

E xperimentální A nalýza N apětí 2005

COMBINED NUMERICAL-EXPERIMENTAL METHOD FOR DETERMINATION OF FAILURE REASONS OF STORAGE TANK KOMBINOVANÁ NUMERICKO-EXPERIMENTÁLNA METÓDA PRE URČENIE PRÍČIN HAVÁRIE AKUMULAČNEJ NÁDRŽE

František Trebuňa¹, František Šimčák², Jozef Bocko³, Peter Trebuňa⁴

In the paper attention is devoted to detection of failure reason of vertical cylindrical storage tank of volume 14 500 m³. Failure happened during operation only several days after its reconstruction. The methodology for assessment of reasons is object of the contribution.

Keywords:

failure, thin-walled shell, reasons of damage.

Kľúčové slová:

Havária, tenkostenná škrupina, príčiny porušenia.

Úvod

Problematike akumulácie tepelnej energie je v poslednom období venovaná nie malá pozornosť. Riešenia, ktoré by túto možnosť bez veľmi veľkých investícií umožňovali sú v prevažnej miere založené na konštrukcii vertikálnych uskladňovacích nádrží, ktoré po drobných úpravách a tepelnom zaizolovaní umožňujú túto funkciu plniť. Skutočný stav týchto konštrukcií po niekoľko desaťročnej prevádzke ale i zvýšenia namáhania od pretlaku resp. podtlaku, a tiež teploty (dosahujúce 95°C) i postupujúca korózia sú veľmi často príčinou havárie takejto konštrukcie. V príspevku je dokumentovaný analiticko-numerický a experimentálnu prístup riešenia problematiky za účelom určenia príčin havárie akumuláčnej nádrže.

Popis akumuláčnej nádrže

Akumulačná nádrž je vertikálne osovo symetrická nádrž s vnútorným priemerom 14 289 mm s výškou po horný okraj valcového plášťa 9 208 mm a s menovitým objemom 1 475 m³ vyrobená z materiálu 11 373.1 a slúži na akumuláciu horúcej vody (obr.1).

¹ Prof. Ing. František Trebuňa, CSc.: Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Sjf TU v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6022458, e-mail: frantisek.trebuna@tuke.sk

² Prof. Ing. František Šimčák, CSc.: Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Sjf TU v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6022462, e-mail: frantisek.simcak@tuke.sk

³ Doc. Ing. Jozef Bocko, CSc.: Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Sjf TU v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6022920, e-mail: jozef.bocko@tuke.sk

⁴ Ing. Peter Trebuňa: Katedra manažmentu a ekonomiky, Sjf TU v Košiciach, B. Němcovej 32, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6023235, e-mail: peter.trebuna@tuke.sk

Ide o beztlakovú nádrž s pevnou strechou, t. j. nádrž s konštantným objemom. Priestor nad hladinou je vyplnený parou uskladnenej kvapaliny – vody.



Obr.1 Akumulačné nádrže

Vertikálne veľkoobjemové nádrže sa bežne budujú pre objemy od 20 m³, do 50 000 m³, pričom priemery nádrží sa pohybujú od 5 m do 90 m a výšky od 4 m do 23 m. Všetky tieto nádrže sú v zásade beztlakové, steny nádrží sú vystavené predovšetkým hydrostatickému tlaku uskladnenej kvapaliny. Pri napúšťaní a vypúšťaní nádrže môže vzniknúť v dôsledku vyfukovania a prisávania vzduchu pretlak alebo podtlak, pričom jeho veľkosť je daná nastavením ventilov. Obvykle sa jedná o veľmi malé tlaky v rozmedzí 50 až 150 mm vodného stĺpca (0,49 ÷ 1,47 kPa).

V priebehu prevádzky sa môžu vyskytnúť tieto druhy zaťažení nádrže:

- hydrostatický tlak pôsobiaci prevažne na plášť (škrupinu),
- pretlak (podtlak) pôsobiaci na plášť, ale predovšetkým na strechu,
- tiaž snehu pôsobiaca na strechu,
- tlak vetra pôsobiaci na plášť i strechu,
- seizmicita pôsobiaca prevažne na plášť.

Všetky druhy týchto zaťažení pôsobia staticky s výnimkou tlaku vetra kde normy presne definujú kedy treba zohľadniť vo výpočte dynamický účinok tlaku vetra. Dynamické účinky seizmicity sú tiež definované v príslušných normách.

Okrem uvedených druhov zaťažení môžu vzniknúť aj iné zaťažovacie stavy v nádržiach. Pretože sa často jedná o havarijné stavy, vykonáva sa výpočtové posúdenie až dodatočne. Sú to napríklad tieto stavy:

- plnenie nádrže do strechy, pri ktorom je potrebné uvážiť namáhanie plášťa i strechy,
- sadanie základov a jeho vplyv na plášť a strechu,
- vznik nedovoleného pretlaku a podtlaku a jeho vplyv na plášť i strechu,
- obetónovanie nádrže a jeho vplyv na plášť i strechu.

