

# Příloha č.2 k metodice ISAAC

## Projevy závažných havárií

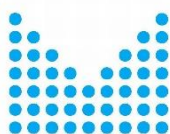
---

**Vytvořeno v rámci řešení projektu:**

„Rozvoj nového přístupu ke zjišťování příčin průmyslových havárií s účastí nebezpečných látek (zkratka „ISAAC“), podpořeného programem bezpečnostního výzkumu České republiky 2015-2022 (BV III/1-VS)

ID projektu: VI20192022119

Období řešení projektu: 01.09.2019 – 31.8.2022



MINISTERSTVO VNITRA  
ČESKÉ REPUBLIKY

# Projevy závažných havárií

Projevy závažných havárií způsobených nebezpečnou látkou v rámci průmyslu závisí na mnoha faktorech. Majoritní význam v této problematice má množství nebezpečné látky a její nebezpečná vlastnost. Mezi faktory s významem lze zařadit okolní podmínky (např. atmosférický rozptyl, iniciace, způsob uložení nebezpečné látky, velikost otvoru při úniku nebezpečné látky atd.). Všechny tyto faktory ve větší, či menší míře ovlivňují velikost projevu havárie a tím velikost následku na cílový systém (zdraví člověka, poškození budov, kontaminaci životního prostředí atd.). Pro správný návrh scénáře a tím i dalších kroků analýzy rizik je nutné porozumět samotným projevům havárie.

## 1 Specifika požáru

Hoření je chemická reakce, při které palivo reaguje s oxidantem, za vzniku různých produktů a energie. Hoření ve skutečnosti vždy probíhá v plynné fázi: tekutá paliva se vypařují působením tepla z plamene a potom reagují s kyslíkem ve vzduchu, pevné látky jsou rozkládány působením vysoké teploty a vzniklé plyny reagují s oxidovadlem, obvykle kyslíkem ve vzduchu. Plameny jsou tyto plyny, reagující při vysokých teplotách, a částečně mohou být i ve formě plasmy. Produkty hoření jsou uvolňovány ve formě kouře, který obsahuje také neshořelé palivo a reakční meziprodukty.

V případě požárů při haváriích je hoření obvykle nedokonalé, kvůli špatnému mísení plynů a par paliva s kyslíkem, a proto se tvoří velké množství černého kouře a sazí. K tomu, aby došlo k hoření, jsou vyžadovány tři základní nutné podmínky: palivo, oxidant a iniciační zdroj. Tyto podmínky mohou být reprezentovány takzvaným trojúhelníkem hoření: pokud jeden z jeho vrcholů chybí, hoření není možné. Trojúhelník hoření bývá někdy doplněn přítomností čtvrté strany: může být nazvána buď řetězovou chemickou reakcí **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** nebo přítomností volných radikálů. Bez této čtvrté podmínky – například v přítomnosti halonových plynů, které blokují radikálovou reakci, k hoření již nemůže dojít. Potom se místo o trojúhelníku hoření mluví o požárním čtyřstěnu. V praxi je navíc pro požár potřeba několik dalších podmínek: palivo a oxidant musí být přítomny v dostatečných množstvích, palivo musí být schopno se vznítit (např. jeho teplota musí být nad určitou minimální hodnotou) a iniciační zdroj musí mít určitou minimální intenzitu.

Rozsah, charakter, průběh požáru tedy závisí na celé řadě okolností a podmínek, za jakých k němu došlo. Zjednodušeně řečeno, jedná se především o druh hořlavé látky a její vlastnosti, skupenství a množství, dále záleží na technologických parametrech (především tlak a teplota), při kterých se látky vyskytují apod. Na základě historických zkušeností a základního chování nebezpečných látek rozdělujeme průmyslové požáry s palivy do několika základních jevů. Jedná se především o

- Pool fire – požár kaluže
- Jet fire – tryskový požár
- Flash fire – prohoření oblaku par
- Fireball – ohnivá koule, může vznikat v rámci jevů BLEVE a Boilover

Prvním základním indikátorem toho, o jaký jev v případě hořlavých látek se bude jednat, je skupenství, ve kterém se daná látka nachází. Pokud se jedná o kapalinu, únik může způsobit kaluž na zemi, která, pokud je přítomná překážka (např. záchytná jímka), se rozlije pouze po určité ploše. Výsledek je potom podobný, jako když dojde k požáru po poškození střechy zásobníku s hořlavou kapalinou. V těchto případech vede inicializace k pool fire a požár zásobníku může být považován za druh pool fire. Pokud kapalina teče pryč, což není příliš

časté, následný pohybující se požár má odlišné rysy a může být i velmi obtížné ho uhasit. Pokud dochází u přehřáté kapaliny k bleskovému odparu následkem náhlého poklesu tlaku při ztrátě soudržnosti nádrže, může se vytvořit fireball.

V případech, kdy látka uniká z otvoru pod tlakem jako plyn, pára nebo aerosol (tzv. dvoufázový výtok) a je inicializována okamžitě, vzniká jet fire. Pokud nedojde k iniciaci okamžitě, může se na základě určitých meteorologických podmínek vytvořit oblak obsahující hořlavou směs – iniciace takového mraku způsobuje flash fire nebo výbuch VCE. K flash fire může dojít také v případě, že není inicializována kaluž těkavého paliva a oblak hořlavých par vznikne následkem vypařování z kaluže. Pool fire a požáry zásobníků jsou nejčastěji se vyskytujícími typy požárů, následují jet fire, flash fire a fireball. Zatímco pool fire a jet fire mohou hořet dlouhou dobu – až několik dnů, fireball bude obvykle trvat méně než minutu a často pouze několik sekund. V případě flash fire se jedná o velmi krátký jev trvající pouze několik sekund.

Pro lepší přehlednost jsou popisy jednotlivých jevů uvedeny jako samostatné podkapitoly. Jevy Flash fire a Fireball jsou detailněji popsány až po uvedení specifik výbuchů.

## **2 Popis požáru typu POOL FIRE- požár louže**

Požár typu pool fire lze charakterizovat jako hoření par vznikajících nad hladinou hořlavé kapaliny. Požár typu pool fire hoří plamenem, který je obvykle válcovitého tvaru. Při bezvětří je plamen vertikální, v případě větru je nakloněný. Významné vlastnosti požáru typu pool fire (výška plamenů, vyzářené teplo, rychlost odhořívání) závisí převážně na průměru kaluže tvořené hořlavou látkou. Doba trvání nehaseného požáru typu pool fire závisí především na hloubce kaluže (zásobníku).

V případě jevu pool fire se může jednat jak o požár v atmosférických zásobnících s hořlavou kapalinou, tak o požár rozlité nebezpečné látky na určitém prostoru nebo na vodní hladině. Kapalná paliva a především ropa jsou často skladovány ve velkokapacitních zásobnících s plovoucí střechou. Požáry těchto zásobníků patří k častým a nebezpečným typům požáru v rámci energetiky. Podle lze tyto požáry rozdělit na několik základních typů: může jít o požáry okrajového těsnění, kdy samotné hoření probíhá pouze v mezeře mezi plovoucí střechou a stěnou zásobníku, k požáru na střeše, kdy hoří pouze kapalina rozlité nad plovoucí střechou, požáru jímky, kdy hoří kapalina rozlité v havarijní jímce, požáru celé nádrže, kdy se střecha potopí a požár zasáhne celou hladinu kapaliny, anebo k požáru rozlité kapaliny, kdy hoří unikající kapalina mimo prostor zásobníku i havarijní jímky.

Jedním z jevů, ke kterým může také dojít, je i požár pohybující se kapalinou, která se rozlévá po okolí. V tomto případě se šíří jak vrstva hořlavé kapaliny (palivo) tak i plameny. Tento jev může probíhat jak na rovném povrchu (stejně jako rozliv kaluže), tak na svahu, který je z hlediska potenciálního přenosu havárie do okolí nebezpečnější. Hořící kapalina se také může šířit jinými cestami, nebezpečný případ může nastat, například pokud se hořící kapalina dostane do kanalizace. V takovém případě dochází k hoření ve chvíli, kdy je dostatečný přísun vzduchu (kanály, výpustě) a může dojít i k explozím uvnitř kanalizačního potrubí, obdobně jako při havárii cisterny s technickým benzínem na D1 u Kozlova 2. 9. 2004.

V nízkých jímkách nebo u neohrazených rozlitéch kalužích nemusí být tloušťka paliva v kaluži dostatečná k tomu, aby hoření probíhalo ustáleně. Existuje zde mnoho nejistot, se kterými nelze takový požár plnohodnotně studovat, například to, jaký bude mít vliv svažování okolí nebo vítr. Velikost rozlivu závisí na více faktorech, včetně rychlosti úniku kapaliny, její viskozity a povrchové napětí, pórovitosti podkladu a jeho drsnosti. Hloubka kaluže v rozlivu se dle literatury obvykle pohybuje v rozmezí od 0,7 do 4 mm. Charakteristika hoření je u kaluže s nízkou hloubkou podstatně ovlivněna předáváním tepla podkladu. Teplo, odvedené do podkladové vrstvy konvekcí snižuje vypařování a tak i velikost plamenů a rychlost odhořívání.

To může vést až k pětinasobné redukci spalovací rychlosti u rozlité kaluže oproti hluboké kaluži. Obecně lze konstatovat, že požáry rozlité kaluže mají oproti ohraničeným hlubším kalužím požárům (požár jímky) kratší trvání a menší výšku plamenu, ale mají větší plochu. Faktory působící na větší poloměr požáru způsobuje horší průběh hoření a tím zvyšuje množství sazí, které znesnadňují hasební zásah a kontaminují ovzduší.

Kapalné palivo (obvykle uhlovodíky) může hořet na vrstvě hasební vody, vytvořené v rámci požárního zásahu. Pokud oheň hoří již určitý čas, voda může začít vřít a může vznikat jev známý jako „boilover na tenké vrstvě“. Vítr způsobuje rozšiřování základny plamenů ve směru větru. Nad určité rychlosti větru (okolo 5 m/s) může u některých požárů dojít i ke sfouknutí.

