Nehody a havárie v průmyslu

Incidents and Accidents in Industry

Jan Procházka*, Dana Procházková

ČVUT, Fakulta dopravní, Praha

Abstrakt

Článek pojednává o nebezpečných látkách, skoro-nehodách, nehodách a haváriích v průmyslu. Shrnuje příčiny nehod a havárií a na základě analýzy konkrétních velkých závažných havárií ukazuje provázanost příčin. Shrnuje též poučení z nehod a havárií. Zdůrazňuje nutnost zavádění programu na zvyšování bezpečnosti a aplikaci získaných zkušeností pro zvyšování bezpečnosti průmyslu.

Příspěvek byl prezentován v rámci 27. mezinárodní vědecké konference Soudního inženýrství ExFoS 2018.

Klíčová slova: chemické látky, průmysl, skoro-nehoda, nehoda, havárie, příčiny, bezpečnost, program na zvyšování bezpečnosti v průmyslu, role poučení z havárií.

Abstract:

The paper deals with dangerous substances, near-misses, incidents and accidents in industry. It summarizes causes of incidents and accidents, and on the basis of analysis of real great significant accidents it shows linkage of causes. It also summarizes the lessons learned from incidents and accidents. It stresses the need of introduction of programme for improvement of safety and application of obtained experiences for industry safety improvement.

The paper was presented on the 27th International Scientific Conference of Forensic Engineering, ExFoS 2018.

Keywords: chemical substances, industry, near-miss, incident, accident, causes, safety, programme for safety increase in industry, role of lessons learned from accidents it shows linkages of causes.

1. ÚVOD

Výrobky chemického, petrochemického a farmaceutického průmyslu a jiných příbuzných odvětví dnes doprovázejí člověka na každém kroku. Pomáhají mu při práci doma i v zaměstnání, přispívají k zabezpečení jeho výživy a všestranně usnadňují jeho život. Denně používáme výrobky z plastických hmot, k léčení nemocí se používají stále nové a nové léky, oblékáme se do různých oděvů zhotovených z umělých vláken apod. Život bez těchto produktů si člověk vůbec nedovede představit a používá je naprosto samozřejmě, aniž si uvědomuje celý proces, jak vznikaly.

Zvláštní pozornost vyvolávají nehody a havárie s přítomností nebezpečných chemických látek, ať už vznikají přímo v chemickém průmyslu nebo v jiných odvětvích, jako je např. obchod (skladování chemických látek) nebo doprava. Je to tím, že navzdory nesmírnému významu moderní chemie a chemické technologie pro život lidské společnosti, která její pozitivní projevy (např. umělé hmoty, pohonné hmoty, umělá hnojiva, potravinářství atd.) považuje za samozřejmost, je úroveň znalostí chemie ještě nedostačující, protože je spojena s jevy jako jsou požár, výbuch nebo toxický

rozptyl, jejichž dopady na okolní prostředí způsobují značné ztráty a škody a tím i obavy. Přitom se každá látka chová pouze takovým způsobem, který odpovídá jejich přirozenosti.

Závažnost dopadů úniků nebezpečných látek na člověka a okolní prostředí se odvíjí přímo úměrně od jejich množství. Je pouze na lidech, aby zajistili bezpečnou výrobu a využívání všech látek a zároveň na nejnížší možnou míru snížili jimi způsobené nepříjemné dopady, jednak prostřednictvím vysoce specializované technické disciplíny, jakou je bezpečnostní inženýrství a jednak také tím, že se pozvedne vědomostní úroveň společnosti jako celku.

2. SOUHRN POZNATKŮ

Ještě v nedávné minulosti byl předmět chemického inženýrství běžně uváděn jako procesy a aparáty v chemickém průmyslu. Logika věci tkví v tom, že chemické průmyslové procesy, tj. chemické reakce doprovázené sdílením hmoty a energie, probíhají ve strojnický konstruovaných zařízeních (reaktory, výměníky tepla, destilační kolony, odparky, pece atd.) vzájemně propojených

potrubími s uzavíracími a regulačními ventily a proudění látek v tomto komplexu je zajišťováno kompresory nebo čerpadly. Na začátku a na konci každého výrobního zařízení se obvykle nacházejí další strojnická zařízení, jako jsou skladovací zásobníky surovin a konečných produktů – výrobků. Celý tento komplex jednotlivých aparátů je dále vybaven prvky měření a regulace nejrůznějších veličin (tlak, teplota, výška hladiny, průtok apod.) a prvky bezpečnostních a ochranných systémů (např. pojistné ventily apod.). Není vzácností, ale spíše pravidlem, že se výrobní linky (většinou obvykle nazývané jako zařízení na výrobu např. butadienu nebo styrenu jako výchozích surovin pro výrobu umělých pryží) skládají z desítek až stovek jednotlivých aparátů.

Pro podporu bezpečnosti se dnes naopak doporučuje složitá zařízení vhodně rozdělit na nižší celky, tzv. odstavitelné sekce, které lze v okamžiku nehody oddělit ručně nebo dálkově (v současnosti většinou i automaticky) od ostatní technologie. Tím lze omezit v nejhorším případě únik chemických látek pouze na obsah postižené sekce, pokud mu nelze přímo zamezit např. odvedením chemické látky na polní hořák. Pro některá zařízení se z důvodu bezpečnosti doporučuje další dělení na podsekce.

Velmi často se vyskytne otázka, zda se zajištění bezpečnosti nechá provést bez chemiků. Nemalá část provozovatelů podniků, ve kterých se chemické látky převážně pouze používají, si dosud myslí, že chemik v týmu není třeba. Není to pravda. Vezme-li se v úvahu množství a rozmanitost chemikálií, které jsou běžně v současnosti používány, odhad jejich chování v okolním prostředí po jejich úniku na základě jejich vlastností může nejspolehlivěji odhadnout pouze chemik. Velmi názorná odpověď vyplývá ze zvážení p-T diagramu chemické látky (obr. 1). Každá čistá

Obr. 1 Příklad fázového idealizovaného (stavového) p-T diagramu čisté chemické látky.

