

OCENE VPLIVNIH OBMOČIJ ZA DOLOČANJE VARNOSTNIH RAZDALJ PRI OBRATIH UTEKOČINJENEGA NAFTNEGA PLINA

ASSESSMENT OF INFLUENCE ZONES FOR DETERMINING SAFE DISTANCES AT LOCATIONS WITH LIQUEFIED PETROLEUM GAS

UDK 614.8:622.323

Zorka Novak Pintarič

dr., Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Smetanova 17, Maribor, zorka.novak@um.si

Povzetek

Prispevek prikazuje, kako modelirati izpuste utekočinjenega naftnega plina (UNP) skladno s scenariji, ki jih predpisuje zakonodaja. Lokacije skladišč nevarnih snovi morajo biti izbrane premišljeno, da bi bili ljudje v primeru požarov, eksplozij ali nevarnih koncentracij čim manj ogroženi. Z modeliranjem scenarijev nezdod lahko napovemo velikost območij z določeno stopnjo ogroženosti. Napovedana so vplivna območja nadtlaka za eksplozijo z različnimi modeli v programu *Phast*. Največji vpliv na izračunana območja imajo vremenske razmere, premer odprtine in smer iztekanja, orientacija posode in agregatno stanje izpusta. Za skladišča z velikimi navpičnimi rezervoarji utekočinjenega naftnega plina podajamo približne razdalje, ki določajo ožje, širše in najširše vplivno območje, na temelju katerih umeščamo objekte različne stopnje ranljivosti v okolico takih obratov.

Abstract

The article presents the modelling of the liquefied petroleum gas (LPG) releases according to the scenarios predicted by legislation. Storage locations of dangerous goods should be selected with care in order to minimize the hazards to people in the case of fire, explosion or dangerous concentrations. The affected areas can be predicted by modelling the accident scenarios. The influence zones for the explosion overpressure are predicted by applying various models available within *Phast* software. The most influential parameters are weather conditions, hole diameter, direction of release, vessel orientation and physical state of release. Those approximate distances are determined for locations with large vertical LPG vessels that define narrow, wider and the widest effect zones. Based on these distances, various vulnerable objects can be placed in the surroundings of such locations.

Uvod

Obrati za skladiščenje in predelavo nevarnih snovi so zaradi pomanjkanja prostora in zniževanja stroškov pogosto v bližini naseljenih območij. Čeprav je varnost temeljna skrb pri umeščanju takih obratov v okolje, obstaja možnost za nezdode, kot sta požar in eksplozija. Nizka gostota prebivalstva v okolici zmanjšuje tveganje za večjo škodo in človeške žrtve ob nezdodi, zato je pomembno, da so taki obrati dovolj oddaljeni od območij, na katerih je večje število ljudi. Sodobna paradigma načrtovanja procesov temelji na preprečevanju nezdod in manj na večji uporabi zaščitnih varnostnih sistemov. Pomembno je ustrezno oceniti posledice in obseg mogočih nezdod ter na podlagi tega načrtovati varne procese oziroma obrate ter njihovo umestitev v prostor (Kletz, 2010).

Najpogosteje uporabljeni pristopi za določanje varnostnih razdalj v obratih z nevarnimi snovmi so razvrščanje nevarnih območij, uporaba minimalnih varnostnih razdalj in modeliranje scenarijev nezdod. Prva metoda razvršča

nevarna območja v posamezne razrede predvsem glede na prisotnost eksplozivnih snovi na območju eksplozivnih koncentracij in virov vžiga. Pri razvrstitvah v cone 0, 1 in 2 je na primer varno območje tisto, ki ni razvrščeno v nobeno izmed teh območij (Lees, 2003).

Druga metoda temelji na varnostnih razdaljah, ki jih podajajo različni standardi in predpisi za skladiščenje goriv, vnetljivih tekočin, utekočinjenega naftnega plina (UNP) itn. Pri tem gre za razdalje med posameznimi procesnimi enotami in deli obrata, pa tudi za razdalje do okolice. Britanski izvršilni organ za zdravje in varnost podaja priporočene razdalje za majhne in velike rezervoarje z utekočinjenim naftnim plinom (HSE, 2015). Po teh priporočilih naj bi bil velik rezervoar od meje obrata oddaljen vsaj 15 metrov.

Tretja metoda temelji na modeliranju scenarijev nezdod in napovedovanju njihovih posledic, pri čemer določamo razdalje, na katerih je dosežena določena raven toplotnega sevanja pri požarih, nadtlaka pri eksplozijah in

koncentracij pri izpustih strupenih in zdravju škodljivih snovi. Tako je na primer za nadtlak pri eksploziji določena vrednost 20 milibarov za šole, 40 milibarov za stanovanjske objekte, 700 milibarov za zaščiteno nadzorno sobo ipd. (Mecklenburgh, 1985). Standard EN 60079 razvršča eksplozijsko ogrožene prostore glede na razdaljo, na kateri povprečna koncentracija plina presega spodnjo mejo eksplozivnosti (SIST, 2016).