Výpočet plášťa nádrže na hydrostatický tlak, pretlak resp. podtlak nad hladinou sa musí vykonať vždy. Ostatné kontroly sa vykonávajú len ak je to nevyhnutne potrebné.

V mieste spojenia spodného lubu a dna nádrže vzniká vysoká koncentrácia napätia. Plášť, ktorý je v dôsledku veľkého priemeru radiálne poddajnejší je v tomto uzle zviazaný päťovým prstencom s membránou dna, ktorá pre radiálny smer deformácie predstavuje veľmi tuhú väzbu. Tým vznikajú vysoké ohybové napätia, ktoré sa superponujú na základnú hladinu membránových napätí a namáhajú tak škrupinu – plášť ako aj oba kútové zvary. Pretože veľkosť ohybových napätí závisí na vzájomnom pomere tuhosti škrupiny a päťového prstenca je nutné dodržať určitú vyváženosť medzi tuhosťami jednotlivých deformačne spriahnutých dielov. Z toho vychádzajú i výpočtové smernice, ktoré priradzujú hrúbku päťového prstenca a veľkosť kútových zvarov hrúbke spodného lubu plášťa.

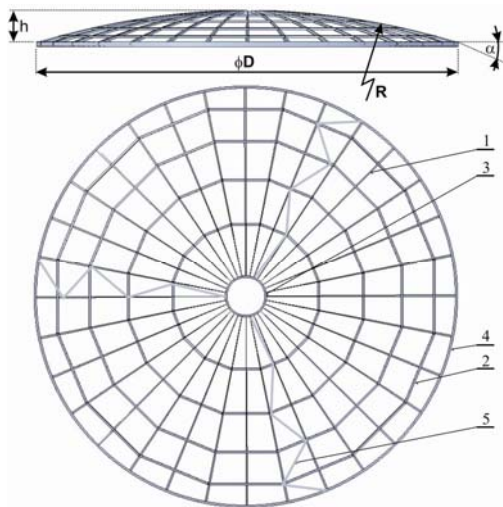
Celistvosť a prevádzkyschopnosť nádrže je však nevyhnutné posúdiť i pri niektorých špeciálnych druhoch zaťaženia, ktoré sú uvedené v predchádzajúcej časti. V prípade, že nádrž z prevádzkových príčin (porucha) bude plnená do strechy, potom namáhanie má podobný charakter ako pri vzniku nedovoleného pretlaku v nádrži. Akonáhle stúpne hladina nad horný

okraj valcového plášt'a, začne kvapalina pôsobiť svojim vztlakom na strešnú škrupinu. Takto vznikajúce membránové sily sú veľké a ohrozujú nádrž. Vzhľadom na to, že vztlaková sila sa prenáša ťahom do valcového plášt'a nádoby, vzniká ďalšie nebezpečie, že sa dno nádrže vybúli a nadvihne päťový veniec. Nádrže v ktorých sa musí počítať s možnosťou naplnenia až do strechy (alebo vznikom neprípustného pretlaku) je treba upevniť pomocou kotviacich skrutiek k základom, pričom tieto sú na vonkajšej časti päťového prstenca.

Strechy vertikálnych nádrží sa stavajú väčšinou ako samonosné v tvare plochého guľového vrchlíka. Výnimku tvoria niektoré typy nádrží malých priemerov (približne do 8 m), ktoré sa stavajú s kužeľovými škrupinovými strechami. Obidva typy striech t. j. strechy kužeľové i vrchlíkové je možné stavať ako škrupinové alebo s nosnou kostrou. Metodika výpočtu sa líši podľa toho, či je škrupina ku kostre privarená alebo nie.

Na strechu nádrže môže pôsobiť celý rad zaťažení. Sú to predovšetkým vlastná tiaž, tiaž snehu, pretlak, prípadne podtlak, tlak vetra a lokálne bremená, prípadne plnenie nádrže do strechy, sadanie základov, vznik nedovoleného pretlaku alebo podtlaku, poprípade i obetónovanie nádrže. Posledné menované vplyvy sa prevažne vyskytujú len pri havarijných stavoch. Pri výpočte striech nádrží sa počíta len so základnými druhmi zaťaženia, ktoré kombinujeme pre symetrický a nesymetrický prípad.

Mimoriadne závažnou sa javí stabilitná únosnosť tenkej strešnej škrupiny vykazujúcej tvarové nepresnosti a súčasne podpretej na rebrách. Je to úloha, ktorej riešenie i pri dnešných hardvérových a softvérových produktoch nie je úplne v možnostiach výpočtárov. Preto je tento prípad dodnes riešený experimentálne. Prenos vonkajšieho zaťaženia cez škrupinu na kostru charakterizujeme tak, že pri malých zaťaženiach preniesie škrupina zaťaženie sama.



