

HODNOTENIE NEBEZPEČENSTVA CHEMICKÝCH PROCESOV

Ľudovít Jelemenský
Juraj Labovský
Zuzana Labovská
Jozef Markoš

**HODNOTENIE NEBEZPEČENSTVA
CHEMICKÝCH PROCESOV**

HODNOTENIE NEBEZPEČENSTVA CHEMICKÝCH PROCESOV

**Ľudovít Jelemenský
Juraj Labovský
Zuzana Labovská
Jozef Markoš**

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
2012**

Učebnica má za cieľ objasniť základné postupy, najčastejšie využívané na identifikáciu nebezpečenstva v chemických prevádzkach, pričom časť týchto metód sa ďalej používa aj na kvantitatívne hodnotenie už samotného rizika vyplývajúce z identifikovaného nebezpečenstva. Hodnotenie nebezpečenstva je organizované úsilie zamerané na identifikáciu a analýzu významu nebezpečných situácií spojených s procesom alebo činnosťou. Konkrétne hodnotenie nebezpečenstva sa využíva na určenie nedostatkov v konštrukciách a v prevádzkových zariadeniach, ktoré by mohli viesť k náhodnému úniku chemických látok, požiaru alebo výbuchu. Mnohé z týchto metód na hodnotenie nebezpečenstva možno použiť aj na problematiku súvisiacu s funkčnosťou, ekonomikou a environmentálnymi aspektmi prevádzky.

Učebnica je určená poslucháčom bakalárskeho a inžinierskeho štúdia na Fakulte chemickej a potravinárskej technológie STU v Bratislave.

116251

KIS SJF STU Bratislava

284J041479



284J041479

KNIŽNICA A INFORMAČNÉ
STREDISKO
SJF STU
812 31 Bratislava

Všetky práva vyhradené. Nijaká časť textu nesmie byť použitá na ďalšie šírenie akoukoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autorov alebo nakladateľstva.

© doc. Ing. Ľudovít Jelemenský, DrSc., Ing. Juraj Labovský, PhD.,
Ing. Zuzana Labovská, PhD., prof. Ing. Jozef Markoš, DrSc.

Recenzenti: prof. Ing. Karol Balog, PhD.
doc. Dr. Ing. Aleš Bernatik
Ing. Alica Mičíková, PhD.

Schválilo vedenie Fakulty Chemickej a potravinárskej technológie STU v Bratislave.

ISBN 978-80-227-3803-3

OBSAH

1 Úvod	9
1.1 Štatistika havárii	10
1.2 Vnímanie úrovne akceptovateľnosti rizika	13
1.3 Seveso – poučenie z havárie	15
2 Kvalitatívne metódy identifikácia nebezpečenstva	19
2.1 Indexová metóda Dow	20
2.2 Selekčná metóda	40
2.3 Kontrolný zoznam – Checklist	52
2.4 Čo ak? – What-If	57
2.5 HAZOP (Hazard and operability study)	60
3 Kvantitatívno-kvalitatívne metódy identifikácie nebezpečenstva	77
3.1 Analýza stromu porúch	77
3.2 Analýza stromu udalostí	89
3.3 Analýza ľudskej spoľahlivosti (HUMAN RELIABILITY ANALYSIS – HRA)	93
Príloha 1	98
Príloha 2	104
Register	111

Predslov

Učebnica Hodnotenie nebezpečenstva chemických procesov je určená poslucháčom bakalárskeho a inžinierskeho štúdia na Fakulte chemickej a potravinárskej technológie STU v Bratislave. Učebnica má za cieľ študentom objasniť základné postupy, ktoré sa najčastejšie využívajú na identifikáciu nebezpečenstva v chemických prevádzkach, pričom časť týchto metód sa ďalej používa aj na kvantitatívne hodnotenie už samotného rizika vyplývajúce z identifikovaného nebezpečenstva. Pri výbere obsahu, voľbe rozsahu a spôsobu podania tém zahrnutých do diela sme vychádzali z poslania učebnice. Dávame prednosť výkladu fyzikálno-chemickej podstaty nebezpečenstva, ktoré môže potencionálne spôsobiť haváriu.

Technológ alebo vedúci výroby často musí vypracovať podklady, ktoré budú slúžiť pre analýzu hodnotenia nebezpečenstva. Hodnotenie nebezpečenstva je organizované úsilie zamerané na identifikáciu a analýzu významu nebezpečných situácií spojených s procesom alebo činnosťou. Konkrétne hodnotenie nebezpečenstva sa využíva na určenie nedostatkov v konštrukciách a v prevádzkových zariadeniach, ktoré by mohli viesť k náhodnému úniku chemických látok, požiaru alebo výbuchu. Informácie z hodnotenia nebezpečenstva poskytujú organizáciám podklady na zlepšenie bezpečnosti a riadenia rizík v ich chemických prevádzkach. Metódy hodnotenia nebezpečenstva sú zvyčajne zamerané na problematiku bezpečnosti procesu, ako je akútny účinok chemických látok počas havarijného úniku na samotných pracovníkov organizácie, ale aj na obyvateľstvo v blízkosti organizácie. Mnohé z týchto metód na hodnotenie nebezpečenstva je možné použiť aj na problematiku súvisiacu s funkčnosťou, ekonomikou a environmentálnymi aspektmi prevádzky.

Aj keď postupy hodnotenie nebezpečenstva sa zvyčajne používajú na kvalitatívne analýzy možných porúch zariadení a ľudských chýb, ktoré môžu viesť k haváriám, súčasne môžu upozorňovať na medzery v systéme riadenia bezpečnosti v organizácii. Napríklad, analýza hodnotenia nebezpečenstva existujúceho procesu môže odhaliť medzery v programe riadenia zmien v prevádzke alebo nedostatky v postupoch údržby. Hoci metódy hodnotenia nebezpečenstva sa neustále zdokonaľujú, veríme, že učebnica bude poskytovať užitočnú platformu aj pre tých, ktorí v uvedenej problematike dosiahli značný pokrok.

Ďakujeme recenzentom doc. Ing. Alešovi Bernatikovi, PhD., prof. Ing. Karolovi Balogovi, PhD., Ing. Alici Mičíkovej, CSc. a ostatným kolegom, ktorí počas tvorby tohto učebného textu svojimi pripomienkami významne prispeli k jeho zlepšeniu.

1 Úvod

Rýchly rozvoj chemického priemyslu a zvyšovanie efektívnosti výroby prispieva k vzniku nových, resp. zdokonaľovaniu už existujúcich technológií. V ostatnom čase sa čoraz viac zdôrazňuje efektívne zvyšovanie bezpečnosti chemických prevádzok využívaním moderných technických prostriedkov zabezpečujúcich účinnú prevenciu proti vzniku závažnej priemyselnej havárie.

„Bezpečnosť“ sa v pôvodnej stratégii prevencie proti nehodám chápala hlavne cez dodržiavania nariadení a zákonov zameraných na pracovnú (osobnú) bezpečnosť. V ostatných rokoch sa pojem bezpečnosť chápe v širšom kontexte a dá sa vyjadriť pojmom „predchádzanie stratám“, či už na majetku, produkcii, životnom prostredí, zdraví, alebo ľudských životoch, ktoré by mohlo vyplynúť z prevádzkovania chemického procesu. V tomto pojme sú zahrnuté procesy identifikácie a hodnotenie nebezpečenstva s návrhom nových inžinierskych prvkov zameraných na prevenciu pred stratami. V ďalšom texte budeme pre jednoduchosť používať slovo bezpečnosť, s tým, že bude chápaná ako synonymum pojmu predchádzanie stratám, ktoré by mohli vyplynúť z prevádzkovania chemického procesu.

Bezpečnosť, nebezpečenstvo a riziko sú veľmi často používané výrazy pri hodnotení bezpečnosti chemických procesov. Ich význam je odlišný, aj keď sa často medzi nimi nerobí rozdiel a sú chápané rovnako. Definujme ich význam:

Bezpečnosť vyjadruje prevenciu pred haváriou. Na identifikáciu nebezpečenstva v chemickej prevádzke sa využívajú vhodné metodiky/techniky s cieľom jeho eliminovania skôr, ako vzniknú nehody.

Nebezpečenstvo je všetko, čo potencionálne môže spôsobiť haváriu.

Riziko je pravdepodobnosť (početnosť), že nebezpečenstvo vyústi do havárie s relevantnými následkami.

Chemické prevádzky obsahujú široké spektrum nebezpečenstiev. V prvom rade sú to nebezpečenstvá, ktorých výsledkom je zranenie pracovníkov či už z osobných príčin (pošmyknutie, zakopnutie, pád pracovníka), alebo zranenia súvisiace s technológiou (pohyb zariadení alebo ich súčastí). V druhom rade sú to nebezpečenstvá vyplývajúce z vlastností chemických látok a manipuláciou s nimi, napr. požiar, výbuch a toxické nebezpečenstvá.

Zo štatistik vyplýva, že moderný chemický priemysel patrí medzi najbezpečnejšie priemyselné odvetvia, ale aj napriek tomu stále existuje potenciál vzniku závažnej priemyselnej havárie s katastrofálnym dosahom. (Slovenská legislatíva definuje, že závažnou priemyselnou haváriou je udalosť, akou je najmä nadmerná emisia, požiar alebo výbuch s prítomnosťou jednej alebo viacerých vybraných nebezpečných látok, vyplývajúca z nekontrolovateľného vývoja v prevádzke ktoréhokoľvek z podnikov, na ktoré sa vzťahuje tento zákon a ktorá vedie bezprostredne alebo následne k vážnemu poškodeniu alebo ohrozeniu života alebo zdravia ľudí, životného prostredia alebo majetku v rámci podniku alebo mimo neho (Zákon č. 261/2002 Z. z.). Z tohto faktu vyplýva, že úloha a zodpovednosť inžiniera v chemickej prevádzke je predovšetkým v minimalizácii strát z dôvodu havárií,

v zabezpečení spoľahlivého prevádzkovania výroby a v optimalizácii materiálovej a energetickej náročnosti výroby.

Inžinier v chemickej prevádzke má zodpovednosť nielen za technológiu, ale aj za seba, svojich spolupracovníkov, za ich rodiny, za komunitu žijúcu v okolí chemického podniku a na poslednom rade má zodpovednosť za samotnú inžiniersku profesiu.

1.1 Štatistika havárií

Vo svete existuje veľké množstvo štatistických ukazovateľov na vyhodnotenie havárií a zodpovedajúcich strát. V tejto súvislosti treba zdôrazniť, že tieto štatistiky treba používať veľmi opatrne a so značnou rezervou. Väčšinou uvádzajú spriemerované hodnoty, ktoré nerozlišujú jednotlivé havarijné scenáre s relevantnými stratami. Zatiaľ neexistuje ukazovateľ, ktorý by bol schopný reflektovať všetky požadované aspekty na komplexné posúdenie havárie.

Najčastejšie sa používajú nasledujúce tri štatistické ukazovatele (Bosch et al., 1997):

- OSHA – početnosť incidentov (Incident rate),
- FAR – početnosť smrteľných incidentov (Fatal accident rate),
- FR – početnosť úmrtia alebo úmrtia na osobu a rok (Fatality rate or deaths per person per year).

Početnosť incidentov (OSHA) vyjadruje mieru bezpečnosti pracovného prostredia. OSHA vychádza zo základu 100 pracovných rokov, pričom pracovný rok má 2000 hodín, z tohto dôvodu je základom pre výpočet OSHA ukazovateľa 200 000 pracovných hodín vystavenia nebezpečenstvu. Početnosť incidentov je vyhodnotená na základe počtu úrazov, chorôb z povolania a z celkového počtu odpracovaných hodín všetkých pracovníkov počas sledovaného obdobia na základe rovnice:

$$\text{OSHA-počet incidentov} \\ \text{(základ prac. úrazy a choroby} \\ \text{z povolania)} = \frac{\text{počet úrazov a chorôb z povolania} \\ \times 200\,000}{\text{celkový počet odpracovaných hodín všetkých} \\ \text{pracovníkov počas sledovaného obdobia}} \quad (0.1)$$

OSHA ukazovateľ sa môže počítať aj z počtu dní pracovnej neschopnosti podľa nasledujúcej rovnice:

$$\text{OSHA-počet incidentov} \\ \text{(základ počet dní pracovnej} \\ \text{neschopnosti)} = \frac{\text{počet dní pracovnej neschopnosti} \\ \times 200\,000}{\text{celkový počet odpracovaných hodín všetkých} \\ \text{pracovníkov počas sledovaného obdobia}} \quad (0.2)$$

Vzhľadom na to, že OSHA ukazovateľ obsahuje informácie od drobných až po smrteľné úrazy, reprezentuje pracovnú nehodovosť lepšie, ako metódy založené iba na nehodách so

smrteľnými následkami. Nevýhodou je, že z tohto ukazovateľa sa nedá priamo zistiť početnosť smrteľných nehôd.

Ukazovateľ početnosti smrteľných incidentov FAR (Fatal accident rate) vyjadruje počet úmrtí na 1000 pracovníkov, ktorí pracujú celkovo 50 rokov, čo predstavuje 10^8 hodín. FAR ukazovateľ sa predovšetkým používa v anglických chemických podnikoch. Používa sa aj pre dostupnosť dát z verejných databáz a otvorených informačných zdrojov. FAR ukazovateľ sa vypočíta z rovnice:

$$FAR = \frac{\text{počet úmrtí} \times 10^8}{\text{celkový počet odpracovaných hodín všetkých pracovníkov počas sledovaného obdobia}} \quad (0.3)$$

Ukazovateľ početnosti úmrtia – FR (Fatality rate or deaths per person per year) vyjadruje počet úmrtí za rok vzťahnutý na celkový počet ľudí v aplikovanej populácii. FR ukazovateľ nezávisí od počtu odpracovaných hodín a používa sa tam, kde je veľmi ťažké určiť počet exponovaných hodín. FR ukazovateľ sa vypočíta z rovnice:

$$FR = \frac{\text{počet úmrtí za rok}}{\text{celkový počet ľudí v aplikovanej populácii}} \quad (0.4)$$

Porovnanie hodnôt najčastejšie používaných štatistických ukazovateľov pre rôzne priemyselné odvetvia je uvedený v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 1.1. Údaje OSHA. FAR a FR pre vybrané priemyselné odvetvia

	OSHA	FAR Smrť. 10^{-8} hod.	FR Smrť. osoba ⁻¹ .rok ⁻¹
Požiar v Londýne v 1940		1000	$2000 \cdot 10^{-5}$
Policajť v Severnom Írsku 1973-1992		70	$140 \cdot 10^{-5}$
HSE tolerovateľný limit (Health and Safety Executive v Anglicku)		50	$100 \cdot 10^{-5}$
Ťaženie ropy v mori		62	$125 \cdot 10^{-5}$
Hĺbkový rybolov		42	$84 \cdot 10^{-5}$
Banictvo	2,22	7,3	$14,5 \cdot 10^{-5}$
Stavebníctvo	3,88	5	$10 \cdot 10^{-5}$
Železnice		4,8	$9,6 \cdot 10^{-5}$
Poľnohospodárstvo	4,53	3,7	$7,4 \cdot 10^{-5}$
Chemický priemysel	0,49	4,0	$4,8 \cdot 10^{-5}$
Automobilový priemysel	1,08	0,6	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Odevný priemysel		0,05	$0,1 \cdot 10^{-5}$
Všeobecne akceptovateľný limit		0,05	$0,1 \cdot 10^{-5}$
Usmrtenie bleskom			$1,0 \cdot 10^{-7}$
Usmrtenie pádom meteoritu			$6,0 \cdot 10^{-11}$

Z uvedenej tabuľky (Tab. 1.1) je zrejmé, že chemický priemysel je dostatočne bezpečný a preto by sa otázka bezpečnosti chemických prevádzok mohla zdať neopodstatnená. Obava spoločnosti o dostatočnú bezpečnosť chemických prevádzok vyplýva z charakteru chemických výrobných, významného potenciálu vzniku závažnej priemyselnej havárie s veľkým dosahom alebo počtom úmrtí, ako to bolo napríklad pri havárii v Bophále v Indii (Kletz, 2001). Vyššie uvedené štatistické ukazovatele neposkytujú informácie o počte úmrtí v rámci jednej havárie, čo sa môže zdať z pohľadu spoločnosti mierne zavádzajúce. Analyzujeme nasledujúci príklad. Predpokladajme dve rôzne chemické prevádzky. Obidve prevádzky majú rovnaký štatistický ukazovateľ ich úplného zničenia v dôsledku výbuchu, a to napríklad raz za 1000 rokov. Prvú prevádzku obsluhuje jeden operátor, teda prípadná havária spôsobí jeden smrteľný následok. Druhú prevádzku obsluhuje 10 pracovníkov, takže havária spôsobí 10 úmrtí. Z pohľadu spoločnosti jednoznačne tragickejšie vyznieva druhá havária, pri ktorej došlo k úmrtiu väčšieho počtu ľudí. Avšak napriek tomu, v oboch prípadoch havárií majú FAR a OSHA ukazovatele rovnakú hodnotu, keďže sa do ich výpočtu berie celkový počet odpracovaných hodín všetkých pracovníkov, a teda z hľadiska každého individuálneho operátora je riziko smrteľného následku rovnaké. Tento príklad demonštruje, že verejnosť vníma haváriu s vyšším počtom úmrtí ako väčšiu tragédiu napriek rovnakým štatistickým ukazovateľom. Práve tento potenciál spôsobiť jednorázovo vysoký počet úmrtí vytvára v spoločnosti pocit, že chemický priemysel je veľmi nebezpečný.

Na druhej strane faktom ostáva, že oveľa častejšie ako havárie so smrteľným následkom sú havárie, ktoré vedú „iba“ k významným ekonomickým stratám. Ekonomické straty súvisia najmä so zničením výrobných zariadení a výpadkom výroby. Zo štatistik o haváriách v chemickom priemysle, ktoré sa vedú od roku 1957, vyplýva, že celkové ekonomické straty, ale aj priemerné ekonomické straty na haváriu neustále narastajú. Napriek neustálemu trendu zvyšovania bezpečnosti v chemickom priemysle sa za každých desať rokov zaznamenané straty zdvojnásobia. Treba tu zdôrazniť, že tento nárast je spôsobený najmä nárastom počtu chemických prevádzok a ich rozmerov, napriek tomu, že sa do prevádzok inštalujú stále zložitejšie, a tým aj drahšie zariadenia, o ktorých sa dá predpokladať, že budú bezpečnosť zvyšovať. Z uvedeného vyplýva, že snaha o zvýšenie bezpečnosti chemických výrobných musí byť orientovaná nielen na elimináciu smrteľných následkov a vážnych zranení, ale aj na predchádzanie ekonomickým škodám. Počet nehôd s konkrétnymi následkami sa znázorňuje pomocou pyramídy nehôd, ktorá je zobrazená na obrázku (Obr. 1.1). Čísla uvedené na obrázku (Obr. 1.1) sú iba pomerové. Presné počty nehôd s uvedenými následkami závisia od typu priemyslu, lokality a času. Štruktúra pyramídy zohľadňuje počet a závažnosť nehôd. Pyramídu tvorí základňa, ktorú tvoria nehody so zanedbateľnými škodami a označujú sa pojmom „skoro nehoda“. Tieto nehody upozorňujú firmy na prítomnosť bezpečnostných problémov, ktoré je potrebné riešiť resp. korigovať skôr, ako vznikne udalosť, ktorá prerastie do vážnej havárie.



Obr. 1.1. Pyramída nehôd

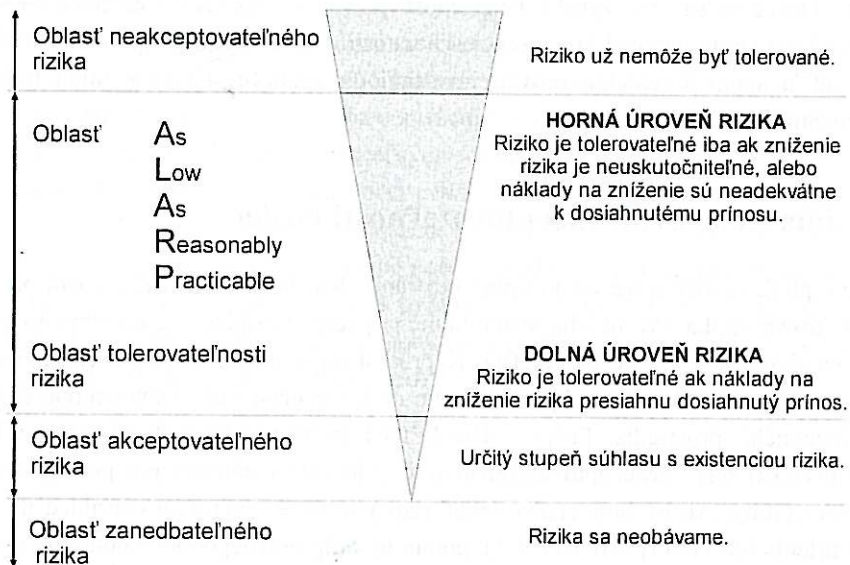
Kletz vo svojej práci (Kletz, 1999) zdôraznil, že bezpečnosť prináša ekonomický zisk a ako každá ekonomická činnosť má svoje priority a optimálne hodnoty. Ak sa dostatočne investuje do bezpečnosti od začiatku ekonomickej činnosti prevádzky, potom je pred haváriami chránená prevádzka a aj pracovníci, čo samozrejme prináša ekonomické výhody v podobe redukcie strát pri haváriách. Ak sú investície do bezpečnosti oproti predchádzajúcemu prípadu vyššie, prinesie to síce nárast zisku v dôsledku redukcie strát, avšak efektívnosť investície do bezpečnosti nemusí byť až taká vysoká, pretože zvýšené náklady sa nutne musia premietnuť do výslednej ceny produktu. Vysoké ceny výsledných produktov, ktoré by boli následkom prehnane vysokých investícií na zlepšenie bezpečnosti, môžu spôsobiť pokles predaja výrobkov. Dosiahne sa síce vysoká bezpečnosť prevádzky, avšak za cenu poklesu zisku z predaja vďaka strate cenovej konkurencieschopnosti. Práve z tohto dôvodu si každá firma musí zvážiť a stanoviť vhodnú úroveň investícií do bezpečnosti, čo je úlohou riadenia a manažmentu rizika.

1.2 Vnímanie úrovne akceptovateľnosti rizika

Všeobecne platí, že riziko nemožno úplne odstrániť. Každá konkrétna chemická prevádzka má určitú úroveň rizika. Pri návrhu technológie, prípadne prevádzky, je potrebné rozhodnúť, aká úroveň rizika je ešte akceptovateľná. Napríklad treba posúdiť otázku, či sú riziká pre zamestnancov vyplývajúce z výroby väčšie, ako riziká spojené s ich dennodennou činnosťou mimo pracovného prostredia. Práve voľba kritérií, pomocou ktorých sa stanoví hranica akceptovateľnosti resp. neakceptovateľnosti rizika, je veľmi dôležitá pre priamy dopad na ekonomiku výroby. Ak by bola snaha znížiť riziká spojené s výrobou napríklad na úroveň rizika usmrtenia bleskom (pozri Tab. 1.1), potom by bolo pravdepodobne potrebné vynaložiť nielen značné úsilie, ale aj vysoké finančné náklady na takto bezpečnú prevádzku. Opäť by

sme sa dostali do situácie, že náklady na bezpečnosť by mohli dosiahnuť úroveň, ktorá významne zhorší ekonomické ukazovatele výroby. V závislosti od zvolených kritérií môže byť pojem „akceptovateľnosť rizika“ vnímaný veľmi rozporuplne. Dôležité je však, aby ekonomické kritériá neboli preceňované a náklady na bezpečnosť redukované do takej miery, že by pri prevádzkovaní výroby reálne hrozila havária so smrteľnými následkami. V tejto súvislosti logicky vzniká otázka, kto má vôbec právo určovať, čo je akceptovateľné riziko pre zamestnancov alebo verejnosť žijúcu v blízkosti chemickej prevádzky. To bol dôvod prečo HSE (Health and Safety Executive) v Anglicku navrhla nahradiť pojem „akceptovateľné riziko“ pojmom „tolerovateľné riziko“. Tolerovateľné riziko predstavuje také riziko, ktorého existenciu na určitú dobu berieme na vedomie (hoci neochotne), keďže ďalšie opatrenia na zníženie rizika by boli veľmi ekonomicky nevýhodné. Na druhej strane, akceptovateľnosť sa vníma ako určitý stupeň súhlasu s existenciou rizika.

HSE v Anglicku navrhla namiesto jednej úrovne rizika používať dve úrovne, a to **horná úroveň rizika**, ktorá by sa nemala nikdy prekročiť a **dolná úroveň rizika**, pod ktorou sa nachádza oblasť akceptovateľného rizika, s ktorým sme ochotní súhlasiť (pozri Obr. 1.2). Všeobecne uznávaná oblasť akceptovateľného rizika sa pohybuje v intervale 10^{-6} až 10^{-7} (smrť/osoba/rok). Pod touto oblasťou sa nachádza oblasť zanedbateľného rizika. Pri takejto úrovni rizika už nie zmysluplné zvyšovať bezpečnosť za cenu dodatočných nákladov. Medzi hornou a dolnou úrovňou je oblasť označovaná **ALARP** (As low as reasonably practicable). V tejto oblasti sa projektanti alebo prevádzkovatelia ešte snažia riziko redukovať, ak je to reálne uskutočniteľné. Riziko v blízkosti hornej úrovne je tolerovateľné iba ak je jeho zníženie neuskutočniteľné, alebo náklady na jeho zníženie sú neadekvátne k miere zlepšenia bezpečnosti. Horná úroveň rizika, nad ktorou sa nachádza už iba oblasť neakceptovateľného rizika, nadobúda hodnotu 10^{-3} (smrť/osoba/rok) pre zamestnancov a 10^{-4} (smrť/osoba/rok) pre verejnosť.



Obr. 1.2. Rôzne úrovne rizika a oblasť ALARP

1.3 Seveso – poučenie z havárie

10. júla 1976 sa vzduch v okolí milánskeho predmestia v obci Seveso naplnil jedovatým oblakom z blízkej chemické továrne ICMESO. Jeden z reaktorov sa prehrial a do ovzdušia unikol toxický oblak obsahujúci jeden z najprudších jedov vôbec – TCDD (2,3,7,8 – tetrachlorodibenzodioxin). Oblak bol miernym vánkom zanesený smerom k zástavbe. Vtáci, ktorých zasiahol v lete, padali mŕtve k zemi. Dioxinový oblak dlhý šesť a široký jeden kilometer zasiahol husto zaľudnenú oblasť ležiacu po vetre od chemickej továrne. Najviac bola zasiahnutá obec Seveso, podľa ktorej začala byť táto udalosť známa ako katastrofa v Sevese (Lees, 1996).

Vedenie továrne prehlásilo haváriu za bežnú, odporučili obyvateľom, aby nekonzumovali zeleninu a ovocie zo svojich záhrad, ale o úniku jedovateho plynu sa nikto nezmenil. Evakuácia zasiahnutých ľudí v okruhu 4 km od továrne prebehla až o 14 dní neskôr, ale to už sa začali prejavovať prvé následky otravy u ľudí (napríklad choroba nazývaná chlorakné). Tisíce kusov dobytky a domácich zvierat muselo byť utratených. V okolitých nemocniciach bolo hospitalizovaných 600 obyvateľov. Celkové škody na ľudskom zdraví neboli v dôsledku povahy znečistenia doposiaľ úplne vyhodnotené. Katastrofa okrem zdravotných následkov mala aj obrovský sociálny dopad.

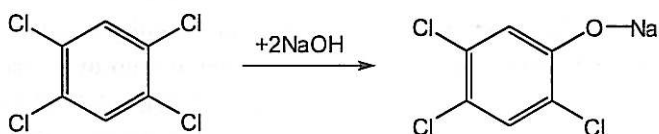
O negatívnom vplyve dioxínu na ľudské zdravie svedčí fakt, že bol používaný ako bojová látka. Otrava dioxínom prebieha nenápadne a veľmi rýchlo, nakoľko je neviditeľný, jedovatý už v mikroskopických dávkach a navyše prenosný kontaktom so zasiahnutými osobami alebo predmetmi, takže v zasiahnutých oblastiach bolo možné jeho účinok prirovnáť ku stredovekej morovej epidémii. Neistota a pocit, že bol človek tejto látke vystavený, stál za veľkým sociálnym, ekonomickým a osobným utrpením zasiahnutého obyvateľstva. Všetko, čo pochádzalo zo zasiahnutej oblasti, bolo v obave z kontaminácie okolitým svetom odmietané, čo miestnu komunitu vážne stigmatizovalo.

Prvotnú snahu všetko utuľtať a zľahčovať vystriedala heroická snaha o záchranu celej oblasti – obeť boli odškodnené, robotníci boli premiestnení, program dlhodobého zdravotného monitoringu funguje dodnes a samotné miesto katastrofy bolo premenené na park. Bohužiaľ do značnej miery bola zasiahnutá oblasť obnovená za cenu prenesenia problému na iné miesto. Ťažko kontaminovaná zemina bola uložená na neznámom mieste za hranicami Talianska, pričom celý proces bol sprevádzaný množstvom zmätkov a škandálov.

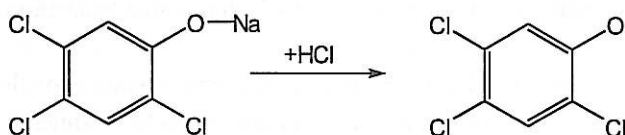
1.3.1 Príčiny havárie v Sevese

Dioxín TCDD (2,3,7,8 – tetrachlorodibenzodioxin) unikol cez roztrhnutú membránu poistného ventilu na vsádzkovom reaktore, v ktorom za normálnych výrobných podmienok prebiehala rutinná výroba 2,4,5-trichlórfenola (TCP), ktorý sa používa na výrobu herbicídu 2,4,5-T alebo antiseptík. TCP vzniká reakciou 1,2,4,5-tetrachlórbenzénu a hydroxidu sodného v prostredí etylénglykolu prebieha pri teplote 170 – 180 °C v dvoch nasledujúcich stupňoch:

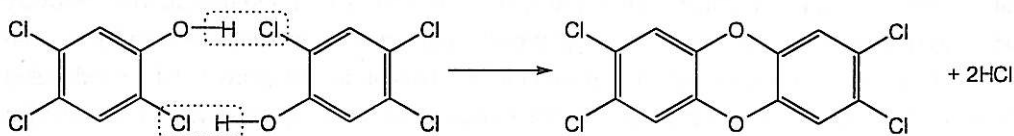
1. stupeň



2. stupeň



Dioxín TCDD, ktorý spôsobil seveskú katastrofu, vzniká pri normálnych prevádzkových podmienkach (teplota 170 – 180 °C) iba v zanedbateľnom množstve nepresahujúcom 1 ppm, avšak pri dlhšom zahrievaní reakčnej zmesi na teploty 230 – 260 °C môže vzrásť jeho produkcia až tisícnásobne. Ide o vzájomnú reakciu dvoch molekúl pôvodného produktu 2,4,5-trichlórfenolu (TCP) za vzniku TCDD a dvoch molekúl HCl:



Práve naštartovanie tejto silne exotermickej nežiaducej reakcie viedlo k nekontrolovateľnému nárastu teploty v reaktore (runaway efekt). Nárast teploty reakčnej zmesi nad teplotu varu prítomného rozpúšťadla (etylénglykolu) následne spôsobilo zvýšenie tlaku, ktoré viedlo k roztrhnutiu poistného ventilu na reaktore a úniku jeho obsahu. Vo vsádzke o hmotnosti 6000 kg sa už v tom čase nachádzalo relatívne veľké množstvo TCDD. Zaujímavé je, že sa doteraz presne nevie, aké celkové množstvo TCDD vzniklo, ale odhaduje sa, že to bolo viac ako jeden kilogram. Pritom si treba uvedomiť, že minimálna známa smrtiaca dávka TCDD je $3,1 \cdot 10^{-9}$ mol kg^{-1} , čo znamená, že vyprodukovaným množstvom TCDD by bolo možné teoreticky usmrtiť milióny ľudí.

Ako vlastne došlo k tejto vážnej priemyselnej havárii? V piatok večer 9. júla pracovná zmena dokončovala poslednú várku výroby TCP. V sobotu 10. júla nad ráno sa pracovníci ponáhľali ukončiť prácu a pripraviť reaktor na odstávku, keďže talianske zákony si vyžadovali odstávku výroby počas víkendy. Podľa prevádzkového predpisu mali pracovníci oddestilovať z reakčnej zmesi všetok etylénglykol. Analýza ukázala, že v skutočnosti oddestilovali iba 15 %. Pracovníci nemali informáciu, že ponechanie väčšieho množstva etylénglykolu vo vsádzke reaktora je nebezpečné. Po destilácii vyplí ohrev reaktora, ktorý bol realizovaný ohrevnou parou o teplote 300 °C. Vyšetrenie havárie ukázalo, že pracovníci sa domnievali, že pracujú s parou o teplote 190 °C, akú zvyčajne používali. Avšak v čase

odstavovania reaktora sa teplota privádzanej pary zvýšila na už spomínaných 300 °C, a to vďaka zmene zaťaženia parnej turbíny. Podľa posledného záznamu, teplota v reaktore dosahovala 158 °C. Obsluha následne vypla miešanie obsahu reaktora s predpokladom, že reaktor sa samovoľne ochladí. Pracovníci si vôbec neboli vedomí, že takéto urýchľovanie odstávky reaktora môže byť veľmi nebezpečné a zanechali reaktor v presvedčení, že v pondelok budú v procese výroby bezproblémovo pokračovať. Neskôr sa ukázalo, že sa hlboko mýlili. Keď pracovná zmena opustila pracovisko, vo vsádzkovom reaktore začali prebiehať nežiaduce chemické reakcie. Prívod ohrevnej pary bol síce vypnutý, ale para a jej kondenzát prítomné v plášti reaktora pomaly chladli, pričom ohrievali reakčnú zmes najmä v blízkosti steny reaktora, keďže miešanie reaktora bolo odstavené. Po dosiahnutí teploty v reaktore približne 180 °C začal reagovať pred odstávkou vyprodukovaný TCP sám so sebou za vzniku dioxínu TCDD, čo je výrazne exotermická reakcia. Pri teplote 180 °C je adiabatický nárast teploty 57 °C, avšak pri teplote 250 °C sa už rovná 114 °C. Z uvedeného je zrejmé, že naštartovaním tejto nežiaducej exotermickej reakcie sa obsah reaktora začal ešte rýchlejšie ohrievať a pri dosiahnutí teploty 230 °C došlo k nekontrolovateľnému a nezvratnému prehriatiu obsahu reaktora, tzv. runaway efekt. Za významnej tvorby dioxínu TCDD trval proces samozohrievania na teplotu 230 °C približne sedem hodín. Prudký nárast teploty spôsobil masívne odparovanie neoddestilovaného etylénglykolu, čo malo za následok nárast tlaku v reaktore. Zvýšený tlak roztrhol membránu na poistnom ventile a obsah reaktora unikol priamo do okolia. Vyšetrovanie nehody ukázalo, že poistný ventil nebol správne navrhnutý, pretože obsah reaktor mal byť usmerný do havarijného zásobníka s vývodom na fléru.

1.3.2 Priame a nepriame následky havárie v Sevese

Napriek tomu, že priamo počas spomínanej havárie nikto neumrel, záverečnú bilanciu následkov havárie môžeme považovať za alarmujúcu. Pokusy o kamuflovanie vzniku závažnej havárie a absolútne diletantský prístup kompetentných spôsobili neskorú informovanosť verejnosti a oneskorenie záchranných prác. V priebehu niekoľkých dní zomrelo 3300 zvierat z kontaminovaného územia, pričom ďalších približne 78 000 bolo preventívne usmrtených. Neskorá evakuácia obyvateľov spôsobila, že až 5000 ľudí muselo ostať pod medicínskym dozorom. Okamžitým prejavom vystavenia dioxínu TCDD bolo tzv. chlórové akné, ktoré sa prejavilo napríklad aj u 193 školákov. Ďalšie zdravotné problémy obyvateľstva súviseli s pečeňou, obličkami a nervovým systémom. V najbližších mesiacoch tehotné ženy z postihnutého územia potratili. V nasledujúcich rokoch po havárii sa objavujú dôkazy karcinogenity, mutagenity a teratogenity dioxínu TCDD. Dlhotrvalé následky vystavenia dioxínu TCDD sa nedali stlmiť, nakoľko ide o látku vo vode nerozpustnú a okrem vysokých teplôt aj odolnú proti rozkladu.

Z analýzy príčin a priamych následkov havárie v Sevese vyplynulo množstvo poznatkov, ktorých aplikácia na existujúce prevádzky, alebo už počas projektovania budúcich chemických výrob môže viesť k zníženiu rizika podobnej havárie. Zo záverov vyšetrovania havárie vyplynula nutnosť už v predstihu posudzovať napr.:

- možnosť vzniku vedľajších reakcií (najmä exotermických),
- možnosť vzniku extrémne nebezpečných látok (toxických, horľavých, výbušných),
- návrh chemického reaktora (konštrukcia, operačné podmienky, regulácia),
- dostatočnosť ochranných a zabezpečovacích mechanizmov,
- vhodnosť umiestnenia nebezpečných prevádzok,
- ohrozenie obyvateľstva (verejná kontrola ohrozenia),
- pripravenosť na haváriu (protiopatrenia okamžite po vzniku havárie),
- tréning, školenia a motivácia pracovníkov (dodržanie technologického reglementu).

Nielen havária v Sevese, ale aj analýzy iných doterajších priemyselných havárií ukázali, že práve na tréning, školenie a motiváciu pracovníkov by sa mal klásť veľký dôraz, pretože práve zlyhanie človeka (teda ľudský faktor) je príčinou 80 % havárií a iba 20 % príčin havárií vyplýva zo zlyhania samotnej techniky.

Politickou odpoveďou Európskej únie na haváriu v Sevese bola rovnako pomenovaná smernica (Seveso Directive 82/501/EEC nazývaná tiež „Seveso I“), ktorá bola zameraná na prevenciu a kontrolu premyslených havárií. Časom bola nahradená novšou Smernicou Seveso II 96/82/EC (nazývaná tiež „Seveso II“) a následne rozšírená Smernicou 2003/105/EC.

Aj Slovenská republika, ešte pred vstupom do Európskej únie, prijala zákon týkajúci sa prevencie závažných priemyselných (Zákon č. 261/2002 Z. z.), ktorý je v súlade so smernicou Seveso II. Od tej doby došlo k viacerým novelizáciám tohto zákona, avšak stále v súlade so smernicami Európskej únie. Smernica platí najmä pre firmy, v ktorých sú nebezpečné látky prítomné v množstvách prekračujúcich definované limity. Určuje niekoľko podmienok pre prevádzkovateľov tovární a verejné úrady. Prevádzkovatelia musia vypracovať plány manažmentu krízových situácií a predložiť krízový plán príslušným úradom. Úrady vypracujú návrh, ako sa bude postupovať v prípade katastrofy pre miestne obyvateľstvo. A taktiež vytvoria havarijný plán, ktorý berie do úvahy blízke okolie továrne.

Použitá literatúra

- [1] Zákon č. 261/2002 Z. z. o prevencii závažných priemyselných havárií a o zmene a doplnení niektorých zákonov
- [2] BOSCH, C.J.H., WETERINGS, R.A.P.M. 1997. *Methods for the calculation of physical effects: due to releases of Hazardous materials (liquids and gases): yellow book*, Directorate-General for Social Affairs and Employment, Committee for the Prevention of Disasters.
- [3] KLETZ, T.A. 2001. *Learning from accidents*, 3rd ed, Gulf Professional, Oxford; Boston xi, 345 p. pp.
- [4] KLETZ, T.A. 1999. *Hazop and hazan: identifying and assessing process industry hazards*, 4th ed, Taylor & Francis, Philadelphia, PA xi, 232 p. pp.
- [5] LEES, F.P. 1996. *Loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment, and control*, 2nd ed, Butterworth-Heinemann, Boston.

2 Kvalitatívne metódy identifikácia nebezpečenstva

Základom pre vyhodnotenie úrovne rizika vyplývajúceho z konkrétnej chemickej prevádzky (prípadne jedného zariadenia, alebo až z celého chemického podniku) je identifikácia možných nebezpečných situácií, ktoré by sa mohli na prevádzke (zariadení, podniku) vyskytnúť. Identifikácia nebezpečenstva je prvým predpokladom pre jeho úspešné vylúčenie. V prípade, že nebezpečenstvo nemožno úplne vylúčiť, identifikácia tohto nebezpečenstva má viesť k lepšiemu zvládnutiu nebezpečnej situácie tak, aby riziko vzniku závažnej havárie bolo minimálne. S rastúcou zložitosťou technológií sa však identifikácia nebezpečenstva stáva veľmi komplexným, časovo a finančne náročným problémom.

Jednotlivé metódy identifikácie nebezpečenstva sa navzájom líšia nielen postupom vyhodnocovania nebezpečenstva, ale aj množstvom informácií (až detailov), ktoré je nutné získať ešte pred aplikáciou zvolenej metódy. Samozrejme platí, že čím je metóda komplexnejšia, tým je náročnejšia na získavanie potrebných informácií, čo zo sebou prináša zvýšené finančné a časové nároky. Z týchto dôvodov sa často pristupuje k tomu, že nie všetky časti veľkého chemického podniku sa hodnotia jednou metódou, ale niektoré prevádzky bývajú podrobené detailnejšej analýze ako iné. Hĺbka štúdie neraz závisí od skúseností hodnotiteľa a primárneho odhadu potenciálneho nebezpečenstva.

Prvotné zameranie metód identifikácie nebezpečenstva je rozpoznanie udalostí, ktorých následkom vzniká nebezpečná situácia pre zamestnancov a/alebo obyvateľstvo, alebo finančné straty. Metódy identifikácie nebezpečenstva sekundárne umožňujú rozpoznať základné príčiny, ktoré vedú k nebezpečným situáciám, ako aj identifikovať situácie, ktoré môžu viesť k nielen bezpečnostným, ale aj technologickým problémom pri prevádzke a údržbe zariadení.