## 2.1 Nebezpečné projevy požáru

Přenos tepla atmosférou probíhá ve formě tepelné radiace – sálavého tepla. To většinou nedosahuje takové intenzity jako u jiných typů požáru (fireball, jet fire) nicméně u rozsáhlejších požárů jsou mu části cílového systému (např. budovy) vystaveny velmi dlouho dobu. Ohrožení obyvatelstva je v tomto případě nízké, jelikož je možné se před projevy havárií ukrýt, protože jeho rozvoj trvá určitou dobu a dosah je často omezený. Vzhledem k době působení je nejnebezpečnější působení tepelné radiace na objekty. Ty mohou být zasaženy buďto tepelnou radiací požáru kaluže s dostatečnou hloubkou (dlouhá doba trvání) nebo působením požáru, který se následkem rozlité dostal až k objektu (např. požár kaluže pod tlakovým zařízením). Požár typu pool fire tak může být zdrojem poškození budov, ostatních zařízení a často také příčinou domino efektu. V případě požárů zásobníku má významný vliv rychlost a směr větru.

Teplo při požáru se může šířit i konvekcí při pohybu produktů hoření z místa požáru. Jelikož požáry kaluží probíhají v průmyslových podnicích většinou v otevřeném prostoru, horký vzduch stoupá, ochlazuje se a v důsledku toho nepůsobí další škody, na rozdíl od požárů uvnitř budov a konstrukcí, kde může dojít k jejich vzplanutí nebo zhroucení.

Určité množství tepla se může šířit stěnami zásobníku (kondukce). To může vést až ke ztrátě pevnosti materiálu a k rozvalení zásobníku. V případě velmi malých průměrů zásobníku může mít kondukce vliv na šíření tepelné vlny ve směsi kapalných uhlovodíků a tím urychlit vznik nebezpečného jevu boilover.

Vzniklé produkty hoření jsou unášeny ohřátým vzduchem (okolní atmosférou) ve směru větru, kde se dále rozptylují. Po ochlazení ve vyšších vrstvách vzduchu mohou v určité vzdálenosti od zdroje klesat na úroveň terénu. Jejich složení závisí na typu hořící látky. Vzniklé produkty hoření mohou mít jak toxické účinky, které vlivem disperze a meteorologických podmínek mohou dostat do značných vzdáleností od zdroje požáru, zároveň jejich působení na cílový systém může být řádově od několika minut až po několik hodin. Dalším druhem nebezpečí jsou nespálené zbytky vzniklé v důsledku nedokonalého hoření. Tyto produkty se mohou stejně jako toxické látky dostat do atmosféry. Jak toxické zplodiny, tak zbytky znečišťují životní prostředí. Pevné a kapalné produkty hoření, které neunikají do atmosféry a zůstávají na místě požáru, se mohou do okolí šířit hasební vodou, která se může způsobit poškození životního prostředí.

## 2.2 Shrnutí poznatků o požáru jevu pool fire

Vznik požáru typu pool fire je obecně velmi těžké předvídat. K iniciaci obvykle dochází následkem výbuchu oblaku par, který se vytvořil nad vrstvou kapaliny. V případě rozlitéch kaluží, kdy je paliva obecně méně, je potom v případě vytvoření kaluže nejnebezpečnějším jevem vzplanutí oblaku par. Při úniku kapaliny lze tedy očekávat určité zpoždění, než vytvořený oblak hořlavých par nalezne iniciační zdroj. V případě přítomnosti menších požárů (požár těsnění, požár v jímce) lze například u větších zásobníků předpokládat rozšíření i na požár celkového povrchu. Obecně lze také často předpokládat rozšíření v případě blízkosti

jednotlivých zásobníků, ať už následkem tepelného toku, tak možného vzniku jevu boilover. Trvání požáru výrazně záleží na množství látky (hloubce kaluže), která může hořet. V případě malých úniků a kaluží rozlitých bez ohrazení mohou požáry trvat jen několik minut, v případě zásobníků s kapalnými hořlavinami (především ropou) lze na základě historických zkušeností hovořit o hodinách až dnech. Z pohledu prevence závažných havárií, představují největší problém především produkty hoření, a to z důvodu větší pravděpodobnosti zasažení cílového systému mimo areál podniku než přenos tepla. Neopomenutelné je však také nebezpečí plynoucí s úniky požárních vod, které může mít dalekosáhlé následky na životní prostředí.

### 2.3 Příklady havárií požáru jevu pool fire

Signal Hill, California, USA (1958)

Zásobník o obsahu 12 719 m<sup>3</sup>, který sloužil jako zásobovací nádrž, vybuchl. Vyvalila se pára, utrhla se střecha a ropná pěna se vyvalila ven. Nenastala bezprostřední iniciace. Ropná pěna se valila po celém území závodu, vytvořila vlnu 1 m vysokou. Potom nastala další exploze a pěna vzplanula. Byla zasažena plocha o velikosti 27 akrů. Oheň hořel 40 hodin. Dva lidé zemřeli a 18 bylo zraněno. Ropa byla v zásobníku při teplotě 157°C a výbuch způsobila voda, která se objevila uvnitř zásobníku a začala vřít.

Hearne, Texas USA (1972)

Na ropném potrubí o průměru 8 palců (20,3 cm) došlo k narušení a vzniku otvoru v horní části potrubí o velikosti 6 palců (15,2 cm). Převážovaná ropa začala unikat a rozstříkovat se po okolí. Ropa zaplavila i potok nedaleko úniku a zachytávala se v rybníku 550 m od úniku. Za 4,5 hodiny od začátku úniku byla ropa iniciována nezjištěným zdrojem. Výsledná exploze a požár vedly k jednomu úmrtí vážným popáleninám dvou lidí. Intenzivní požár o výšce několika desítek metrů a délce více jak 500 m se rozhořel na ploše potoka, blízkého rybníku a silnice a železnice vedoucí podél potoka a vypálil celou oblast. Množství uniklé ropy bylo 1258 m<sup>3</sup>.

Umm Said, Katar, Perský záliv (1977)

V jednom skladovacím zásobníku došlo ke katastrofickému poškození. Jednalo se o jednostěnný zásobník z uhlíkaté oceli, který obsahoval 37 000 m<sup>3</sup> kapalného propanu, skladovaného při teplotě -42°C. Vlna kapalného propanu se přelila přes okraje jímky a začala vřít na písku. Vlna dosáhla až k sousednímu zpracovatelskému objektu, kde byla iniciována.

Vznikl masivní požár, který vedl k rozsáhlým škodám, hořel bez kontroly dva dny a byl uhašen až po osmi dnech. Na následky požáru zemřelo 7 osob a 13 osob bylo zraněno.

Buncefield, VB (2005)

Došlo k sérii explozí, ve skladu ropy, leteckého benzínu, nafty a dalších paliv. Prinejmenším jedna z explozí měla masivní rozměry a došlo k rozsáhlému požáru, který zaplavil 20 velkoobjemových skladovacích zásobníků s ropou. Bylo zraněno 43 lidí, nikdo vážně, k úmrtí nedošlo. Podstatné poškození utrpěly komerční i obytné budovy v okolí a bylo evakuováno na 2000 lidí. Požár trval několik dnů, zničil většinu skladu a vytvářel velké množství černého kouře, který se rozptyloval nad jižní Anglií. K hašení bylo použito velké množství pěny a vody. Určité množství požární vody uniklo mimo podnik.

## 3 Popis požáru typu JET FIRE - tryskový požár

Vlastnosti požáru typu jet fire závisí na složení paliva, podmínkách úniku, rychlosti úniku, rozměru otvoru, jímž látka uniká a v neposlední řadě také na směru a rychlosti větru.

Nejjednodušší formou požáru typu jet fire je únik samotného plynu pod tlakem (nejčastěji uhlovodíku) s následnou iniciací. Pokud uniká směs plynu a kapaliny pod tlakem,

dochází k dvoufázovému tryskavému požáru. Proud plynu rozdělí kapalinu na kapičky, které jsou následně odpařeny teplem plamene. Může dojít i k úniku kapaliny pod tlakem, který vytvoří tryskavý požár. Pokud je kapalina schopna rychle se vypařovat, projeví se dvoufázové chování, tedy vznik aerosolu. K tomu může dojít, pokud kapalina uniká ze zařízení, kde je skladována při teplotě nad svým bodem varu, což umožní bleskový odpar (např. propan, butan) s následným tryskavým požárem odpařující se kapaliny. U málo těkavých uhlovodíků (kerosin, nafta, ustálená ropa) je nepravděpodobné, že by mohlo dojít za normálních podmínek ke vzniku dvoufázového tryskavého požáru. Jinými slovy, podmínkou vzniku tohoto jevu při úniku výše uvedených látek je jejich vystavení účinkům vnějšího požáru (například zásobník nebo potrubí v ohni). V každém případě úniku těchto látek může dojít k úkapu na zem a formování kaluže. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Ze zkušeností v průmyslu si lze jet fire představit jako velký plynový nebo olejový hořák s úzkým plamenem.

Zda dojde ke vzniku stabilního tryskavého plamene následkem úniku stlačeného plynu, závisí principiálně na vlastnostech a tlaku paliva, velikosti otvoru, ze kterého palivo uniká a vlastnostech okolního prostředí.

Různé překážky v okolí požáru mohou ovlivnit směr a tvar požáru typu jet fire. Objekty, které jsou menší, než polovina šířky plamene v daném bodě, pravděpodobně nezpůsobí výraznější změnu délky nebo tvaru plamene. Vlivem velkých zařízení nebo překážek v plamenu může dojít ke znatelnému zkrácení tvar požáru typu jet fire, překážka typu zeď nebo střecha může změnit plamen na kruhový stěnový plamen (radial wall jet), kde umístění a směr je dán typem povrchu, na který plamen dosahuje a jeho vzdáleností od bodu úniku.

