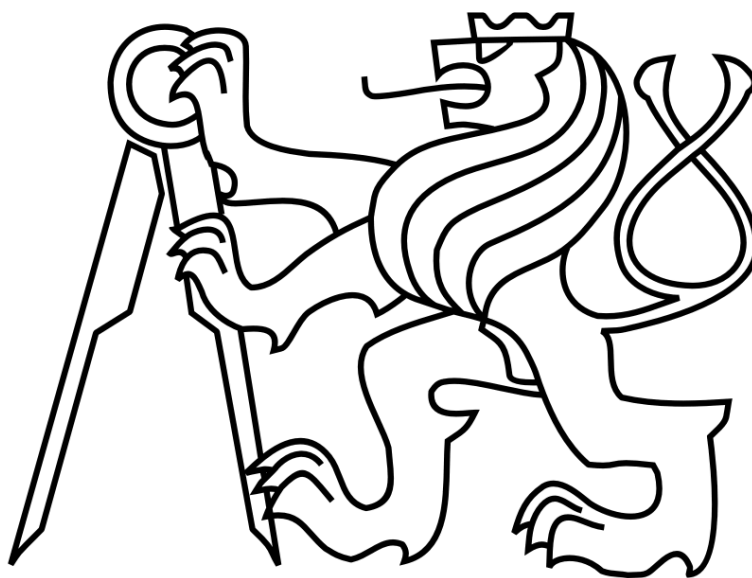


133YBEX

Betonové kontejnmenty jaderných elektráren

Jan Vesecký, Jakub Hobza, Lukáš Nálepa

16. 12. 2017



Obsah

1	Úvod	2
2	Dělení kontejnmentů.....	2
2.1	Dělení kontejnmentů dle konstrukce	2
2.1.1	Jednovrstvé.....	2
2.1.2	Dvouvrstvé.....	2
2.2	Dělení kontejnmentu dle tvaru	2
2.2.1	Kulové	2
2.2.2	Válcové	3
2.3	Dělení kontejnmentů podle systému potlačení tlakové vlny během havárie LOCA.	3
2.3.1	Plnotlaké.....	3
2.3.2	Subatmosferické.....	3
2.3.3	S potlačením tlaku.....	3
3	Příklady kontejnmentů	3
3.1	Jaderná elektrárna Temelín.....	3
3.2	Jaderná elektrárna Baharak v Abu Dhabi	4
3.3	Jaderná elektrárna Maanshan v Taiwan.....	4
4	Testy kontejnmentů	4
4.1	Přetlak.....	5
4.2	Zemětřesení.....	5
4.3	Terorismus.....	5
4.4	Reálná havárie jako podklad pro vylepšení.....	6
5	Vnitřní a vnější události	6
6	Návrh kontejnmentu	7
6.1	Zatěžovací stavy.....	7
6.2	Kombinace zatěžovacích stavů.....	7
7	Přibližný návrh předpětí na vnitřní přetlak při LOCA.....	8
8	Zdroje.....	11

1 Úvod

Kontejnment je ochranná obálka jaderného reaktoru v jaderné elektrárně. Spojuje se zde funkce hermetického prostoru pro ochranu před únikem nebezpečných látek do vnějšího prostředí a mechanické ochrany reaktoru před vnějšími vlivy způsobené přírodou nebo člověkem. Zároveň působí jako radiační stínění při běžném provozu i při nehodě. Konstrukce kontejnmentu tedy přispívá k ochraně personálu elektrárny a veřejnosti před nepřiměřenými účinky radiace z radioaktivních látek, které se vyskytují uvnitř kontejnmentu a jeho systémů. [1], [2], [3]

Kontejnment je obvykle jednovrstvá nebo dvouvrstvá konstrukce z předpjatého nebo vyztuženého betonu, případně z oceli. Jeho geometrie je většinou ve tvaru kulovité nebo válcovité nádoby dole připojené k základové desce a nahoře zakončené kulovitou či elipsoidickou kopulí. [1]

2 Dělení kontejnmentů

Podle materiálu můžeme rozdělit kontejnmenty na betonové, ocelové a betonové s ocelovou vystýlkou. V následujícím textu se zaměříme převážně na betonové kontejnmenty a betonové kontejnmenty s ocelovou vystýlkou. [1], [2], [3]

2.1 Dělení kontejnmentů dle konstrukce

Kontejnmenty můžeme rozdělit dle konstrukce na jednovrstvé s hermetickou výstelkou a na dvouvrstvé.