Fig. 1 Example of phase idealized (state of matter) p-T diagram of pure chemical substance.

chemická látka je charakterizována svými fyzikálně-chemickými konstantami, např. bodem tání (teplota, při které přechází chemická látka ze stavu pevného do stavu kapalného), bodem varu (teplota, při které tlak nasycených par chemické látky dosáhne hodnoty 101.325 kPa), trojným bodem (teplota, při které koexistují všechny tři stavy látky: pevný, kapalný i plynný) a kritickým bodem (tento bod na fázovém diagramu zakončuje křivku vypařování; v kritickém stavu charakterizovaném kritickým tlakem p_k , kritickou teplotou T_k a kritickým objemem V_k mizí rozdíl mezi kapalinou a její párou). Předmětné body pak propojují křivky fázových přeměn: křivka sublimační (přechod ze skupenství pevného do plynného), křivka výparná (přechod ze skupenství kapalného do plynného) a křivka tání (přechod ze skupenství pevného do kapalného).

Chemická látka v zařízení pod kontrolou:	Chemická látka v okolí zařízení mimo kontrolu:
a) stav látky určen teplotou T , tlakem p , objemem V (koncentrací c), b) zpracování, skladování nebo transport látky přináší užitek (+ peníze).	a) stav určen teplotou atmosférickou T_a , tlakem atmosférickým p_a , objemem oblaku v atmosféře V_a , který je obecně funkcí původní koncentrace látky c , rychlosti vanutí větru u_a , a doby trvání události t ($V_a = f(c, u_a, t)$), b) únik látky do okolního prostředí způsobuje škody na zdraví a životě lidí, na majetku, na životním prostředí (- peníze).
PŘEDMĚT CHEMICKÉHO INŽENÝRSTVÍ	PŘEDMĚT BEZPEČNOSTNÍHO INŽENÝRSTVÍ
	(včetně návržení a realizace zmírňujících opatření)

Obr. 2 Chemické a bezpečnostní inženýrství jsou dvě strany jedné mince [1].
Fig. 2 Chemical and security engineering are two sides of one coin [1].

Pouze člověk důkladně znalý chemie a fyziky má vědomosti a zná prameny, ve kterých lze nalézt informace o tom, jak odhadnout chování nebezpečné chemické látky z jejích stavových parametrů a fyzikálně-chemických konstant. Např. pokud při kryogenním skladování kapalného kyslíku ($t = -183\text{ °C}$, $p = 101,325\text{ kPa}$) dojde k jeho úniku do okolí charakterizovaného normálními podmínkami ($t = 0\text{ °C}$, $p = 101,325\text{ kPa}$), pak nastane prudký okamžitý odpar a pokles tlaku kyslíku na úroveň jeho parciálního tlaku v atmosféře ($\approx 21\text{ kPa}$). Jev je zviditelněn kondenzací vodní páry přítomné v atmosféře a v rámci daného oblaku existuje nebezpečí vzniku omrzlin. V závislosti na meteorologických podmínkách je průměr oblaku 5 až 25 m. Za uvedenou hranici se vyskytuje už jen normální atmosféra s koncentrací kyslíku 21 % objemu.

Na druhé straně chemické a bezpečnostní inženýrství jsou dvě strany jedné mince, jak je znázorněno na obr. 2 [1, 2]. Uvedené skutečnosti jsou zde prezentovány pro ilustraci, aby nevznikl dojem, že zajištění bezpečnosti je celkem jednoduchá záležitost, jak se projevilo při odborném posuzování bezpečnostních dokumentací vyžadovaných od provozovatelů podle původního zákona č. 353/1999 Sb., o prevenci závažných havárií s přítomností chemických látek, a projevuje se i dále při posuzování podle zákona č. 59/2006 Sb.

Ohrožení od průmyslových komplexů, skladů a vozidel nakládajících s nebezpečnými chemickými látkami je vlastně velikost nehody (případně z ní vyvinuté havárie), která je měřena velikostí dopadů na chráněné zájmy (aktiva), tj. způsobenými škodami a ztrátami [2, 3]. To znamená, že ohrožení souvisí s nebezpečností zařízení, která vyplývá z vnitřních (vrozených) vlastností předmětných nebezpečných chemických látek a chemických přípravků. **Rozdíl mezi ohrožením a nebezpečností je v tom, že:**

- **nebezpečnost** všech typů zařízení s nebezpečnými chemickými látkami závisí jen na vnitřních příčinách, tj. jenom na vlastnostech chemických látek a na procesech nakládání s nimi,
- **ohrožení** všech typů zařízení s nebezpečnými chemickými látkami závisí jak na vnitřních příčinách spojených s vlastnostmi chemických látek, tak na vnitřních příčinách spojených např. se stárnutím materiálu zařízení, řízením technologických procesů, lidskými chybami apod., a tak i na vnějších příčinách (živelní pohromy, havárie jiných zařízení, domino efekty, kriminalita apod.).