V Sloveniji je za umeščanje obratov v uporabi Uredba o merilih za določitev najmanjše razdalje med obratom in območji, na katerih se zadržuje večje število ljudi, ter infrastrukturo (Vlada Republike Slovenije, 2008). Uredba določa, da je treba določiti vplivna območja učinkov, do katerih bi prišlo ob izpustu nevarnih snovi. Pri tem so mogoči učinki toplotno sevanje pri požarih, nadtlak pri eksplozijah in koncentracije pri izpustih strupenih in zdravju škodljivih snovi. Uredba razdeli vplivna območja na tri razrede:

- prvi razred pomeni ožje vplivno območje, določeno s toplotnim sevanjem 5 kW/m^2 ali več, nadtlakom, enakim ali večjim 140 milibarov, ali s koncentracijo, večjo ali enako vrednosti ERPG-3;
- drugi razred pomeni širše vplivno območje, določeno s toplotnim sevanjem med 5 in 3 kW/m^2 , nadtlakom med 140 in 50 milibari ali s koncentracijo med ERPG-3 in ERPG-2;
- tretji razred pomeni najširše vplivno območje, določeno s toplotnim sevanjem med 3 in $1,8 \text{ kW/m}^2$, nadtlakom med 50 in 20 milibari ali s koncentracijo med ERPG-2 in ERPG-1.

Uredba z matriko ogroženosti določa sprejemljivo ogroženost glede na razred vplivnega območja in stopnjo ranljivosti objektov. Tako so na ožjem vplivnem območju sprejemljivi le objekti manjše ranljivosti, na primer nestanovanjske stavbe, na širšem vplivnem območju objekti manjše in srednje ranljivosti, na primer manjše stanovanjske stavbe in manjše nestanovanjske stavbe, na najširšem vplivnem območju pa objekti manjše, srednje in večje ranljivosti, na primer stanovanjske stavbe srednje velikosti. Objekti največje ranljivosti, na primer večje stanovanjske stavbe, nestanovanjske stavbe za izobraževanje, znanstvenoraziskovalno delo, šport in zdravstvo, ne bi smeli biti na vplivnih območjih.

Uredba v prilogi 1 okvirno predpisuje scenarije večjih nesreč, na primer:

- izpust nevarne snovi iz procesne ali skladiščne posode ali transportne posode, ki se polni ali prazni v obratu, pri čemer je predpisano trajanje izpusta 15 minut iz razpoke s premerom 100 milimetrov;
- iztekanje iz cevovoda v trajanju 15 minut, pri čemer je premer cevovoda določen z večjo vrednostjo izmed 250 milimetrov ali 50 odstotki prereza največjega cevovoda v obratu.

Zgoraj opisani pogoji so začetne smernice za določanje scenarijev v realnem industrijskem obratu. Toda komercialni programi za simulacijo izpustov nevarnih

snovi ponujajo veliko razmeroma podobnih scenarijev, ki zahtevajo veliko specifičnih vhodnih podatkov in lahko kot rezultat izračunajo različno velika vplivna območja. Nujni so nadaljnja navodila in informacije pri uporabi uredbe, da bi dosegli vsaj približno poenotenje modeliranja izpustov.

V Sloveniji se med kritično infrastrukturo uvrščajo tudi skladišča tekočih goriv in plinov, ki so pogosto umeščena v bližino stanovanjskih objektov in cest (Kopač, 2010). Umeščanje takih objektov v prostor olajšajo modeli ocene tveganja, kot je na primer model, ki so ga predlagali Bajčar in sodelavci leta 2013 za merilne in merilno-regulacijske postaje za zemeljski plin. V tem prispevku obravnavamo skladišča utekočinjenega naftnega plina in na primeru izpustov tega plina opisujemo, katere modele je smiselno izbrati za oceno vplivnih območij eksplozije v programu *Phast* 6.5 (DNV, 2006), ki bi ustrezali predpisanim scenarijem v uredbi in na podlagi katerih bi lahko izvedli ustrezno umeščanje skladišč utekočinjenega naftnega plina v okolje. Navajamo, katere vhodne podatke je treba priskrbeti za posamezni scenarij in kakšne so napovedane velikosti vplivnih območij. Prav tako podajamo rezultate analiz občutljivosti za nekatere vhodne podatke, s čimer želimo identificirati najpomembnejše vplivne parametre, ki bi jih bilo smiselno poenotiti pri definiranju scenarijev za oceno najmanjših razdalj med obratom in območji, na katerih se zadržuje večje število ljudi, ter infrastrukturo. Za obrate z večjimi rezervoarji utekočinjenega naftnega plina podajamo približne razdalje ožjega, širšega in najširšega vplivnega območja.

Opredelitev scenarijev izpustov utekočinjenega naftnega plina

Programi za modeliranje posledic izpustov nevarnih snovi ponujajo različne modele za definiranje scenarijev. Pri preprostejših programih je modelov manj in so preprostejši, pri zahtevnejših, praviloma tudi dražjih, je izbira modelov velika, s čimer se je mogoče bolje približati realni sliki nezgode, ki jo pričakujemo v nekem obratu. Program *Phast* (DNV, 2006) spada med zmogljivejše in ponuja pester nabor modelov za definiranje scenarijev izpustov, na primer:

- katastrofalni izpust, pri katerem se predpostavlja nenadna izguba celotne vsebine posode in velja za pesimističen, slab scenarij;
- prelom cevi, pri katerem gre za iztekanje iz cevi določene dolžine in premera, ki je priključena na posodo;
- iztekanje, puščanje iz posode, ki predpostavlja luknjo v steni posode, iz katere izteka snov;
- izpust z določenim trajanjem predpostavlja izgubo celotne vsebine posode v določenem času, na primer 10 minut, in prav tako velja za pesimističen, slab scenarij;
- izpust skozi varnostni ventil ali loputo;
- izpust iz dolgega cevovoda.