Požáry typu Jet fire mohou vznikat v rámci průmyslu při mnoha situacích. V rámci havarijní situace mohou vzniknout při úniku hořlavé kapaliny nebo plynu ze zásobníku, potrubí nebo příruby pod tlakem, a to v případě, že je unikající materiál iniciován dodanou energií. Ve výjimečných případech, například u vodíku, může dojít díky zvláštním vlastnostem chemické látky a specifickým okolnostem k samovznícení.

V případě úniků zemního plynu pod vysokým tlakem je mísení a spalování relativně efektivní a vede k vzniku malého množství sazí s výjimkou extrémně vysokých rychlostí úniku. Při požárech zemního plynu proto vzniká jen velmi málo kouře, nebo vůbec žádný. Značně větší množství sazí vzniká při požárech s účastí vyšších uhlovodíků.

Zvláště nebezpečné vlastnosti má dále například požár typu jet fire u plynného vodíku, kdy může v závislosti na podmínkách vznikat poměrně dlouhý plamen (metry až desítky metrů). Tento plamen ovšem není téměř vidět díky absenci sazí na rozdíl od plamene hořícího uhlovodíku, a z plamene se jen málo tepla šíří zářením. Uvnitř plamene je spalováním vodíku dosahováno vysokých hodnot tepla, které není prakticky předáváno dále jinak než spaliny. Z výše uvedených faktů vyplývá, že tento typ požáru je zvláště nebezpečný pro zdraví osob, které plamen prakticky nevidí a tepelně necítí až do okamžiku plného zasažení. Ohrožené osoby procházející oblastí ohroženou takovým plamenem do ní mohou přímo vstoupit a utrpět vážné popáleniny.

Spalovací proces v rámci požáru typu jet fire - zemního plynu (nižších uhlovodíků) je relativně efektivnější a vzniká při něm menší množství sazí. Zároveň nejsou tyto plameny tak svítivé jako plameny vyšších uhlovodíků. Vyzařování tepla radiací z požáru typu jet fire zemního plynu je přímo úměrné obsahu vodní páry a oxidu uhličitého (s výjimkou velkých úniků, kdy produkce sazí omezuje proces spalování). Základním výsledkem je, že přenos tepla radiací u nižších uhlovodíků je menší, než u srovnatelných požáru typu jet fire vyšších uhlovodíků.

Požáru typu jet fire vzniká v případě, že je pod tlakem unikající hořlavá látka iniciována. K iniciaci může dojít kdykoli během úniku látky. Doba trvání závisí na době úniku – v případě úniku ze zásobníku až do jeho vyprázdnění, v případě úniku z potrubí, dokud je v potrubí tlak.

Stejně jako jev pool fire je tryskový požár těžké předvídat, proto k němu většinou dochází neočekávaně.

### **Přenosy nebezpečí u požáru jevu jet fire**

V následujícím textu jsou stručně specifikovány jednotlivé typy nebezpečí a cesty, kterými se nebezpečí přenáší na cílový systém. V závěru této kapitoly je provedeno zhodnocení jejich závažnosti z pohledu ohrožení cílového systému.

Teplota je přenášena okolní atmosférou plameny. V plamenu těchto požárů je obvykle vyšší teplota, než u běžných difúzních plamenů. Proto je dosah tepelné radiace z těchto plamenů poněkud delší. Protože plamen se může vytvořit v různých směrech (nemusí být pouze vertikální), dochází k šíření tepla tepelnou radiací v závislosti na směřování plamene.

Konvekce může u požáru typu jet fire představovat výraznou hrozbu. Jedná se především o nucenou konvekci, ke které dochází v plamenu následkem pohybu tryskajícího paliva. U méně zářivých plamenů (např. plamen vodíku) může docházet k přenosu většiny tepla pouze konvekci. Ohroženy jsou pak především objekty, kterých se dotýká samotný plamen a málokterý objekt takovému zatížení odolá.

Produkty hoření se přenášejí okolní atmosférou ve formě kouře. Zvláště při vyšších rychlostech dochází k dobrému promíchávání se vzduchem, proto při požárech typu jet fire dochází převážně k dokonalému spalování.

### **Shrnutí poznatků požáru jevu jet fire**

Přestože požár typu jet fire patří k jevům představujícím podstatné nebezpečí uvnitř zařízení a může vést ke vzniku domino efektu, jeho dopady mimo podnik jsou většinou minimální. V historii však lze nalézt jen minimální množství případů, kdy tento typ požáru způsobil závažné dopady na obyvatelstvo mimo hranice podniku.

### **Příklady havárií požáru jevu jet fire**

Las Piedras, Venezuela (1984)

Došlo k fraktuře na potrubí o poloměru 20 cm vedoucím horkou ropu pod tlakem 4,8 MPa. Horká ropa o teplotě 343°C byla rozstříkována po okolí až k vodíkové jednotce. Došlo k iniciaci a následný intenzivní požár vedl k ruptuře vodíkového potrubí o poloměru 0,4 m, což způsobilo masivní tryskový plamen, který byl příčinou dalšího poškození potrubí. K některým následným rupturám došlo se silou exploze.

Richmond, California, USA (1989)

Pěticentimetrové potrubí s vodíkem pod tlakem 19,3 MPa, bylo porušeno v místě sváru, přičemž vznikl tryskový požár vodíku. Ten dosáhl až na sousední reaktor a způsobil jeho poškození, což vedlo k rozsáhlým škodám.

## **4 Specifika výbuchu**

S problematikou požáru úzce souvisí problematika výbuchu, proto v následujícím textu jsou v krátkosti vysvětleny základní mechanismy výbušné přeměny spojené s uvolněním chemické energie, protože tyto mechanismy jsou v zásadě společné pro výbuchy kondenzovaných výbušnin, plyných oblaků i prachových disperzí.

Havarijní jev typu výbuch (exploze) je charakteristický rychlými fyzikálními nebo chemickými změnami doprovázenými velkým zvýšením tlaku (až 2,5 MPa). Mimo zvýšení tlaku je také při výbuchu generován světelný záblesk a zvukový efekt, oba tyto jevy existují po velmi krátkou dobu. Obecně shrnuto výbuch je velmi rychlý děj, spojený s velkým vzrůstem uvolněné energie, tlaku, tepla, zvuku, případně světla s následnými účinky (práce, destrukce

atd.). To vyústí v rychle se pohybující tlakovou vlnu. Hlavním kritériem rozeznání výbuchu je tedy nárůst tlaku. Rozeznáváme prioritně tři druhy výbuchu:

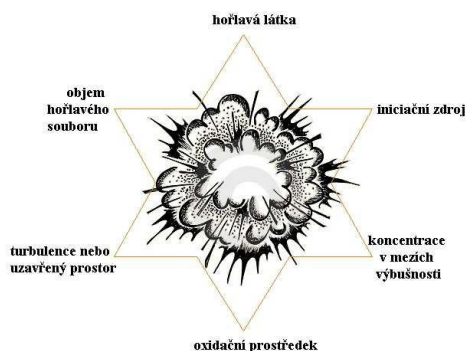
Fyzikální (mechanický) výbuch, vznikající při fázových přeměnách, výbuch, který je způsobený chemickou reakcí a jaderný výbuch, který vzniká při štěpení jader a atomů. Jak již bylo uvedeno, tato publikace se věnuje pouze výbuchům chemickým, a to specificky především výbuchům oblaků plynů a par nebo prachovým disperzím.

Rozdělení těchto mechanismů se provádí v závislosti na rychlosti výbušné přeměny a na vygenerovaném přetlaku. Dle těchto kritérií rozdělujeme mechanismy na tři základní skupiny:

1. Explozivní hoření (deflagrace)
2. Detonace
3. Přejod od hoření (deflagrace) do detonace (někdy uváděno jako vlastní výbuch nebo výbuch druhého řádu)

Explozivní hoření (deflagrace) se vyznačuje nízkými lineárními rychlostmi hoření řádově ( $10^{-1} - 10^1$ )  $\text{m.s}^{-1}$  a nízkými tlaky (od nepatrného přetlaku až do několika MPa). Vzhledem k hodnotám rychlosti hoření dochází k tomu, že tlaková vlna předbíhá reakční pásmo. V případě detonace se chemická reakce šíří detonující chemicky reaktivní látkou nadzvukovou rychlostí za místních podmínek. Přejod od hoření (deflagrace) do detonace je velmi komplikovaný proces, na jehož vysvětlení zatím nebyla vytvořena ucelená teorie. Lineární rychlost roste s generovaným tlakem. Nestačí-li již zplodiny reakce unikát z reakční zóny, dochází ke zvýšení tlaku a dalšímu narůstání lineární rychlosti, tím může přejít vlastní výbuch v detonaci. K přechodu z deflagrace do detonace může v rámci plynných oblaků nebo prachových disperzí docházet v prostorech plných překážek nebo v uzavřeném prostoru, či u velkých oblaku hořlavin. Aby mohlo vůbec dojít k výbuchu, musí být k dispozici alespoň částečně uzavřený prostor či otevřený prostor s překážkami, kde vznikne turbulentní proudění.

Aby mohl vzniknout výbuch, musí být splněn výbuchový šestiúhelník (viz obrázek 10) obdobně jako u trojúhelníku hoření. Výbuchový šestiúhelník je tvořen oxidačním prostředkem (většinou vzduch respektive kyslík ve vzduchu) – ve směsi s hořlavou látkou ve výbušné koncentraci a iniciační zdroj o dostatečné energii. Důležitým parametrem je také objem hořlavého souboru, protože při malém množství vznikne sice výbuch, ale jeho účinky jsou tak minimální, že se jako výbuch nedá klasifikovat (např. zapálení zapalovače). Poslední z podmínek je uzavřený prostor nebo turbulence.



