

30 PREVENCE VZNIKU HAVÁRIÍ NA VYSOKOTLAKÝCH A VELMI VYSOKOTLAKÝCH PLYNOVODECH A OMEZENÍ JEJICH NÁSLEDKŮ

30.1 ÚVOD

V kapitole jsou uvedeny základní informace o prevenci vzniku a dopadů havárií na VVTL a VTL plynovodech. Struktura a obsah kapitoly vychází ze základního předpokladu, že pro přijetí odpovídajících efektivních opatření v oblasti prevence vzniku a dopadů havárií je nezbytné provádění analýz rizika a jejich promítnutí do navazujících oblastí, jako je havarijní plánování a řízení bezpečnosti podniku, včetně motivace a přípravy zaměstnanců.

Historie přístupu k posuzování a snižování rizika úzce souvisí s vývojem legislativy v jednotlivých průmyslových zemích světa, jako jsou Velká Británie, USA, další země EU, Švýcarsko, Austrálie a Kanada. Revoluční změny legislativy či vůbec její vznik byl iniciován bouřlivým rozvojem plynárenství a bohužel většinou také haváriemi spojenými s velkými dopady na obyvatele a majetek. V současné době vyžaduje evropská legislativa přímo provádění analýz rizika (včetně kvantitativních QRA), zpracování havarijních plánů, zavedení bezpečnostního managementu atd. V zemích EU proto podniky provozující rizikovou činnost plní výše uvedené požadavky, jejichž uplatněním se výrazně snižuje riziko ve smyslu ohrožení osob, majetku a životního prostředí.

V kapitole 30.2 jsou uvedeny základní informace o legislativě v dané oblasti se zaměřením na požadavky na provádění analýz rizika, havarijní plánování a zavádění bezpečnostního managementu.

V kapitole 30.3 a 30.4 jsou uvedeny základní informace o postupu a obsahu analýzy rizika, stručná charakteristika jednotlivých metod. Kapitola 30.4 je věnována scénářům a postupům pro výpočet a odhad následků.

V kapitole 30.5 jsou uvedeny základní údaje k havarijnímu plánování, včetně stručného popisu obsahu a struktury havarijních plánů.

30.2 LEGISLATIVA V OBLASTI PREVENCE HAVÁRIÍ PRO PLYNOVODY

Legislativa pro plynovody je v rozvinutých zemích světa většinou součástí legislativy pro dálkovody. Nejrozšířenější jsou dálkovody kapalných ropných látek a zemního plynu.

První legislativou (standardem) s technickými požadavky na provedení potrubí v USA byla ANSI B 31.8 pro plynová potrubí (nyní ASME B 31.8) a ANSI B 31.4 (kapalné ropné látky). Ve Velké Británii byl v roce 1970 vydán standard BS 8010, který vycházel ze starého standardu IGE/TO/1 a světových standardů. Důležitým požadavkem těchto norem je velikost konstrukčního faktoru. U plynového potrubí vedeného v blízkosti osídlení klesá hodnota předepsaného konstrukčního faktoru na 0,3 u britských norem a na 0,4 u amerických norem.

Ve většině světových standardů (zákonů, předpisů, norem) jsou podobně jako v ČR obsaženy požadavky týkající se minimální hloubky uložení, ochranného pásma, minimální vzdálenosti k obytným budovám, požadavky na nižší konstrukční faktor v oblastech s vyšší populací, tlakový limit pro potrubí v hustě obydlených regionech, požadavky na dozor a údržbu, požadavky na systém hlášení havárií.

Problematickou je otázka nového hodnocení starších potrubí, která byla vystavěna v původně neobydlených oblastech a které je potřebné upravit, případně znovu vybudovat tak, aby splňovaly požadavky na technické provedení, na provozní tlak apod. Pro vyhodnocení takových situací jsou v zemích, jako jsou USA, Velká Británie a země EU, Kanada, Austrálie, zaváděny do legislativy předepsané postupy, kritéria a jejich hodnoty pro hodnocení rizika a posouzení jeho přijatelnosti (hodnocení společenské přijatelnosti rizika).

V USA je předložen kongresu ke schválení zákon o bezpečnosti potrubí, který obsahuje postupy a požadavky pro hodnocení rizika a požadavky na zavedení a využívání risk managementu.

Ve Velké Británii byl přijat nový zákon o bezpečnosti potrubních systémů, který oproti předchozímu stavu sjednocuje požadavky na bezpečnost potrubí pod jeden zákon. Do tohoto zákona byly zahrnuty i požadavky na potrubí se zemním plynem. Dříve byla bezpečnost potrubí řešena speciálními předpisy British Gas. Základními požadavky je zpracování dokumentu k prevenci závažných havárií provozovatelem, zavedení a dokumentování systému bezpečnostního managementu, zpracování podkladů k havarijnímu plánování pro potřeby regionálních orgánů státní správy, opatření vůči subjektům ohrožujícím potrubní systémy.

V Kanadě je přijat podobný standard jako v USA a současně probíhají práce na zpracování a rozpracování standardu a instrukcí pro hodnocení rizika potrubí. V Austrálii platný standard zahrnuje požadavky na hodnocení rizik na obyvatele a přijímání odpovídajících opatření.

Uvedené standardy mají zásadní význam pro územní plánování. Pro povolování staveb plynovodu nebo naopak objektů v blízkosti plynovodu se místo jednoduchých jednoznačných zákazů provádí podrobné analýzy rizika v konkrétních podmínkách lokality a provozu plynovodu. Základní používanou metodou pro hodnocení rizika je QRA (Quantitative Risk Analysis), protože velké nehody na plynovodech nemají (naštěstí) takovou četnost, aby byly statisticky vyhodnotitelné pro různé varianty plynovodů.

V ČR existuje propracovaný legislativní systém v oblasti technické bezpečnosti potrubí, včetně systému dozoru, viz další příspěvky v plynárenské příručce. Oblast prevence a likvidace havárií není odpovídajícím způsobem pokryta, viz kapitola 30.1.1.2. Základní požadavky na havarijní plán jsou dány zákonem č. 222/1994 Sb. a navazujícími vyhláškami. Vyhláška či metodický pokyn ke zpracování havarijního plánu podle tohoto zákona zpracován není a zřejmě ani v nejbližší době nebude.

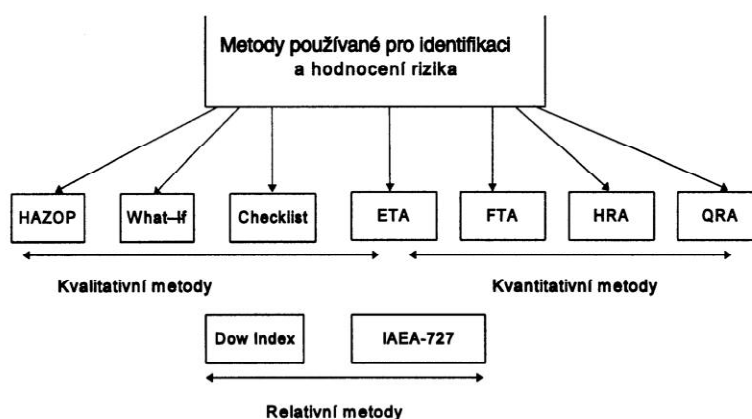
Při zpracování havarijního plánu je vhodné vycházet z návrhu Zákona o prevenci a likvidaci havárií, který je v současné době připraven ve formě věcného záměru zákona k projednání ve vládě ČR. Zpracování havarijního plánu dále vychází z požadavků zákona č. 425/1991 Sb., o okresních úřadech, a z Metodických pokynů k zabezpečení úkolů okresních úřadů při usměrňování Integrovaného záchranného systému vydaných Ministerstvem vnitra ČR.

30.3 ÚVOD DO ANALÝZ RIZIKA

Povinnost zajištění bezpečnosti lidí, výrobního zařízení a ochrany životního prostředí patří k základním úkolům moderního podnikového managementu. V rozhodovacím procesu musí management porovnávat náklady na vyšší míru bezpečnosti vůči zpravidla omezeným finančním zdrojům. S tím souvisí rostoucí význam hodnotících technik přesně oceňujících míru rizika v kvantitativní podobě. Je evidentní, že nadhodnocení rizika může vést k ekonomickým ztrátám, neboť prostředky vydané na opatření ke zmírnění tohoto rizika nepřispějí podstatněji ke zvýšení bezpečnosti. Na druhé straně podhodnocení rizika může vést k závažným důsledkům na provoz, případně existenci podniku.

Pro analýzu rizika se používají metody kvalitativního, kvantitativního a relativního hodnocení rizika. **Kvalitativní metody** napomáhají k pochopení logické struktury poruchových stavů a slouží pro identifikaci zdrojů rizik (ZR) v systému. **Kvantitativní metody** využívají dostupná data o poruchách komponent, odhadují vliv lidských chyb a umožňují předpovědět pravděpodobnost výskytu nehod. **Relativní** metody zařazení rizika hodnotí procesy pomocí indexů, které umožňují navzájem porovnat procesy a stanovit pořadí pro další detailnější analýzy rizika.