V obratih, v katerih skladiščijo in pretakajo utekočinjeni naftni plin, je glede na Uredbo smiselno obravnavati iztekanje utekočinjenega naftnega plina iz večje skladiščne posode, iz železniške cisterne in cevovoda. V ta namen smo uporabili naslednje modele:

- a) Model *prelom cevi* predstavlja iztekanje snovi iz krajše cevi, priključene na rezervoar. Model izračuna padec tlaka skozi cev glede na ventile, kolena, spojke in vozlišča. Glede na to izračuna pretok iztekajočega fluida in nato disperzijo v ozračje skladno z danimi vremenskimi razmerami. Scenarij lahko modeliramo kot časovno spremenljiv ali nespremenljiv izpust. Časovno spremenljiv izpust upošteva, da se med praznjenjem rezervoarja pretok iztekajoče tekočine zmanjšuje. Pri časovno nespremenljivem izpustu se za izračune uporabi konstantna, začetna vrednost pretoka. Ker je pretok na začetku iztekanja največji, so izračunana vplivna območja pri časovno nespremenljivem pretoku praviloma večja kot pri spremenljivem.
- b) Model *iztekanje* predstavlja iztekanje skozi luknjo v steni posode. Model uporablja izračun skozi odprtino ob predpostavki, da ni izgub zaradi trenja, ko fluid teče skozi posodo proti odprtini. Modeliranje lahko poteka s časovno spremenljivim ali konstantnim pretokom.
- c) Model *dolg cevovod* je primeren za daljše cevi, pri katerih je razmerje med dolžino in premerom bistveno večje od 300. Model omogoča modeliranje iztekanja na poljubnem mestu cevovoda in skozi poljubno velikost odprtine, torej od puščanja skozi majhno luknjo do popolnega preloma cevovoda. Upošteva možnost zaprtja ventilov v določenem času, tako da snov v času od poškodbe cevi do zaprtja ventilov izteka z obratovalnim pretokom, po zaprtju pa izteče še preostala količina snovi, ki je zadržana v cevovodu med dvema ventiloma.

Za obravnavane scenarije smo izračunavali vplivna območja za eksplozijo oblaka plina, določena z nadtlaki 140, 50 in 20 milibarov, kot jih predpisuje Uredba. Izračunane razdalje predstavljajo maksimalne radialne razdalje, merjene od točke izpusta snovi. Obravnavane scenarije smo izvedli za poletne in zimske vremenske razmere (preglednica 1). Na disperzijo izpuščene snovi najbolj vpliva turbulentnost ozračja, ki jo opisujemo z

Parameter	Enota	Poleti	Pozimi
Hitrost vetra	m/s	2	1
Stabilnost ozračja po Pasquillu	–	D	F
Temperatura zraka in tal	°C	25	2
Relativna vlažnost	%	75	60
Sončno sevanje	kW/m ²	0,5	0,5
Parameter površinske hrapavosti	–	0,25*	0,25*
*višja drevesa, razpršene velike ovire			
Preglednica 1: Podatki za vremenske razmere Table 1: Data for weather conditions			

Parameter	Enota	Vrednost
Sestava: propan		35
n-butan	% (masni)	65
Spodnja meja vnetljivosti	% (volumski)	1,702
Zgornja meja vnetljivosti	% (volumski)	9,201
Preglednica 2: Podatki za utekočinjen naftni plin (UNP) Table 2: Data for Liquefied Petroleum Gas (LPG)		

razredi stabilnosti po Pasquillu (American Institute of Chemical Engineers, 2000). Za poletne razmere smo izbrali razred D, ki pomeni nevtralne razmere za disperzijo ob zmerni oblačnosti in vetru. V zimskih razmerah je izbrana stabilnost ozračja F, ki predstavlja stabilne nočne razmere z nekaj oblačnosti in nizko hitrostjo vetra ter posledično zelo počasno disperzijo snovi. Sestava in lastnosti utekočinjenega naftnega plina so prikazane v preglednici 2.

Rezultati modeliranja izpustov za utekočinjen naftni plin

S programom *Phast 6.5* (DNV, 2006) smo modelirali scenarije izpustov utekočinjenega naftnega plina iz velikega navpičnega rezervoarja, železniške cisterne in cevovoda ter izvedli analize občutljivosti, s katerimi smo preverili, kakšen učinek imajo določeni vhodni podatki na napovedana vplivna območja nadtlaka eksplozije.

Izpust iz skladiščne posode

V tem scenariju je predpostavljen izpust iz navpičnega rezervoarja prostornine 250 m³, v katerem je 100 t utekočinjenega naftnega plina, skozi odprtino s premerom 100 mm. Dolžina cevi od posode do točke preloma je 0,5 m, do izpusta pride pri dnu rezervoarja 1 m nad tlemi. Uporabili smo modela prelom cevi (preglednica 3) in iztekanje (preglednica 4) s spremenljivim in konstantnim pretokom v poletnih in zimskih razmerah.