**Obrázek 1 Výbuchový šestiúhelník**

Výbušná atmosféra je někdy nazývána „hořlavý soubor“ a je tvořena směsí oxidačního prostředku (vzduch, kyslík, halogeny...) a hořlavinou dispergovanou ve formě plynu, páry nebo aerosolu. Výbušná se stává od dolní hranice výbušnosti (DHV) až po horní hranici výbušnosti (HHV). Mimo tyto hranice se již nedokáže po zapálení čelo plamene dále samo šířit a soubor je nehořlavý. V anglické literatuře se také někdy používají zkratky z anglického vztahu lower



explosive limit (LEL, LFL) a upper explosive limit (UEL,UFL). Hořlavost a výbušnost jako vlastnost látky se u výbuchu směsi hořlaviny se vzduchem prakticky překrývají, jelikož hoření je v tomto případě základním mechanismem výbuchu a o přechodu z hoření k výbuchu zde rozhodují vlastnosti výbušného oblaku (velikost, přítomnost překážek), nikoli vlastnosti látky.

Oblast výbušnosti, tzn. koncentrace od DMV po H MV je pro každou látku specifická. Pokud je koncentrace směsi nad horní mezí výbušnosti, může se směs stát výbušnou po odpovídajícím zředění se vzduchem. Jako koncentraci, která není nebezpečná výbuchem, je možné označit koncentraci některého plynu nebo páry uvnitř technologického zařízení, jestliže nepřekročí 50 % dolní meze výbušnosti. Směsi prachu tuhých látek se vzduchem jsou nebezpečné výbuchem, jestliže jejich dolní mez výbušnosti je menší nebo rovna  $65\text{g/m}^3$  a jsou zvláště nebezpečné výbuchem, jestliže jejich dolní mez výbušnosti je menší nebo rovna  $15\text{g/m}^3$ .

### **Projevy výbuchů**

Mezi nejzávažnější projevy výbuchu patří mechanické projevy, které jsou způsobeny tlakovou vlnou a vzniklými letícími troskami. Další projevy výbuchu jsou tepelné. Mezi tepelné projevy můžeme zařadit tepelnou radiaci, která je nebezpečná, protože působí jako iniciační prostředek sekundárních požárů. Minoritní jsou také chemické projevy, mezi které můžeme zařadit vznikající toxické látky vznikající při výbuchu. Problémem však může být nedostatek kyslíku ve vyhořelé atmosféře. Všechny uvedené projevy výbuchu vyjma nedostatku kyslíku působí krátkodobě, tzn. několik milisekund.

Z pohledu prevence závažných havárií představují výbuchy největší problém především v generování přetlaku, který způsobuje poškození všeho zranitelného, co mu stojí v cestě. Okamžik vzniku jakýchkoliv výbuchů je velmi obtížné předpovídat a z toho plyne i nemalé nebezpečí, protože výbuchy trvají jen několik milisekund a není k dispozici čas nutný pro evakuaci. Nebezpečí také spočívá ve vzniku sekundárních požárů, které se mohou iniciovat další nebezpečné havarijní jevy.

## **5 Popis jevu BLEVE - výbuch expandujících par vroucí kapaliny**

Zásobníky pod tlakem mohou akumulovat značnou energii (převážně tepelnou a tlakovou), která při svém náhlém uvolnění může být příčinou mechanické exploze. Takovými případy jsou náhlé ruptury kotlů nebo exploze zásobníků se stlačeným vzduchem. Speciálním případem exploze zásobníku s nebezpečnou látkou nad jejím bodem varu při atmosférickém tlaku je havarijní jev „BLEVE“ (anglicky „boiling liquid expanding vapour explosion“ – výbuch expandujících par vroucí kapaliny).

Podle historických zkušeností lze konstatovat, že pokud dojde k jevu BLEVE, zásobník často obsahuje hořlavý materiál a exploze je následována rychlým hořením unikajícího obsahu. Bezprostředně po explozi zásobníku obsahujícího hořlavou látku může dojít také ke vzniku ohnivé koule, přičemž se jedná o jev, který kombinuje jak mechanické efekty výbuchu, tak tepelné účinky ohně. Tato kombinace představuje jeden z nejnebezpečnějších havarijních jevů, ke kterým může dojít v průmyslu s přítomností nebezpečných látek vůbec. Nebezpečné látky a směsi, které se mohou účastnit jevu BLEVE (např. LPG), jsou v energetice poměrně časté, což je příčinou relativně vyšší četnosti výskytu tohoto jevu.

Z výše uvedených definic je zřejmé, že jsou obvykle vztaženy na explozi zásobníku, přičemž není řečeno, že při BLEVE mohou nastat také vážné tepelné efekty. Jedna pětina těchto výbuchů, ke kterým v historii došlo, se udála na zásobnících s nehořlavou látkou. Velká část jevů BLEVE vzniká při přepravě, například následkem vykolejení vlaku či havárií autocisteren. Během životního cyklu paliv k nim dochází často na zásobnících pohlcených vnějším požárem. Lze konstatovat, že požár je obecně nejčastější příčinou vzniku jevu BLEVE.

Průběh jevu BLEVE souvisí především se způsobem skladování. Pokud dojde k významnému ohřevu (energetické dotaci) zásobníku obsahujícího kapalinu pod tlakem

(například zkapalněný plyn – LPG, LNG), tlak uvnitř zásobníku se bude zvyšovat. V určitém momentu, pokud zahřívání není homogenní, dojde v důsledku vnitřního přetlaku k ruptuře (roztržení) na zahřáté části zásobníku (nejpravděpodobněji na jeho horní části). Horní část zásobníku totiž není v kontaktu s kapalinou, která by ji mohla ochlazovat. S nárůstem teploty stěny zásobníku zároveň klesá její mechanická odolnost, a to zvláště nad hladinou kapaliny, kde není ocel ochlazována. Jevu BLEVE obvykle předchází tzv. katastrofická ruptura zařízení. Nejedná se tedy o trhlinu malých rozměrů umožňující jen malý únik obsahu ze zařízení, ale o totální destrukci. Pokud dojde k otevření pojišťovacích ventilů hlídajících přetlak na zásobníku, vroucí kapalina se následkem uvolnění výparného tepla začne ochlazovat, požárem dodávané teplo však nestačí kompenzovat. Za takto nestabilních podmínek lze kapalinu označit za přehřátou (anglicky „superheated liquid“). Kapaliny mohou běžně odolávat určité úrovni přehřátí, kdy teplota může při experimentálních podmínkách značně překračovat bod varu za atmosférického tlaku. V okamžiku snížení tlaku při ztrátě integrity zásobníku dojde k mžikovému odparu části kapaliny a vzniká dvoufázová směs páry a kapaliny. Následně dochází k podstatnému nárůstu objemu odpařující se kapaliny. V případě propanu se jeho objem zvětší 250krát a v případě vody dokonce 1750krát. K tomuto zvětšení objemu je nutno připočítat expanzi již existující páry, což v důsledku vede ke vzniku silné tlakové vlny působící roztržení zásobníku na několik částí. Tyto části (trosky) mohou doletět do značné vzdálenosti. Při experimentech s malými zásobníky (o objemu 1 litr) bylo zjištěno, že pokud v zásobníku existuje prasklina, tlak nejprve mírně poklesne a následně stoupne na maximum. Počáteční snížení tlaku způsobí, že kapalina se dostane teplotně do blízkosti přechodu z přehřátého stavu, což vede k explozi.

Pokud látka v zásobníku není hořlavá, je jediným projevem BLEVE tlaková vlna a letící úlomky. K tomu může dojít například při explozi zásobníku s vodou. Pokud je látka hořlavá (například zkapalněné ropné plyny - propan, butan), směs kapaliny a plynu vyvržená při explozi se pravděpodobně vznítí a vznikne ohnivá polokoule, z počátku na úrovni země, později přecházející ve fireball. Tepelná radiace, která v této počáteční fázi vzniká, trvá obvykle pouze několik sekund, nicméně se jedná o velmi závažný efekt. Celková masa paliva hoří pouze na okraji, jelikož v jejím středu je nedostatek vzduchu, čímž je překročena horní hranice hořlavosti. V prostoru pod ohnivou koulí může dojít ke spadu hořících kapiček, které mohou způsobit další požár nebo popáleniny osob.

V další fázi jevu nasaje turbulence, která vzniklá při hoření, do ohnivé koule další vzduch, zároveň tepelné záření způsobuje vypaření kapalných částíček a zahřeje celou směs. Výsledkem je turbulentní zvýšení objemu celého mraku. Hořící masa dostává přibližně tvar koule a stoupá, vytváří při tom "brázdu", která může mít libovolný průměr. Takové ohnivě koule mohou být velmi rozsáhlé, což zároveň znamená vysoké hodnoty tepelné radiace. Velikost, tvar a umístění ohnivé koule v prostoru je také ovlivněno směrem a rychlostí větru.

### **Přenosy nebezpečí u výbuchu jevu BLEVE**

Při výbuchu zásobníku je energie obsažená uvnitř, uvolněna náhle (jednotkou tlaku je energie vztažená na jednotku objemu). Látka obsažená v zásobníku zvyšuje svůj objem následkem expanze páry, která je přítomna v zásobníku v okamžiku exploze a následkem přehřáté kapaliny, která rovněž projde mžikovým odparem. Mechanickou energii uvolněnou při explozi zásobníku lze rozdělit dále na energii tlakové vlny, kinetickou energii fragmentů a energii potřebnou k rozpadu zásobníku.

Relativní rozdělení energie na tyto části se mění v závislosti na podmínkách exploze. Je velmi obtížné přesně určit, jaká část bude uvolněna tlakovou vlnou. Předpokládá se, že při křehkém lomu zásobníku se 80 % energie uvolní ve formě tlakové vlny. V případě tzv. houževnatého lomu, kdy se vytvářejí obvykle větší fragmenty, je na tlakovou vlnu přeměněno pouze 40-50% energie. Obvykle se předpokládá, že v obou případech je zbývající energie

přeměněna na kinetickou energii fragmentů - případně další přeměny energie (například zahřívání okolí) jsou zanedbány.