Obr.2. Kostra strechy nádrže 1- radiálne rebrá, 2- polygonálne prstence, 3- lucernový prstenec, 4- päťový prstenec, 5 -zavetrovacie priečky

Pri zaťažení rovnom asi polovici kritického zaťaženia doľahne škrupina na kostru takže sa vonkajšie zaťaženie začne prenášať i kostrou. Bolo dokázané, že v počiatočnom štádiu sa na kostru prenáša asi 1/10 celkového zaťaženia. Ak prekročí vonkajšie zaťaženie kritický tlak škrupiny dôjde k výraznému prerozdeleniu síl medzi škrupinou a kostrou. Postupným bulením škrupiny sa zlepši kontakt medzi oboma štruktúrami a tým sa zintenzívni prenos zaťaženia na kostru.

Kostra strechy predstavuje priestorový rám, ktorého prvky ležia na guľovej ploche. Rám je pozváraný z valcovaných profilov najčastejšie I alebo U. Pri pevných strechách nádrží sa zatiaľ najviac ujal typ kostier s radiálnymi rebrami a polygonálnymi prstencami ako je zřejmé z obr.2.

Nosnú kostru strechy akumuláčnej nádrže tvoria ešte štyri polygonálne prstence z ktorých dva spodné sú vyrobené z profilov $L 70 \times 70 \times 8$ a horné z profilov $L 65 \times 65 \times 6$.

Kvôli získaniu základnej predstavy potrebnej pre posúdenie akumuláčnej nádrže je uvedený tvar zborbenia strechy nádrže na obr.3. Obhliadkou havarovanej konštrukcie strechy boli zistené nasledovné skutočnosti. Päťový prstenec má porušený zvar na hornej pásnici (pozri obr.4). Rebrá sú odtrhnuté v hornej časti prierezu v mieste privarenia k päťovému prstencu (obr.5).

Prúty polygonálnych prstencov predovšetkým v prvom a druhom prstenci od päťového prstenca sú plasticky zdeformované (pozri obr.6) a deformácie sú tiež v miestach lokálnych strát stability na voľnom okraji profilu (obr.7). Plastická deformácia strešnej škrupiny (pozri obr.7) spolu s miestom porušenia spoja rebro - päťový prstenec, (pozri obr.5) je zrejším dôkazom toho, že haváriu vyvolal podtlak nad hladinou uskladnenej kvapaliny.



Obr.3 Strecha poškodenej akumuláčnej nádrže po havárii (zaizolovaná)



Obr.4 Porušený zvar päťového prstenca U180



Obr.5 Porušenie spoja rebro - päťový prstenec

Uvedenú skutočnosť potvrdzuje i tvar celkovej deformácie strešnej konštrukcie, ktorá je úplne identická s haváriami takýchto konštrukcií popísanými v literatúre.



Obr.6 Plasticky zdeformovaný prút polygonálneho prstenca



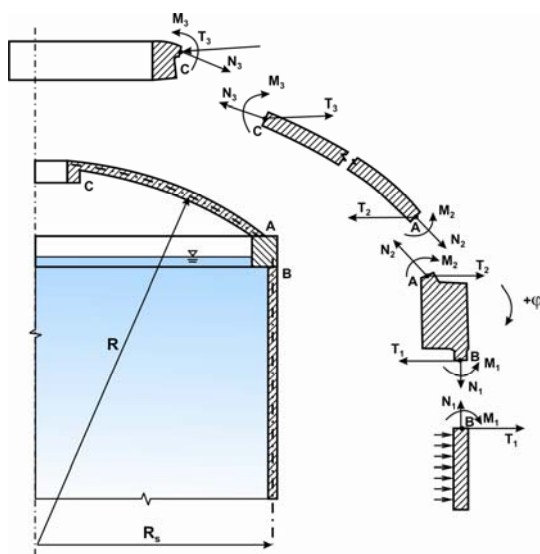
Obr.7 Lokálna plastická deformácia polygonálneho prstenca

Zaťaženie akumuláčnej nádrže, výpočet a posúdenie stability

Pri výpočte vnútorných silových veličín v nosných prvkoch plášťa a strechy akumuláčnej nádrže sa vychádza z noriem STN 73 0035 a 73 1401 ako aj z normy ON 69 8119. Riešenie vychádza zo statického zaťaženia v prípade potreby aj z dynamického zaťaženia. Uvažuje sa

so zaťažením stálym, aj so zaťažením náhodným, so zaťažením klimatickým (sneh, vietor) ako aj s kombináciou zaťažení. Pri výpočte sa uvažuje s normovým zaťažením, ktoré je stanovené pre stále zaťaženia (podľa geometrických a konštrukčných parametrov, objemovej hmotnosti), pre užitočné a montážne zaťaženie podľa najnepriaznivejších hodnôt vyskytujúcich sa za normálnych podmienok prevádzkovania, ktorá odpovedajú požiadavkám prevádzkovateľa objektu a dodávateľa zariadenia a pre klimatické zaťaženia podľa ročných resp. najnepriaznivejších hodnôt určených mnohoročnými meraniami. Hodnoty súčiniteľov zaťaženia vychádzajú z pravidiel uvádzaných vo vyššie citovaných normách. Na základe experimentov možno konštatovať, že pri dostatočne plastických materiáloch možno uvedené výpočtové vzťahy považovať za dostatočne presné. V prípade skúmanej akumuláčnej nádrže sa vyskytujú v súvislosti so zvaraním viaceré príčiny vyvolávajúce zvýšené hladiny namáhania. Ide predovšetkým o tieto skutočnosti