V praxi volba typu analýzy posuzovaného systému závisí na účelu analýzy, na složitosti systému, finančních zdrojích, dostupnosti dat o poruchách, na míře, ve které je zahrnut vliv lidského faktoru, atd. V následujícím obrázku jsou uvedeny nejčastěji používané typy metod pro hodnocení rizika systémů.



Při hodnocení rizika se v zásadě hledají odpovědi a nabízí postupy pro nalezení odpovědí na následující otázky:

- 1) Co se může porouchat?
- 2) Jaké jsou příčiny?
- 3) Jaké jsou důsledky (následky)?
- 4) Jak je to pravděpodobné?

Hlavní rozdíl mezi kvalitativními a kvantitativními metodami je v tom, na které otázky odpovídají. **Kvalitativní metody** poskytují odpovědi na první dvě a částečně na třetí otázku (typ následků). **Kvantitativní metody** odpovídají na třetí a čtvrtou otázku (kvantifikace následků a pravděpodobnosti), ale předpokládají zodpovězení předchozích dvou otázek.

Pro posouzení bezpečnosti a spolehlivosti provozu technických a technologických systémů plynovodů mohou být použity metody relativního, kvalitativního a kvantitativního hodnocení rizika vždy podle účelu, pro který mají být výsledky analýz použity.

V následujících subkapitolách jsou uvedeny popisy vybraných základních metod, které jsou vhodné pro hodnocení rizika plynovodů.

30.3.1 Kvalitativní metody

Systematické hledání možných příčin a odchylek od normálních provozních stavů je základem identifikace ohrožení (ZR). Identifikace zdrojů rizik slouží pro určení množiny nehod a iniciačních událostí, které mohou vést k uplatnění ZR v systému.

30.3.1.1 Analýza pomocí kontrolního seznamu (Checklist analysis)

Při analýze je používán písemný seznam položek nebo požadavků, podle kterého se ověřuje stav systému, tzn. posuzuje se shoda s požadavky norem a ověřuje úplnost vedené dokumentace pro provoz, údržbu apod.

Někdy se kontrolní seznam kombinuje s další metodou např. metodou What-If (Co se stane, když...), aby se zjistila ohrožení, která by kontrolní seznam sám o sobě mohl pominout (What - If/Check list Analysis).

30.3.1.2 What - If (Co se stane, když...)

What-If je tvůrčí metoda, která za pomoci "brainstormingu" při poradách prověřuje výrobní zařízení a postupy. Otázky typu "Co by se stalo, kdyby...?" se formulují na základě zkušeností, mohou být vytvářeny postupně pro jednotlivé funkční části. Otázky se mají týkat libovolných abnormálních podmínek, nejenom poruch komponent nebo odchylek od procesu.

Nedostatkem metody je její malá systematickosti v porovnání s metodou HAZOP, což může vést k opomenutí některých ohrožení. Z tohoto důvodu se někdy používá tato metoda v kombinaci s kontrolním seznamem.

30.3.1.3 HAZOP (Hazard and Operability Study)

Metoda HAZOP (Analýza ohrožení a provozovatelnosti) sestává z identifikace ohrožujících situací (Operability study), na kterou navazuje analýza ohrožení (Hazard analysis). Přínosem metody je, že několik expertů s různými vědomostmi společně vytvoří a systematicky identifikuje více problémů, než když pracují odděleně a potom kombinují své výsledky (závěry).

Zkušený vedoucí systematicky vede tým projektem procesu a používá určitého souboru slov (takzvaných vodících slov). Tato vodící slova jsou použita v jednotlivých bodech projektu a kombinují se s konkrétními parametry procesu, tak aby se identifikovaly možné odchylky od provozování.

Vodící slova se aplikují na funkce, respektive na parametry procesu tak, aby se identifikovaly možné odchylky správného provozování technologie. Například spojením vodícího slova NE a parametru TLAK navozujeme situaci není tlak.

Účelem analýzy HAZOP je pečlivě systematickým způsobem prošetřit proces (technologie) nebo způsob provozování, aby se určilo, zda mohou odchylky procesu vést k nežádoucím následkům. Tato technika se hodí k hodnocení kontinuálních i dávkových procesů a lze ji přizpůsobit k hodnocení písemných postupů. Tým vytvoří **seznam možných příčin a následků odchylky a existujících ochranných opatření proti odchylce**. Když tým zjistí, že proti myslitelné odchylce neexistuje přiměřená ochrana, doporučí obvykle **opatření nebo činnost ke snížení rizika**.

Výsledkem analýzy HAZOP jsou nálezy týmu obsahující identifikované ohrožení a navržená doporučení vedoucích ke zdokonalení systému a doporučení dále studovat oblasti, ve kterých nebylo možné udělat závěr v důsledku nedostatku informací.

Identifikace zdrojů rizik, iniciačních událostí a určení scénářů možných havárií je nezbytnou součástí detailní analýzy rizik. Pokud je při analýze některý zdroj rizika, iniciační událost nebo některý rozvoj nehody opomenut, pak je provedená analýza neúplná. Bohužel žádná ze známých metod nezaručuje úplnost provedené identifikace zdrojů rizik. Při správném použití metody HAZOP, eventuálně What-If lze možnost opomenutí při identifikaci ZR snížit na minimum. Nejdůležitější přednosti metody HAZOP v porovnání s ostatními metodami jsou:

- systematicčnost při identifikaci ZR,
- efektivní využití znalostí a zkušeností obsluhy.

30.3.1.4 ETA (Event Tree Analysis)

Metoda ETA (Analýza stromem událostí) se používá pro přehledné zobrazení možných následků jedné výchozí události. Strom událostí vždy začíná výchozí (iniciační) událostí, další události, které na ni navazují se nazývají rozvíjející události. Rozvíjející události se mohou uplatnit pouze v případě, že nastane iniciační událost.

Strom událostí je konstruován tak, že události předcházející mají vliv na události následující. Pokud určíme pravděpodobnosti úspěchu nebo neúspěchu uplatnění jednotlivých událostí můžeme vypočítat pravděpodobnost vzniku jednotlivých nehod a jejich rozvoje. Tímto krokem se ETA stává kvantitativní metodou. Příklad stromu rozvoje havárie při úniku plynu je uveden v kapitole 5.

30.3.2 Metody relativního hodnocení rizika

Metody relativního hodnocení rizika, resp. relativního zařazování rizika, umožňují vzájemné porovnání zdrojů rizik podle předem daných parametrů. Metody jsou zaměřené na posouzení požárního, explozivního a toxického ohrožení spojeného s poškozením zdraví, životního prostředí a ekonomickými dopady.

Nejčastěji je používána metoda Dow Fire and Explosion Index pro vzájemné porovnání rizikovitosti hodnocených technologických částí z hlediska možného ohrožení majetku a osob. Poslední verze této metody umožňuje i odhad ekonomických škod na majetku a odhad ztrát z přerušení výroby.

Na úrovni okresů je nejčastěji používanou metodou IEAE-TECDOC-727, která se používá pro prioritizaci zdrojů rizik v regionu z hlediska možných dopadů na obyvatele. Zvláštností této metody je vyhodnocení zdrojů rizik v matici rizik. Hodnocení rizik v rámci této metody ve formě pravděpodobnost a následky však nelze použít pro samostatné hodnocení možných dopadů a pravděpodobnosti dopadů, ale pouze v rámci metody pro relativní posouzení.

Výsledky relativních metod jsou podkladem pro provedení detailnějších analýz rizika, kvalitativních a kvantitativních.

30.3.3 Kvantitativní metody

30.3.3.1 FTA (Fault Tree Analysis)

Metoda FTA (analýza stromem poruch) byla vyvinuta v roce 1960 a je nejčastěji používanou metodou při kvantitativním hodnocení rizik procesu. FTA je deduktivní technika, která se soustředí na jednotlivou havárii nebo závažnou poruchu systému a poskytuje metodu pro určení příčin této události.

Metoda využívá Booleovu algebru tzv. logické symboly (A, NEBO). Analýza začíná nehodou nebo nechtěnou událostí (vrcholová událost - TOP EVENT) a hledají se bezprostřední příčiny (primární poruchy) této události. Výsledkem je tzv. strom poruch zobrazující vztahy mezi základními událostmi a zvolenou vrcholovou událostí. Při hledání vztahů mezi příčinami se hledají odpovědi na otázku "Co vede k této události?".

Vrcholové události jsou ohrožující situace identifikované pomocí kvalitativních metod (např. What-If, HAZOP atd.). Strom poruch je grafický model, který zobrazuje různé kombinace poruch vybavení a lidských chyb, jež mohou vést ke zkoumané poruše systému k takzvané vrcholové události.

Síla FTA jako kvantitativního nástroje spočívá v její schopnosti identifikovat úplný výčet minimálních kombinací poruch prvků vybavení a lidských chyb, které mohou vést k havárii. Strom poruch je vhodný ke kvantitativní analýze vrcholové události, jsou-li známy pravděpodobnosti primárních příčin.

