

**VŠB-Technická Univerzita Ostrava**  
**Fakulta bezpečnostního inženýrství**

Факультет безопасности инженерства



**PROTIVÝBUCHOVÁ PREVENCE**  
***SBÍRKA PŘÍKLADŮ***

OSTRAVA 2014

## Obsah

1. Konstrukční protivýbuchová ochrana .....	1
1.1 Úvod.....	1
1.2 Konstrukce odolné výbuchu .....	1
1.2.1 Nádoby odolné výbuchovému tlaku.....	1
1.2.2 Nádoby odolné výbuchovému rázu .....	6
1.3 Odlehčení výbuchu.....	10
2. Hořlavé kapaliny .....	18
2.1 Úvod.....	18
2.2 Koncentrace hořlavé kapaliny .....	18
2.3 Vypařování kapalin do nepohyblivého prostředí .....	20
2.3.1 Nebezpečná výška nad hladinou hořlavé kapaliny .....	25
2.4 Vypařování kapalin do pohyblivého prostředí .....	29
2.4.1 Intenzita vypařování $I_{POHYB}$ .....	29
2.5 Zařízení s dýchací trubicí .....	30
2.5.1 Velké dýchání.....	31
2.5.2 Malé dýchání .....	33
2.6 Množství par hořlavé kapaliny uniklých při odhermetizování.....	36
3. Hořlavé plyny .....	40
3.1 Úvod.....	40
3.2 Hořlavé plyny .....	40
3.2.1 Místní poškození zařízení.....	42
3.2.2 Výtok kapalin .....	43
3.2.3 Výtok plynů a přehřátých par kapalin .....	43
3.4 Přehled požárně technických charakteristik vybraných hořlavých plynů a kapalin .....	53
4. Hořlavý prach .....	60
4.1 Úvod.....	60
4.2 Nebezpečí výbuchu prachu uvnitř výrobního zařízení.....	62
4.3 Nebezpečí výbuchu prachu vně výrobního zařízení.....	63
4.4 Přehled požárně technických charakteristik vybraných hořlavých prachů .....	65
Literatura .....	80

# 1. Konstrukční protivýbuchová ochrana

## 1.1 Úvod

Není-li možné pravděpodobnost vzniku nebezpečné výbušné atmosféry řádně vyhodnotit, vychází se z toho, že tato nebezpečná výbušná atmosféra existuje. Obdobně platí i tato zásada v případě hodnocení pravděpodobnosti vzniku iniciačního zdroje. Pokud není možné řádně vyhodnotit pravděpodobnost vzniku účinného iniciačního zdroje, vychází se z toho, že iniciace je možná.

Nelze-li zabránit vytváření nebezpečné výbušné koncentrace a vyloučit nebezpečí výbuchu opatřeními aktivní protivýbuchové prevence, nebo nejsou-li takovéto opatření vhodná, musí být zařízení, ochranné systémy a součásti konstruovány tak, aby byly účinky výbuch omezeny na bezpečnou míru.

Opatření konstrukční protivýbuchové ochrany tedy nezabrání výbuchu, ale slouží k tomu, aby nedošlo k poškození zařízení, ohrožení osob a aby bylo zařízení v co nejkratší možné době opět provozuschopné.

***Konstrukční opatření omezující účinky výbuchu na únosnou míru rozdělujeme:***

- konstrukce odolné výbuchu,
- odlehčení výbuchu,
- potlačení výbuchu,
- zabránění přenosu plamene a výbuchu.

## 1.2 Konstrukce odolné výbuchu

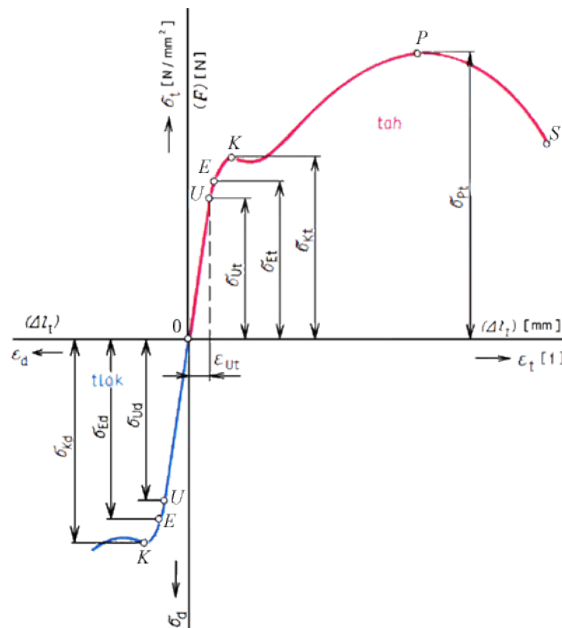
Konstrukce odolné výbuchu se dále dělí na dvě skupiny a to na nádoby odolné výbuchovému tlaku a nádoby odolné výbuchovému rázu.

### 1.2.1 Nádoby odolné výbuchovému tlaku

V některých případech je vhodné nadimenzovat nádobu, potrubí nebo zařízení tak, aby bezpečně odolaly výbuchu. Je to vhodné zejména v těch případech, kdy se jedná o dopravu, skladování nebo zpracování látek jedovatých a dalších látek nebezpečných pro životní prostředí. Další případem, kdy je toto opatření vhodné je případ, kdy jsou jiná ochranná opatření neúčinná nebo nevhodná například z důvodu vysoké rychlosti nárůstu výbuchového tlaku.