V současné době je poznání takové, že rizika od všech typů zařízení s nebezpečnými chemickými látkami počítáme s ohledem na ohrožení (anglicky hazard). Jestliže se vezme v úvahu jen nebezpečnost, pak stanovené riziko není úplné, což ukázala např. Spolana a. s. při povodni v r. 2002, při které se odhalilo, že v bezpečnostní dokumentaci nebyla povodeň považována za možný zdroj havárie. Situace je však složitější. Riziko totiž ještě závisí na místní zranitelnosti, která je spojena s podložím místa, stavbou a konkrétní technologií, počtem lidí a kulturou bezpečnosti. Postupy pro identifikaci ohrožení a pro výpočet integrálního rizika lze nalézt ve specializované literatuře [2–4]. Při výpočtu ohrožení se zdroje rizika rozdělují na:

- technologické poruchy a nehody (tzv. vnitřní) kritických prvků, vazeb a toků v systému; je nutno zvážit vady materiálu, stárnutí, nedostatečnou údržbu apod.,

- chyby nebo selhání řídicího systému,
- lidské chyby,
- živelní pohromy nebo technologické havárie (tzv. vnější) jiného systému,
- teroristický útok, kriminální čin nebo válka.

a u výpočtu nebezpečnosti se zdroje rizik zvažují jen ve spojitosti s vlastnostmi nebezpečné látky a ostatní se neberou v úvahu, tj. dle materiálů OECD 2 [5, 6] se počítá jen tzv. chemické riziko. Mnohdy se zapomíná i na chyby spojené s řízením, tj. na organizační havárie.

V lidském systému u zařízení s nebezpečnými chemickými látkami pak rozlišujeme stavy bezpečí a nebezpečí, přičemž nebezpečí je stav, při kterém již zařízení s nebezpečnými chemickými látkami je v situaci, že újma na chráněných zájmech je vysoce pravděpodobná, tj. v daném případě lze s velkou pravděpodobností očekávat vznik nehody, při které budou i nepřijatelné dopady, tj. nehoda přeroste v havárii.

3. NEBEZPEČNOST ZAŘÍZENÍ

Nebezpečnost sledujeme u: technologických výrobních zařízení, skladovacích zařízení, produktovody, mobilní přepravní zařízení), která obsahují nebezpečné chemické látky.

Za velmi nebezpečná chemická zařízení, tj. za zařízení s velkou nebezpečností, jsou obecně považována taková stacionární zařízení, ve kterých dopady nehod v procesních nebo skladových zařízeních/aparátech, které se vyvinou v havárie, mohou významně ovlivnit životy nebo zdraví lidí, jejich majetek a životní prostředí za hranicemi těchto zařízení. V případě zařízení a objektů skladujících nebo zpracovávajících chemické látky se zejména jedná o objekty, ve kterých se nebezpečné látky (vyjmenované jednak taxativně, jednak skupinově na základě určitých vlastností) vyskytují v množstvích převyšujících stanovené limity (viz např. směrnice Seveso II).

Po uvolnění látky ze zařízení (aparátu) mohou, jak již bylo dříve řečeno, nastat tři základní nebezpečné situace: požár (např. požár kaluže, tryskový oheň, ohňová koule, bleskový oheň apod.), výbuch (ohraňeného oblaku par, neohraňeného oblaku par, kondenzované fáze, expandujících par vroucí kapaliny neboli BLEVE apod.) a toxický rozptyl.

Potenciál způsobit škody je všem nebezpečným chemickým látkám „vlastní“, nebo také „vrozený či inherentní“. Je projevem jejich konkrétních vlastností, jako jsou hořlavost, výbušnost (směsí jejich par s ovzduším nebo kyslíkem) a toxicita. Chemické látky, které se v zařízeních chemického průmyslu (výrobních nebo skladových), případně v transportních prostředcích, chovají stavově, tj. zaujmají příslušný objem a vykazují příslušný rovnovážný tlak svých par odpovídající teplotě v zařízení, se po úniku do okolí pochopitelně rovněž zachovávají stavově, pouze hodnoty stavových veličin se diametrálně změní tak, že tlak a teplota budou funkcí momentálního počasí (alespoň v prvních okamžicích rozvoje události) a objem bude určen v případě úniku kapalin stavebním řešením okolí zařízení (terén, jámka apod.) a v případě plynů nebo par bude též určen momentálním počasím (viz obr. 3).

Na obr. 3 je znázorněno fyzikální chování chemických látek po jejich úniku z aparátu do okolního prostoru. Chemické látky mohou obecně vytékat z aparátů jako plyny, chladem nebo tlakem

Zařízení s chemickou látkou (obecně tekutinou):

- a) stlačený plyn,
- b) plyn zkapalněný tlakem nebo chladem,
- c) kapalina v rovnováze se svou nasycenou parou

Nežádoucí únik chemické látky:

- a) výtok plynu nebo páry,
- b) dvoufázový výtok (plyn/pára a kapénky kapaliny),
- c) výtok kapaliny.

Chování chemické látky v okolním prostředí:

- a) tvorba oblaku plynů/par (nebezpečí vzniku požáru, výbuchu, toxického rozptýlu),
- b) kondenzace plynů / par do kaluže (nebezpečí znečištění půdy, vody),
- c) tvorba kaluže a její odpar do oblaku

Obr. 3 Základní model pro odhad množství nebezpečné chemické látky, které uniklo ze zařízení do životního prostředí; zpracováno dle [7].

Fig. 3 Basic model for judgement of amount of dangerous substance, which released from facility to environment; processed according to [7].

Obr. 4 Struktura modelů hodnocení dopadů.

Fig. 4 Structure of models for impacts assessment.

zkapalněné plyny nebo jako kapaliny. Protože každá taková chemická látka může mít více nebezpečných vlastností, výsledné působení může být značně komplexní (viz obr. 3 a 4).

Skutečné závažné havárie v chemickém průmyslu představují ve větší či menší míře nejružnější kombinace výše uvedených základních situací. Proto je každá konkrétní nehoda i havárie vždy poněkud jiná a odlišuje se od dosud známých havárií. Proto je třeba při odhadu rizika provozu zařízení vycházet ze zcela konkrétních a co nejúplnějších údajů.