V rámci problematiky hodnotenia rizika chemických výrobných procesov bolo doteraz publikovaných viacero techník, metodík, nástrojov a postupov orientovaných na identifikáciu nebezpečenstva (pre hlbšie štúdium jednotlivých metodík odporúčame práce (Mannan et al., 2005) a (AIChE, 1992)). V nasledujúcich kapitolách sa budeme podrobnejšie zaoberať najpoužívanejšími metódami identifikácie nebezpečenstva, ktoré sa navzájom líšia nielen komplikovanosťou, ale aj cieľom, pre ktorý sa pri identifikácii nebezpečenstva využívajú. Relatívne jednoduché a z časového hľadiska nenárodné skriningové metódy (napríklad indexová metóda Dow (AIChE, 2005) a selekčná metóda (AIChE, 2000)) sa často využívajú v prípadoch, ak je potrebné za časovo obmedzené obdobie zmapovať, aký nebezpečný potenciál majú jednotlivé zariadenia v rámci prevádzky (resp. prevádzky v rámci podniku). Ich hlavnou výhodou je, že si vyžadujú relatívne malé množstvo vstupných údajov o hodnotených zariadeniach, čo umožňuje ich rýchlu aplikáciu aj na väčšie technologické celky, prípadne na celý podnik. Často bývajú použité v počiatočných štádiách hodnotenia nebezpečenstva s cieľom navzájom porovnať nebezpečný potenciál jednotlivých zariadení (prevádzok), zostaviť „rebríček nebezpečnosti“ a vybrať zariadenia (prevádzky), ktoré je nutné podrobiť analýzám podrobnejšími metódami, alebo naopak, vyselektovať zariadenia (prevádzky), ktoré nemajú

potenciál spôsobiť nebezpečnú situáciu a teda nie je nutná ďalšia komplexnejšia bezpečnostná analýza.

Medzi ďalšie metódy identifikácie nebezpečenstva, ktoré sú najčastejšie používané a odporúčané pre projektovú prípravu ale aj už existujúce zariadenia (prevádzky) patria napríklad Metóda kontrolného zoznamu (Check lists), Metóda Čo ak? (What if?), Metóda HAZOP (Hazard and Operability Study). Ide o komplexnejšie metódy identifikácie nebezpečenstva, ktoré v porovnaní so skriningovou, resp. selekčnou metódou, vyžadujú nielen väčší objem vstupných informácií o hodnotenom zariadení (prevádzke), ale napríklad v prípade HAZOPu aj zostavenie multidisciplinárneho pracovného tímu, čím sa stávajú časovo a finančne omnoho náročnejšie.

2.1 Indexová metóda Dow

Indexová metóda Dow (AIChE, 2005) patrí medzi štandardné skriningové metódy. Je vhodná na jednoduché a rýchle určenie relatívnej miery nebezpečenstva operačnej jednotky (zariadenia) vyjadrenej dvomi číslami tzv. indexmi. Prvý index, tzv. požiarno-výbušný index (*PVI*), vyjadruje veľkosť nebezpečenstva spojeného s fyzikálno-chemickými vlastnosťami látky (napr. horľavosť, sklon k vzplanutiu, výbušnosť, termická stálosť, reaktivita, spalné teplo) a s technickým riešením systému (tlak a teplota, využitie otvoreného ohňa). Druhý index, nazývaný index toxicity (*IT*), vyjadruje veľkosť biologického nebezpečenstva vyplývajúceho s toxických vlastností látok v hodnotenej operačnej jednotke.

Prvým krokom metódy je rozdelenie skúmanej prevádzky na jednotky, ktoré sa budú posudzovať samostatne, tzn. pre každú jednotku sa určí samostatný požiarno-výbušný index (*PVI*) aj index toxicity (*IT*). Pod pojmom jednotka budeme rozumieť, zariadenie v ktorom prebiehajú jednotkové operácie fyzikálnej povahy (výmenníky tepla, separačné zariadenia, zásobníky, pomocné zariadenia) alebo chemické reakcie (chemický reaktor). V rámci prevádzky (podniku) sa nachádza väčší počet jednotiek, avšak nie je nutné posudzovať každú jednotku. Zvyčajne sa posudzujú len tie jednotky, ktoré môžu mať významný vplyv na celkovú bezpečnosť prevádzky (podniku), avšak výber posudzovaných jednotiek silne závisí od prvotného odhadu hodnotiteľa. Neexistuje univerzálne pravidlo na výber posudzovaných jednotiek. Avšak medzi dôležité faktory, ktoré by mali výber ovplyvňovať patrí napríklad:

- prítomnosť chemickej reakcie,
- množstvo nebezpečného materiálu v jednotke a jeho vlastností (požiarno-výbušné a toxické vlastností, teplota varu a vzplanutia),
- celkový energetický potenciál jednotky (vysoké spalné teplo materiálu),
- prevádzkové podmienky jednotky (vysoká, resp. nízka teplota a/alebo tlak),
- problémy, ktoré vznikli na jednotke v minulosti (malé úniky materiálu, vážne havárie),
- problematické resp. komplikované riadenie jednotky.

Na tomto mieste je nutné zdôrazniť, že prítomnosť chemickej reakcie prináša so sebou vždy určitú mieru rizika, a preto chemické reaktory musia byť posudzované vždy. Vzhľadom na to,

že každé horenie paliva pri výrobe tepla je silne exotermická reakcia, treba vždy posudzovať aj spaľovacie zariadenia.

Prax ukazuje, že pre posúdenie bezpečnosti celej prevádzky zvyčajne stačí v rámci nej vyhodnotiť pre 3 – 4 jednotky, avšak v prípade veľmi veľkej alebo komplikovanej prevádzky sa samozrejme môže hodnotiť omnoho viac jednotiek.

Pred samotným hodnotením jednotky je nutné získať potrebné informácie ako napríklad:

- prevádzkové a technické informácie o zariadení (teplota, tlak, použitie otvoreného ohňa, prítomnosť rotujúcich častí v zariadení, spôsob výmeny tepla, operačné a prevádzkové problémy),
- fyzikálno-chemické vlastnosti a informácie o nebezpečných vlastnostiach materiálov (spalné teplo, reaktivita, tepelné zafarbenie reakcií, horľavosť, toxicita, najvyššie prípustné expozičné limity, výbušnosť, prašnosť, veľkosť častíc, nekompatibilita materiálov, korozívnosť, tvorba usadenín),
- informácie o stavebných ochranných opatreniach (uzatvorenie zariadenia, prístupové cesty, kanalizácia, záchytné vane, prístup k hydrantom, protipožiarne steny).

2.1.1 Výpočet požiarno-výbušného indexu (PVI)

Výpočtu PVI pre danú jednotku predchádza výpočet materiálového faktora (MF) a určenie dvoch pokutových faktorov: všeobecný procesný faktor (F_1) a špeciálny procesný faktor (F_2). Súčin všeobecného procesného faktora a špeciálneho procesného faktora ($F_1 \times F_2$) sa nazýva faktor nebezpečnosti jednotky (FNJ).

Zo známych hodnôt materiálového faktora (MF) a všeobecného procesného faktora (F_1) a špeciálneho procesného faktora (F_2) určíme požiarno-výbušný index (PVI) ich vzájomným vynásobením:

$$PVI = MF F_1 F_2 \quad (2.1)$$

Na základe vypočítanej hodnoty PVI sa jednotke priradí stupeň nebezpečnosti požiaru a výbuchu podľa tabuľky (Tab. 2.1).

Tabuľka 2.1. Priradenie stupňa nebezpečnosti požiaru a výbuchu podľa hodnoty PVI

	Stupeň nebezpečnosti požiaru a výbuchu	PVI
1	nízky	0 – 30
2	ľahký	30 – 60
3	stredný	60 – 95
4	vysoký	95 – 125
5	veľmi vysoký	125 – 155
6	extrémne vysoký	nad 155

V nasledujúcich kapitolách bude postupne vysvetlený mechanizmus výpočtu materiálového faktora a určenia pokutových faktorov F_1 a F_2 .

2.1.1.1 Materiálový faktor (MF)

Materiálový faktor je miera energetického potenciálu uvoľneného pri horení alebo explózii materiálov prítomných v jednotke bez ohľadu na to, či ide o surovinu, medziprodukt, produkt alebo rozpúšťadlo. MF sa vo všeobecnosti vypočíta použitím spalného tepla látky pri teplote 298 K podľa vzťahu:

$$MF = \frac{\Delta H_c(298\text{ K})}{2324} \quad (2.2)$$

kde $\Delta H_c(298\text{ K})$ je spalné teplo v jednotkách $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ tabelované pri teplote 298 K, konštanta 2324 je konverzný koeficient na prevod materiálového faktora do jednotiek Btu lb^{-1} , ktorý zároveň zabezpečí, že hodnota materiálového faktora sa bude pohybovať v intervale 1 – 40.

Ak sa v jednotke nachádza zmes látok, použijeme zmesnú hodnotu spalného tepla. V prípade, že spalné teplo zmesi nepoznáme, použijeme spalné teplo tej látky, ktorá má jeho hodnotu najvyššiu, čím zabezpečíme, že nebezpečenstvo nebude v žiadnom prípade podhodnotené (skôr mierne nadhodnotené). Výnimku tvorí situácia, keď sa látka s najvyšším spalným teplom vyskytuje v minimálnych množstvách (pod 5 %).

V prípade, že údaj o spalnom teple (spalných teplách) nemáme k dispozícii, MF možno určiť pomocou údajov z diamantu nebezpečenstva (NFPA diamant) pre danú látku (pozri prílohu 1). Na určenie materiálového faktora pre kvapaliny a plynné látky stačí poznať koeficient horľavosti K_H a koeficient reaktivity K_R a z Tab. 2.2 možno jednoducho odčítať hodnotu MF. V prípade výbušných prachov a aerosólov je potrebné poznať koeficient S_I , ktorý závisí od maximálnej rýchlosti nárastu tlaku pri výbuchu (pozri Tab. 2.3). Práve maximálna rýchlosť vzrastu tlaku sa používa ako kritérium charakterizujúce výbušný prach a nie medze výbušnosti prachu. Medze výbušnosti prachu nie sú objektívna veličina, pretože veľmi závisia od zrnitosti, teploty a iných fyzikálnochemických vlastností prachu a v závislosti od podmienok sa pre danú látku môžu meniť aj v rozsahu niekoľko rádo.

Tabuľka 2.2. Určenie materiálového faktora zo známych hodnôt koeficientov horľavosti a reaktivity

	$K_R = 0$	$K_R = 1$	$K_R = 2$	$K_R = 3$	$K_R = 4$
Kvapaliny a plyny					
$K_H = 0$	1	14	24	29	40
$K_H = 1$	4	14	24	29	40
$K_H = 2$	10	14	24	29	40
$K_H = 3$	16	16	24	29	40
$K_H = 4$	21	21	24	29	40
Tuhe materiály					
$K_H = 1 (S_I = 1)$	4	14	24	29	40
$K_H = 2 (S_I = 2)$	10	14	24	29	40
$K_H = 3 (S_I = 3)$	16	16	24	29	40
Horľavé prachy a aerosóly					
$S_I = 1$	16	16	24	29	40
$S_I = 2$	21	21	24	29	40
$S_I = 3$	24	24	24	29	40

Tabuľka 2.3. Určenie stupňa horľavosti (S_i) pre prachové materiály

S_i	Maximálna rýchlosť vzrastu tlaku ($\text{kPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	menej ako 20 000
2	20 000 až 30 000
3	viac ako 30 000

Ako z uvedeného vyplýva, materiálový faktor možno určiť dvoma, na sebe absolútne nezávislými spôsobmi. Pokiaľ výpočet MF pomocou spalného tepla vôbec nezohľadňuje, či je alebo nie je daná látka reaktívna, pri určení MF pomocou koeficientov z diamantu nebezpečenstva má práve koeficient reaktivity významnú úlohu. Môžeme si všimnúť, že v prípadoch koeficientu reaktivity 2 a viac, hodnota MF už vôbec nezávisí od koeficientu horľavosti (napr. pre všetky látky s $K_R = 2$ je $MF = 24$ bez ohľadu na K_H). Napriek tomu rozdiely v MF určené rôznymi spôsobmi pre jednu látku nebývajú veľké. Ako príklad si môžeme uviesť benzén, ktorého spalné teplo je $40\,147,6 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, a teda použitím rovnice (2.2) dostávame MF , ktorý sa rovná 17,3 ($MF = 17,3$). Z diamantu nebezpečenstva môžeme získať informácie o hodnotách koeficientu toxicity $K_T = 2$, horľavosti $K_H = 3$ a reaktivity $K_R = 0$. Na základe koeficientov horľavosti a reaktivity môžeme z Tab. 2.2 odčítať, že MF sa rovná 16 ($MF = 16$) čo je veľmi blízke hodnote materiálového faktora určeného zo spalného tepla ($MF = 17,3$). Ďalším faktom je, že pri výpočte MF pomocou spalného tepla dostávame rozdielne hodnoty MF aj pre látky, ktoré majú koeficient reaktivity a koeficient horľavosti rovnaký, a teda by pri určení MF pomocou diamantu nebezpečenstva vyšli s rovnakým materiálovým faktorom (Tab. 2.4).

Tabuľka 2.4. Ukážka rozdielov v hodnotách MF počítaného rozdielnym spôsobom

Názov látky	ΔH_C [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]	$MF(\Delta H_C)$	K_H	K_R	K_T	$MF(K_H, K_R)$
Acetón	31064,0	13,36	3	0	1	16
Etanol	29672,2	12,76	3	0	0	16
Metanol	22693,5	9,76	3	0	1	16

2.1.1.2 Pokutové faktory – všeobecný procesný faktor F_1

Všeobecný procesný faktor (F_1) sa určuje na základe vyhodnotenia šiestich všeobecných charakteristík procesu **F1.1** – **F1.6**. Výsledná hodnota všeobecného procesného faktora (F_1) sa vypočíta tak, že k základu 1 sa pripočíta suma pokút, ktoré prislúchajú charakteristikám **F1.1** – **F1.6**. vymenovaným v Tab. 2.5. :

$$F_1 = 1 + F_{1.1} + F_{1.2} + \dots + F_{1.6} \quad (2.3)$$

V Tab. 2.5. je zároveň uvedené, v akom rozsahu sa pokuta pre každú charakteristiku **F1.1** – **F1.6**. môže pohybovať, avšak ak sa niektorá charakteristika pre hodnotenú jednotku nehodí (teda sa nehodnotí), pre danú charakteristiku pridelíme pokutu, ktorá sa rovná nule. Napríklad, ak v zariadení neprebíha endotermická reakcia, pokuta pre **F1.2** sa bude rovnáť nule.

Tabuľka 2.5. Všeobecné charakteristiky procesu

F1	Charakteristika procesu	Rozsah pokút
F1.1	Exotermické chemické reakcie	0,30 – 1,25
F1.2	Endotermický proces	0,20 – 0,40
F1.3	Manipulácia s materiálom a jeho transport	0,25 – 1,10
F1.4	Proces v uzavretom priestore	0,25 – 0,90
F1.5	Prístup	0,35
F1.6	Ochranné zariadenia a kanalizácia pre prípad úniku kvapalín	0,25 – 0,50

Ak sa charakteristika pre danú jednotku hodnotí, presná hodnota pokutového príspevku sa volí na základe podrobnejšej informácie o hodnotenom procese. V tabuľkách **F1.1** až **F1.6** sú stručne uvedené základné pokutové príspevky. Je len samozrejmé, že tabuľky neobsahujú všetky možnosti, s ktorými sa pri chemických výrobách môžeme stretnúť, avšak podľa nášho názoru sú dostatočne ilustratívne na to, aby naznačili hodnotiteľovi, akú pokutu zvoliť pre konkrétny prípad.

Pri určovaní pokuty pre danú charakteristiku platia tieto zásady:

- pre každú charakteristiku procesu **F1.1** až **F1.6** sa volí len jedna hodnota pokuty, to znamená, že z prislúchajúcej tabuľky (napr. z Tab. F1.1) sa vždy zvolí len jedna hodnota pokuty, a to tá najvyššia. Nikdy sa nesčítavajú dve prípadne viaceré hodnoty pokút z jednej tabuľky!
- v prípade, že nie je dostatok informácií pre konkrétnu charakteristiku hodnotenej jednotky a nebezpečenstvo z danej charakteristiky sa nedá vylúčiť, prikloni sa k najhoršej pokute pre danú charakteristiku. Napríklad v prípade charakteristiky procesu **F1.6 – Ochranné zariadenia a kanalizácia pre prípad úniku kvapalín**, pokiaľ prevádzkovateľ neposkytne žiadne informácie ochranných zariadeniach, automaticky sa pre túto charakteristiku použije najvyššia hodnota pokuty 0,5.

2.1.1.2.1 Tabuľky charakteristík procesu pre všeobecný procesný faktor F_1

Tabuľka F1.1. Exotermická chemická reakcia (týka sa reakcií v chemickom reaktore)

Charakteristika	Pokuta
Mierne exotermická reakcia, ako napr. hydrogenácie, hydrolyzy, izomerizácie, sulfonácie, neutralizácie.	0,3
Stredne exotermická reakcia, napr. alkylácie, esterifikácie, oxidácie, polymerizácie, kondenzácie, adičné reakcie.	0,5
Ak sa pracuje s kyselinami, ktoré sú silne korozívne.	1,0
Oxidácie, pri ktorých prebieha spaľovanie alebo oxidácia s použitím silných oxidovadiel.	1,0
Silne exotermické reakcie, ťažko riaditeľné ako napr. halogenizácie.	1,0
Veľmi silne exotermické, ako napr. nitrácie, fluorácie.	1,25

Pozn.: Pri podrobnejšom posudzovaní chemických reaktorov okrem iného hrá významnú úlohu konštrukčné riešenie reaktora a materiál, prítomnosť viacerých fáz, operačné podmienky, parametrická citlivosť, ustálený alebo neustálený stav, odvod tepla z reaktora.

Tabuľka F1.2. Endotermický proces (týka sa reakcií v chemickom reaktore)

Charakteristika	Pokuta
Jednoduchý endotermický proces.	0,2
Endotermický proces, v ktorom sa energia dodáva spaľovaním paliva priamo v reaktore, napr. pyrolýza.	0,4

Pozn.: Pri endotermických reakciách v princípe nehrozí nebezpečenstvo priamo z priebehu reakcie, ale z jej realizácie, najmä z toho, akým spôsobom sa do reaktora dodáva teplo potrebné na priebeh reakcie. Ako príklad na vysvetlenie tejto pokuty možno uviesť pyrolýzu uhlíkovodíkov, čo je silne endotermická reakcia, pri ktorej sa teplo spotrebované reakciou dodáva buď vonkajším ohrevom pyrolýznych rúrok spalinami, alebo pridávaním kyslíka/vzduchu do reakčnej zmesi tak, aby časť reaktantov zhorela a uvoľnené spalné teplo sa spotrebuje na priebeh pyrolýznych reakcií. Je zrejmé, že prvý spôsob je z hľadiska bezpečnosti ľahšie zvládnuteľný, druhý spôsob je náročnejší na riadenie, reguláciu atď., ale na druhej strane je oveľa ekonomickejší a efektívnejší.

Tabuľka F1.3. Manipulácia s materiálom a jeho transport

Charakteristika	Pokuta
Pokuta sa pridáva pre procesy, v ktorých hrozí nebezpečenstvo požiaru/výbuchu pri manipulácii alebo transporte materiálov. Udeľuje sa aj v prípade, ak je zariadenie inertizované.	
Procesy plnenia resp. vyprázdňovania jednotky horľavinami prvej triedy alebo skvapalnenými uhlíkovodíkmi, pri ktorých sa musí pripojiť resp. odpojiť transportné potrubie.	0,5
Procesy, pri ktorých prítomnosť vzduchu počas pridávania surovín do zariadenia môže spôsobiť vytvorenie výbušnej zmesi alebo nebezpečenstvo nežiaducich reakcií.	0,5
Zásobníky horľavých látok: a) horľavé kvapaliny alebo plyny s $K_H > 2$ b) horľavé tuhé látky, $K_H = 3$ c) horľavé tuhé látky, $K_H = 2$ d) horľavé kvapaliny alebo plyny s $K_H \leq 2$	0,85 0,65 0,4 0,2
Ak sú zásobníky horľavých látok (a–d) bez zabudovaného vnútorného sprchovacieho/skrápacieho zariadenia, pripočíta sa k pokute ešte hodnota +0,2.	

Pozn.: K_H je koeficient horľavosti (pozri prílohu 1)

Tabuľka F1.4. Ohradená alebo uzatvorená jednotka

Charakteristika	Pokuta
Pokuta sa používa iba pre uzatvorené jednotky obsahujúce horľavé kvapaliny resp. skvapalnenými plynmi. Za uzatvorené jednotky považujeme tie, ktoré sú umiestnené v priestore so strechou a s tromi alebo viac stenami, alebo bez strechy so stenami na všetkých stranách.	
Prachový filter alebo zberač v uzavretom priestore.	0,5
Proces, v ktorom sa manipuluje s horľavými kvapalinami pri teplote nad bodom vzplanutia pri množstvách nepresahujúcich 4,5 t .	0,3
Proces, v ktorom sa manipuluje s horľavými kvapalinami pri teplote nad bodom vzplanutia pri množstvách presahujúcich 4,5 t .	0,45

Proces, v ktorom sa manipuluje s horľavými kvapalinami alebo skvapalnenými plynmi pri teplotách nad bodom varu v uzavretom priestore pri množstvách nepresahujúcich 4,5 t.	0,6
Proces, v ktorom sa manipuluje s horľavými kvapalinami alebo skvapalnenými plynmi pri teplotách nad bodom varu v uzavretom priestore pri množstvách presahujúcich 4,5 t.	0,9
Ak je v priestore odborne nainštalovaná a dimenzovaná ventilácia, uvedené pokuty sa môžu redukovať o 50 %.	

Tabuľka F1.5. Prístup k jednotke

Charakteristika	Pokuta
Jednotka alebo sklad s nedostatočným prístupom pre zásahové jednotky.	0,35

Pozn.: Za dostatočný prístup sa považuje buď prístup z minimálne dvoch rôznych smerov, alebo prístup iba jednou prístupovou cestou, ale okrem nej musí byť prítomný ľahko dostupný funkčný hydrant. V uzavretom priestore treba túto pokutu zväziť obzvlášť pozorne.

Tabuľka F1.6. Ochranné zariadenia a kanalizácia pre prípad úniku kvapalín

Charakteristika	Pokuta
Pokuta sa pridáva pre jednotky, ktoré pracujú pri teplote vyššej, ako je teplota vzplanutia materiálu, ktorý je v nich umiestnený a pre všetky jednotky, v ktorých sú horľavé materiály s bodom vzplanutia nižším ako 60 °C.	
Rovná plocha okolo jednotky, ktorá umožňuje rozliatie a šírenie uniknutej kvapaliny, čo v prípade požiaru ohrozí veľkú plochu prevádzky.	0,5
Také ochranné zariadenia (hrádza, priekopa, nádrž, nekrytá stoka), ktoré sú sice navrhnuté, aby zabránili rozliatie kvapaliny na väčšiu plochu, ale v prípade požiaru nebránia vplyvu ohňa na jednotku, z ktorej materiál uniká resp. iné jednotky/zariadenia v blízkosti.	0,5
Ochranné zariadenia, ktoré priamo ohrozujú obslužné potrubia alebo nespĺňajú vzdialenostné limity.	0,5

Pozn.: Pokutované nebudú ochranné zariadenia, ktoré v prípade úniku materiálu dovoľujú jeho odtok jedným smerom (do zvyšných troch strán je bariérami zabránené rozlievanie materiálu) do napr. záchytnej nádrže, pričom sklon plochy odvádzajúcej materiál je min. 2 % a vzdialenosť jednotky od okraja záchytnej nádrže je min. 15 metrov.

2.1.1.3 Pokutové faktory – špeciálny procesný faktor F_2

Špeciálny procesný faktor (F_2) sa určuje na základe vyhodnotenia jedenástich špeciálnych charakteristík procesu **F2.1 – F2.11**. Výsledná hodnota špeciálneho procesného faktora (F_2) sa (rovnako ako v prípade všeobecného procesného faktora (F_1)) vypočíta tak, že k základu 1 sa pripočíta suma pokút, ktoré prislúchajú charakteristikám **F2.1 – F2.11**. vymenovaným v Tab. 2.6:

$$F_2 = 1 + F_{2.1} + F_{2.2} + \dots + F_{2.11} \quad (2.4)$$

Tabuľka 2.6. Prehľad špeciálnych charakteristík procesu

F2	Charakteristika procesu	Rozsah pokút
F2.1	Nízkotlakové procesy	0,5
F2.2	Operácie v blízkosti medzi horľavosti	0,3 – 0,8
F2.3	Operácie s výbušným prachom	0,2 – 2,0
F2.4	Zvýšený tlak	funkcia tlaku
F2.5	Nízke teploty	0,2 – 0,3
F2.6	Množstvo horľavého materiálu	funkcia množstva
F2.7	Korózia a erózia	0,1 – 0,75
F2.8	Úniky, priesaky	0,1 – 1,15
F2.9	Použitie plameňa	funkcia vzdialenosti
F2.10	Výmena tepla pomocou olejov	0,15 – 1,15
F2.11	Zariadenia s rotujúcimi časťami	0,5

Pri určovaní jednotlivých pokút platia rovnaké zásady ako v prípade charakteristík **F1.1 – F1.6.**, avšak pri špeciálnych charakteristikách procesu sa stretne nielen s možnosťou jednoduchého výberu výšky pokuty z príslušnej tabuľky, ale v niektorých prípadoch (napr. **F2.4, F2.6, F2.9**) bude nutné pokutu, alebo časť z nej vypočítať z príslušného vzťahu.

2.1.1.3.1 Tabuľky charakteristík procesu a výpočtové vzťahy pre určenie špeciálneho procesného faktora F_2

Tabuľka F2.1. Nízkotlakové procesy

Charakteristika	Pokuta
Pre operácie pri celkovom tlaku $P < 66$ kPa, pri ktorých hrozí pri vniknutí vzduchu do jednotky vznik kritickej situácie.	0,5

Pozn. Ak je aplikovaná táto pokuta, pokuty **F2.2** a **F2.4** sa už neudelujú. Najbežnejšie operácie, ktoré prichádzajú do úvahy, sú väčšina stripovacích procesov, vákuové destilácie a niektoré kompresorové jednotky.

Tabuľka F2.2. Operácie v blízkosti medzi horľavosti

Charakteristika	Pokuta
Pokuta sa pridáva pre procesy, pri ktorých sa pracuje s horľavými kvapalinami resp. plynmi a prítomnosť vzduchu v jednotke môže vytvoriť horľavé zmesi.	
Zásobník horľavej kvapaliny s $K_H = 3$ alebo 4, do ktorého môže vniknúť vzduch pri zlyhaní (vypnutí) čerpadla alebo pri náhlom ochladení zásobníka.	0,5
Zásobník horľavej kvapaliny uskladňujúci kvapalinu pri teplote blízkej alebo vyššej ako je teplota vzplanutia materiálu. (Pokuta sa neudelí ak je zásobník pod inertnou atmosférou a je zabezpečený proti vniknutiu vzduchu (pozri nižšie)).	0,5
Zariadenie alebo proces, v ktorých môže vzniknúť zmes v medziach horľavosti len v prípade vážneho zlyhania zariadenia časti zariadenia alebo prístrojov (napr. porucha inertizácie).	0,3
Prepravné člny príp. cisternové autá.	0,3
Proces alebo operácie, ktoré sú svojou podstatou vždy v/alebo blízko oblasti vzplanutia a použitie inertnej atmosféry nie je prakticky možné.	0,8

Tabuľka F2.3. - Operácie s výbušným prachom

Charakteristika	Pokuta
Pokuta sa pridáva pre jednotky, v ktorých dochádza k manipulácii s práškami / prachom (transport, miešanie, rozomietanie, balenie a pod.). Pokuty musia byť započítané, aj keď je dokázané testami, že nebezpečenstvo výbuchu prachu neexistuje! V prípade, že sa manipuluje s prachom v inertnej atmosfére, vyššie uvedené pokuty sa môžu vydeliť dvoma.	
Veľkosť častíc (μm):	
a) väčšia ako 175	0,25
b) 150 – 175	0,50
c) 100 – 150	0,75
d) 75 – 100	1,25
e) menšie ako 75	2,00

Tabuľka F2.4. Zvýšený tlak

Charakteristika	Pokuta
Pokuta sa pridáva sa pre procesy realizované pri tlaku vyššom ako je atmosférický.	
Pretlak 0 – 7,0 MPa, veľmi viskózne materiály	$0,7 \times X$ (rov. (2.5))
Pretlak 0 – 7,0 MPa, stlačené plyny samotné alebo horľavé kvapaliny stlačené s ľubovoľným plynom	$1,2 \times X$ (rov. (2.5))
Pretlak 0 – 7,0 MPa, skvapalnené horľavé plyny	$1,3 \times X$ (rov. (2.5))
Pretlak 7,0 MPa	0,86
Pretlak 10,0 MPa	0,92
Pretlak 13,5 MPa	0,95
Pretlak 17,0 MPa	0,98
Pretlak 20,0 – 70,0 MPa	1,00
Pretlak > 70,0 MPa	1,50

Pozn.: Koeficient X sa vypočíta zo vzťahu (2.5), pričom za P sa dosádza hodnota pretlaku v jednotkách pascal (Pa)!

$$X = 0,16109 + 2,34242 \cdot 10^{-7} P - 3,0565 \cdot 10^{-14} P^2 + 1,57803 \cdot 10^{-21} P^3 \quad (2.5)$$

Tabuľka F2.5. Nízke teploty

Charakteristika	Pokuta
Zariadenie z uhlíkovej ocele pracujúce pri teplote blízkej a nižšej, ako je teplota fázovej premeny materiálu	0,30
Zariadenie z iného materiálu ako uhlíková ocel pracujúce pri teplote blízkej alebo nižšej, ako je teplota fázovej premeny	0,2

Pozn.: Pri práci pri veľmi nízkych teplotách, môže dochádzať k významnej zmene mechanických vlastností konštrukčných materiálov (rôzne druhy ocelí, plasty, sklo atď.) Ak nie je k dispozícii dostatok údajov, pokuta sa udeľuje pre jednotky, ktoré pracujú pri teplote nižšej ako 10°C .

Tabuľka F2.6. Množstvo horľavého a nestabilného materiálu

Charakteristika	Pokuta
Procesy, v ktorých sa pracuje s horľavými plynmi, so skvapalnenými horľavými plynmi, s reaktívnymi materiálmi, s kvapalinami pri teplote nad bodom splanutia, resp. s kvapalinami, ktoré majú bod vzplanutia pod 60 °C, <ul style="list-style-type: none"> • materiál s $K_R < 2$ • materiál s $K_R \geq 2$ 	X_1 (rov.(2.7)) X_2 (rov.(2.8))
Zásobníky, v ktorých sa skladujú kvapaliny a plyny <ul style="list-style-type: none"> • skvapalnené plyny • horľaviny 1. triedy • horľaviny 2. triedy 	Y_1 (rov.(2.9)) Y_2 (rov.(2.10)) Y_3 (rov.(2.11))
Procesy, v ktorých sa pracuje s práškami, alebo s horľavými tuhými látkami <ul style="list-style-type: none"> • materiál s $K_R < 2$ a sypná hustotou pod 160,2 kg.m⁻³ • materiál s $K_R < 2$ a sypná hustotou nad 160,2 kg.m⁻³ • materiál s $K_R \geq 2$ 	Z_1 (rov.(2.12)) Z_2 (rov.(2.13)) Z_3 (rov.(2.14))

Pozn.: Pridelované pokuty pre kvapalné a plynné látky sú závislé od množstva uvoľneného tepla Q , ktoré sa počíta z hmotnosti horľavého alebo nestabilného materiálu m (kg) a spalného tepla ΔH_c (GJ.kg⁻¹) podľa vzťahu (2.6). Pre nestabilné materiály sa v uvedenom vzťahu (2.6) môže namiesto spalného tepla použiť hodnota rozkladného tepla, ak je táto hodnota vyššia ako hodnota spalného tepla. Pokuty pre prášky a horľavé tuhé látky závisia iba od hmotnosti materiálu v jednotke m (kg).

$$Q = \Delta H_c \cdot m \quad (2.6)$$

$$\log X_1 = -11,9314 + 10,8528 \log Q - 3,6233 (\log Q)^2 + 0,5397 (\log Q)^3 - 0,02998 (\log Q)^4 \quad (2.7)$$

$$\log X_2 = -11,9314 + 10,8528 \log(6 \times Q) - 3,6233 (\log(6 \times Q))^2 + 0,5397 (\log(6 \times Q))^3 - 0,02998 (\log(6 \times Q))^4 \quad (2.8)$$

$$\log Y_1 = -1,88318 + 0,41201 \log Q + 0,09448 (\log Q)^2 - 0,01864 (\log Q)^3 \quad (2.9)$$

$$\log Y_2 = -1,54723 + 0,23761 \log Q + 0,09307 (\log Q)^2 - 0,01538 (\log Q)^3 \quad (2.10)$$

$$\log Y_3 = -1,88336 + 0,41488 \log Q + 0,04025 (\log Q)^2 - 0,01076 (\log Q)^3 \quad (2.11)$$

$$\log Z_1 = 0,40925 + 0,29371 \log(m/10^6) - 0,21471 (\log(m/10^6))^2 + 0,06622 (\log(m/10^6))^3 \quad (2.12)$$

$$\log Z_2 = -0,2161 + 0,37114 \log(m/10^6) - 0,11758 (\log(m/10^6))^2 + 0,02276 (\log(m/10^6))^3 \quad (2.13)$$

$$\log Z_3 = 0,40925 + 0,29371 \log(m \times 6 \cdot 10^6) - 0,21471 (\log(m \times 6 \cdot 10^6))^2 + 0,06622 (\log(m \times 6 \cdot 10^6))^3 \quad (2.14)$$

Tabuľka F2.7. Korózia a erózia

Charakteristika	Pokuta
Pokuta sa udeľuje nielen pre jednotky, v ktorých dochádza ku korózii kovových častí, ale aj iných materiálov (napr. plastové tesnenia, potrubia a pod., ktoré môžu korodovať vplyvom silných minerálnych kyselín, resp. organických kyselín).	
Rýchlosť korózie < 0,125 mm za rok	0,10
Rýchlosť korózie > 0,125 mm za rok, ale < ako 1 mm za rok	0,20
Rýchlosť korózie > 1 mm za rok	0,50
Korózia, ktorá môže viesť k riziku mechanického poškodenia zariadenia	0,75
Korózia vyžaduje špeciálne výstelky zariadení	0,20

Pozn.: Zvlášť pozorne treba hodnotiť koróziu v prípadoch, keď hrozí v dôsledku korózie perforácia steny zariadenia s následkom nebezpečnej situácie (vznik výbušnej zmesi, priebeh nežiaducich reakcií zmiešaním nekompatibilných látok, expanzia obsahu zariadenia do okolia).

Tabuľka F2.8. Úniky, priesaky, netesnosti

LEAKS

Charakteristika	Pokuta
Netesnosti čerpadiel malého významu	0,10
Proces, v ktorom dochádza vždy k problémom s netesnosťou s následnými únikmi z čerpadiel, kompresorov a obrubových spojov	0,30
Procesy, v ktorých dochádza k cyklickým zmenám teplôt a tlakov	0,30
Proces, v ktorom použitý materiál je priepustný alebo procesy v ktorých sa používajú tesnenia hriadeľov (rotačných častí)	0,4
Zariadenia so sklenenými priezormi	1,5

Tabuľka F2.9. Práca s plameňom

Charakteristika	Pokuta
Samotná hodnotená jednotka pracuje s otvoreným plameňom	1
Proces, ktorý sa nachádza v blízkosti zariadenia pracujúceho s otvoreným ohňom a v ktorom je horľavý prach, alebo materiál pri teplote vyššej ako je bod vzplanutia	X (rov. (2.15))
Proces, ktorý sa nachádza v blízkosti zariadenia pracujúceho s otvoreným ohňom a v ktorom je materiál pri teplote vyššej ako je teplota varu	Y (rov. (2.16))

Pozn.: Pokuta je funkciou vzdialenosti hodnotenej jednotky, z ktorej by mohlo dôjsť k úniku horľavých/výbušných látok, od zariadenia pracujúceho s otvoreným ohňom. Koefficient X sa vypočíta zo vzťahu (2.15) a koefficient Y zo vzťahu (2.16), pričom vzdialenosť x sa dosádza v jednotkách meter (m)!

$$\log X = 1,0093 - 0,02129x - 5,89117 \cdot 10^{-4} x^2 + 2,10863 \cdot 10^{-5} x^3 - 1,58881 \cdot 10^{-7} x^4 \quad (2.15)$$

$$Y = 0,10393 + 0,88993 \exp(-x/8,30074) \quad (2.16)$$

Tabuľka F2.10. Výmena tepla s teplonosičmi na báze olejov

Charakteristika
Pokuta sa udeľuje pre jednotky, v ktorých sa na výmenu tepla používa horľavé teplonosné médium. Pokuta sa neudeľuje ak je teplonosné médium nehorľavé, alebo jeho teplota je vždy pod bodom vzplanutia.

Množstvo (m ³)	Pokuta	
	Olej nad bodom vzplanutia	Olej pri/alebo nad bodom varu
menej ako 20	0,15	0,25
viac ako 20, menej ako 40	0,30	0,45
viac ako 40, menej ako 100	0,50	0,75
viac ako 100	0,75	1,15

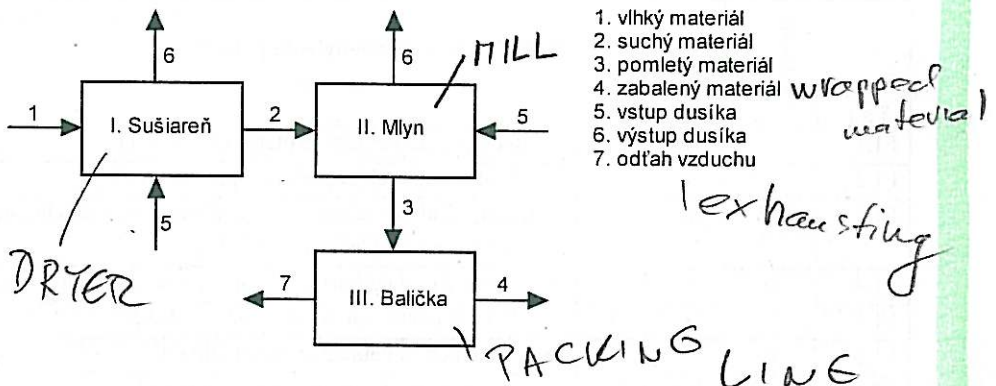
Pozn.: Pri posudzovaní výmenníkov tepla s inými (nie horľavými) teplotosičmi treba zohľadniť tvorbu usadenín, koróziu, chemickú nekompatibilitu chladeného a ohrievaného média, možnosť deformácií konštrukčného materiálu v prípade veľkých teplotných rozdielov medzi médiami.

Tabuľka F2.11. Zariadenia s rotujúcimi časťami

Charakteristika	Pokuta
Jednotka obsahuje rotujúcu časť	0,5
Jednotka je kompresor alebo čerpadlo	0,5
Jednotka využíva miešadlo alebo cirkulačnú pumpu, ktorých zlyhanie môže viesť k prehriatiu systému.	0,5
Jednotka je iné zariadenie s časťami rotujúcimi veľkou rýchlosťou, napr. centrifúga.	0,5

2.1.1.4 Príklad určenia PVI

Na nasledujúcom príklade bude ukázaný postup určenia *PVI* pre zariadenia pracujúce s výbušným prachom. Dotknutá časť technologickej schémy je zjednodušená znázornená na (Obr. 2.1) a pozostáva z troch jednotiek: sušiareň, mlyn, balička. Do sušiarne vstupuje vlhký materiál (prúd č. 1) s rôznou veľkosťou častíc. Materiál sa po zbavení nadbytočnej vlhkosti (prúd č. 2) vedie do mlyna, kde sa melie na prášok. Prášok vstupuje do baličky (prúd č. 3), z ktorej je expedovaný (prúd č. 4) do skladového hospodárstva. Do sušiarne a mlyna vstupuje dusík (prúd č. 5), ktorý zabezpečuje inertnú atmosféru a je zároveň teplotné médium. Dusík opúšťajúci sušiareň a mlyn (prúd č. 6) je vedený mimo jednotiek, kde sa upravuje, aby mohol byť opätovne použitý. Vzduch z baličky (prúd č. 7) je odsávaný mimo jednotky, kde sa zbavuje unášaných častíc prachu. Všetky jednotky možno považovať za jednotky s dostatočným prístupom. Maximálna kapacita jednotiek je 50 ton materiálu.



Obr. 2.1. Zjednodušená technologická schéma sušenia, mletia a balenia prachového produktu

Opis hodnotených jednotiek:

- I. **Sušiareň** pracuje pri teplote 160 °C v inertnej dusíkovej atmosfére, aby sa zabránilo vzniku výbušnej atmosféry. Dusík je zároveň teplonosné médium. Sušiareň nie je vyhrievaná iným ohrevným médium resp. zariadením. V sušiarňi sa suší materiál s rôznou veľkosťou častíc > 200 µm.
- II. **Mlyn** pracuje v inertnej dusíkovej atmosfére pri teplote maximálne 160 °C, aby sa zabránilo vzniku výbušnej atmosféry. Materiál sa melie tak, aby veľkosť častíc nepresahovala 75 µm. Mlyn obsahuje rotujúce časti a na niektorých častiach mlyna dochádza k opotrebovaniu, ktoré si vyžaduje údržbu v pravidelných intervaloch.
- III. **Balička** pracuje pri teplote okolia a bez inertnej atmosféry. Vzduch, ktorý obsahuje prachové častice je odvádzaná mimo jednotky, kde sa čistí.

