

POSÚDENIE PEVNOSTNÝCH CHARAKTERISTÍK LNG NÁDRŽÍ NA PLAVIDLÁCH

ASSESSMENT OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF LNG TANKS ON THE VESSELS

Martin Jurkovič¹, Tomáš Kalina²

Anotácia: Vnútrozemská vodná doprava vsadila jednoznačne na využívanie dvojpaliivových systémov nafta – LNG. Širšiemu uplatneniu tohto paliva v doprave predchádza potreba vytvorenia fungujúceho trhu s čím úzko súvisí vyriešenie množstva problémov s logistikou nie len v rámci regiónu, ale aj vzhľadom na regióny produkcie ako aj na fyzikálne vlastnosti LNG súvisiace s jeho prepravou na veľké vzdialenosti. V súčasnosti platná legislatíva týkajúca sa prepravy nebezpečných tovarov (ADN) umožňuje na prepravu LNG po vnútrozemských vodných cestách využívať LNG tankery vybavené špeciálnymi zásobníkmi - nádržami na uchovávanie kryogénnych plynov. Podobné nádrže je možné využiť aj na dlhodobé skladovanie v centrálnych termináloch. Aj keď táto technológia nie je nová, s jej aplikáciou vo vnútrozemských plavidlách sú minimálne skúsenosti. Pri konštrukcii a umiestňovaní nádrží na existujúce plavidla je potrebné hľadať kompromisy zohľadňujúce jednak tvar nádrže a množstvo uskladneného plynu, ako aj izolačné a pevnostné vlastnosti.

Kľúčové slova: LNG, pevnostné charakteristiky, LNG nádrže, skladovanie

Summary: Inland water transport has clearly bent on the use of dual-fuel systems diesel - LNG. The wider use of this fuel in transport is preceded by the need to create a functioning market with the closest connection to solving many logistical problems not only within the region but also in terms of production regions as well as the physical properties of LNG related to its long-range transport. The current legislation on the transport of dangerous goods (ADN) allows the use of LNG tankers equipped with special containers - cryogenic storage tanks for the transport of LNG by inland waterways. Similar tanks can also be used for long-term storage at central terminals. Although this technology is not new, its application to inland vessels is on very low level. When constructing and placing tanks on existing vessels, it is necessary to seek compromises taking into account both the shape of the tank and the amount of stored gas, as well as the insulation and strength characteristics.

Key words: LNG, strenght characteristics, LNG tanks, storage

ÚVOD

Zemný plyn je po rope a čiernom uhľi najvyužívanejší zdroj energie. Je predpoklad, že jeho spotreba bude stúpať. Nie len celosvetovo, ale aj v Európskej únii. Vo svete budú spotrebu

¹ Ing. Martin Jurkovič, PhD., Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov, Katedra vodnej dopravy, Univerzitná 1, 01026 Žilina, Tel.: +421 41 513 3554,
E-mail: martin.jurkovic@fpedas.uniza.sk

² Ing. Tomáš Kalina, PhD., Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov, Katedra vodnej dopravy, Univerzitná 1, 01026 Žilina, Tel.: +421 41 513 3554,
E-mail: tomas.kalina@fpedas.uniza.sk

ťahať rozvíjajúce sa ekonomiky hlavne ázijských štátov a v EÚ trend podpory „zelených“ zdrojov energie a nízko uhlíkových palív.

Výhodou zemného plynu je možnosť jeho širokého využitia. Okrem tradičných technológií využívajúcich zemný plyn pri výrobe elektrickej energie a tepla sú tu možnosti hlavne v doprave.(11) Stále prísnejšie normy zamerané na emisie (hlavne CO₂, NO_x, SO_x, a pevné častice (PM)) z dopravy nútia dopravcov hľadať riešenia, ako tieto negatívne aspekty eliminovať zohľadňujúc nie len ekologickú ale aj ekonomickú stránku. V tomto smere asi najperspektívnejšie riešenie ponúkajú technológie využívajúce alternatívne palivá. V porovnaní s konvenčnými palivami, skvapalnený zemný plyn (LNG) dokáže znížiť produkciu NO_x o 85-90 %, SO_x, PM takmer o 100 % a CO₂ o 15-20 %. (5)

Dopracovia v cestnej doprave sa s týmto problémom stretávajú už niekoľko desaťročí. Prvá európska emisná norma Euro 1 začala platiť od roku 1993. Už splnenie tejto normy si vyžadovalo zásadnejšiu úpravu pohonnej jednotky inštaláciou riadeného trojcestného katalyzátora a lambda sondy. V porovnaní so stavom pred roku 1993, v súčasnosti platné emisné normy Euro 6 priniesli redukciu množstva PM o 99 % a NO_x o 98 %. (6)