Zařízení je dimenzováno tak, že odolává maximálnímu výbuchovému tlaku (deflagračnímu nebo detonačnímu). U nádob odolným výbuchovému tlaku nejsou přípustné žádné trvalé deformace nebo netěsnosti.

Nádoba odolná výbuchovému tlaku se dimenzuje tak, že skutečné napětí vyvolané výbuchem při optimálních podmínkách je nižší, než dovolené namáhání použitého konstrukčního materiálu. Pro volbu namáhání se vychází z meze kluzu daného materiálu zobrazené na obrázku č. 1.



Obrázek č. 1 – Diagram závislosti napětí na relativním prodloužení u materiálu s výraznou mezí kluzu

Se zvyšujícím se napětím roste prodloužení přímo úměrně až do hodnoty napětí  $\sigma_{Ut}$ :

- **$\sigma_{Ut}$  - mez úměrnosti:** po překročení meze úměrnosti přestává být relativní prodloužení přímo úměrné normálovému napětí.
- **$\sigma_{Et}$  - mez pružnosti:** po překročení meze pružnosti přestává být deformace pružná a materiál už se nevrátí do původního stavu.
- **$\sigma_{Kt}$  - mez kluzu:** po překročení meze kluzu se zvětšuje relativní prodloužení, aniž by se zvětšovalo normálové napětí (materiál se prodlužuje bez zvětšování síly – tečení materiálu), mění se fyzikální vlastnosti materiálu.
- **$\sigma_{Pt}$  - mez pevnosti:** po překročení meze pevnosti se materiál přetrhne.

Dovolené namáhání  $\sigma_D$  se volí jako část meze kluzu:

$$\sigma_D = \frac{\sigma_{Kt}}{k_B}$$

**kde:**

$\sigma_D$  dovolené namáhání [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$\sigma_{Kt}$  mez kluzu [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$k_B$  koeficient bezpečnosti

(koeficient bezpečnosti se pro nádoby odolné výbuchovému tlaku pro ocele a tavné litiny volí  $k_B = 1,5$ )

U nádob odolných výbuchovému tlaku musí být všechny součásti tj. tloušťka stěny, dvířka kontrolních otvorů, připojené armatury atd. navrženy tak, aby platilo:

$$\sigma_{skut} < \sigma_D$$

**kde:**

$\sigma_D$             dovozené namáhání [N.m<sup>-2</sup>]  
 $\sigma_{skut}$         skutečné napětí ve stěně materiálu [N.m<sup>-2</sup>]

Pro výpočet skutečného napětí se zde uvažuje maximální možné zatížení výbuchem tj. zatížení maximálním výbuchovým tlakem  $p_{max}$ .

I když nádoby odolné výbuchovému tlaku nejsou tlakové nádoby v pravém slova smyslu, protože nejsou tlakem namáhány trvale, při výpočtu se postupuje podle normy ČSN 69 0010 pro tlakové nádoby.

### **Výpočet pro válcové části**

#### **Výpočet tloušťky stěny dle ČSN 69 0010**

$$s_r = \frac{p_{max} \cdot d}{(2 \cdot \sigma_{DOV} \cdot \varphi) - p_{max}}$$

**kde:**

$p_{max}$         maximální výbuchový tlak [MPa]  
 $d$             vnitřní průměr nádoby [mm]  
 $\sigma_D$         dovozené namáhání [MN.m<sup>-2</sup>], [MPa]  
 $\varphi$             součinitel hodnoty podélného svaru  
(obvykle se volí  $\varphi = 0,85$ )

#### ***Výpočet tloušťky stěny dle dovozeného mechanického namáhání***

$$t = \frac{p_{max} \cdot d}{2 \cdot \sigma_{Dov}}$$

**kde:**

$p_{max}$         maximální výbuchový tlak [MPa]  
 $d$             vnitřní průměr nádoby [mm]  
 $\sigma_D$         dovozené namáhání [MN.m<sup>-2</sup>], [MPa]

### **Vzorový příklad:**

Vypočtete tloušťku stěny válcové nádoby o poloměru 1,5 m a výšce 3 m odolné výbuchovému tlaku, tak aby odolala výbuchovému tlaku 7 barů. Nádoba bude vyrobena z ocele 15 121 – žárupevná ocel, která je vhodná pro výrobu kotlů a tlakových nádob.