V preglednicah 3 in 4 je najprej prikazan izračunani pretok iztekajoče snovi in nato največje vplivne razdalje, pri čemer so dosežene vrednosti nadtlakov 20, 50 in 140 milibarov. Zadnja vrstica prikazuje razdaljo od mesta izpusta do lokacije vira vžiga, pri kateri je program izračunal največja vplivna območja za navedene vrednosti nadtlakov.

Model prelom cevi daje pri izpustih iz skladiščne posode manjša vplivna območja kot model iztekanje, saj upošteva padce tlaka v ceveh. Posledično je pretok iztekanja nižji, s tem pa tudi vplivna območja. Zimske vremenske razmere dajejo večja vplivna območja zaradi slabše disperzije plina v ozračju in večjega pretoka iztekanja.

	Spremenljiv izpust			Nespremenljiv izpust	
	Enota	Poleti	Pozimi	Poleti	Pozimi
Pretok	kg/s	27,6*	47,4*	81,8	76,2
Eksplzija, nadtlak 20 milibarov	m	453	1184	816	1432
Eksplzija, nadtlak 50 milibarov	m	357	812	643	1022
Eksplzija, nadtlak 140 milibarov	m	308	630	556	815
Razdalja do vira vžiga z največjim vplivnim območjem	m	260	430	470	610
*povprečna vrednost					
Preglednica 3: Rezultati za skladiščno posodo (model prelom cevi)					
Table 3: Results for storage tank (line rupture model)					

	Spremenljiv izpust			Nespremenljiv izpust	
	Enota	Poleti	Pozimi	Poleti	Pozimi
Pretok	kg/s	109,5*	80,2*	119,7	89,7
Eksplzija, nadtlak 20 milibarov	m	966	1376	991	1492
Eksplzija, nadtlak 50 milibarov	m	758	974	781	1065
Eksplzija, nadtlak 140 milibarov	m	654	791	675	862
Razdalja do vira vžiga z največjim vplivnim območjem	m	550	510	570	630
*povprečna vrednost					
Preglednica 4: Rezultati za skladiščno posodo (model iztekanje)					
Table 4: Results for storage tank (leak model)					

Časovno spremenljiv izpust vodi do manjših vplivnih območij kot model s konstantnim pretokom, saj prvi upošteva, da se pretok ob praznjenju rezervoarja manjša, medtem ko je pri nespremenljivem modelu pretok ves čas enak začetni, največji vrednosti, ki je dosežena ob začetku iztekanja. Razlika med obema načinoma je še posebno velika pri visokih navpičnih posodah, zato je v teh primerih priporočena uporaba modelov, ki upoštevajo spreminjanje pretoka med iztekanjem.

Izpust iz železniške cisterne

V tem scenariju je predpostavljen izpust iz železniške cisterne s prostornino 120 m³, v kateri je 50 t utekočinjenega naftnega plina, skozi odprtino s premerom 100 mm. Dolžina cevi od posode do točke preloma je 0,5 m, do izpusta pride pri dnu rezervoarja 1 m nad tlemi. Preglednica 5 prikazuje rezultate modela prelom cevi, preglednica 6 pa rezultate modela iztekanje.

	Spremenljiv izpust			Nespremenljiv izpust	
	Enota	Poleti	Pozimi	Poleti	Pozimi
Pretok	kg/s	9,8*	4,8*	9,8	4,6
Eksplzija, nadtlak 20 milibarov	m	262	382	262	371
Eksplzija, nadtlak 50 milibarov	m	206	261	206	251
Eksplzija, nadtlak 140 milibarov	m	178	200	178	190
Razdalja do vira vžiga z največjim vplivnim območjem	m	150	140	150	130
*povprečna vrednost					
Preglednica 5: Rezultati za železniško cisterno (model prelom cevi)					
Table 5: Results for railroad car tank (line rupture model)					

	Spremenljiv izpust			Nespremenljiv izpust	
	Enota	Poleti	Pozimi	Poleti	Pozimi
Pretok	kg/s	103,5*	67,3*	107,9	71,2
Eksplzija, nadtlak 20 milibarov	m	936	1226	941	1211
Eksplzija, nadtlak 50 milibarov	m	734	851	741	838
Eksplzija, nadtlak 140 milibarov	m	631	695	640	707
Razdalja do vira vžiga z največjim vplivnim območjem	m	530	410	540	420
*povprečna vrednost					
Preglednica 6: Rezultati za železniško cisterno (model iztekanje)					
Table 6: Results for railroad car tank (leak model)					

Vplivna območja za izpust iz železniške cisterne so manjša kot pri izpustih iz navpičnega rezervoarja s prostornino 250 m³ zaradi nižjih pretokov iztekanja, ki so posledica vodoravne postavitve cisterne.

Razlike med časovno spremenljivim in nespremenljivim izpustom so manjše kot pri navpični posodi, saj je pri železniški cisterni vpliv hidrostatičnega tlaka manjši zaradi nižje višine tekočine v cisterni. Začetna vrednost pretoka, s katero se računajo vplivna območja z nespremenljivim modelom, zato ni bistveno višja od povprečne vrednosti pri spremenljivem modelu. Pri manjših vodoravnih rezervoarjih bi torej lahko uporabili enostavnejše modele s konstantnim pretokom iztekanja in se tako izognili uporabi kompleksnejših modelov.