Prvá európska legislatívna úprava emisných limitov týkajúca sa plavidiel vnútrozemskej dopravy sa objavila až v roku 2004. Smernica 2004/26/ES dopĺňala smernicu 97/68/ES pričom upravovala emisie nových motorov inštalovaných na vnútrozemských plavidlách v časovom horizonte do konca roku 2008. Reakcia na vývoj v cestnej doprave priniesla ďalšie úpravy v podobe smerníc 2010/26/EÚ a 2012/46/EÚ zameraných hlavne na úpravu emisii NO_x.(3) Posledná legislatívna úprava bola schválená Európskym parlamentom v júli 2016. V rámci etapy V sprísňuje emisné limity spaľovacích motorov necestných pojazdných strojov a teda aj lodí vnútrozemskej plavby. Tieto opatrenia sú sprevádzané rozsiahlejšou podporou výskumu v oblasti alternatívnych palív.

1. PREPRAVA A SKLADOVANIE LNG

Fyzikálne a chemické vlastnosti LNG ako aj jeho špecifické vlastnosti na skladovanie v nádržiach určených na prepravu na plavidlách a plávajúcich/statických termináloch sú odlišné ako u nádrží na uskladnenie fosílnych palív. Dimenzovanie a konštrukcia LNG nádrží musí byť v súlade s legislatívou EÚ, s predpisom ADN a musí spĺňať príslušné legislatívne a bezpečnostné normy. (10)

Logistika prepravy LNG po vnútrozemských vodných cestách je komplexný reťazec operácii, na ktoré je potrebné brať zreteľ, a teda je potrebné definovať prvky (priebeh) tohto reťazca, od bodu jeho vzniku až do momentu ukončenia, t. j. jeho uskladnenia, resp. ďalšieho využitia.

Zemný plyn sa v kvapalnom skupenstve v prírode takmer nevyskytuje. Pre získanie LNG je nutné vyťažený zemný plyn zbaviť nečistôt a následne skvapalniť v skvapalňovacej stanici. Po skvapalnení je plyn prečerpaný do tankera a prepravený do miesta určenia - terminálu, kde je opätovne prečerpaný do zásobníkov, kde dochádza k jeho postupnému odparovaniu do plynovodných potrubí, alebo je ďalej skladovaný v špecializovaných kryogénnych nádržiach v tekutom stave. (9)

2. CHEMICKÉ A FYZIKÁLNE VLASTNOSTI LNG

Zemný plyn je bezfarebný, sám o sebe nezapáchajúci, horľavý plyn. Patrí do skupiny vykurovacích plynov. Využíva sa na vykurovanie, ohrev a varenie vody v elektrárňach, teplárňach, v kogeneračných jednotkách, ako aj v doprave ako pohon motorových vozidiel.

Zemný plyn sa môže vyskytovať v dvoch formách:

- CNG (Compressed Natural Gas) – stlačený plyn pri tlaku 200 barov,
- LNG (Liquefied Natural Gas) – skvapalnený plyn pri teplote -162°C (-259°F) pri atmosferickom tlaku.

Skvapalnený zemný plyn (Liquefied Natural gas) je zemný plyn v kvapalnom skupenstve. Hlavnou výhodou LNG je fakt, že zaujíma cca 600 krát menší objem ako plynný zemný plyn, čo je jeho hlavná výhoda pri skladovaní a v doprave. Pre uchovanie LNG v kryogénnych nádržiach je potrebné zabezpečiť ich dostatočnú pevnosť a odolnosť voči nízkym teplotám. (1)

Hlavné parametre LNG sú:

- chemické zloženie,
- bod varu,
- hustota a špecifická hmotnosť,
- horľavosť,
- teplota vznietenia a horenia.

LNG je z cca 90-100 % tvorený metánom a v závislosti od ťažobnej lokality obsahuje zvyšky etánu, propánu, vyšších uhľovodíkov, dusíku a ďalších plynov. Jeho výhrevnosť sa pohybuje okolo 55 MJ/kg, vyjadrené v litroch je to cca 22 MJ/l. (7) Podrobnejšia špecifikácia základných chemických vlastností je v tabuľke č. 1.