4. VÝSLEDKY ANALÝZY PŘÍČIN PRŮMYSL OVÝCH NEHOD

Při studiu byla použita data z konkrétních havárií a ze zpráv od vyšetřovacích cílů i z vlastních zkušeností autorky, získaných při šetření havárií [1, 8]. Velmi podrobně byly zváženy havárie Flixborough, Seveso a Bhópál, pro které jsou v odborné literatuře dostupná fakta v dostatečné podrobnosti (souhrn dat je v [1, 8]). Získaná data byla analyzována metodami

Tab. 1 Klasifikace faktorů, které přispívají ke vzniku závažných havárií v chemickém průmyslu.
Tab. 1 Classification of factors that contribute to strong accident origin in chemical industry.

I. Bezprostřední přímé příčiny havárie:	
I.1 Chyby provozovatele:	I.6.3. Dopad dopravní nehody uvnitř podniku na aparáty zařízení.
I.1.1. Při provozu.	I.7. Události v okolí podniku ovlivňující zařízení:
I.1.2. Při údržbě.	I.7.1. Vliv domino efektu na zařízení následkem události v jiném zařízení sousedního podniku.
I.1.3. Při inspekci, testování nebo kalibraci.	I.7.2. Dopad dopravní nehody vně podniku na aparáty zařízení.
I.1.4. Při návrhu konstrukčního řešení.	I.7.3. Porucha veřejných sítí:
I.2. Poruchy komponent:	I.7.3.1. Výpadek elektrické sítě.
I.2.1. Potrubí a potrubní prvky.	I.7.3.2. Výpadek vodovodního řadu.
I.2.2. Svařováním.	I.7.3.2. Porucha v dodávce jiných médií a služeb v okolí důležitých pro podnik.
I.2.3. Ventily.	I.7.4. Činnost neoprávněných osob:
I.2.4. Hlavní aparáty:	I.7.4.1. Sabotáže.
I.2.4.1. Nádoby / kolony.	I.7.4.2. Ostatní akce (vandalismus, rozkrádání apod.).
I.2.4.2. Zásobníky.	I.8. Přírodní podmínky a pohromy:
I.2.4.3. Reaktory.	I.8.1. Extrémní intenzita větru.
I.2.4.4. Výměníky tepla.	I.8.2. Nízká / vysoká teplota ovzduší.
I.2.4.5. Pece.	I.8.3. Zemětřesení.
I.2.4.6. Vařáky.	I.8.4. Povodeň.
I.2.5. Strojní zařízení:	I.8.5. Blesky.
I.2.5.1. Čerpadla.	II. Doprovodné příčiny havárie:
I.2.5.2. Kompresory / dmychadla.	II.1. Manažerská / organizační opomenutí:
I.2.5.3. Míchadla / směšovače.	I.1.1. Nedostatek bezpečnostní kultury.
I.2.5.4. Mlecí aparáty.	II.1.2. Neadekvátní organizace bezpečnosti.
I.2.5.5. Mechanické dopravníky.	II.1.3. Nedodržení předem stanovených bezpečných postupů (např. pro udržení nebo zvýšení výroby atd.).
I.2.5.6. Sušičky.	II.1.4. Nedostatečné nebo nevhodné předpisy (pro pracovní postupy):
I.2.5.7. Odstředivky.	II.2. Nedostatky designu:
I.2.6. Komponenty měření a regulace.	II.2.1. Nevhodné použití norem / prováděcích předpisů pro konkrétní výrobu (proces).
I.2.7. Elektrické komponenty.	II.2.2. Proces nedostatečně analyzován z hlediska bezpečnosti, nebezpečí nebylo identifikováno.
I.3. Koroze:	II.2.3. Chyby v designu (opomenutí, nevhodné použití norem / předpisů).
I.3.1. Vnitřní koroze.	II.2.4. Chyby v aplikaci ergonomických principů pro design vztahu člověk-stroj.
I.3.2. Vnější koroze.	II.2.5. Použité normy/předpisy zajistily pouze omezenou ochranu.
I.3.3. Koroze napětím.	II.3. Nedodržení příslušných pracovních předpisů (zkratky):
I.3.4. Koroze cyklickou únavou.	II.3.1. Výrobní předpisy.
I.4. Nepředvídané reakce:	II.3.2. Předpisy pro údržbu.
I.4.1. Neovladatelné / rozkladné reakce.	II.3.3. Předpisy týkající se testování, provozování, kalibrace nebo inspekce.
I.4.2. Ostatní nepředvídané chemické reakce.	II.3.4. Předpisy konstrukční.
I.4.3. Fyzikálně-chemické reakce.	II.3.5. Předpisy pro vnitřní komunikaci.
I.5. Elektrostatické náboje.	II.3.6. Předpisy pro povolování prací.
I.6. Události v místě nesouvisící se zařízením:	II.3.7. Předpisy pro laboratorní analýzy.
I.6.1. Vliv domino efektu na zařízení následkem události v jiném zařízení téhož podniku.	II.3.8. Předpisy pro skladování materiálů.
I.6.2. Poruchy dodávek pomocných látek a energií:	
I.6.2.1. Výpadek elektřiny.	
I.6.2.2. Porucha záložního energetického zdroje.	
I.6.2.3. Výpadek chladicí vody.	
I.6.2.4. Porucha pneumatického/elektrického měřicího a regulačního systému.	
I.6.2.5. Výpadek dodávky páry.	
I.6.2.6. Výpadek dodávky paliv.	
I.6.2.7. Výpadek dodávky dusíku nebo jiných inertních médií.	

Tab. 2 Výběr příčin ztráty soudržnosti zařízení v chemickém průmyslu s případným uvolněním nebezpečných chemických látek do okolního prostředí následkem ztráty obsahu (zádrže) zařízení.

Tab. 2 Selection of causes of loss of containment of facility in chemical industry with eventual release of dangerous chemical substances into surrounding as a consequence of loss of content (plug) of facility.