Enako kot pri velikem navpičnem rezervoarju tudi pri železniški cisterni dobimo največja območja vpliva z uporabo modela iztekanje v zimskih razmerah. Model prelom cevi je sicer v primeru železniške cisterne realnejši za prakso, saj je verjetneje, da bi prišlo do iztekanja iz cevi zaradi napake ob pretakanju kot do iztekanja skozi luknjo v steni posode, ki bi nastala na primer zaradi korozije. V tem primeru bi namreč opazili iztekanje pri bistveno manjši velikosti razpoke, kot znaša premer 100 mm.

Izpust iz cevovoda

Za modeliranje izpusta iz cevovoda smo uporabili model dolg cevovod s predpostavljeno dolžino cevi 100 m in premerom 250 mm. Predpostavili smo, da je masni pretok v cevovodu ob normalnem obratovanju 3 kg/s in da bi se ob poškodbi cevovoda črpalka ustavila čez 15 minut ter prekinila pretok v cevovodu. Glede na dimenzije cevovoda bi v tem času izteklo 5357 kg utekočinjenega naftnega plina.

Primerjavo smo izvedli še z modelom izpusta celotne množine snovi v določenem času in z eksplozijskim modelom TNT. Model z določenim časom predpostavlja izpust celotne količine snovi v definiranem času. V našem primeru se 5357 kg utekočinjenega naftnega plina sprosti iz cevovoda v 900 sekundah. Poenostavljen eksplozijski model TNT Explosion ne računa disperzije plina, temveč predpostavi eksplozijo na mestu izpusta. Rezultate vseh treh modelov prikazuje preglednica 7.

Model dolg cevovod je namenjen natančnejšemu modeliranju izpustov iz cevovodov, v katerih je razmerje med dolžino in premerom bistveno večje od 300. Za določitev količine izpuščene nevarne snovi je treba poznati pretok v cevovodu ob normalnem obratovanju, dimenzije cevovoda in predviden čas, v katerem bi ustavili dotok tekočine v cevovod. Primerljive rezultate smo dobili tudi z enostavnejšim modelom določen čas, v katerem se vsa količina nevarne snovi sprosti v vnaprej določenem času. Eksplozijski model TNT daje večja vplivna območja kot druga dva uporabljena modela, ker predpostavlja eksplozijo celotne količine snovi na mestu izpusta. Vremenske razmere pri tem modelu na vplivna območja nimajo vpliva, saj gre za takojšnjo eksplozijo na mestu izpusta brez disperzije plina v ozračje.

Analize občutljivosti

Pri uporabi programa *Phast* je treba za posamezne modele definirati vrsto vhodnih podatkov, katerih vrednosti ni mogoče vedno enostavno določiti, zato smo preverili vplive nekaterih vhodnih podatkov na vplivna območja eksplozije oblaka plina.

Vpliv premera cevi

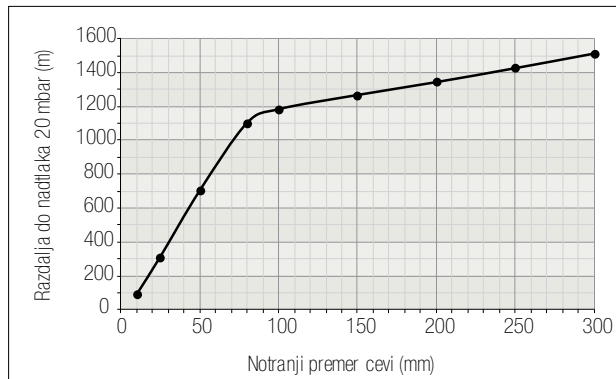
Za študij vpliva premera cevi smo izbrali scenarij izpusta iz velikega navpičnega rezervoarja, model prelom cevi s spremenljivim izpustom v zimskih razmerah. Spreminjali smo premer cevi, iz katere izteka tekočina. Premer cevi/odprtine ima pomemben vpliv na vplivna območja, ki se večajo z naraščanjem odprtine, ker s tem narašča pretok (slika 1). Povprečne vrednosti pretokov z naraščanjem premera odprtine naraščajo počasneje, saj se posoda pri večji luknji prazni hitreje, s tem pa upada hidrostatski tlak tekočine nad luknjo, zato pretoki in vplivna območja naraščajo vse počasneje. Parameter hrapavost cevi nima pomembnega vpliva na vplivna območja eksplozije oblaka plina.