Většina zásobníků a tanků je vyrobena z materiálů, které jsou při běžných podmínkách houževnaté. Ke křehkému lomu dochází pouze za specifických podmínek (pokud je mechanické napětí v materiálu větší než jeho mez plasticity). K tomu dochází pouze u zahřáté oceli nebo u skla. U většiny explozí zásobníků se proto jedná spíše o houževnatý lom.

Je třeba podotknout, že je prakticky nemožné určit přesný okamžik, kdy dojde k explozi. Ve skutečnosti se to může stát v krátkém okamžiku od vzniku požáru ohřívajícího zásobník. K explozi může dojít od několika sekund až hodin od vzniku havárie.

Teplo ve formě tepelné energie přenášené v atmosféře vzniklé při jevu BLEVE, je funkcí množství látky v zásobníku. Tepelné účinky se však vztahují pouze k BLEVE, ke kterému došlo na zásobníku s hořlavou látkou. Jedná-li se o nehořlavou látku, uvažují se pouze tlakové efekty a efekty letících trosek. Pokud je však hořlavá látka přítomna, je vzniklá ohnivá koule a s ní související tepelné záření nejzávažnějším nebezpečím.

Vývoj hodnoty tlaku při explozi zásobníku obsahujícího přehřátou kapalinu a páru ukazuje obvykle dva vrcholy oddělené krátkým časovým okamžikem. První vrchol odpovídá expanzi páry a druhý prudkému odpařování kapaliny. Velikost hodnot tlaku závisí na poměru kapaliny a páry v zásobníku těsně před explozí. Přestože tlakové vlny z těchto dvou jevů jsou často odděleny, používá se obvykle konzervativní předpoklad jejich zjednodušení do jediné kombinované vlny. V případě velkých zásobníků s hořlavou látkou lze pozorovat i třetí vrchol odpovídající explozivnímu prohoření oblaku přehřáté kapaliny. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

V případě velkých výbuchů může dojít také k šíření tlakových vln zemskou kůrou. Výbuchy obrovských zásobníků tak mohou způsobit malá zemětřesení.

Letící části explodujícího zásobníku představují jedno z rizik, které je velmi obtížně kvantifikovatelné. Fragmenty vržené při explozi mají omezený účinek vzhledem k přímým trajektoriím letu. Počet primárních projektilů závisí na typu lomu, procesu zahřívání, tvaru zásobníku a závažnosti exploze. V případě cylindrického zásobníku jde obvykle o 2-3 úlomky, v případě sférického 2-15, ale nejčastěji méně než 5. Obvykle se jedná o houževnatý lom, kdy se prasklina šíří pláštěm zásobníku nízkou rychlostí a bez rozvětvení. Počet vzniklých úlomků je obvykle nižší, než při křehkém lomu.

Hořící kapalina může být následkem exploze rozstříkávána do okolí. Pod prostorem ohnivé koule dopadají kapky hořící kapaliny, které mohou způsobit úmrtí dalších osob lidí a sekundární požáry. Určité množství paliva může být nasáto do proudu vytvářeného letícími fragmenty. Rozstřík kapaliny může snižovat obsah paliva v doprovodné ohnivé kouli, a tím také ovlivnit její rozměry a trvání.

### **Shrnutí poznatků o jevu BLEVE**

Zásadní nebezpečí jevu BLEVE spočívá v kombinaci mechanických účinků a tepelných efektů (v případě BLEVE na zásobníku s hořlavou kapalinou). Dalším negativním faktorem je neschopnost přesně předvídat počátek jevu, ovšem lze ho určitým způsobem předpokládat (v případě zahlcení zásobníku ohněm). Vzhledem k četnosti těchto jevů a četnosti výskytu zásobníků se zkapalněnými plyny je nutné věnovat jevu BLEVE patřičnou pozornost. Jev je nebezpečný především pro zasahující složky.

### **Příklady havárií výbuchu jevu BLEVE**

PEMEX LPG Terminal, Mexico City, Mexico (1984)

V LPG terminálu došlo k závažnému požáru a sérii explozí. Následkem události došlo k úmrtí 500 lidí a celý terminál byl zničen. Terminál byl určen pro distribuci LPG, které bylo

do areálu čerpáno potrubím ze tří různých rafinérií. Základní skladovací kapacita byla 16 000 m<sup>3</sup>, tvořená šesti kulovými zásobníky a 48 horizontálními válcovými nádržemi. Dva největší kulové zásobníky měly objem 2 400 m<sup>3</sup> a čtyři menší zásobníky pak objem 1 600 m<sup>3</sup>. Dva největší zásobníky a 48 válcových nádrží bylo naplněno na 90% a čtyři menší kulové zásobníky byly naplněny přibližně na 50%. V okamžiku vzniku incidentu bylo v areálu přibližně 11 000 m<sup>3</sup> látky. V první fázi nehody došlo k úniku LPG, který trval 5 až 10 minut. Vytvořil se mrak o rozměrech 200 x 150 m, dva metry vysoký, který byl následně iniciován. Výbuch způsobil rozsáhlý požár. Přibližně 5 minut potom došlo k prvnímu BLEVE. Minutu potom došlo k dalšímu BLEVE, jednomu ze dvou nejzávažnějších z celého incidentu. Jednalo se o BLEVE na jednom z menších kulových zásobníků, kdy vznikla ohnivá koule (fireball) o poloměru 300 m, která trvala přibližně 20 sekund. Z fireballu odkapávaly kapičky LPG, které pokryly okolí vrstvou LPG. Tato vrstva byla následně iniciována teplem právě probíhající blízké ohnivé koule. Zasažení jedinci se proměnili v lidské pochodně. Během další hodiny a půl došlo k 15 dalším explozím. Jev BLEVE přitom nastal na všech čtyřech menších kulových zásobnících a u mnoha válcových. Vytvořilo se velké množství fragmentů. Velké kusy z kulových zásobníků o váze 10 – 40 t byly nalezeny ve vzdálenostech 100 - 890 m. Válcové zásobníky o váze 20 t byly následkem výbuchu vystřeleny do vzdáleností okolo 100 m, jeden dokonce až 1200 m. Fragmenty působily poškození jak kinetickou energií, tak svojí vysokou teplotou, která zapalovala projektily zasažené domy.

Montreal, Kanada (1957)

Ve skladu byly umístěny tři sférické zásobníky o obsahu 800 m<sup>3</sup>, 1900 m<sup>3</sup> a 2400 m<sup>3</sup> v jedné společné jínce. Následkem přeplnění došlo k úniku kapalného butanu z 800 m<sup>3</sup> zásobníku. Vzniklý oblak par byl iniciován ve vzdálenosti 180 m od zásobníků, prohořel zpět a nastal požár původní kaluže. Po 30 minutách došlo k jevu BLEVE u zásobníku o objemu 1900 m<sup>3</sup>, za 15 minut nato došlo k témuž jevu také u zbývajících dvou zásobníků.

Turkey farm, Albert City, Los Angeles, 9 dubna 1998

Havárie začala nárazem auta do potrubí vedoucího zkapalněný propan ze zásobníku o objemu 68 m<sup>3</sup>. Došlo k požáru a zasahující hasiči se snažili chladit okolní objekty. Po 18 minutách od vzniku havárie došlo k explozi. Největší část zásobníku, kus dlouhý 7,3 m, byl odhozen do vzdálenosti 95 m. Další kus se zastavil o silo ve vzdálenosti 46 m. Třetí, největší kus, zasáhl hasiče operující ve vzdálenosti 27 m a okamžitě je usmrtil. Další kusy se rozletěly v okolí výbuchu až do vzdálenosti 80 m.

## 6 Popis jevu BOILOVER - vzkypění

Havarijní jev boilover může nastat obvykle při hoření viskózní hořlavé kapaliny, ve které se pod objemem hořící kapaliny vyskytují kapsy nebo vrstva vody. K jevu dochází při požáru směsí (například uhlovodíků), kdy vzniká částečnou destilací a změnou hustoty tzv. tepelná vlna, která postupuje od zóny odhořívání směrem dolů. Při zvýšení teploty u dna nádrže nad bod varu vody při tlaku páry rovné součtu atmosférického a hydrostatického (obvykle mezi 105 a 120°C) vodní pára „probublává“ kapalinou na hladinu hořící kapaliny. Vodní pára probublávající viskózní hořlavou kapalinou vytvoří (například u ropy) intenzivní pěnu. Jakmile tato pěna dosáhne povrchu hoření, dojde k prudkému nárůstu rychlosti hoření, vyvrhnutí hořlavé kapaliny mimo obsah nádrže a následnému vzniku ohnivé koule (fireball).

Jev boilover je havarijní jev velkého rozsahu, jehož předpokladem je vznik požáru nádrže způsobující odpařování vodní vrstvy, volné vody nebo vodní emulze v ropě. Aby došlo k jevu vzkypění, musí být splněny čtyři podmínky:

1. požár nádrže;
2. přítomnost vody schopné přeměny v páru;

3. vytvoření tepelné vlny, která se může dostat do styku s vodní vrstvou ležící pod vrstvou uhlovodíků;
4. dostatečně viskózní směs uhlovodíků (aby vodní pára nemohla snadno proniknout ze spodní části nádrže)

Na základě těchto čtyř podmínek je možné charakterizovat směsi uhlovodíků schopné vyvolat jev vzkypění. Tyto směsi musí mít následující vlastnosti:

- průměrnou teplotu varu vyšší, než je teplota varu vody při tlaku na fázovém rozhraní „voda – uhlovodíky“, tedy přibližně 120°C,
- teplotní rozpětí varu při destilaci dostatečně široké pro vyvolání tepelné vlny,
- hodnotu kinematické viskozity vyšší, než je hodnota této veličiny pro petrolej při 393 K, tedy větší než  $7,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

K jevu vzkypění dochází vždy v důsledku požáru zásobníku. Jeho vznik lze tedy určitým způsobem předvídat a očekávat. Existují metody pro výpočet postupu tepelné vlny, které mohou sloužit pro orientační údaje o tom, za jakou dobu po vzniku požáru nádrže dojde k vyvržení kapaliny. Pro určení doby vzniku je důležité znát rychlost sestupu tepelné vlny. Doba do vzniku jevu je potom funkcí rychlosti sestupu tepelné vlny a výšky hladiny v zásobníku. Obecně se tato doba pohybuje v řádech několika hodin. Samotný jev potom trvá v řádu několika vteřin, nicméně se může opakovat (dochází k opakované erupci a prohoření vyvrženého oblaku kapaliny, většinou ale již v menším měřítku). Velikost vzkypění závisí na tloušťce vodní vrstvy (množství vody v nádrži).