FTA je vhodná pro analýzu vysoce zálohovaných systémů. Pro systémy, které jsou zranitelné především jednoduchými poruchami, je možno použít technik orientovaných na jednoduché poruchy, což je např. metoda FMEA. FTA se často využívá v situacích, kdy jiná technika (např. HAZOP) ukázala potřebu podrobnější analýzy.

Nároky FTA na čas a náklady závisejí na složitosti analyzovaných systémů a na úrovni řešení modelů. Modelování složitých systémů může trvat i několik měsíců, a to i zkušenému týmu.

30.3.3.2 HRA (Human Reliability Analysis)

Metody analýzy spolehlivosti lidského činitele HRA vyžadují expertní odhad a zpravidla obsahují následující položky:

- určení důležitých úkolů prováděných operátorem,
- prezentace (znázornění) každého úkolu, např. rozložením úkolu do základních (hlavních) složek pro identifikaci,
 - příležitost udělat chybu,
 - body vzájemného působení (interakce s podnikem),
- použití dat získaných z historických záznamů,
- identifikace podmínek způsobujících chybu. Tyto podmínky jsou nazývány "performance-shaping factors" v nich je zahrnut stres, výcvik, kvalita zobrazených údajů a způsob kontroly, kterou používá operátor.

Výsledky metod HRA jsou vyjadřovány ve formě pravděpodobnosti lidské chyby (Human Error Probabilities) nebo ve stupni lidské chyby.

Pravděpodobnost lidské chyby = (Počet chyb)/(Počet příležitostí udělat chybu)

Stupeň lidské chyby = (Počet chyb)/(Celkové trvání úlohy)

K nejznámějším metodám HRA patří metody THERP, ASEP, HEP, OAT.

30.3.3.3 Konsekvenci analýzy

Modelování projevů a následků havárií je základním předpokladem pro určení jejich možných dopadů na osoby, majetek a životní prostředí. Při odhadu následků vycházíme z předem stanovených scénářů rozvoje havárie pro identifikovaný zdroj rizika. Bez předchozího provedení kvalitativních analýz nemá modelování následků valný smysl.

Vzhledem k významu modelování následků pro stanovení rizika, k významu pro navazující oblasti (havarijní plánování apod.) a k rozsahu problematiky je podrobněji rozvedeno v kapitole 5.

30.3.3.4 Analýza QRA

QRA (Quantitative Risk Analysis) je metoda, který umožňuje odborníkovi kvantitativně ohodnotit riziko, doporučit a priorizovat opatření pro snížení rizika.

QRA podle obecné metodiky, určuje co je nutno udělat a jaké výsledky je nutno získat a doporučuje obecné postupy (díleč metody). Jako jediná metoda umožňuje celkové (komplexní) posouzení problému (zařízení - zdrojů rizika). Metoda kombinuje kvalitativní a kvantitativní metody, z jejich výsledků umožňuje odhadnout velikost rizika zařízení. Metodu je možno doplnit i ekonomickým vyhodnocením návratnosti investic do navržených opatření ke snížení rizika zařízení. QRA je relativně nová metoda, která umožňuje kvantitativně doplnit identifikované ohrožení, analyzovat ho a zhodnotit. QRA byla původně používána především v jaderném průmyslu a letectví. V současné době je používána ve všech průmyslových odvětvích, ve kterých jsou prováděny rizikové činnosti.

Kvantitativní analýza rizika se uskutečňuje postupně v krocích. Protože v mnoha případech není nutné užívat vždy těch nejvyspělejších a nejobtížnějších technik, úplný postup QRA může být zkrácen zjednodušením a někdy i vypuštěním některých technik (metod).

Úplný postup kvantitativní analýzy rizika by měl sestávat z následujících kroků: definice analýzy, popis systému, identifikace ohrožení, výčet nehod, jejich výběr, sestavení modelu, odhad následků, odhad pravděpodobností, odhad rizik, užité odhadů rizika.

Podrobnost a rozsah vstupních údajů se určuje v závislosti na definovaných záměrech a cílech studie, na zdrojích, které jsou k dispozici (finanční prostředky, čas, vyškolený personál). Podle rozsahu a cíle analýzy určíme díleč metody použité pro analýzu, podrobnost modelování, kde jak v oblasti odhadu následků, tak v oblasti odhadu frekvencí je celá škála možností od velmi hrubých inženýrských odhadů až po jemné propočty založené na množství obtížně získatelných vstupních údajů.

Výsledky QRA odpovídají jednotlivým provedeným krokům metody, například je výsledkem seznam identifikovaných ohrožení, seznam iniciačních událostí, seznam nehod, následky havárií, pravděpodobnost vzniku havárií, odhad rizika (individuální, společenské).

30.4 ZÁKLADNÍ TYPY A SCÉNÁŘE HAVÁRIÍ, ODHAD NÁSLEDKŮ

Modelování účinků havarijních projevů navazuje na výsledky kvalitativních metod hodnocení rizika popsané v kapitole 4. Kvalitativními metodami jsou identifikována místa možného úniku nebezpečných látek ze zařízení. Jednotlivé úniky NL jsou také specifikovány fyzikálně-chemickými vlastnostmi NL (skupenství, teplota vznícení, DMV, HMV apod.) a podmínkami v zařízení (teplota, tlak, průtok apod.).

30.4.1 Sestavení scénářů havárií a mimořádných stavů, určení pravděpodobnosti rozvoje

Pro zařízení plynovodů připadají v úvahu dvě základní skupiny látek, pro které jsou sestaveny typové scénáře rozvoje havárie při úniku nebezpečné látky. U plynovodů jde především o plynnou látku (zemní plyn), případně o kapalné látky (gazolin, oleje, metanol).

Scénáře rozvoje havárie jsou vytvářeny pomocí metody ETA (Analýza stromem událostí). Pro přehledné zobrazení všech možných rozvoje havárie se používají tzv. stromy rozvoje událostí.

Při sestavování scénářů havárií jsou hledány takové iniciační události, které při svém uplatnění mohou za podmínek selhání bezpečnostních prvků, části technického zařízení nebo obsluhy vést k závažným dopadům (haváriím).

Graficky jsou scénáře zobrazovány v podobě stromu událostí. Strom začíná iniciační událostí a postupně se větví podle úspěchu či neúspěchu rozvíjející události. Stromy jsou konstruovány tak, že horní větev znamená odpověď ("ANO" na danou funkci systému (rozvíjející událost). Každá větev stromu představuje jeden možný rozvoj události a vyhodnotí se, zda je případem úspěšného zvládnutí iniciační události nebo scénářem rozvoje určité havárie. Pro každou větev stromu se provádí deduktivní analýza možných příčin úspěchu/neúspěchu funkce rozvíjející události.

Základní havarijní projevy lze rozdělit na únik:

- hořlavé plynné látky (zemní plyn),
- hořlavé kapalné látky (gazolin, olej, metanol).

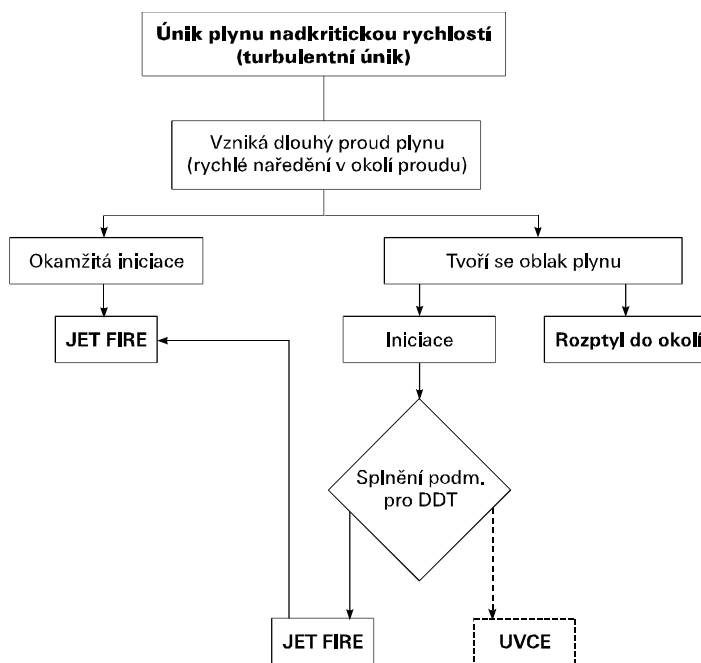
Havarijní projevy jsou odlišné při úniku NL do volného prostoru nebo do uzavřeného (vnitřního) prostoru. Uváděné scénáře je nutno brát jako základní bez zohlednění podmínek konkrétního zařízení, okolí, meteorologické a geografické situace apod.

30.4.2 Typové scénáře rozvoje havárie

30.4.2.1 Rozvoj havárie při úniku NL do volného prostoru

Rozvoj havárie při úniku **hořlavé plynné látky** je odlišný při úniku nadkritickou rychlostí (turbulentní výtok) nebo podkritickou rychlostí (difúzní výtok). Scénář rozvoje havárie při úniku zemního plynu nadkritickou rychlostí je uveden v obrázku 30.2.

