a na celkovém objemu taveniny

ΔH – Rozdíl entalpií – Je vypočítán z rozdílu teploty taveniny a teploty solida (odhadnuté), je definován jako

$$\Delta H = c_p \cdot \Delta T = c_p \cdot (T_m - T_{solid}) \rightarrow \Delta H = f(T_{solid})$$

$$c_p = \frac{\Delta H}{T_m - T_{solid}} = \frac{2,5E6}{2800 - 1750} \doteq 2381 \text{ [J/kg} \cdot \text{K]}$$

$$\Delta H = 2381 \cdot (2800 - T_{solid}) \text{ [J/kg]}$$

3.2.2 Úprava výše uvedené korelace jako funkce hlavních veličin:

$$L = \frac{V_{tot}^{1/4} \cdot G^{7/16} \cdot \left(\frac{g}{3 \cdot v}\right)^{1/16} \cdot \rho_m^{1/2} \cdot (H(T_m) - H(T_{solid}))^{1/2}}{[q_{rad} + q_{conv} - q_v \delta_{cap}]^{1/2} \cdot D}$$

$$L = \frac{20,72^{1/4} \cdot G^{7/16} \cdot \left(\frac{9,81}{3 \cdot 1,22E-4}\right)^{1/16} \cdot 7819^{1/2} \cdot (\Delta H)^{1/2}}{[1,81E6 + 1,52E6 - 4,643E5 \cdot 0,00617]^{1/2} \cdot 5,08}$$

$$L \doteq 0,038507 \cdot G^{7/16} \cdot (\Delta H)^{1/2}$$

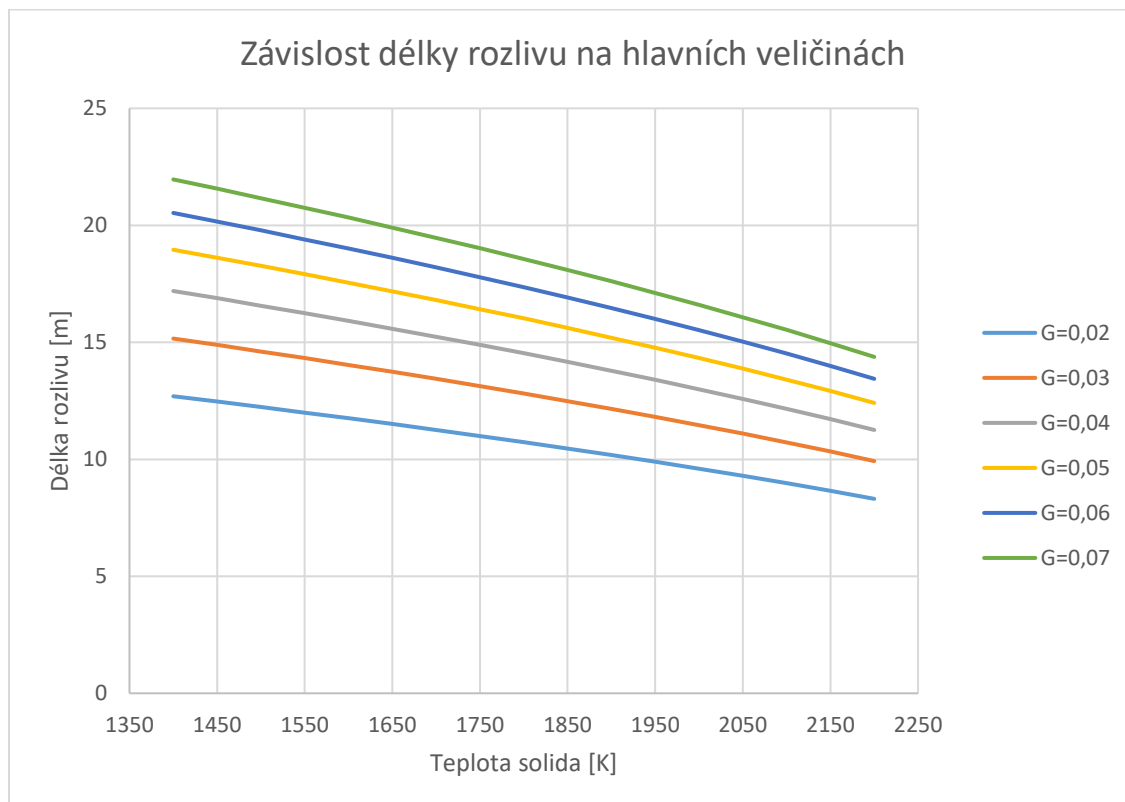
Pro následující citlivostní výpočet budou použity hodnoty: G 0,02 – 0,07 [m³/s] a $\Delta H = f(T_{solid})$; $T_{solid} \in < 1400; 2200 > \text{ [K]}$

3.2.3 Vypočtené hodnoty rozlivu v závislosti na hlavních veličinách:

Délka rozlivu [m]