Požiarno-výbušné vlastnosti materiálu:

Spracovávaný materiál je stabilná látka, pri bežných teplotách prakticky nereaguje so žiadnymi kyselinami, zásadami, ani s bežnými oxidovadlami. Koeficient reaktivity (K_R) z diamantu nebezpečenstva (pozri prílohu 1) sa rovná 1. Prach so vzduchom vytvára výbušnú zmes, pričom prach sa ľahko iniciuje elektrickou iskrou. Dolná medza výbušnosti je 20 – 30 g.m⁻³ a maximálna rýchlosť vzrastu tlaku je 18 500 kPa.m.s⁻¹. Sypná hustota materiálu je asi 150 kg.m⁻³.

Riešenie – určenie PVI:

I. Určenie materiálového faktora (MF)

1. Na základe údaju o maximálnej rýchlosti vzrastu tlaku (18 500 kPa.m.s⁻¹) môžeme z tabuľky (Tab. 2.3) určiť stupeň horľavosti pre prachové materiály $S_t = 1$.
2. Pomocou informácie o stupni horľavosti pre prachové materiály $S_t = 1$ a koeficiente reaktivity $K_R = 1$ jednoducho odčítame z tabuľky (Tab. 2.2) hodnotu materiálového faktora $MF = 16$.

II. Pridelenie pokutových faktorov

Tabuľka 2.7. Pridelenie pokutových faktorov

Všeobecný procesný faktor F_1				
	Sušiareň	Mlyn	Balička	Príčiny udelenia/neudelenia pokuty
F1.1	0	0	0	v jednotkách neprebíha exotermická reakcia
F1.2	0	0	0	v jednotkách neprebíha endotermická reakcia
F1.3	0,5	0,5	0	v sušiarňi a mlyne sa musí zamedziť prístupu vzduchu, aby sa zabránilo vzniku výbušnej zmesi
F1.4	0	0	0	na jednotkách sa nepracuje s kvapalinami ani skvapalnenými plynmi
F1.5	0	0	0	ku všetkým jednotkám je dostatočný prístup
F1.6	0	0	0	na jednotkách sa nepracuje s kvapalinami
F1 =	1,5	1,5	1,0	k sume pokút F1.1 – F1.6 sa pripočítava +1

Špeciálny procesný faktor F_2				
	Sušiareň	Mlyn	Balička	Pričiny udelenia/neudelenia pokuty
F2.1	0	0	0	v jednotkách sa nepracuje pri zníženom tlaku
F2.2	0	0	0	v jednotkách sa nepracuje s kvapalinami v medziach horľavosti
F2.3	0,125	1,0	2,0	sušiareň – častice $> 200 \mu\text{m}$ + inertná atmosféra, mlyn – častice $< 75 \mu\text{m}$ + inertná atmosféra, balička- častice $< 75 \mu\text{m}$
F2.4	0	0	0	v jednotkách sa nepracuje pri zvýšenom tlaku
F2.5	0	0	0	v jednotkách sa nepracuje pri nízkej teplote
F2.6	0,33	0,33	0,33	pokuta pre prášky vypočítaná z rovnice (2.12) (50 ton práškoveho materiálu so synnou hustotou cca. $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
F2.7	0	0,75	0	dokázaná korózia/erózia niektorých častí mlyna
F2.8	0	0	0	nie sú známe informácie o problémoch s netesnosťami
F2.9	0	0	0	na jednotkách sa nepracuje s plameňom
F2.10	0	0	0	v jednotkách sa nepracuje s teplonosičmi na báze olejov
F2.11	0	0,5	0	mlyn obsahuje rotujúce časti
F2 =	1,455	3,58	3,33	k sume pokút F2.1 – F2.11 sa pripočítava +1

III. Výpočet PVI a priradenie stupňa nebezpečenstva

Požiaro-výbušný index pre všetky tri jednotky vypočítame jednoducho zo vzťahu (2.1) a na základe čísla PVI z tabuľky (Tab. 2.1) odčítame stupeň nebezpečenstva.

Tabuľka 2.8. Výpočet PVI a priradenie stupňa nebezpečenstva

	Sušiareň	Mlyn	Balička
MF	16	16	16
F1	1,5	1,5	1,0
F2	1,455	3,58	3,33
PVI	34,92	85,92	53,28
Stupeň nebezpečenstva	ľahký	stredný	ľahký

2.1.2 Index toxicity IT

Index toxicity (IT) závisí nielen od samotnej toxicity látok, ktoré sa na jednotke nachádzajú, ale aj technického riešenia hodnotenej jednotky, preto sa pri výpočte indexu toxicity budú zohľadňovať obidva pokutové faktory, všeobecný (F_1) aj špeciálny (F_2) procesný faktor, ktoré už boli použité pri výpočte PVI . Toxické vlastnosti látky sa rovnako zohľadnia v dvoch faktoroch. Prvý faktor toxicity (T_1) je mierou celkovej toxicity látky z pohľadu jej účinku na človeka bez ohľadu na cesty vstupu do organizmu a je daný koeficientom toxicity (K_T) z diamantu nebezpečenstva (pozri prílohu 1). Hodnotu prvého faktora toxicity (T_1) prakticky získame jednoduchým odčítaním z tabuľky (Tab. 2.9).

Tabuľka 2.9. Určenie prvého faktora toxicity na základe hodnôt K_T

Koeficient toxicity K_T	Faktor toxicity T_1
0	0
1	50
2	125
3	250
4	325

Druhý faktor toxicity (T_2) zvyšuje hodnotu indexu toxicity (IT) pre tie látky, ktoré vstupujú do organizmu dýchacími cestami (inhaláciou) a je závislý od hodnoty NPEL (najvyšší prípustný expozičný limit) (pozri prílohu 1). Samotnú hodnotu druhého faktora toxicity získame odčítaním z tabuľky (Tab. 2.10) ak poznáme hodnotu NPEL v jednotkách ppm (1 ppm odpovedá 1 ml toxickéj látky na 1 meter kubický objemu).

Tabuľka 2.10. Hodnotenie rizika na základe NPEL v jednotkách ppm

NPEL (ppm)	T_2
≤ 5	125
5 – 50	75
> 50	50

Iné cesty vstupu toxickéj látky do organizmu ako inhaláciou sa ďalej nehodnotia, nakoľko pri dodržaní základných pravidiel bezpečnosti práce (zákaz požívania potravín na pracovisku, používanie ochranných prostriedkov ako rukavice, ochranné oděvy), sa toxické látky inou cestou do organizmu nemôžu dostať ani pri ich náhodnom úniku z jednotky. Na základe získaných faktorov toxicity T_1 a T_2 a už známych pokutových faktorov F_1 a F_2 sa výpočet indexu toxicity vykoná na základe vzťahu:

$$IT = \frac{T_1 + T_2}{100} (F_1 + F_2 - 1) \quad (2.17)$$

Na základe hodnôt indexu toxicity (IT) možno hodnotenej jednotke priradiť zodpovedajúci stupeň biologického ohrozenia podľa Tab. 2.11.

Tabuľka 2.11. Priradenie stupňa biologického rizika podľa hodnôt indexu toxicity

	Stupeň biologického rizika	IT
1	nízky	< 2
2	ľahký	2-4
3	stredný	4-6
4	vysoký	6-8
5	veľmi vysoký	8-10
6	extrémne vysoký	nad 10

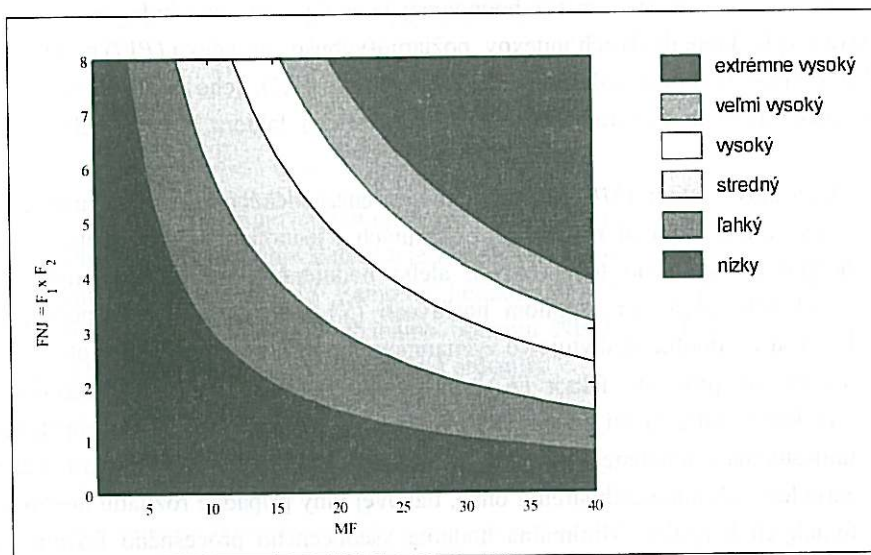
2.1.3 Zhrnutie indexovej metódy Dow

Stanovenie veľkosti nebezpečenstva hodnotenej jednotky pomocou indexovej metódy Dow pozostáva z vyhodnotenia dvoch indexov, požiarno-výbušného indexu (*PVI*) a indexu toxicity (*IT*). Na základe definície požiarno-výbušného indexu (2.1), jeho hodnota závisí od troch veličín, materiálového faktora, všeobecného procesného faktora a špeciálneho procesného faktora:

- Materiálový faktor (*MF*), ktorý je mierou energetického potenciálu uvoľneného pri horení alebo explózii materiálov prítomných v jednotke. Jeho hodnota je daná buď hodnotou spalného tepla (ΔH_C), alebo hodnotami koeficientov horľavosti (K_H) a reaktivity (K_R) resp. stupňom horľavosti (S_i) základnej, najnebezpečnejšej látky, ktorá sa v jednotke vyskytuje vo významnom množstve, resp. zmesi látok.
- Všeobecný procesný faktor (F_1) závisí od vlastností reagujúcej sústavy (ak ide o reaktor), ďalej závisí od riešenia manipulácie s materiálmi, od stavebného riešenia, umiestnenia hodnotenej jednotky, od prístupu k jednotke a prítomnosti ochranných zariadení zabráňujúcich šíreniu ohňa, tlakovej vlny prípadne rozliatiu horľavých príp. toxických kvapalín. Minimálna hodnota všeobecného procesného faktora sa rovná jednej. V prípade nebezpečných reakcií (napr. silne exotermických), pokutový príspevok významne zvyšuje svoju hodnotu, avšak ani hodnoty ostatných pokút nie sú zanedbateľné. Treba si však uvedomiť, že zatiaľ čo pokuta za nebezpečnú reakciu sa znížiť nedá, ostatné pokuty sa dodatočnými opatreniami dajú výrazne znížiť.
- Špeciálny procesný faktor (F_2), ktorého minimálna hodnota sa rovná jednej, sa navyšuje v závislosti od prevádzkových podmienok jednotky (teplota, tlak), od vlastností látok, s ktorými sa v jednotke pracuje (medze horľavosti, teplota varu, teplota vzplanutia, korozívne vlastnosti, výbušné prachy), od konštrukčného riešenia jednotky (konštrukčné materiály, rotujúce časti, teplonosič, otvorený plameň, možné úniky a priesaky atď.). Rovnako ako v prípade všeobecného faktora (F_1) aj v prípade špeciálneho faktora (F_2) stojí za zváženie, či sa vhodnou úpravou prevádzkových podmienok, alebo konštrukčnou úpravou jednotky nepodari znížiť nebezpečenstvo, ktorému je vystavená pracovná sila v rámci podniku, príp. obyvateľstvo za jeho hranicami.

Pomocou vypočítanej hodnoty *PVI* sa každej jednotke priradí stupeň nebezpečenstva požiaru a výbuchu od 1 – nízky stupeň, až po 6 – extrémne vysoký stupeň. Z definičného vzťahu (pozri rovnicu (2.1)) vyplýva, že na výslednú hodnotu *PVI* vplyva materiálový faktor rovnako ako pokutové faktory, avšak maximálne hodnoty, ktoré tieto parametre môžu v bežných prípadoch dosahovať sú rôzne. Hodnoty materiálového faktora sa pohybujú v rozmedzí 1 – 40 (pozri Tab. 2.2). Na druhej strane, faktor nebezpečenstva jednotky *FNJ*, ktorý sa rovná súčinu všeobecného a špeciálneho faktora ($F_1 \times F_2$) by nemal nadobudnúť hodnoty vyššie ako 8. V prípade, že *FNJ* je predsa vyšší ako 8, autormi metódy je odporúčené použiť hodnotu 8 ako maximálnu (AIChE, 2005). Na obr. 2.2 môžeme vidieť rozdelenie stupňov nebezpečenstva požiaru a výbuchu v závislosti o *MF* a *FNJ*. Ako je zjavné, nízke hodnoty materiálového

faktora ($t. j. < 7,5$) zaradia jednotku maximálne do druhého stupňa nebezpečenstva aj pre maximálne hodnoty faktora nebezpečenstva jednotky (FNJ).



Obr. 2.2. Stupne nebezpečenstva požiaru a výbuchu v závislosti od FNJ a MF

Na druhej strane, vysoké hodnoty materiálového faktora zaradia jednotku do stredného stupňa nebezpečenstva už pre relatívne nízke hodnoty faktora nebezpečenstva jednotky ($FNJ > 1,5$). Keďže hodnota MF sa znížiť nedá (alebo iba vo veľmi zriedkavých prípadoch, ak nahradíme pôvodnú látku novou s nižším MF), na zníženie stupňa nebezpečenstva požiaru a výbuchu jednotky treba pristúpiť k takým opatreniam, ktoré znižujú riziko vzniku nebezpečnej situácie na minimum a zároveň znižujú na minimum aj následky prípadnej nebezpečnej situácie. V Tab. 2.12 sú uvedené odporúčané minimálne preventívne a ochranné opatrenia v závislosti od hodnoty PVI .

Tabuľka 2.12. Preventívne a ochranné opatrenia v závislosti od hodnoty PVI

	Preventívne a ochranné opatrenia	Požiarne výbušný index, PVI					
		0 – 30	30 – 60	60 – 95	95 – 125	125 – 155	> 155
1	Ohňovzdorné materiály	A	B	B	C	D	D
2	Postrek vodou						
	(i) priamym prúdom vody	A	B	C	C	D	D
	(ii) plochy	A	B	C	C	D	D
	(iii) vodná clona	A	A	B	B	B	D
3	Špeciálne merania a snímanie						
	(i) teploty	A	B	C	C	D	D
	(ii) tlaku	A	B	C	C	C	D
	(iii) prietoku	A	B	C	D	D	D
4	Skládky, vetranie, riadenie rozliatia	A	A	B	C	C	D
5	Vnútoraná explózia zariadení	A	B	C	C	D	D

6	Monitoring horľavých plynov						
	(i) varovné signály	A	A	B	C	C	D
	(ii) spúšťanie ochranných zariadení	A	A	B	C	C	D
7	Diaľkové ovládanie (z veľňa)	A	A	B	C	C	D
8	Ochranné hrádze, steny	A	D	D	D	D	D
9	Protivýbuchové odvetranie a steny, izolácia zariadenia	A	A	B	C	D	D
A – opatrenie dobrovoľné, B – opatrenia navrhnuté, C – opatrenia doporučené, D – vyžadované opatrenia.							

Index toxicity je funkciou toxických vlastností látky (T_1 a T_2) a pokutových faktorov (F_1 a F_2). Jeho hodnota závisí najmä od:

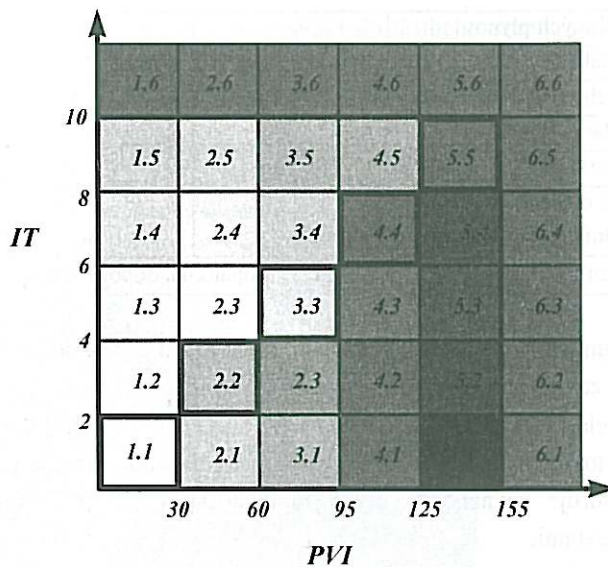
- toxických vlastností látky daných koeficientom toxicity K_T (určuje hodnotu koeficientu toxicity T_1) a hodnotou NPEL (určuje hodnotu koeficientu toxicity T_2), ktorá vyjadruje závažnosť vplyvu toxickej látky pri jej vstupe do organizmu dýchacími cestami,
- všeobecného (F_1) a špeciálneho (F_2) procesného faktora.

Zníženie koeficientov toxicity (T_1 a T_2) je prakticky možné len výmenou toxickej látky v jednotke za menej toxickú látku, čo vo väčšine prípadov neprichádza do úvahy, takže zníženie indexu toxicity je možné len spôsobom, ktorý sme diskutovali už v prípade *PVI*.

Na Obr. 2.3 je znázornená matica možných indexov *PVI* a *IT*. Jednotlivé prvky tejto matice svojim prvým číslom vyjadrujú stupeň nebezpečenstva požiaru a výbuchu, druhé číslo vyjadruje stupeň biologického ohrozenia. Od hodnôt týchto čísel sa odvíjajú ďalšie aktivity, cieľom ktorých je znížiť celkové nebezpečenstvo vyplývajúce z prevádzky danej jednotky.

Vo všeobecnosti môžeme konštatovať:

- Najnižšiu mieru rizika predstavujú prvky s indexmi [1.1].
- Prvky, v ktorých sa nachádza číslo 6 (na prvom alebo druhom mieste) a prvok (5.5) predstavujú najnebezpečnejšie jednotky, a vyžadujú si detailnú bezpečnostnú analýzu, vypracovanie havarijných plánov a kontrolu zabezpečovacích a ochranných zariadení. Pre tieto jednotky je nutné mať prepracovaný a detailný systém riadenia bezpečnosti, preto sa v ďalšom hodnotení odporúča aplikovať najkomplexnejšou techniku na identifikáciu nebezpečenstva – HAZOP (AICHE, 1992).
- Prvky, v ktorých sa nachádza číslo 4 a 5 si rovnako vyžadujú vypracovanie havarijných plánov a použitie komplexnej techniky identifikácie nebezpečenstva (HAZOP), pričom následné opatrenia závisia od toho, či číslo 4 resp. 5 je dôsledkom vysokých hodnôt *PVI* alebo *IT*. V prípade vysokých hodnôt *PVI* (prvky (4.x), (5.x)) je nutné sa zamerať na analýzu rizík požiaru a výbuchu a kontrolu požiarom predpisov, v prípade vysokých hodnôt *IT* (prvky (x.4), (x.5)) sa treba orientovať na ochranu pracovníkov resp. obyvateľstva pred toxickým ohrozením (ochranné pracovné prostriedky, evakuácia, predpoveď šírenia oblaku toxických látok v prípade ich úniku, systém varovania obyvateľstva atď.).
- V prípade prvkov s číslami menšími ako 4 je odporúčaná ďalšia analýza nebezpečenstva pomocou štandardných techník.



Obr. 2.3. Matica indexov *PVI* a *IT*. Prvé číslo označuje stupeň nebezpečenstva požiaru a výbuchu, druhé stupeň biologického ohrozenia

Na záver je nutné pripomenúť, že postup hodnotenia rizík opísaný na predchádzajúcich stránkach nemožno vzťahovať na iné riziká ako riziká spojené s manipuláciou s chemickými látkami a procesmi chemického priemyslu. Ďalej je nutné zdôrazniť, že metóda by sa mala používať pre určenie požiarno-výbušných rizík pre jednotky, v ktorých sa manipuluje alebo spracováva viac ako 2000 kg (alebo 2,3 m³) horľavého, výbušného resp. reaktívneho materiálu. Pokiaľ sa *PVI* určuje pre jednotky pracujúce s menšími množstvami, jeho hodnoty sú zvyčajne nadsadené (AIChE, 2005).

Pre každú hodnotenú jednotku sa odporúča vytvoriť prehľadnú tabuľku, ktorej návrh predstavuje Tab. 2.13. Samozrejme, táto tabuľka je len orientačná, pre praktické účely by sa žiadalo doplniť ju o ďalšie informácie, napr. názov podniku, prevádzky, jednotky, meno pracovníka, ktorý jednotku hodnotil, dátum a iné informácie, ktoré môžu byť užitočné.

Tabuľka 2.13. Pracovný formulár na určovanie PVI a IT

PVI	Základná látka na určenie materiálového faktora:						
	<i>Názov</i>	<i>Bod varu, (°C)</i>	<i>Bod vzplanutia, (°C)</i>	<i>Koeficient horľavosti, K_H</i>	<i>Koeficient reaktivity, K_R</i>	<i>Koeficient toxicity, K_T</i>	<i>NPPL (ppm)</i>
	1.						
	2.						
	3.						
	4.						
MF	Materiálový faktor						
F_1	Všeobecný procesný faktor				Rozsah pokút	Pokuta	
	Základný faktor				1,0	1,0	
F1.1	Exotermické chemické reakcie				0,30 – 1,25		
F1.2	Endotermický proces				0,20 – 0,40		
F1.3	Manipulácia s materiálom a jeho transport				0,25 – 1,05		
F1.4	Proces v uzavretom priestore				0,25 – 0,90		
F1.5	Prístup				0,20 – 0,35		
F1.6	Kontrola vyprázdňovania				0,25 – 0,50		
	<i>Všeobecný procesný faktor $F_1 =$</i>						
F_2	Špeciálny procesný faktor				Rozsah pokút	Pokuta	
	Základný faktor				1,00	1,00	
F2.1	Nízkotlakové procesy				0,50		
F2.2	Operácie v alebo blízko medzi horľavosti				0,30 – 0,80		
F2.3	Výbušný prach				0,25 – 2,00		
F2.4	Zvýšený tlak						
F2.5	Nízke teploty				0,20 – 0,30		
F2.6	Množstvo horľavého / nestabilného materiálu						
F2.7	Korózia a erózia				0,10 – 0,75		
F2.8	Možné úniky, priesaky				0,10 – 1,15		
F2.9	Použitie plameňa						
F2.10	Výmena tepla s teplotosičmi na báze olejov				0,15 – 1,15		
F2.11	Zariadenia s rotujúcimi časťami				0,50		
	<i>Špeciálny procesný faktor $F_2 =$</i>						
FNJ	Faktor nebezpečenstva jednotky $FNJ = F_1 \times F_2$						
PVI	Požiarne výbušný index $PVI = FNJ \times MF$						
IT	Index toxicity IT (podľa vzťahu (2.17))						
Stupne nebezpečenstva požiaru a výbuchu (Tab. 2.1)							
Stupeň biologického rizika (1 - 6) (Tab. 2.11 Priradenie stupňa biologického rizika podľa hodnôt indexu toxicity Tab. 2.11)							

2.2 Selekčná metóda

Selekčná metóda je založená na kvantitatívnom výpočte „indikačného čísla A“ a „selekčného čísla S“, ktoré slúžia na výber rizikových zariadení (resp. celých operačných jednotiek) v podniku (alebo iba v rámci jednej prevádzky), pre ktoré je potrebné vykonať podrobnejšie hodnotenie rizika. Indikačné a selekčné čísla sú počítané v závislosti od množstva vybraných nebezpečných látok v danom zariadení, ich chemicko-fyzikálnych vlastností a procesných podmienok, pri ktorých sa nachádzajú. Rizikovosť jednotlivých zariadení sa následne určuje na základe ich vzdialenosti od zvolených objektov, napr. iných výrobných zariadení, obývaných oblastí, prípadne významných prvkov životného prostredia (vodné nádrže, rieky, zdroje pitnej vody a pod.).

Postup vyhodnocovania nebezpečnosti podniku resp. prevádzky pomocou selekčnej metódy môžeme rozdeliť do štyroch hlavných bodov:

1. Rozdelenie podniku (resp. prevádzky), na **operačné jednotky**, ktorých nebezpečnosť sa bude vyhodnocovať. V rámci jednej operačnej jednotky sa môže nachádzať aj viacero zariadení obsahujúcich rôzne nebezpečné látky pri rôznych procesných podmienkach.
2. Výpočet **indikačného čísla „A“** ako miery vlastnej nebezpečnosti operačnej jednotky, ktoré závisí od množstva nebezpečnej látky, jej fyzikálnych a toxických vlastností a od špecifických prevádzkových podmienok v každom zariadení v rámci operačnej jednotky.
3. Výpočet **selekčného čísla „S“**, ktoré je okrem indikačného čísla „A“ závislé od vzdialenosti k zvolenému objektu (viacerých objektov), ktorého ohrozenie operačnými jednotkami nás zaujíma.
4. **Vyselektovanie najnebezpečnejšej operačnej jednotky** (viacerých operačných jednotiek), ktorá predstavuje najvyššie ohrozenie pre nami zvolený objekt (objekty).

2.2.1 Rozdelenie podniku na operačné jednotky

Dôležité kritérium pre definíciu „samostatnej operačnej jednotky“ je, že strata (únik) obsahu tejto jednotky pri incidente (havárii) nespôsobí významnú stratu obsahu ďalšej jednotky. Následne to znamená, že dve jednotky môžeme považovať za samostatné, ak ich navzájom vieme izolovať vo veľmi krátkej dobe okamžite po začiatku incidentu. V rámci jednej jednotky sa môže nachádzať viacero zariadení, v ktorých sa môžu nachádzať rôzne nebezpečné látky (horľavé, toxické, výbušné) pri rôznych podmienkach (skupenstvo, teplota, tlak).

Pri selekčnej metóde budeme rozoznávať dva základné typy zariadení:

- zariadenia procesné,
- zariadenia skladovacie.

Procesné zariadenie môže v konečnom dôsledku pozostávať z niekoľkých nádob, prepojených potrubím s prídavnými zariadeniami. Súčasťou skladovacieho zariadenia sú často recirkulačné systémy a výmenníky tepla, ktoré slúžia na udržanie obsahu zásobníka pri vhodných podmienkach skladovania.

2.2.2 Výpočet indikačného čísla „A“

Indikačné číslo „A“ je počítané ako miera vlastnej nebezpečnosti operačnej jednotky, ktoré závisí od množstiev nebezpečných látok, ich fyzikálnych a toxických vlastností a od špecifických prevádzkových podmienok v každom zariadení operačnej jednotky. Indikačné číslo je bezrozmerné číslo definované takto:

$$A = \frac{Q \times O_1 \times O_2 \times O_3}{G} \quad (2.18)$$

kde

Q je množstvo látky (kg),

O_1, O_2, O_3 – faktory procesných podmienok (-),

G – limitné množstvo látky (kg).

2.2.2.1 Množstvo látky – Q

Množstvo látky v zariadení (operačnej jednotke) sa udáva v kilogramoch. Tento údaj vyjadruje množstvo nebezpečnej látky (horľavej, toxickkej, výbušnej), nie celkové množstvo látok v operačnej jednotke. Pri zmesiach látok sa stretávame najčastejšie s dvoma situáciami:

- nebezpečná látka v prítomnosti nie nebezpečného rozpúšťadla,
- zmes viacerých nebezpečných látok.

Ak je nebezpečná látka rozpustená v nie nebezpečnom rozpúšťadle, potom sa berie do úvahy iba množstvo nebezpečnej látky, nie množstvo celej zmesi. V tomto prípade by sme mali poznať zloženie zmesi (koncentráciu nebezpečnej látky v zmesi, molový zlomok, hmotnostný zlomok). V prípade zmesi viacerých nebezpečných látok je situácia o niečo komplikovanejšia. V ideálnom prípade by sme mali poznať fyzikálne, chemické a toxické vlastnosti zmesi látok, čím by sme mohli túto zmes posudzovať rovnakým spôsobom ako čistú látku s danými vlastnosťami. Ak tieto informácie nemožno získať, sme nútení použiť buď vlastnosti látky, ktorá je zastúpená v najväčšej miere, alebo látky, ktorej únik by mal z pohľadu bezpečnosti najhorší dopad na svoje okolie.

2.2.2.2 Faktory procesných podmienok – O_1, O_2, O_3

Aby sme zohľadnili podmienky, pri ktorých sa nebezpečné látky v zariadeniach nachádzajú, aplikujú sa tri rôzne faktory:

1. Faktor zohľadňujúci, či ide o procesné zariadenie, alebo zásobník

Tabuľka 2.14. Faktor procesných podmienok O_i

Typ	O_1
Procesné zariadenie	1
Zásobník	0.1

2. Faktor zohľadňujúci umiestnenie zariadenia

Tabuľka 2.15. Faktor procesných podmienok O_2

Pozícia	O_2
Zariadenie umiestnené vonku	1,0
Zariadenie umiestnené v budove	0,1
Ohradené zariadenie s procesnou teplotou (T_p) menšou ako je teplota varu materiálu pri atmosférických podmienkach + 5 °C (T_v): $T_p \leq T_v + 5 \text{ °C}$	0,1
Ohradené zariadenie s procesnou teplotou (T_p) väčšou ako je teplota varu materiálu pri atmosférických podmienkach + 5 °C (T_v): $T_p > T_v + 5 \text{ °C}$	1,0

3. Faktor procesných podmienok – zohľadňuje množstvo látky, ktoré sa dostane do plynej fázy po možnom úniku. Vyhodnocuje sa na základe informácií o procesnej teplote, teplote varu látky pri atmosférických podmienkach, skupenstve látky pri okolitej teplote.

Tabuľka 2.16. Faktor procesných podmienok O_3

Skupenstvo	O_3
Látka v plynnom skupenstve	10
Látka v kvapalnom skupenstve <ul style="list-style-type: none"> • Tlak nasýtených pár pri procesnej teplote 0,3 MPa a viac • Tlak nasýtených pár pri procesnej teplote medzi 0,1 – 0,3 MPa • Tlak nasýtených pár (resp. parciálny tlak pár) pri procesnej teplote menej ako 0,1 MPa Pozn.: Ak je nebezpečná látka rozpustená v nie nebezpečnom rozpúšťadle, na výpočet faktora O_3 sa používa parciálny tlak pár nebezpečnej látky.	10 $X + \Delta$ $10 \times P_{SAT} + \Delta$
Látka v tuhom skupenstve	0,1

P_{SAT} – tlak nasýtených pár v jednotkách MPa

V prípade, že tlak nasýtených pár látky v kvapalnom skupenstve pri procesnej teplote sa nachádza v intervale od 0,3 MPa po 0,1 MPa, s narastajúcim tlakom nasýtených pár látky lineárne rastie faktor X od 1 po 10 podľa rovnice:

$$X = 45 \times P_{sat} - 3,5 \quad (2.19)$$

kde P_{sat} je tlak nasýtených pár pri procesnej teplote (MPa).

Parameter Δ – zohľadňuje odparovanie zo vzniknutej mláky v dôsledku toku tepla z okolia a závisí len od teploty varu látky pri atmosférických podmienkach T_v .

Tabuľka 2.17. Závislosť parametra Δ od teploty varu

T_v – Teplota varu pri atm. podm. [°C]	Δ
$-25 \text{ °C} \leq T_v$	0

$-75\text{ °C} \leq T_v < -25\text{ °C}$	1
$-125\text{ °C} \leq T_v < -75\text{ °C}$	2
$T_v < -125\text{ °C}$	3

Najnižší prípustný tretí faktor procesných podmienok O_3 je 0,1. Zodpovedá látkam v tuhom skupenstve. V niektorých prípadoch kvapalných roztokov nebezpečných látok môžeme vypočítať hodnotu nižšiu ako 0,1. V takomto prípade vypočítanú hodnotu nahradíme faktorom rovnajúcim sa 0,1.

Pozor, všetky tri faktory procesných podmienok sa určujú pre toxické a horľavé látky, pre výbušné látky budeme uvažovať, že všetky faktory sa rovnajú 1, $O_1 = O_2 = O_3 = 1$.

2.2.2.3 Limitné množstvo látky – G

Limitné množstvo látky sa prisudzuje podľa nebezpečnej vlastnosti látky (toxická, výbušnosť, horľavosť) a závisí od fyzikálnych vlastností. Ak látka patrí k dvom skupinám (napr. je aj toxická aj výbušná) hodnotí sa v oboch skupinách, podľa pravidiel každej skupiny:

1. Limitné množstvo pre výbušné látky

Limitné množstvo pre výbušné látky predstavuje také množstvo látky, ktoré pri výbuchu uvoľní rovnaké množstvo energie ako 1000 kg TNT. Energetický potenciál TNT je $4600\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, teda pri výbuch 1000 kg TNT sa uvoľní 4600 MJ.

G = ekvivalent 1000 kg TNT (= množstvo látky schopné uvoľniť 4 600 MJ)

2. Limitné množstvo pre horľavé látky

Pre horľavé látky je stanovená hodnota limitného množstva na 10 000 kg.

3. Limitné množstvo pre toxické látky

Hlavným parametrom na určenie limitného množstva pre toxické látky je LC_{50} „lethal concentration“, ktorá predstavuje smrteľnú koncentráciu látky pre 50 % testovaných zvierat (pozri prílohu 1) v zvolenom časovom intervale. V tomto prípade ide o smrteľnú koncentráciu pre potkana pri inhalovaní toxického látky po dobu 1 hodiny v jednotkách $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Ďalej potrebujeme poznať informáciu o skupenstve, v ktorom by sa látka nachádzala pri teplote 25 °C . V prípade látok, ktoré sa pri teplote 25 °C a bežnom tlaku nachádzajú v kvapalnom skupenstve, potrebujeme poznať ich teplotu varu. Na základe získaných parametrov, limitné množstvo pre toxické látky odčítame z nasledujúcej tabuľky:

Tabuľka 2.18. Limitné množstva pre toxické látky

LC_{50} [mg/m^3]	Fáza pri 25 °C	G [kg]
$LC_{50} \leq 100$	plynná	3
	kvapalná ($25\text{ °C} < T_v \leq 50\text{ °C}$)	10
	kvapalná ($50\text{ °C} < T_v \leq 100\text{ °C}$)	30
	kvapalná ($100\text{ °C} < T_v$)	100
	tuhá	300

100 < LC ₅₀ ≤ 500	plynná	30
	kvapalná (25 °C < T _v ≤ 50 °C)	100
	kvapalná (50 °C < T _v ≤ 100 °C)	300
	kvapalná (100 °C < T _v)	1000
	tuhá	3000
500 < LC ₅₀ ≤ 2000	plynná	300
	kvapalná (25 °C < T _v ≤ 50 °C)	1000
	kvapalná (50 °C < T _v ≤ 100 °C)	3000
	kvapalná (100 °C < T _v)	10 000
	tuhá	∞
2 000 < LC ₅₀ ≤ 20 000	plynná	3000
	kvapalná (25 °C < T _v ≤ 50 °C)	10 000
	ostatné	∞
LC ₅₀ > 20 000	všetky	∞

Na základe informácií o množstve nebezpečnej látky v procesnom zariadení resp. zásobníku, umiestnení zariadenia, procesných podmienkach a limitnom množstve látky sme schopní vypočítať indikačné číslo vzťahujúce sa na každú nebezpečnú vlastnosť (F – horľavosť, T – toxicita, E – výbušnosť) $A_{i,p}^F, A_{i,p}^T, A_{i,p}^E$ danej látky „i“ v danom zariadení pri zadaných procesných podmienkach „p“. V rámci jednej operačnej jednotky sa môže nachádzať viacero látok v zariadeniach pri rôznych operačných podmienkach, preto na získanie indikačného čísla pre operačnú jednotku je potrebné spočítať indikačné čísla $A_{i,p}$ pre každú látku „i“ v danom zariadení pri zadaných procesných podmienkach „p“. Takto pre každú hodnotenú operačnú jednotku získame maximálne tri indikačné čísla vzťahujúce sa k nebezpečným vlastnostiam horľavosť A^F , toxicita A^T a výbušnosť A^E :

$$A^F = \sum_{i,p} A_{i,p}^F \quad (2.20)$$

$$A^T = \sum_{i,p} A_{i,p}^T \quad (2.21)$$

$$A^E = \sum_{i,p} A_{i,p}^E \quad (2.22)$$

2.2.3 Výpočet selekčného čísla „S“

Výpočet selekčných čísel pre operačnú jednotku vychádza z indikačných čísel jednotky, teda ak operačná jednotka obsahuje látku resp. látky, ktoré sa vyznačujú všetkými tromi nebezpečnými vlastnosťami (F – horľavosť, T – toxicita, E – výbušnosť), musíme vypočítať tri selekčné čísla vzťahujúce sa k nebezpečným vlastnostiam horľavosť S^F , toxicita S^T a výbušnosť S^E podľa nasledujúcich jednoduchých vzorcov:

$$S^F = \left(\frac{100}{L}\right)^3 A^F \quad (2.23)$$

$$S^T = \left(\frac{100}{L}\right)^2 A^T \quad (2.24)$$

$$S^E = \left(\frac{100}{L}\right)^3 A^E \quad (2.25)$$

pričom L je vzdialenosť operačnej jednotky od analyzovaného objektu (bodu). Väčšinou ide o iné výrobné zariadenia, obývané oblasti, alebo významné prvky životného prostredia v okolí podniku. Vo všeobecnosti sa však odporúča podrobne vyhodnotiť možný vplyv operačných jednotiek na oblasti v bezprostrednej blízkosti hraníc podniku vytvorením siete bodov kopírujúcich hranice podniku s maximálnou vzdialenosťou od seba 50 metrov. Treba však dodržať pravidlo, že výsledná hodnota vzdialenosti operačnej jednotky od každého bodu L by mala byť minimálne 100 metrov.

2.2.4 Vyselektovanie najnebezpečnejšej operačnej jednotky (operačných jednotiek)

Výsledkom vyššie uvedených krokov je tabuľka selekčných čísel, pričom každé číslo sa vzťahuje k nebezpečnej vlastnosti látok operačnej jednotky a zvolenému objektu (bodu).

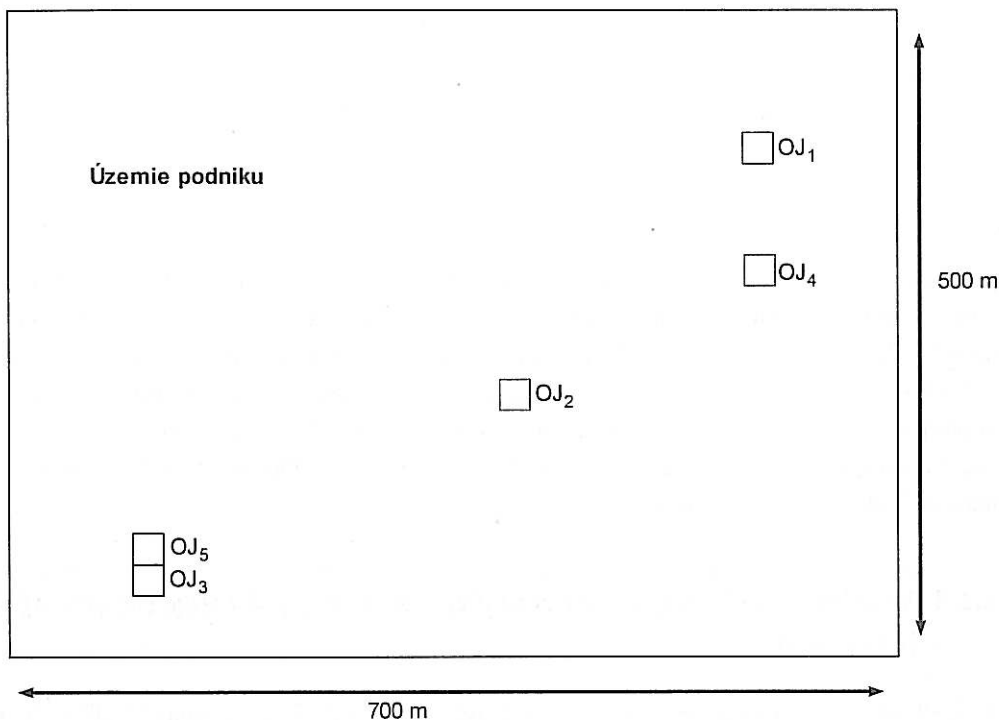
Tabuľka 2.19. Tabuľka selekčných čísel

		Operačná jednotka č. 1			Operačná jednotka č. 2			Operačná jednotka č. n		
		F	T	E	F	T	E	F	T	E
Zvolené objekty(body)	1	S_{1-OJ1}^F	S_{1-OJ1}^T	S_{1-OJ1}^E	S_{1-OJ2}^F	S_{1-OJ2}^T	S_{1-OJ2}^E	S_{1-OJn}^F	S_{1-OJn}^T	S_{1-OJn}^E
	2	S_{2-OJ1}^F	S_{2-OJ1}^T	S_{2-OJ1}^E	S_{2-OJ2}^F	S_{2-OJ2}^T	S_{2-OJ2}^E	S_{2-OJn}^F	S_{2-OJn}^T	S_{2-OJn}^E
	3	S_{3-OJ1}^F	S_{3-OJ1}^T	S_{3-OJ1}^E	S_{3-OJ2}^F	S_{3-OJ2}^T	S_{3-OJ2}^E	S_{3-OJn}^F	S_{3-OJn}^T	S_{3-OJn}^E
	M	S_{m-OJ1}^F	S_{m-OJ1}^T	S_{m-OJ1}^E	S_{m-OJ2}^F	S_{m-OJ2}^T	S_{m-OJ2}^E	S_{m-OJn}^F	S_{m-OJn}^T	S_{m-OJn}^E

V takto zostavenej tabuľke selekčných čísel budeme navzájom porovnávať selekčné čísla operačných jednotiek pre každý zvolený objekt (bod). Pre každý zvolený objekt (bod) nájdeme najvyššie selekčné číslo a označíme si operačnú jednotku, ktorej prislúcha. Pre daný objekt (bod) môže byť vyselektovaných viacero operačných jednotiek, ak ďalšie (druhé, tretie, až n -té) selekčné čísla presahujú 50 % z najvyššieho selekčného čísla (pre daný objekt). Za zanedbateľné môžeme považovať selekčné čísla menšie ako jedna.