### **Přenosy nebezpečí u výbuchu jevu boilover**

Nejzávažnějším tepelným projevem jevu boilover v atmosféře je vznik ohnivé koule (fireball), která se vytvoří při erupci kapaliny nad hladinou zásobníku. Bylo zjištěno, že při vzniku ohnivé koule dosahuje její teplota výrazně vyšších hodnot, než jakých dosahuje teplota plamenů při normálním průběhu požáru. Lze předpokládat, že teplo vyzářené tepelnou radiací bude vyšší.

Určité množství tepla se může šířit stěnami zásobníku (kondukce). V případě velmi malých průměrů tato skutečnost může mít vliv na šíření tepelné vlny ve směsi kapalných uhlovodíků a tím urychlit vznik vzkypění.

Dalším projevem jevu boilover je šíření hořících kapek a zaplavení hořící látkou vyvrženou z nádrže. Jak dokazují historické události, hořící kapky kapaliny mohou dopadat do vzdálenosti několika desítek, dokonce i stovek metrů. Hořící uhlovodík potom zpravidla bývá příčinou vzniku dalších požárů, především na okolních zásobnících.

### **Shrnutí poznatků jevu boilover**

Havarijní jev boilover představuje velké nebezpečí především vysokou hodnotou tepelného toku a rozstříkáním kapaliny do okolí. V případě jeho výskytu v prostoru s více zásobníky dochází většinou i k šíření požáru (domino efekt). Jev boilover ale nevzniká okamžitě. Předchází mu požár na hladině zásobníku a k samotnému jevu dojde až se značným zpožděním. Je možno uvažovat, že pokud dojde k havárii s nejhorsími možnými dopady, bude doba od vzniku požáru do vzniku jevu dostatečně dlouhá na to, aby byla podniknuta nutná opatření k ochraně obyvatelstva (varování, evakuace). Jedná se o dobu řádově hodin až desítek hodin.

### **Příklady havárií jevu boilover**

Ahmadi, Kuvajt (1991)

V roce 1991 bylo skladiště ropy v Kuvajtském Ahmadi zasaženo následkem válečných operací. Jeden z tanků o průměru 79 metrů a výšce 18,5 m začal hořet. V době požáru byla hladina na úrovni 7,7 m (tj. 37,500 m<sup>3</sup>) ropy. Při absenci hašení došlo na zásobníku po nějaké

době k prudkému vzkypění. Podle přítomných hasičů bylo prvním varováním před tímto jevem zvýšení hlasitosti ohně (praskání) a probleskování ohně v kouři. Ropa ze vzkypění smetla ohraničující násep a rozšířila se k dalším zásobníkům.

Czechowice-Dziedzice, Polsko (1971)

V sektoru rafinerie, kde byla ve čtyřech zásobnících skladována ropa, došlo k požáru pravděpodobně způsobeného bleskem. Průměr nádrží činil 33 m, výška přibližně 15 m a obsah 12 500 m<sup>3</sup>. V nádrži zachvácené požárem bylo přibližně 9 000 tun ropy. Po pěti hodinách trvání požáru došlo k prudkému vyvření ropy z nádrže. Hořící ropa byla vyvržena až do vzdálenosti 250 m. Bylo zabito 36 osob, přičemž více než 100 dalších osob bylo zraněno.

Tocoa, Venezuela (1982)

Došlo k požáru nejprve jednoho zásobníku, obsahujícího 13 249 m<sup>3</sup> (což činilo 1/3 objemu nádrže) topného oleje. Následně se požár rozšířil také na sousední zásobník. Průměr nádrží byl 60 m a výška 20 m. Skladiště bylo umístěno na straně kopce, 55 m nad úrovní moře a obklopeno 17 metrovým hliněným náspem. Po šesti hodinách došlo k jevu „boilover“ a nad zásobníkem se vytvořil oblak hořícího oleje dosahující výšky 450 m, který se postupně změnil ve „fireball“ (ohnivou kouli či spíše sloup) přibližně 600 m vysoký a 275 m široký. Kapky hořícího oleje dopadaly v okolí až do vzdálenosti 450 metrů. Při havárii zemřelo 150 lidí, z toho 53 zasahujících hasičů. Dalších více než 300 lidí bylo vážně popáleno.

## **7 Popis jevu FLASH FIRE (prošlehnutí) a jevu VCE (výbuch oblaku hořlavých plynů a/nebo par)**

Exploze plynů/par je obecně definována jako proces, při kterém hoření (spalování) směsi hořlavého plynu/páry (paliva) a vzduchu (oxidačního činidla) způsobuje rychlý nárůst tlaku.

Celkový exotermní charakter chemických reakcí vede k nárůstu teploty v zóně hoření a zvýšení objemu produktů spalování. Hoření, které nejčastěji probíhá ve formě přimíseného nebo difúzního plamene je doprovázeno uvolňováním tepla a světla. Při explozi plynů/par se uplatňuje předmísený plamen, který postupuje určitou rychlostí vytvořeným mrakem výbušné směsi. Jak bude diskutováno níže, na rychlosti čela plamene, přímo závisí míra tlakových projevů exploze.

Následky exploze plynů závisí na prostředí, ve kterém je oblak hořlavého plynu uzavřen nebo které je oblakem obklopeno. Z tohoto důvodu můžeme exploze plynů rozdělit podle prostředí, kde se výbuch uskuteční.

- Exploze plynů/par v uzavřeném prostředí – uvnitř budov a nádob; v potrubí, kanálech a tunelech. Exploze plynu/par v těchto prostorách se také někdy nazývá vnitřní exploze. Typické pro tento druh exploze je, že proces hoření nemusí být vždy tak rychlý, aby způsobil vážný nárůst tlaku.
- Exploze plynu v částečně uzavřeném prostředí – nastává v případech, kdy plyn/pára se uvolňuje např. v budově, která je částečně otevřená. Stěny budovy mohou nebezpečný přetlak odrazit, odklonit, nasměrovat nebo pohltit.
- Exploze plynu/par na otevřeném/volném prostranství je někdy nazýván neohraničený výbuch plynu. Vysoké přetlaky při explozi plynu na volném prostranství mohou být způsobeny například oblastmi, kde se nachází překážky (respektive přeplněné zóny). Režim deflagrace může tedy přejít v režim detonace.

Exploze v otevřených prostorech zahrnuje několik dílčích jevů jako atmosférický rozptyl plynu, iniciace, šíření čela plamene, expanze hořící masy, interakce s překážkami,

turbulence, a tak dále. Je známo, že urychlování čela plamene až po přechod deflagrace na detonaci je kromě chemických vlastností hořlavého souboru silně ovlivňováno vznikem turbulencí vlivem přítomných přepážek.

Jednou ze základních podmínek vzniku jevu „Vapour cloud explosion“ (VCE) je existence přeplněných zón. Přeplněná zóna je definována jako oblast, kde je koncentrována řada položek zařízení takovým způsobem, že tvoří mnohonásobné překážky (stromy, nádoby, potrubí, tepelné výměníky, aj.), které způsobují urychlování čela plamene.

Vlivem proudění čela plamene kolem překážek vznikají ve směsi turbulentní struktury, které mají vliv na zvětšování reakčního povrchu čela plamene. Platí pravidlo, že čím je větší reakční povrch čela plamene, tím více bude teplo a hmota přestupovat mezi nespálenou a spálenou směsí a tím více se urychlí šíření požáru, resp. výbuchu.

U exploze plynu (VCE) je plyn a oxidační prostředek promíchán předem, tato promíchaná směs plynu a oxidačního prostředku musí být v rozmezí dolní meze výbušnosti (LEL) a horní meze výbušnosti (UEL). Obvykle v případě, kdy se plyn a oxidační prostředek promíchá předem, hořlavý plyn hoří rychleji než v případě promíchání hořlavého plynu a oxidačního prostředku během hoření. Rychlejší hoření znamená spálení většího množství plynu za jednotku času a vznik většího množství reakčních produktů.

Vznik jevu je možné rozdělit na tři části: tvorba mraku, iniciace a přechod od flash fire k VCE. Tvorba oblaku záleží na mnoha parametrech. Oblak se vytváří při úniku páry nebo plynu. Oblak vzniká při úniku plynu pod tlakem, fázové přeměně (přehřáté kapaliny na plyn), rozlití kapaliny (velmi pomalé a závisí na: velikosti plochy hladiny, teplotě unklé kapaliny i na teplotě okolí a na atmosférických podmínkách – rychlost vzduchu, proudění, vlhkost/teplota a třeba inverze). Vznikne třívrstvý oblak, tvořený oblastí pod dolní mezí výbušnosti, která nevybuchne kvůli nedostatku paliva, oblast nad horní mezí výbušnosti, která nevybuchne kvůli nedostatku vzduchu a oblast kde je koncentrace látky v mezích výbušnosti. Hořlavá látka ve směsi se vzduchem vybuchuje pouze v mezích výbušnosti, tzn. od dolní do horní meze výbušnosti.