2.1.1 Jednovrstvé

Kontejnment se skládá z předpjatého betonu a vnitřní vložky. Jednovrstvé kontejnmenty s hermetickou výstelkou byly stavěny v 80. a 90. letech 20. století. S tímto druhem kontejnmentu se můžeme setkat například v jaderné elektrárně Temelín. [1], [3]

2.1.2 Dvouvrstvé

Dvouvrstvé kontejnmenty jsou nástupcem jednovrstvých, jedná se tedy o modernější řešení ochranné obálky reaktoru. Vnější stěny jsou z železobetonu a slouží k ochraně reaktoru před přírodními vlivy (katastrofami) a vlivy způsobené člověkem (náraz letadla, bombový útok). Vnitřní stěny jsou z oceli, nebo z předpjatého betonu opatřené výstelkou a slouží k přenesení tlaku, který může vzniknout při havárii (např. LOCA, kdy dochází k rapidnímu zvýšení teploty a tlaku uvnitř kontejnmentu). Výstelka je zhotovena z oceli nebo z kompozitních materiálů a slouží jako těsná vrstva, která zajišťuje nepropustnost. Mezi vnější a vnitřní stěnou vznikne prostor, který slouží k zachycení nebezpečných látek, při porušení vnitřní stěny nebo výstelky. Tyto látky mohou být následně odsáty a filtrovány. [1], [2], [3]

Moderní dvouvrstvý betonový kontejnment se tedy skládá z betonu, betonářské výztuže, předpínací výztuže a výstelky tvořené ocelí nebo kompozitními materiály. Minimální charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku je 35 MPa, většinou se používají betony vyšších tříd, než je C 35/45. Mez kluzu betonářské oceli je minimálně 400 MPa a využívají se varianty s vyšší duktilitou, tedy třídy tažnosti B a C. Mez kluzu ocelové výstelky je minimálně 250 MPa. [1], [2], [3]

2.2 Dělení kontejnmentu dle tvaru

2.2.1 Kulové

Kulová konstrukce kontejnmentu je staticky výhodnější než konstrukce válcová. Nicméně jejich velikou nevýhodou byly vysoké náklady při výstavbě. Tyto kontejnmenty byly stavěny převážně do

80. let 20. století. Kulový kontejnment můžeme nalézt například na jaderné elektrárně Biblis B v Německu. [3], [4]

2.2.2 Válcové

Konstrukce válcového kontejnmentu je staticky méně výhodná, ale jejich hlavní výhodou jsou nižší výrobní náklady, které vyplývají z jednodušší konstrukce. Válcové kontejnmenty lze nalézt ve většině nových projektů, například na jaderné elektrárně Temelín. [3], [4]

2.3 Dělení kontejnmentů podle systému potlačení tlakové vlny během havárie LOCA.

2.3.1 Plnotlaké

Jedná se o kontejnment s velkým objemem, do kterého může expandovat pára v případě havárie (např. LOCA). Není zde tedy potřeba uměle snižovat tlak a jedná se o pasivní bezpečnostní systém ochrany. Plnotlaké kontejnmenty jsou dimenzovány na tlak 0,5 MPa. Jedná se o nejběžnější řešení kontejnmentů. [1], [3]

Orientační rozměry typického plnotlakého velkoobjemového kontejnmentu. Vnitřní průměr válce je od 37 m do 45 m, tloušťka stěny je 0,8 m až 1,5 m a tloušťka základové desky je 1 až 6 m. Rozměry kontejnmentu se liší dle typu použitého reaktoru. [1], [3]

2.3.2 Subatmosferické

Za běžného provozu se v kontejnmentu udržuje podtlak pomocí ventilátorů a filtrů. Díky podtlaku je možná částečná redukce návrhového tlaku při havárii. [1], [3]

2.3.3 S potlačením tlaku

Tlak vzniklý při havárii se uměle snižuje především kondenzací páry. Nachází se zde tedy například ledový kondenzátor, který je schopen uvolněný tlak potlačit. [1], [3]