I. Závady soudržnosti zařízení způsobené „otevřeným koncem“ cesty do atmosféry.	
A.	Následkem skutečného odlehčení procesu nebo požadavků vypustit zařízení.
B.	Následkem chybné operace nebo poruchy zařízení, např. nesprávnou činností pojišťovacího ventilu nebo poruchou pojišťovací membrány, atd.
C.	Následkem chyby operátora, např. ponechání otevřeného odvodušňovacího nebo odkalovacího ventilu, špatné směrování přesunu materiálu, přeplnění zásobníku, otevření natlakované jednotky, atd.
II. Závady v soudržnosti způsobené v mezích operačních podmínek zařízení následkem vad zařízení.	
A.	Vady vzniklé před uvedením do provozu a neobjevené před najetím (následkem špatných inspekčních nebo zkušebních procedur).
1.	Zařízení navržené neadekvátně pro zamýšlený výkon, např. vyspecifikován špatný materiál, neadekvátní jmenovitý tlak nádob nebo potrubí, neadekvátní jmenovitá teplota, atd.
2.	Defekty vzniklé během výroby, např. použit špatný materiál, nízká zručnost pracovníků, nízká úroveň kontroly kvality, atd.
3.	Poškození zařízení nebo zhoršení jeho stavu při dopravě nebo skladování.
4.	Poruchy vzniklé při stavbě, např. defekty při svařování, porušení souososti, špatně přizpůsobená těsnění, atd.
B.	Vady následkem zhoršení stavu zařízení při provozu nezjištěné dříve, než se jejich vliv stal významným (např. nevhodné monitorovací procedury v těch případech, kdy zhoršování je postupné).
1.	Zeslabení a trhliny v ucpávkách čerpadel nebo míchadel, těsnění ventilů, těsnění přírubových spojů, atd.
2.	Interní a/nebo externí koroze, včetně popraskání vlivem pnutí z koroze.
3.	Eroze nebo zeslabení.
4.	Únava kovů nebo dopady vibrace.
5.	Hrubé zacházení v předchozím údobí, např. provoz pece při teplotách převyšujících konstrukční teplotu trubek („creep“ neboli tečení materiálu).
6.	Zkřehnutí vodíkem.
C.	Vady vzniklé při rutinní údržbě nebo při malých změnách neprovedených přesně, např. nízká zručnost pracovníků, špatné materiály, atd.
III. Závady v soudržnosti způsobené v mezích operačních podmínek zařízení následkem externích činitelů.	
A.	Poškození nárazem, např. pád jeřábu, silniční vozidlo, rypadlo, strojní dílna přidružená k procesní jednotce, atd.
B.	Poškození ohraničenou explozí následkem nahromadění a vznícení hořlavých směsí vzniklých z malých úniků, např. výbušné prostředí vytvořené v analyzátorových domkách, v uzavřených kanalizacích, okolo obestavěných zásobníků, atd.
C.	Sesedání stavebních podpěr následkem geologických nebo klimatických faktorů nebo vady stavebních podpěr následkem koroze, atd.
D.	Poškození silničních cisteren, železničních vagonů, kontejnerů, atd. během přepravy materiálu do a z místa.
E.	Vystavení vlivu požáru.
F.	Dopady tlakové vlny z okolních explozí (exploze neohraničeného oblaku par, vybuchující nádoby, atd.), jako je přetlak v čele vlny, úlomky, poškození staveb, atd.
G.	Přírodní pohromy, jako je vichřice, zemětřesení, povodně, blesky, atd.
IV. Závady v soudržnosti způsobené následkem odchylek mimo meze operačních podmínek zařízení.	
A.	Přetlakování zařízení
1.	Následkem propojení se zdrojem tlaku:
a.	zdroj tlaku plyn:
(1)	prudký vnik plynu do následujícího nízkotlakého zařízení v důsledku poruchy kontroly tlaku, chybně otevřený oddělovací ventil atd.
(2)	tlakový zpětný tok do nízkotlakového zařízení, např. v důsledku poruchy kompresoru.
b.	zdroj tlaku kapalina:
(1)	načerpání blokových (ucpaných) plynových prostorů,
(2)	hydraulické přetlakování jako následek blokování (ucpání) na odtokové straně,
(3)	nadměrný ráz, takový jako při náhlém uzavření ventilu na transportním potrubí kapaliny.
2.	Následkem vzrůstající teploty procesu:
a.	ztráta chlazení:
(1)	ztráta průtoku chladiva, např. do chladiče reaktoru, do kondenzátoru destilační kolony, atd.
(2)	zvýšená teplota chladiva, např. výpadek ventilátoru chladicí vody, atd.
(3)	nános nečistot v chladičích, kondenzátorech, výměnících,
b.	nadměrný vstup tepla (termálního)
(1)	porucha kontroly vařáku, zejména u systémů vytápěných parou nebo horkým olejem,

Tab. 2 Výběr příčin ztráty soudržnosti zařízení v chemickém průmyslu s případným uvolněním nebezpečných chemických látek do okolního prostředí následkem ztráty obsahu (zádrže) zařízení. (Pokračování)

Tab. 2 Selection of causes of loss of containment of facility in chemical industry with eventual release of dangerous chemical substances into surrounding as a consequence of loss of content (plug) of facility. (Continuation)