Iniciace může ovlivnit, zda vznikne Flash Fire nebo VCE. Silný iniciační zdroj, např. výbuch, může vyvolat jev VCE i bez turbulence. Iniciační zdroj musí mít minimální iniciační energii (v literatuře značenou jako MIE), jinak neinicuje směs v místech mraku, kde je rozmezí od dolní po horní mez výbušnosti. S rostoucí minimální iniciační energií se zvyšuje hlavně maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku. Minimální iniciační energie je pro každou směs odlišná a závisí také na okolních podmínkách (teplota, tlak, vlhkost).

Přechod jevu Flash Fire, který je chápán spíše jako požár, na výbuch typu VCE závisí na rychlosti čela plamene. Plyny za čelem plamene se rozpínají do volného prostoru, nespálená směs je tlačena přes překážky a vytváří „víry“, tzn., vzniká turbulence (v nespálené směsi i na čele plamene) a ta akceleruje rychlost čela plamene. Do procesu hoření při turbulenci se dostává nebo vyměňuje více hořlavé látky a oxidačního prostředku. Rychlost šíření plamene může být tak vysoká, že proces hoření podporující rozpínání nespáleného plynu bude natolik vysoká, že dojde před čelem plamene ke kompresi směsi. Toto vyvolá rázovou vlnu, síla závisí na rychlosti šíření čela plamene.

### **Přenosy nebezpečí u výbuchu jevu Flash fire a jevu VCE**

Z popisů samotného jevu plyne, že při těchto jevech vznikají následující nebezpečí ve formě tlaku, tepla a letících trosek.

Jedním z nejzákladnějších přenosů tepla je tepelná radiace v atmosféře. Při jevech Flash Fire nedosahuje takové intenzity jako u jiných jevů jako fireball nebo jet fire. U tohoto jevu jsou části cílového systému (např. budovy) vystaveny pouze velmi krátkou dobu. Ohrožení osob mimo oblak hořlavé látky je téměř nulové, jelikož intenzita tepelné radiace je nízká a trvá pouze několik málo milisekund. Nebezpečí tepelné radiace spočívá pouze v možném vzniku sekundárních požárů, kde tepelná radiace se chová jako iniciátor.

V případě přechodu jevu Flash Fire do jevu VCE vzniká u jevu VCE tlaková vlna. Tyto projevy vedou v případě jevu VCE k nejzávažnějším důsledkům.

Letící trosky vzniklé při jevu VCE představují závažné riziko, které je velmi obtížně kvantifikovatelné. Fragменты vržené při explozi mají omezený účinek vzhledem k přímým trajektoriím letu. Paradoxně ale mohou způsobit destruktivní efekty v mnohem větší vzdálenosti než samotná tlaková vlna či tepelná radiace.

Dle historických zkušeností vznikají letící trosky pouze z lehkých částí technologie (stříšky, žebříky, okna ...). V technologiích pracujících s plyny existuje pouze malá pravděpodobnost vzniku letících trosek vzniklých z technologie, protože technologie je konstruována z masivní oceli a odolává tlaku min. 10 MPa. Při dosažení 0,7 kPa přetlaku se předpokládá vybití 50% skleněných ploch (oken) v blízkosti. Letící skleněné střepy mohou poranit nechráněné osoby. Největší nebezpečí letících fragmentů spočívá v tom, že vznikají již při velmi nízkých hodnotách 0,7 kPa a míra nebezpečí letících trosek je úměrná rychlosti letu trosky.

### **Shrnutí poznatku jevu Flash fire a jevu VCE v rámci prevence závažných havárií**

Požár typu Flash Fire představuje nebezpečí i přesto, že jeho projevy nejsou až tak závažné. Například tepelné projevy jsou velmi krátkodobé a nestačí způsobit primární poškození, ale i přes krátkou dobu mohou způsobit vznik sekundárních požárů.

Pokud vznikne jev Flash Fire v přeplněné zóně může přejít v jev VCE, který je již velmi nebezpečný díky generaci tlakových účinků. V odborné literatuře již byly popsány případy, kdy i výbuch málo reaktivního metanu na volném prostranství v přeplněné zóně způsobil vážné poškození okolí. Nejčastěji však vzniká jev Flash Fire, a to bez přechodu do jevu VCE.

### **Příklady havárií jevů VCE a Flash fire**

Ufa, Rusko (1989)

Na Transsibiřské magistrále v Baškirské oblasti v blízkosti města Ufa zasáhl 4. června 1989 výbuch zkapalněného plynu z poškozeného dálkového potrubí dva projíždějící osobní vlaky. Celkem tak přišlo o život 575 pasažérů (na místě zahynulo 258 lidí, dalších 317 zemřelo v nemocnicích), dalších asi 600 lidí zůstalo kvůli popáleninám a dalším zraněním trvale postiženo. Důvodem havárie bylo selhání pracovníků plynovodu, kteří na varovné signály upozorňující na snížená tlaku, a tím poukazující na možný únik na potrubní trase, reagovali zvýšením tlaku v potrubí. Unikající plyn se začal, hromadit ve dvou hlubokých kalužích nedaleko trati. Mohutný výbuch pravděpodobně způsobila jiskra, která odletěla od vlaku, podle některých teorií to mohla být i cigareta.

Bangkok, Thajsko (1990)

24. září se v centru Bangkoku srazil cisternový tahač převážející LPG s dalšími vozidly na rušné křižovatce. Přibližně 5 tun látky uniklo do ovzduší, nebylo ihned iniciováno, ale k iniciaci došlo později. Podle očitých svědků se jednalo o jasný případ „flash fire“. Následný požár zničil všechny obchody v ulici, usmrtil 68 lidí a 100 zranil. Cisternový tahač převážející látku neměl pro převoz LPG licenci.

New York, USA (1962)

Tahač s cisternovým návěsem převážející LPG se při otáčení převrátil a obsah cisterny (celkem 26029 litrů) se vylil do okolí. Následně se zformoval oblak hořlavých par, který měl 2000 m<sup>2</sup> a byl 25 m vysoký. Po iniciaci došlo k masivnímu požáru, který usmrtil 10 lidí a 17 zranil.



## 8 Specifika úniku nebezpečné látky do životního prostředí

Chování a hodnocení nebezpečných látek v životním prostředí má svá specifika. Ve srovnání s dopady havárií na životy a zdraví lidí či majetkové hodnoty je v případě životního prostředí rozdílem různorodost cesty přenosu kontaminantu, rozmanitost ohroženého cíle a různá citlivost složek ŽP. Zatímco při haváriích s dopadem na obyvatelstvo lze za cestu přenosu považovat pouze šíření vzduchem, při haváriích s dopadem na životní prostředí existuje mimo možnost šíření vzduchem také možnost šíření kontaminantu půdním prostředím, povrchovými a podzemními vodami. Životní prostředí a jeho jednotlivé složky z tohoto pohledu nejsou pouze cílovým systémem ohroženým havárií, nýbrž i médiem – cestou přenosu.

V této oblasti existují obecně jen limitované znalosti o chování (mobilitě, reaktivitě a rozptylu) nebezpečných látek. Rovněž cíl, který může být havárií zasažen, je specifický. V ŽP nedochází jen k ohrožení živých organismů, potenciální havárií v energetice mohou být ovlivněny také povrchové vody (včetně vodohospodářsky významných vodních děl), půdní prostředí, bonita půdy a v neposlední řadě podzemní voda, prostřednictvím které může dojít k šíření kontaminantu a ohrožení zásob pitné vody. Navíc nelze předem definovat odolnost a reakci složek životního prostředí (např. fauny a flory) na stresor (nebezpečnou látku) v prostředí.

Dopad havárie s účastí nebezpečné látky na životní prostředí je řetězcem vztahů. Intenzita dopadu havárie v životním prostředí je kombinací funkcí vlastností nebezpečné látky, vlastností složky životního prostředí a množství uniklé nebezpečné látky do složky životního prostředí. Nebezpečnost látek v životním prostředí je reprezentována především (eko)toxicitou. Šíření kontaminantu je pak dáno chemickými a fyzikálně-chemickými vlastnostmi, které určují především mobilitu nebezpečných látek v životním prostředí a stav životního prostředí v době kontaminace. Mezi důležité charakteristiky nebezpečných látek, které ovlivňují jejich chování, patří především ekotoxická tenze par, biokoncentrační faktor, rozdělovací koeficient oktanol – voda, půdní adsorpční koeficient, rozpustnost ve vodě, Henryho konstanta, vlastnosti fyzického životního prostředí a technické parametry zařízení, z něhož dochází k úniku látky do životního prostředí.

Ekotoxická je jedovatost pro ŽP, ta je definována jako schopnost látky vyvolat otravy v životním prostředí. Ekotoxikologické charakteristiky udávají nebezpečnost toxických látek pro životní prostředí. Pro použití na vodní prostředí se velmi často používá hodnota  $LC_{50}$  (střední letální koncentrace). Tato hodnota představuje koncentraci látky, která způsobí úhyn 50 % testovacích ryb ve zvoleném časovém úseku. Pro půdu se používá hodnota  $EC_{50}$  (efektivní koncentrace) koncentrace látky, která způsobí úhyn nebo imobilizaci 50 % testovacích organismů. Pro řasy se používá hodnota  $IC_{50}$  (inhibiční koncentrace) koncentrace látky, která způsobí 50% inhibici růstu nebo růstové rychlosti řasové kultury nebo 50% inhibici růstu kořene *Sinapis alba* (hořčice setá) ve srovnání s kontrolou ve zvoleném časovém úseku.

Fyzické životní prostředí je prezentováno jeho složkami – ovzduším, vodním prostředím (povrchová voda a podzemní voda) a půdním prostředím. Ovzduší je jednou z cest přenosu nebezpečné látky ke složkám životního prostředí, především k biotě, které ovlivňují zejména meteorologická podmínky, aktuální sezónní podmínky a geografické podmínky. Biota je ohroženým cílem významným především svou ekologickou hodnotou ekosystému. Povrchové vody jsou z pohledu havárií jak potenciálním ohroženým cílem, tak významnou cestou přenosu kontaminantu. Význam povrchových vod je tedy ekologický, společenský a ekonomický. Z ekologického hlediska se v případě havárií jedná především o poškození akvatických ekosystémů a ekologické rovnováhy.