- Pomerne veľký rozdiel v hrúbkach päťového prstenca dna (ktorý je ešte privarený k pôvodnému dnu nádrže) a prvého (nového) lubu plášťa nádoby.
- Presadenie valcových častí plášťa nádoby najmä v miestach spojenia prvého (nového) lubu s pôvodnou konštrukciou. Tieto presadenia evidentne dosahujú v niektorých miestach polovicu hrúbky plášťa.
- Geometria plášťa nádoby a kolmost' prvého lubu nie je dodržaná. Meraním bolo zistené, že tieto odchýlky vo viacerých bodoch dosahujú na výške 1000 mm odklon od vertikály 100 mm aj viac.
- Luby v mieste vertikálnych spojení nie sú časťou valcovej plochy, ale majú tvar mnohouholníka.



Obr. 8. Vzájomné silové pôsobenie častí nádrže

Vzájomné silové pôsobenie medzi strechou, výstužným vencom a plášťom nádrže je určené podľa obr.8. Veľkosť silových účinkov $M_1, M_2, M_3, T_1, T_2, T_3, N_1, N_2, N_3$ sa určuje z podmienok spojitosti deformácií jednotlivých častí nádrže v bodoch A, B a C.

Pri výpočte predpokladáme, že strecha akumuláčnej nádrže je škrupina v tvare guľového vrchlíka. Strata stability takéhoto tenkostenného konštrukčného prvku nastáva pri vonkajšom pretlaku (resp. vnútornom podtlaku) p .

Pri praktických výpočtoch rozlišujeme tzv. „vysoké“ guľové vrchlíky pri ktorých je výška h porovnateľná s polomerom krivosti R vrchlíka a „ploché“ guľové vrchlíky, pri ktorých je $h \ll R$. Podľa [2] je potrebné považovať guľový vrchlík za plochý, ak je splnená podmienka $6h \ll R$.

Strecha akumuláčnej nádrže má rozmery $h = 1100 \text{ mm}$, $R = 24500 \text{ mm}$, teda sa jedná o plochý guľový vrchlík. Zaťaženie strechy je kolmé k jej strednicovej ploche (pretlak resp. podtlak), resp. pôsobí kolmo na horizontálnu rovinu (vlastná tiaž strešnej konštrukcie, tiaž snehu a pod.).

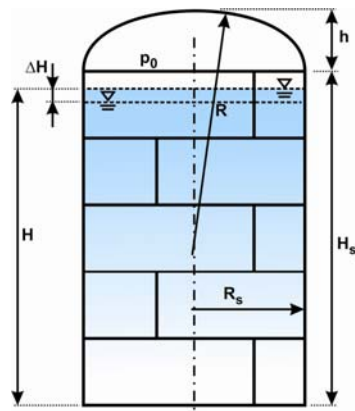
Ako však vyplýva z viacerých experimentov [2,4], kritické zaťaženie reálnych škrupín je 4 až 6 krát menšie ako ideálnych škrupín. Je to spôsobené predovšetkým odchýlkami geometrie skutočnej konštrukcie (imperfekcie) voči ideálnemu výpočtovému modelu. Pri reálnych konštrukciách je veľkosť kritického zaťaženia ovplyvnená tiež poddajnosťou päťového

výstužného prstenca, pretože táto ovplyvňuje okrajové podmienky uloženia škrupiny strechy. V prípade väčších geometrických odchýlok a imperfekcií sa kritické zaťaženie znižuje ešte navyše 1,5 až 2 krát.

Okrem toho môžu v mieste výstužných prstencov pôsobiť značné ohybové momenty, ktoré tak isto nepriaznivo ovplyvňujú kritické zaťaženie škrupiny. Dôležitá je tiež kvalita zvarových spojov. Podľa [4] sa pri určovaní kritického zaťaženia plochého guľového vrchlíka zohľadňuje vplyv radiálnych rebier a polygonálnych prstencov.

Tlakové pomery nad hladinou kvapaliny pri zmene jej výšky

Uvažujme akumuláciu nádrž s maximálnou výškou hladiny vody $H = 9108$ mm (obr.9).