	<ul style="list-style-type: none"> (2) vstup horkého materiálu z vnějšku, např. přetok, c. nadměrný vznik tepla (chemického) <ul style="list-style-type: none"> (1) ujetí reaktoru, např. následkem nedostatku reakčního rozpouštědla, vysoké rychlosti přívodu surovin, vysokého molárního poměru, nashromáždění nezreagovaných chemikálií při nevhodném míchání nebo dočasné ztrátě reakce následně vedoucí k ujetí reaktoru, atd. (2) samozahřívání následkem vstupu katalytických nečistot, např. zpětný tok ze spotřebitelské jednotky ethylenoxidu do napájecího zásobníku, (3) samozahřívání následkem smíchání reagujících chemikálií, např. H_2SO_4 s $NaOH$, (4) exotermní rozklad tepelně nestabilních nebo explozivních materiálů, jako jsou peroxidy, např. následkem vzrůstu teploty, překonzentrováním nebo uložením na horké povrchy.
3.	Následkem vnitřní exploze vzniklé vytvořením a zapálením směsi hořlavých plynů, aerosolů nebo prachů: <ul style="list-style-type: none"> a. vnik ovzduší např. následkem neadekvátního vyčištění zařízení před najetím, následkem ztráty proplachu dusíkem v hlavách fáků, skladových zásobníků, odstředivkových systémů, sušáren, atd. b. nepřítomnost kritického inertního zředovačla, např. dusíku ve skladových zásobnících s ethylenoxidem, výpadek dusíku ve směšovací sekci transportních systémů pevných látek, atd. c. nedostatek prostředků tlumících explozi, d. hořlavá odchylna v oxidačních procesech, např. následkem vysokých podílů ovzduší nebo kyslíku nebo při zastavení konverze.
4.	Následkem fyzikálně nebo mechanicky indukovaných sil nebo pnutí: <ul style="list-style-type: none"> a. expanze při změně stavu, např. zamrznutí vody v potrubí, b. tepelná expanze zablokovaných kapalin, např. ve výměnících tepla nebo v dlouhých potrubích, c. vnik cizích fází, např. porucha plynového kompresoru následkem protlačení kapaliny sáním stroje, pulsování kondenzátu v parovodech, atd.
B.	Podtlakování zařízení (neschopného odolat vakuu): <ul style="list-style-type: none"> 1. Přímým připojením k ejektoru nebo k zařízení normálně provozovanému pod vakuem: <ul style="list-style-type: none"> a. následkem selhání zařízení, např. ztrátou kapalinového uzávěru následkem poruchy hlídače hladiny a tím způsobeným spojením s vakuovým prostorem, b. následkem chyby operátora, např. otevřený oddělovací ventil, atd. 2. Následkem pohybu nebo přemístění kapalin: <ul style="list-style-type: none"> a. vyčerpání zásobníků nebo nádob, b. vyprázdnění nebo gravitační odtok ze zvýšených zablokovaných zařízení. 3. Následkem ochlazení plynů nebo par: <ul style="list-style-type: none"> a. kondenzace kondenzovatelných par, např. zablokování nádoby po vypařování, b. chlazení nekondenzovatelných plynů a par, např. skladový zásobník při silném dešti v létě. 4. Následkem jevu rozpustnosti, např. rozpouštění plynů v kapalinách.
C.	Vysoká teplota kovů (způsobující ztrátu pevnosti): <ul style="list-style-type: none"> 1. Požár pod zařízením, např. následkem výtoku, prosakování čerpadel, atd. 2. Plamenový náraz způsobující lokální přehřátí, např. v pecích následkem nesouososti nebo špatným seřazením hořáků. 3. Přehřátí elektrickými topidly, např. následkem poruchy vysokoteplotních pojistek. 4. Neadekvátní průtok tekutiny vytápěným zařízením, např. porucha trubky pece při ztrátě průtoku horkého oleje. 5. Vyšší průtoková rychlost nebo vyšší teplota teplejší páry nebo nižší průtoková rychlost nebo vyšší teplota chladnější páry výměníkem tepla.
D.	Nízká teplota kovů (způsobující zkřehnutí a přepnutí): <ul style="list-style-type: none"> 1. Podchlazení chladicí jednotkou, např. následkem poruch kontroly, použitím špatného chladiva, atd. 2. Neúplné odpaření a/nebo neadekvátní ohřátí chladného materiálu před převedením do zařízení nevhodné jmenovité teploty, např. následkem poruchy kontroly odparky kapalného etylénu. 3. Ztráta tlaku v jednotkách zpracovávajících kapalinu o nízkém bodu varu.
E.	Špatné zpracovávání materiálů nebo abnormální znečištění (způsobující větší korozi, chemické působení na ucpávky a těsnění, trhání korozním pnutím, zkřehnutí, atd.) <ul style="list-style-type: none"> 1. Změny složení par mimo přípustné hranice. 2. Abnormální nečistoty vnesené se surovinami nebo nevhodné suroviny. 3. Vedlejší produkty nežádoucích chemických reakcí. 4. Kyslík, chlór nebo jiné nečistoty zůstávající v zařízení při najíždění následkem neadekvátní evakuace nebo dekontaminace. 5. Nečistoty vstupující do procesu z atmosféry, obslužných médií, úniků z potrubí, atd. během provozu.

používáními v rizikovém inženýrství [9], tj. analýza situace, analýza kontrolním seznamem, analýza stromem události a multikriteriální vyhodnocení.

Při vyšetřování průmyslových nehod i havárií s přítomností nebezpečných chemických látek se obvykle zjistí, že nebyly způsobeny nějakou jedinou příčinou, nýbrž že vyplynuly z konkrétní kombinace celé řady okolností; nejčastěji jde o propojení příčin lidských, technických, environmentálních a organizačních. Dále se obvykle zjistí, že závažným haváriím předcházely jisté události, tzv. „skoro-nehody“ (near-mises), které proběhly v podmínkách splňujících většinu havarijních okolností. Důkladným rozбором se obvykle zjistí, že i při **kritické události**, dopady nehod až závažných havárií mohou být velmi různorodé, od případů nevykazujících žádná zranění osob nebo poškození majetku či životního prostředí až po úmrtí osob a závažné škody na majetku a životním prostředí.