2.2.5 Ukážka aplikácie selekčnej metódy

V podniku sa vyskytujú nebezpečné látky v piatich operačných jednotkách (OJ), ktoré sú v rámci územia podniku lokalizované podľa Obr. 2.4.



Obr. 2.4. Lokalizácia operačných jednotiek v rámci územia podniku

Prvá operačná jednotka – OJ₁ obsahuje iba jedno procesné zariadenie, ktoré je umiestnené v budove a obsahuje 2100 kg kvapalného chlóru pri teplote 35 °C a tlaku 1 MPa (10 bar).

Druhá operačná jednotka – OJ₂ pozostáva z viacerých procesných zariadení, ktoré obsahujú horľavé látky pri rôznych podmienkach. Všetky zariadenia, v ktorých sa horľavé látky nachádzajú sú umiestnené vonku. V zariadeniach sa nachádza etylén, etán, bután, propylén a propán. Množstvo každej látky, skupenstvo, teplota a tlak sú zosumarizované v Tab. 2.20.

Operačnú jednotku OJ₃ tvorí iba jedno zásobné zariadenie umiestnené vonku, ktoré obsahuje 1500 ton 30 %-ného roztoku kyseliny chlorovodíkovej vo vode (percentá sú hmotnostné) pri teplote 25 °C (zodpovedajúci parciálny tlak pár HCl (2 kPa (0,02 bar))).

30 %-ný roztok kyseliny chlorovodíkovej vo vode (percentá sú hmotnostné) sa nachádza aj vo štvrtnej operačnej jednotke OJ₄. Procesné zariadenie, v ktorom sa nachádza 300 000 kg roztoku pri teplote 100 °C (zodpovedajúci parciálny tlak pár HCl 0,11 MPa (1,1 bar)) sa nachádza v budove.

Posledná piata operačná jednotka OJ₅ opäť pozostáva z viacerých procesných zariadení umiestnených vonku, v ktorých sa nachádzajú rôzne nebezpečné látky. Ide o 12 000 kg plynného amoniaku, 9000 kg 60 %-ného vodného roztoku amoniaku vo vode (percentá sú hmotnostné) (pri teplote 43 °C, parciálny tlak pár amoniaku 0,94 MPa (9,4 bar)) a 1000 kg pár benzínu pri teplote 150 °C.

Pre jednoduchšie narábanie so získanými informácia je vhodné vytvoriť tabuľku, v ktorej zosumarizujeme o aké zariadenia v ktorej operačnej jednotke ide (procesné, zásobné), kde sa tieto zariadenia nachádzajú (v budove, vonku), aká nebezpečná látka, v akom množstve a pri akých fyzikálnych podmienkach sa danom zariadení nachádza (pozri Tab. 2.20).

Tabuľka 2.20. Príklad sumarizácie informácií o operačných jednotkách z Obr. 2.4

OJ	Zariadenie	Umiestnenie	Látka	Množstvo [kg]	Fáza	Teplota [°C]	Tlak [MPa]
1	procesné	v budove	chlór	2100	L	35	1
2	procesné	vonku	etylén	200 000	L	-30	2
			etán	100 000	G	80	
			bután	10 000	G	30	
			propylén	10 000	L	-35	0,175
			propán	50 000	L	80	3,1
3	zásobné	vonku	30% HCl	1 500 000	L	25	*0,002
4	procesné	v budove	30% HCl	300 000	L	100	*0,11
5	procesné	vonku	NH ₃	12 000	G		
			60% NH ₃	9000	L	43	*0,94
			benzín	1000	G	150	

* parciálny tlak pár nebezpečnej látky, L – kvapalnú skupenstvo, G – plynnú skupenstvo

Výpočet indikačných čísel – A

Množstvo nebezpečnej látky v operačnej jednotke – Q

Množstvá jednotlivých nebezpečných látok v rámci operačných jednotiek (ak sú čisté) máme sumarizované v Tab. 2.20. Avšak si treba uvedomiť, že v operačných jednotkách číslo 3, 4 a 5 sa nachádzajú zmesi nebezpečnej látky s nie nebezpečnou látkou, preto je nutné vypočítať množstvo čistej nebezpečnej látky.

$$Q(OJ_3, 30 \text{ hm.}\% \text{ HCl}) = 450\,000 \text{ kg}$$

$$Q(OJ_4, 30 \text{ hm.}\% \text{ HCl}) = 90\,000 \text{ kg}$$

$$Q(OJ_5, 60 \text{ hm.}\% \text{ NH}_3) = 5400 \text{ kg}$$

Faktor procesných podmienok č. 1 – O_1

Všetky operačné jednotky okrem operačnej jednotky číslo 3 obsahujú procesné zariadenia, teda prvý faktor procesný podmienok je pre ne rovný 1 ($O_1 = 1$). Operačná jednotka číslo 3 (OJ_3) pozostáva zo zásobného zariadenia, teda prvý faktor procesný podmienok je v tomto prípade rovný 0,1 ($O_1(OJ_3) = 0,1$).

Faktor procesných podmienok č. 2 – O_2

Operačné jednotky číslo 1 a 4 majú zariadenia umiestnené v budove, teda druhý faktor procesných podmienok je pre tieto operačné jednotky rovný 0,1 ($O_2 = 0,1$). Druhý faktor procesných podmienok rovný 1 ($O_2 = 1$) prislúcha operačným jednotkám číslo 2, 3 a 5, ktoré majú zariadenia umiestnené vonku.

Faktor procesných podmienok č. 3 – O_3

Všetky zariadenia umiestnené v rámci operačných jednotiek, ktoré obsahujú nebezpečnú látku v plynnom skupenstve budú ohodnotené najvyšším tretím faktorom procesných podmienok rovným 10 ($O_3 = 10$). Menovite sú to zariadenia obsahujúce etán a bután v druhej operačnej jednotke a v piatej operačnej jednotke sú to zariadenia obsahujúce čistý amoniak a benzín. Rovnako budú najvyšším faktorom rovným 10 pokutované zariadenia, ktoré obsahujú kvapalinu a zároveň je tlak nasýtených pár rovný alebo väčší ako 0,3 MPa. Ide o zariadenie s chlórrom v prvej operačnej jednotke, zariadenia s etylénom a propánom v druhej operačnej jednotke a zariadenie so 60 %-ným roztokom amoniaku v piatej operačnej jednotke. Tretí faktor procesných podmienok musíme počítať v prípade, ak je v zariadení kvapalná látka a zároveň je tlak nasýtených pár menší ako 0,3 MPa. V druhej operačnej jednotke sa nachádza propylén v kvapalnej fáza s tlakom nasýtených pár 0,175 MPa, preto $X = 45 \times 0,175 - 3,5 = 4,4$. Teplota varu propylénu pri atmosférických podmienkach je -48°C , preto $\Delta = 1$. Na základe uvedeného, tretí faktor procesných podmienok pre propylén v druhej operačnej jednotke sa rovná 5,4 ($O_3(\text{OJ}_2, \text{propylén}) = 5,4$). V tretej operačnej jednotke sa nachádza 30 %-ný roztok kyseliny chlorovodíkovej, ktorej parciálny tlak pár sa rovná 2 kPa ($P_i = 0,002 \text{ MPa}$). Teplota varu 30 %-ného roztoku kyseliny chlorovodíkovej pri atmosférickom tlaku je 57°C , preto $\Delta = 0$ a následne $O_3(\text{OJ}_3, 30 \text{ hm.}\% \text{ HCl}) = 0,02$. Keďže výsledný tretí faktor procesných podmienok je menší ako minimálna prípustná hodnota 0,1, v ďalších výpočtoch použijeme hodnotu 0,1 ($O_3(\text{OJ}_3, 30 \text{ hm.}\% \text{ HCl}) = 0,1$). V štvrtej operačnej jednotke sa opäť nachádza 30 %-ný roztoku kyseliny chlorovodíkovej avšak pri vyššej teplote (100°C), pričom parciálny tlak kyseliny chlorovodíkovej je 0,11 MPa, preto $X = 45 \times 0,11 - 3,5 = 1,5$. Teplota varu 30 %-ného roztoku kyseliny chlorovodíkovej pri atmosférickom tlaku je 57°C , preto $\Delta = 0$. Na základe uvedeného, tretí faktor procesných podmienok vo štvrtej operačnej jednotke je rovný 1,5 ($O_3(\text{OJ}_4, 30 \text{ hm.}\% \text{ HCl}) = 1,5$).

Limitné množstvo látky – G

Pri výpočte limitného množstva látky je potrebné charakterizovať nebezpečenstvo vyplývajúce z danej látky, teda či ide o látku horľavú, toxickú alebo výbušnú. Napríklad v prípade amoniaku budeme hľadať limitné množstvo zodpovedajúce jeho toxicite, ale aj horľavosti. Pre všetky horľavé látky predpokladáme limitné množstvo, ktoré sa rovná 10 000 kg. Platí to pre všetky látky z druhej operačnej jednotky (etylén, etán, bután, propylén a propán) a z piatej operačnej jednotky (amoniak, roztok amoniaku a benzín). Pre toxické látky (chlór, chlorovodík, amoniak) potrebujeme informáciu o skupenstve pri 25°C , teplote varu (ak je látka pri 25°C v kvapalnom skupenstve) a LC_{50} v jednotkách mg/m^3 pre potkana pri inhalovaní toxického látky po dobu 1 hodiny.

Tabuľka 2.21. Sumarizácia údajov na výpočet limitného množstva látky

Toxická látka	Skupenstvo pri 25°C	LC_{50} (potkan, inhalácia 1 hod.)	G
Chlór	plynné	$850 \text{ mg}/\text{m}^3$ (293 ppm)	300 kg
Chlorovodík	plynné	$4664 \text{ mg}/\text{m}^3$ (3124 ppm)	3000 kg
Amoniak	plynné	$6600 \text{ mg}/\text{m}^3$ (9500 ppm)	3000 kg

V tejto chvíli máme k dispozícii všetky údaje, ktoré potrebujeme na výpočet indikačného čísla pre každé zariadenie všetkých operačných jednotiek. Pre väčšiu prehľadnosť zosumarizujeme doterajšie výsledky do prehľadnej tabuľky:

Tabuľka 2.22. Sumarizácia údajov na výpočet indikačného čísla

OJ	Látka	Q [kg]	O_1	O_2	O_3	G^k [kg]	G^l [kg]	A^k	A^l
1	chlór	2100	1	0,1	10	-	300	-	7
2	etylén	200 000	1	1	10	10 000	-	200	-
	etán	100 000	1	1	10	10 000	-	100	-
	bután	10 000	1	1	10	10 000	-	10	-
	propylén	10 000	1	1	5,4	10 000	-	5,4	-
	propán	50 000	1	1	10	10 000	-	50	-
3	30% HCl	450 000	0,1	1	0,1	-	3000	-	1,5
4	30% HCl	90 000	1	0,1	1,5	-	3000	-	4,5
5	NH ₃	12 000	1	1	10	10 000	3000	12	40
	60% NH ₃	5400	1	1	10	10 000	3000	5,4	18
	benzín	1000	1	1	10	10 000	-	1	-

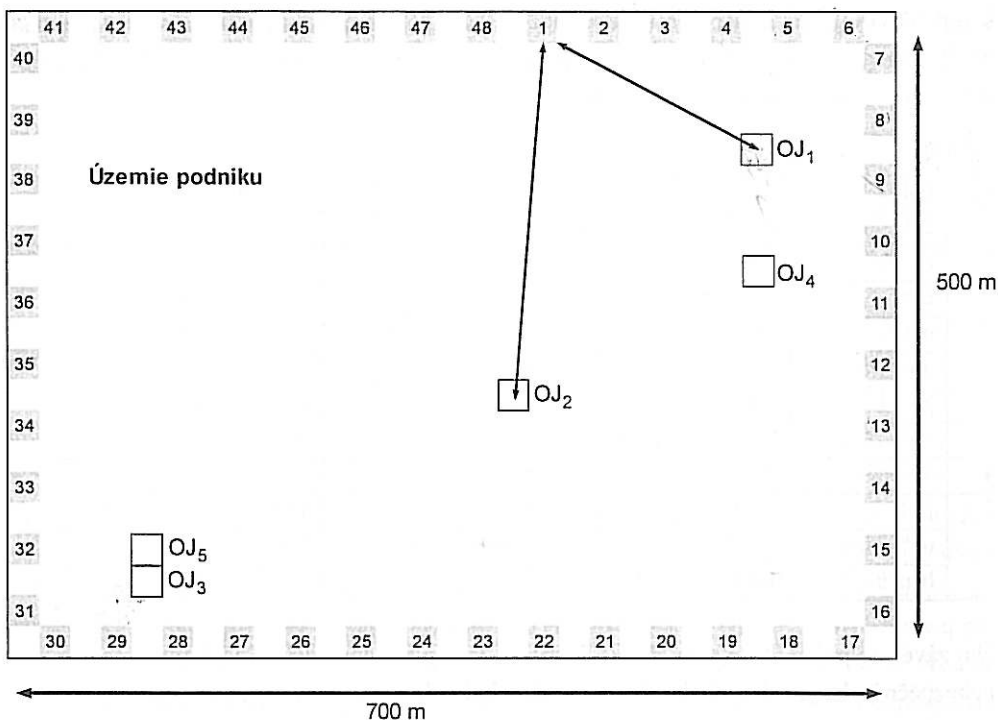
Na záver výpočtu indikačných čísel spočítame indikačné čísla vzťahujúce sa na každú nebezpečnú vlastnosť pre jednotlivé operačné jednotky:

Tabuľka 2.23. Indikačné čísla pre jednotlivé operačné jednotky

OJ	$A^k = \sum_{i,p} A_{i,p}^k$	$A^l = \sum_{i,p} A_{i,p}^l$
1	-	7
2	365,4	-
3	-	1,5
4	-	4,5
5	18,4	58

Výpočet selekčných čísel – S

Pre výpočet selekčných čísel potrebujeme zdefinovať objekty (body), ktorých ohrozenie operačnými jednotkami nás zaujíma, aby sme vedeli určiť ich vzájomnú vzdialenosť L. Pre vyhodnotenie vplyvu operačných jednotiek v oblastiach bezprostredne za hranicami podniku vytvoríme sieť bodov kopírujúcich hranice podniku s maximálnou vzdialenosťou od seba 50 metrov (Obr. 2.5).



Obr. 2.5. Lokalizácia operačných jednotiek so zvolenými bodmi na hranici podniku

Ako je vidieť z Obr. 2.5, pozdĺž hraníc podniku vzniklo 48 bodov, ktoré sú od seba vzdialené približne 50 m. V tomto momente je teda nutné počítať selekčné čísla na základe vzdialenosti medzi každým bodom (celkom 48 bodov) a každou operačnou jednotkou (5 operačných jednotiek), okrem prípadov, keď je vzdialenosť medzi bodom a operačnou jednotkou menej ako 100 metrov. Pre operačnú jednotku číslo 5 budeme počítať selekčné čísla pre každý bod dvakrát. Výsledkom budú selekčné čísla vzťahujúce sa k nebezpečným vlastnostiam horľavosti S^F a toxicity S^T . Napríklad, vzdialenosť medzi prvým vzťažným bodom a operačnou jednotkou číslo 1 je 201,6 metrov. Pre operačnú jednotku číslo 1 budeme počítať selekčné číslo hovoriace o toxicite:

$$S_{1-OJ1}^T = \left(\frac{100}{L}\right)^2 A^T = \left(\frac{100}{201,6}\right)^2 7 = 1,7 \quad (2.26)$$

Ďalej môžeme pokračovať výpočtom pre ten istý bod a operačnú jednotku číslo 2, ktorá je vzdialená 301 metrov:

$$S_{1-OJ2}^F = \left(\frac{100}{L}\right)^3 A^F = \left(\frac{100}{301}\right)^3 365,4 = 13,4 \quad (2.27)$$

a v podobnom trende by sme pokračovali pre všetky zvolené body a všetky operačné jednotky, kým by sme nevytvorili komplexnú tabuľku selekčných čísel, pomocou ktorej potom vyselektujeme najnebezpečnejšie operačné jednotky. Pre každý zvolený bod vyberieme operačnú jednotku, ktorej selekčné číslo má najvyššiu hodnotu, prípadne ďalšie

operačné jednotky, ktorých selekčné čísla majú hodnotu 50 % a viac z najvyššieho selekčného čísla. Takýmto spôsobom nám vyšlo, že v rámci podniku s ohľadom na ich vplyv až za hranice podniku najnebezpečnejšie operačné jednotky sú 1, 2 a 5.

Tabuľka 2.24. Finálna tabuľka s vyselektovanými operačnými jednotkami

Bod	S_{O11}^T	S_{O12}^F	S_{O13}^T	S_{O14}^T	S_{O15}^T	S_{O15}^F	Vyselektované OJ
1	1.7	13.4	0	0.6	2	0.1	2
2	2.7	12.3	0	0.8	1.8	0.1	2
3	4.5	10.6	0	1	1.6	0.1	2
4	6.6	8.7	0	1.1	1.4	0.1	1, 2
5	6.6	6.9	0	1.1	1.3	0.1	1, 2
6	4.5	5.4	0	1	1.1	0	1, 2
7	4.5	5.4	0	1.1	1.1	0	1, 2
8	6.6	6.9	0	1.8	1.2	0.1	1, 2
9	6.6	8.7	0	2.9	1.3	0.1	1, 2
10	4.5	10.6	0	4.2	1.4	0.1	2
11	2.7	12.3	0	4.2	1.5	0.1	2
12	1.7	13.4	0	2.9	1.5	0.1	2
13	1.2	13.4	0	1.8	1.6	0.1	2
14	0.8	12.3	0	1.1	1.6	0.1	2
15	0.6	10.6	0	0.7	1.6	0.1	2
16	0.5	8.7	0	0.5	1.6	0.1	2
17	0.4	9.3	0	0.5	1.7	0.1	2
18	0.4	13.4	0.1	0.5	2.1	0.1	2
19	0.4	19.4	0.1	0.5	2.5	0.2	2
20	0.4	27.8	0.1	0.5	3.1	0.2	2
21	0.4	37.5	0.1	0.4	4	0.3	2
22	0.4	44.6	0.1	0.4	5.2	0.5	2
23	0.3	44.6	0.2	0.3	7.1	0.8	2
24	0.3	37.5	0.3	0.3	10.3	1.3	2
25	0.3	27.8	0.5	0.2	16	2.6	2.5
26	0.2	19.4	0.8	0.2	27.3	5.8	2.5
27	0.2	13.4	1.5	0.2	51.6	15.1	5
28	0.2	9.3	1.5	0.1	58	18	5
29	0.2	6.6	1.5	0.1	58	18	5
30	0.1	4.8	1.5	0.1	51.6	15.1	5
31	0.1	4.4	1.4	0.1	46.4	12.9	5
32	0.2	5	1.4	0.1	58	18	5
33	0.2	5.4	1	0.1	46.4	12.9	5
34	0.2	5.7	0.6	0.1	29	6.4	5
35	0.2	5.7	0.4	0.1	17.8	3.1	5
36	0.2	5.4	0.2	0.1	11.6	1.6	5
37	0.2	5	0.2	0.1	8	0.9	2.5
38	0.2	4.4	0.1	0.1	5.8	0.6	2.5
39	0.2	3.8	0.1	0.1	4.4	0.4	2.5
40	0.2	3.2	0.1	0.1	3.4	0.3	2.5
41	0.2	3.3	0.1	0.1	3.1	0.2	2.5
42	0.2	4.2	0.1	0.1	3.2	0.2	2.5
43	0.3	5.4	0.1	0.2	3.2	0.2	2.5
44	0.4	6.9	0.1	0.2	3.1	0.2	2
45	0.5	8.7	0.1	0.2	3	0.2	2
46	0.6	10.6	0.1	0.3	2.7	0.2	2
47	0.8	12.3	0.1	0.4	2.5	0.2	2
48	1.2	13.4	0.1	0.5	2.3	0.1	2

2
2
2
2
2

2.3 Kontrolný zoznam – Checklist

Metóda kontrolného zoznamu je založená na vytvorení a aplikácii zoznamu špecifických otázok na identifikáciu známych nebezpečenstiev, projektových nedostatkov a potenciálnych technologických problémov spojených so zariadeniami a procesmi. Analýza kontrolného zoznamu sa používa veľmi jednoducho a môže byť aplikovaná v ktoromkoľvek štádiu životného cyklu procesu. Môže byť použitá pre identifikáciu nebezpečenstiev pre existujúce procesy, s ktorými má prevádzkovateľ dlhoročné skúsenosti. Často sa používa už v priebehu projektovania ešte neexistujúceho procesu, keď sa využívajú skúsenosti získané pri prevádzkovaní podobných procesov. Správne používanie kontrolného zoznamu vedie k uisteniu, že analyzované procesy, či už existujúce alebo procesy v štádiu projektovania, spĺňajú požiadavky príslušných noriem a predpisov. Kontrolné zoznamy sa navzájom líšia kvalitou, rozsahom a úrovňou detailov, nakoľko závisia od účelu, podkladov a zložitosti procesov, čím sa stávajú silne špecifické pre konkrétny proces. Okrem primárneho cieľa identifikácie nebezpečenstva býva metodika kontrolného zoznamu využívaná ako prostriedok a forma riadenia vývoja procesu od jeho projektu až po likvidáciu. Rovnako efektívne môže byť využitá pri zoznamovaní sa neskúseného personálu s procesom pomocou porovnania existujúceho stavu s požiadavkami uvedenými v kontrolnom zozname.

Proces identifikácie nebezpečenstva pomocou metodiky kontrolného zoznamu možno rozdeliť do troch hlavných krokov:

- vytvorenie kontrolného zoznamu,
- prevedenie analýzy,
- dokumentácia výsledkov analýzy.

2.3.1 Vytvorenie vhodného kontrolného zoznamu

Pri príprave vhodného kontrolného zoznamu je nutné mať k dispozícii podklady obsahujúce informácie o zariadeniach, zásobovaní, fázach výroby (nábeh, odstávka), pracovných postupoch, operačných procedúrach, bezpečnostných normách a predpisoch, ktoré sa na posudzovanú prevádzku (proces) vzťahujú. Odborníkmi pripravovaný kontrolný zoznam obsahuje súbor otázok založených na nedostatkoch a odchýlkach od projektových alebo prevádzkových postupov, ktoré musia byť zadefinované už v prípravnej fáze. Formulácia otázok by mala umožňovať stručné odpovede typu „áno“, „nie“, „neaplikovateľné“. S kvalitne pripraveným kontrolným zoznamom by následne mala byť schopná pracovať aj osoba, ktorá nemá bezprostredné skúsenosti s metodikami identifikácie nebezpečenstva.

2.3.2 Prevedenie samotnej analýzy

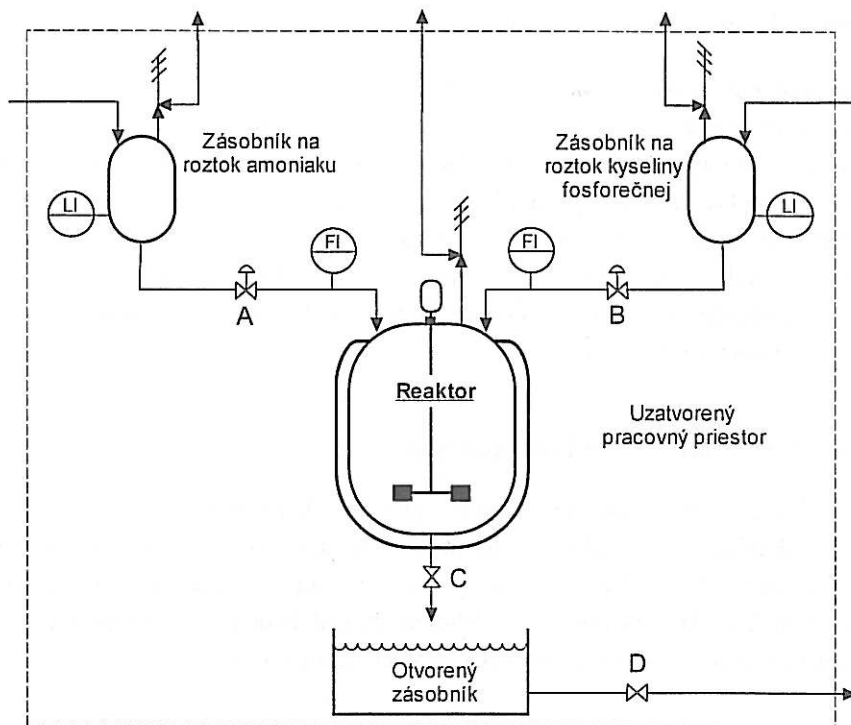
Prevedenie samotnej analýzy môžeme jednoducho zadefinovať ako sumarizovanie odpovedí na otázky kontrolného zoznamu. Vykonávateľ analýzy kladie otázky kompetentným pracovníkom, ktorí majú vedomosti o aktuálnom stave posudzovanej prevádzky. V mnohých prípadoch je účelné vykonať fyzickú kontrolu stavu prevádzky. Počas rozhovorov s kompetentnými pracovníkmi a samotnej fyzickej kontrole stavu je nutné podrobne zaznamenávať nielen odpovede na otázky, ale aj skutočnosti, ktoré sú v nesúlade s existujúcim kontrolným zoznamom do takej miery, že by bolo nutné kontrolný zoznamu upraviť, alebo dokonca vytvoriť nový.

2.3.3 Dokumentácia výsledkov analýzy

Správa z vykonania bezpečnostnej analýzy metódou kontrolného zoznamu by okrem samotných odpovedí na otázky kontrolného zoznamu mala obsahovať sumarizáciu nedostatkov, ktoré boli identifikované počas stretnutí s kompetentnými pracovníkmi resp. počas fyzických kontrol prevádzky. Vhodné je, keď hodnotitelia navrhnú odporúčania na zlepšenie bezpečnosti, ktoré by mali byť dostatočne zdôvodnené.

2.3.4 Ukážka aplikácie kontrolného zoznamu

Na obrázku (Obr. 2.6) je schematicky znázornená časť prevádzky na kontinuálnu výrobu $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Vodný roztok amoniaku a kyseliny fosforečnej sa dávajú do prietokového miešaného reaktora pomocou regulačných obvodov *A*, *B*. Reaktor a aj zásobníky na vodný roztok amoniaku a kyseliny fosforečnej sú vybavené poistnými ventilmi s vývodom mimo uzatvoreného pracovného priestoru. Počas reakcie vzniká aj sekundárny produkt, ktorý nie je toxický ani horľavý. Produkt vyteká z reaktora do otvoreného zásobníka.



Obr. 2.6. Prúdová schéma prevádzky na výrobu $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

Poruchové stavy:

- **Vyšší prietok kyseliny fosforečnej** – ak je prietok kyseliny fosforečnej do reaktora vyšší, ako je zámer vyplývajúci z prietoku vodného roztoku amoniaku, potom vznikne viac vedľajšieho neželaného produktu. Reakcia prebieha bezpečne, nedochádza k zvýšeniu teploty a tlaku. Následkom vyššieho prietoku kyseliny fosforečnej do reaktora je znečistenie produktu, čo nepredstavuje bezpečnostný problém, „iba“ technologicko-ekonomický problém;
- **Vyšší prietok oboch reaktantov** – ak je prietok amoniakového roztoku a aj kyseliny fosforečnej do reaktora vyšší ako je projektovaný zámer, nastane intenzívnejšia produkcia tepla s následným nárastom teploty a tlaku na hodnoty, na ktoré nie je reaktor dimenzovaný, čo môže mať za následok nebezpečnú situáciu;
- **Vyšší prietok amoniakového roztoku** – ak je prietok amoniakového roztoku do reaktora vyšší ako zámer (s ohľadom na odpovedajúci prietok kyseliny fosforečnej), potom sa nezreagovaný amoniak môže dostať do otvoreného produktového zásobníka, z kade bude prenikať do pracovného priestoru, čo spôsobí toxické ohrozenie obsluhy. Následkom vyššieho prietoku amoniakového roztoku do reaktora je nebezpečná situácia toxického ohrozenia obsluhy, preto je pracovný priestor vybavený detektorom na amoniak.

Ukážka kontrolného zoznamu:

Zostavený kontrolný zoznam môžeme rozdeliť do troch častí. Jednotlivé časti kladú otázky týkajúce sa rôznych aspektov prevádzky: zariadenia, materiál a procedúry. V tabuľke (Tab. 2.25) sa nachádzajú príklady odpovedí na položené otázky aj s poznámkami, ktoré boli zaznamenané na doplnenie stručných odpovedí:

Tabuľka 2.25. Ukážka kontrolného zoznamu

Kontrolný zoznam na zariadenia		
Otázka	Odpoveď	Doplňujúca poznámka – odporúčenie
Boli všetky časti jednotky kontrolované podľa plánovaných kontrol?	Áno.	Kontroly boli vykonávané v súlade s inšpekčnými štandardmi spoločnosti, avšak na základe údajov o poruchovosti z oddelenia údržby vyplýva, že zariadenie operujúce s kyselinou by sa malo kontrolovať častejšie.
Boli všetky bezpečnostné ventily kontrolované podľa plánu kontrol?	Áno.	
Bol bezpečnostný systém kontrolovaný dostatočne často?	Áno.	Frekvencia testovania bola dodržaná, ale prebiehala počas prevádzky, čo je v prísnom rozpore s prevádzkovými predpismi firmy.
Sú náhradne časti zariadenia k dispozícii?	Áno.	Firma má vypracovaný logistický systém dodávania nízko nákladových náhradných dielov. Nákladnejšie – väčšie náhradné dielce sú zabezpečované prostredníctvom lokálneho distribútora v priebehu pár hodín.
Kontrolný zoznam na procedúry		
Otázka	Odpoveď	Doplňujúca poznámka – odporúčenie
Sú písomné prevádzkové postupy aktuálne?	Áno.	Písomné prevádzkové postupy boli aktualizované pred 6 mesiacmi, pretože došlo k malým zmenám v operačných postupoch.
Dodržiavajú operátori uvedené prevádzkové postupy?	Nie.	Ostatná zmena prevádzkového postupu sa ťažko implementovala, pretože operátori majú pocit, že uvedená zmena neprináša zvýšenie ich bezpečnosti (je iba formálna) a z toho dôvodu ju obchádzali.
Sú noví pracovníci dostatočne pripravovaní/trénovaní?	Áno.	Firma má vypracovaný systém periodického školenia a testovania, s relevantnou dokumentáciou.
Je zabezpečená výmena informácií medzi striedajúcimi smenami?	Áno.	Prekryv zmien je 30 minút, kde končiaca informuje novú zmenu o aktuálnom stave prevádzky.
Kontrolný zoznam na materiál		
Otázka	Odpoveď	Doplňujúca poznámka – odporúčenie
Je kvalita dodávaných surovín kontrolovaná počas každého príjmu?	Áno.	Dodávateľ je overený. Označenie na cisternách a dodacích formulároch sú kontrolované, ale vzorky materiálu sa pred príjmom neodoberajú.

Majú prevádzkari prístup ku kartám bezpečnostných údajov?	Áno.	Karty bezpečnostných údajov sú 24 hodín k dispozícii na prevádzke a aj na firemnom intranete.
Sú hasiace zariadenia a ochranné prostriedky na prevádzke vhodne umiestnené a udržiavané?	Nie.	Na prevádzke sa postavila nová stena, čím sa zhoršil prístup k hasiacim zariadeniam a nie je ich možné adekvátne použiť.

Tabuľka (Tab. 2.25) obsahuje ukážku otázok a možných odpovedí kontrolného zoznamu pre časť prevádzky, na ktorej sa nachádza reaktor, v ktorom prebieha exotermická chemická reakcia. Na prvý pohľad je zjavné, že ide o veľmi stručnú ukážku a že počet otázok kontrolného zoznamu, ktoré by sa pre daný príklad dali aplikovať, je mnohonásobne viac. V tabuľke (Tab. 2.26) sú uvedené otázky kontrolného zoznamu, ktoré by sa vo všeobecnosti mohli aplikovať pri posudzovaní bezpečnosti chemického reaktora. Napriek tomu, že tabuľka (Tab. 2.26) obsahuje omnoho viac otázok týkajúcich sa chemického reaktora ako tabuľka (Tab. 2.25), nemôžeme tento zoznam považovať za úplný.

Tabuľka 2.26. Otázky kontrolného zoznamu pre chemický reaktor

Exotermická reakcia v reaktore (Čo môže zapríčiniť exotermická reakcia v reaktore?)
<ul style="list-style-type: none"> - Môže nedostatočné chladenie, alebo jeho úplná strata spôsobiť runaway efekt? - Môže nadbytok (zdvojené dávkovanie) jedného z reaktantov, alebo jeho nedostatok spôsobiť runaway efekt? - Môže spôsobiť runaway efekt prídanie reaktantov v nevhodnom poradí? - Môže oneskorená iniciácia reakcie vo vsádzkovom reaktore vďaka nevhodnému nadávkovaniu reaktantov spôsobiť runaway efekt? - Môžu runaway efekt spôsobiť kontaminanty (hrdza, vzduch, voda, olej, čistiace prostriedky, kovy, ...) v reaktore? - Môže neadekvátne (nevhodné, nedostatočné) čistenie spôsobiť runaway efekt? - Môže strata miešania v miešanom reaktore spôsobiť nárast teploty a tlaku, ktoré by mohli viesť k runaway efektu? - Môžu lokálne hot spoty spôsobiť poruchu (zničenie reaktorového lôžka) reaktora? - Môže zvýšená teplota spôsobiť termálnu dekompozíciu, alebo runaway efekt? - Môže prienik teplotného (chladiaceho) média do reakčnej zmesi spôsobiť exotermickú reakciu, alebo runaway efekt? - Môže spätný tok reakčnej zmesi, alebo chladiaceho média spôsobiť runaway efekt? - Môže vyššia teplota v reaktore spôsobiť následné nežiaduce reakcie? - Môže strata inertného plynu spôsobiť runaway efekt?
Miešanie reaktora (Je miešanie obsahu reaktora dostatočne zabezpečené?)
<ul style="list-style-type: none"> - Čo môže spôsobiť miešanie a jeho <ul style="list-style-type: none"> - výpadok? - výpadok a neskoršie reštartovanie? - oneskorené zapnutie? - príliš rýchly, alebo pomalý chod? - chod v opačnom smere? - Ako je monitorovaný chod miešadla?

<ul style="list-style-type: none"> - Môže nedostatok, alebo prebytok materiálu v reaktore, prehriatie materiálu resp. jeho podchladenie viesť k neefektívnemu miešaniu s nebezpečným následkom?
Poistný ventil (Sú poistné ventily na reaktore adekvátne?)
<ul style="list-style-type: none"> - Na akú situáciu bol poistný ventil navrhnutý (výpadok chladenia, externý oheň, runaway reakcia)? - Bol pri dizajne poistného ventilu zohľadnený potenciálny dvojfázový tok? - Je poistný ventil chránený pred upchatím? - Bola zohľadnená strata tlaku pozdĺž reaktora pri dizajne poistného ventilu? - Môže dôjsť k upchatiu reaktora (zrútenie štruktúry reaktora, spečenie, zakoksovanie katalyzátora) a Spôsobiť pretlakovanie reaktora v časti kde nie je poistný ventil? - Môže v reaktore nastať nežiaduce vákuum?
Prekročenie teploty v reaktore (Môže nastať vyššia teplota v reaktore ako je zámer?)
<ul style="list-style-type: none"> - Môžu dôjsť k prehriatiu nástrekov? - Môže nastať runaway efekt? - Môžu vzniknúť hotspotsy? - Môže nastať nekontrolovateľná reakcia, alebo horenie počas regenerácie lôžka reaktora? - Môže preniknúť vzduch do reaktora počas prevádzky? - Môže teplonosné médium preniknúť do reaktora a spôsobiť prehriatie reakčnej zmesi?
Katalyzátor (Aké nebezpečenstvo je spojené s prítomnosťou katalyzátora v reaktore?)
<ul style="list-style-type: none"> - Je katalyzátor pyroforický pred, alebo po použití v reaktore? - Je katalyzátor toxický pred, alebo po použití v reaktore? - Môže uvoľňovať toxické plyny po vybratí z reaktora? - Môže katalyzátor poškodiť reaktor a následné zariadenia počas normálneho chodu, alebo v havarijných situáciách, alebo počas jeho regenerácie? - Za akých podmienok môže dôjsť k znehodnoteniu katalyzátora (zakoksovanie, deaktivácia, pečenie, zborenie jeho štruktúry)?
Údržba reaktora (Aké nebezpečenstvo je spojené s odstávkou/údržbou reaktora?)
<ul style="list-style-type: none"> - Môže nastať runaway reakcia v dôsledku údržby reaktora? - Nemôže dôjsť k prieniku médií, ktoré sa používajú pri údržbe, do reaktora počas prevádzky? - Nemôže dôjsť k prieniku reaktantov do reaktora počas odstávky/údržby? - Je procedúra odstávky reaktora bezpečná? - Je procedúra nábehu reaktora bezpečná?

2.4 Čo ak? – What-If

Metóda Čo ak? je kreatívna a veľmi jednoduchá metóda, ktorá identifikuje možné nebezpečné situácie v procesoch a v zariadeniach. Tím špecialistov posudzuje vybranú prevádzku z hľadiska výskytu možných nebezpečných stavov pomocou otázok, ktoré začínajú otázkou Čo ak...? Uvedená metóda identifikácie môže byť použitá v ktoromkoľvek štádiu životného cyklu procesu (návrh, prevádzka, likvidácia), ale aj pre samotné budovy, energetické systémy, vstupné suroviny, produkty, sklady, transport materiálu, procedúry atď. Na základe dlhoročných skúseností sa ukázalo, že je to veľmi silná metóda na identifikáciu

nebezpečenstva, práve ak ju aplikujú skúsení hodnotitelia, v opačnom prípade môže byť identifikácia nebezpečenstva touto metódou značne nekompletná. Identifikácia nebezpečenstva metódou Čo ak? analýzy pre jednoduché systémy (prevádzky, procesy, procedúry, operácie) môže byť vykonávaná jedným resp. dvoma hodnotiteľmi, avšak analýza komplexnejšieho systému si vyžaduje zostavenie väčšieho tímu hodnotiteľov a dlhší čas na identifikáciu nebezpečenstva. Postup hodnotenia môže byť rôzny v závislosti od definície cieľa resp. zámeru analýzy. Pri hodnotení nebezpečenstva komplexnejšej prevádzky sa zvyčajne začína analýzou vstupných prúdov (surovín), sleduje sa tok materiálu prevádzkou s následnosťou procedúr až smerom k výstupom z prevádzky. Metóda Čo ak? sa môže zamerať aj na určité konkrétne typy následkov hodnotených procesov (osobná bezpečnosť, verejná bezpečnosť, ochrana životného prostredia). Výsledkom analýzy je identifikácia potenciálnych nebezpečenstiev, ktoré vyplývajú z podstaty položených otázok Čo ak...? Otázky sú sústredené na príčiny poruchových stavov, ktorých následkom je určité nebezpečenstvo. Úlohou hodnotiteľského tímu je teda položiť otázku Čo ak...?, v ktorá je sústredená na možnú príčinu poruchového stavu a v rámci odpovede na otázku jednoznačne zdefinovať nebezpečný následok poruchového stavu. Napríklad, na otázku: „Čo ak do reaktora vstupujúca surovina má nesprávnu koncentráciu?“ môže zaznieť odpoveď: „Ak koncentrácia kyseliny bude dvojnásobná, potom reakciu nebude možné bezpečne uregulovať a nastane rýchly nárast teploty.“ Zároveň môže dôjsť k návrhu odporúčenia: „Inštalácia bezpečnostného systému na rýchle odstavenie výroby.“

Postup identifikácie nebezpečenstiev metodikou Čo ak? má tri základné kroky:

- príprava Čo ak? otázok,
- prevedenie samotnej analýzy,
- dokumentácia výsledkov analýzy.

2.4.1 Príprava Čo ak? otázok

Samotná príprava obsahuje zhromaždenie podkladov obsahujúcich informácie o procesoch, materiáloch, zariadeniach, prevádzkových postupoch, bezpečnostných normách atď. V prípade, že hodnotená prevádzka už bola v minulosti podrobená analýze Čo ak?, súčasťou prípravy je vyhodnotenie aktuálnosti v minulosti zostavených otázok a zároveň tím hodnotiteľov môže rozšíriť okruh ľudí, z ktorými bude viesť rozhovor. Môže ísť o obslužný personál alebo údržbu, ktorí disponujú informáciami o aktuálnom stave prevádzky, nakoľko sa môže stať, že písomná dokumentácia nezodpovedá aktuálnemu stavu prevádzky (často býva dopĺňaná s oneskorením). Z tohto dôvodu býva súčasťou prípravy aj fyzická obhliadka posudzovanej prevádzky spojená s aktualizáciou otázok. Ak ide o hodnotenie novej prevádzky, resp. prevádzky, ktorá doposiaľ hodnotená nebola, potom musia hodnotitelia pripraviť relevantné Čo ak? otázky, vychádzajúc zo skúseností a informácií z iných podobných prevádzok. Samozrejme sa očakáva, že aj neskôr, práve počas samotnej analýzy, sa budú spontánne tvoriť ďalšie otázky.