Zjednodušeně se dá říci, že je pára vzniklá při havárii vháněna do košů obsahujících led, kde následně dochází ke kondenzaci. [1], [3]

3 Příklady kontejnmentů

3.1 Jaderná elektrárna Temelín

Jedná se o jednovrstvý plnotlaký kontejnment válcového tvaru. Mohutná válcová konstrukce je tvořena z předpjatého betonu a skládá se z válce a kulového vrchlíku. Celá stavba je vysoká 56 metrů, vnitřní průměr kontejnmentu je 45 metrů, tloušťka stěny válce je 1,2 metru a tloušťka kulového vrchlíku je 1,1 metru. Celkový půdorys vestavby je 66 x 66 metrů. [4]



Válcovou část kontejnmentu svírá 96 předepnutých ocelových kabelů délky přibližně 85-90 metrů. Každý předpínací kabel je tvořen svazkem 487 kusů vysoce legovaných ocelových patentovaných ocelových drátů o průměru 5 milimetrů. Všechny kabely byly předepnuty silou 10 MN (1000 tun). [4]

Vnitřní povrch je pokryt 8 mm tlustou nerezovou výstelkou, která hermeticky uzavírá vnitřní prostor. Kontejnment je projektován na maximální přetlak 0,49 MPa a maximální teplotu 150 °C. V kontejnmentu jsou umístěny dva výrobní bloky s tlakovodními reaktory VVER 1000 typu V320 s maximálním výkonem 2000 MW. [4]

3.2 Jaderná elektrárna Baharak v Abu Dhabi

Dvouvrstvý velkoobjemový kontejnment z předpjatého betonu. Válcová konstrukce se skládá z válce a kulového vrchlíku. Celková výška je 77 m a vnitřní průměr 44 m a tloušťka stěny je 1,3 m. [5]



3.3 Jaderná elektrárna Maanshan v Taiwan

Jednovrstvý velkoobjemový plnotlaký kontejnment z předpjatého betonu. Válcová konstrukce se skládá z válce a kulového vrchlíku. Celková výška je 60 m, vnitřní průměr 39,6 m, tloušťka stěny je 1,22 m, tloušťka kopule 0,96 m a základová deska je tlustá 7 m. [5]

Ocelová výstelka má tloušťku 6,35 mm.



4 Testy kontejnmentů

Na kontejnmenty jsou kladeny extrémní nároky, a proto podléhají nejnáročnějším testům. Cíle testování jsou dva – jednak zjistit, jak se konstrukce bude chovat, jednak vysvětlit pomocí teoretických modelů, proč se tak chovala. Zpřesněné teoretické modely mohou dále přesně popisovat chování elektrárny, aniž by se v rámci velkých testů musela ničit, a umožňují předpovědět chování její konstrukce i v situacích, na které se testy neprováděly.

4.1 Přetlak

Model kontejnmentu se naplní vodou, plynem nebo jejich kombinací a pak se měří, jak se konstrukce chová, zatímco tlak roste. Ocelové kontejnmenty při provedených testech vydržely bez problémů 4-6krát vyšší tlak, než na který byly navrhovány, betonové kontejnmenty pak 2,5-3,5krát vyšší tlak, přičemž návrhový tlak je asi čtyřnásobek tlaku atmosférického, hodnota se samozřejmě kontejnment od kontejnmentu liší. [6]

Tlakové testy provedené v 80. letech ukázaly, že některé teoretické modely je třeba ještě vylepšit. Ocelové kontejnmenty se chovaly jinak, než modely předpovídaly, zatímco do chování betonových kontejnmentů se celkem střelily. V okamžiku selhání se v kontejnmentu objevily drobné praskliny. Modely sice dobře předpověděly, že se tak stane v okolí prostupů, ale v identifikaci konkrétního místa se většinou mýlili. Díky datům nashromážděným během testů mohly být modely a následně i skutečné projekty patřičně vylepšeny. [6]

Součástí zkoušek byla i naprostá destrukce. Ocelový model kontejnmentu 1:8 se po natlakování dusíkem na 1,41 MPa (14násobek atmosférického tlaku) rozletěl na kousky, které se pak našly až půl kilometru daleko. Kontejnment byl projektovaný na tlak 0,3 MPa. [6]