$$p_{\max} = 7 \text{ baru} = 0,7 \text{ MPa}$$

$$r = 1,5 \text{ m} = 1500 \text{ mm}$$

$$d = 3 \text{ m} = 3000 \text{ mm}$$

$$\sigma_{KT} = 295 \text{ MPa}$$

$$k_B = 1,5$$

$$\varphi = 0,85$$

Výpočet dovoleného namáhání:

$$\sigma_D = \frac{\sigma_{Kt}}{k_B}$$

$$\sigma_D = \frac{295}{1,5}$$

$$\sigma_D = 196,7 \text{ MPa}$$

Výpočet tloušťky stěny dle ČSN 69 0010:

$$s_r = \frac{p_{\max} \cdot d}{(2 \cdot \sigma_{DOV} \cdot \varphi) - p_{\max}}$$

$$s_r = \frac{0,7 \cdot 3000}{(2 \cdot 196,7 \cdot 0,85) - 0,7}$$

$$s_r = 6,29 \text{ mm}$$

Výpočet tloušťky stěny dle dovoleného mechanického namáhání:

$$t = \frac{P_{\max} \cdot d}{2 \cdot \sigma_{Dov}}$$

$$t = \frac{0,7 \cdot 3000}{2 \cdot 196,7}$$

$$t = 5,34 \text{ mm}$$

Závěr:

Tloušťka stěny válcové nádoby s poloměrem 1,5 m a výškou 3 m vyrobené z oceli 15 121 musí být dle výpočtu ČSN 69 0010 6,29 mm, a 5,34 mm podle výpočtu dovoleného mechanického namáhání, aby odolala výbuchovému tlaku 7 barů.

## Výpočet pro kulové skořepiny

### Výpočet tloušťky stěny dle ČSN 69 0010

$$s_r = \frac{p_{max} \cdot d}{(4 \cdot \sigma_{DOV} \cdot \varphi) - p_{max}}$$

**kde:**

$s_r$	tloušťka stěny [mm]
$p_{max}$	maximální výbuchový tlak [MPa]
$d$	vnitřní průměr nádoby [mm]
$\sigma_D$	dovolené namáhání [MN.m <sup>-2</sup> ], [MPa]
$\varphi$	součinitel hodnoty podélného svaru (obvykle se volí $\varphi = 0,85$ )

### Vzorový příklad:

Vypočítejte tloušťku stěny kulové nádoby o poloměru 1,5 m odolné výbuchovému tlaku, tak aby odolala výbuchovému tlaku 7 barů. Nádoba bude vyrobena z ocele 15 121 – žárupevná ocel, která je vhodná pro výrobu kotlů a tlakových nádob.

$$p_{max} = 7 \text{ baru} = 0,7 \text{ MPa}$$

$$r = 1,5 \text{ m} = 1500 \text{ mm}$$

$$d = 3 \text{ m} = 3000 \text{ mm}$$

$$\sigma_{KT} = 295 \text{ MPa}$$

$$k_B = 1,5$$

$$\varphi = 0,85$$

Výpočet dovoleného namáhání:

$$\sigma_D = \frac{\sigma_{Kt}}{k_B}$$

$$\sigma_D = \frac{295}{1,5}$$

$$\sigma_D = 196,7 \text{ MPa}$$

Výpočet tloušťky stěny:

$$s_r = \frac{p_{max} \cdot d}{(4 \cdot \sigma_{DOV} \cdot \varphi) - p_{max}}$$

$$s_r = \frac{0,7 \cdot 3000}{(4 \cdot 196,7 \cdot 0,85) - 0,7}$$

$$s_r = 3,14 \text{ mm}$$

Závěr:

Tloušťka stěny kulové nádoby s poloměrem 1,5 m vyrobené z oceli 15 121 musí být 3,14 mm, aby odolala výbuchovému tlaku 7 barů.

### 1.2.2 Nádoby odolné výbuchovému rázu

V případech, kdy výbuch nelze vyloučit, ale lze předpokládat, že k výbuchům nebude docházet příliš často, je vhodné dimenzovat nádobu nebo zařízení jako odolné výbuchovému rázu. Tyto konstrukce se liší od konstrukcí odolných výbuchovému tlaku tím, že jsou zde přípustné plastické deformace, tj. namáhání je přípustné až na mez kluzu. Není ovšem přípustné aby došlo k porušení těsnosti. Při dimenzování konstrukce na odolnost proti výbuchovému rázu se ušetří materiál a sníží se tím jak hmotnost zařízení, tak i jeho cena.

Princip je v tom, že u těchto nádob je dovolené namáhání rovno mezi kluzu.

*Dovolené namáhání  $\sigma_D$  se volí jako část meze kluzu:*

$$\sigma_D = \frac{\sigma_{Kt}}{k_B}$$

$$\sigma_D = \sigma_{Kt}$$

***kde:***

$\sigma_D$  dovolené namáhání [N.m<sup>-2</sup>]