Vpliv dolžine cevi

Za model prelom cevi smo spreminjali dolžino cevi od posode do točke iztekanja. Dolžina cevi praktično nima vpliva pri vrednostih do 5 metrov in ima majhen vpliv do okoli 10 metrov. Pri daljših ceveh se zaradi večjih

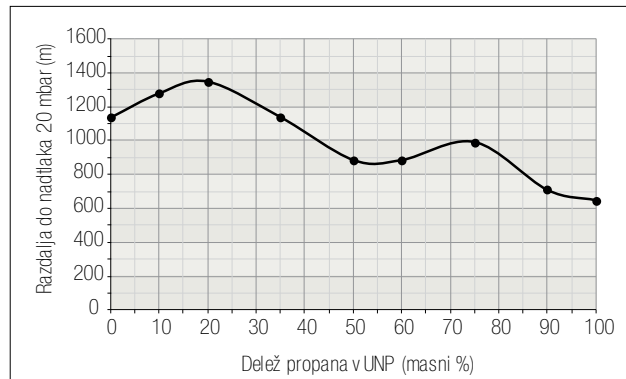
	Enota	Model dolg cevovod		Model določen čas		Model TNT	
		Poleti	Pozimi	Poleti	Pozimi	Poleti	Pozimi
Povprečni pretok	kg/s	5,2	5,3	6,0	6,0	–	–
Eksplozija, 20 milibarov	m	211	393	187	294	592	592
Eksplozija, 50 milibarov	m	160	272	148	227	297	297
Eksplozija, 140 milibarov	m	135	211	129	193	148	148
Razdalja do vira vžiga z največjim območjem	m	110	150	110	160	–	–

Preglednica 7: Rezultati za izpust iz dolgega cevovoda
Table 7: Results for long pipeline release



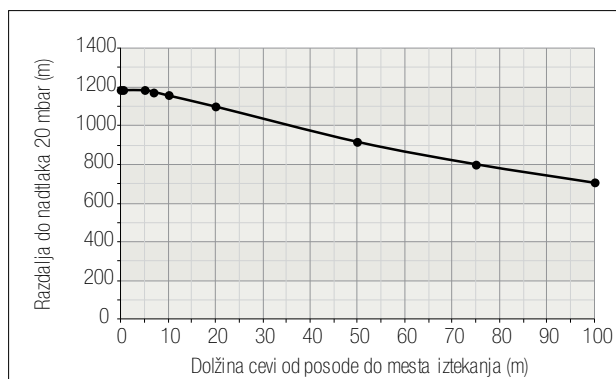
Slika 1: Vpliv premera cevi na območje nadtlaka 20 milibarov

Figure 1: Influence of pipe diameter on 20 mbar effect zone



Slika 3: Vpliv sestave utekočinjenega naftnega plina na območje nadtlaka 20 milibarov

Figure 3: Influence of LPG composition on 20 mbar effect zone



Slika 2: Vpliv dolžine cevi na območje nadtlaka 20 milibarov

Figure 2: Influence of pipe length on 20 mbar effect zone

Orientacija posode	Orientacija posode		
	Enota	Navpična	Vodoravna
Povprečni pretok	kg/s	47,4	4,63
Eksplozija, nadtlak 20 milibarov	m	1183,7	369,5
Eksplozija, nadtlak 50 milibarov	m	812,0	250,0
Eksplozija, nadtlak 140 milibarov	m	630,4	189,8
Razdalja do vira vžiga z največjim vplivnim območjem	m	430	130

Preglednica 8: Rezultati za različno orientacijo posode
Table 8: Results for various orientations of the vessel

Vpliv orientacije posode

Preverili smo vpliv orientacije posode, saj program omogoča navpično ali vodoravno postavitve. Slednja daje manjša vplivna območja zaradi bistveno manjšega pretoka iztekanja (preglednica 8).

Vpliv smeri iztekanja

Program omogoča nastavitve različnih smeri iztekanja medija iz rezervoarja, na primer vodoravno, navpično, pod kotom glede na horizontalo, navzdol na tla ipd. Smer iztekanja ima znaten vpliv na vplivna območja, ki so v celoti gledano največja za vodoravno smer iztekanja (preglednica 9). V tem primeru namreč vstopa v začetni fazi v oblak plina manj zraka, oblak se počasneje redči in potuje v smeri vetra v območju vnetljivih koncentracij,

tlačnih izgub pretok občutneje zmanjša, zato so vplivna območja manjša (slika 2). Sicer je pri zelo dolgih ceveh priporočena uporaba modela dolg cevovod, kajti model prelom cevi je namenjen krajšim cevem.

Vpliv sestave utekočinjenega naftnega plina

Sestava utekočinjenega naftnega plina v rezervoarjih variira glede na potrebe porabnikov. V splošnem se vplivno območje eksplozije za nadtlak 20 barov zmanjšuje, če se večja delež propana, kot prikazuje slika 3.

	Enota	Smer iztekanja			
		vodoravna	pod kotom 45°	navpično gor	navzdol na tla
Povprečni pretok	kg/s	47,4	47,4	47,4	47,4
Eksplozija, nadtlak 20 milibarov	m	1183,7	545,5	775,0	1185,3
Eksplozija, nadtlak 50 milibarov	m	812,0	408,1	587,9	770,0
Eksplozija, nadtlak 140 milibarov	m	630,4	338,8	493,6	564,2
Razdalja do vira vžiga z največjim območjem	m	430	270	400	340

Preglednica 9: Sprememba smeri iztekanja
Table 9: Direction of release

	Enota	Agregatno stanje	
		tekoče	plinasto
Višina iztekanja nad tlemi	m	1	30
Pretok	kg/s	76,2	5,52
Eksplozija, nadtlak 20 milibarov	m	1432,2	90,7
Eksplozija, nadtlak 50 milibarov	m	1022,0	65,4
Eksplozija, nadtlak 140 milibarov	m	815,2	52,6
Razdalja do vira vžiga z največjim vplivnim območjem	m	610	40
Preglednica 10: Rezultati za izpust v tekočem in plinastem stanju			
Table 10: Results for liquid and gaseous release			