Zkoušce mezního stavu únosnosti byl podroben i kontejnment japonské elektrárny Ohi-3. Tento model, v poměru 1:4, nejprve v rámci běžných zátěžových testů popukal. Aby ho experimentátoři mohli pořádně natlakovat, vyložili ho zevnitř gumovou fólií, naplnili z větší části vodou a doplnili dusíkem, jehož tlak zvyšovali až při tlaku 1,42 MPa kontejnment (navržený na 0,39 MPa) nevydržel a betonová, ocelí vyztužená konstrukce odshora dolů pukla. [6]

4.2 Zemětřesení

Vliv zemětřesení se testoval v roce 1980 v Japonsku v Tadotsu Engineering Laboratory. Model kontejnmentu 1:10 se postavil na speciální třesací stůl a poté byl zatížen mnoha zemětřesnými vlnami. Kontejnment zemětřesením, na která byl vyprojektován, odolal, ale ukázalo se, že se poškození akumuluje a v případě řady velkých zemětřesení za sebou by přece jen mohlo dojít k poškození, přestože každé zemětřesení by samo o sobě kontejnment neohrozilo. [6] [9]

4.3 Terorismus

Až do 11. září 2001 se pád dopravního letadla na kontejnment jako možné riziko neuvažoval. Nikoho nenapadlo, že by se mohlo jednat o úmyslný čin, a šance, že by se letadlo zasáhlo kontejnment při nějaké nehodě omylem byla nesmírně malá. I tak v roce 1993 proběhly testy ověřující, s jakou energií by vlastně takové letadlo do stěny kontejnmentu narazilo. Stíhačka F4 Phantom byla na speciální pozemní trati urychlena na 210 m/s a čelně se střetla s betonovým blokem o tloušťce kontejnmentu. Zed' odolala, stíhačka doslova „zmizela“ a experiment přinesl konkrétní data o energii útočícího letadla. Testy, co by se s kontejnmentem stalo, kdyby uvnitř něj něco vybuchlo nebo se uvolnila lopatka z běžící turbíny či čerpadla, se konaly již o deset let dříve. [6] [8]

Teroristický útok přidal do seznamu hrozeb pro jadernou elektrárnu unesené, úmyslně navedené dopravní letadlo. Následné testy (převážně teoretické) ukázaly, co by se v případě takového útoku s kontejnmentem stalo. Jako typický zástupce byl vybrán Boeing 767-400, nejčastější velké letadlo nad Amerikou. Má délku 61 metrů, rozpětí křídel 52 metrů a vzletovou váhu 204 tun. Dvojice motorů, každý o váze 4 300 kilogramů, je od sebe vzdálená 15 metrů a je to také současně jediná věc, která by mohla napáchat vážnější škody. V případě útoku na kontejnment je třeba tímto strojem zasáhnout objekt o průměru kolem 40 metrů, to vše v rychlosti přes 500 km/h a jen pár metrů nad zemí. Pokud by se pilot opravdu trefil jedním z motorů přímo na střed kontejnmentu, jednalo by se buď o ukázkou mistrovské pilotáže, nebo o neuvěřitelné štěstí. Ale simulace ukázaly, že i v případě takového

zásahu by se kontejnment sice prohnul a popukal, ale dovnitř by nepronikly ani části letadla, ani letecké palivo a chlazení reaktoru by zůstalo zachováno. Totéž platí i pro bazén nebo sud s vyhořelým jaderným palivem – ani jim by přímý náraz Boeingu neublížil. [6] [8]

4.4 Reálná havárie jako podklad pro vylepšení

Chybou obsluhy došlo na elektrárně Three Mile Island k roztavení části aktivní zóny a úniku malého množství radioaktivních látek do ovzduší. Reaktor se ovšem nikam neprotavil. Pro vědce byla tato nehoda i velkým přínosem. Do té doby nevěděli zcela přesně, co by se při roztavení aktivní zóny vlastně stalo, a teprve událost na Three Mile Island jim ukázala, že následky by vlastně byly daleko menší, než předpokládali. Zahrnuli tedy informace o chování aktivní zóny při ztrátě chlazení do návrhů nových elektráren. [6]

5 Vnitřní a vnější události

Jedná se o situace, při kterých může být ohrožena bezpečnostní funkce kontejnmentu. Cílem návrhu je zajistit, aby žádná vnitřní událost nepronikla vně kontejnmentu a zároveň, aby žádná vnější událost neohrozila vnitřní provoz. Kontejnment tedy slouží jako štít mezi vnitřním a vnějším prostředím.