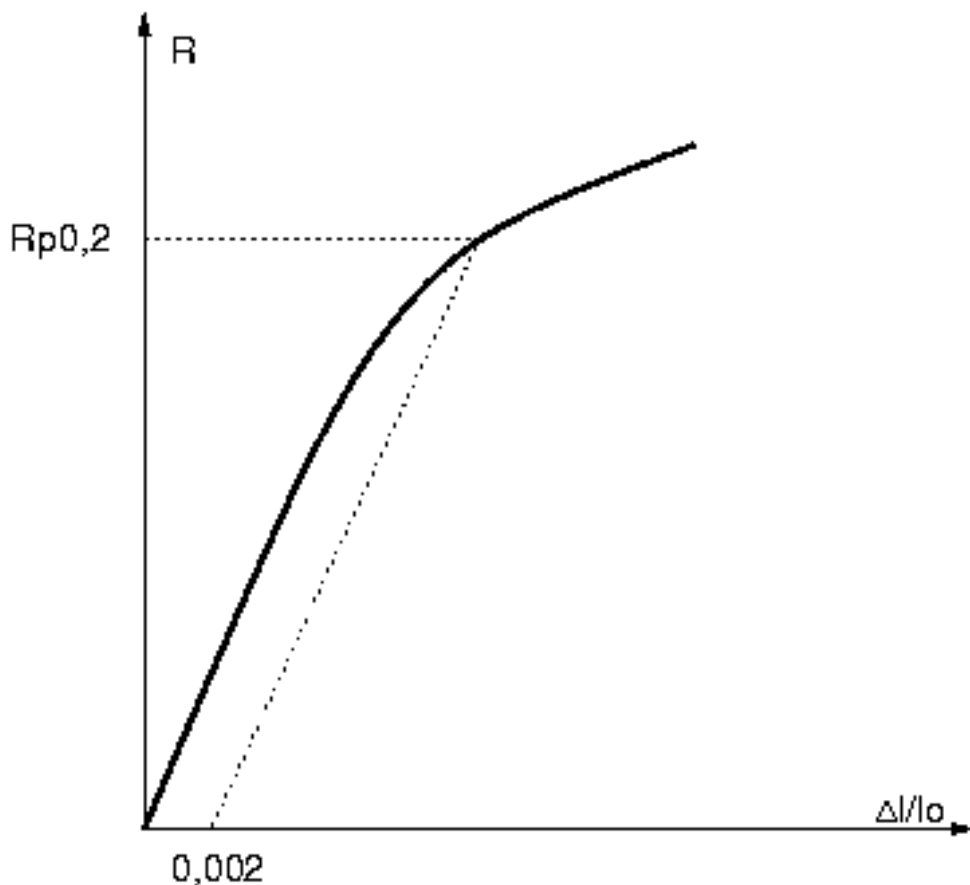
$\sigma_{Kt}$  mez kluzu [N.m<sup>-2</sup>]

$k_B$  koeficient bezpečnosti

*(koeficient bezpečnosti pro nádoby odolné výbuchovému rázu se volí  $k_B = 1$ )*

Při použití oceli bez výrazné meze kluzu, může být namáhání  $\sigma_D = \sigma_2$ , tj. trvalá deformace po zatížení výbuchem může být až 2%. Na obrázku č. 2 je znázorněna závislost napětí na prodloužení pro materiál bez výrazné meze kluzu (AUSTENITICKÉ OCELI).





Obrázek č. 2 – Závislost napětí na relativním prodloužení u materiálu bez výrazné meze kluzu (AUSTENITICKÁ OCEL)

Jak je vidět z obrázku č. 2, je zde pořád značná rezerva do meze pevnosti. Zatížení na mez kluzu však způsobí trvalou deformaci. Většinou však tato trvalá deformace nemá zásadní vliv na funkci zařízení. Většinou se jedná o vyboulení stěny, která byla před výbuchem rovná apod. V žádném případě však nesmí dojít k porušení těsnosti zařízení ani k uvolnění žádné součástí zařízení či nádoby.

## Vzorový příklad:

### *Válcová nádoba*

Vypočtete tloušťku stěny válcové nádoby o poloměru 1,5 m a výšce 3 m odolné výbuchovému rázu, při zatížení výbuchovým tlakem 7 barů. Nádoba bude vyrobena z ocele 15 121 – žárupevná ocel, která je vhodná pro výrobu kotlů a tlakových nádob.

$$p_{\max} = 7 \text{ baru} = 0,7 \text{ MPa}$$

$$r = 1,5 \text{ m} = 1500 \text{ mm}$$

$$d = 3 \text{ m} = 3000 \text{ mm}$$

$$\sigma_{KT} = 295 \text{ MPa}$$

$$k_B = 1,5$$

$$\varphi = 0,85$$

### Výpočet dovoleného namáhání:

$$\sigma_D = \sigma_{Kt}$$

$$\sigma_D = 295 \text{ MPa}$$

### Výpočet tloušťky stěny dle ČSN 69 0010:

$$s_r = \frac{p_{\max} \cdot d}{(2 \cdot \sigma_{Dov} \cdot \varphi) - p_{\max}}$$

$$s_r = \frac{0,7 \cdot 3000}{(2 \cdot 295 \cdot 0,85) - 0,7}$$

$$s_r = 4,19 \text{ mm}$$

### Výpočet tloušťky stěny dle dovoleného mechanického namáhání:

$$t = \frac{P_{\max} \cdot d}{2 \cdot \sigma_{Dov}}$$

$$t = \frac{0,7 \cdot 3000}{2 \cdot 295}$$

$$t = 3,56 \text{ mm}$$

### Závěr:

Tloušťka stěny válcové nádoby s poloměrem 1,5 m a výškou 3 m vyrobené z oceli 15 121 musí být dle výpočtu ČSN 69 0010 4,19 mm, a 3,56 mm podle výpočtu dovoleného mechanického namáhání, aby odolala výbuchovému rázu způsobeného výbuchovým tlakem 7 barů.