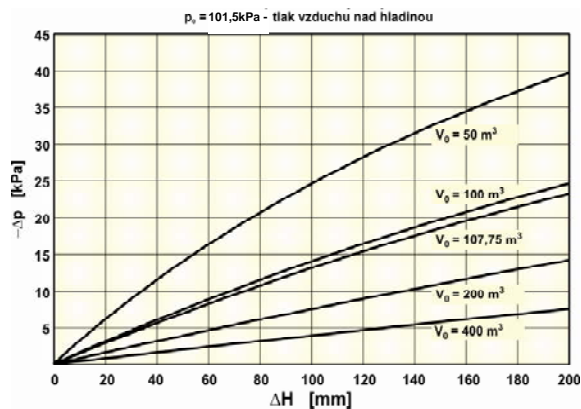


Obr.9 Veličiny udávajúce pomery v akumuláčnej nádrži pri poklese hladiny vody

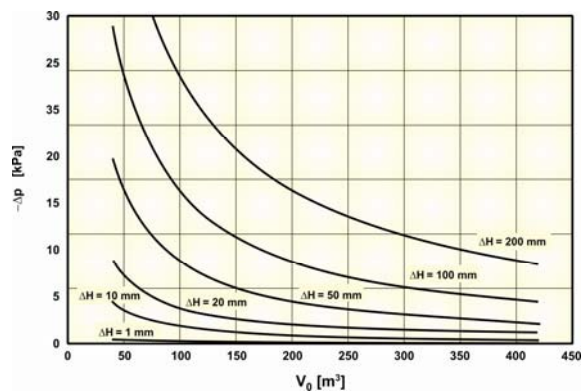
Nech pri tejto hladine vody je nad hladinou tlak p_0 .

Pretože výška valcovej časti nádoby je $H_s = 9208$ mm, objem vzduchu V_0 nad hladinou v nádrži je $107,75\text{m}^3$.

Zmenu tlaku nad hladinou v nádrži pri zmene výšky (poklese) hladiny o hodnotu ΔH za predpokladu, že priestor nad hladinou je uzavretý (bez prístupu vzduchu) možno znázorniť diagramom na obr.10, na ktorom je graficky znázornená závislosť $\Delta p = \Delta p(\Delta H)$ pre tlak $p_0 = 101,5$ kPa.



Obr.10. Závislosti zmeny tlaku pri poklese výšky hladiny pre jednotlivé objemy vzduchu nad hladinou a počiatočný tlak nad hladinou $p_0 = 101,5$ kPa

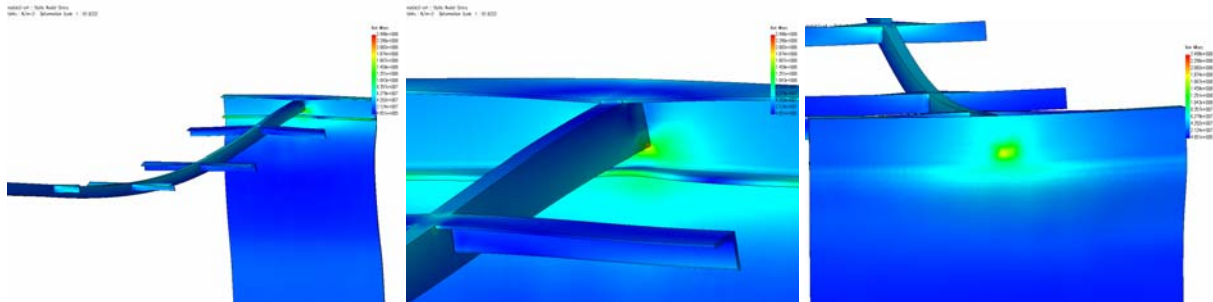


Obr.11 Závislosti zmeny tlaku pri zmene objemu vzduchu nad hladinou pre jednotlivé poklesy výšky hladiny a počiatočný tlak nad hladinou $p_0 = 101,5$ kPa

Na obr.11 je graficky znázornená závislosť $\Delta p = \Delta p(V_0)$ pre tlak $p_0 = 101,5$ kPa pre jednotlivé poklesy výšok ΔH . Okrem štandardných výpočtov podľa normy bol výpočet akumuláčnej nádrže vykonaný aj metódou konečných prvkov. Pre výpočet bol použitý komerčný program, ktorého užívateľom je pracovisko riešiteľov.

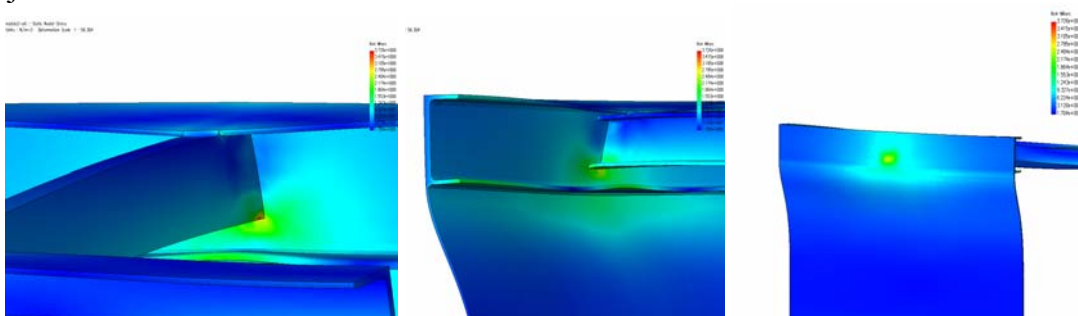
Vzhľadom na možnosť využitia symetrie bola modelovaná iba tridsiata druhá časť celej konštrukcie tvoriaca segment, vybraný meridiálnymi rezmi prechádzajúcimi osou symetrie nádrže. Presadenie dna voči vonkajšiemu povrchu plášťa bolo riešené pre rôzne prípady.