K úniku plynu nadkritickou rychlostí (turbulentní výtok) dochází při vnitřním přetlaku plynu v zařízení větším než cca 100 kPa. Po úniku plynu se tvoří ostře směrovaný proud plynu, který, pokud není iniciován ihned po úniku, vytváří díky vysoké rychlosti a probíhající turbulizaci poměrně krátký a široký oblak směsi plynu se vzduchem v porovnání s difúzním únikem při stejném hmotnostním úniku. Vhodnou iniciací a splněním fyzikálně-chemických podmínek přechodu deflagračního hoření do detonace (silný iniciační zdroj, alespoň částečně obestavěný prostor, inverzní počasí atd.), může dojít k explozi oblaku (UVCE). Při úniku zemního plynu dojde k výbuchu UVCE jen ve výjimečných situacích. Pokud nejsou splněny fyzikálně-chemické podmínky přechodu hoření do detonace, nedojde k explozi oblaku ale pouze k jeho rychlému zahoření (FLASH FIRE). Při iniciaci unikajícího plynu ve fázi turbulentního výtoku se vytváří po zahoření plamenná pochodeň (JET FIRE) s velmi vysokým tepelným tokem.



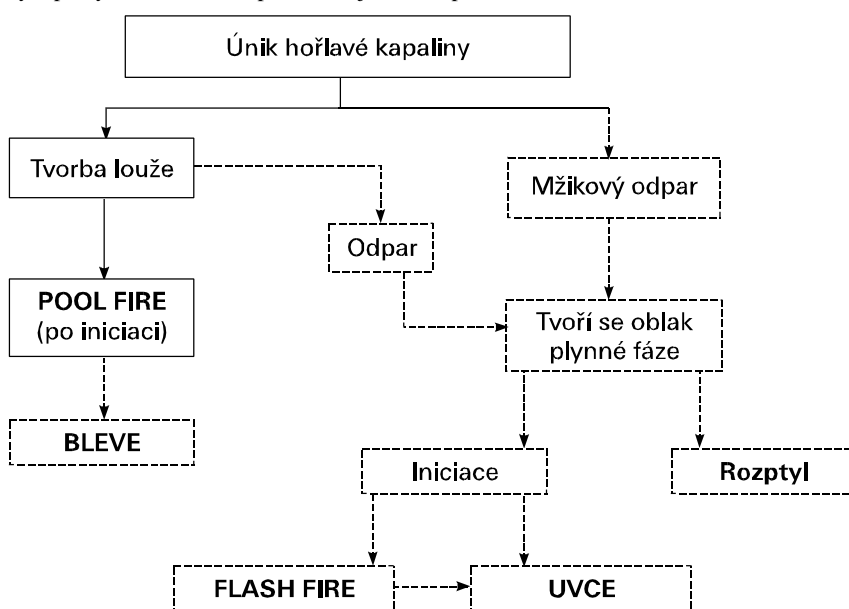
Obr. 30.2: Scénář rozvoje události při úniku plynné látky nadkritickou rychlostí do volného prostoru

K úniku plynu podkritickou rychlostí (difúzní výtok) dochází při vnitřním přetlaku plynu v zařízení menším než cca 100 kPa. Po úniku plynu vzniká oblak směsi plynu se vzduchem, který se šíří ve směru vanutí větru. Při ne-inverzním počasí jde oblak zemního plynu do mírného vznosu. Zahoření oblaku (FLASH FIRE) má krátkodobý účinek ve formě sálavého tepla a možnosti přímého kontaktu s plamenem v prostoru oblaku. Exploze oblaku UVCE je při úniku zemního plynu podkritickou rychlostí v otevřeném prostoru nepravděpodobná. Při dlouhodobější dotaci

difúzního výtoku se po iniciaci vytvoří laminární plamen s relativně nízkým tepelným tokem ve srovnání s JET FIRE.

Scénář rozvoje havárie při úniku hořlavé kapaliny je uveden v obrázku 30.3. Při úniku hořlavé kapaliny, dochází k vytvoření louže hořlavé látky a vhodnou iniciací dojde k zahoření louže, tzv. plošný požár (POOL FIRE). Projevy plošného požáru lze charakterizovat relativně dlouhodobým tepelným tokem působícím na okolí.

Pokud by unikající látkou byl zkapalněný uhlovodíkový plyn (např. propan-butan), dochází po úniku ze zařízení k mžikovému odparu kapaliny (zkapalněného plynu), tvoří se oblak plynu, který po iniciaci může přejít do FLASH FIRE nebo do exploze UVCE. Speciálním případem havárie vyskytující se u zásobníků s hořlavými kapalinami a zkapalněnými plyny je jednorázové vzkypění obsahu zásobníku (BLEVE) nejčastěji způsobené tepelnými účinky předcházejícího požáru POOL FIRE. Jednorázové vzkypění obsahu vede ke vzniku "ohnivé koule" ve vznosu obsahující kapalnou i plynnou složku obsahu zásobníku, přičemž povrch koule intenzivně hoří. Při požáru BLEVE vzniká vysoký tepelný tok sálavého tepla ohrožující okolí po dobu existence "ohnivé koule".



Obr. 30.3: Scénář rozvoje havárie při úniku hořlavé kapalné látky. Tečkovaně je vyznačen rozvoj havárie typický pro zkapalněné hořlavé plyny.

30.4.2.2 Rozvoj havárie při úniku NL do vnitřního (uzavřeného) prostoru

Problematika úniku nebezpečných látek a možného rozvoje havárie uvnitř objektů (budov) je odlišná v porovnání s úniky ve volném prostoru.

Únik hořlavé látky a její hoření v uzavřeném prostoru se projevuje, kromě působení sálavé složky tepla, i odebráním kyslíku pro hoření ze vzduchu a tvorbou zplodin hoření, případně vytěsnění vzduchu při velkém úniku. Uvedené faktory mohou být významně nebezpečné obsluze uvnitř objektů. Vytěsnění vzduchu však zároveň omezuje další rozvoj havárií typu POOL a JET FIRE. Hoření uvnitř objektů je velmi závislé na dostupnosti okysličovadla (vzduchu) v místě požáru.

Možné scénáře rozvoje havárie při úniku látky schopné výbuchu uvnitř objektu probíhají za výrazně odlišných podmínek v porovnání s únikem ve volném prostoru. Pro explozivní projev je nezbytné, aby se "významná" část látky nacházela v koncentračním rozmezí mezi dolní a horní mezí výbušnosti. Při masivním úniku ZP, např. v regulační stanici, je tato podmínka splněna po velmi krátké době. Projevy účinků po iniciaci potom závisí na fyzikálně-chemických vlastnostech látky a geometrickém uspořádání uzavřeného objektu. Pokud nejsou splněny podmínky pro přechod hoření do detonace v uzavřeném prostoru, dojde k explozivnímu hoření se vznikem tlakové vlny spojitého charakteru. Při splnění podmínek dojde ke vzniku rázové vlny s výraznými destrukčními projevy na objekt a okolí.

30.4.3 Odhad následků havárie

V předcházejících kapitolách jsou popsány scénáře rozvoje havárií při úniku zemního plynu, nadkritickou rychlostí (turbulentní výtok) a podkritickou rychlostí (difúzní výtok) a scénář rozvoje havárií při úniku hořlavých kapalin. V případě úniku plynu nebo zkapalněného plynu je určován v závislosti na podmínkách model šíření a vytváření oblaku (turbulentní a difúzní model). V rámci těchto modelů můžeme potom zjišťovat dosahy nebezpečných koncentrací plynu (toxické a dusivé koncentrace, koncentrace dolní meze výbušnosti, resp. hoření) a množství plynu, který je schopný hoření či výbuchu (mezi dolní a horní mezí výbušnosti). Na základě těchto údajů lze výpočtem určit dosahy účinků tepelného toku a přetlakové vlny dané velikosti na osoby a materiál. Podle konkrétního místa havárie pak lze na základě těchto údajů odhadnout maximální možné dopady na osoby, budovy, zařízení apod.

30.4.3.1 Výpočet výtoku nebezpečné látky

Únik plynu za zařízení

Množství unikajícího plynu otvorem ze zařízení je dáno základním vztahem:

$$G = C_d \cdot \psi \cdot \frac{A_0 \cdot p_1}{a_0}$$

kde	G	je hmotový výtok plynu	[kg.s ⁻¹],
	C_d	výtokový koeficient	[-],
	A_0	plocha únikového otvoru	[m ²],
	a_0	rychlost zvuku plynu při teplotě T	[m.s ⁻¹],
	ψ	tokový faktor	[-]
	p_1	absolutní tlak v zařízení	[Pa].