Analýzy procesů, které způsobily nehodu nebo až závažnou havárii ukazují, že nepříjemné jevy nastaly jako výsledek jistého sledu jevů a měly i dlouhou inkubační dobu (např. postupné snižování důrazu na bezpečnostní pravidla a zásady). Proto je užitečné modelovat též kroky, jejichž uskutečněním je možné se havárii vyhnout. Přitom se vychází z modelu stromu událostí, které vyústily nebo mohou vyústit v havárii. Počáteční, též iniciační událost (Initiating Event) vyvolá řetězec jevů dle konkrétních podmínek v daném okamžiku. Potenciální nehoda až havárie se rozvine pouze tehdy, pokud současně vznikne nebo již probíhá spouštěcí událost (Trigger Event). Nežádoucí jev se uskuteční pouze tehdy, pokud selžou ochranná zařízení nebo zásahy obsluhy. Stupeň závažnosti jevu pak závisí na míře selhání zmírňovacích opatření. Uvedená „anatomie“ nehody popř. havárie je převzata z odborné literatury proto, že vhodně spojuje základní počáteční příčiny a následné uvolnění hmoty nebo energie do okolního prostředí.

Při vyhodnocování dat získaných vyšetřováním závažných havárií s přítomností nebezpečných chemických látek jsou identifikovány jednak bezprostředně přímé příčiny nehody a následné havárie, jednak doprovodné příčiny havárie. V tab. 1 je uvedena klasifikace faktorů, jejichž role při vzniku havárie je podstatná (přeloženo z práce [10]).

Všem průmyslovým nehodám a haváriím ve stabilních zařízeních s přítomností chemických látek je společné jedno stadium, které bývá v odborné literatuře označováno termínem „Loss of Containment“ a znamená v chemickém průmyslu ztrátu soudržnosti nádoby či objektu. Proto je třeba upozornit, že v chemické průmyslové praxi je rozdíl oproti jaderné energetice, ve které je kontejnment realizován jako ochranná obálka reaktorové haly se všemi svými vlastnostmi a funkcemi. Podobný technický objekt se v chemickém průmyslu vyskytuje velmi zřídka a jen v několika zvláštních případech chrání zařízení bezpečnostní obálka – kontejnment. Většina velkých zařízení, jak výrobních, tak skladovacích, je obvykle postavena na volných prostranstvích a jejich zařízení se zpravidla nacházejí pod širým nebem. Proto jakákoliv porucha v kterémkoliv místě technologického systému znamená ztrátu soudržnosti (také ztrátu obsahu nebo zádrže) tohoto systému a únik nebezpečné chemikálie do okolního prostředí, tj. na terén a do ovzduší. Některé, zejména malé úniky neboli úkapy, jsou nezbytné a vznikají zejména při přečerpávání chemikálií, protože zvláště některá čerpadla (ucpávková) nejsou nikdy absolutně těsná.

Příčiny úniku nebezpečné chemické látky z uzavřeného systému následkem ztráty soudržnosti zařízení jsou rozvedeny v tab. 2, přeložené z práce [11].

5. POUČENÍ Z NEHOD A HAVÁRIÍ

Studiem nehod mohou provozovatelé omezit nebezpečné nebo neproduktivní pracovní praktiky a tím zvýšit kulturu bezpečnosti práce. Pozitivní zpětnou vazbu na vznik nehod mohou mít i audity řízení, audity bezpečnosti, audity nebezpečných dějů, chemických reakcí, zprávy o nehodách a skoro nehodách, a monitoring dodržování všech opatření. Existují 3 kategorie nebo „úrovně“ doporučení, a to:

1. Bezprostřední technická doporučení.
2. Doporučení pro zabránění nebezpečí.
3. Doporučení pro řízení zaměřené na primární příčiny nehod.

Bezprostřední technická doporučení jsou zaměřena na zabránění určitých nehod. Např. u odběru vzorků kapalného chloru ve výrobně chloru existuje určité nebezpečí úniku chlóru a následná inhalace plynného chloru obsluhou při vzorkování chloru. Doporučení z této kategorie jsou: změna techniky vzorkování, trénink správného odběru a použití ochranných pomůcek.

Doporučení pro zabránění (odvrácení) havárií jsou zaměřena na odvrácení nepříjemných havárií anebo alespoň jejich nepříjemných dopadů. Např. se provede zlepšení běžných, oddělujících opatření umístěných mezi obsluhu a vlastní nebezpečí, tj. modifikace vzorkovací aparatury, vzorkováním v jiném místě nebo in-line analyzátozem, který odstraňuje potřebu ručního vzorkování.

Doporučení pro řízení zaměřené na primární příčiny nehody. Analýzou situace se identifikují nutné změny v řídicích systémech. Jde nejen o prevenci daného typu nehody, ale i na jiné podobné nehody. Předmětná opatření jsou více důsledná a déle přetrvávající. V případě vzorkování chlóru to může být:

- a) zlepšení v metodách odběru vzorků (sofistikovaně se odpoví na otázky: Kdo se účastní rozhodování? Jaká jsou kritéria pro stanovení místa odběru? Jaké jsou metody odběru a přístrojové vybavení? Kdo je oprávněn k odběru? Existuje periodický audit? a odpovědi se zavedou do praxe);
- b) zlepšení v systému řízení pro zaváděcí, hodnotící a monitorovací standardní výrobní postupy (jsou postupy adekvátní, srozumitelné a jsou důsledně prováděny? Je tento pracovní úkol stále nezbytný?), a odpovědi se zavedou do praxe;
- c) existuje rutinní postup jako analýza bezpečnosti práce, ve kterém jsou úkoly systematicky posuzovány z hlediska potenciálního nebezpečí?