T _{sold} [K]	G→/ ΔH↓	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
1400	3333400	12,6965002	15,16086	17,19431	18,9575748	20,53168	21,96412
1450	3214350	12,4677157	14,88767	16,88447	18,6159689	20,16171	21,56834
1500	3095300	12,2346537	14,60937	16,56885	18,2679761	19,78483	21,16515
1550	2976250	11,997065	14,32567	16,24709	17,9132244	19,40062	20,75414
1600	2857200	11,7546751	14,03623	15,91883	17,5513038	19,00865	20,33482
1650	2738150	11,5071805	13,7407	15,58366	17,1817612	18,60842	19,90667
1700	2619100	11,2542446	13,43867	15,24112	16,804094	18,19939	19,46911
1750	2500050	10,9954917	13,12969	14,89071	16,4177413	17,78096	19,02149
1800	2381000	10,7305012	12,81327	14,53184	16,022075	17,35244	18,56307
1850	2261950	10,4587988	12,48883	14,16389	15,616387	16,91307	18,09304
1900	2142900	10,1798472	12,15573	13,78611	15,1998749	16,46197	17,61047
1950	2023850	9,89303325	11,81325	13,3977	14,7716232	15,99816	17,1143
2000	1904800	9,59765201	11,46054	12,99767	14,3305795	15,52049	16,60331
2050	1785750	9,2928866	11,09662	12,58494	13,8755239	15,02765	16,07609
2100	1666700	8,97778138	10,72035	12,15821	13,4050297	14,51809	15,53098
2150	1547650	8,65120661	10,33039	11,71594	12,9174098	13,98998	14,96602
2200	1428600	8,31181046	9,925115	11,25632	12,4106459	13,44114	14,37889

3.2.4 Graf závislosti:



Délka rozlivu se může nacházet v závislosti na dvou hlavních veličinách v extrémních případech v rozmezí od 8 do 22 metrů.

Závěr

V České republice (a v některých evropských zemích) má energie vyrobená v jaderných elektrárnách velké procentuální zastoupení. Díky stále větší energetické náročnosti bude v budoucnu této energie zapotřebí mnohem více, a to vede ke snaze předvídat katastrofické scénáře jaderných havárií a zmírnit tak případné následky selhání a zabránit úniku radioaktivního materiálu do okolí JE.

Tato práce se zabývala problematikou těžkých havárií jaderných reaktorů a zmírněním jejich následků. Takových havárií se v minulosti nestalo mnoho (ty nejtěžší pouze dvě: JE Černobyl a JE Fukušima), ale jejich následky měly velký dopad. V první části se práce zabývala rozvojem těžké havárie a popisovala jevy, které se v reaktoru odehrávají od přerušení dodávky elektřiny a ztráty chladiva z aktivní zóny, přes tavení aktivní zóny až po vznik bazénu taveniny a lože trosk na dně reaktorové nádoby.

Druhá část popisovala chování taveniny před a po dosažení dna reaktorové nádoby. První polovina druhé části se zabývala možností zachycení taveniny uvnitř nádoby (In-vessel) pomocí obnovení dodávky vody do reaktoru a zalévání taveniny uvnitř nádoby a zaplavení šachty reaktoru vodou, přičemž dochází k odvodu tepla z taveniny přes boční a spodní stěnu reaktorové nádoby. Druhá polovina druhé části řešila chování taveniny po selhání dna reaktorové nádoby a jejím následném vypadnutí do šachty reaktoru. Dále se zabývala interakcí mezi taveninou a materiálem šachty reaktoru a možností zastavení jejího šíření pomocí zalévání vodou nebo odvodem do speciálních částí kontejnmentu.

Třetí část byla zaměřena na citlivostní výpočet vlivu hlavních veličin určujících délku rozlivu taveniny po vypadnutí z porušené reaktorové nádoby na betonovou podlahu kontejnmentu. Určení této délky je podstatné z hlediska dimenzování záchytných prostorů pod reaktorem. Výsledek výpočtu ověřil předpoklad, že se s rostoucí objemovou rychlostí lítí taveniny prodlužuje délka rozlivu. Ta je také přímo úměrná rozdílu měrných entalpií taveniny.

Použitá literatura

- [1] DUSPIVA, J. *Metodika: Těžké havárie*, ÚJV Řež, 2012
- [2] SARNET Textbook, draft 2011
- [3] FLETCHER D. F., TURLAND B.D. and LAWRENCE S.P.A.: *A Review of Hydrogen Production During Melt/Water Interaction in LWRs, Nuclear Safety Vol. 33-4*, OCT-DEC 1992.
- [4] JOURNEAU C., CRANGA M., *Analysis of Stockholm Royal Institute Of Technology spreading length approximate calculation method – Application to CSC project tests and CORINE experiment*, 5. 12. 2006
- [5] KONOVALIKHIN M.J., *Investigations on melt spreading and coolability in a LWR severe accident*, ISRN KTH/NPS/CSC-0011-SE, November 2011

Internetové články

- [6] PENTTILÄ K., *Molten corium and concrete thermodynamics and viscosity*, RESEARCH REPORT VTT-R-01441-12, <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/maat/2012/VTT-R-01441-12.pdf>
- [7] Nuclear Power Reactor Core Melt Accidents, http://www.irsn.fr/EN/Research/publications-documentation/Scientific-books/Documents/1_LAGEN_chapitre%205.4.pdf