Typ výtoku plynu je určen poměrem tlaku v zařízení k tlaku atmosférickému. Je-li hodnota poměru tlaků rovna nebo větší než r_{krit} , potom se jedná o únik nadkritickou rychlostí (nazývaný též turbulentní, jet nebo nadzvukový). Je-li poměr tlaků menší než r_{krit} , potom se jedná o únik podkritickou rychlostí (nazývaný též podzvukový nebo difúzní). Hodnota r_{krit} je určena vztahem:

$$r_{krit} = \left[\frac{(\gamma + 1)}{2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

kde γ je poměr specifických měrných tepel c_p/c_v [-].

Únik plynu z dlouhého potrubí

Problematika úniku plynu z dlouhého potrubí je základní pro řešení úniku na plynovodu, pro odhad možných účinků a dopadů havárií.

Vlastní únik plynu z dlouhého potrubí je rozdělen do několika na sebe navazujících dějů:

- únik plynu s vlivem dekompresní vlny zředění,
- únik plynu nadkritickou rychlostí,
- únik plynu podkritickou rychlostí.

Pro potřeby analýz a havarijního plánování jsou uvažovány první dvě fáze úniku, kdy je únik plynu rozhodující pro vyhodnocení maximálních projevů a účinků.

Mechanismus výpočtu úniku plynu z dlouhého potrubí je založen na dvou předpokladech, potrubí je "dostatečně" dlouhé, aby se mohl projevit vliv dekompresní vlny a drsnost stěn potrubí je přibližně konstantní v celé jeho délce.

Hmotový únik plynu z otvoru G je definován základním vztahem:

$$G = A_l \cdot G_r \cdot G_0,$$

kde	G	je	hmotový únik	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$,
	A_l		plocha únikového otvoru	$[\text{m}^2]$,
	G_r		relativní hmotnostní tok	$[-]$
	G_0		je počáteční hmotnostní tok	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$.

A) Vliv dekompresní vlny zředění

Dekompresní vlna zředění postupuje rychlostí zvuku v daném prostředí od místa úniku proti směru výtoku plynu z potrubí. Vlna způsobuje urychlení výtoku plynu z potrubí v prvních fázích úniku, do doby dosažení vzdálenějšího uzavřeného konce potrubí.

Druhým významným projevem dekompresní vlny zředění je její tlakové působení. Jedná se o vlnu rázového (nespojitého) charakteru, která může mít, s ohledem na velikost tlakového rozdílu a její rychlost, destruktivní účinky na potrubí ve kterém probíhá. Pokud je toto potrubí lokálně narušeno, potom dekompresní vlna zředění může způsobit i jeho možné rozrušení se všemi negativními důsledky. Rovněž tak i při dopadu dekompresní vlny zředění na překážku v plynovodu, například částečně uzavřené armatury, může dojít i k jejich deformaci nebo destrukci. Pro ilustraci lze uvést, že krátkodobé zatížení nespojitou vlnou zředění s tlakovým skokem 50 kPa v potrubí DN 900 dosáhne cca 3000 kg.

Rozhodujícím faktorem určujícím rychlost úniku plynu je hodnota G_r , která je závislá na hodnotě redukovaného součinitele tření f_r , který je funkcí doby výtoku t po dobu pohybu rázové vlny zředěné potrubím:

$$f_r = \frac{2 \cdot f}{d} \cdot \sqrt{\frac{p_{s0} \cdot \gamma}{\rho_0}} \cdot t$$

kde	f_r	je	redukovaný součinitel tření	$[-]$,
	f		součinitel tření	$[-]$.
	p_{s0}		počáteční absolutní tlak plynu	$[\text{Pa}]$,
	d		průměr potrubí	$[\text{m}]$
	ρ_0		hustota plynu v potrubí	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$.

B) Nadkritický únik

Po ukončení vlivu dekompresní vlny zředění na výtok plynu je únik z otvoru určován nadkritickým únikem. Redukovaný součinitel tření f_r není v tomto případě funkcí času a je konstantní.

$$f_r = \frac{2 \cdot f \cdot l}{d}$$

kde	l	je	délka potrubí $[\text{m}]$
-----	-----	----	----------------------------

C) Podkritický únik

Po ukončení úniku plynu nadkritickou rychlostí přechází charakter výtoku při vnitřním přetlaku přibližně 100 kPa a menším na únik podkritickou rychlostí. Podkritický únik se vyznačuje laminárním výtokem plynu z otvoru.

Výtok kapaliny

Pro výtok kapaliny otvorem za zařízení je použita rovnice hmotnostního výtoku, která je odvozena z rovnice kontinuity a Torricelliho vztahu, ve tvaru:

$$V_0 = \mu \cdot \rho \cdot A_0 \sqrt{2 \cdot \left[\frac{p_1 - p_2}{\rho} + h \cdot g \right]}$$

kde	V_0	je	hmotnostní výtok	[kg.s ⁻¹],
	μ		výtokový koeficient pro kapaliny	[-],
	ρ		hustota kapaliny	[kg.m ⁻³],
	h		výška hladiny kapaliny nad otvorem	[m],
	p_1		tlak v zařízení	[Pa],
	p_2		tlak atmosférický	[Pa],
	g		tíhové zrychlení	[m.s ⁻²]
	A_0		průtočná plocha otvoru	[m ²].

30.4.3.2 Základní vztahy pro určení účinků a dopadů projevů havárie

Určení dosahů nebezpečných koncentrací v oblaku plynu

Model turbulentního úniku plynu

Pro vyhodnocení parametrů oblaku při úniku plynu pod vysokým tlakem je použit turbulentní model. Tvorbou oblaku plynu při turbulentním úniku plynu je odlišná od tvorby oblaku při úniku látky pod nízkým tlakem (difúzní únik).

Rozdíl je dán přítomností kinetické energie, kterou do procesu tvorby oblaku vnáší plyn proudící z otvoru nadkritickou rychlostí, kdy charakter úniku již není ovlivněn hodnotou Reynoldsova kritéria ($Re > 20\,000$).

Tento typ úniku je možno popsat vztahem charakterizujícím koncentrační profil vytvářeného oblaku:

$$C(x, r) = C_o \cdot P_1 \cdot \frac{d}{x} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_0}} \cdot e^{-\left(\frac{P_1 \cdot r}{x}\right)^2}$$

kde	$C_{(x,r)}$	je	koncentrace v souřadnicích x, r	[obj. %],
	C_o		koncentrace plynu	[obj. %],
	P_1 a P_2		parametry úniku	[-],
	d		průměr únikového otvoru	[m],
	x, r		délka a poloměr oblaku	[m],
	ρ_a		hustota vzduchu	[kg.m ⁻³]
	ρ_0		hustota plynu v otvoru	[kg.m ⁻³].

Vysoká rychlost unikajícího plynu způsobuje intenzivní turbulence, jejichž důsledkem je velmi rychlé zředování nebezpečných látek. To se projevuje zkrácením délky oblaku a rozšířením jeho stopy. Zároveň je tak eliminován vliv mírné vznášivosti unikajícího plynu, takže lze předpokládat, že dominantní část oblaku se bude v průběhu tur-

bulentního výtoku “držet” v místě úniku. Potom velmi záleží na směru, kterým plyn uniká, tzn. zda je únik vertikální, nebo horizontální. Pro směr vytváření oblaku u turbulentního úniku není tedy zásadně určující směr a rychlost větru.

Model difúzního úniku plynu

Oblak difúzního charakteru vzniká při úniku plynné fáze podkritickou rychlostí ze zařízení nebo odparem látky z uniklé kapalně fáze.

Koncentrační profil oblaku se vyznačuje vysokou koncentrací látky v ose šíření stopy a její pozvolný pokles ve směru stopy i kolmo ke stopě. Hodnota maximální koncentrace se udržuje na velmi vysoké úrovni po dobu výrazně vyšší než u modelu turbulentního výtoku.

Koncentrační profil oblaku se při ustáleném výtoku látky stabilizuje po určité době na konstantní velikosti, co do délky i do šířky, a je po dosažení maximální velikosti časově neměnný.

Vztah definující koncentrační profil oblaku plynu:

$$C(x,y,z) = \frac{G}{u \cdot \mathbf{F}_y \cdot \mathbf{F}_z} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{y^2}{\mathbf{F}_y^2} + \frac{z^2}{\mathbf{F}_z^2} \right]}$$

kde	G	je	výron látky	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$,
	\mathbf{F}_y		směrodatná odchylka pro šířku oblaku	$[\text{m}]$,
	\mathbf{F}_z		směrodatná odchylka pro výšku oblaku	$[\text{m}]$,
	u		rychlost větru	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$,
	$C(x,y,z)$		koncentrace látky v bodě daném souřadnicemi	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
	x,y,z		souřadnice (délka, šířka, výška oblaku)	$[\text{m}]$.

Charakter oblaku je určen odchylkami \mathbf{F}_y a \mathbf{F}_z . Jejich hodnota je závislá na délce oblaku a typu atmosferické stálosti.

Určení dosahů tepelného toku (požár typu JET FIRE, POOL FIRE)

Únik hořlavého plynu z potrubí nadkritickou rychlostí vede po jeho iniciaci ke vzniku požáru typu JET FIRE, po iniciaci v difúzní fázi úniku k požáru FLASH FIRE. Únik hořlavé kapaliny vede po iniciaci ke vzniku požáru typu POOL FIRE. Účinky požárů jsou charakterizovány sálavou složkou tepla.