2.4.2 Prevedenie samotnej analýzy

Samotná analýza pozostáva z kladenia pripravených Čo ak? otázok formou rozhovoru prizvaným pracovníkom, ktorí majú aktuálne informácie o prevádzke. V rámci odpovede na položenú otázku by malo byť možné jednoznačne zadefinovať nebezpečný následok poruchového stavu, ktorý zaznel v otázke a uviesť už existujúce, resp. navrhnúť nové opatrenia, ktoré by buď odstránili príčinu, alebo zmiernili následok poruchového stavu. Zvyčajne sa postupuje logicky od vstupu surovín do jednotky (prevádzky) až po výstup produktov (medziproduktov) z výrobných jednotiek. Zoznam pripravených otázok by sa mal spontánne rozširovať o otázky, ktoré vzniknú priamo na stretnutí a sú zamerané na identifikáciu potenciálnych nebezpečenstiev, ktoré môžu viesť k haváriám. Na vykonanie analýzy by mal byť vyhradený dostatočný časový interval, aby sa hodnotitelia nedostali pod časový tlak. Stretnutia by mali byť dôsledne organizované a jedno stretnutie by nemalo byť dlhšie ako 6 hodín. Celé hodnotenie vedie vedúci, ktorý organizuje priebeh analýzy. V prípade väčšej prevádzky je vhodné, aby vedúci tímu rozdelil prevádzku na menšie celky, ktoré by bolo možné posúdiť v priebehu jedného stretnutia.

2.4.3 Dokumentácia výsledkov analýzy

Správa po vykonaní bezpečnostnej analýzy metódou Čo ak? by mala obsahovať zoznam otázok Čo ak? spolu s potenciálnymi nebezpečnými následkami a existujúcimi alebo navrhnutými ochranami. Súčasťou správy by mali byť zosumarizované nedostatky, ktoré boli zistené počas stretnutí, nielen technického resp. bezpečnostného charakteru, ale aj nedostatky zistené v písomnej dokumentácii. Ďalej by správa mala obsahovať odporúčania na zlepšenie bezpečnosti, ktoré by mali byť nielen dostatočne zdôvodnené, ale aj prekonzultované s manažmentom firmy.

2.4.4 Ukážka aplikácie Čo ak? analýzy

Nasledujúca ukážka aplikácie Čo ak? analýzy sa bude týkať časti prevádzky na kontinuálnu výrobu $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, ktorej opis spolu so schematickým obrázkom (Obr. 2.6) bol uvedený v kapitole 2.3.4 (Ukážka aplikácie kontrolného zoznamu). V rámci ukážky analýzy je uvedených iba pár z množstva možných Čo ak? otázok:

Čo ak

- *sa namiesto kyseliny fosforečnej nadávkuje iný materiál?*
- *je koncentrácia kyseliny fosforečnej príliš nízka?*
- *je kyselina fosforečná znečistená?*
- *je ventil B zatvorený alebo upchatý?*
- *sa privedie oveľa vyššie množstvo vodného roztoku amoniaku?*

Tabuľka (Tab. 2.27) sumarizuje: položené otázky, v ktorých sú sústredené možné príčiny poruchového stavu, možné následky a nebezpečenstvá vyplývajúce z poruchového stavu, existujúce bezpečnostné opatrenia a odporúčania, ktoré by mali viesť k eliminácii nebezpečenstva.

Tabuľka 2.27. Ukážka Čo ak? analýzy pre príklad uvedený na Obr. 2.6

EXISTING SECURITY MEASURES

Čo ak	Následok/nebezpečenstvo CONSEQUENCE DANG RISK	Existujúce bezpečnostné opatrenia	Odporúčania RECOMMENDATION
sa namiesto kyseliny fosforečnej nadávkuje iný materiál?	Potenciálne nebezpečenstvo reakcie kyseliny fosforečnej alebo amoniaku s nesprávnym materiálom – generovanie nešpecifikovaných látok	Overený dodávateľ. Kontrola označenia na cisternách a dodacích formulároch	Odoberanie vzorky pred príjmom materiálu
je koncentrácia kyseliny fosforečnej príliš nízka?	Nezreagovaný amoniak sa dostane do otvoreného zásobníka pre produkt a unikne do okolitého pracovného priestoru	Detektor amoniaku v ovzduší s alarmom	Odobratie vzorky a kontrola koncentrácie kyseliny fosforečnej pred dávkovaním do reaktora
je kyselina fosforečná znečistená?	Potenciálne nebezpečenstvo reakcie kyseliny fosforečnej alebo amoniaku s nesprávnym materiálom – generovanie nešpecifikovaných látok	Overený dodávateľ. Kontrola označenia na cisternách a dodacích formulároch	Odoberanie vzorky pred príjmom materiálu
je ventil B zatvorený alebo upchatý?	Nezreagovaná amoniak sa dostane do otvoreného zásobníka pre produkt a unikne do okolitého pracovného priestoru	Detektor amoniaku v ovzduší s alarmom. Pravidelná údržba	Alarm s automatickým uzavretím ventilu A prívodu amoniaku
sa privedie oveľa vyššie množstvo vodného roztoku amoniaku?	Nezreagovaná amoniak sa dostane do otvoreného zásobníka pre produkt a unikne do okolitého pracovného priestoru	Detektor amoniaku v ovzduší s alarmom. Meranie prítoku amoniaku na prívode do reaktora	Alarm s automatickým uzavretím ventilu A prívodu amoniaku

2.5 HAZOP (Hazard and operability study)

HAZOP je, na rozdiel od metód predstavených v predchádzajúcich kapitolách, systematická metóda určená na identifikáciu potenciálnych chýb v zariadeniach, procedúrach resp. prevádzkach, ktoré môžu viesť k nebezpečným situáciám alebo technologickým problémom (AIChE, 1992). Metodika HAZOPu bola vypracovaná v 60. rokoch minulého storočia firmou ICI v Anglicku. V ďalších rokoch sa dynamicky rozvíjala a zakrátko sa stala štandardným prostriedkom v bezpečnostnom inžinierstve, pričom je najpoužívanejšou metódou na

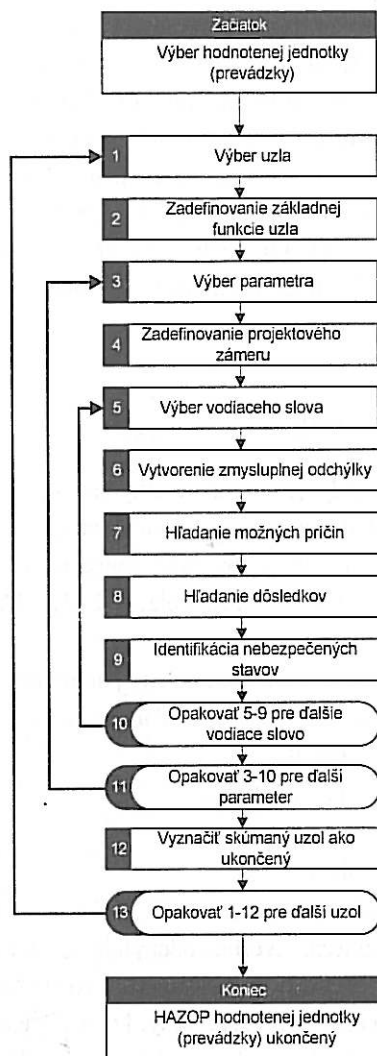
identifikáciu nebezpečenstva v procesnom priemysle. Zásadný vplyv na rozvoj HAZOP metódy mali publikácie od Kletza (Kletz, 1999) a Chemetics Manual (CISHEC, 1977). Samotnú identifikáciu nebezpečenstva uskutočňuje tím ľudí rôznych profesií, ktorých úlohou je kriticky revidovať všetky procesy a pracovné postupy na prevádzke s cieľom nájsť potenciálne zdroje nebezpečenstiev a prevádzkových problémov. Treba však zdôrazniť, že HAZOP analýza sa nemá používať ako náhradná metóda na zásadné vylepšenie samotného projektu. Napríklad ak sa počas HAZOP analýzy nového projektu neustále vynára množstvo zásadných nedostatkov, potom je niečo principiálne chybného na samotnom projekte a treba ho odporučiť na prepracovanie.

2.5.1 Princíp HAZOP metódy

Základný princíp HAZOP metódy je hľadať všetky možné **odchýlky** od **projektovaného zámeru** spôsobené poruchou, nájsť **príčiny** a možné **dôsledky** týchto odchýlok a v konečnom dôsledku aj navrhnúť **opatrenia**, ktoré by buď zabránili vzniku odchýlky, alebo aspoň zmiernili negatívny dôsledok odchýlky. Principiálne body HAZOP analýzy môžeme teda zhrnúť takto:

- definovanie projektového zámeru pre zvolený parameter,
- tvorba odchýlky od zámeru aplikáciou vodiaceho slova,
- hľadanie príčiny/príčin odchýlky,
- hľadanie dôsledku/dôsledkov odchýlky
 - nebezpečné stavy,
 - prevádzkové problémy,
- návrh opatrenia/opatrení (zabránenie vzniku, zmiernenie následku odchýlky).

Definovaniu projektového zámeru, tvorbe odchýlok a ostatným principiálnym krokom HAZOP analýzy predchádza nie menej dôležitý proces rozdelenia hodnotenej jednotky resp. prevádzky na viaceré menšie celky, nazývané **uzly**, ktoré navzájom logicky nadväzujú. Uzol môže predstavovať zariadenie, časť zariadenia, alebo dokonca viacero zariadení, avšak uzol by mal byť volený tak, aby bolo možné jednoznačne zdefinovať jeho základnú funkciu. Každý uzol je charakteristický svojimi **parametrami** a až pre zvolený parameter konkrétneho uzla definujeme projektový zámer. Schematický postup HAZOP analýzy je znázornený na Obr. 2.7.



Obr. 2.7. Schematický postup HAZOP analýzy

2.5.1.1 Definovanie projektového zámeru pre parameter

Po zvolení vyšetřovaného parametra v rámci hodnotenia uzla je nutné definovať projektový zámer pre tento parameter. Definovanie projektového zámeru znamená jednoznačne definovať konkrétnu hodnotu resp. stav parametra, ktorý je žiaduci pre daný parameter za štandardných prevádzkových podmienok. Definovanie projektového zámeru parametra závisí od jeho typu. Parameter môže označovať prevádzkové podmienky (teplota, tlak, pretlak, prietok, výška hladiny, vodivosť, koncentrácia...) V tomto prípade môže projektový zámer parametra predstavovať jeho konkrétna hodnota (*teplota – 100 °C, tlak – 5 MPa, výška hladiny – 80 %, prietok – 20 kg.s⁻¹*). Avšak parameter môže predstavovať nejakú činnosť, respektíve miesto určenia. Ide napríklad o postupnosť krovov pri diskontinuálnych procesoch

(uzamknutie koľaje po príchode cisterny na stáčacie miesto) alebo pri nábehu a odstávke zariadení (otvorenie reaktora po vychladnutí vsádzky). V tom prípade má dôležitú úlohu zadefinovanie priestoru a/alebo času. Pri diskontinuálnych výrobách je často nutné zohľadniť čas a obšírnejšie definovať projektový zámer aj pre prevádzkové podmienky (teplota 100 °C v čase 50 minút od začiatku procesu).

2.5.1.2 Tvorba odchýlok

Tvorba odchýlky od projektovaného zámeru prebieha spojením vybraného hodnoteného parametra, pre ktorý máme zadefinovaný projektový zámer, s vodiacim slovom. Vzhľadom na systematickosť metódy je nutné vytvoriť všetky logické kombinácie parametra s vhodnými vodiacimi slovami. Základný zoznam vodiacich slov je aj s krátkym vysvetlením uvedený v Tabuľke (Tab. 2.28).

Tabuľka 2.28. Zoznam vodiacich slov

Vodiace slovo	Význam	Komentár
NIE, ŽIADEN	úplná negácia zámeru	ani čiastočne sa nedosiahol zámer, ale nič viac sa nestalo
VIAC	kvantitatívny vzrast	týkajúce sa množstiev, vlastností aj aktivít
MENEJ	kvantitatívny pokles	týkajúce sa množstiev, vlastností aj aktivít
AKO AJ NAVYŠE	kvalitatívny vzrast	všetky zámery boli dosiahnuté spolu s nejakou ďalšou udalosťou/aktivitou
ČASŤ Z	kvalitatívny pokles	niektoré zámery boli dosiahnuté, niektoré nie
OPAK	logická negácia zámeru	najčastejšie aplikovateľné na aktivity, stavy (opačný tok, jed – protijed)
INÝ AKO	úplná zámena	nedosiahla sa ani časť pôvodného zámeru, stalo sa niečo iné

Na názornú ukážku aplikácie vodiacich slov pri tvorbe odchýlok si predstavme prevádzku s reaktorom, do ktorého sa **kontinuálne dopravuje surovina A**.

Uzol môžeme pomenovať: *dodávka suroviny A do reaktora.*

Prvý zvolený parameter: *prietok suroviny A* (iné parametre pre ďalšiu analýzu sú napr.: teplota suroviny A, koncentrácia suroviny A, viskozita suroviny A atď.)

Projektový zámer predstavuje hodnotu prietoku suroviny A za štandardných operačných podmienok: $20 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$.

Pri tvorbe odchýlky použijeme prvé vodiace slovo z Tabuľky (Tab. 2.28) „žiaden“ a v kombinácii so zvoleným parametrom vytvoríme odchýlku: *žiaden prietok suroviny A*.

Pod takto vytvorenou odchýlkou treba chápať, že do reaktora nebude vstupovať surovina A, a teda projektový zámer, ktorý hovorí, že do reaktora by malo vstupovať $20 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ suroviny A, jednoznačne nie je splnený.

Odchýlka vyjadrujúca kvantitatívny nárast je spojená s použitím vodiaceho slova „viac“ a v kombinácii s parametrom *prietok suroviny A* vytvoríme odchýlku: *vyšší prietok suroviny*

A. Odchýlka *vyšší prietok suroviny A* znamená, že do reaktora bude vstupovať surovina A s prietokom, ktorý je vyšší, ako bolo definované v zámere, teda $> 20 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$.

Odchýlka vyjadrujúca kvantitatívny pokles je spojená s použitím vodiaceho slova „menej“ a v kombinácii s parametrom *prietok suroviny A* vytvoríme odchýlku: *nižší prietok suroviny A*. Odchýlka znamená, že do reaktora bude vstupovať surovina A s prietokom, ktorý je nižší, ako bolo definované v zámere, teda $< 20 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$.

Odchýlka vyjadrujúca logickú negáciu zámeru dopraviť surovinu A do reaktora je spojená s použitím vodiaceho slova „opak“, čím sa vytvorí odchýlka: *opačný prietok suroviny A*. Odchýlka zahŕňa situáciu, keď surovina v potrubí neprúdi smerom do reaktora, ale z nejakého dôvodu surovina v potrubí prúdi smerom od reaktora. V konečnom dôsledku bude treba analyzovať, či sa môže objaviť tok materiálu z reaktora do zásobníka látky A?

S prietokom suroviny A možno vytvoriť reálnu odchýlku vyjadrujúcu zmenu zámeru s využitím vodiaceho slova „iný“. V tomto prípade sa analyzuje možnosť vzniku inej udalosti, ako je transport suroviny A: *prietok inej suroviny ako A*. Táto odchýlka nehovorí o nesplnení zámeru dodať konkrétny prietok, ale hovorí o nesplnení zámeru dodať surovinu A.

Pri tvorbe odchýlok od projektovaného zámeru **pre diskontinuálne (pretržité) procesy** treba brať do úvahy charakter daného procesu a je aj potrebné použiť vodiace slová v súvislosti s činnosťami s ohľadom na časovú resp. priestorovú os. Napríklad si predstavme prevádzku s vsádzkovým reaktorom, do ktorého sa podľa reglementu ako prvá dávkuje 1 tona suroviny A a až potom katalyzátor. Zámer v tomto prípade môžeme zdefinovať ako: *nadávkovanie 1 tony suroviny A pred nadávkovaním katalyzátora*. Počas HAZOP štúdie sa následne musia zvažovať odchýlky ako napr.:

- nenadávkovaná surovina A,
- nadávkované viacej suroviny A,
- nadávkované menej suroviny A,
- nadávkovaná nielen surovina A (ak sa nadávkuje okrem látky A aj niečo iné),
- nadávkovaná časť zo suroviny A (keby napríklad bola surovina A zmes látok a nadávkovala by sa iba jedna zložka),
- nadávkované niečo iné ako surovina A,
- nadávkovaná surovina A až po nadávkovaní katalyzátora.

Pre vyjadrenie *časovej* závislosti procesov a operácií sa HAZOPe vyskytujú parametre ako trvanie, frekvencia, absolútny čas, postupnosť. Vodiace slová „viac“ a „menej“ sa aplikujú pre trvanie a frekvenciu, vodiace slová „skôr“ a „neskôr“ sa viac používajú v súvislosti s absolútnym časom, zatiaľ čo vodiace slová „začať“ a „skončiť“ s postupnosťou činností. Pri zohľadňovaní *priestoru* a *miesta* sú často sledované parametre poloha, zdroj, miesto určenia, dráha presunu atď., pričom sa spájajú s vodiacimi slovami ako „vyššie“, „nižšie“, „vstup“ a „výstup“.

Pri tvorbe odchýlok je nutné akceptovať základné pravidlá slovenského jazyka, aby vytvorené odchýlky nevyzneli smiešne, a tým zbytočne nerozptyľovali hodnotiaci tím. Zároveň je nutné uvažovať o reálnosti odchýlky. Napríklad výška hladiny kvapaliny v zásobníku môže byť „vyššia“ ako zámer (predpokladajme zámer 3 m od dna zásobníka) respektíve „nižšia“ ako

zámer, ale ťažko bude „opačná“. Tabuľka (Tab. 2.29) niekoľko typických kombinácií vodiacich slov a parametrov pri tvorbe HAZOP odchýlok.

Tabuľka 2.29. Typické kombinácie vodiacich slov a parametrov pri tvorbe HAZOP odchýlok

Základný zoznam odchýlok	
Vodiace slovo	Parameter
Vysoký Nízky Žiadny Opačný	Prietok
Vysoký Nízky	Tlak
Vysoká Nízka	Teplota
Vysoká Nízka Žiadna	Hladina, úroveň
Plyn Kvapalina Tuhá látka	Zmena stavu
Iné Nečistoty	Zloženie
Príliš zavčasu Príliš neskoro Opakované Zabudnuté Vynechané Nemožné	Ľudská činnosť

2.5.1.3 Príčiny, dôsledky odchýlok a odporúčania

Po vytvorení zmysluplnej odchýlky od projektového zámeru pre zvolený parameter je ďalším krokom HAZOP analýzy identifikácia všetkých možných príčin vzniku vytvorenej odchýlky a samozrejme aj jej možných následkov. Nie všetky následky odchýlok od projektového zámeru musia predstavovať zdroj nebezpečenstva pre obslužný personál, alebo dokonca obyvateľstvo mimo územia podniku. V mnohých prípadoch odchýlky spôsobia prevádzkové problémy, ktoré môžu, ale nemusia byť sprevádzané stratami na produkcii. Aj významné straty na produkcii predstavujú vážne následky odchýlok, preto aj v takýchto prípadoch, nielen v prípade identifikácie priameho nebezpečenstva, je nutné hľadať opatrenia na zabránenie vzniku týchto situácií, t. j. zabránenie vzniku odchýlok, alebo opatrenia na zmiernenie, resp. úplnú elimináciu následkov odchýlok. Samozrejme, každé zvyšovanie bezpečnosti prevádzky je často podmienené značnými finančnými nákladmi, ktoré treba zohľadňovať už počas návrhu opatrení.

Vráťme sa k príkladu z predchádzajúcej podkapitoly (2.5.1.2 Tvorba odchýlok), kde boli tvorené odchýlky pre parameter „prietok suroviny A“. Projektový zámer prietoku suroviny A do reaktora predstavoval hodnotu $20 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$.

Prvá vytvorená odchýlka znela: *žiadnen prietok suroviny A*

Možné príčiny odchýlky môžu byť nasledujúce: *zásobná nádrž suroviny A je prázdna; potrubie medzi reaktorom a zásobnou nádržou suroviny A je prerušené; regulačný ventil riadiaci prietok suroviny A do reaktora je zatvorený atď.*

Dôsledok tejto odchýlky môže byť: *explózia, pretože prietok suroviny B by presiahol prietok suroviny A.*

Je zrejmé, že ide nielen o prevádzkový problém, ale o *nebezpečný stav*.

Počas analýzy, ktorá vedie k identifikácii vyššie uvedených príčin a následkov vytvorenej odchýlky sa možno pýtať rôznymi spôsobmi:

- Mohlo by sa stať, aby nebol žiadnen prietok suroviny A?
- Ak áno, ako sa to mohlo stať?
- Aké sú následky toho, že nie je žiadnen prietok suroviny A?
- Ako operátor spozná, že nie je žiadnen prietok suroviny A?
- Sú dôsledky žiadneho prietoku suroviny A nebezpečné, alebo bránia efektívnej prevádzke?
- Ak áno, môžeme zabrániť tomu, aby vznikla takáto situácia (žiadnen prietok suroviny A), alebo zabrániť jeho následkom buď zmenou projektu alebo spôsobom prevádzkovania?
- Ak áno, oprávňuje nás miera nebezpečenstva alebo závažnosť problému zvýšiť náklady?

Tabuľka (Tab. 2.30) uvádza stručný zoznam možných príčin vzniku odchýlok od zámeru vytvorených pomocou štandardných vodiacich slov.

Tabuľka 2.30. Zoznam možných príčin vzniku odchýlok

Vodiace slovo	Odchýlka	Príčiny
ŽIADEN	žiadnen prietok	zablokovanie resp. zlyhanie čerpadla, porucha ventilu, netesnosti, zlyhanie riadenia, pretlakovaná výstupná časť potrubia, prázdna nasávacía nádoba
OPAK	opačný tok	zlyhanie čerpadla, pretlakovaný výstupná časť, reverzné čerpadlo
VIACEJ	vyšší prietok	zlyhanie čerpadla, pretlakovaná nasávacía časť, zlyhanie regulátora, porucha ventilu
	vyššia teplota, tlak, viskozita	požiar, zablokovanie, prehriatie, strata kontroly riadenia, penenie, uvoľňovanie plynov, reakcia, výbuch, zavretý ventil
MENEJ	nížší prietok	zlyhanie čerpadla, netesnosti, tvorba usadenín, čiastočné upchatie, sedimentácia, kavitácia, nedostatočné nasávanie, zmena procesu
	nížšia teplota, tlak, viskozita	straty tepla, odparovanie, podmienky v okolí, dážď, zablokovaný vetrací otvor

ČASŤ Z	zmena zloženia	vysoká alebo nízka koncentrácia zmesi, vedľajšie reakcie v reaktore, zmena vstupu
VIAC AKO	nečistoty alebo iná fáza navyše	vstup nečistôt ako napr. vzduch, voda, mazacích olejov, produktov korózie, prítomnosť iných materiálov (nečistôt), zlyhanie izolácie, zmeny na vstupe
INÉ	iné aktivity ako normálny priebeh	nábeh a odstavenie prevádzky, kontroly, vzorkovanie, údržba, aktivovanie katalyzátora, odstraňovanie upchávka z vodného kameňa, korózie, aktivácia bezpečnostných akcií, strata energie, palív, pary, vzduchu, vody, inertného plynu

2.5.2 Organizácia HAZOP analýzy

V HAZOP štúdií sa postupuje podľa nasledujúcich krokov:

- definícia cieľov HAZOP analýzy,
- zostavenie pracovného tímu,
- príprava na HAZOP analýzu,
- priebeh analýzy – vedenie a práca tímu,
- záznam z HAZOP analýzy.

2.5.2.1 Definícia cieľov HAZOP analýzy

Ako už bolo definované v úvode, primárnym cieľom HAZOP analýzy je identifikácia potenciálnych chýb v zariadeniach, procedúrach resp. prevádzkach, ktoré môžu viesť k nebezpečným situáciám alebo prevádzkovým problémom (AIChE, 1992). Všeobecne ide o *kontrolu existujúceho stavu a operatívnych procedúr* z dôvodu identifikácie možných nebezpečenstiev a/alebo prevádzkových problémov. Súčasne sa taktiež *kontroluje úplnosť informácií o zariadeniach, zásobovacích informáciách, fázach výroby (nábeh a odstávka), pracovných postupoch a inštrukciách a o bezpečnosti práce (pracovníkov, zariadení, obyvateľstva a životného prostredia)*. Cieľom HAZOP analýzy môže byť *kontrola projektu*, avšak nemá byť použitá ako náhradná metóda na zásadné vylepšenie samotného projektu.

2.5.2.2 Zostavenie pracovného tímu

HAZOP analýza je vypracovaná multidisciplinárnym tímom, ktorý by mal pozostávať z ľudí z projekcie a z výroby, ktorí majú dostatok skúseností s hodnotenou prevádzkou (projektom, zariadením, procedúrou), sú schopní sa rozhodovať a absolvovať všetky stretnutia. Na druhej strane nie je žiaduce, aby tím pozostával z veľkého počtu ľudí. Šesť až sedem ľudí je zvyčajne dostatočný počet. Zloženie pracovného tímu sa líši v závislosti od toho, či ide o HAZOP existujúcej prevádzky, alebo o kontrolu projektu prevádzky. Zložitosť moderných prevádzok je príčinou, prečo je často takmer nemožné vidieť zlyhanie a problémy pokiaľ sa systematicky nerozanalyzuje celý projekt. Niektoré z nehôd sú spôsobené nevedomovaním si všetkých

súvislosti a nedostatočnej komunikácii odborníkov už v projektovej fáze. Práve HAZOP analýza dáva možnosť krok po kroku prekontrolovať projekt a uvažovať o všetkých možných odchýlkach, čo môže viesť k odhaleniu prehliadnutých nedostatkov projektu.

V prípade HAZOPu, ktorého cieľom je kontrola nového projektu je obvyklé nasledujúce zloženie pracovného tímu (presné pomenovanie funkcie sa líši v závislosti od štruktúry manažmentu a veľkosti firmy):

- **projektový inžinier** zvyčajne strojný inžinier, osoba zodpovedná za udržanie investičných nákladov v daných medziach. Na jednej strane sa snaží minimalizovať počet zmien v projekte (a tým aj súvisiace náklady), ale zároveň sa snaží nájsť, všetky možné doteraz neznáme nebezpečenstvá resp. prevádzkové problémy,
- **prevádzkový inžinier** zvyčajne chemický inžinier, ktorý bude poverený riadením prevádzky (od nábehu až po odstávku) s prislúchajúcou zodpovednosťou, preto inklinuje k zmenám, ktoré mu zjednodušia činnosť.
- **inžinier riadenia (automatizér)** zodpovedá za automatizáciu prevádzky, diaľkové riadenie prevádzky, automatické alarmy, ochrany,
- **chemik výskumník** je súčasťou tímu ak je zavedený nový chemický proces,
- **nezávislý vedúci** je expert v technike HAZOP, nie je expert pre daný typ prevádzky, ale zvyčajne zodpovedá za prípravu stretnutí, vypracovanie programu stretnutia, výber členov tímu a poučenie členov tímu o ich úlohe počas HAZOP analýzy, zabezpečenie potrebnej dokumentácie k jednotlivým stretnutiam, priebeh štúdie, dodržanie časového rozvrhu počas stretnutí a záznam stretnutí.

Ak je objektom štúdie už existujúca prevádzka, potom by tím mal pozostávať z:

- **prevádzkový inžinier** zodpovedný za prevádzku, zodpovedný za stav strojného zariadenia, je informovaný o všetkých nedostatkoch, ktoré sa vyskytujú,
- **prevádzkový majster** osobne dohliada na činnosti pracovníkov na prevádzke, na základe osobne skúsenosti vie odhadnúť čo by sa mohlo stať pri vzniku odchýlok,
- **inžinier riadenia (automatizér)** zodpovedá za automatizáciu prevádzky, diaľkové riadenie prevádzky, automatické alarmy, ochrany,
- **prevádzkový výskumník** zodpovedný za sledovanie (výskum) technických problémov a za prenos laboratórných výsledkov do prevádzkových rozmerov,
- **manažér údržby** zodpovedný za realizáciu úprav a údržbu,
- **nezávislý vedúci** je expert v technike HAZOP, nie je expert pre daný typ prevádzky, ale zvyčajne zodpovedá za prípravu stretnutí, vypracovanie programu stretnutia, výber členov tímu a poučenie členov tímu o ich úlohe počas HAZOP analýzy, zabezpečenie potrebnej dokumentácie k jednotlivým stretnutiam, priebeh štúdie, dodržanie časového rozvrhu počas stretnutí a záznam stretnutí.

Členovia HAZOP tímu s výnimkou nezávislého vedúceho nemusia pred začiatkom samotnej HAZOP analýzy absolvovať priveľa prípravy a tréningu ohľadom samotnej metodiky. Môžu si osvojiť techniku za pochodu. Z hľadiska práce tímu je však oveľa efektívnejšie, ak členovia tímu absolvovali základné školenie o metodike, čím sa skrátí „doba nábehu tímu“ a začiatok reálnej práce na štúdiu. Ak je niektorý z členov súčasťou HAZOP tímu prvýkrát a v minulosti

nepodstúpil základné školenie o metodike, vedúci by mal začať s desaťminútovým úvodným vysvetlením.

Treba zdôrazniť, že členovia tímu, okrem nezávislého vedúceho, by mali byť experti pre daný proces resp. mali by v danej problematike pracovať minimálne jeden – dva roky. V prípadoch, keď sa členovia tímu nie sú schopí dohodnúť v niektorom diskutovanom bode, nezávislý vedúci by mal tento bod vylúčiť z programu stretnutia a dať ho posúdiť ďalším expertom (napr. materiálový inžinier) mimo HAZOP tímu. HAZOP nie je technika na tréning kreatívneho myslenia a evokáciu nových nápadov, týkajúcich sa procesu. Je to technika, ktorá má umožniť prizvaným expertom usporiadať ich skúsenosti a znalosti systematickým spôsobom tak, aby sa neprehliadli možné nebezpečné situácie, alebo prevádzkové problémy. Tím by mal mať právomoc (autorizáciu) odsúhlasiť väčšinu navrhovaných zmien priamo na stretnutí, aby sa proces hodnotenia zbytočne nespomaľoval vysvetľovaním dôvodov k jednotlivým zmenám ďalším na samotnom HAZOPe neprítomným osobám. Členovia tímu by sa mali vyvarovať posielania na stretnutia HAZOP tímu svojich zástupcov, nakoľko tí zvyčajne nemajú vedomosti z predchádzajúcich schôdzí a postup pri riešení problémov sa spomali.

2.5.2.3 Príprava na HAZOP analýzu

Ako už bolo spomenuté, členovia HAZOP tímu, s výnimkou nezávislého vedúceho, nemusia pred začiatkom samotnej HAZOP analýzy absolvovať prívľa teoretickej prípravy ohľadom samotnej HAZOP metodiky. Príprava spočíva v získaní a zoznámení sa s kompletnou technickou dokumentáciou hodnotenej prevádzky ako napr. potrubná a inštrumentálna schéma (PI&D), procesná prúdová schéma so sprievodnou dokumentáciou, prevádzkové a technologické predpisy, bezpečnostné predpisy so zoznamom spracovávaných materiálov, atď. S technickou dokumentáciou sa zoznamuje aj nezávislý vedúci, ktorý síce nie je expert pre daný typ prevádzky, ale je expert v technike HAZOP. Získané informácie sa následne posudzujú a upravujú do jednoduchšej a zrozumiteľnejšej podoby, aby bolo možné na ich základe pripraviť plán jednotlivých krokov štúdie a v neposlednom rade pripraviť program stretnutí, resp. určiť začiatok analýzy.

Pri HAZOP analýze, ktorej cieľom je kontrola projektu, je veľmi dôležité rozhodnutie, kedy sa samotná štúdia začne. Nevýhoda veľmi skoro začatej štúdie môže byť v nedostupnosti všetkých dôležitých informácií. V takejto situácii vzniká riziko, že sa v projekte urobia zásadné zmeny, ktoré budú mať negatívny vplyv na bezpečnosť a operatívnosť prevádzky. Na druhej strane, výhodou skoro začatej štúdie je, že zmeny vychádzajúce zo samotnej štúdie sa ľahšie začlenia do projektu a následne zrealizujú. V prípade veľmi neskoro začatej štúdie sa zmeny ťažšie a drahšie zakomponujú do už ukončeného projektu. Avšak v princípe sa HAZOP analýza nemôže začať pred skompletizovaním dokumentácie (prúdovej schémy). V prípade posudzovania existujúcej prevádzky, prvý krok prípravy spočíva v overení, či papierová dokumentácia prevádzky korešponduje s jej aktuálnym stavom. Začať HAZOP s nesprávnou dokumentáciou je jednou z najnezmyselnejších prác na svete.

V rámci prípravy na HAZOP analýzu je dôležitá príprava plánu stretnutí. Odporúčaná dĺžka stretnutia je 3 – 5 hodín denne, 2 až 4-krát za týždeň tak, aby členovia tímu mohli plniť aj svoje ďalšie povinnosti. Dĺžka stretnutí by nemala prekročiť odporúčané limity, pretože po niekoľkých hodinách sústredenia prichádza únava. Pri HAZOP analýze hlavných uzlov prevádzky (destilačný prístroj, pec, reaktor, výmenník, atď.) treba počítať s potrebným časom zhruba hodinu a pol až tri hodiny v závislosti od skúseností HAZOP tímu a od komplikovanosti uzla.

Realizácia HAZOP analýzy na veľkom projekte (veľká prevádzka, podnik) môže celkovo trvať aj niekoľko mesiacov, napriek tomu, že dva – tri HAZOP tímy môžu pracovať paralelne na rôznych častiach prevádzky. Táto časová náročnosť môže spôsobiť komplikácie najmä v prípade, keď cieľom HAZOP analýzy je kontrola projektu a brzdi jeho dokončenie. V takomto prípade treba zvážiť dve základné možnosti:

- a) pozastaviť práce na detailnej konštrukcii projektu, pokiaľ HAZOP nie je ukončený,
- b) umožniť pokrok v detailnej projekcii s rizikom potreby neskoršej modifikácie projektu v čase, keď budú známe výsledky HAZOP analýzy.

V ideálnom prípade by mal byť časový harmonogram prípravy projektu plánovaný tak, aby bolo možné pozastaviť práce na projekte (možnosť (a)), avšak zvyčajne je požiadavka na rýchle ukončenie projektu, a teda prichádza do úvahy iba možnosť neskoršej modifikácie projektu podľa výsledkov HAZOPu (možnosť (b)).

2.5.2.4 Pribeh analýzy – vedenie a práca tímu

Pri HAZOP analýze je niekoľko dôležitých faktorov, ktoré vplyvajú na úspešnosť tejto metódy. Medzi dôležité faktory patrí odborná úroveň vedúceho tímu. Nezávislý vedúci tímu by mal mať skúsenosti s HAZOP analýzou, pritom však nemusí byť expert pre daný proces. Napriek tomu je jeho úloha veľmi dôležitá, pretože jeho prácou je riadiť tím tak, aby postupoval podľa metodiky a efektívne dosahoval stanovené ciele. Musí mať skúsenosti s vedením ľudí, ktorí mu nie sú podriadení, preto je vhodné, aby vedúci HAZOP tímu prešiel vhodným školením pre HAZOP analýzu.

Keďže HAZOP analýza používa formálny až mechanický postup a v mnohých prípadoch vytvorené otázky znejú nerealisticky alebo veľmi triviálne. Je práve na vedúcom, aby ostatným členom tímu pomohol pri vizuálnej predstave možných odchýlok, aby ľahšie identifikovali ich príčiny a dôsledky, pretože účinnosť HAZOP štúdie veľmi závisí od kvality pracovnej atmosféry. Ďalšou úlohou vedúceho tímu je dosiahnuť efektívnu a vyváženú komunikáciu medzi jednotlivými členmi tímu a zjednocovať ich expertné poznatky. Treba tu explicitne zdôrazniť, že úlohou vedúceho nie je identifikovať jednotlivé nebezpečenstvá alebo operatívne problémy, ale riadiť tím tak, aby došlo k procesu identifikácie nebezpečenstva. Zároveň sa musí uistiť, či skúmanie jednotlivých nebezpečenstiev nie je až príliš formálne, alebo naopak nezachádza do takej hĺbky, že síce identifikujú všetky nebezpečenstvá, ale za neúmerne dlhý čas.

Ďalej bude uvedených niekoľko bodov, na ktoré musí nezávislý vedúci myslieť počas HAZOP analýzy:

Nenechať sa uniesť

Je možné, že entuziazmus zavedie tím k odporúčaniam nainštalovať drahé zariadenie na ochranu pred málo pravdepodobným nebezpečenstvom. Vedúci by mal zabrániť takejto situácii poukázaním na objektívne údaje o frekvencii výskytu nebezpečnej situácie, resp. na vážnosť následkov tejto situácie. Niekedy môže odporučiť vykonať kompletnú detailnejšiu analýzu nebezpečenstva, ale rovnako môže tímu pomôcť získať nadhľad zámerným položením otázok typu: „Ako často podobná pumpa v minulosti netesnila? Ako často netesní spojovacie potrubie a ako ďaleko strieka kvapalina? Ako často operátor zabudne zatvoriť ventil, keď počuje zvuk alarmu?“ Aby vedúci vedel posúdiť efektívnosť navrhnutého opatrenia, musí sa orientovať nielen v HAZOP metodike, ale aj v analýze nebezpečenstva.

Hardware verzus software

Pracovný tím býva zložený najmä z inžinierov, ktorí zvyčajne uprednostňujú opatrenia smerujúce k hardwarovému vylepšovaniu procesu. Avšak v niektorých prípadoch je hardwarové riešenie nemožné, alebo príliš drahé. Vtedy je vhodnejšie pristúpiť k opatreniam, ktoré zahŕňajú zmenu metodiky práce, alebo v niektorých prípadoch postačí iba lepšie zaškolenie obsluhy, t. j. zmena softwaru. Inštalácia komplikovaných hardwarových systémov riadenia a ochrany nemusí viesť k vylepšeniu bezpečnosti procesu najmä vtedy ak nie je v súlade s odbornosťou a skúsenosťami obsluhy. V takých prípadoch je potrebné hľadať menej komplikované riešenia.

Malé zmeny (modifikácie) na prevádzke

HAZOP analýza, ako komplexná a časovo náročná metodika, nie je vždy vhodná pre analýzu bezpečnosti po malých zmenách (modifikáciách) na prevádzke. Nie je efektívne zavolať HAZOP tím zakaždým, keď chceme nainštalovať nový ventil. Na druhej strane, veľa nehôd (až havárií) vzniklo vďaka tomu, že malé úpravy na prevádzke viedli k vedľajším neočakávaným následkom. Práve z tohto dôvodu je nutné analyzovať dopady zmien, ktoré sa budú na prevádzke zavádzať, avšak nie je nutné za každých okolností využiť HAZOP analýzu.

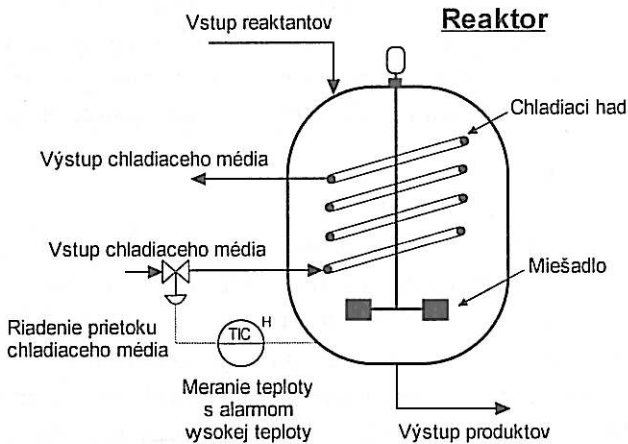
2.5.2.5 Záznam HAZOP analýzy

Vedúci HAZOP tímu okrem iného, často plní úlohu zapisovateľa. Záznam by mal zachytávať relevantné závery, na ktorých sa zhodli členovia tímu, nemalo by ísť o podrobný prepis rozhovorov, ktoré počas HAZOP analýzy prebehli. Po skončení každého stretnutia by mal byť písomný záznam k dispozícii všetkým členom HAZOP tímu na prípadné pripomienkovanie a schválenie, a to ešte pred ďalším stretnutím, na ktorom sa bude pokračovať v analýze.

2.5.3 Príklady aplikácie a účinnosti HAZOP analýzy

2.5.3.1 Ukážka HAZOP analýzy zameranej na vznik runaway efektu v chemickom reaktore

Na Obr. 2.8 je znázornený chemický reaktor, v ktorom prebieha exotermická chemická reakcia. Odvod reakčného tepla je zabezpečený vďaka chladiacemu hadovi, v ktorom prúdi chladiaca voda. Množstvo privádzanej chladiacej vody sa riadi na základe nameranej teploty v reaktore. V prípade straty funkčnosti chladenia sa dá očakávať nárast teploty v reaktore s následným nárastom rýchlosti chemickej reakcie, čo by bolo spojené s ďalším prudkým nárastom teploty. Táto situácia môže vyústiť až do nebezpečného runaway efektu, pri ktorom sa dá očakávať nárast tlaku v reaktore nad bezpečnú (konštrukčnú) hodnotu. Proti tejto situácii je reaktor zabezpečený alarmom vysokej teploty. Ukážka HAZOP analýzy je uvedená v Tab. 2.31.