6. ZÁVĚR

OECD [5, 6] na základě rozsáhlých analýz havárií experty doporučila nutnost zavádění programu na zvyšování bezpečnosti a stanovila jeho zásady a koncept. Zároveň zdůraznila roli poučení z havárií a skoro-nehod; v rámci kultury bezpečnosti by poučení měla být systematicky používána vždy při zvažování technických a organizačně – řídicích opatření. Profesor Kletz, který zkoumal

havárie, poukazuje na problém udržování a využívání znalostí v rámci dané organizace [5, 6]. S postupem času a změnami personálu jsou původní opatření provedená po proběhlé havárii zapomenuta nebo nejsou předána všem pracovníkům v dané organizaci. Proto navrhuje následující opatření ke zlepšení společné paměti organizace:

1. Připojení poznámky ke každému pokynu, předpisu nebo normě, proč je právě takový.
2. Popis staré i nedávné havárie v podnikovém tisku s poučeními z nich vyplývající a projednání na školeních, zaměřených na bezpečnost, pro všechny složky podniku.
3. Pravidelná kontrola dodržování vydaných opatření.
4. Odstranění existujícího zařízení teprve po poznání, proč bylo instalováno. Rušení původního postupu po zjištění, proč byl přijat. Je to nutné, aby se neodstranilo něco, co má zabránit havárii nebo má zmírnit její dopady.
5. Zavedení lepšího informačního systému pro nalezení podrobností o haváriích a vydaných doporučeních po havárii.

Zavádění nových technologií s sebou nese i rizika, proto je třeba důsledně dbát na bezpečnost, což znamená kontinuální shromažďování relevantních dat, znalost metod rizikového inženýrství a provádění řízení procesů, hlavně složitějších, složitých a vzájemně propojených, způsobem, který vede k bezpečné komunitě, tj. každé průmyslové zařízení je bezpečné a neohrožuje sebe ani své okolí při svých kritických podmínkách.

Práce [12] se zabývá riziky, která narušují bezpečnost technických děl a jejich okolí. Ukazuje, že kvůli složitosti současných technických děl je nutno u důležitých technických děl, do kterých patří průmyslové komplexy, zvažovat i rizika, která jsou spojena s vnitřními propojeními, což potvrzují údaje v obou tabulkách. Proto v případě strategických řešení problémů technických děl je nutné používat systémové pojetí, založené na integrálním riziku.

Postupy založené na vypořádání dílčích rizik či integrovaného rizika nezajišťují dostatečně bezpečné technické dílo. Vzhledem k dynamickému vývoji světa je třeba prioritní rizika monitorovat a vypořádávat v čase. Na základě porovnání uspořádaných požadavků technik používaných při práci s riziky v technickém díle byl v práci [12] sestaven kontrolní seznam pro posuzování míry bezpečnosti technických děl na základě posouzení úrovně sedmi oblastí technik práce s riziky. Příklad hodnocení bezpečnosti běžných technických děl, která nepatří mezi kritické objekty České republiky a mají charakter SME, ukázal, že jejich míra bezpečnosti

je kolem rozhraní malá a střední. To znamená, že dle [11] jsou úrovně prevence nehod a havárií a připravenost na jejich rychlé a správné zvládnutí nízké.

7. LITERATURA

- [1] PROCHÁZKOVÁ, D., BUMBA, J., SLUKA, V., ŠESTÁK, B. *Nebezpečné chemické látky a chemické přípravky a průmyslové nehody*. PA ČR, Praha, 2008, 420 s. ISBN 978-80-7251-275-1
- [2] PROCHÁZKOVÁ, D.: *Strategické řízení bezpečnosti území a organizace*. ČVUT, Praha, 2011, 483 s. ISBN 978-80-01-04844-3.
- [3] PROCHÁZKOVÁ, D.: *Analýza a řízení rizik*. ČVUT, Praha, 2011, 405 s. ISBN 978-80-01-04841-2
- [4] PROCHÁZKOVÁ, D.: *Bezpečnost kritické infrastruktury*. ČVUT, Praha, 2012, 318 s. ISBN 978-80-01-05103-0
- [5] OECD. *Guiding Principles on Chemical Accident Prevention, Preparedness and Response*. OECD, Paris, 2003, 192 s.
- [6] OECD. *Guidance on Safety Performance Indicators. Guidance for Industry, Public Authorities and Communities for developing SPI Programmes related to Chemical Accident Prevention, Preparedness and Response*. OECD Environment, Health and Safety Publications, 11, OECD, Paris, 2003, 207 s.
- [7] AIChE. *DOW's Chemical Exposure Index Guide*. 1st Edition, AIChE, New York, 1994.
- [8] ČVUT: *Archiv – analýza a hodnocení rizik pohrom, havárií a dalších jevů*. ČVUT, Praha, 2017.
- [9] PROCHÁZKOVÁ, D. *Metody rizikového inženýrství*. SPBI SPEKTRUM XVIII, Ostrava, 2012, 147 s. + CD ROM (106 s., 690 kB).
- [10] DROGADIS, G. *Major Accident Reporting System*. Elsevier, Amsterdam, 1993.
- [11] PETROCHEM. *Loss Prevention*. PCHE – PetroChemEng, Praha, 2004. ISBN 80-02-01574-6
- [12] PROCHÁZKOVÁ, D. *Nástroj pro stanovení úrovně bezpečnosti technického díla na základě posouzení validity technik používaných při práci s riziky v praxi. Řízení rizik procesů spojených s technickými díly*, ČVUT, Praha, 2017, s. 163–191. ISBN 978-80-01-06351-4. <http://hdl.handle.net/10467/73522>
- [13] PROCHÁZKA, J., PROCHÁZKOVÁ, D. *Nehody a havárie v průmyslu. XXVII. Mezinárodní vědecká konference soudního inženýrství (ExFoS 2018), 1.–2. 2. 2018, Brno. Sborník příspěvků konference Expert Forensic Science Brno 2018*. s. 604–620. ISBN 978-80-214-5600-6

Správná citace:

PROCHÁZKA, J., PROCHÁZKOVÁ, D. Nehody a havárie v průmyslu. *Soudní inženýrství*, 2018, 29(3), 37–45. ISSN 1211-443X.