Na základě známých účinků tepelného toku na osoby a materiál (osoby, ocelové stavební prvky, dřevo) v závislosti na velikosti tepelného toku a expozice, případně požární odolnosti staveb, jsou vypočteny vzdálenosti negativních účinků (např. popáleniny 3. stupně, 50% mortalita, porušení pevnosti ocelových konstrukcí, zápal dřeva).

Pro odhad procenta mortality osob v dané vzdálenosti od požáru a při dané expozici lze použít probit funkci. Pro výpočet jsou používány následující vztahy.

Intenzita tepelného toku na povrchu ohně P_S :

$$P_S = 0,0092 \cdot \mathbf{M} \cdot H_c \cdot m^{0,09} \quad [\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}]$$

kde	\mathbf{M}	je	radiační podíl	$[-]$
	H_c		spalné teplo látky	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
	m		hmotový únik	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$.

Dále se určují parametry - zdánlivá vzdálenost R_F , pohledový faktor F , vzdálenost R_T , atmosférická transmisivita T - pro výpočet intenzity tepelného toku P_R :

$$P_R = P_S \cdot F \cdot \tau \cdot T \quad [kW \cdot m^{-2}]$$

kde τ je absorptivita příjemce [-].

Hodnota intenzity tepelného toku pro danou expozici t [s] je přeočtena na probitovu funkci Pr :

$$Pr = -14,9 + 2,56 \cdot \ln \left[\frac{t \cdot (P_R)^{\frac{3}{4}}}{10^4} \right]$$

Hodnota Pr vyjadřuje hodnotu odpovídající obdržnému tepelnému impulzu za čas t a intenzitě tepelného toku P_R .

Hodnota Pr je pomocí vypočteného polynomu převedena na % mortality osob.

Procento mortality určuje jaká část osob (uvažována průměrná populace - věk, zdravotní stav) při daném tepelném toku a expozici následkem tepelné radiace zemře. Pokud se osoba dostane do zóny zasažené přímým plamenem (JET FIRE, FLASH FIRE, POOL FIRE), předpokládá se mortalita 100 %.

Exploze

Termín **exploze** se často používá při popisu rychlých exotermních dějů. Vzhledem k nejednoznačnosti výkladu tohoto termínu je nutno provést jeho přesnější vymezení. Termín exploze souhrnně označuje jak explozivní hoření, přechod hoření do detonace, tak i vlastní detonaci. Jedná se tedy o termín popisující více dějů bez jejich rozlišení.

Pokud je popisován rychlý exotermní děj uvnitř objektů nebo zařízení, používá se termín vnitřní exploze.

Explozivní hoření

Explozivní hoření je výbušná přeměna, při které lineární rychlost šíření reakční zóny dosahuje relativně nízkých hodnot. Reakční pásmo se pohybuje rychlostí několika $mm \cdot s^{-1}$ do rychlostí řádově $100 m \cdot s^{-1}$. Rychlost šíření reakčního pásma v blízkosti reakční zóny je vždy nižší než rychlost zvuku v daném prostředí.

Explozivní hoření, pokud probíhá ve volném prostoru, není doprovázeno v místě hoření podstatným zvýšením tlaku. Je-li únik zplodin explozivního hoření do okolí omezen, tlak v prostoru hoření rychle vzrůstá. Dojde-li k explozivnímu hoření v úplně uzavřeném prostoru, může výbuchový tlak plyných směsí dosáhnout až desetinásobku počátečního tlaku.

Explozivní hoření může za určitých podmínek přejít do detonace.

Detonace

Detonace je děj, při kterém se úzké reakční pásmo pohybuje systémem rychlostí vždy větší než je rychlost zvuku v daném prostředí. Lineární rychlost výbušné přeměny dosahuje hodnot 900 - 9000 $m \cdot s^{-1}$.

Detonace je vždy doprovázena vznikem rázové vlny, která se šíří od místa detonace do okolí. V případě detonace se výbušná přeměna šíří prostřednictvím rázového stlačení látky detonační vlnou.

Šíření detonační vlny je energeticky náročnější než šíření explozivního hoření. Proto jsou koncentrační meze detonace obvykle užší než meze hořlavosti. V koncentracích, které leží v mezích detonace, je detonace sice možná, ale ne nutná. Zatímco v celém rozsahu mezi výbušností nastává explozivní hoření i po relativně velmi slabé iniciaci, iniciace do detonace je náročnější. Některé plyné systémy přecházejí do detonace ochotně, například směs acetyleny s kyslíkem. Některé plyné uhlovodíky jako methan lze v laboratorních podmínkách přivést k detonaci pouze s použitím relativně silných iniciačních zdrojů.

Při úniku většího množství uhlovodíků se detonace účastní jen část hořlavé směsi. V tomto případě se hovoří o stupni konverze k detonaci.

Explozivní hoření i detonace jsou výbušné přeměny, při kterých nenastává proces výměny hmoty s okolím. To znamená, že do reakční zóny při explozivním hoření nebo detonaci není transportována oxidační složka - kyslík, a proto není rychlost těchto výbušných přeměn limitována těmito transportními pochody.

Pokud dojde k vytvoření oblaku par schopných výbuchu může dojít v důsledku iniciace k ději nazývanému UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) exploze uvolněného oblaku par ve volném prostoru. K explozi oblaku ve volném prostoru je nutné splnění řady podmínek. Kromě potřebného iniciačního zdroje k nim patří dostatečné množství uniklého plynu. Například pro propan-butan uvádějí různé zdroje hodnoty 2000 až 5000 kg. Je však znám případ, kdy došlo k detonaci při úniku pouhých 900 kg tohoto plynu v otevřené technologii v místě, které však bylo ze tří stran obestavěno. Pro detonaci zemního plynu ve volném prostoru není znám řádně doložený případ. Při splnění řady podmínek jej však nelze vyloučit.

Explozivní hoření v uzavřeném prostoru, přechod do detonace

Projevy a účinky exploze plyných systémů jsou značně závislé na prostředí, ve kterém probíhá výbušná přeměna a na druhu výbušné přeměny. V praxi to znamená, zda dochází při výbušné přeměně pouze k explozivnímu hoření, nebo zda dochází k detonaci. V reálných podmínkách může docházet i ke kombinované výbušné přeměně. Může dojít k tomu, že explozivní hoření za jistých podmínek přejde do detonace nebo naopak, že detonace přejde do explozivního hoření.

Při explozivním hoření výbušných plyných směsí se vzduchem v uzavřeném prostoru může teoreticky dojít až k desetinásobnému zvýšení původního tlaku. Praktické zvýšení tlaku je sedminásobné v důsledku různých ztrát. To znamená, že v prostorech, kde je tlak přibližně atmosférický, dojde ke zvýšení tlaku na cca 1 MPa. Tyto tlaky často překračují mez pevnosti technologických zařízení a pokud nejsou speciálně konstruovány tak, aby těmto přetlakům odolávaly, může dojít k destrukci.

Účinky vzdušné tlakové vlny

Maximálních přetlaků je obvykle dosahováno v oblasti stechiometrických koncentrací nebo mírně negativních kyslíkových bilancí. Obecně lze odvodit, že čím vyšší je hustota energie (čím více energie je uvolněno v jednotce objemu) tím vyšší jsou docílené přetlaky. Maximální přetlaky explozivního hoření plyných systémů lze vypočítat ze složení výbušného systému a termochemických dat.

Metoda vyhodnocení účinku havarijního úniku látky schopné výbuchu je založena na metodě "tritolového ekvivalentu". Tato metoda vychází ze skutečnosti, že parametry vzdušné rázové vlny a její šíření v prostoru jsou především funkcí uvolněného množství energie, která přejde do tvorby rázové vlny. Pro tlakové pásmo 10-100 kPa, které se nachází v zájmové oblasti, je tento předpoklad s rezervou splněn.

Výpočet ekvivalentního množství TNT energeticky odpovídajícího množství látky schopné výbuchu v uvolněném oblaku je založeno na vztahu:

$$W = k_{TNT} \cdot M \cdot \frac{Q_1}{Q_{TNT}}$$

- kde W je ekvivalentní hmotnost nálože TNT [kg],
- k_{TNT} stupeň konverze,
- M množství látky v mezích výbušnosti [kg],
- Q_1 spalné teplo látky [kJ.kg⁻¹]
- Q_{TNT} spalné teplo TNT [kJ.kg⁻¹].

Znalost ekvivalentního množství TNT pak umožňuje vyhodnotit vzdálenosti pro jednotlivé typy účinků.

Maximální přetlak vzdušné rázové vlny jako funkci vzdálenosti a hmotnosti nálože definuje vztah:

$$p_p = \frac{93,2}{Z} \% \frac{383}{Z^2} \% \frac{1275}{Z^3}$$

s rozsahem platnosti: $Z \geq 2; 200$,

kde p_p je přetlak tlakové vlny [kPa], Z je redukovaná vzdálenost [kg.m^{-1/3}].