Segment obsahuje dno nádrže, jej obvodový plášť, výstuž a škrupinu strechy nádrže. Základný model obsahuje približne 160 000 prvkov a 320 000 uzlov. Dno nádrže je voľne podporené, bočné hranice segmentu sú viazané podmienkami symetrie. Okrem tiaže modelovaných častí konštrukcie bolo uvažované aj s tiažou plechu škrupiny strechy, izolačnej hmoty Nobasil a krycieho plechu. Pri výpočte bolo uvažované s pracovnou hladinou vody o výške stĺpca 9108 mm. Variovaním hodnôt pretlaku a podtlaku zodpovedajúceho 150 mm, resp. 300 mm vodného stĺpca ako aj výpočtom bez a so zaťažením snehovou pokrývkou bolo prepočítaných osem základných zaťažovacích stavov. Na obr.12 je znázornené rozloženie napätí. Deformácie sú kvôli ich lepšej viditeľnosti niekoľkonásobne zväčšené. Výpočet bol vykonaný pre rôzne druhy zaťaženia, z ktorých vyberáme zaťaženie podtlakom 150mm vodného stĺpca a so zaťažením snehom. Redukované napätia podľa von Misesa pri tomto zaťažení dosiahli maximálnu hodnotu 249,8 MPa. Ich rozloženie je zrejmé z obr.12.



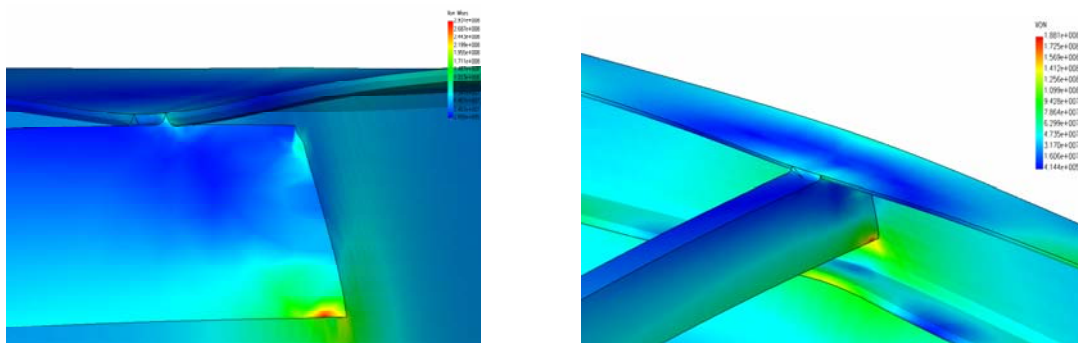
Obr.12 Polia redukovaných napätí pri podtlaku 150 mm a zaťažení snehom

Pri zaťažení podtlakom 300mm vodného stĺpca a zaťažením snehom redukované napätia podľa von Misesa pri tomto zaťažení dosiahli maximálnu hodnotu 342,6 MPa. Ich rozloženie je zrejmé z obr.13.



Obr.13 Polia redukovaných napätí pri podtlaku 300 mm a zaťažení snehom

Pri výpočte napät'ových polí so zohľadnením pružneplastických deformácií boli vo viacerých prípadoch prekročené hodnoty medze klzu. Na obr.14 sú uvedené napät'ové polia pri pružneplastickom výpočte pri zaťažení hydrostatickým tlakom uskladnenej kvapaliny a podtlaku 300 mm vodného stĺpca. Maximálne redukované napätie dosiahlo hodnotu 291 MPa.



Obr.14 Pole redukovaných napätí pri pružneplastickom výpočte pri hydrostatickom tlaku vody a podtlaku 300 mm

Výpočtom boli určené miesta extrémnych namáhání v ktorých v smeroch hlavných normálových napätí boli nainštalované tenzometrické kríže. Pri jednotlivých režimoch v čase odovzdávania príspevku bude zahájené experimentálne overenie výpočtov, o ktorých po ukončení budeme informovať na konferencii.