### ***Kulová nádoba***

Vypočtete tloušťku stěny kulové nádoby o poloměru 1,5 m odolné výbuchovému rázu, při zatížení výbuchovým tlakem 7 barů. Nádoba bude vyrobena z ocele 15 121 – žárupevná ocel, která je vhodná pro výrobu kotlů a tlakových nádob.

$$p_{\max} = 7 \text{ baru} = 0,7 \text{ MPa}$$

$$r = 1,5 \text{ m} = 1500 \text{ mm}$$

$$d = 3 \text{ m} = 3000 \text{ mm}$$

$$\sigma_{KT} = 295 \text{ MPa}$$

$$k_B = 1,5$$

$$\varphi = 0,85$$

Výpočet dovoleného namáhání:

$$\sigma_D = \sigma_{Kt}$$

$$\sigma_D = 295 \text{ MPa}$$

Výpočet tloušťky stěny:

$$s_r = \frac{p_{\max} \cdot d}{(4 \cdot \sigma_{DOV} \cdot \varphi) - p_{\max}}$$

$$s_r = \frac{0,7 \cdot 3000}{(4 \cdot 295 \cdot 0,85) - 0,7}$$

$$s_r = 2,10 \text{ mm}$$

Závěr:

Tloušťka stěny kulové nádoby s poloměrem 1,5 m vyrobené z oceli 15 121 musí být 2,10 mm, aby odolala výbuchovému rázu způsobeného výbuchovým tlakem 7 barů.

### 1.3 Odlehčení výbuchu

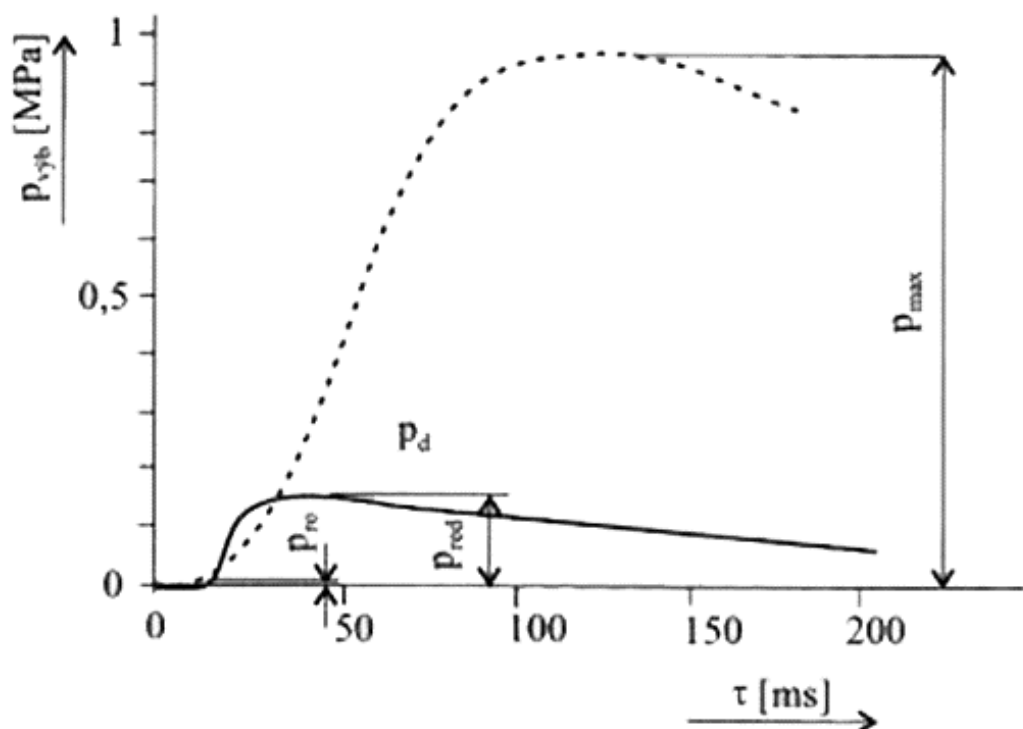
Odlehčení výbuchu znamená, že v případě výbuchu dojde po krátké době trvání výbuchu většinou po dosažení určitého tlaku k otevření původně uzavřené nádoby a to buď na krátkou dobu, nebo natrvalo. Odlehčovací zařízení musí zareagovat tak, aby zařízení nebo nádoba nebyla v žádném případě namáhána nad svou rázovou pevnost.

Princip ochrany u odlehčení výbuchu tedy spočívá v tom, že se při rozvoji výbuchu a dosažení relativně nízké hodnoty reakčního tlaku odlehčovacího prvku otevře odlehčovací otvor a tím pádem dojde k uvolnění výbušné směsi případně spalin z původně uzavřeného zařízení do volného prostoru. Rychlost uvolnění je taková, aby se vyrovnal nárůst objemu uvnitř zařízení a vyvinutý tlak tzv. maximální redukovaný tlak nepřekročil danou přípustnou hodnotu, která je výrazně nižší než maximální výbuchový tlak, který by se vyvinul v neodlehčené nádobě. Otevření odlehčovacího prvku může být trvalé u odlehčovacích membrán nebo jen po dobu přetlaku v zařízení a úniku do volného prostoru v případě odlehčovacích klapek a ventilů.