VNITŘNÍ UDÁLOST	VNĚJŠÍ UDÁLOSTI
ztráta primárního chladiwa (LOCA)	náraz letadla
poruchy v systému s párou	exploze zásobníků hořlavých tekutin
poruchy v potrubí s napájecí vodou	zemětřesení
porucha v potrubí s chladicí vodou	hurikán nebo tropická cyklona
poruchy v parogenerátoru u PWR	záplavy
neúmyslné otevření tlakových a odlehčovacích klapek	tornádo
oscilace v kondenzaci směsi kapalina-plyn při úniku chladicího média u BRW	vítr
únik nebo porucha v systému přepravujícím radioaktivní tekutiny uvnitř kontejnmentu	náraz vnějšího rychle letícího objektu
nehody při manipulaci s palivem uvnitř kontejnmentu	sněhová vánice
vnitřní rychle letící objekty	tsunami
vnitřní požár	fluktuační vodní hladiny blízkého vodního díla
vnitřní zatopení	erupce sopky
	extrémní teploty (nízké i vysoké)

Zatímco vnitřní události mohou nastat u všech jaderných kontejnmentů, některé vnější události jsou specifické pro danou lokalitu stavby – např. tsunami může ohrozit pouze elektrárny umístěné na mořském pobřeží.

Nehody, které mohou v průběhu provozu kontejnmentu vzniknout se dělí do dvou základních skupin:

- PROJEKTOVÉ NEHODY (DBA – „design basis accident“)
- NADPROJEKTOVÉ NEHODY

Při projektových nehodách se předpokládá řetězec za sebou jdoucích událostí vybraných pro posouzení integrity kontejnmentu. Důsledky takové nehody musí zůstat na přijatelných hodnotách.

Nadprojektové nehody charakterizuje vícenásobné selhání bezpečnostních systémů, možnost degradace aktivní zóny reaktoru a ohrožení integrity kontejnmentu. Předpokládá se velmi nízká

pravděpodobnost jejich vzniku, ale při návrhu by mělo být zhodnoceno, zda je nutné je při výpočtu zohlednit. [1]

6 Návrh kontejnmentu

O velikosti (resp. objemu) kontejnmentu rozhodují 2 základní návrhové parametry

- NÁVRHOVÝ TLAK
- NÁVRHOVÁ TEPLOTA

Návrhový tlak se stanovuje jako tlak špičkový, zvětšený o 10 %. Špičkový tlak je takový, který vznikne při projektové nehodě s největším možným únikem látek a energií.

Návrhová teplota se stanovuje jako maximální teplota ze všech možných projektových nehod. Kontejnment včetně vnitřních systémů musí zajistit plnou funkčnost při jakékoli kombinaci tlaků a teplot, které nepřekročí návrhové hodnoty.

V evropských zemích se nejčastěji doporučuje návrh a posouzení na základě metody mezních stavů kdy největší předpokládaný účinek zatížení E nesmí překročit nejmenší předpokládanou odolnost konstrukce R. [1], [5]

$$E \leq D$$

6.1 Zatěžovací stavy

Minimální sadu zatěžovacích stavů lze rozdělit do 4 kategorií podle času trvání a pravděpodobnosti výskytu během životnosti kontejnmentu [1]:

PŘEDPROVOZNÍ	PROVOZNÍ	EXTRÉMNÍ VLIVY	ZATÍŽENÍ PŘI NEHODĚ
stálá	provozní tlak	návrhové zemětřesení	činnost systému pro snížení tlaku
proměnná	provozní teplota	rychle letící objekty nesené větrem	vnitřní zatopení
předpětí	vítr	náraz letadla	
montážní	extrémní vítr	vnější exploze	
testovací tlak	klimatické vlivy	DBA tlak	
testovací teplota	reakce potrubí	DBA teplota	
	pohon bezpečnostní uvolňovací klapky	DBA reakce potrubí	
	zvedání uvolňovací klapky	tryskové působení a vibrace potrubí	
	vzduchové čištění bezpečnostní uvolňovací klapky	lokální efekty v důsledku DBA	
		dynamická zatížení spojená s DBA	

6.2 Kombinace zatěžovacích stavů

Ve většině evropských zemí jsou pro návrh užívány Eurokódy. Hodnoty zatížení pro základní zatěžovací stavy udává EC1, pravidla pro tvorbu kombinací zatěžovacích stavů je poté popsána v EC0. Vzhledem k velkému množství zatěžovacích stavů (viz výše) je velmi složité správně stanovit možné kombinace.