Pro rychlou orientaci v destrukčních projevech, např. pro potřeby havarijního plánování, je používáno základní rozdělení do pásem.

Základní pásma rozrušení

Přetlak na čele vlny p (kPa)	Účinek	Pásmo
> 100	Úplná destrukce budov. 100 % mortalita.	Silného rozrušení
100 - 30	Vážné poškození budov.	Středního rozrušení
30 - 10	Rozbitá okna, lehčí poškození budov. Poranění lidí.	Mírného rozrušení

30.4.4 Rozbor příčin proběhlých havárií

Pro analýzy možných rozvojų havárie a jejich dopadů jsou již proběhlé havárie významným zdrojem informací, které nám umožní verifikovat teoretické modely pro zjišťování účinků a dopadů havárií a pravděpodobnost možného rozvoje havárie. Pro prevenci vzniku havárie je důležité znát nejčastější příčiny vzniku havárií, aby mohla být přijata odpovídající opatření technická a organizační ke snížení rizika, snížení pravděpodobnosti vzniku havárie.

Nehody proběhlé na plynovodech v ČR a ve světě jednoznačně ukazují na několik základních příčin vzniku havárií. Příčiny havárií můžeme rozdělit do několika skupin:

- technická závada (konstrukční, vada materiálu, nedodržení technologické kázně při výstavbě a opravě),
- koroze,
- provozní chyba zaměstnance (lidský činitel),
- vnější vliv (přírodní vlivy, zásah cizí organizace nebo osoby).

Při zjišťování příčin havárií je uvažována nejen přímá příčina havárie (únavový lom, koroze, vadný materiál, roztržení zemním strojem, nesprávná manipulace a obsluha zařízení atd.), ale i příčiny, které umožnily vznik havarijní situace (nedodržení technologie výstavby a opravy, nedostatečná kontrola a údržba atd.). Ve většině případů dojdeme při hledání nepřímých příčin vzniku havárie k tomu, že došlo k selhání lidského činitele. Ve výsledku tedy nebyly dodrženy předepsané postupy nebo nebyly tyto odpovídající postupy dosud stanoveny.

Při porovnání příčin velkých havárií v ČR (na plynovodech ZP a svítiplynu) a ve světě (na plynovodech ZP) zjišťujeme, že v ČR má poměrně významný vliv nedodržení technologické kázně, technologických postupů při výstavbě plynovodu. Relativně často vznikly havárie v souvislosti s provozem cizích zařízení nebo prací cizích organizací v blízkosti plynovodu. Tato příčina je typická i pro havárie v zahraničí. Z 15-ti popsanych velkých havárií v zahraničí je u 13-ti z nich jako příčina uvedeno právě působení cizích organizací a osob.

Z rozboru havárií v USA na plynovodech ZP v letech 1985 až 1995 (celkem 1348 nehod) vyplývá, že:

- cca 30 % bylo způsobeno vnějším vlivem,
- vadou materiálu a konstrukce bylo způsobeno 10 %,
- koroze 16 %,
- příčiny zbývajících nehod jsou nerozlišeny nebo neurčeny.

Zajímavým zjištěním z hlediska dopadů na osoby je, že ze všech úrazů v souvislosti s těmito haváriemi (celkem 177 úrazů) vzniklo 38 % úrazů při haváriích způsobených vnějším vlivem a u smrtelných úrazů (celkem 42) to bylo dokonce 62 %. Na základě tohoto zjištění lze přijmout hypotézu, že při haváriích způsobených vnějším vlivem, tzn. vlivem činnosti cizích organizací, dochází k závažnějším dopadům na osoby. Při porušení plynovodu cizí organizací, většinou při práci zemního stroje, je přítomna minimálně obsluha stroje nebo jiného zařízení a je přítomen iniciační zdroj - zemní stroj apod., který umožní vznik ohně typu JET FIRE, případně FLASH FIRE. Osoby v okolí plynovodu pak jsou ohroženy nejen tlakovou vlnou při roztržení plynovodu, hlukem a odletující zeminou a fragmenty plynovodu, ale také sálavým teplem při požáru. Většina zemních prací je prováděna v blízkosti různých komunikací nebo staveb, což zvyšuje počet ohrožených osob, které nejsou vybaveny a připraveny na havárii, a zvyšuje se možnost iniciace. Pokud je havárie zapříčiněna koroze, vadou materiálu bez přímého vlivu

činnosti člověka, není ohrožení osob tak vysoké, protože plynovody vedou mimo sídla a mají předepsaná bezpečnostní pásma, v kterých není povoleno trvalé osídlení. Tato pásma zároveň přibližně odpovídají možnému dosahu smrtelných účinků havárie.

Na základě znalosti příčin možného vzniku havárie je nutné věnovat zvýšenou pozornost výstavbě nových plynovodů, včetně výběru dodavatelské organizace, provádění dohledu, dozoru a kontrol ve fázi projektu, výstavby, přebírání a uvádění plynovodu do provozu. Důležitá je také kontrola ochranného a bezpečnostního pásma a systém povolování a dohledu nad pracemi v těchto pásmech. Spolupráce se stavebními úřady v oblasti regulace stavebních prací v blízkosti plynovodu, s OKÚ v oblasti prevence a likvidace havárií podporuje včasné podchycení nebezpečných situací ohrožujících plynovody a následně jejich okolí.

30.4.5 Program ROZEX

Programy, které využívají výše uvedených vztahů pro modelování projevů havárie a pro výpočet dosahů možných účinků těchto projevů, umožňují efektivní provádění výpočtů pro potřeby havarijního plánování, analýz rizika i při řešení havarijních situací. Firma TLP, s.r.o. vyvinula řadu programů pro vyhodnocování havarijních projevů úniků plyných a kapalných nebezpečných látek (toxických, hořlavých nebo výbušných) pod společným názvem ROZEX.

Verzi určenou pro modelování na plynovodech ZP je program ROZEX TG. Zadávané hodnoty pro výpočet JET FIRE jsou limitovány tak, aby nemohly být zadávány nesprávné hodnoty při překlepu apod. Ekvivalentní průměr otvoru úniku je například limitován velikostí zadaného DN potrubí. Výstupní formulář na obrazovce případně na tiskárně obsahuje vstupní hodnoty výpočtu a vypočtené hodnoty. Výsledkem výpočtu jsou doba turbulentního úniku, maximální dosah DMV, výška plamene (průměr výšky v intervalech 0-15 s, 15-180 s, 3-15 min., 15-60 min.), dosah působení sálavého tepla (účinky sálavého tepla na osoby - mortalita 50%, popáleniny I. stupně, bezpečná vzdálenost - pro expozice 15, 60, 120 a 180 s), dále účinky sálavého tepla na osoby po 15 a 60 min. při expozici 3 min., dosah působení sálavého tepla na ocel (porušení pevnosti) a na dřevo (zapálení) při expozici 3 minuty.

Poslední verze programu ROZEX TG (v. 2.0) umožňuje provést velmi rychlé a dostatečně přesné vyhodnocení možných následků úniku ZP z potrubí s následným zahořením. Důraz je dán na jednoduché a srozumitelné ovládání s maximální podporou uživatele.

30.5 HAVARIJNÍ PLÁNOVÁNÍ

30.5.1 Cíle havarijního plánování

Havarijní plánování je nutným předpokladem pro úspěšné zvládnutí havarijních situací. Předem zpracované postupy pro možné typy havárií umožní včasnou reakci na havárii a umožní omezení rozvoje havárie a jejich dopadů na okolí a vlastní zařízení.

V systému havarijního plánování nejde pouze o zajištění připravenosti k vlastnímu zásahu, ale také o snížení možnosti vzniku havárií a omezení jejich rozvoje a dopadů vhodnými technickými a organizačními opatřeními.

Základním dokumentem havarijního plánování je havarijní plán. Postupy uvedené v havarijním plánu musí být provázány s opatřeními a postupy uvedenými v souvisejících dokumentech, jako jsou požární dokumentace a krizový plán subjektů hospodářské mobilizace, a v další dokumentaci podniku (provozní řády, dispečerský řád, organizační řád atd.).

V rámci zpracování havarijního plánu jsou vyhodnoceny zdroje rizika, určeny možné rozvoje a dopady havárií, analyzován organizační, řídicí a informační systém, včetně spojovacích prostředků, informačních zdrojů, proveden rozbor sil a prostředků pro zásah a záchranu atd.. Podkladem pro zpracování havarijního plánu je proto bezpečnostní zpráva nebo podrobná bezpečnostní studie, která analyzuje všechny výše uvedené aspekty.

Na základě podrobného rozboru či analýzy všech faktorů, které ovlivňují efektivnost opatření v oblasti prevence a likvidace havárie, lze potom zpracovat funkční systém havarijních, resp. protihavarijních opatření. Opatření přijatá v této oblasti přispívají k bezpečnému a spolehlivému provozu plynárenské soustavy, což sebou přináší dlouhodobé ekonomické efekty.