Snížení tlaku při výbuchu v nádobě či zařízení z maximálního výbuchového tlaku  $p_{\max}$  na maximální redukovaný tlak  $p_{\text{red,max}}$  umožní podstatně snížit tloušťku stěny nádoby či zařízení a tím pádem snížit hmotnost a cenu.

Tloušťka stěny respektive pevnost jednotlivých součástí zařízení nebo nádoby se dimenzuje buď jako u nádob a zařízení odolných výbuchovému tlaku nebo jako u nádob odolných výbuchovému rázu. Rozdíl v dimenzování je v tom, že se neuvažuje maximální výbuchový tlak  $p_{\max}$  ale maximální redukovaný tlak  $p_{\text{red,max}}$ .

Výbuchová křivka, která znázorňuje průběh tlaku v odlehčené nádobě v porovnání s průběhem tlaku v uzavřené nádobě je znázorněna na obrázku č. 3.



Obrázek č. 3 – Výbuchová křivka v odlehčené nádobě

Velikost maximálního redukovaného tlaku závisí na dostatečně rychlém otevření odlehčovacího otvoru teda na statickém reakčním tlaku odlehčovacího prvku  $p_{stat}$  a ploše odlehčovacího otvoru  $A$ .

Čím je reakční tlak odlehčovacího prvku vyšší tím větší objem výbušné směsi zreaguje – prohoří v nádobě do okamžiku otevření a tím pádem bude i vyšší maximální redukovaná tlak  $p_{red,max}$ .

Čím je plocha odlehčovacích prvků větší, tím účinnější je odvádění narůstajícího objemu a tím nižší je výsledný maximální redukovaný tlak  $p_{red,max}$ .

Z těchto důvodů je vhodné volit velikost statického reakčního tlaku  $p_{stat}$  co nejnižší. Problém ovšem nastává při kolísání pracovního tlaku uvnitř zařízení. Statický reakční tlak je proto nutné volit tak, aby byl vyšší než nejvyšší možný pracovní tlak.

**Musí tedy být splněno:**

$$p_{stat} > p_{prac}$$

Kdyby tato nerovnost nebyla splněna, docházelo by k nechtěnému otevírání zařízení respektive k praskání (trhání) pojistných membrán.

### 1.3.1 Velikost odlehčovacích otvorů

#### Hořlavé plyny

Dále uvedená rovnice platí pro navrhování odlehčovacích otvorů u kompaktní (kubické) nádoby. Tato rovnice platí pro samostatné nádoby bez prvků způsobující turbulenci. Tato rovnice předpokládá, že výbušná atmosféra je uvnitř nádoby v době vznícení v podstatě v klidu.

#### Rovnice platí za předpokladu:

Kubická konstanta	$K_G \leq 550 \text{ bar.m.s}^{-1}$
Maximální redukovaný tlak	$p_{red} \leq 0,2 \text{ MPa}$
	$p_{red} > p_{stat} + 0,05 \text{ bar}$
Statický reakční tlak	$0,1 \leq p_{stat} \leq 0,5 \text{ bar}$
Objem chráněné nádoby	$V \leq 1000 \text{ m}^3$

$$A = [(0,1265 \cdot \log K_G - 0,0567) \cdot p_{red}^{-0,5817} + 0,1754 \cdot p_{red,max}^{-0,5722} \cdot (p_{stat} - 0,1)] \cdot V^{\frac{2}{3}}$$

#### kde:

A	je geometrická odlehčovací plocha [ $\text{m}^2$ ]
$K_G$	výbušná konstanta plynu [ $\text{bar.m.s}^{-1}$ ]
$p_{red}$	redukovaný výbušný tlak [bar]
$p_{stat}$	statický otevírací tlak zařízení pro odlehčení výbuchu [bar]
V	objem zařízení [ $\text{m}^3$ ]

### **Vzorový příklad:**

Určete velikost odlehčovací plochy pro skladovací nádrž o objemu 500 m<sup>3</sup>, pro skladování toluenu s kubickou konstantou 9,4 MPa.m.s<sup>-1</sup>. Jako pojistné zařízení, bude použita obdélníková výklopná membrána se statickým reakčním tlakem 15 kPa a redukováným tlakem 95 kPa.

$$V = 500 \text{ m}^3$$

$$K_G = 9,4 \text{ MPa.m.s}^{-1} = 94 \text{ bar. m.s}^{-1}$$

$$p_{\text{stat}} = 15 \text{ kPa} = 0,15 \text{ bar}$$

$$p_{\text{red}} = 95 \text{ kPa} = 0,95 \text{ bar}$$

Výpočet velikosti odlehčovací plochy:

$$A = \left[ (0,1265 \cdot \log K_G - 0,0567) \cdot p_{\text{red}}^{-0,5817} + 0,1754 \cdot p_{\text{red}}^{-0,5722} \right. \\ \left. \cdot (p_{\text{stat}} - 0,1) \right] \cdot 500^{\frac{2}{3}}$$

$$A = \left[ (0,1265 \cdot \log 94 - 0,0567) \cdot 0,95^{-0,5817} + 0,1754 \cdot 0,95^{-0,5722} \right. \\ \left. \cdot (0,15 - 0,1) \right] \cdot 500^{\frac{2}{3}}$$

$$A = 13,09 \text{ m}^2$$

Závěr:

Odlehčovací plocha pro skladovací nádrž o objemu 500 m<sup>3</sup> pro skladování toluenu musí mít odlehčovací plochu 13,09 m<sup>2</sup>.