Uplatňuje se přístup založený na dílčích součinitelích spolehlivosti, které procentuálně zvyšují negativně působící zatížení, a naopak redukují nebo zcela zanedbávají zatížení příznivě působící. [5]

Je doporučeno uvažovat následující kombinace:

$$\begin{aligned}
 CO1 &= 1,4 \cdot D + 1,7 \cdot D \\
 CO2 &= 0,75 \cdot (1,4 \cdot D + 1,7 \cdot D \pm 1,87 \cdot E) \\
 CO3 &= 0,75 \cdot (1,4 \cdot D + 1,7 \cdot L + 1,7 \cdot W) \\
 CO4 &= 0,9 \cdot D \pm 1,43 \cdot E \\
 CO5 &= 0,9 \cdot D \pm 1,3 \cdot W \\
 CO6 &= 1,4 \cdot D + 1,7 \cdot L + 1,7 \cdot H \\
 CO7 &= 0,9 \cdot D + 1,7 \cdot H \\
 CO8 &= 0,75 \cdot (1,4 \cdot D + 1,4 \cdot T + 1,7 \cdot L) \\
 CO9 &= 1,4 \cdot (D + T)
 \end{aligned}$$

Pro železobetonové kontejnmenty se mají upravit kombinace obsahující zatížení zemětřesením:

$$\begin{aligned}
 CO2 &= 1,4 \cdot (D + L \pm E) \\
 CO4 &= 0,9 \cdot D \pm 1,4 \cdot E
 \end{aligned}$$

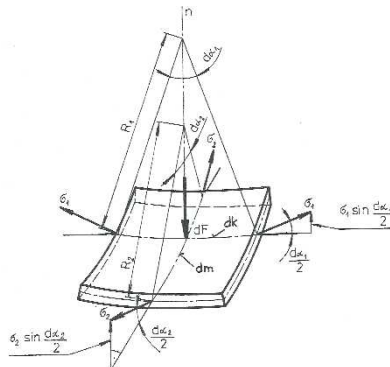
Význam veličin použitý v předchozích vztazích je následující:

CO	kombinace zatěžovacích stavů
D	stálá zatížení
L	proměnná zatížení
W	zatížení větrem
E	seismická zatížení
T	zatížení vlivem nerovnoměrného sedání, reologických změn betonu a teplotou
H	zatížení zemním tlakem

7 Přibližný návrh předpětí na vnitřní přetlak při LOCA

Návrh vychází z membránové teorie skořepin, kdy na plošný prvek obecně s dvojitou křivostí působí plošné zatížení kolmé ke střednici. Při splnění čtyř níže uvedených podmínek je ve skořepině dosaženo tzv. membránového stavu, kdy nevznikají žádné ohybové ani kroučící momenty a konstrukce je namáhána pouze osovými vnitřními silami, případně smykem. Podmínky, které je třeba dodržet pro dosažení membránového stavu jsou následující:

1. velikost spojitého zatížení stěny skořepiny se nesmí měnit náhle
2. tloušťka stěny skořepiny se nesmí měnit náhle
3. vnější bodové síly působící na skořepinu musí mít směr tečny k povrchu skořepiny
4. poloměry křivosti a poloha středu křivosti se nesmí měnit náhle



Pokud má navíc skořepina rotačně symetrický tvar, může být napjatost jednoznačně určena pomocí dvou vztahů: Laplaceovy rovnice a rovnice rovnováhy oddělené části skořepiny. [10]

Zapsáno ve složkách hlavních napětí:

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{\Delta p}{t}$$

$$\sigma_1 = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot t \cdot \cos \varphi}$$

Nebo ve složkách hlavních měrných normálových sil:

$$\frac{n_1}{R_1} + \frac{n_2}{R_2} = \Delta p$$

$$n_1 = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \cos \varphi}$$

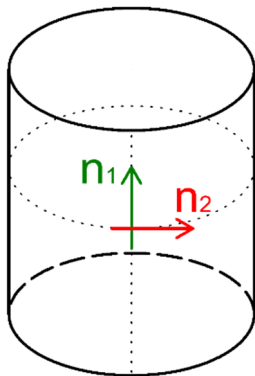
Předpokládá se, že napětí σ_3 působící kolmo na střednicovou rovinu je zanedbatelné oproti tečným napětím σ_1 a σ_2 .