Obr. 2.8. Riadenie teploty v prietokovom dokonale miešanom reaktore s exotermickou reakciou

Tabuľka 2.31. Zápis HAZOP analýzy reaktora pre zámer chladenie obsahu reaktora

Zariadenie: reaktor

Parameter: prietok chladiacej vody

Zámer: chladenie obsahu reaktora

Vodiace slovo	Odchýlka	Možné príčiny	Možné následky	Ochrana	Odporúčané opatrenia
---------------	----------	---------------	----------------	---------	----------------------

Žiaden	Žiaden prietok	<ol style="list-style-type: none"> 1. Porucha riadenia prietoku 2. Poškodenie chladiaceho potrubia 3. Upchatie chladiaceho potrubia 4. Strata dodávky chladiacej vody 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Žiadne chladenie reaktora, nárast teploty v reaktore s následkom runaway 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alarm vysokej teploty 2. Operátor odstavi reaktor 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inštalácia alarmu straty prietoku chladiaceho média 2. Inštalácia regulačného ventilu, ktorý sa v prípade poruchy otvorí 3. Zdvojenie riadiacej jednotky 4. Inštalácia filtrov na prevenciu zanesenia chladiaceho potrubia 5. Inštalácia (prívod) záložného zdroja chladiacej vody 6. Inštalácia systému na automatické odstavenia reaktora v prípade vysokej teploty v reaktore
Viac	Vyšší prietok	1. Porucha riadenia prietoku	1. Nadmerné chladenie reaktora, spomalenie chem. reakcie – technologický problém	Nie je	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inštalácia merania prietoku chladiacej vody 2. Inštrukcie a tréning operátorov na adekvátny zásah - procedúru
Menej	Nižší prietok	<ol style="list-style-type: none"> 1. Porucha riadenia prietoku 2. Čiastočné upchatie chladiaceho potrubia 3. Čiastočná strata dodávky chlad. vody 	1. Nedostatočné chladenie, možný runaway	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alarm vysokej teploty 2. Operátor odstavi reaktor 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ako pre odchýlku žiaden prietok 2. Inštalácia merania prietoku chladiacej vody a alarmu nizkeho prietoku
Časť z	Čiastočný prietok	<i>1. ako pre odchýlku nižší prietok</i>	<i>1. ako pre odchýlku nižší prietok</i>	<i>1. ako pre odchýlku nižší prietok</i>	<i>1. ako pre odchýlku nižší prietok</i>
Opačný	Opačný prietok	1. Strata dodávky chladiacej vody majúca za následok opačný prietok	1. Nedostatočné chladenie, možný runaway	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alarm vysokej teploty 2. Operátor odstavi reaktor 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inštalácia spätnej klapky na potrubie chladiacej vody 2. ako pre odchýlku nižší prietok

Ako aj navyše	Chladiaca voda v reaktore	1. Porušenie chladiaceho hada (tlak v potrubí vyšší ako v reaktore)	1. Zriedenie reakčnej zmesi 2. Zničenie produktu 3. Preplnenie reaktora	Nie je	1. Inštalácia merania hladiny v reaktore 2. Pravidelná kontrola procedúr a rozvrh údržby reaktora
	Reakčné produkty v chladiacom hadovi	1. Porušenie chladiaceho hada (tlak v reaktore vyšší ako v potrubí)	1. Strata produkcie 2. Nedostatočné chladenie, možný runaway 3. Kontaminácia chladiacej vody	Nie je	1. Inštalácia spätnej klapky na potrubí chladiacej vody pred reaktorom 2. Pravidelná kontrola procedúr a rozvrh údržby reaktora
Iný ako	Iný materiál ako voda	1. Kontaminácia zdroja chladiacej vody 2. Spätný tok zo stoky	1. Nedostatočné chladenie, možný runaway	1. Alarm vysokej teploty 2. Operátor odstavi reaktor	1. Izolácia zdroja chladiacej vody 2. Inštalácia spätnej klapky na potrubie chladiacej vody za reaktorom 3. Inštalácia systému na automatické odstavenia reaktora v prípade vysokej teploty v reaktore

Z HAZOP analýzy vyplývajú nasledujúce odporúčania na zavedenie opatrení predchádzajúcich nebezpečnej situácii *nedostatočného chladenia obsahu reaktora*, ktorej následkom môže byť runaway efekt:

- Inštalácia systému na automatické odstavenia reaktora v prípade vysokej teploty v reaktore. Teplota, pri ktorej má dôjsť k automatickej odstávke reaktora, by mala byť vyššia ako teplota pri ktorej sa aktivuje alarm, aby mal operátor možnosť manuálne obnoviť chladenie reaktora.
- Inštalácia merania prietoku chladiacej vody a alarmu nízkeho prietoku, ktorý upozorní operátora na problémy s dodávkou chladiacej vody ešte pred dramatickým nárastom teploty v reaktore.
- Inštalácia regulačného ventilu, ktorý sa v prípade jeho poruchy otvorí, a teda nezablokuje prietok chladiacej vody do reaktora.
- Zdvojenie riadiacej jednotky. (Toto opatrenie sa aplikuje iba v zriedkavých prípadoch.)
- Inštalácia (prívod) záložného zdroja chladiacej vody pre prípad straty dodávky chladiacej vody zo štandardného zdroja.
- Úpravy existujúcej sústavy na prívod a odvod chladiacej vody: izolácia zdroja chladiacej vody na zabránenie externej kontaminácie, inštalácia spätnej klapky na

vstupe a aj na výstupe z reaktora na zabránenie kontaminácie zdroja chladiacej vody pri spätnom toku zo stoky alebo pri netesnosti chladiaceho hada v reaktore, inštalácia filtrov na prevenciu zanesenia chladiaceho potrubia.

- Pravidelná kontrola procedúr a rozvrhu údržby reaktora so zameraním na chladenie.

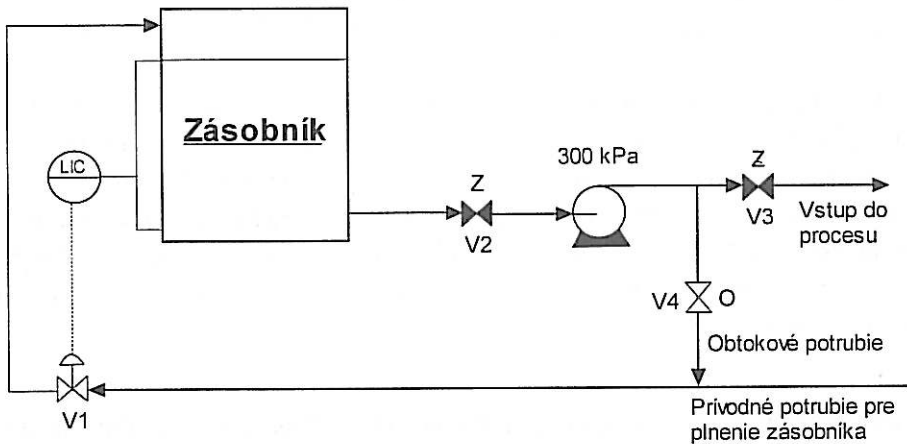
Vedenie prevádzky na základe výsledkov HAZOP analýzy prijalo rozhodnutie, že alarm vysokej teploty (už existujúca ochrana) spolu so systémom automatickej odstávky reaktora v prípade vysokej teploty (odporúčané opatrenie, ktoré sa nainštaluje) budú postačujúce na prevenciu pred vznikom nebezpečnej udalosti runaway efektu. Ak by sa v budúcnosti ukázalo, že poruchová udalosť nedostatočného chladenia sa vyskytuje často, potom sa budú aplikovať aj ďalšie odporúčania z HAZOP analýzy.

2.5.3.2 Ukážka HAZOP analýzy zameranej na poškodenie čerpadla na prívod suroviny do zásobníka

Na obrázku (Obr. 2.9) je znázornená časť procesu, ktorá pozostáva zo zásobníka a čerpadla na prečerpávanie obsahu zásobníka do procesu (Kletz, 1999). Zásobník sa plní cez prírodné potrubie. Hladina v zásobníku sa meria a reguluje pomocou regulácie LIC (Level indication control), ktorá zabezpečí uzatvorenie ventilu (V1) v prípade dosiahnutia maximálnej hladiny. Čerpadlo slúžiace na prečerpávanie obsahu zásobníka do procesu je dimenzované na maximálny tlak 300 kPa. Potrubia na prívod materiálu do zásobníka a potrubie odvádzajúce materiál do procesu sú spojené obtokovým potrubím, na ktorom sa nachádza ventil V4.

Na prevádzke došlo k havárii s následkom poškodenia čerpadla. Materiál sa zo zásobníka do procesu neprečerpával, čerpadlo nebolo v prevádzke a ventily V2 a V3 boli uzatvorené. V zásobníku sa dosiahla maximálna hladina a regulácia LIC zatvorila ventil V1, čo spôsobilo nárast tlaku v prívodnom potrubí na 2 MPa. Keďže ventil V4 na obtokovom potrubí nebol zatvorený, došlo k spätnému toku materiálu cez obtokové potrubie s následkom poškodenia čerpadla, ktoré bolo dimenzované len na tlak 300 kPa.

Havárii sa dalo predísť vykonaním HAZOP analýzy, pri ktorej by sa vyšetrovali odchýlky ako napríklad „spätný tok v obtokovom potrubí“ alebo „vysoký tlak v prívodnom potrubí“. Po dodatočnom vykonaní HAZOP analýzy sa navrhlo opatrenie zmeniť potrubné zapojenie tak, aby obtokové potrubie nebolo napojené na prírodné potrubie, ale ústilo priamo do zásobníka.



Obr. 2.9. Časť procesu zameraného na plnenie zásobníka (Kletz, 1999) (Z – zatvorený ventil, O – otvorený ventil)

Použitá literatúra

- [1] MANNAN, S., LEES, F. P. 2005. *Lee's loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment, and control*, 3rd ed, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam; Boston.
- [2] AICHE 1992. *Guidelines for hazard evaluation procedures*, 2nd ed, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, NY xxxi, 461 p. pp.
- [3] AICHE 2005. *Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide, 7th Edition*, 7 ed 88 pp.
- [4] AICHE 2000. *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*, 2nd ed, The Center, New York xxviii, 754 p. pp.
- [5] KLETZ, T. A. 1999. *Hazop and hazan: identifying and assessing process industry hazards*, 4th ed, Taylor & Francis, Philadelphia, PA xi, 232 p. pp.
- [6] CISHEC. 1977. *A guide to hazard and operability studies.*, The Chemical Industry Safety and Health Council of the Chemical Industries Association Ltd.

3 Kvantitatívno-kvalitatívne metódy identifikácie nebezpečenstva

Kapitola Kvantitatívno-kvalitatívne metódy identifikácie nebezpečenstva priamo nadväzuje na predchádzajúcu kapitolu, ktorá sa zaoberá čisto kvalitatívnymi metodikami identifikácie nebezpečenstva. Primárna úloha kvalitatívnych metód spočívala v identifikácii nebezpečenstva a rozpoznaní udalostí, ktorých následkom vzniká nebezpečná situácia. Pomocou týchto metód možno vytvoriť zoznam udalostí, ktoré môžu viesť k nebezpečným situáciám, tzv. top-events (vrcholové udalosti). V tejto kapitole si predstavíme **Metódu stromu porúch**, slúžiacu na rozpoznanie základných **príčin** vzniku vrcholových udalostí. Na Metódu stromu porúch priamo nadväzuje **Metóda stromu udalostí**, ktorá sa používa na identifikáciu priamych **následkov** vrcholových udalostí a/alebo preverenie ochranných systémov, ktoré majú zabrániť vzniku incidentu s nebezpečnými následkami. Častou príčinou vzniku nebezpečných situácií je zlyhanie ľudského faktora. Spoľahlivosť ľudského výkonu je ovplyvňovaná mnohými faktormi. Na systematické hodnotenie týchto faktorov s cieľom identifikácie potenciálnych ľudských chýb sa používa **Analýzy ľudskej spoľahlivosti (HRA)**, ktorej všeobecný postup predstavíme v závere kapitoly. Všetky tri uvedené metódy slúžia nielen na kvalitatívnu identifikáciu príčin (Metóda stromu porúch), následkov (Metóda stromu udalostí) a chýb ľudskej spoľahlivosti (Analýzy ľudskej spoľahlivosti), ale umožňujú kvantitatívne vyčíslenie frekvencie vzniku vrcholovej udalosti, frekvencie (pravdepodobnosti) jej následkov, resp. pravdepodobnosti vzniku ľudskej chyby. Nakoľko hlavným cieľom tejto knihy je predstaviť kvalitatívne metódy identifikácie nebezpečenstva, kvantitatívnej časti týchto metód sa dotkneme len okrajovo.

3.1 Analýza stromu porúch

FAULT TREE ANALYSIS

Analýza stromu porúch je deduktívna metóda určená na identifikáciu okolností (ciest), za ktorých môže z potenciálneho nebezpečenstva vzniknúť reálna havária. Strom porúch využíva grafický model, označovaný ako logický diagram, ktorý znázorňuje príčiny, resp. kombinácie príčin, ktoré môžu spôsobiť vážnu systémovú poruchu (haváriu), tzv. vrcholovú udalosť (AIChE, 1992). V logickom diagrame sú kombinácie jednotlivých porúch vedúcich k vrcholovej udalosti znázornené pomocou Booleanových logických symbolov (napríklad OR brána a AND brána). Konštrukcia stromu porúch začína zadefinovaním vrcholovej udalosti a pokračuje systematickým a logickým rozvojom porúch, ktoré tvoria bezprostredné príčiny vzniku vrcholovej udalosti.

Cieľom analýzy stromu porúch zvyčajne býva:

- určenie kombinácií porúch zariadenia, prevádzkových podmienok, environmentálnych podmienok a ľudský chyb, ktoré vedú k vzniku havárie;

- identifikácia opatrení, ktoré môžu zvýšiť spoľahlivosti alebo bezpečnosti a posúdenie efektívnosti nájdených opatrení;
- výpočet početnosti – frekvencie havárie, alebo spoľahlivosti zariadenia.




3.1.1 Základné pojmy analýzy stromu porúch



Základným „konštrukčným“ prvkom (entitou) každého stromu porúch je **Udalosť (Event)**. **Udalosť (Event)** možno definovať ako nežiaducu odchýlku od požadovaného alebo predpokladaného stavu prevádzkového zámeru. Pri analýze stromu porúch sa používajú päť základných udalostí:

- **Vrcholová udalosť (Top event)** – Vážna systémová porucha alebo havária, ktorá tvorí vrchol stromu porúch. Strom porúch sa rozvíja smerom nadol k základným (nerozvinutými, externými) udalostiam, ktoré sú príčinou vrcholovej udalosti využívajúc „logické brány“.
- **Základná udalosť (Basic event)** – Poruchová udalosť, ktorá je dostatočne základná (t. j. jej vznik nie je podmienený inou príčinou, alebo súbehom viacerých príčin). Predstavuje najnižšiu úroveň (vrstvu) stromu porúch, preto jej ďalší rozvoj nie je potrebný.
- **Nerozvinutá udalosť (Undeveloped event)** – Poruchová udalosť, ktorá má v strome porúch rovnaké postavenie ako základná udalosť, avšak dôvodom jej nerozvinutia je že informácie na jej ďalší rozvoj nie sú dostatočné.
- **Externá alebo domáca udalosť (External or House event)** – Externá udalosť je poruchová udalosť, ktorá je z pohľadu systému externá, teda príčiny jej vzniku sú za hranicami posudzovaného systému a nedajú sa ovplyvniť („strata dodávky chladiacej vody na prevádzku“). Domáca udalosť je udalosť, ktorej sa z technologického hľadiska nedá vyhnúť (zabrániť), predpokladá sa teda, že daná udalosť je neustále v chybovom stave („prítomnosť autocisterny na stáčacom mieste“).
- **Prechodná udalosť (Intermediate event)** – Poruchová udalosť, ktorá propaguje alebo zmierňuje iniciačnú (napr. základnú) udalosť. (Sú to v podstate všetky udalosti v logickom diagrame, ktoré sa nachádzajú medzi vrcholovou udalosťou a základnými, nerozvinutými a externými udalosťami).

Pre uvedené udalosti sa pri konštrukcii stromu porúch využívajú grafické symboly, ktoré sú sumarizované v nasledujúcej tabuľke (Tab. 3.1).



Tabuľka 3.1. Symboly udalostí používaných pri konštrukcii stromu porúch

Udalosť	Anglický názov	Symbol
Vrcholová udalosť	Top event	
Základná udalosť	Basic event	
Nerozvinutá udalosť	Undeveloped event	

Externá alebo domáca udalosť	External or House event	
Prechodná udalosť	Intermediate event	

Jednotlivé udalosti sú v strome porúch spájané pomocou **logických brán (logic gate)**, ktoré určujú vzájomný (logický) vzťah medzi vstupnými (nižšími) udalosťami a jednou výstupnou (vyššou) udalosťou. Pre praktické účely stromu porúch sa používajú najmä dve základné logické brány AND a OR (Tab. 3.2).

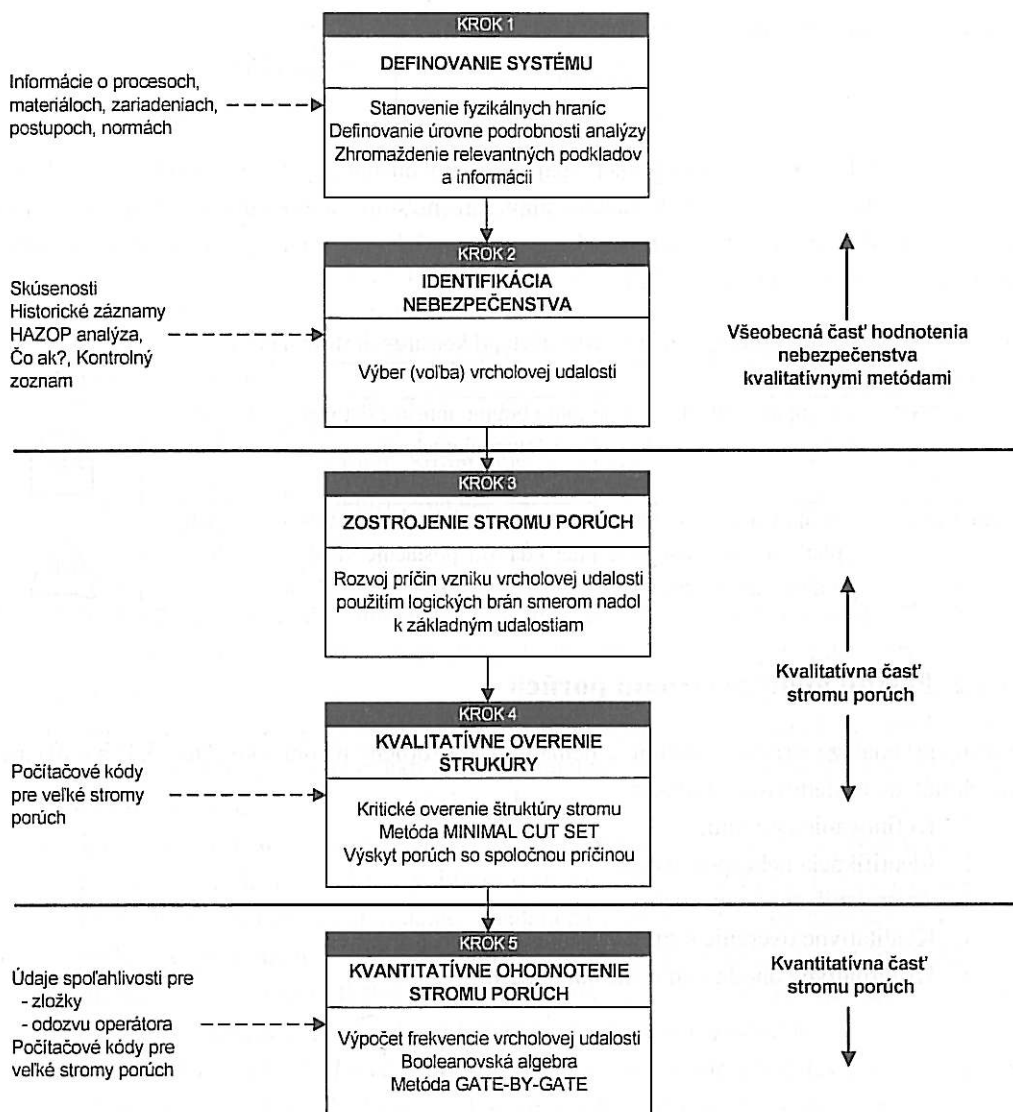
Tabuľka 3.2. Symboly logických brán používaných pri konštrukcii stromu porúch

Logická brána	Použitie	Význam	Označenie
brána AND	Vstupné udalosti spojené touto bránou musia existovať súčasne, aby došlo k vzniku výstupnej udalosti.	Logický súčin ×	
brána OR	Spája viaceré (rovnocenné) vstupné udalosti, pre ktoré platí, že na vznik výstupnej udalosti postačuje každá z nich samostatne.	Logický súčet +	

3.1.2 Postup analýzy stromu porúch

Postup pri analýze stromu porúch je schematicky znázornený na obrázku (Obr. 3.1) a môžeme ho zhrnúť do nasledovných krokov:

1. Definovanie systému,
2. Identifikácia nebezpečenstva,
3. Zostrojenie stromu porúch,
4. Kvalitatívne overenie štruktúry,
5. Kvantitatívne ohodnotenie stromu porúch.



Obr. 3.1. Postup analýzy stromu porúch

3.1.2.1 Krok 1. Definovanie systému

V podstate pri každej metóde slúžiacej na kvalitatívne, resp. kvantitatívne hodnotenie nebezpečenstva (rizika) je potrebné, aby sa vykonávateľ analýzy podrobne oboznámil s hodnoteným systémom. Tomu predchádza stanovenie fyzikálnych hraníc systému, t. j. ktoré časti systému sa budú (ešte) brať do úvahy pri zostavovaní stromu porúch a definovanie úrovne podrobnosti (hĺbky) analýzy. Nasleduje zhromaždenie relevantných podkladov a informácií, pretože pochopenie príčin vzniku nežiaducej udalosti (havárie) môže byť dosiahnuté iba vďaka dôkladnému spoznaniu všetkých detailov systému. Pre vykonávateľa

analýzy stromu porúch to znamená, oboznamovanie sa s relatívne veľkým množstvom údajov:

- špecifické informácie o procese (napr. termodynamika, hydrodynamika, kinetika...),
- podmienky procesu (chemické a fyzikálne vlastnosti procesu),
- nebezpečné vlastnosti materiálov a procesu,
- procesná prúdová schéma (PFD) a potrubná a inštrumentálna schéma (P&ID),
- presný opis zariadení,
- opis riadiacich a ochranných prvkov,
- prevádzka systému (bežné činnosti, obsluha, údržba, bezpečnosť...),
- ľudský faktor (napr. obsluha zariadenia, údržba, prepojenie na úrovni pracovník – zariadenie...),
- faktory, ktoré majú vplyv na životné prostredie.

3.1.2.2 Krok 2. Identifikácia nebezpečenstva

Druhým dôležitým krokom analýzy stromu porúch je zadefinovanie, alebo skôr výber vrcholovej udalosti, pre ktorú bude strom porúch konštruovaný. Rozpoznanie vrcholových udalostí pre analýzu stromu porúch bolo cieľom kvalitatívnych metód predstavených v kapitole 2 (napr. Kontrolný zoznam, Čo ak? analýza, ale najmä HAZOP analýza). Práve výstupom týchto metód je zoznam nebezpečných situácií t. j. vrcholových udalostí, identifikovaných pre hodnotený systém. Strom porúch by mal byť konštruovaný pre každú vrcholovú udalosť zvlášť, aby bolo možné logickým rozvojom porúch identifikovať všetky bezprostredné príčiny a kombinácie príčin jej vzniku. Pre systémy, s ktorými sú dlhodobé skúsenosti, alebo sú pre ne k dispozícii kvalitné historické záznamy môže byť vrcholová udalosť (avšak nie všetky vrcholové udalosti) identifikovaná bez predchádzajúceho použitia iných kvalitatívnych metód.

Analyzovaná vrcholová udalosť musí byť presne definovaná. Jej opis musí byť jasný, presný a primeraný, napr. „nedostatočné chladenia reaktora“). Vrcholová udalosť typu „explózia reaktora“ je príkladom dosť neurčitého definovania vrcholovej udalosti. Na druhej strane, pre analýzu stromu porúch nie je vhodné ani príliš špecifické definovanie vrcholovej udalosti, napr. „porušenie potrubia (trhlina) na prívod chladiacej vody“.

3.1.2.3 Krok 3. Zostrojenie stromu porúch

Strom porúch môžeme zostrojiť tromi spôsobmi:

1. manuálne,
2. algoritmicke,
3. automaticke.

1. Manuálne zostrojenie

Strom porúch predstavuje logický diagram, ktorý znázorňuje príčiny a kombinácie (súbehy) príčin zlyhania systému. Strom sa začína zostavovať od vrcholovej udalosti, pre ktorú sú identifikované priame príčiny jej vzniku. Ak identifikované príčiny vzniku vrcholovej udalosti sú podmienené inými udalosťami (príčinami), strom porúch sa rozvíja ďalej smerom k nim. Strom porúch je vždy zostavovaný od vrcholovej udalosti cez prechodové udalosti smerom k základným resp. nerozvinutým a externým udalostiam, teda smerom „zhora nadol“. Udalosti, ktoré majú medzi sebou logické vzťahy sú spájané cez brány AND a OR. Proces logickej dedukcie sa končí, keď sa usúdi, že sa do stromu porúch zahrnuli a do dostatočnej hĺbky rozvinuli všetky možné príčiny vzniku vrcholovej udalosti.

Ako príklad postupu manuálneho zostrojenia stromu porúch možno uviesť veľmi zjednodušenú (ilustratívnu) analýzu pre vrcholovú udalosť: „Nesvieti stolná lampa“. Predpokladáme, že existujú dve priame príčiny, prečo „stolová lampa nesvieti“ (vrcholová udalosť):

- o Problém so žiarovkou (prechodná udalosť);
- o Nefunkčné elektrické vedenie lampy (prechodná udalosť).

Obe tieto príčiny predstavujú prechodné udalosti pričom samotný ich vznik je podmienený ďalšími príčinami, ktoré je nutné preskúmať (teda hlbšie rozvíjať).

- o Príčiny spôsobujúce problém so žiarovkou (prechodová udalosť) môžu byť:
 - Vypálená žiarovka (základná udalosť);
 - V lampe nie je žiadna žiarovka (nerozvinutá udalosť).

Príčinu „vypálená žiarovka“ môžeme považovať za základnú udalosť, teda už nie je nutné ju ďalej rozvíjať. V našej analýze je príčina „v lampe nie je žiadna žiarovka“ označená ako nerozvinutá udalosť pre nedostatok informácií na ďalšie rozvinutie príčin neprítomnosti žiarovky v lampe. Je nutné poznamenať, že v prípade dostatku relevantných informácií (napr. o vplyve ľudského faktora na túto udalosť) by bolo možné jej hlbšie rozvinutie, a tým by sa udalosť „v lampe nie je žiadna žiarovka“ stala prechodovou udalosťou a rozvíjala sa ďalej.

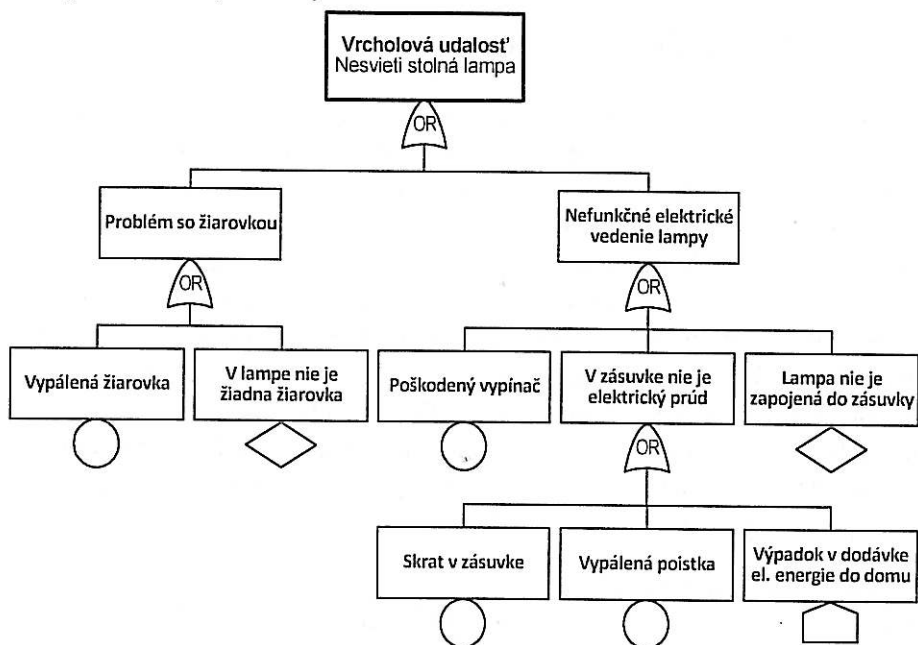
- o Príčinami nefunkčného elektrického vedenia lampy môžu byť nasledujúce:
 - Poškodený vypínač (základná udalosť);
 - Lampa nie je zapojená do zásuvky (nerozvinutá udalosť);
 - V zásuvke nie je elektrický prúd (prechodná udalosť).

Na účely našej analýzy bola príčina „poškodený vypínač“ považovaná za základnú, a teda táto udalosť sa už nebude ďalej rozvíjať. Pri udalosti „lampa nie je zapojená do elektrickej siete“ môžeme opäť predpokladať vplyv ľudského faktora na túto udalosť, avšak nemáme dostatočné údaje na jej ďalšie rozvíjanie, preto bola označená ako nerozvinutá. V prípade udalosti „v elektrickej zásuvke nie je elektrický prúd“ poznáme možné príčiny tohto stavu, preto bola označená ako prechodová a budeme ju ďalej rozvíjať.

- o Príčiny udalosti „v elektrickej zásuvke nie je elektrický prúd“ môžu byť nasledujúce:
 - Skrat v zásuvke (základná udalosť);
 - Vypálená poistka (základná udalosť);
 - Výpadok v dodávke elektrickej energie do domu (externá udalosť).

„Skrat v zásuvke“ a „vypálená poistka“ sú dôvody, ktoré môžeme považovať za základné príčiny vzniku udalosti „v elektrickej zásuvke nie je elektrický prúd“, a preto sa nebudú ďalej rozvíjať. V prípade udalosti „výpadok v dodávke elektrickej energie do domu“ sa zdroj príčiny nachádza mimo nami skúmaného systému (za hranicami hodnoteného systému), preto je táto príčina označená ako externá udalosť.

Strom porúch vyššie uvedenej analýzy pre vrcholovú udalosť „Nesvieti stolná lampa“ je znázornený na obrázku (Obr. 3.2).



Obr. 3.2. Strom porúch pre vrcholovú udalosť: „Nesvieti stolná lampa“

Pri manuálnom zostrojení stromu porúch často dochádza k závažným pochybeniam. Medzi najčastejšie všeobecné chyby patrí napríklad:

- rýchla príprava jednej vetvy stromu namiesto systematického postupu práce smerom nadol úroveň po úrovni (snaha rýchleho dosiahnutia základnej udalosti na úkor širšieho vnímania súvislostí),
- vypustenie dôležitých príčin vďaka nesprávnemu predpokladu ich zanedbateľného vplyvu na vznik vyššej udalosti.
- nesprávne zvolenie logickej brány,
- chybné zhodnotenie závislosti jednotlivých udalostí.

2. Algoritmická konštrukcia stromu porúch

Veľké úsilie bolo vynaložené na vypracovanie systematických metód na zostrojení stromu porúch pomocou rôznych logických algoritmov. Cieľom týchto metód bolo zostrojení stromov porúch tak, aby boli podrobné a úplné, ale tieto metódy ani v súčasnosti negarantujú splnenie uvedeného cieľa (AICHÉ, 1992). Z tohto dôvodu sa nebudeme ďalej zaoberať uvedeným prístupom.

3. Automatická syntéza stromu porúch

Cieľom tejto metódy je použiť procesnú prúdovú schému alebo potrubnú a inštrumentálnu schému ako vstupné dáta pre počítačový program, ktorý by vygeneroval stromy porúch pre všetky relevantné vrcholné udalosti. Táto myšlienka bola realizovaná niekoľkými skupinami a výsledkom je množstvo softvéru na generovanie stromov porúch (AIChE, 1992; Mannan et al., 2005).

3.1.2.4 Krok 4. Kvalitatívne overenie štruktúry (Minimal cut set)

Po prvotnom zostrojení stromu porúch by malo nasledovať kritické overenie jeho štruktúry na základe analýzy väzieb medzi jednotlivými udalosťami, ale aj kombináciami udalostí, s cieľom maximálne zjednodušiť a sprehľadniť štruktúru stromu porúch. Tento proces je známy ako metodika **minimal cut set**, čo môžeme voľne preložiť ako „metóda skrátenia súboru na minimum“. Ide o metódu matematického spracovania logickej štruktúry stromu porúch s cieľom identifikovať všetky kombinácie základných udalostí, ktorých výsledkom je vznik vrcholovej udalosti, pri vytvorení čo najjednoduchšej štruktúry stromu porúch. To znamená redukciu počtu kombinácií základných udalostí, tiež nazývaných skrátene súbory, na čo najmenší počet. Zároveň, skrátene súbory by mali obsahovať iba nevyhnutný počet prechodných udalostí, ktoré sú dôvodom vzniku vrcholovej udalosti. Pri matematickej transformácii logickej štruktúry pôvodného stromu porúch do „minimálnej skrátenej verzie“ sa používajú pravidlá Booleanovskej algebry, ktoré sú uvedené v Tabuľke (Tab. 3.3).

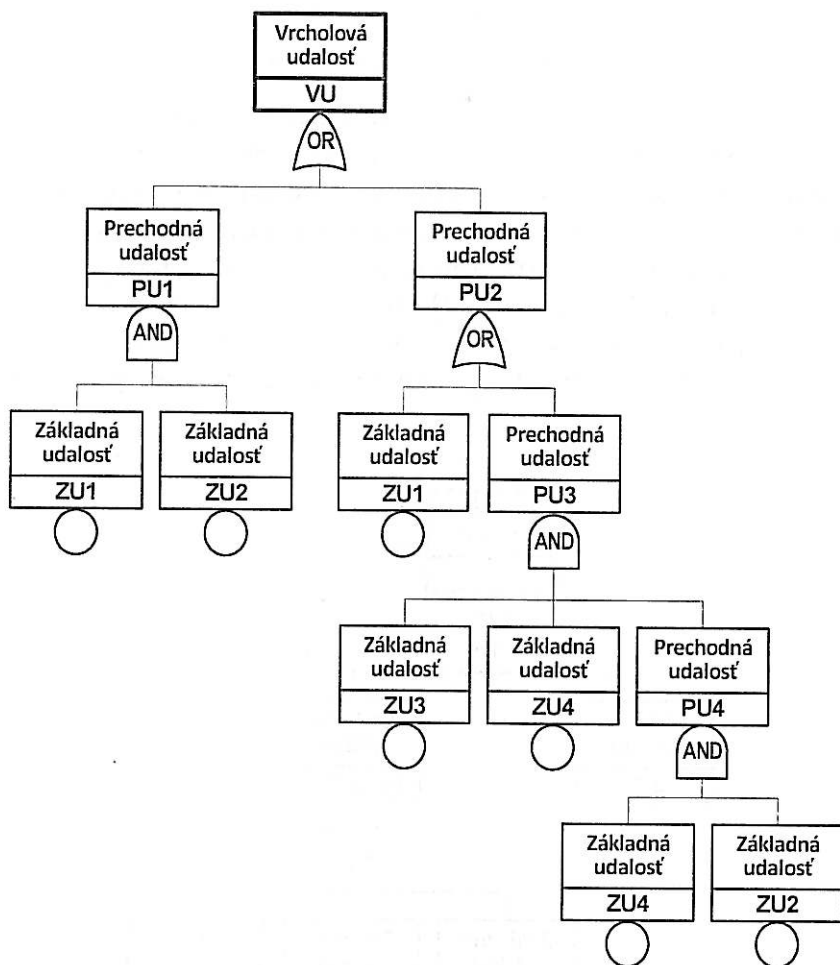
Tabuľka 3.3. Vlastnosti Booleanovej algebry

Pravidlo	Matematický tvar
Komutatívne	$A \times B = B \times A$
	$A + B = B + A$
Asociatívne	$A \times (B \times C) = (A \times B) \times C$
	$A + (B + C) = (A + B) + C$
Distributívne	$A \times (B + C) = A \times B + A \times C$
	$A + (B \times C) = (A + B) \times (A + C)$
Idempotentne	$A \times A = A$
	$A + A = A$
Zákon absorpcie	$A \times (A + B) = A$
	$A + A \times B = A$

Transformovaný strom porúch je matematický a logický ekvivalent originálneho stromu porúch. Tento proces transformácie zaručuje, že niektoré udalosti, ktoré sa javia často v rôznych vetvách stromu porúch, sú vhodne umiestnené. Táto metóda je použiteľná pre všetky typy stromov porúch, bez ohľadu na veľkosť alebo komplexnosť, ak vyhovujú nasledujúcim podmienkam:

- všetky poruchy majú binárny charakter (zariadenia sú buď pracujúce alebo poškodené),
- prechod medzi bežným pracovným a poruchovým stavom vznikne okamžite,
- všetky poškodené komponenty sú štatisticky nezávislé,
- frekvencia (pravdepodobnosť) poškodenia každého prvku zariadenia je konštantná,
- frekvencia (pravdepodobnosť) opravy je pre každý prvok zariadenia konštantná,
- po oprave bude systém pracovať rovnako spoľahlivo ako pred opravou, nie však tak spoľahlivo, ako keď bol nový.

Praktická ukážka postupu **minimal cut set** bude demonštrovaná na jednoduchom príklade. Pôvodný, manuálne zostrojený strom porúch, na ktorom bude aplikovaná metóda minimal cut set, je znázornený na obrázku (Obr. 3.3).



Obr. 3.3. Pôvodný strom porúch, na ktorom bude aplikovaná metóda minimal cut set

Redukcia stromu porúch je rozdelená do niekoľkých krokov. V prvom kroku sa vrcholová udalosť *VU* vyjadrí pomocou prechodných udalostí *PU1* a *PU2*. Logická brána **OR** spájajúca

udalosti PU_1 a PU_2 znamená, že na vznik VU stačí, aby sa vyskytla iba jedna z udalostí PU_1 alebo PU_2 , teda použijeme logický súčet.

$$VU = PU_1 + PU_2 \quad (3.1)$$

Následne sa rozvinú udalosti PU_1 (pomocou logického súčinu udalostí spojených pomocou brány AND) a PU_2 (pomocou logického súčtu udalostí spojených pomocou brány OR), takže získame vyjadrenie:

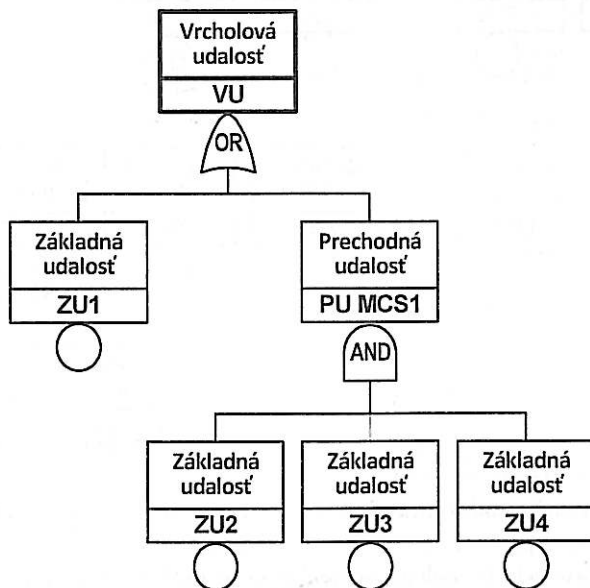
$$VU = (ZU_1 \times ZU_2) + (ZU_1 + PU_3) \quad (3.2)$$

Analogickým spôsobom sa pokračuje až do momentu, keď Booleanovské vyjadrenie neobsahuje žiadne prechodné udalosti (obsahuje teda len udalosti, ktoré nemožno ďalej rozvinúť – základne, nerozvinuté príp. externé udalosti). Úplne rozvinuté Booleanovské vyjadrenie stromu porúch (Obr. 3.3) má teda tvar:

$$VU = ZU_1 \times ZU_2 + ZU_1 + ZU_3 \times ZU_4 \times ZU_4 \times ZU_2 \quad (3.3)$$

Vzťah (3.3) vyjadruje vrcholovú udalosť VU iba prostredníctvom základných udalostí ZU_1 až ZU_4 , ide teda o skráteneý súbor. V ďalšom kroku je nutné posúdiť, či možno využitím pravidiel Booleanovskej algebry dosiahnuť redukciu (úpravu, zjednodušenie) vzťahu (3.3) a teda aj celého stromu porúch. Udalosť ZU_4 sa v skráteneom súbore nachádza dvojmo, teda ju možno eliminovať na základe idempotentného pravidla $ZU_4 \times ZU_4 = ZU_4$. Ďalej využitím zákona absorpcie možno nahradiť kombináciu udalostí $ZU_1 \times ZU_2 + ZU_1$ iba udalosťou ZU_1 . V poslednom kroku sa využije komutatívny zákon na preskupenie jednotlivých udalostí, čím získame pretransformovaný vzťah (3.4), ku ktorému je ekvivalentný strom porúch (Obr. 3.4).

$$VU = ZU_1 + ZU_2 \times ZU_3 \times ZU_4 \quad (3.4)$$



Obr. 3.4. Redukovaný strom porúch po transformácii pomocou metódy minimal cut set

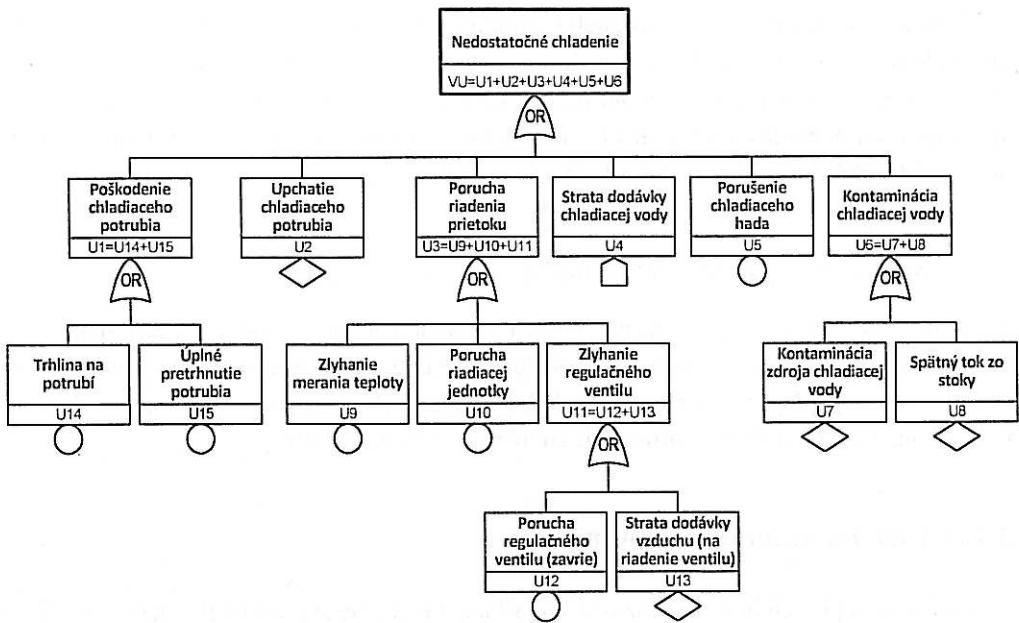
Z (Obr. 3.4) je zrejme, že z pôvodného stromu porúch boli eliminované všetky pôvodné prechodové udalosti PU_1 až PU_4 a transformáciou vznikla len jedna nová prechodová udalosť PU_{MCS1} . Z redukovanej verzie stromu porúch vyplýva, že základná udalosť ZU_1 má kľúčový vplyv na vznik vrcholovej udalosti VU . (Vrcholová udalosť nastane, ak sa vyskytne samotná udalosť ZU_1 alebo súčasne nastanú všetky tri udalosti ZU_2, ZU_3, ZU_4 .)