Tab. 1- Chemické zloženie LNG

Chemická látka	Chemický vzorec	Najnižšie hodnoty	Najvyššie hodnoty
Metán	CH ₄	87 %	99 %
Etán	C ₂ H ₆	<1 %	10 %
Propán	C ₂ H ₈	>1 %	5 %
Bután	C ₄ H ₁₀	>1 %	>1 %
Dusík	N ₂	0,1 %	1 %
Ostatné uhľovodíky	rôzne	-	-

Zdroj: (1,2)

Skôr ako dôjde k skvapalneniu zemného plynu, je nutné odstrániť jeho nežiadúce prímеси.

Tab. 2 - Nečistoty v LNG

Prímеси	Jednotka	Množstvo
Voda	ppm obj.*	1
Oxid uhličitéy	ppm obj.	1000
Zlúčeniny síry	mg/Nm ^{3**}	30
Ortuť	mg/Nm ³	10
Aromatické uhl'ovodíky	ppm obj.	10

Zdroj: (1,2)

*označuje jednu objemovú časť v milióné **označuje miligram na normálny meter kubický (pri normálnych podmienkach – 101 325 Pa a 0°C)

3. POSÚDENIE PEVNOSTNÝCH CHARAKTERISTÍK LNG NÁDRŽÍ

Riešenie pevnostných charakteristík LNG nádrží vieme počítať metódou konečných prvkov (MKP), kde sa vyhodnocujú napätia použitím HMM (Huber, von Mises, Hencky) hypotézy pevnosti, t. j. hypotézy maximálnej mernej deformačnej energie potrebnej pre zmenu tvaru. Táto hypotéza dáva najpresnejšie hodnoty a je najčastejšie používaná. Využíva sa vo výpočtových softvéroch, kde je redukované napätie podľa HMM hypotézy pevnosti nazývané Von Missesovo napätie. Je vhodná pre húževnaté materiály. Kritériom nebezpečného stavu je maximálna merná deformačná energia potrebná pre zmenu tvaru $\lambda_t \max$. Pevnostná hypotéza HMM predpokladá, že nebezpečný stav nastane vtedy, keď merná deformačná energia pre zmenu tvaru danej napätosti prekročí hodnotu mernej deformačnej energie pre zmenu tvaru priamkovej napätosti, pri ktorej nastáva porucha. Požaduje splnenie nerovnosti:

$$\lambda_{t \max} \leq \lambda_D. \quad (1)$$

Nebezpečný stav nastáva pri mernej deformačnej energii pre zmenu tvaru:

$$\lambda_D = \frac{1+\mu}{3E} \sigma_D^2. \quad (2)$$

Kde λ_D je maximálna dovolená deformačná energia, μ je poissonova konštanta, E Youngov modul pružnosti a σ_D je maximálne dovolené napätie. Pričom platí:

$$\lambda_{t \max} = \frac{1+\mu}{3E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 \cdot \sigma_3 - \sigma_2 \cdot \sigma_3). \quad (3)$$

Parametre $\sigma_{1,2,3}$ sú hlavné napätia v jednotlivých smeroch. Dosadením vzťahov (2) a (3) do (1) a úpravou dostávame pevnostnú podmienku podľa HMM hypotézy pevnosti pre priestorovú napätosť:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 \cdot \sigma_3 - \sigma_2 \cdot \sigma_3} \leq \sigma_D. \quad (4)$$

Pre rovinnú napätosť platí vzťah:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \leq \sigma_D. \quad (5)$$

Pre rovinnú napätosť danú normálovým a šmykovým napätím τ platí:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_D. \quad (6)$$

Pomocou HMM hypotézy pevnosti je možné vypočítať redukované napätie aj bez znalosti hlavných normálových napätí. Redukované napätie možno priamo vypočítať pre napätosť danú 6 nezávislými zložkami napätia:

$$\sigma_{red} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \leq \sigma_D, \quad (7)$$

kde $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ sú normálové napätia v smeroch v X, Y, Z a $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ sú šmykové zložky napätia.

Maximálne dovolené napätie môžeme zistiť z vzťahu:

$$\sigma_D = \frac{Re}{k}. \quad (8)$$

Kde Re je medza klzu pre daný material, σ_D je maximálne dovolené napätie a k je koeficient bezpečnosti pre zvolený material zväčša určený príslušnou normou.

V prípade LNG nádrží, ktoré sú predmetom tohto článku, sa pri určovaní koeficientu bezpečnosti vychádzalo z normy IMO. Táto norma predpisuje koeficient bezpečnosti $k = 1,5$ a to pre všetky zaťažovacie stavy určené touto normou.(8)

4. VÝSLEDKY ZAŤAŽOVACIEHO TESTOVANIA

Ako už bolo vyššie spomenuté, zvolený materiál vonkajšieho a vnútorného plášťa je nerezová oceľ s označením AISI 304. Pre podpery a medzi-distančné bloky bol zvolený plastový materiál polykarbonát a to pre jeho dobrý pomer medzi pevnosťnými a izolačnými vlastnosťami. Medzné vlastnosti materiálu sú závislé od prevádzkovej teploty.