Význam veličin použitých v přecházejících rovnicích je následující:

σ_1, σ_2	hlavní napětí
R_1, R_2	poloměry křivosti ve směru hlavních napětí vztahované ke střednici skořepiny
Δp	působící přetlak
t	tloušťka skořepiny
F	výslednice vnějších sil působících na oddělenou část skořepiny
r	poloměr odřáté části skořepiny v místě myšleného řezu
φ	sklon tečny odřáté části skořepiny
n_1, n_2	hlavní měrné normálové síly

Kontejnment nejčastěji sestává ze dvou základních geometrických těles – válcové a kulové plochy, kdy válcová část tvoří spodní část kontejnmentu a je uzavřena shora kulovým vrchlíkem nebo celou polokoulí. Obě tyto plochy lze z matematického hlediska označit za rotačně symetrické kvadriky. Rovnice pro vyjádření napjatosti lze poté zjednodušit.

válcová plocha



$$R_1 = \infty$$

$$R_2 = r$$

$$F = \pi \cdot r^2 \cdot \Delta p$$

$$\varphi = 0^\circ$$

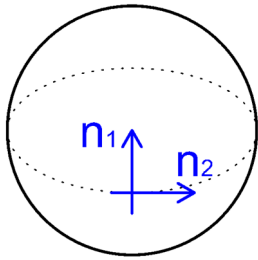
$$\sigma_1 = \frac{R_2 \cdot \Delta p}{2 \cdot t}$$

$$\sigma_2 = \frac{R_2 \cdot \Delta p}{t}$$

$$n_1 = \frac{R_2 \cdot \Delta p}{2}$$

$$n_2 = R_2 \cdot \Delta p$$

kulová plocha



$$R_1 = R_2 = R$$
$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{R \cdot \Delta p}{2 \cdot t}$$
$$n_1 = n_2 = \frac{R \cdot \Delta p}{2}$$

Je třeba upozornit, že v oblasti poblíž napojení válcové a kulové části vznikají singularity napětí, které nelze popsat membránovou teorií skořepin. [1]

V příloze A je uveden příklad návrhu předpětí na vnitřní přetlak pro válcovou a kulovou část.

8 Zdroje

- [1] VINKLER, Marek. *Návrh předpjatého kontejnmentu jaderné elektrárny na projektovou nehodu*. Praha, 2012. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí.
- [2] STUDÝNKA, Radim. *Modely a analýzy v kontejnmentovém systému s potlačením tlaku při haváriích s únikem chladiva*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav.
- [3] KOVAŘÍK, Jan. *Úloha kontejnmentu v jaderné energetice*. Praha, 2011. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a energetiky.
- [4] BROMOVÁ, Edita. Co vydrží kontejnment jaderné elektrárny. In: *Třípól* [online]. Simopt s.r.o. 2012. [vid. 4. 12. 2017]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/510-co-vydrzi-kontejnment-jaderne-elektrarny>
- [5] BANGASH, M. Y. H. *Structures for Nuclear Facilities*. Londýn, Velká Británie: Springer, 2011, IBSN: 978-3-642-12559-1.
- [6] URL: <<http://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/510-co-vydrzi-kontejnment-jaderne-elektrarny>>
- [7] URL:
<<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6906/cr6906.pdf>>
- [8] URL:
<<http://www.nei.org/resourcesandstats/documentlibrary/safetyandsecurity/reports/epriplantstructuralstudy>>
- [9] MÁČA, Přednáška DSK205_text, URL:
<https://mech.fsv.cvut.cz/homeworks/student/DY02/DSK2_05text.pdf>
- [9] MICHALEC J. a kolektiv. *Pružnost a pevnost I, 1. dotisk 3. vydání*. Praha: Česká technika, 2010, IBSN 978-80-01-04224-3