### **Hořlavé prachy**

Dále uvedené rovnice jsou navrženy pro výpočet odlehčovacích ploch pro většinu praktických aplikací – nádobu zcela zaplněnou vířícím mrakem prachu s optimální koncentrací.

Velikost odlehčovacích otvorů pro samostatné nádoby se určí:

a) **přetlak 0,1 bar  $\leq p_{red,max} <$  přetlak 1,5 bar**

$$A = B \cdot \left( 1 + C \cdot \log L/D \right)$$

kde:

$$B = \left[ 3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{max} \cdot K_{st} \cdot p_{red,max}^{-0,569} + 0,27 \cdot (P_{stat} - 0,1) \cdot p_{red,max}^{-0,5} \right] \cdot V^{0,753}$$

$$C = (-4,305 \cdot \log p_{red,max} + 0,758)$$

b) **přetlak 1,5 bar  $\leq p_{red,max} <$  přetlak 2 bar**

$$A = B$$

### **Rovnice platí za předpokladu:**

*Kubická konstanta a maximální výbuchový tlak:*

5 bar  $\leq p_{max} \leq$  10 bar pro specifický parametr prachu

10 bar.m.s<sup>-1</sup>  $\leq K_{st} \leq$  300 bar.m.s<sup>-1</sup>

5 bar  $\leq p_{max} \leq$  12 bar pro specifický parametr prachu

300 bar.m.s<sup>-1</sup>  $< K_{st} \leq$  800 bar.m.s<sup>-1</sup>

*Maximální redukovaný tlak:*

$p_{stat} \leq p_{red,max} \leq$  2 bar,

$p_{red,max}$  musí být alespoň  $p_{stat} + 2$  x toleranční rozsah  $p_{stat}$

*Statický otevírací tlak odlehčovacího zařízení:*

0,1 bar  $\leq p_{stat} \leq$  1 bar, pro  $p_{stat} <$  0,1 bar se použije  $p_{stat} =$  0, 1 bar

*Objem chráněné nádoby:* 0,1 m<sup>3</sup>  $\leq V \leq$  10 000 m<sup>3</sup>

*Poměr délky k průměru:* 1  $\leq L/D \leq$  20



### Vzorový příklad:

Určete velikost odlehčovací plochy pro skladovací nádrž o průměru 7 m a výšce 12 m, pro skladování krmného droždí s maximálním výbuchovým tlakem 7,1 bar a kubickou konstantou 31,8 bar.m.s<sup>-1</sup>. Jako pojistné zařízení, bude použita obdélníková výklopná membrána se statickým reakčním tlakem 15 kPa a redukováným tlakem 95 kPa.

$$d = 7 \text{ m}$$

$$h = 12 \text{ m}$$

$$p_{\max} = 7,1 \text{ bar}$$

$$K_{st} = 31,8 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$p_{\text{stat}} = 15 \text{ kPa} = 0,15 \text{ bar}$$

$$p_{\text{red,max}} = 95 \text{ kPa} = 0,95 \text{ bar}$$

Výpočet objemu nádrže:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h$$

$$V = \frac{\pi \cdot 7^2}{4} \cdot 12$$

$$V = 461,58 \text{ m}^3$$

$$B = \left[ 3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{\max} \cdot K_{st} \cdot p_{\text{red,max}}^{-0,569} + 0,27 \cdot (p_{\text{stat}} - 0,1) \cdot p_{\text{red,max}}^{-0,5} \right] \cdot V^{0,753}$$

$$B = \left[ 3,264 \cdot 10^{-5} \cdot 7,1 \cdot 31,8 \cdot 0,95^{-0,569} + 0,27 \cdot (0,15 - 0,1) \cdot 0,95^{-0,5} \right] \cdot 461,58^{0,753}$$

$$B = 2,175$$

$$C = (-4,305 \cdot \log p_{\text{red,max}} + 0,758)$$

$$C = (-4,305 \cdot \log 0,95 + 0,758)$$

$$C = 0,854$$

$$A = B \cdot \left( 1 + C \cdot \log L/D \right)$$

$$A = 2,175 \cdot \left( 1 + 0,854 \cdot \log 12/7 \right)$$

$$A = 2,61 \text{ m}^2$$

Závěr:

Odlehčovací plocha pro skladovací nádrž o průměru 7 m a výšce 12 m pro krmné droždí musí mít odlehčovací plochu 2,61 m<sup>2</sup>.

## **Příklady**

1) Vypočtete tloušťky stěny válcové nádoby o poloměru 2 m a výšce 4 m tak, aby a) byla odolná výbuchovému tlaku b) byla odolná výbuchovému rázu. Výbuchový tlak, na který je potřeba nádobu nadimenzovat je 5,5 barů. Nádoba bude vyrobena z ocele 15 121 – žárupevná ocel, která je vhodná pro výrobu kotlů a tlakových nádob  $\sigma_{KT} = 295 \text{ MPa}$ .