Záver

Z vizuálnej obhliadky je zrejmé, že poškodenie strechy akumuláčnej nádrže so zreteľom na klimatické zaťaženia v čase havárie mohlo byť vyvolané podtlakom nad hladinou kvapaliny v nádrži. Z vizuálnej obhliadky je tiež zrejmé, že novo vložený spodný lub je voči pôvodným lubom presadený, v niektorých miestach až o 50% hrúbky plechu. Kvalita zvarov medzi novým lubom a susedným pôvodným lubom je nevyhovujúca a vyvoláva koncentráciu napätia. Nový lub vykazuje pomerne veľký odklon od vertikály a v kritických miestach tento odklon predstavuje viac ako 100 mm, čo spôsobuje prídavné namáhanie ako v mieste privarenia prvého lubu ku dnu, tak aj v mieste privarenia k druhému lubu. Luby nemajú konštantné polomery zakrivenia ale vytvárajú zalomené úseky mnohoúhelníka. Päťový prstenec dna má vonkajší prečnievajúci okraj menší ako je bežne zaužívané pri vertikálnych uskladňovacích nádržiach. Tak isto nie je dodržaná odporúčaná šírka päťového prstenca dna. Privarenie päťového prstenca k pôvodnému dnu, ktoré nie je rovnomerne podopreté základom (niekde sú medzery až 20 mm) spôsobuje výrazné imperfekcie v namáhaní a so zreteľom na zakrytovanie plášťa tieto podmienky ako okrajové podmienky riešenia úlohy nemožno zahrnúť do výpočtu. Hrúbka päťového prstenca je zbytočne veľká s negatívnymi účinkami v mieste prechodu poddajnejšieho prvku na tuhší prvok a privarenie päťového prstenca k plechu pôvodného dna zvyšuje negatívny účinok spojenia steny a dna.

Plasticky zdeformované polygonálne prstence dokumentujú vysoké hladiny napätí v dôsledku prekročenia hodnoty kritického podtlaku, pretože pri zaťažení hydrostatickým tlakom v akumuláčnej nádrži, resp. pretlakom do hodnoty 150 mm vodného stĺpca, namáhanie polygonálnych prstencov zďaleka nedosahuje medzu klzu materiálu. Vertikálne beztlakové uskladňovacie nádrže s rozmermi posudzovanej nádrže nemusia byť vybavené nosnou výztužnou konštrukciou strechy. Keďže k strate stability došlo aj napriek skutočnosti, že posudzovaná nádrž mala výztužnú konštrukciu možno konštatovať, že túto stratu stability mohol spôsobiť len podtlak v nádrži.

Plastické deformácie strešnej konštrukcie sú úplne identické s deformáciami guľových škrupín pri podtlaku popísanými v literatúre a plechy odtrhnuté od nosnej konštrukcie tomu jednoznačne odpovedajú.

Korózne poškodenie a namerané hrúbky stien nosných prvkov aj plechu dokumentujú, že so zreteľom na úbytky hrúbok $6,5 \div 11,5$ %, (i keď sú tieto úbytky nerovnomerné, v niektorých prípadoch lokálne), ale i so zreteľom na geometriu škrupiny budú skutočné hodnoty kritického napätia podstatne nižšie ako vypočítané hodnoty.

Vertikálne veľkoobjemové uskladňovacie nádrže sú v podstate beztlakové a podľa účelu ich použitia sú vystavené prevažne hydrostatickému tlaku uskladnenej kvapaliny. Pri ich napúšťaní a vypúšťaní napr. pri prevádzke v dôsledku vyfúkavania a prisávania vzduchu môže vzniknúť pretlak alebo podtlak, ktorého veľkosť je daná nastavením ventilov. Obyčajne sa jedná o veľmi malé tlaky v rozmedzí 50-150 mm vodného stĺpca. Väčšie podtlaky a pretlaky sú neprípustné, takže bezpečnosť prevádzky vyžaduje, aby regulačné prvky zabezpečovali hore uvedené maximálne pretlaky resp. podtlaky.

Výpočtové zaťaženia akumuláčnej nádrže vychádzajú z platných postupov definovaných v norme ON 698119 „Nadzemné uskladňovacie nádrže“, vypracovanej Chepos Brno a VSS Košice, ale i z medzinárodných štandardov a literatúry vypracovanej významnými odborníkmi z uvedenej oblasti. Klimatické zaťaženie (sneh, vietor) je definované normou STN 73 0035. Pretože nádrž má presne určenú geografickú polohu, výpočtové zaťaženie snehom podľa príslušnej normy sa uvažuje 1 kNm^{-2} . Zaťaženie vetrom pre valcovú nádobu je určené v súlade s článkom 165, avšak treba podotknúť, že výpočtové zaťaženie vetrom, ktoré dosahuje hodnotu $0,468 \text{ kNm}^{-2}$ zaťažuje strechu saním teda pôsobí proti zaťaženiu vlastnou tiažou a snehom. Vietor teda ovplyvňuje stratu stability strešnej konštrukcie v pozitívnom zmysle. Analýza zvarov a imperfekcií v zvarových spojoch zreteľne poukazuje na kritické miesta, na nevhodnosť prípadne až neprípustnosť jednotlivých druhov zvarov použitých pri výrobe akumuláčnej nádrže č. 2. Analýza vplyvov imperfekcií jednoznačne poukázala na veľmi výrazné zvýšenie hladín namáhania. V ďalšom bola vykonaná pevnostná kontrola krytu strechy, ktorý je zaťažený vlastnou silou tiaže, silou tiaže snehu a náhodným zaťažením v zmysle STN 73 0035. Aj napriek vysokým hodnotám priehybu krycieho plechu z pevnostného hľadiska krycí plech vyhovuje.