3.1.2.5 Krok 5. Kvantitatívne ohodnotenie

V poslednom kroku analýzy stromu porúch sa kvantitatívne vyhodnotí frekvencia alebo pravdepodobnosť vzniku „vrcholovej udalosti“. Keďže táto kniha nie je zameraná na kvantitatívne výpočty frekvencie a následne rizika, nebudeme sa ďalej zaoberať týmto krokom analýzy. Podrobnejšie informácie sú uvedené v práci (1999).

3.1.3 Ukážka aplikácie stromu porúch

Ukážka stromu porúch bude nadväzovať na príklad, ktorý sme si predstavili v kapitole 2.5.3.1 Ukážka HAZOP analýzy zameranej na vznik runaway efektu v chemickom reaktore. Príklad sa zaoberá chemickým reaktorom, v ktorom prebieha exotermická reakcia, preto je reaktor chladený vodou. V prípade nedostatočného chladenia sa môže dôjsť k nebezpečnému následku runaway efektu, preto bola ako vrcholová udalosť stromu porúch zvolená udalosť „nedostatočné chladenia“. Niektoré identifikované príčiny vzniku nedostatočného chladenia reaktora identifikované HAZOP analýzou, z ktorých budeme pri tvorbe stromu porúch vychádzať, sú uvedené v Tab. 2.31. Vzhľadom na to, že analýza stromu porúch nasleduje po vykonaní HAZOP analýzy, môžeme priamo začať s tvorbou stromu porúch (krokom 3), pretože kroky 1 a 2 boli vykonané v rámci HAZOP analýzy. Strom porúch vychádzajúci z vrcholovej udalosti „nedostatočné chladenie“ je zobrazený na obrázku (Obr. 3.5).



Obr. 3.5. Strom porúch pre analýzu vrcholovej udalosti „nedostatočné chladienie“ reaktora vychádzajúc z HAZOP analýzy

Počas HAZOP analýzy boli identifikované nasledujúce príčiny vzniku vrcholovej udalosti „nedostatočné chladienie“ reaktora: U1 – Poškodenie chladiaceho potrubia, U2 – Upchatie chladiaceho potrubia, U3 – Porucha riadenia prietoku, U4 – Strata dodávky chladiacej vody, U5 – Porušenie chladiaceho hada a udalosti U7 – Kontaminácia zdroja chladiacej vody a U8 – Spätý tok zo stoky. Posledné dve menované udalosti U7 a U8 sú nerozvinuté udalosti (nemáme dostatok informácií na ich ďalší rozvoj), ktoré spôsobia kontamináciu chladiacej vody, preto boli spojené bránou OR a tvoria príčiny nadradenej udalosti U6 – Kontaminácia chladiacej vody. Každá z udalostí U1 až U6 je sama o sebe postačujúca na vznik vrcholovej udalosti, preto boli navzájom spojené bránou OR. Udalosti U2, U4, U5 neboli ďalej rozvíjané (pre udalosť U2 máme nedostatočné informácie pre jej ďalšie rozvinutie – nerozvinutá udalosť, udalosť U4 je považovaná za externú udalosť, keďže príčiny jej vzniku presahujú hranice skúmaného systému a udalosť U5 môžeme považovať za základnú). Poškodenie chladiaceho potrubia môže byť čiastočné (trhlina), alebo úplné, preto bola udalosť U1 rozvinutá do dvoch základných udalostí U14 – Trhlina na potrubí a U15 – Úplné pretrhnutie potrubia, ktoré sú teda spojené bránou OR. Pri poruche riadenia prietoku (udalosť U3) je nutné si uvedomiť, z akých prvkov pozostáva riadenie tejto veličiny. Poruchu riadenia prietoku môže spôsobiť jedna z nasledujúcich udalostí U9 – Zlyhanie merania teploty, alebo U10 – Porucha riadiacej jednotky, alebo U11 – Zlyhanie regulačného ventilu. Udalosti U9 a U10 môžeme považovať za základné. Udalosť U11 bola ďalej rozvinutá, pretože okrem samotnej poruchy (tela) regulačného ventilu (udalosť U12), môže dôjsť k jeho zlyhaniu v dôsledku straty dodávky vzduchu (udalosť U13), ktorá zabezpečuje jeho otváranie/zatváranie.

3.2 Analýza stromu udalostí

EVENT TREE ANALYSIS

Strom udalostí je grafický logický model, ktorý identifikuje a kvantifikuje možné následky začiatkových/iniciačných udalostí, ktorými často bývajú (ale nemusia byť) vrcholové udalosti stromu porúch. Strom udalostí poskytuje systematický opis časovej postupnosti šírenia udalostí od momentu vzniku začiatkovej/iniciačnej udalosti, buď prostredníctvom následných akcií ochranného systému a núdzových operácií (aplikovanie na akcie vykonávané pred incidentom), alebo hľadaním konečných následkov udalosti po úplnej strate kontroly nad systémom (hľadanie priamych následkov po incidente). Stromy udalostí majú teda dve typické oblasti použitia:

- „**pred incidentom**“ – preveruje ochranné systémy, ktoré napriek vzniku začiatkovej/iniciačnej udalosti majú zabrániť vzniku incidentu s nebezpečnými následkami. Takýto strom môže byť použitý na zhodnotenie efektívnosti viacložkového ochranného systému.
- „**po incidente**“ – používa sa na identifikáciu a kvantifikáciu nebezpečných následkov incidentu (keď ochranné systémy nezabránili jeho vzniku). V chemickom priemysle ide najčastejšie o incidenty spojené s únikom nebezpečnej látky, ktoré vedú k následkom ako požiar, výbuch, toxické ohrozenie atď. Následky môžeme rozdeliť na priame (napr. požiar, explózia, disperzia) alebo nepriame (napr. domino efekty na okolitých zariadeniach).

Začiatková/iniciačná udalosť stromu udalostí býva mnohokrát totožná s vrcholovou udalosťou stromu porúch. Avšak rozvoj vrcholovej udalosti sleduje odlišné ciele. Pokiaľ strom porúch rozvíja (hľadá) základné príčiny vzniku vrcholovej udalosti, strom udalostí identifikuje (hľadá) následky vrcholovej udalosti („po incidente“), alebo preveruje efektívnosť ochranných systémov, ktoré majú zabrániť vzniku nebezpečných následkov vrcholovej udalosti.

Každá udalosť stromu udalostí, ktorá nasleduje po začiatkovej/iniciačnej udalosti je ovplyvnené priebehom predchádzajúcej udalosti. Priebeh predchádzajúcej udalosti má najčastejšie binárny charakter (PREBEHLA – NEPREBEHLA, ÚSPECH – NEÚSPECH, ÁNO – NIE), alebo úspešnosť priebehu udalosti môže byť vyjadrené percentuálne (napr. úspešnosť spustenia bezpečnostného alarmu je 50 %).

3.2.1 Postup analýzy stromu udalostí

Pri zostrojovaní stromu udalostí vychádzame zo začiatkovej/iniciačnej udalosti a postupne prechádzame cez všetky ochranné/bezpečnostné systémy, ktoré majú zabrániť vzniku nebezpečných následkov, resp. analyzujeme aspekty ovplyvňujúce konečný následok začiatkovej/iniciačnej udalosti. Každá vetva stromu udalostí reprezentuje následok začiatkovej/iniciačnej udalosti. Celkový postup zostavenia stromu udalostí sa dá zhrnúť do nasledujúcich siedmich krokov:

1. Identifikácia začiatočnej/iniciačnej udalosti. Iniciačná udalosť je charakteristická tým, že predstavuje poruchu niektorého systému, poruchu zariadenia alebo chybu človeka (môže byť totožná s vrcholovou udalosťou stromu porúch);
2. Identifikácia ochranných/bezpečnostných funkcií. Ochranné/bezpečnostné funkcie (systémy) sú zariadenia, akcie, bariéry, ktoré umožňujú korekciu resp. potlačenie následkov začiatočnej/iniciačnej udalosti. Tento krok je obzvlášť dôležitý pri preverovaní ochranných systémov, t. j. analýza stromu udalostí „**pred incidentom**“;
3. Konštrukcia stromu udalostí. Pri samotnom zostavovaní stromu je nutné posúdiť, či bezpečnostná funkcia ovplyvní priebeh iniciačnej udalosti. Ak dôjde k ovplyvneniu udalosti, zostroja sa vetvy pre úspešný a neúspešný zásah bezpečnostného systému. Pokiaľ nedôjde k ovplyvneniu priebehu iniciačnej udalosti, graf sa nerozvetvuje a analyzuje sa nasledujúca funkcia bezpečnostného systému;
4. Klasifikácia nebezpečných následkov začiatočnej/iniciačnej udalosti. V prípade analýzy stromu udalostí „**pred incidentom**“ sa vytvorí zoznam kombinácií zlyhaní ochranných systémov, ktoré vedú k nebezpečnému incidentu (následku). Na druhej strane, strom udalostí „**po incidente**“ poskytuje konkrétny zoznam možných nebezpečných následkov začiatočnej/iniciačnej udalosti (napr. požiar, explózia, disperzia);
5. Určenie pravdepodobnosti vzniku všetkých udalostí vo vetvách stromu udalostí;
6. Výpočet frekvencie výskytu výsledných následkov pre každú vetvu v strome udalostí;
7. Kontrola následkov.

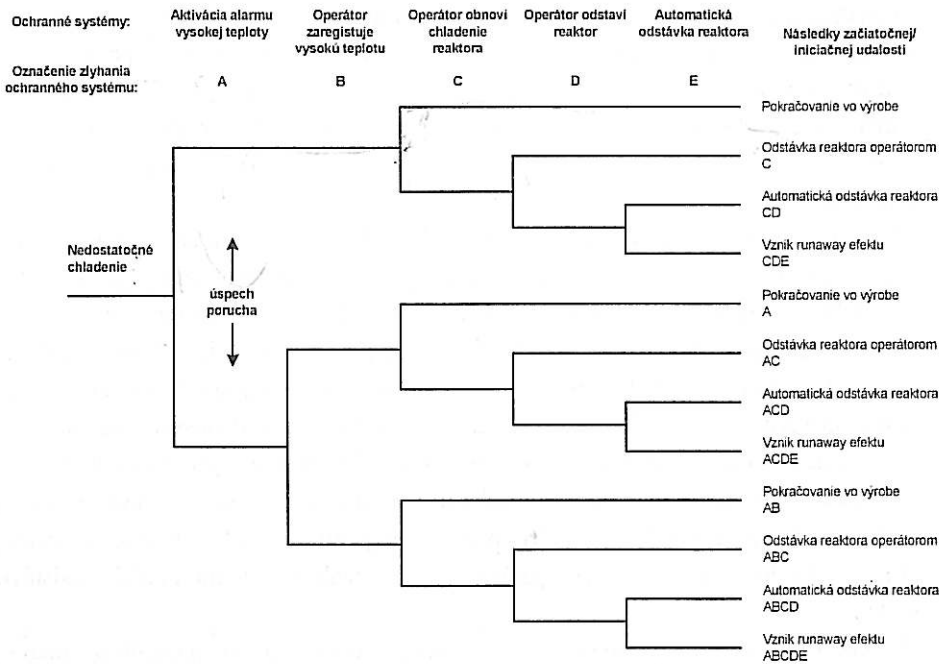
Kroky 1 až 4 predstavujú kvalitatívnu časť stromu porúch, v prípade krokov 5 až 7 ide o kvantifikáciu (výpočet frekvencie/pravdepodobnosti) následkov začiatočnej/iniciačnej udalosti. Keďže táto kniha nie je zameraná na kvantifikovanie frekvencie následkov nebezpečných situácií, v rámci ukážky aplikácie stromu udalostí sa nebudeme zaoberať krokmi 5 až 7. Podrobnejší rozbor stromu udalostí aj s kvantitatívnou časťou stromu udalostí je uvedený v práci (1999).

3.2.2 Ukážka aplikácie stromu udalostí

Ukážka stromu udalostí bude nadväzovať na príklad, ktorý sme si predstavili v kapitole 2.5.3.1 Ukážka HAZOP analýzy zameranej na vznik runaway efektu v chemickom reaktore. Zameriame sa na chemický reaktor, v ktorom prebieha exotermická chemická reakcia. V prípade nedostatočného chladenia tohto reaktora bol ako jeden z možných následkov identifikovaný runaway efekt. Pred aplikáciou HAZOP analýzy bol reaktor zabezpečený proti vzniku tejto nebezpečnej udalosti iba alarmom vysokej teploty. Vedenie prevádzky na základe výsledkov HAZOP analýzy prijalo rozhodnutie, že alarm vysokej teploty bude doplnený o systém automatickej odstávky reaktora. Teplota v reaktore, pri ktorej má dôjsť k automatickej odstávke reaktora je vyššia ako teplota pri ktorej sa aktivuje alarm, aby mal operátor možnosť manuálne obnoviť chladenie reaktora.

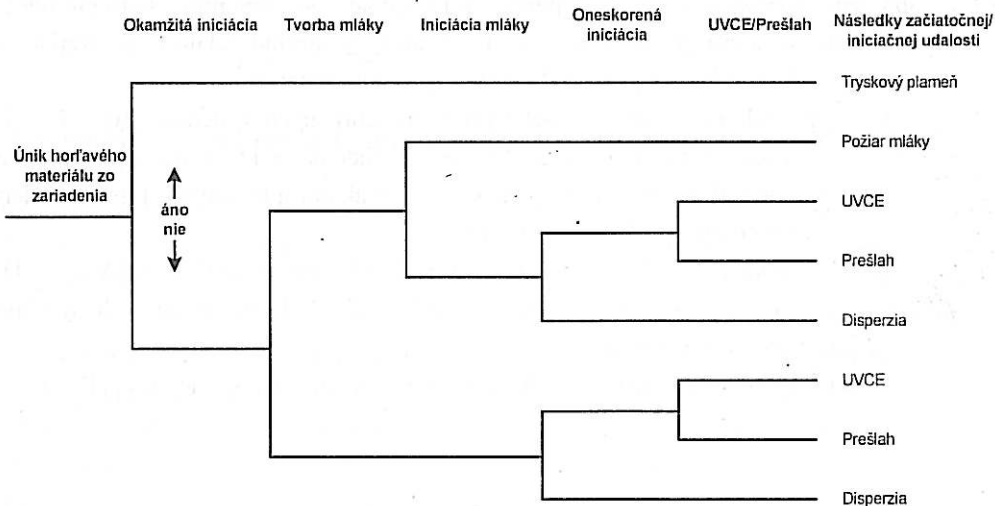
Postup zostrojenia stromu udalostí je nasledujúci:

1. **Identifikácia začiatocnej udalosti.** Ako začiatocná udalosť stromu udalostí bola zvolená udalosť „nedostatočné chladenie“, ktorá môže v prípade nezvrátenia situácie vyústiť do následku runaway efekt. Táto začiatocná/iniciačná udalosť je zároveň totožná s vrcholovou udalosťou „nedostatočné chladenie“ reaktora analyzovanou pomocou stromu porúch na (Obr. 3.5), v pomocou ktorého sme identifikovali základné príčiny jej vzniku.
2. **Identifikácia bezpečnostných/ochranných funkcií.** Na korekciu začiatocnej udalosti „nedostatočné chladenie“, ktorej následkom môže byť runaway efekt, je v reaktore nainštalovaný systém na aktiváciu alarmu vysokej teploty. Po zaregistrovaní vysokej teploty v reaktore operátorom, operátor by sa mal pokúsiť obnoviť chladenie reaktora. Ak operátor nie je schopný obnoviť chladenie, mal by podľa predpisanej procedúry úplne odstaviť reaktor. V prípade, že sa operátorovi nepodarí odstaviť reaktor pred dosiahnutím kritickej teploty, malo by dôjsť k aktivácii systému automatickej odstávky reaktora. Identifikované ochranné systémy môžeme zhrnúť takto: a) aktivácia alarmu vysokej teploty, b) operátor zaregistruje vysokú teplotu, c) operátor obnoví chladenie reaktora, d) operátor odstaví reaktor, e) automatická odstávka reaktora.
3. **Konštrukcia stromu udalostí.** Strom udalostí vychádza zo začiatocnej udalosti „nedostatočné chladenie“, rozvíja sa s ohľadom na chronologické poradie identifikovaných ochranných systémov, pričom sa vyhodnocuje úspešná a neúspešná aplikácia každého z nich. Zostrojený strom udalostí je zobrazený na Obr. 3.6.
4. **Klasifikácia nebezpečných následkov začiatocnej/iniciačnej udalosti.** Pri konštrukcii stromu udalostí boli identifikované štyri následky začiatocnej udalosti: pokračovanie vo výrobe, odstávka reaktora operátorom, automatická odstávka reaktora, vznik runaway efektu, pričom nebezpečným následkom iniciačnej udalosti je iba vznik runaway efektu. Neúspešný zásah ochranného systému je v strome porúch označený veľkými písmenami A až E. Z analýzy stromu udalostí je zrejmé, že nebezpečná výsledná udalosť vzniku runaway efektu nastane:
 - I. v prípade neúspešného zásahu pri troch ochranných systémoch ($C \times D \times E$), t. j. operátorovi sa nepodarí obnovenie chladenia reaktora, následne neodstaví reaktor a zlyhá aj automatická odstávka reaktora a to napriek tomu, že alarm vysokej teploty bol úspešne aktívny,
 - II. v prípade neúspešného zásahu pri štyroch ochranných systémoch ($A \times C \times D \times E$), t. j. zlyhaní alarmu vysokej teploty aj všetkých ochranných systémov menovaných v bode I,
 - III. v prípade neúspešného zásahu všetkých ochranných systémov ($A \times B \times C \times D \times E$).



Obr. 3.6. Strom udalostí pre iniciačnú udalosť „nedostatočné chladenie“

Obrázok (Obr. 3.6) predstavuje ukážku stromu udalostí, v ktorom sa preverujú ochranné systémy slúžiace na zamedzenie nebezpečnej výslednej udalosti vzniku runaway efektu, t. j. strom udalostí „**pred incidentom**“. Jednoduchá ukážka stromu udalostí „**po incidente**“, ktorej výsledkom je konkrétny zoznam možných nebezpečných následkov začiatočnej/iniciačnej udalosti („únik horľavého materiálu zo zariadenia“) je zobrazený na obrázku (Obr. 3.7).



Obr. 3.7. Strom udalostí pre iniciačnú udalosť „únik horľavého materiálu zo zariadenia“

3.3 Analýza ľudskej spoľahlivosti (HUMAN RELIABILITY ANALYSIS – HRA)

Úroveň spoľahlivosti ľudskeho výkonu je nesmierne dôležitá pre úspešné fungovanie systému človek – zariadenie. Spoľahlivosť ľudskeho výkonu je ovplyvňovaná mnohými faktormi, ktoré možno rozdeliť do dvoch základných skupín:

- vnútorné faktory – stres, emocionálny stav, osobná príprava a skúsenosti,
- vonkajšie faktory – pracovná doba, pracovné prostredie, prístup vedúcich, metodické postupy.

Všeobecne možno konštatovať, že počet faktorov, ktoré ovplyvňujú výkon človeka je takmer nekonečný. Niektoré z týchto faktorov nemožno úplne eliminovať, no mnohé faktory možno ovplyvniť a riadiť, čím môžeme v mnohých prípadoch významným spôsobom ovplyvniť celkovú úspešnosť procesu. Nakoľko vnútorné a vonkajšie faktory sú základným zdrojom ľudských chýb, ich identifikácia patrí k primárnym cieľom analýzy ľudskej spoľahlivosti (HRA). HRA teda možno definovať ako proces systematického hodnotenia faktorov, ktoré ovplyvňujú prácu operátorov, údržby, technikov a iných zamestnancov podniku, s cieľom identifikácie potenciálnych ľudských chýb, ktoré sa môžu vyskytnúť v priebehu normálnej prevádzky alebo v prípade núdzových stavov. V neposlednom rade k úlohám HRA patrí navrhovať také úpravy systému, ktoré môžu znížiť pravdepodobnosť vzniku týchto chýb.

Je nutné pripomenúť, že mnohé vyššie uvedené metódy na identifikáciu nebezpečenstiev majú v sebe potenciál identifikovať nebezpečné situácie spôsobené zlyhaním ľudskeho faktora. Napríklad chyba operátora môže byť použitá ako základná (príp. nerozvinutá) udalosť pri analýze stromu porúch. Aj metodiky „Čo ak?“ a analýza kontrolného zoznamu môžu počas identifikácie nebezpečenstva zahŕňať vplyv ľudskeho faktora. Napríklad v prípade vytvorenia otázky: „Čo ak by operátor pridal viac roztoku amoniaku?“ možno odhaliť následok nesprávneho dávkovania suroviny a identifikovať vznik nebezpečnej situácie, ale nezistí sa príčina operátorovej chyby. Pracovný tím by mal pokračovať otázkou: „Prečo by mohol operátor pridať viac roztoku amoniaku?“ ale nemal by sa uspokojiť s povrchnou odpoveďou napr. „z nepozornosti“. Pri tvorbe otázok pre metodiku „Čo ak?“ prípadne pri generovaní kontrolného zoznamu možno relatívne jednoducho zaradiť otázky typu:

- Sú ovládacie prvky ľahko prístupné?
- Je možné jednotlivé ovládacie prvky jednoducho rozlíšiť?
- Majú pracovníci dostatok informácií, aby určili príčinu výskytu poruchy - odchýlky?

Podobným spôsobom možno ľudský faktor zahrnúť aj do HAZOP analýzy, kde sa môže vytvoriť odchýlka od projektového zámeru, ktorá je spôsobená chybou operátora. Aj napriek skutočnosti, že vyššie spomenuté štandardné metódy umožňujú zahrnúť ľudský faktor do identifikáciu nebezpečenstva, predsa len sú viac optimalizované na identifikáciu nebezpečných situácií spôsobených „hardvérovými“ aspektmi. Preto je vhodnejšie použiť špeciálne postupy identifikácie nebezpečenstva – súhrne označované ako HRA v prípadoch, ak sa posudzovaná činnosť skladá z operácií, pri ktorých je potrebná súčinnosť človeka a zariadenia.

3.3.1 Všeobecný postup HRA analýzy

V súčasnosti existuje viacero špeciálnych metód určených na identifikáciu nebezpečenstiev pre systémy človek – zariadenie. Nakoľko sa zväčša jedná o metódy, ktoré sú veľmi špecifické z hľadiska možnosti využitia, v nasledujúcom texte sa budeme venovať len všeobecnému postupu HRA analýzy.

Všeobecný postup HRA analýzy pozostáva s nasledujúcich krokov:

- popis pracovného prostredia, pracovných úloh a charakteristiky pracovníka,
- hodnotenie rozhrania človek – technika,
- vykonanie úlohovej analýzy jednotlivých funkcií pracovníka,
- vykonanie analýzy ľudskej chyby v jednotlivých funkciách pracovníka,
- dokumentácia výsledkov.

Je nutné poznamenať, že uvedené kroky predstavujú len tú najvšeobecnejšiu kostru HRA. V mnohých prípadoch nie je potrebné vykonať všetky vyššie uvedené kroky, ale vykonávajú sa len tie, ktoré odpovedajú hĺbke analýzy s cieľom splnenia dopredu zadefinovaného účelu analýzy. Napríklad, ak je cieľom analýzy zvýšenie výkonnosti operátora v riadiacej miestnosti, analýzu možno ukončiť už po vykonaní analýzy jednotlivých funkcií pracovníka (teda v treťom bode).

3.3.1.1 Opis pracovného prostredia, pracovných úloh a charakteristiky pracovníkov

Opis pracovného prostredia, pracovných úloh a charakteristiky pracovníkov je takmer vždy prvým krokom v HRA analýze. Jeho hlavným cieľom je detailne pochopenie systému človek – technika. V tomto kroku je potrebné získavať informácie z viacerých zdrojov. Typické zdroje informáciu, potrebných na začatie HRA analýzy sú:

- demografické informácie týkajúce sa zamestnancov ako jazyk, úroveň vzdelania, fyzické predpoklady,
- opis pracovného prostredia,
- opis operačných postupov,
- fyzická návšteva a kontrola pracovného prostredia,
- rozhovory s operátormi posudzovanej jednotky,
- analýza predchádzajúcich nebezpečných situácií, ktoré boli spôsobené zlyhaním ľudského faktora.

3.3.1.2 Hodnotenie rozhrania človek – technika

V druhom kroku je potrebné vyhodnotiť kompatibilitu medzi potrebami človeka a limitáciami, ktoré vo svojej podstate vymedzuje technika. Nemenej dôležité je preskúmať prevádzkové a pracovné podmienky v rámci jednotky s cieľom vyhodnotiť adekvátnosť požiadaviek kladených na operátorov (obsľuhu). V tomto kroku môžu byť identifikované problémy ako:

- komplikované označovanie riadiacich komponentov,
- ťažko čitateľné údaje na zobrazovacích jednotkách z dôvodu zlého umiestnenia,
- vysoko umiestnené ručné ventily, s ktorými je náročné manipulovať,
- nedostatočná efektívna komunikácia medzi operátormi resp. medzi jednotlivými zmenami.

3.3.1.3 Vykonanie úlohovej analýzy jednotlivých funkcií pracovníka

Po identifikácii a náprave všeobecných problémov rozhrania človek – technika, je potrebné vykonať detailný rozbor funkcií, ktoré má pracovník vykonať. Tento proces sa nazýva úlohová analýza. Počas úlohovej analýzy sa skúmaná funkcia operátora rozdelí na postupnosť úloh, ktoré musí pracovník vykonať, aby splnil danú funkciu. Vyjadrenie úlohovej analýzy napr. pre skúmanú funkciu operátora môže byť nasledujúce:

$$\text{Funkcia operátora} = \text{Úloha}_1 + \text{Úloha}_2 + \text{Úloha}_3 + \dots \quad (3.5)$$

Pre úspešné splnenie zadefinovanej funkcie pracovníka musí dôjsť k splneniu všetkých úloh, čo predstavuje niekoľkonásobnú príležitosť na vznik ľudskej chyby.

3.3.1.4 Vykonanie analýzy ľudskej chyby v jednotlivých funkciách pracovníka

Po zostrojení postupnosti úloh, nasleduje fáza, v ktorej sa tieto úlohy vyhodnocujú s cieľom identifikovať situácie, ktoré by mohli spôsobiť nesplnenie zadefinovanej funkcie v dôsledku ľudskej chyby. Na analýzu jednotlivých úloh sa používa modifikovaná verzia stromu udalostí. Ukážka typického stromu udalostí, používaného v HRA analýze je uvedená v príklade aplikácie HRA analýzy (3.3.2).

3.3.1.5 Dokumentácia výsledkov

Finálnym krokom v HRA analýze je podrobné dokumentovanie výsledkov štúdie. Tento dokument by mal obsahovať opis systému človek - technika, úlohovú analýzu jednotlivých funkcií, modifikovaný strom udalostí a diskusiu o faktoroch určujúcich výkon pracovníkov resp. faktoroch, ktoré vytvárajú predpoklad na vznik ľudskej chyby. Ďalej by mal obsahovať odporúčania, ktoré môžu znížiť pravdepodobnosť vzniku ľudskej chyby.

3.3.2 Ukážka aplikácie HRA analýzy

Uvažujme situáciu, pri ktorej operátor vo velíne musí ručne aktivovať bezpečnostný systém na odstávku prevádzky. Vo velíne sa nachádza množstvo alarmov, ale operátor má aktivovať bezpečnostný systém len v prípade, ak sa aktivuje aspoň jeden z piatich kritických alarmov

(ostatné „nekritické“ alarmy rovnako oznamujú výskyt odchýlok a vyžadujú akciu operátora, ale vtedy sa nevyžaduje aktivácia bezpečnostného systému).

V prvej fáze, pri opise pracovného prostredia a pracovných úloh boli identifikované nasledujúce skutočnosti:

- vysoká úroveň hluku vo veľine výrazne komplikuje zaznamenania zvukového signálu alarmov,
- vizuálne indikátory piatich kritických alarmov sú umiestnené v rôznych častiach riadiaceho panela, čo komplikuje identifikáciu kritického alarmu,
- tlačidlo na aktiváciu bezpečnostného systému je umiestnené pod chrániacim krytom, ktorý ma zabrániť náhodnému stlačeniu, pričom vytvorená ochrana spôsobuje značný problém pri potrebe rýchlej aktivácii bezpečnostného systému,
- bezpečnostný systém neobsahuje indikátor oznamujúci úspešnosť vykonania jeho aktivácie.

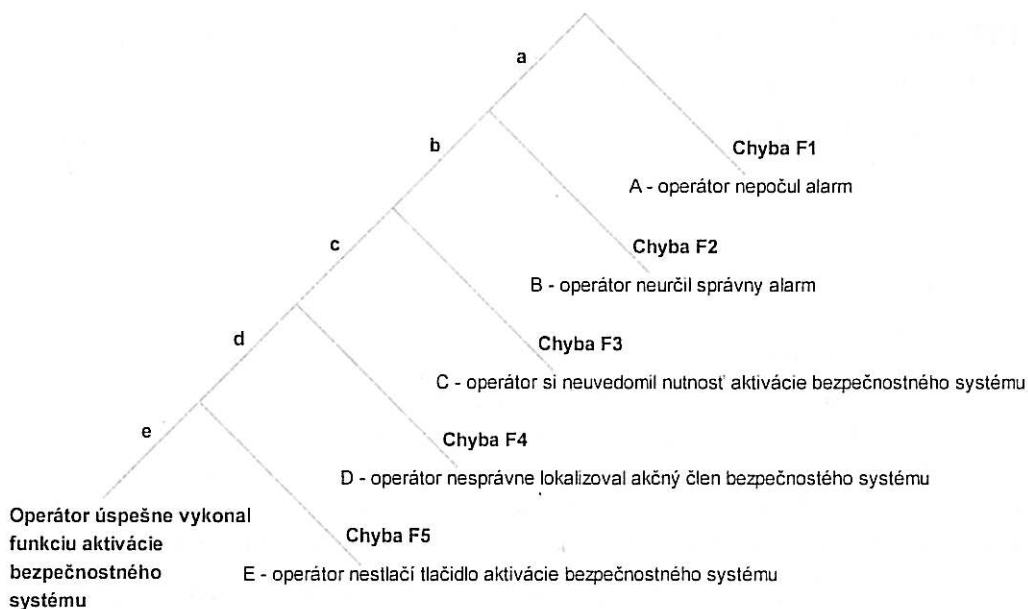
Pri vykonaní úlohovej analýzy funkcie operátora, ktorú predstavuje „aktivácia bezpečnostného systému“ bol identifikovaný nasledujúci zoznam úloh:

- Úloha 1: Rozpoznanie aktivácie alarmu.
- Úloha 2: Rozpoznanie typu alarmu.
- Úloha 3: Uvedomenie si nutnosti aktivácie bezpečnostného systému.
- Úloha 4: Lokalizácia aktivačného prvku bezpečnostného systému.
- Úloha 5: Aktivácia bezpečnostného systému stlačením tlačidla.

V nasledujúcom kroku prebieha analýza ľudskej chyby v definovanej funkcii operátora:

- **Nezrovnalosti v dodržiavaní prevádzkových postupov** – prevádzkové postupy prikazujú operátorovi okamžite inicializovať bezpečnostný systém v prípade aktivácie aspoň jedného z piatich kritických alarmov, ale prax ukazuje, že pred samotnou aktiváciou bezpečnostného systému sa operátor snaží vykonávať ešte nejaké „zúfalé“ opatrenia pred aktiváciou bezpečnostného systému.
- **Zlé rozvrhnutie panela** – riadiaci panel bol po poslednej rekonštrukcie rozšírený a riadiace prvky boli rozmiestnené na voľné miesta bez prísnejších logických alebo ergonomických zásad.
- **Jednotvárnosť** – počas nočných smien sa vyskytujú dlhé časové úseky, počas ktorých nie je nutné zasahovať do priebehu výroby, čo spôsobuje otupenie pozornosti operátora, ktorý je vo veľine sám. V noci by bola vhodná striedanie aspoň dvoch operátorov, aby nemohlo dôjsť k dramatickému zníženiu pozornosti operátora zodpovedného za chod prevádzky.

Nasledujúci obrázok (Obr. 3.8) zobrazuje HRA strom udalostí opisujúci úlohovú analýzu funkcie operátora „aktivácia bezpečnostného systému“. Malé písmená „a“ až „e“ predstavujú úspešné splnenie po sebe nasledujúcich úloh, ktoré musia byť vykonané pre splnenie funkcie operátora po zaznení kritického alarmu. Veľkými písmenami „A“ až „E“ je označené nesplnenie úlohy, čím nedôjde k splneniu funkcie, t. j. aktivácia bezpečnostného systému.



Obr. 3.8. HRA strom udalostí zobrazujúci úlohovú analýzu funkcie operátora „aktivácia bezpečnostného systému“

Použitá literatúra

- [1] AICHE 1992. *Guidelines for hazard evaluation procedures*, 2nd ed, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, NY xxxi, 461 p. pp.
- [2] MANNAN, S., LEES, F. P. 2005. *Lee's loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment, and control*, 3rd ed, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam; Boston.
- [3] 1999. *CPR 18E: guidelines for quantitative risk assessment*, 1st. ed, Sdu, Den Haag [250] p. pp.

Príloha 1 – Vybrané vlastnosti horľavých a toxických látok, použitých v skriningových metódach (indexová metóda Dow, selekčná metóda)

Horľavé látky

Horľavé látky sú látky v tuhom, kvapalnom alebo plynnom skupenstve, ktoré sú za definovaných podmienok schopné horieť alebo pri svojej látkovej alebo fázovej premene vytvárať produkty schopné horieť. Horenie môže nastať v homogénnej fáze alebo na rozhraní fáz. Priebeh horenia je limitovaný prítomnosťou horľavej látky a oxidačného prostriedku, ktoré spolu vytvárajú horľavú zmes. Horľavá látka (palivo) a oxidačný prostriedok (kyslík, vzduch) tvoria dva vrcholy trojuholníka horenia. Tretí vrchol trojuholníka horenia tvorí zdroj zapálenia (iniciátor), aby boli splnené všetky tri nevyhnutné podmienky pre začatie procesu horenia. Reakčná schopnosť horľavín klesá od plynného cez kvapalné až k tuhému skupenstvu. Pri horení kvapalín je rozhodujúcim faktorom dosiahnutie optimálnej koncentrácie horľavých plynov nad hladinou (ktorá sa vyjadruje intervalom dolnej a hornej hranice horľavosti a výbušnosti paliva) a vytvorenie horľavej zmesi premiešaním s oxidovadlom. Tuhý materiál obvyčajne nereaguje priamo s kyslíkom, ale samotnému horeniu predchádza tepelný rozklad za vzniku prchavých produktov. Keď je zmes prchavých produktov horľavá, dochádza pri styku s kyslíkom za priaznivých podmienok k vzplanutiu a plameňovému horeniu. Uhlíkom obohatený tuhý zvyšok môže ďalej oxidovať tzv. bezplameňovým horením (tlením, žeravením).

V nasledujúcom texte sú zadané vybrané vlastnosti horľavých látok, ktoré sú použité v metódach identifikácie nebezpečenstva opísaných v predchádzajúcich kapitolách.

Teplota vzplanutia

je najnižšia teplota kvapalnej látky pri tlaku 101 kPa, pri ktorej sa uvoľní zo zahrievanej vzorky nad jej hladinou do vzduchu toľko pár, že vzniknutá zmes pár skúšanej látky a vzduchu pri daných podmienkach skúšky po priblížení skúšobného plameňa vzplanie a opäť zhasne. Bod vzplanutia je kritérium pre zaradenie horľavých kvapalín do triedy nebezpečnosti Tabuľka P1.1.

Tabuľka P1.1. Triedy nebezpečnosti horľavých kvapalín

Trieda horľavosti	Bod vzplanutia
I.	do 21 °C
II.	nad 21 °C do 55 °C
III.	nad 55 °C do 100 °C
IV.	nad 100 °C do 250 °C

Teplota vznietenia

Teplota vznietenie horľavých kvapalín je najnižšia teplota horúceho povrchu, pri ktorej sa najvhodnejšia zmes pár alebo plynov danej látky so vzduchom vznieti za predpísaných skúšobných podmienok.

Tabuľka P1.2. Teplotné triedy na základe teploty vznietenia

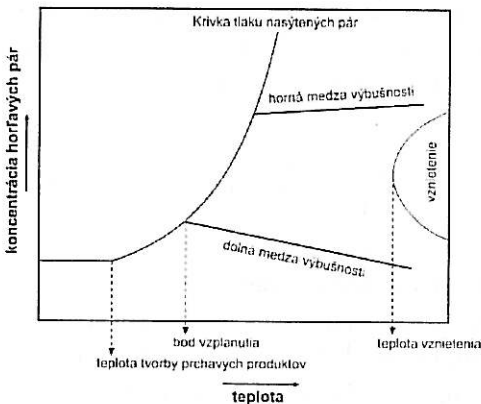
Trieda	Teplota vznietenia v °C
T1	nad 450
T2	nad 300 do 450
T3	nad 200 do 300
T4	nad 135 do 200
T5	nad 100 do 135
T6	nad 85 do 100

Dolná medza horľavosti/výbušnosti (DMH)

Dolná medza horľavosti/výbušnosti je najnižšia koncentrácia pár látky v zmesi so vzduchom, kedy sa už v uzavretých priestoroch za predpísaných podmienok táto zmes zapáli.

Horná medza horľavosti/výbušnosti (HMH)

Horná medza horľavosti/výbušnosti je najvyššia koncentrácia pár látky v zmesi so vzduchom, kedy sa ešte v uzavretých priestoroch za predpísaných podmienok táto zmes zapáli.



Obr. P1.1. Diagram znázorňujúci krivku tlaku nasýtených pár, dolnú a hornú medzu výbušnosti, teplotu tvorby prechvých produktov, body vznietenia a vzplanutia v závislosti od teploty

Toxické látky

Toxické látky sú látky, ktoré pri kontakte s organizmom, alebo po preniknutí do organizmu, spôsobia zmeny niektorej z jeho funkcií (príp. súboru funkcií) a následne tieto zmeny vedú k poškodeniu zdravia, prípadne až k smrti. Prejav intoxikácie závisí od koncentrácie toxickkej látky, dĺžky trvania expozície a toxických vlastností látky. Na posúdenie a vzájomné porovnanie toxických vlastností látok sa používajú rôzne limitné hodnoty definované autoritami pre rôzne účely. Napríklad ide o hodnoty LC₅₀ (Stredná smrteľná koncentrácia –

Median Lethal Concentration), IDHL (Okamžité nebezpečenstvo pre zdravie alebo život – Immediately Dangerous to Life or Health), ERPG (Príručka plánovania havarijnej odozvy – Emergency Response Planning Guideline), NPEL (Najvyššie prípustné expozičné limity). Pre potreby skríningových metód sa využívajú hodnoty NPEL a LC₅₀.

NPEL – Najvyššie prípustné expozičné limity chemických faktorov v pracovnom ovzduší

Hodnoty NPEL sú definované v nariadení vlády Slovenskej republiky č. 300/2007 Z. z., ktorým sa mení nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 355/2006 Z. z. o ochrane zamestnancov pred rizikami súvisiacimi s expozíciou chemickým faktorom pri práci.

Najvyššie prípustný expozičný limit (NPEL) je definovaný ako najvyššia koncentrácia chemického faktora (plynu, pary alebo hmotnostných častíc) v pracovnom ovzduší, ktorá vo všeobecnosti nemá škodlivé účinky na zdravie zamestnancov ani nespôsobí neodôvodnené obťažovanie napríklad nepríjemným zápachom, a to aj pri opakovanej a dlhodobej expozícii denne počas osemhodinovej pracovnej zmeny a 40-hodinového pracovného týždňa.

Najvyššie prípustné expozičné limity (NPEL) pre chemické faktory sú stanovené priemernou hodnotou a krátkodobou hodnotou.

Najvyššie prípustný expozičný limit priemerný predstavuje časovo vážený priemer hodnôt koncentrácií nameraných v dýchacej zóne zamestnanca za osemhodinovú pracovnú zmenu a 40-hodinový pracovný týždeň.

Najvyššie prípustný expozičný limit krátkodobý stanovuje povolené krátkodobé prekročenie hodnôt NPEL v dĺžke 15 minút v priebehu zmeny. Najvyššie prípustné expozičné limity plynom a parám sú stanovené nezávisle od teploty a tlaku v ml.m⁻³ (ppm – parts per milion) a závisle od týchto premenných v mg.m⁻³ pri teplote 20 °C a tlaku 101,3 kPa.