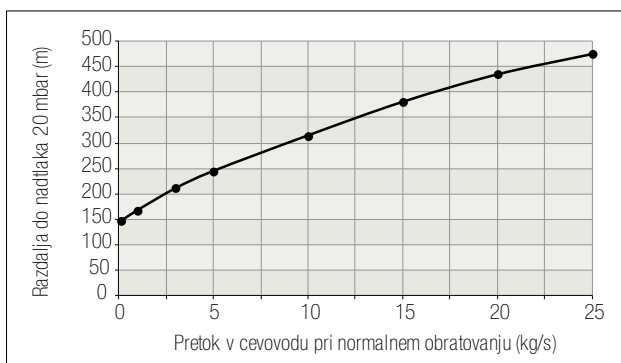
zaradi česar so vplivi eksplozije večji. Izpusti v zrak pod kotom se hitreje redčijo pod mejo vnetljivosti, preden se oblake posede k tlom, zato so vplivna območja manjša. Vplivna območja za smer navzdol na tla so primerljiva z vodoravnim izpustom, ker je gibalna količina v programu zaradi odboja od tal zmanjšana na 25 odstotkov začetne vrednosti, kar zmanjša začetno hitrost redčenja, zato je disperzija počasnejša, vplivna območja pa večja.

Vpliv agregatnega stanja

Sprememba agregatnega stanja iz tekočega v plinasto za model prelom cevi s časovno spremenljivim izpustom ni dala rešitve, zato smo spremembo izvedli za scenarij prelom cevi z nespremenljivim izpustom v zimskih razmerah. Vplivna območja so pri plinastem izpustu znatno manjša (preglednica 10).

Vpliv pretoka v cevovodu

Pri modelu dolg cevovod na vplivna območja znatno vpliva obratovalni pretok v cevovodu. Z naraščanjem obratovalnega pretoka se območja povečujejo, ker s tem naraščata tudi pretok in hitrost iztekanja ob izpustu. Slika 4 prikazuje povečevanje vplivnega območja za nadtlak 20 milibarov v poletnih razmerah pri modelu dolg cevovod, če se povečuje pretok.



Slika 4: Vpliv obratovalnega pretoka na območje nadtlaka 20 milibarov

Figure 4: Influence of LPG flow rate on 20 mbar effect zone

Razprava

Glede na rezultate analiz predstavljamo priporočila za modeliranje izpustov utekočinjenega naftnega plina za določitev razdalj med obrati z utekočinjenim naftnim plinom in naseljenimi območji, skladno z Uredbo.

- Modeliranje scenarijev nezgod izvedemo za največjo oziroma najvišjo navpično posodo z največjo polnitvijo na lokaciji, saj daje ta scenarij največja vplivna območja.
- Smiselno je uporabiti enotno velikost odprtine iztekanja, na primer 100 mm, da bodo rezultati primerljivi.
- Uporabimo najbolj neugodno kombinacijo meteoroloških parametrov, ki so v primeru eksplozije utekočinjenega naftnega plina nizka temperatura, nizka hitrost vetra, stabilno ozračje in nočne razmere.
- Za visoke navpične rezervoarje uporabimo natančnejše modele, ki upoštevajo, da se pretok med iztekanjem iz posode spreminja, saj bi z enostavnejšimi modeli s konstantnim pretokom precenili vplivna območja.
- Za nižje vodoravne rezervoarje lahko uporabimo modele s konstantnim pretokom, saj so vplivna območja primerljiva z rezultati preciznejših modelov.
- Pomembna je odločitev, ali uporabimo model iztekanja iz priključne cevi ali iz luknje v steni posode, ker so vplivna območja v drugem primeru bistveno višja.
- Smiselno je, da se mesto eksplozije predvidi na tisti razdalji od kraja izpusta, na kateri so doseženi največji učinki. Zmogljivi programi sami izračunajo lokacijo vira vžiga, ki daje največja vplivna območja eksplozije.
- Posledice eksplozije plinskega oblaka na mestu izpusta lahko vrednotimo z enostavnimi eksplozijskimi modeli brez disperzije plina v ozračje.

Modeliranje izpustov utekočinjenega naftnega plina iz industrijskih cevovodov je težko poenotiti, saj so cevovodi v obratih različnih dolžin in premerov. Oba parametra bistveno vplivata na količino snovi v cevovodu, ki bi se sprostila ob poškodbi. Pomemben podatek za modeliranje je obratovalni pretok v cevovodu, ki ga priskrbi podjetje. Smiselno je določiti časovni interval, v katerem je mogoče ustaviti dotok utekočinjenega naftnega plina v cevovod, saj lahko na podlagi te informacije in podatkov o obratovalnem pretoku ter velikosti cevovoda določimo maso izpuščene snovi.

Analize občutljivosti kažejo, da je premer cevi pomemben vplivni dejavnik, saj vplivna območja naraščajo z večanjem premera, ker se s tem veča pretok iztekajoče tekočine. To je posebno izrazito pri ceveh s premerom, manjšim od 100 mm, pri večjih ceveh pa je povečevanje vplivnih območij s premerom manj izrazito.