Na geometrickom modeli bola za účelom výpočtu pomocou MKP vytvorená sieť. Vonkajší a vnútorný plášť bol osieťovaný pomocou škrupinových elementov, pri zvyšných komponentoch zostavy (plastové distančné bloky a dorazy, podstavce pod nádržou) boli využité objemové elementy.

Pri prvých troch zaťažovacích stavoch je využitá polovičná symetria. Model obsahoval 1 939 766 elementov. V prípade 2. zaťažovacieho stavu využitie symetrie už nebolo možné a to z dôvodu nesymetrického zaťaženia. V tomto prípade bolo nevyhnutné počítať s celým modelom a počet elementov sa zvýšil na 3 914 394.

Po dosadení všetkých potrebných parametrov ako je zaťaženie, okrajové podmienky a materiálový model, bolo pre zaťažovacie stavy 1-4 dosiahnuté rozloženie napätíových polí tak, aby ani v jednom z týchto prípadov neprekročilo maximálne napätie dovolené napätie, ktoré udáva IMO norma.

ZÁVER

Vo všetkých štyroch zaťažujúcich stavoch vznikali maximálne napätia na totožných miestach v prípade vonkajšieho plášťa podobne ako v prípade vnútorného plášťa. Pri vonkajšom plášti to bolo na čelnej strane, koncentrátor napätia by bolo možné odstrániť použitím iného typu distančného bloku. Na vnútornom plášti sa koncentrátor napätia vždy vyskytol v oblasti plniaceho hrdla. Pri daných rozmeroch LNG nádrže je v konštrukcii táto časť najviac namáhaná a považuje sa za najkritickejšie miesto. V budúcnosti by bolo vhodné optimalizovať oblasť plniaceho hrdla, čo znamená zlepšiť pevnostné podmienky pri zachovaní čo najmensej tepelnej priepustnosti.

Príspevok vznikol na základe podpory výskumnej úlohy inštitucionálneho výskumu: LNG nádrže na plavidlách a ich konštrukčné charakteristiky.

POUŽITÁ LITERATURA

- (1) BARTA, D., MRUZEK, M., KENDRA, M., KORDOS, P., KRZYWONOS, L.: Using of non-conventional fuels in hybrid vehicle drives. In: Advances in Science and Technology Research Journal, Lublin University of Technology, Volume 10, Issue 32, 2016. pp. 240 – 247. ISSN 2299-8624.
- (2) BUIL, R.M., HERNANDO D.V. Comparison of Heat Insulations for Cryogenic Tankers Using Analytical and Numerical Analysis. Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering, 2013. 17 p.
- (3) European Commission – SEVESO III. Available on: <http://ec.europa.eu/environment>
- (4) European Committee for Standardization (CEN). Available on: <http://www.cen.eu/Pages/default.aspx>
- (5) GIIGNL. Basic Properties of LNG. [online]. France. 9 p. Available on: <http://www.giignl.org>.
- (6) GIIGNL. Managing LNG Risks. [online]. France. 8 p. Available on: <http://www.giignl.org>.
- (7) HOFFMAN, A.: The Thermal Conductivity of Cryogenic Insulation Materials and Its Temperature Dependence. Cryogenics. 46, 2006. 815-824.
- (8) IMO Guidance on the continued use of existing IMO type portable tanks and road tank vehicles for the transport of dangerous goods. Ref.: T3/1.01 DSC/Circ.12 11 November 2003.
- (9) SKRUCANY, T., KENDRA, M., SARKAN, B., GNAP, J.: Software simulation of an energy consumption and GHG production in transport. In: Tools of transport telematics: 15th international conference on Transport systems telematics, TST 2015: revised selected papers: Wrocław, Poland, April 15-17, 2015. - Cham: Springer, 2015. pp. 151-160. ISBN 978-3-319-24576-8.

- (10) STOPKA, O., KAMPF, R.: Determining the most suitable layout of space for the loading units' handling in the maritime port. *Transport*, 12 April 2016. pp. 1-11. ISSN 1648-4142. DOI: 10.3846/16484142.2016.1174882.
- (11) GALIERIKOVA, A., SOSEDOVA, J. Environmental aspects of transport in the context of development of inland navigation. In: *Ekológia (Bratislava)*. - ISSN 1335-342X. - Vol. 35, iss. 3 (2016), pp. 279-288.