Havarijní plán je zpracováván na základě zákona č. 222/1994 Sb., z 2. listopadu 1994, o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o státní energetické inspekci, který v § 12 (1) definuje stav nouze a v písmenu c) jako možnou příčinu havárií na zařízeních pro výrobu a rozvod tepla. Podle odstavce (4) jsou držitelé autorizace (provozovatelé) povinni bezprostředně po vzniku havárie zahájit likvidaci následků v souladu s havarijními plány. Podle vyhlášky MPO č. 197/1995 Sb., § 4 postupují držitelé autorizace podle schválených havarijních plánů a podle konkrétní situace v plynárenské soustavě. Havarijní plány pro stavy nouze jsou zpracovávány pro likvidaci následků poruch a havárií a pro postup při úplném přerušení dodávek plynu podle havarijního odběrového stupně č. 10 pro území města a pro obce.

Hlavním cílem realizace úkolů vyplývajících z tohoto havarijního plánu je likvidace následků poruch a havárií, které mají vliv na zabezpečení přepravy a dodávek plynu. Přičemž následkem poruchy nebo havárie je podle vyhl. č. 197/95 Sb. stav nouze a stavem nouze se rozumí omezení nebo přerušení dodávek plynu.

Vzhledem k požadavkům státní správy na OKÚ a požadavkům OKÚ na podniky v okrese a vzhledem k připravované legislativě, je nutné zpracovat v havarijním plánu opatření, která řeší dopady vzniklé havárie na pracovníky provozu, obyvatele v okolí plynovodu, majetek a životní prostředí.

Možným řešením je zpracování dvou havarijních plánů, jeden plán k zajištění přepravy a druhý k zabezpečení ochrany osob a majetku na území podniku a v jeho okolí. Vhodnější je asi zpracovat havarijní plán jeden, který bude spojoval oba aspekty, včetně informací potřebných pro havarijní plánování okresu.

Význam korektních informací pro havarijní plánování OKÚ je v případě VVTL a VTL plynovodů zásadní, protože zásahové a záchranné složky zabezpečuje OKÚ (hasičský záchranný sbor, policie, zdravotníci). Plynárenské společnosti nemají vlastní zásahové síly k záchraně obyvatel a majetku, pouze pohotovostní služby (čety), které v případě havárie provádějí opatření k ukončení úniku zemního plynu a případně zajišťují opravy zařízení.

Cílem realizace havarijního plánu pro plynovody je připravit účinný protihavarijní systém, který v okamžiku vzniku havárie nastartuje činnosti směřující k její likvidaci, k ochraně obyvatelstva, majetku a životního prostředí. Součinnost složek plynárenského podniku a záchranných a zásahových složek vně podniku, jejich rychlá a přesná reakce na vzniklé havarijní situace, zabezpečuje včasný a rychlý zásah a tím zmírnění následků havárií (ekologických, ekonomických, společenských).

Vzhledem ke specifice plynovodů je při zpracování havarijního plánu položen také důraz na rozpracování systému spolupráce mezi plynárenským podnikem a státní správou (okresní úřad, složky IZS okresu), a to nejen při řešení vzniklé havárie, ale i při přípravě obyvatelstva, orgánů a organizací v okolí plynovodu.

30.5.2 Struktura havarijního plánu

Havarijní plán se skládá z informativní a operativní části. Nedílnou součástí operativní části havarijních plánů jsou havarijní karty jednotlivých částí (linií, tras) plynovodů, doplněné o karty křížení a souběhů. Pro vlastní řešení havárie mají největší význam informace obsažené v operativní části, která shrnuje v přehledné formě informace nutné pro podporu řešení havárie, pro provádění odpovídajících činností.

Informativní (pohotovostní) část

Informativní část obsahuje všeobecné informace o podniku a jeho organizaci, informace o zdrojích rizik a rizicích (popis zařízení, informace o látkách apod.), informace o stacionárních zdrojích rizik v okolí, organizaci činnosti a systému řízení v případě havárie, informace o komunikačních systémech, informace o výstražných a varovných systémech a prostředcích, přehled o prostředcích, technických zařízeních a systémech pro záchranné a likvidační práce, o systému školení a výcviku, aktualizace a posuzování havarijního plánu.

Operativní část

Operativní část obsahuje informace (tabulky, schémata, přehledy apod.) pro podporu řešení a likvidace havárie, záchranu osob apod. Obsahuje scénáře a doporučené postupy řešení havárie. Přílohou operativní části jsou havarijní karty, včetně karet křížení a souběhů.

Havarijní karty

Havarijní karty jsou nedílnou součástí havarijních plánů. Havarijní karty jsou určeny pro základní subjekty podílející se na řešení havárie a obsahují obecné i specifické informace, které daný subjekt potřebuje pro provedení odpovídající činnosti vedoucí k minimalizaci dopadů na okolí a omezení dalšího rozvoje havárie podle havarijního plánu. Každá havarijní karta má jednoznačný systém identifikace, který určuje jejího uživatele a zařízení (trasa plynovodu, regulační stanice, VPS apod.), pro které je havarijní karta zpracována. Havarijní karty jsou obvykle zpracovány pro dispečink, pohotovostní službu, hasičský záchranný sbor okresu, policii ČR, případně pro rychlou záchrannou pomoc.

Příklad základní struktury havarijního plánu

Informativní (pohotovostní) část

- Úvodní ustanovení,
- Základní informace o podniku,
- Charakteristika nebezpečných látek,
- Základní typy havárií, modelování účinků,
- Systémy a prostředky komunikace, vyrozumění a varování,
- Síly a prostředky k likvidaci havárie,
- Použití havarijních karet při řešení havárie,
- Školení, výcvik,
- Aktualizace a posuzování havarijního plánu.

Operativní část

- Organizace činnosti a systém řízení v případě havárie,
- Evakuace,
- Zdravotnické zabezpečení.

Přílohy

- Havarijní karty,
- Schémata zařízení (průběh trasy plynovodu, VPS, RS apod.),
- Přehled okresů, kterými prochází plynovod,
- Rozdělení plynovodu na úseky a trasy.

30.6 ZÁVĚR

Výsledky analýz rizika, poznatky z proběhlých havárií a zkušenosti s provozem umožňují navrhnout opatření, která eliminují nebo omezují podmínky umožňující vznik a rozvoj havárie a dopady havárie.

V České republice není dána zákonem povinnost provádět podrobné analýzy rizika. Vzhledem k tomu, že bez podrobných analýz rizika lze jen obtížně správně identifikovat a ohodnotit rizika, najít odpovídající opatření ke snížení rizika, zpracovat havarijní plány atd., provádějí velké chemické a plynárenské podniky (Transgas, Chemopetrol, Kaučuk atd.) podrobné analýzy rizika pro potřeby bezpečnostních a pojišťovacích studií, auditů, havarijních plánů apod.

Výsledky analýz rizika mají široké uplatnění při:

- projektování a výstavbě plynovodů,
- posuzování investic do bezpečnosti stávajících zařízení,
- zpracování bezpečnostních auditů,

- zpracování posouzení ohrožení okolí plynovodu (pro výstavbu nových plynovodů, pro výstavbu v okolí plynovodu),
- zpracování koncepce řízení bezpečnosti,
- výchově a výcviku zaměstnanců,
- zpracování havarijních opatření, havarijních plánů,
- přípravě pojistných smluv (získání bonusů za vyšší úroveň bezpečnosti) apod.

Opatření uplatněná v jednotlivých oblastech snižují riziko v jedné nebo v obou jeho složkách, tzn. snižují pravděpodobnost vzniku havárie a snižují také rozsah a velikost dopadů. Současně tato opatření mnohdy snižují riziko ekonomických ztrát z přerušení provozu a další následné ztráty.

30.7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion
BOZP	bezpečnost a ochrana zdraví při práci
CO	Civilní ochrana
DDT	Deflagration to Detonation Transition
ETA	Event Tree Analysis
EU	Evropská unie
FTA	Fault Tree Analysis
HAZOP	Hazard and Operability Study
HKa	havarijní karty
IZS	Integrovaný záchranný systém
NL	nebezpečná látka
PO	požární ochrana
QRA	Quantitative Risk Analysis
RS	regulační stanice
TU	trasový uzávěr
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion
VPS	vnitrostátní předávací stanice
VTL	vysokotlaký
VVTL	velmi vysokotlaký
VTZ	vyhrazená technická zařízení
ZP	zemní plyn
ZR	zdroj rizika

30.8 LITERATURA

- [1] Odborné práce TLP, s.r.o. pro Transgas, o.z., 1996-7
- [2] F. Dittrich, TLP s.r.o.: Není výbuch jako výbuch, Sborník přednášek mezinárodní konference "Prevenca pred účinkami priemyselných havárií", Stará Lesná, 1996
- [3] F. P. Less: Loss Prevention in the Process Industries, 2. Butterworts, London, Boston 1980
- [4] TNO: Methods for the Calculation of Physical Effects (Yellow Book), 2. Edition, Netherlands 1992
- [5] TLP, s.r.o: Příručka programu ROZEX, ver. 3.0, 1996