Prepočet mg.m⁻³ na ppm:

$$\text{koncentrácia v mg.m}^{-3} \text{ v ovzduší} = \frac{\text{molekulová hmotnosť v g.mol}^{-1}}{24,1 \text{ l.mol}^{-1}} \times \text{koncentrácia v ppm}$$

LC₅₀ – Median lethal concentration – Stredná smrteľná koncentrácia

LC₅₀ je štatisticky alebo graficky odvodená koncentrácia, pri ktorej sa očakáva úmrtnosť 50 % testovanej skupiny populácie v priebehu definovaného času expozície. Hodnota LC₅₀ sa zvykne udávať v jednotkách hmotnosti na kubický meter, prípadne v jednotkách ppm.

NFPA – Diamant nebezpečenstva

Diamant nebezpečenstva bol vyvinutý Národnou americkou protipožiarnou organizáciou NFPA (National Fire Protection Association) v USA. Tento systém je dnes v medzinárodnej bezpečnostnej praxi veľmi často požívaný aj napriek tomu, že bol primárne určený pre potreby Amerických protipožiarnych agentúr na rýchle a ľahké identifikovanie rizík nebezpečných materiálov. Označenie nebezpečnej látky sa realizuje prostredníctvom kosoštvorca so štyrmi farebnými poľami, ktoré obsahujú numerické vyjadrenie nebezpečenstva. Modré pole označuje stupeň ohrozenia zdravia v dôsledku toxických

vlastností látky, červené pole označuje stupeň horľavosti látky, žlté pole označuje stupeň reaktivity a biele políčko obsahuje špeciálne označenie pre iné nebezpečné vlastnosti látky (nekompatibilita s vodou „W“, látka sa môže správať ako silné oxidovadlo „OX“). Modré (toxicita), červené (horľavosť) a žlté pole (reaktivita) obsahuje číslo z rozsahu od 0 po 4, ktoré označuje stupeň rizika ohrozenia danou nebezpečnou vlastnosťou látky (0 – žiadne riziko, 4 – veľké riziko). Ide o koeficienty toxicity K_T , horľavosti K_H , reaktivity K_R . Primárnym zdrojom hodnôt koeficientov K_T , K_H a K_R sú publikácie organizácie NFPA (NFPA 325: *Guide to Fire Hazard Properties of Flammable Liquids, Gases, and Volatile Solids* (1994), prípadne NFPA 49: *Hazardous Chemicals Data* (1994)). V prípade látok, ktoré sa nenachádzajú v uvedených zdrojoch, možno použiť nasledujúce tabuľky na určenie koeficientov K_T , K_H a K_R .

K_T	Charakteristika
0	Látky, ktoré žiadnym spôsobom neohrozujú zdravie
1	Látky slabo dráždivé, so slabými a dočasnými následkami, a to aj v prípade, keď neboli použité ochranné prostriedky. Pri dodržaní zásad bezpečnosti práce sú prakticky neškodné. Patria sem: <ul style="list-style-type: none"> • látky, ktoré pri horení môžu uvoľňovať dráždivé produkty horenia, • látky, ktoré dráždia pokožku bez poškodenia odevu.
2	Látky, ktoré pri intenzívnom alebo dlhodobom pôsobení môžu zapríčiniť dočasnú práceneschopnosť alebo zanechať trvalé následky aj napriek rýchlej lekárskej pomoci. Pri práci s nimi je potrebné použiť respirátor s nezávislým zdrojom vzduchu. Patria sem: <ul style="list-style-type: none"> • látky, ktoré pri horení uvoľňujú toxické produkty horenia, • látky, ktoré pri horení uvoľňujú vysoko dráždivé produkty, • látky, ktoré za normálnych podmienok alebo pri horení uvoľňujú toxické pary bez varovných príznakov (zápach, farebný oblak).
3	Látky, ktoré pri krátkodobom pôsobení zapríčinia vážne dočasné alebo trvalé poškodenie organizmu, a to aj napriek rýchlej lekárskej pomoci. Pri práci s nimi sú potrebné celotelové ochranné prostriedky. Patria sem: <ul style="list-style-type: none"> • látky, ktoré pri horení produkujú vysoko toxické spaliny, • látky rozkladajúce textilie a látky toxické pri kontakte s kožou, • preukázateľné a možné karcinogény.
4	Látky, ktoré aj pri veľmi krátkom kontakte zapríčinia smrť alebo veľmi ťažké trvalé následky aj napriek veľmi rýchlej lekárskej pomoci. Pri práci s nimi je nevyhnutné používať špeciálne ochranné prostriedky a nástroje. Patria sem: <ul style="list-style-type: none"> • látky, ktoré prenikajú cez bežné gumené ochranné prostriedky, • látky, ktoré za normálnych podmienok uvoľňujú extrémne nebezpečné pary resp. plyny, ktoré vnikajú do organizmu dýchacími cestami a kožou, • preukázateľné a možné karcinogény, mutagény.

K_H	Charakteristika
0	Nehorľavé látky, t. j. látky, ktoré sa nezapália ani na vzduchu pri teplotách 800°C po dobu dlhšiu ako 5 minút.
1	Látky, ktoré sa musia silne prehriať, aby sa zapálili. Patria sem: <ul style="list-style-type: none"> • látky, ktoré sa zapália na vzduchu, ak sú vystavené teplotám 800 °C menej ako päť minút, • kvapaliny, tuhé látky a polotekuté látky, ktoré majú FP > 100 °C.
2	Látky, ktoré sa zapália pri slabom prehriatí alebo pri vystavení vyšším okolitým teplotám. Za normálnych podmienok netvorí so vzduchom nebezpečnú atmosféru, ale pri vysokej teplote okolia alebo pri slabom zahrievaní uvoľňujú dostatočné množstvo pár k tomu, aby sa so vzduchom taká atmosféra vytvorila. Patria sem: <ul style="list-style-type: none"> • kvapaliny s bodom vzplanutia v rozmedzí 38 °C < T_{FP} < 100 °C, • tuhé alebo polotuhé látky, ktoré ľahko uvoľňujú horľavé pary.
3	Kvapaliny a tuhé látky, ktoré sú zápalné pri teplotách prostredia. Látky s týmto stupňom tvoria so vzduchom nebezpečné zmesi pri všetkých teplotách a sú ľahko zápalné bez ohľadu na okolitú teplotu. Patria sem: <ul style="list-style-type: none"> • kvapaliny, ktorých bod vzplanutia je v rozmedzí 23 °C < T_{FP} < 38 °C, alebo kvapaliny, pre ktoré platí T_{FP} < 23 °C a T_{BP} > 38 °C, • tuhé látky vo forme hrubých prachov, ktoré sú schopné rýchlo zhorieť, ale vo všeobecnosti netvorí so vzduchom výbušnú atmosféru, • tuhé látky vo vláknitej alebo útržkovitej forme, ktoré môžu rýchle horieť, a ktoré sa ľahko zapália iskrou (bavlna, konope, sisal), • látky, ktoré horia extrémne rýchlo, zvyčajne v dôsledku toho, že obsahujú vo svojej molekule reaktívny kyslík (organické peroxidy, suchá nitrocelulóza), • látky, ktoré začnú horieť spontánne pri styku so vzduchom.
4	Látky, ktoré sa veľmi rýchlo vyparujú alebo úplne odparia pri normálnej teplote a atmosférickom tlaku, látky, ktoré sa ľahko rozptýlia vo vzduchu a ktoré ľahko horia. Patria sem: <ul style="list-style-type: none"> • plyny, • kvapaliny a plyny, ktoré sú kvapalné pri vyšších tlakoch a ktoré majú T_{FP} < 23 °C a T_{BP} < 38°C, • látky, ktoré vďaka svojej fyzikálnej forme alebo podmienkam v ich okolí ľahko tvoria so vzduchom výbušné zmesi, látky, ktoré sa ľahko dispergujú vo vzduchu ako napr. prach z horľavých tuhých látok, aerosóly a hmly horľavých kvapalín.

K_R	Charakteristika
0	Látky, ktoré sú stabilné, aj v plameni, nereagujú s vodou. Patria sem: <ul style="list-style-type: none"> • látky, ktoré nereagujú s vodou do teplôt 300 °C, • látky, ktoré reagujú silne exotermicky vyšších ako 300 °C, • látky, ktoré nereagujú exotermicky ani pri teplotách do 500 °C.
1	Látky, ktoré samé o sebe, sú za normálnych podmienok stabilné, ale môžu byť nestabilné pri zvýšenej teplote a tlaku. Patria sem: <ul style="list-style-type: none"> • látky, ktoré sa menia alebo rozkladajú pôsobením vzduchu, vody alebo vlhkostí, • látky, ktoré reagujú silne exotermicky pri teplotách vyšších ako 150 °C, ale nižších ako 300 °C, • látky, ktoré reagujú s vodou za uvoľnenia malého množstva tepla bez výrazného nebezpečenstva.
2	Látky, ktoré pri zvýšenej teplote a tlaku podliehajú nebezpečným chemickým reakciám, ale bez výbuchu (detonácií). Patria sem: <ul style="list-style-type: none"> • látky, ktoré reagujú silne exotermicky pri normálnych teplotách a tlakoch, • látky, ktoré podliehajú nebezpečným chemickým premenám pri zvýšenej teplote alebo tlaku, • látky, ktoré prudko reagujú s vodou alebo s ňou tvoria výbušnú zmes.
3	Látky, ktoré sa rozkladajú za výbuchu, alebo explozívne reagujú, ale vyžadujú silnú iniciáciu z vonkajšieho zdroja (zdroj tepla, mechanické namáhanie, elektrická iskra). Patria sem: <ul style="list-style-type: none"> • látky, ktoré sú citlivé na tepelné alebo mechanické šoky pri zvýšených teplotách alebo tlakoch, • látky, ktoré explozívne reagujú s vodou bez predchádzajúceho zahrievania alebo dlhšieho vzájomného kontaktu.
4	Látky nestabilné, samovoľne sa rozkladajúce za výbuchu pri normálnych teplotách a tlakoch. Látky citlivé na lokálne prehriatie alebo mechanický šok (náraz a pod.) pri normálnej teplote a tlaku.

Príloha 2 – Vybrané vlastnosti nebezpečných látok

	Sum. vzorec	CAS	skupenstvo	M_m [g.mol ⁻¹]	NPEL prie- merný [ppm]	kategória	NPEL _k krátko- dobý [ppm]	LC ₅₀ [ppm]	T_T [°C]	T_V [°C]	$T_{v,sp}$ [°C]	T_{sam} [°C]	DMV [%]	HMV [%]	P_{SAT} [kPa]	K_T [-]	K_{Hl} [-]	K_R [-]	ΔH_c [kJ.kg ⁻¹]
acetaldehyd (etanál)	C2H4O	75-07-0	G	44,1	50	I	50	15874	-123,0	20,9	-38,1	180	4	60	97,5	2	4	2	-25070
acetanhydrid (anhydrid kyseliny octovej)	C4H6O3	108-24-7	L	102,1	5	I	5	1587	-73,0	139,5	49,0	316	2,7	10,3	0,47	3	2	1	-16410
acetón (propanón)	C3H6O	67-64-1	L	58,1	500	-	1000	41000	-94,9	56,1	-18,0	465	2,5	12,8	24,7	1	3	0	-28560
acetomitril (nitril kyseliny etánovej)	C2H3N	75-05-8	L	41,1	40	-	-	42000	-44,0	81,9	6,0	524	3	16	9,7	2	3	0	-29000
akroleín (propenál)	C3H4O	107-02-8	L	56,1	0,1	-	-	104	-87,9	52,7	-26,0	234	2,8	31	29,7	4	3	3	-27590
2-aminoetanol	C2H7NO	141-43-5	L	61,1	1	-	3	-	10,5	170,0	85,0	410	3	20,7	0,03	3	2	0	-22310
alyalkohol	C3H6O	107-18-6	L	58,1	2	-	5	1060	-129,0	97,0	20,9	378	2,5	18	2,47	3	3	0	-29820
amoniak	NH3	7664-41-7	G	17	20	-	50	9500	-77,9	-33,4	-	651	15	28	85,4	3	1	0	-18600
amylalkohol (1- pentanol)	C5H12O	71-41-0	L	88,1	100	-	-	-	-78,0	137,9	33,0	300	1,2	10	0,2	1	3	0	-34760
anilín	C6H7N	62-53-3	L	93,1	2	II	4	-	-6,0	184,0	70,0	615	1,3	11	0,06	3	2	0	-34780
bifenyľ	C12H10	92-52-4	S	154,2	0,16	-	-	-	68,9	255,0	113,0	540	0,6	5,8	<0,01	2	1	0	-40520
brómeťán (etylbrómíd)	C2H5Br	74-96-4	L	109	180	-	-	26980	-118,8	38,4	-23,0	511	6,8	11,3	51,8	2	1	0	-11790
butanón (etylmetylketón)	C4H8O	78-93-3	L	72,1	200	-	300	5040	-86,7	79,9	-9,0	505	1,8	11,5	9,7	1	3	0	-31450
butanol	C4H10S	109-79-5	L	90,2	0,5	II	I	6400	-115,9	98,2	1,7	460	1,4	11,3	4,8	2	3	0	-32770
2-butoxyletanol (butyl glykol)	C6H14O2	111-76-2	L	118,2	20	-	50	714	-74,0	171,1	60,0	238	1,1	12,7	0,1	2	2	0	-30130
2-butoxyetylacetát (butyl glykol)	C8H16O3	112-07-2	L	160,2	20	-	50	-	-63,5	192,0	71,0	340	0,9	8,5	0	1	2	0	-27290
1-butylacetát	C6H12O2	123-86-4	L	116,2	100	I	70	620	-74,0	126,0	22,0	420	1,7	7,6	1,1	1	3	0	-28240
2-butylacetát	C6H12O2	105-46-4	L	116,2	100	-	-	-	-99,0	112,0	17,0	390	1,7	9,7	2,2	1	3	0	-28130

I-butanol	C4H10O	71-36-3	L	74,1	100	I	100	12700	-89,3	118,0	29,0	345	1,4	11,2	0,62	1	3	0	-33110
2-butanol	C4H10O	78-92-2	L	74,1	50	-	-	25400	-114,9	99,8	24,0	405,5	1,7	9,8	1,65	1	3	0	-35000
terc-butanol	C4H10O	75-65-0	S	74,1	20	II	80	-	25,4	82,8	11,0	470	2,4	8	4,1	2	3	0	-32700
butyldiglykol 2-(2-butoxyetoxy)etanol	C8H18O3	112-34-5	L	162,2	10	-	15	-	-68,0	230,7	78,0	226	0,8	9,4	<0,01	1	2	0	-28660
cyklohexán	C6H12	110-82-7	L	84,2	200	-	-	-	6,5	81,0	-20,0	250	1,3	8	10,4	1	3	0	-43440
cyklohexanol	C6H12O	108-93-0	L	100,2	50	I	50	-	23,5	161,0	68,0	300	2,4	12	0,1	1	2	0	-34580
cyklohexanon	C6H10O	108-94-1	L	98,1	10	-	20	12700	-32,0	155,8	44,0	420	1,1	9,4	0,4	1	2	0	-33610
cyklohexén	C6H10	110-83-8	L	82,1	300	-	-	-	-103,8	83,0	-12,0	244	1,3	7,7	9,4	1	3	0	-43000
cyklohexylamin (cyklohexánamin)	C6H13N	108-91-8	L	99,2	2	I	4	-	-17,7	134,3	31,0	293	1,5	9,4	1	3	3	0	-38170
diborán	B2H6	19287-45-7	G	27,7	0,1	-	-	-	-165,3	-92,5	-90,0	38	0,8	88	4029	4	4	3	-72280
dibutyflaíát	C16H22O4	84-74-2	L	278,3	-	-	-	340	-35,0	340,0	157,0	402	0,5	3,5	<0,01	0	1	0	-29150
dietylamin	C4H11N	109-89-7	L	73,1	5	-	10	6350	-49,9	55,5	-28,0	312	1,8	10,1	25,3	3	3	0	-38290
benzén-1,4-diol(hidrochinón)	C6H6O2	123-31-9	S	110,1	0,1	-	-	-	171,8	286,3	165,0	515	1,2	7,1	<0,01	2	1	0	-24710
2-diethylaminoetanol	C6H15NO	100-37-8	L	117,2	5	I	5	1470	-70,0	162,7	51,0	250	1,2	8,4	0,2	3	2	0	-32990
dietylenglykol-dimetyléter	C6H14O3	111-96-6	L	134,2	5	II	40	-	-64,0	162,2	63,0	190	1,5	17,4	0,15	1	2	1	-26020
dietyléter	C4H10O	60-29-7	L	74,1	100	-	200	92000	-116,2	34,4	-45,0	170	1,7	48	59	1	4	1	-33780
di-(2-etylhexyl)ftalát	C24H38O4	117-81-7	L	390,6	1,4	II	11,3	-	-50,0	384,0	216,0	370	0,3	28	<0,01	0	1	0	-33170
difenyleter	C12H10O	101-84-8	S	170,2	1	I	1	-	28	257,8	115,0	618	0,7	6	<0,01	1	1	0	-34630
1,2-dichlorbenzén	C6H4Cl2	95-50-1	L	147	20	-	50	1570	-17,0	180,1	66,0	648	2,2	9,2	0,13	2	2	0	-19220
1,4-dichlorbenzén	C6H4Cl2	106-46-7	L	147	20	-	50	1570	53,0	174,0	66,0	640	2,5	10,1	0,16	2	2	0	-19220
1,1-dichloréтан	C2H4Cl2	75-34-3	L	99,0	100	-	-	-	-98,0	57,3	-10,0	458	5,6	11,4	24,4	2	3	0	-11220
1,1-dichloréтан (dichlorétyén)	C2H2Cl2	75-35-4	L	96,9	2	II	4	-	-122,3	32,0	-28,0	570	7,3	16	66,35	2	4	2	-10360
dichloréтан (metyléncchlorid)	CH2Cl2	75-09-2	L	84,9	100	-	-	19800	-95,1	39,9	-	556	13	23	47,6	2	1	0	-6050
N,N-dimetylacetamid	C4H9NO	127-19-5	L	87,1	10	-	20	2480	-20,0	165,4	63,0	490	1,8	11,5	0,2	2	2	0	-27320
dimetylamin	C2H7N	124-40-3	G	45,1	2	-	5	7461	-92,2	6,9	-	400	2,8	14,4	17,0	3	4	0	-35810
N,N-dimetylamilin	C8H11N	121-69-7	L	121,2	5	II	10	-	2,5	192,8	62,0	371	1,2	7	0,07	3	2	0	-37240
dimetyléter	C2H6O	115-10-6	G	46,1	1000	-	-	-	-141,5	-24,0	-	350	3,4	27	51,2	2	4	1	-28840
N,N-dimetylformamid	C3H7NO	68-12-2	L	73,1	10	II	20	9086	-60,4	152,7	58,0	445	2,2	15,2	0,4	1	2	0	-24470
2,2-dimetylpropán	C5H12	463-82-1	G	72,1	1000	-	-	-	-17,0	9,5	-	450	1,3	7,5	172,5	1	4	0	-45050
1,4-dioxán	C4H8O2	123-91-1	L	88,1	20	I	40	15830	11,9	101,1	12,0	180	2	22	3,9	2	3	1	-24810

etánol	C2H6S	75-08-1	L	62,1	0,5	II	I	7020	-146,0	35,0	-48,0	299	2,8	18,1	58	2	4	0	-27950
bis(2-chlóretyl)éter	C4H8Cl2O	111-44-4	L	143	10	I	10	122	-44,0	178,2	55,0	369	2,7	-	0	3	2	1	-15280
2-etoxyetanol	C4H10O2	110-80-5	L	90,1	5	II	40	3826	-70,0	135,0	42,0	238	1,8	15,6	0,5	2	2	0	-25910
2-etoxetylacetát (etylglukolacetát)	C6H12O3	111-15-9	L	132,2	5	II	40	4408	-61,9	156,2	51,0	379	1,7	14	0,2	2	2	0	-23840
etylacetát	C4H8O2	141-78-6	L	88,1	400	I	800	29080	-83,8	77,0	-4,0	426	2,2	11,5	9,7	1	3	0	-23390
etylakrylát	C5H8O2	140-88-5	L	100,1	5	I	10	-	-71,1	99,2	9,0	350	1,4	14	3,9	2	3	2	-25520
etylalkohol (etanol)	C2H6O	64-17-5	L	46,1	500	II	1000	43089	-115,0	78,3	13,0	363	3,3	19	5,9	0	3	0	-26810
etylamin (etanamin)	C2H7N	75-04-7	G	45,1	5	-	10	4760	-81,0	17,0	-18,0	385	3,5	14	115,2	3	4	0	-35210
etylbenzén	C8H10	100-41-4	L	106,2	100	-	200	6350	-95,0	136,1	18,0	432	1,0	6,7	0,95	2	3	0	-40920
etyléndiamin	C2H8N2	107-15-3	L	60,1	10	II	20	-	8,5	117,0	34,0	385	2,5	12	1,2	3	2	0	-28140
etylénglykól	C2H6O2	107-21-1	L	62,1	20	-	40	-	-13,0	197,4	11,0	398	3,2	15,3	<0,01	1	1	0	-16960
etylformiát	C3H6O2	109-94-4	L	74,1	100	I	100	12700	-79,8	54,0	-20,0	445	2,7	16	26,2	2	3	0	-20340
fenol	C6H6O	108-95-2	S	94,1	2	I	0	81	0,0	181,6	79,0	715	1,4	9,5	0	4	2	0	-31040
o-fenyléndiamin	C6H8N2	95-54-5	S	108,1	0,0	-	-	-	103,0	257,0	156,0	-	1,5	-	<0,01	2	1	0	-30790
fluór	F2	7782-41-4	G	38	1	-	2	185	-219,3	188,0	-	-	-	-	0	4	0	4	0
formaldehid	CH2O	50-00-0	G	30	0,3	I	0,6	647	-92,0	-19,1	-	430	7	73	442,5	3	2	0	-17540
fosgén	CCl2O	75-44-5	G	98,9	0,02	-	0,1	270	-127,0	7,6	-	-	-	-	160	4	0	1	-1770
ftalanhydrid (anhydrid kyseliny ftalovej)	C8H4O3	85-44-9	S	148,1	-	-	-	-	131,1	284,2	152,0	570	1,7	10,5	<0,01	3	1	0	-21410
furfural	C5H4O2	98-01-1	L	96,1	2	-	-	1040	-36,5	161,6	60,0	315	2,1	19,3	0	3	2	0	-23480
furfurylalkohol	C5H6O2	98-00-0	L	98,1	10	I	10	590	-14,8	170,3	65,0	491	1,8	16,3	0,05	1	2	1	-24640
gáfor (bormán-2-ón)	C10H16O	76-22-2	S	152,2	2	II	6,3	-	180,1	204,0	66,0	466	0,6	3,5	0,02	0	2	0	-36460
heptán	C7H16	142-82-5	L	100,2	500	0	0	-	-90,8	98,1	-4,0	253,5	1,1	6,7	4,7	1	3	0	-44560
heptán-2-ón	C7H14O	110-43-0	L	114,2	50	-	100	-	-35,0	150,7	39,0	393	1,1	7,9	0,38	1	2	0	-35900
heptán-3-ón (etylbutylketón)	C7H14O	106-35-4	L	114,2	20	-	-	6350	-39,0	147,0	41,0	39	1,1	8,8	0,4	2	2	0	-35890
hexachlór-1,3- butadién	C4Cl6	87-68-3	L	260,8	0,02	-	-	-	-21,0	213,0	90,0	610	-	-	0,02	2	1	1	-5690
n-hexán	C6H14	110-54-3	L	86,2	20	II	-	-	-95,2	68,9	-21,6	225	1,1	7,5	16,3	1	3	0	-44740
chlór	Cl2	7782-50-5	G	70,9	-	-	0,5	293	-101,0	-34,0	-	-	-	-	673	4	0	0	0
chlórbenzén	C6H5Cl	108-90-7	L	112,6	5	-	1,5	12980	-45,0	131,9	28,0	593	1,3	9,6	1,199	2	3	0	-26440
2-chlórbuta-1,3- dién(chlóropren)	C4H5Cl	126-99-8	L	88,5	5	-	0	5090	-130,0	59,3	-20,0	524	4	20	24,2	2	3	0	-25100
chlórétán	C2H5Cl	75-00-3	G	64,5	100	-	-	75220	0,0	12,3	-50,0	519	3,8	15,4	0	2	4	0	-19920
chlóroform	CHCl3	67-66-3	L	119,4	2	-	-	15270	-63,8	61,2	-	-	-	-	21,1	2	0	0	-3180

3-chlóropropén	C3H5Cl	107-05-1	L	76,5	1	-	-	4060	-134,8	45,2	-29,0	392	2,9	11,2	39,6	3	3	1	-22870
chlórovodík	HCl	7647-01-0	G	36,5	5	-	9,4	3125	-114,1	-85,0	-	-	-	-	0	3	0	1	-780
izopropylalkohol (propán-2-ol)	C3H8O	67-63-0	L	60,1	200	II	400	24000	-89,0	83,0	12,0	399	2	12,7	4,2	1	3	0	-30520
izopropylamin (propán-2-amin)	C3H9N	75-31-0	L	59,1	5	I	10	6350	-95,2	32,0	-37,0	402	2	10	63,64	3	4	0	-36480
izopropylbenzén (kumén)	C9H12	98-82-8	L	120,2	20	-	50	-	-96,0	152,1	36,0	424	0,9	6,5	0,44	2	3	1	-41190
o-krezol	C7H8O	95-48-7	S	108,1	5	-	-	-	31,0	191,0	81,0	598	1,4	7,6	<0,01	3	2	0	-32630
m-krezol	C7H8O	108-39-4	L	108,1	5	-	-	-	11,8	201,8	86,0	620	1,1	7,6	0,02	3	2	0	-32620
p-krezol	C7H8O	106-44-5	S	108,1	5	-	-	-	35,5	201,7	86,0	558	1,1	7,6	0,012	3	2	0	-32570
kyanovodík	CHN	74-90-8	L	27	1,9	II	3,8	127	-13,1	26,0	-18,0	538	5,6	40	81,6	4	4	2	-23060
kyselina mravčia	CH2O2	64-18-6	L	46	5	-	0	4950	8,2	101,0	69,0	434	18	57	4,44	3	2	0	-4600
kyselina octová	C2H4O2	64-19-7	L	60,1	10	-	0	25400	16,7	118,0	39,0	426	4	16	1,6	3	2	0	-13100
maleinhydrid (anhydrid kyseliny maleinovej)	C4H2O3	108-31-6	S	98,1	0,1	I	0,1	-	53,0	202,0	102,0	477	1,4	7,1	0,03	3	1	1	-14170
2-metoxycetanol (metylglykol)	C3H8O2	109-86-4	L	76,1	5	II	40	3180	-85,1	124,0	39,0	285	2,5	20	0,89	2	2	0	-22760
2-(2-metoxycetoxy) etanol	C5H12O3	111-77-3	L	120,1	10	-	-	-	-70,0	193,0	83,0- 96,0	215	1,6	18,1	0,02	1	1	0	-23550
2-metoxymetyl- etoxypentanol	C7H16O3	34590-94- 8	L	148,2	50	-	-	-	-80,0	189,0	74,0	270	1,1	104	0,05	0	2	0	-27180
1-metoxypropán-2-ol	C4H10O2	107-98-2	L	90,1	5	II	40	-	-96,4	120,0	32,0	287	1,9	13,1	1,2	0	3	0	-26020
2-metoxypropán-2-yl acetát	C6H12O3	108-65-6	L	132,2	50	-	100	-	-66,0	146,0	42,9	350	1,3	13,1	0,38	0	2	0	-23830
metylacetát (octan metylóv)	C3H6O2	79-20-9	L	74,1	200	II	800	50800	-98,0	58,0	-11,0	454,5	3,1	16	22,8	1	3	0	-19720
metylalkohol (metanol)	CH4O	67-56-1	L	32	200	-	-	101594	-97,9	65,0	11,0	464	6	36	12,9	1	3	0	-19920
metylacetylén (metyletín)	C3H4	74-99-7	G	40,1	1000	-	-	-	-102,7	-23,1	-	258	1,7	11,7	52,1	2	4	2	-46140
metylakrylát	C4H6O2	96-33-3	L	86,1	5	I	5	2143	-76,7	80,2	-3,1	468	2,8	25	9,108	3	3	2	-22420
metylamin (metánamin, metylazán)	CH5N	74-89-5	G	31,1	10	I	10	-	-93,0	-6,3	-	430	4,9	20,7	296	3	4	0	-31400
metylbután (izopentán)	C5H12	78-78-4	L	72,1	1000	-	-	-	-160,0	27,9	-51,0	420	1,4	7,6	76,6	1	4	0	-44900

3-metylbutylacetát (izopentylacetát)	C7H14O2	123-92-2	L	130,2	50	-	100	-	0,0	142,3	25,0	360	1	7,5	0	1	3	0	-29870
metylyklohexán	C7H14	108-87-2	L	98,2	200	II	400	-	-126,7	101,0	-6,0	250	1,2	6,7	4,79	2	3	0	-43360
2-metylyklohexanol	C7H14O	583-59-5	S	114,2	50	-	-	-	25,0	163,0	65,0	296	1,3	-	0	0	2	0	-35540
5-metylnhexán-2-ón	C7H14O	110-12-3	L	114,2	20	-	-	-	-74,0	145,0	36,0	191	1	8,2	0,5	1	2	0	-35910
metylochlorid (chlórmetán)	CH3Cl	74-87-3	G	50,5	50	II	100	57150	-97,7	-24,2	-	632	8,1	17,4	506	2	4	0	-13380
metylyzokyanát (izokyanatometán)	C2H3NO	624-83-9	L	57,1	0,01	I	0,01	26	-80,0	39,0	-7,0	534,5	5,3	26	48	4	3	2	-18580
metyl-merkaptán (metántiol)	CH4S	74-93-1	G	48,1	0,5	II	1	1071	-123,0	6,0	-	374	3,9	21,8	202	4	4	0	-23940
metylmetakrylát (metyl 2-etylpropenoát)	C5H8O2	80-62-6	L	100,1	50	I	100	29764	-48,1	100,3	10,0	421	1,8	12,5	3,8	2	3	2	-25370
4-metylpentán-2-ón	C6H12O	108-10-1	L	100,2	20	-	50	-	-84,7	117,0	13,0	448	1,8	8	1,99	2	3	?	-34710
2-metylstyrén	C9H10	611-15-4	L	118,2	100	I	200	-	-68,5	170,0	53,0	494	0,8	6,7	0,2	2	2	2	-40790
morfolin	C4H9NO	110-91-8	L	87,1	10	-	20	-	-4,6	128,0	37,0	310	1,8	11	1	2	3	0	-30690
naftalén	C10H8	91-20-3	S	128,2	10	-	-	-	80,2	218,0	79,0	530	0,9	5,9	0,02	2	2	0	-38860
nitrobenzén	C6H5NO2	98-95-3	L	123,1	0,1	-	-	-	5,8	210,9	88,0	481	1,8	40	0,023	3	2	1	-24190
nitroglycerin (glyceroltrinitrát)	C3H5N3O9	55-63-0	L	227,1	0,05	II	0,05	-	13,0	250,0	-	270	-	-	<0,01	2	2	4	-6260
3-nitrotolúén	C7H7NO2	99-08-1	L	137,1	5	II	10	-	16,1	232,0	106,0	305	1,6	8,8	<0,01	3	1	1	-26030
4-nitrotolúén	C7H7NO2	99-99-0	S	137,1	5	II	10	-	52,0	238,2	103,0	450	1,6	-	<0,01	3	1	1	-25910
oxid uhofnatý	CO	630-08-0	G	28	30	II	60	4130	-205,0	191,5	-	605	12,5	74,2	>1e5	3	4	0	-10100
pentán	C5H12	109-66-0	L	72,1	1000	-	-	-	-129,0	36,0	-40,0	260	1,8	7,8	56	1	4	0	-44980
pentylacetát	C7H14O2	628-63-7	L	130,2	50	-	100	-	-70,9	148,7	25,0	360	1,1	7,5	0,7	1	3	0	-29910
peroxid vodíka	H2O2	7722-84-1	L	34	1	I	1	2250	-0,4	150,0	-	-	-	-	0,2	2	0	3	-1580
piperazin	C4H10N2	110-85-0	S	86,1	0,028	-	0,084	-	106,0	146,0	81,0	450	1,6	12,5	0,3	3	2	1	-31790
propylacetát (octan propylový)	C5H11O2	109-60-4	L	102,1	100	I	200	12700	-95,0	101,7	14,0	450	2	8	3,3	1	3	0	-26160
pyridín	C5H5N	110-86-1	L	79,1	5	-	-	6542	-41,6	115,1	20,0	482	1,8	12,4	2	3	3	0	-33780
rezorcinol (benzén-1,3-diol)	C6H6O2	108-46-3	S	110,1	10	-	-	-	109,0	277,0	127,0	607,5	1,4	9,8	<0,01	0	1	0	-24690
sírouhík (sulfid uhličitý)	CS2	75-15-0	L	76,1	5	II	10	5556	-111,0	46,1	-30,0	90	1,3	50	3,94	3	4	0	-14140
sírovodík (sulfán)	H2S	7783-06-4	G	34,1	5	I	10	713	-85,0	-60,0	-	260	4	46	1781	4	4	0	-15200
styren	C8H8	100-42-5	L	104,1	20	II	40	8800	-30,6	145,4	31,0	490	0,9	6,8	0,6	2	3	2	-40510

tetraetylolovo	C8H20Pb	78-00-2	L	323,4	0,004	-	0,008	60	-136,0	200,0	93,0	110	1,8	-	0,04	3	2	3	-18240
tetrahydrofuran	C4H8O	109-99-9	L	72,1	50	-	100	30287	-108,5	66,0	-14,1	321	2	11,8	17,2	2	3	1	-32240
1,1,1,2-tetrachlór-2,2-difluoretán (freón 112a)	C2Cl4F2	76-11-9	S	203,8	200	II	400	15900	40,6	91,5	-	-	-	-	6,1	2	0	0	-2390
1,1,2,2-tetrachlórétán	C2H2Cl4	79-34-5	L	167,8	1	II	2	1590	-43,9	145,0	-	-	-	-	0,6	2	0	0	-4970
tetrachlóretylén (tetrachlórétán)	C2Cl4	127-18-4	L	165,8	50	0	0	6350	-22,3	121,1	-	-	-	-	1,9	2	0	0	-4440
tetrachlórmetán	CCl4	56-23-5	L	153,8	0,5	II	1,063	12699	-28,8	76,5	-	-	-	-	12,2	3	0	0	-1720
toluén	C7H8	108-88-3	L	92,1	50	-	100	26700	-95,0	110,9	4,0	480	1,1	7,1	2,9	2	3	0	-40530
toluén-2,4-diazokyanát (4-metyl-m-fenylen-diazokyanát)	C9H6N2O2	584-84-9	L	174,2	0,01	-	-	22	13,9	251,0	127,0	620	0,9	9,5	<0,01	3	1	1	-23170
trietylamin	C6H15N	121-44-8	L	101,2	2	-	3	1590	-114,9	88,9	-15,0	240	1,2	8	7,2	3	3	0	-39930
1,2,4-trichlórbenzén	C6H3Cl3	120-82-1	L	181,4	2	-	5,007	-	17,0	213,0	105,0	571	2,5	6,6	0,04	2	1	0	-14640
1,1,1-trichlórétán	C2H3Cl3	71-55-6	L	133,4	100	-	198,2	28600	-30,0	74,0	-	536	7,5	12,5	13,3	2	1	0	-7310
1,1,2-trichlórétán	C2H3Cl3	79-00-5	L	133,4	10	II	200	1000	-36,6	114,0	-	413	6	15,5	2,4	3	1	0	-7260
1,2,3-trimetylbenzén (mezitylén)	C9H12	526-73-8	L	120,2	20	-	40	-	-25,4	176,0	44,0	470	0,8	6,6	0,16	0	2	0	-41050
1,2,4-trimetylbenzén (mezitylén)	C9H12	95-63-6	L	120,2	20	-	40	-	-43,9	169,0	45,5	500	0,9	6,4	0,2	0	2	0	-41020
1,3,5-trimetylbenzén (mezitylén)	C9H12	108-67-8	L	120,2	21	-	41	-	-44,7	164,6	50,0	550	0,9	8,6	0,24	0	2	0	-41010
vinylidénchlorid (1,1-dichlórétán)	C2H2Cl2	75-35-4	L	96,9	2	II	4	-	-122,3	31,6	-25,0	570	6,5	16	66,3	2	4	2	-10360
o-xylén	C8H10	95-47-6	L	106,2	50	-	100	7940	-25,2	144,1	32,0	463	0,9	6,7	0,7	2	3	0	-40810
m-xylén	C8H10	108-38-3	L	106,2	50	-	100	7940	-47,9	139,0	27,0	527	1,1	7	0,8	2	3	0	-40800
p-xylén	C8H10	106-42-3	L	106,2	50	-	100	7940	13,3	138,1	27,0	528	1,1	7	0,9	2	3	0	-40810

Tabuľka obsahuje:

Názov a sumárny vzorec látky [2]
CAS registračné číslo CAS (Chemical Abstracts Service) [2]
Skupenstvo skupenský stav pri teplote 20 °C a tlaku 101,325 kPa
*M*_m molovú hmotnosť [9]

g.mol⁻¹

NPEL	najvyššie prípustný expozičný limit [2]	ppm
kategória	kategória krátkodobého expozičného limitu [2]	
LC ₅₀	stredná smrteľná koncentrácia pre potkana pri inhalovaní toxického látky po dobu 1 hodiny [1]	ppm
T _T	teplota topenia pri tlaku 101,325 kPa [1; 3; 6; 7]	°C
T _V	teplota varu pri tlaku 101,325 kPa [1; 3; 6; 7]	°C
T _{vzp}	teplota vzplanutia [1; 5; 8]	°C
T _{sm}	teplota samovznietenia [1; 3; 5; 8]	°C
DMV, HMV	dolná a horná medza výbušnosti [1; 5; 8]	%
P _{SAT}	tlak nasýtených pár pri teplote 20°C [1; 6; 7]	kPa
K _T , K _H , K _R	koefficienty toxicity, horľavosti a reaktivity [1; 3; 8]	
ΔH _c	spalná entalpia pri teplote 25°C [4; 6; 7]	

Pozn.: Hodnoty LC₅₀ uvedené v tabuľke vyjadrujú strednú smrteľnú koncentráciu pre potkana pri 1 hodinovej inhalácii. V mnohých prípadoch LC₅₀ pre hodinovú expozíciu potkana nel- -la k dispozícii, preto sa jej hodnota určila a prepočtom z

[1] National Institute for Occupational Safety and Health. International Chemical Safety Cards (ICSCs). Dostupné na [WWW:http://www.cdc.gov/niosh/ipcs/icstart.html](http://www.cdc.gov/niosh/ipcs/icstart.html)

[2] Nariadenie vlády č.300/2007.

[3] *NFPA. 325, 1994b Guide to Fire Hazard Properties of Flammable Liquids, Gases and Volatile Solids*, Fire Protection Association, Quincy, MA, USA.

[4] S. Batrnová, M. Sečliková and M. Vajda, *Chemické inžinierstvo tabuľky a grafy*, STU Bratislava Vazovova 5 (2000).

[5] National Fire Protection Association., *Fire protection handbook*. National Fire Protection Association, Boston, Mass., p. v.

[6] B.D. Smith and R. Srivastava, *Thermodynamic data for pure compounds*, Elsevier; Distributors for the U.S. and Canada, Elsevier Science Pub. Co. (1986).

[7] D.R. Stull, E.F. Westrum and G.C. Sinke, *The chemical thermodynamics of organic compounds*, Krieger, Malabar, Fla. (1987) xvii, 865 p. pp.

[8] J.W. Vincioli, *Risk Management for Hazardous Chemicals* (1997).

[9] M.E. Wieser and T.B. Copley, Atomic weights of the elements 2009 (IUPAC Technical Report), *Pure and Applied Chemistry* **83**(2011), pp. 359-396.

Register

A	
ALARP.....	14
analýza ľudskej spoľahlivosti	93
analýza stromu porúch	77
ukážka aplikácie	87
analýza stromu udalostí.....	89
ukážka aplikácie	90
B	
bezpečnosť	9
booleanovská algebra.....	84
Č	
Čo ak? – What-If.....	57
D	
dioxin	15
dolná medza horľavosti/výbušnosti	99
F	
faktor nebezpečenstva jednotky	21
faktor toxicity	33
FAR.....	10
FR.....	10
H	
HAZOP	60
organizácia analýzy	67
príklady aplikácie.....	72
tím	67
tvorba odchýlok.....	63
vodiace slová.....	63
horľavé látky	98
horná medza horľavosti/výbušnosti	99
I	
index toxicity.....	20, 33
indexová metóda Dow	20
indikačné číslo.....	40
výpočet	41
K	
koeficient horľavosti.....	22
koeficient reaktivity	22
Kontrolný zoznam – Checklist	52
L	
limitné množstvo látky	43
logická brána.....	79
M	
Materiálový faktor	22
minimal cut set.....	84
N	
nebezpečenstvo	9
NFPA Diamant nebezpečenstva	100
NPEL	100
O	
operačná jednotka	40
OSHA	10
P	
pokutové faktory	23
požiarno-výbušný index	20
príklad určenia	31
pyramída nehôd	12
R	
riziko	9
akceptovateľné.....	14
tolerovateľné.....	14
vnímanie úrovne akceptovateľnosti.....	13
S	
selekčná metóda.....	40
ukážka aplikácie	45
selekčné číslo.....	40
výpočet.....	44
Seveso	15

strom porúch	77
strom udalostí	89
stupeň nebezpečenstva požiaru a výbuchu	21

Š

špeciálny procesný faktor.....	26
štatistika havárií	10

T

TCDD.....	15
teplota vznietenia	99
teplota vzplanutia	98

U

udalosť.....	78
úroveň rizika	13

V

všeobecný procesný faktor.....	23
--------------------------------	----

Z

závažná priemyselná havária	9
-----------------------------------	---