Pretože pri pevnostnom výpočte strechy akumuláčnej nádrže boli zistené niektoré závažné porušenia koncepcie tvorby škrupinových konštrukcií, bola zvýšená pozornosť venovaná určeniu kritického zaťaženia strechy nie ako izotropnej skupiny ale ako škrupiny vystuženej radiálnymi rebrami a polygonálnymi prstencami. Výpočet jasne dokumentuje, že kritickým je miesto medzi druhým a tretím polygonálnym prstencom, kde je najnižšia hodnota kritického podtlaku. Pri nominálnych rozmeroch strešnej konštrukcie sa pri podtlaku 150 mm vodného stĺpca a pri zaťažení snehom dosahuje stav, pri ktorom dôjde k strate stability zlyhaním niekoľkých radiálnych rebier, čo je dokumentované haváriou strešnej konštrukcie.

Štúdiom tlakových pomerov nad hladinou pri zmene jej výšky z dôvodov plnenia resp. z dôvodu zmeny objemu kvapaliny v dôsledku zmeny jej teploty (až o 30°C) dochádza k vzniku podtlaku, ktorého veľkosť pri poklese hladiny je tým väčšia čím je objem vzduchového vankúša nad hladinou kvapaliny menší. Pretože existujúci systém regulácie výšky hladiny kvapaliny umožňuje preplňovanie nádoby a tým aj znižovanie objemu vzduchu nad hladinou, už pri poklese hladiny vody o 100 mm môže dôjsť k podtlaku až o hodnotu 25 kPa. Uvedená analýza jasne dokumentuje, že pri tlaku 101,5 kPa nad hladinou (t. j. pretlaku 1,5 kPa nad hladinou) a objeme $107,75 \text{ m}^3$ vzduchu (pary) nad hladinou (pri výške hladiny 9108 mm) pokles hladiny o 10 mm vyvolá zníženie tlaku o cca 1,5 kPa. Teda v prípade poklesu hladiny o ďalších 10 mm sa nad hladinou vytvára podtlak cca 150 mm vodného stĺpca, ktorý je v kombinácii so zaťažením snehom už medzným stavom.

Výpočtom metódou konečných prvkov (MKP) boli verifikované hodnoty napätí a posuvov určené analytickými metódami.

V súčasnosti autori pripravujú experimentálne overenie, ktoré bolo z klimatických dôvodov časovo posunuté a malo by byť realizované do termínu konferencie EAN 2005.

Literatúra

- [1] Křupka, V., Schneider, P.: Konstrukce aparátů. PC DIR Nakladatelství, Brno, 1998.
- [2] Voľmir, A. S.: Ustojčivosť uprugich system. GIFML, Moskva 1963.
- [3] Sabol, R., Jedinák, O.: Určenie hlavných parametrov a nedeštruktívna diagnostika „AN 2“ v prevádzka TEKO. Technická správa č. 54/04/Sa/Je, TEKO Košice, 2004.
- [4] Lizin, V. T., Pjatkin, V. A.: Projektirovanije tenkostennykh konstrukcij. Mašinostrojenie, Moskva 1976. str. 229-235.
- [5] Ponomarjev, S. D., kol.: Rasčety na pročnosť v mašinostrojenii, GNTIML, Moskva 1958, str. 185-255.

- [6] Kantorowitsch, S. B.: Die Festigkeit der Apparate und Maschinen für die chemische Industrie. VEB Verlag, Berlin 1955, str. 119-150.
- [7] Trebuňa, F., Šimčák, F.: Odolnosť prvkov mechanických sústav. Emilena, Košice 2004.
- [8] STN 73 1401 Navrhovanie oceľových konštrukcií. UNM, Bratislava 1998.
- [9] Girkmann, K.: Flächentraqwerke. Springer-Verlag, Wien 1956.
- [10] Trebuňa, F., Šimčák, F.: Pružnosť, pevnosť a plastickosť v strojárstve. EMILENA, Košice, 2005.
- [11] Trebuňa, F., Šimčák, F.: Pružnosť, pevnosť a plastickosť v príkladoch. EMILENA, Košice, 2005.
- [12] Juhas, P.: Komentár k norme STN 73 1401, ÚNaM Bratislava 2001.
- [13] ON 69 8119 Nadzemné uskladňovacie nádrže, MTP, VSS, Košice.
- [14] Trebuňa, F., Buršák, M.: Medzné stavy – kovy. Grafotlač Prešov, 2002.
- [15] Trebuňa, F. a kol.: Akumulačné nádrže, analýza namáhania, príčiny havárie a určenie zvyškovej životnosti po realizácii opatrení. Sjf TU V Košiciach , December 2004