Pomemben dejavnik je smer iztekanja. Glede na rezultate simulacij so največja vplivna območja dosežena pri vodoravni smeri iztekanja. V praksi je smer iztekanja težko predvideti oziroma napovedati vnaprej, saj je

odvisna od lokacije luknje v posodi, skozi katero izteka tekočina, in od pretoka iztekajočega medija.

Postavitev posode, navpična ali vodoravna, ima pomemben vpliv na nevarna območja. Ta so večja pri visokih navpičnih posodah, saj je dosežen večji pretok iztekanja kot pri vodoravno postavljenih rezervoarjih.

Izpust utekočinjenega naftnega plina iz visokega navpičnega rezervoarja daje večja vplivna območja eksplozije kot izpust plina zaradi bistveno večjega pretoka in dejstva, da utekočinjeni naftni plin po izpustu praktično v celoti prehaja v plinasto fazo in aerosol.

Rezultati kažejo, da so vplivna območja eksplozije utekočinjenega naftnega plina z večjim deležem propana nižja od vplivnih območij zmesi s prevladujočim deležem butana. Butan je manj hlapen od propana, saj ima nižji parni tlak in se zato slabše oziroma počasneje razredčuje v ozračju.

Pri modelu iztekanja iz cevi je vhodni podatek tudi dolžina cevi od posode do mesta iztekanja. Ta parameter nima večjega vpliva na območja pri ceveh, dolgih do okoli 10 m, pri daljših priključkih pa se območja zmanjšujejo, ker se zaradi tlačnih izgub pretok zmanjšuje, zato je uporaba modela prelom cevi priporočena za krajše dolžine priključnih cevi.

Sklepne misli

V prispevku smo prikazali študijo izpustov utekočinjenega naftnega plina iz navpičnega rezervoarja, železniške cisterne in industrijskega cevovoda, da bi določili ustrezne scenarije, modele in vhodne parametre za

določanje varnostne razdalje med obrati z utekočinjenim naftnim plinom in območji, na katerih se zadržuje večje število ljudi. Scenarije smo definirali na podlagi Uredbe, za modeliranje pa uporabili program *Phast* 6.5 in vgrajene modele, ki so na voljo. Posledice izpustov smo vrednotili z območji vpliva eksplozije plina, ki jih določa Uredba z nadtlaki 140, 50 in 20 milibarov.

Glede na rezultate izpusta z največjimi posledicami, torej izpusta iz navpičnega rezervoarja z zmogljivostjo 100 t utekočinjenega naftnega plina, lahko okvirno navedemo razdalje za vplivna območja obratov, ki skladiščijo večje količine utekočinjenega naftnega plina v navpičnih rezervoarjih:

- ožje vplivno območje prvega reda, v katerem so dovoljeni le objekti manjše ranljivosti, je do okoli 800 m od obrata;
- širše vplivno območje drugega reda, v katerem so dovoljeni objekti manjše in srednje ranljivosti, je od 800 do 1000 m;
- najširše vplivno območje tretjega reda, v katerem so dovoljeni objekti manjše, srednje in večje ranljivosti, je od 1000 do 1400 m;
- za najbolj ranljive objekte, kot so šole, vrtci, bolnice, trgovski centri ipd., je priporočljiva oddaljenost od skladišča utekočinjenega naftnega plina večja od 1400 m.

Navedene razdalje predstavljajo konzervativne ocene, saj so pridobljene za scenarij z največjimi posledicami, torej izpust utekočinjenega naftnega plina iz velikega navpičnega rezervoarja v zimskih razmerah skozi luknjo v steni posode ali krajšo priključno cev. Izpusti iz vodoravno postavljenega rezervoarja, železniške cisterne in cevovoda dajejo manjša vplivna območja, prav tako izpusti v poletnih razmerah.

Viri in literatura

1. American Institute of Chemical Engineers, 2000. Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Chemical Process Risk Analysis, Second Edition, New York: Wiley, AIChE.
2. Bajcar, T., Cimerman, F., Širok, B., 2013. Tveganje za posameznika v okolici merilnih in merilno-regulacijskih postaj za zemeljski plin. *Ujma* 27, 165–173.
3. DNV, Phast 6.5, 2006. Process Hazard Analysis Software Tool.
4. HSE, Health and Safety Executive, 2015. Storage of flammable liquids in tanks, 2. izdaja. <http://www.hse.gov.uk/pubns/priced/hsg176.pdf>, dostop 12. 5. 2016.
5. Kletz, T., 2010. Process Plants: A Handbook for Inherently Safer Design. London: Taylor & Francis.
6. Kopač, E., 2010. Kritična infrastruktura kemične industrije v Republiki Sloveniji, *Ujma* 24, 140–145.
7. Lees, F. P., 2003. Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control, Second Edition, Volume 1, Oxford: Elsevier.
8. Mecklenburgh, J. C., 1985. Process Plant Layout, London: Godwin.
9. SIST, EN 60079-10, 2016. Eksplozivne atmosfere - 10 - 1. del: Razvrstitev prostorov – Eksplozivne plinske atmosfere.
10. Vlada Republike Slovenije, 2008. Uredba o merilih za določitev najmanjše razdalje med obratom in območji, kjer se zadržuje večje število ljudi, ter infrastrukturo. Uradni list RS, št. 34/08.