Společenský a ekonomický dopad havárií na povrchové vody je chápán z pohledu poškození užitné hodnoty povrchových vod, která je využívána např. jako zdroj pitné či užitkové vody. Dopad havárie na půdní prostředí závisí nejen na cennosti (bonitě) půdy, ale taky na vlastnostech půdního prostředí, které tvoří prostředí pro šíření kontaminantu. Podzemní

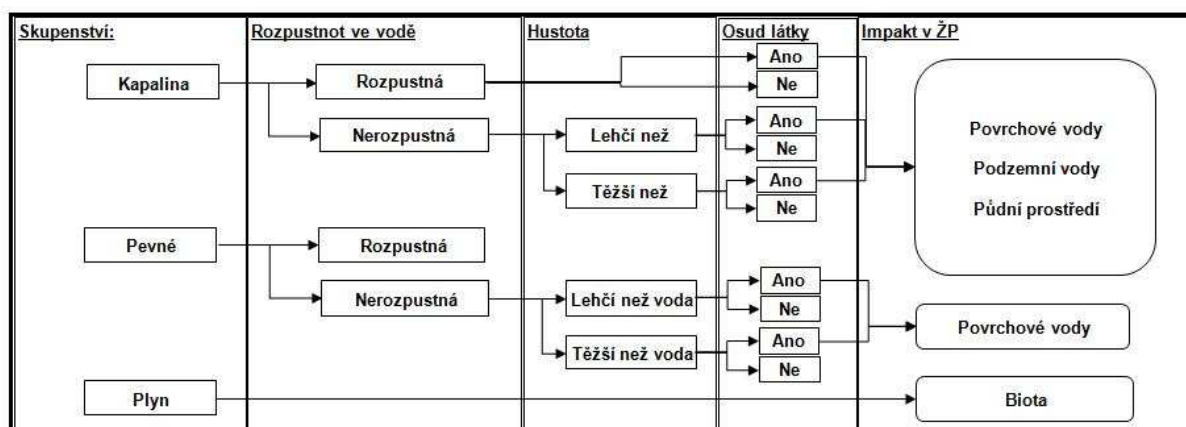
voda je veškerá voda nacházející pod zemským povrchem. Podle stupně nasycení vodou tuto vodu dále dělíme do dvou zón. Jedná se o zónu saturace (nasycená zóna) a zónu aerace (nenasycená zóna). V nenасыčené zóně dochází ke koloběhu vody a komunikaci s povrchem. Nasycená zóna se nachází pod volnou hladinou podzemní vody. Jedná se o imaginární povrch gravitační podzemní vody, ve kterém ve všech jeho bodech naměříme tlak, který se rovná atmosférickému tlaku. Hydrogeologickým prostředím tedy chápeme vodu v nasycené zóně, která se dá sledovat hydrogeologickými metodami a poskytuje informace o doplňování a oběhu podzemní vody.

V případech, že hrozí kontaminace půdního prostředí, je vysoký předpoklad možného ohrožení i prostředí hydrogeologického, tj. horninového prostředí a podzemních vod.

Technické parametry zařízení mají přímý vliv na množství uniklé látky do složky životního prostředí. Toto množství nemusí být vždy shodné s množstvím, které unikne ze zařízení při havárii. Ve většině případů je část nebezpečné látky zachycena bezpečnostními opatřeními (jímky, dvouplášť apod.). V tomto případě se do prostředí dostane pouze množství, které není schopné dané bezpečnostní opatření zadržet. Stanovení množství, které se dostane do jednotlivých složek životního prostředí, je předmětem tvorby scénářů havárií.

### Typy úniků nebezpečné látky do životního prostředí

Z pohledu kontaminace jednotlivých složek životního prostředí lze nebezpečné látky dle jejich vlastností rozdělit do skupin dle chování se v ohrožených složkách životního prostředí (viz Obrázek XX).



Obrázek XX Schéma působení nebezpečné složky na ŽP

Zasažení konkrétní složky životního prostředí (půdy, vody, bioty) je kombinací především vlastností určujících mobilitu nebezpečné látky v životním prostředí (skupenství látky, její rozpustnost a hustota nebezpečné látky) a dále vlastnostmi látky určujícími její chování - osud v ŽP. Těmito vlastnostmi jsou zejména těkavost látky, perzistence, adsorpce, poločas rozpadu. Na obrázku XX jsou tyto vlastnosti označeny kolonkou „ano“ nebo „ne“ dle toho, ovlivní-li tyto vlastnosti chování látky v ŽP po jejím úniku.

Povrchové vody jsou ohroženy jak nebezpečnými látkami kapalnými tak pevnými látkami. Konkrétní impakt vedle skupenství látky je dále dán jejich rozpustností ve vodním prostředí a hustotou. Rozpustnost látek určuje její migrační schopnost v povrchových a podzemních vodách, ovlivňuje zejména rozpustnost, mísitelnosti s vodou, perzistence a těkavost nebezpečných látek. Rozpustné kontaminanty se mohou vyskytovat v povrchové i podzemní vodě, mohou vyplňovat dutiny hornin a půdy nesaturované zóny, migrovat póry, puklinami a dalšími plochami diskontinuity saturované zóny. Vytvářejí oblasti kontaminace, které jsou schopny se šířit ve směru proudění vody.

## **Přenosy nebezpečí u nebezpečné látky do životního prostředí**

Jak již bylo uvedeno výše, v životním prostředí jsou jeho složky nejen ohroženými systémy, nýbrž i cestami přenosu nebezpečí. Médium přenosu nebezpečných látek v životním prostředí je nejčastěji povrchová či podzemní voda, tedy kapalina; v těchto případech dochází při haváriích nejen k rychlé migraci nebezpečných látek tímto prostředím, ale i k ohrožení podzemních vod, povrchových vod, jejich organismů a ekosystémů. V případě šíření nebezpečných látek vzduchem jsou dopady na životní prostředí omezeny na ohrožení přítomné bioty (živých organismů a ekosystémů). V případě šíření látky pevným prostředím (po povrchu, půdou) jsou ohroženými složkami životního prostředí biotické a půdní prostředí se svými organismy.

Specifikem může být šíření toxických zplodin hoření, při kterém stejně jako u látek toxických a ekotoxických, lze očekávat migraci kontaminantů životním prostředím a jeho složkami, otravou biotického prostředí, s následným ohrožením především terestrických ekosystémů. Dalším specifickým je kontaminace složek životního prostředí hasební vodou použitou při likvidaci havárie, která může být kontaminována nebezpečnými látkami. Vzhledem k množství těchto hasebních vod je velmi pravděpodobné, že při vzniku závažné havárie dojde ke kontaminaci povrchových vod prostřednictvím kanalizace. Následkem je migrace nebezpečných látek, které hasební vody obsahují, povrchovými vodami a ohrožení aquatických ekosystémů.

## **Shrnutí poznatků o úniku nebezpečných látek do životního prostředí**

Dopady havárií na životní prostředí mají svá specifika. Jednotlivé složky životního prostředí nejsou pouze jeho ohroženými prvky, nýbrž i cestou přenosu, po kterých se nebezpečné látky mohou šířit často do velmi vzdálených oblastí. Z pohledu dopadů havárií na životním prostředí a možnosti jejich likvidaci, lze specifikovat několik typů havárií. Tyto typy havárií, které mohou tvořit „typové scénáře“ pro migraci skupiny nebezpečných látek životním prostředím jsou specifické fyzikálními vlastnostmi nebezpečné látky, které mají vliv na migraci látky zejména ve vodním prostředí.

## **Příklady havárií úniku nebezpečné látky do životního prostředí**

Polepy, Česká republika (2001)

V červnu roku 2001 byl nedaleko obce Polepy neznámým pachatelem úmyslně navrtán produktovod o průměru otvoru 4 mm za účelem krádeže. Do životního prostředí uniklo kolem 80 m<sup>3</sup> benzínu. V místě poškození produktovodu byla provedena skrývka kontaminovaných zemin, vrstvy sprašových hlín o mocnosti 7 m, která byla silně kontaminována, a dále byly budovány sanační vrty. V místě úniku byly mimořádně nepříznivé hydrogeologické poměry, pod vrstvou spraše byly propustné pískovce a vápence s výraznou preferenční cestou k obci Polepy (rychlost šíření kontaminace až 100 m/den), tím došlo ke kontaminaci studní v obci. Studně byly pro obyvatelstvo jediným zdrojem pitné vody, do obce musel být vybudován vodovod. Jedná se o případ, kdy nerozpustná kapalina lehčí než voda uniká do životního prostředí.

Galicie, Španělsko (2002)

Během bouřky 13. listopadu došlo k prasknutí trupu tankeru Prestige převážející těžké topné oleje. Po problémech o tom, do kterého z přístavů se má tanker s unikajícím lehkým topným odtáhnout. Došlo 19. listopadu k jeho úplnému rozlomení a potopení. Díky tomu do oceánu nedaleko pobřeží Španělska, Portugalska a Francie začal unikat těžký topný olej spolu s ropou. Následky této ekologické havárie se odstraňovaly několik let. Jedná se o případ, kdy uniká nerozpustná kapalina lehčí než voda do životního prostředí.

České Zlatníky, Česká republika (1985)

Dne 11. prosince došlo k železniční nehodě u Bíliny na trati Bílina - České Zlatníky. Příčinou železniční nehody bylo hrubé porušení drážních předpisů (nerespektování návěstidla v poloze Stůj). Při srážce dvou vlaků došlo mimo jiné i k vykolejení a poškození dvou železničních cisteren s topným mazutem. Mazut pak z cisteren vytékal do kolejiště, po náspu na obslužnou komunikaci, do propustku pod tratí a dále až do řeky Bíliny. Celkem uniklo 51 t mazutu, několik tun se dostalo až do Bíliny.