2) Vypočtete tloušťky stěny válcové nádoby o poloměru 3 m a výšce 6 m tak, aby a) byla odolná výbuchovému tlaku b) byla odolná výbuchovému rázu. Výbuchový tlak, na který je potřeba nádobu nadimenzovat je 8 barů. Nádoba bude vyrobena z ocele 15 121 – žárupevná ocel, která je vhodná pro výrobu kotlů a tlakových nádob  $\sigma_{KT} = 295 \text{ MPa}$ .

3) Vypočtete tloušťku stěny kulové nádoby o poloměru 1,2 m tak, aby a) byla odolná výbuchovému tlaku b) byla odolná výbuchovému rázu. Výbuchový tlak, na který je potřeba nádobu nadimenzovat je 8,5 barů. Nádoba bude vyrobena z ocele 15 121 – žárupevná ocel, která je vhodná pro výrobu kotlů a tlakových nádob  $\sigma_{KT} = 295 \text{ MPa}$ .

4) Určete velikost odlehčovací plochy pro skladovací nádrž o objemu  $250 \text{ m}^3$ , pro skladování metanu s kubickou konstantou  $5,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jako pojistné zařízení, bude použita obdélníková výklopná membrána se statickým reakčním tlakem 15 kPa a redukováným tlakem 95 kPa.

5) Určete velikost odlehčovací plochy pro skladovací nádrž o průměru 2,5 m a výšce 7 m, pro skladování cukru s maximálním výbuchovým tlakem 8,2 bar a kubickou konstantou  $59,2 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jako pojistné zařízení, bude použita obdélníková výklopná membrána se statickým reakčním tlakem 20 kPa a redukováným tlakem 160 kPa.

## **Výsledky**

- 1) a)  $s_r = 6,59 \text{ mm}$   
 $t = 5,59 \text{ mm}$   
b)  $s_r = 4,39 \text{ mm}$   
 $t = 3,73 \text{ mm}$
- 2) a)  $s_r = 14,39 \text{ mm}$   
 $t = 12,2 \text{ mm}$   
b)  $s_r = 9,59 \text{ mm}$   
 $t = 8,14 \text{ mm}$
- 3) a)  $s_r = 3,05 \text{ mm}$   
b)  $s_r = 2,04 \text{ mm}$
- 4)  $A = 7,04 \text{ m}^2$
- 5)  $A = 0,48 \text{ m}^2$

## 2. Hořlavé kapaliny

### 2.1 Úvod

Hořlavé kapaliny mohou vytvářet nebezpečí výbuchu v důsledku odpařování, které vytváří výbušnou směs plynu a/nebo par se vzduchem. Jednou z cest pro vyloučení nebezpečí výbuchu je zabránění vzniku výbušných směsí plynů a/nebo par se vzduchem. Pro hodnocení pravděpodobnosti vzniku výbušné směsi je nutné znát bod výbušnosti hořlavé kapaliny nebo meze výbušnosti. Výbušnost par hořlavých kapalin závisí především na:

- vlastnostech látky (např. mezích výbušnosti, tlaku par, chemickém složení včetně nečistot v hořlavých kapalinách,
- tlaku a teplotě prostředí,
- rozměrech, tvaru a procentuálním naplnění nádoby,
- iniciačním zdroji (typ, energie).

### 2.2 Koncentrace hořlavé kapaliny

Vytváření nebezpečné koncentrace hrozí, jestliže platí:

$$k_{b1} \cdot LEL < c_{SKUT} < k_{b2} \cdot UEL$$

**kde:**

$k_{b1}, k_{b2}$  bezpečnostní koeficienty [-]  
LEL, UEL dolní a horní mez výbušnosti [obj.%] nebo [g.m<sup>-3</sup>]  
 $c_{SKUT}$  skutečná koncentrace [obj.%] nebo [g.m<sup>-3</sup>]

V uzavřeném zařízení nebo nádrži se skutečná koncentrace par hořlavé kapaliny rovná koncentraci nasycených par.

$$c_{SKUT} = c_S$$

**kde:**

$c_{SKUT}$  skutečná koncentrace [obj.%] nebo [g.m<sup>-3</sup>]  
 $c_S$  koncentrace nasycených par hořlavé kapaliny [obj.%]

**Koncentrace nasycených par se vypočítá:**

$$c_S = \frac{p_n}{p_{PRAC}} \cdot 100$$

**kde:**

$c_S$  koncentrace nasycených par hořlavé kapaliny [obj.%]  
 $p_{PRAC}$  pracovní tlak [Pa]  
 $p_n$  tlak nasycených par kapaliny při dané teplotě [Pa]

Tlak nasycených par čistých látek se určí z **Antoineovy rovnice**:

$$\log p_n = A - \frac{B}{C + t}$$

$$p_n = 10^{A - \frac{B}{C+t}}$$

Přepočet objemové koncentrace par  $c_v$  [obj. %] na hmotnostní koncentraci  $c_m$  [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]:

$$c_m = \frac{M \cdot c_v}{100 \cdot V_t}$$

**kde:**

$M$  molární hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$ ]

$V_t$  molární objem při teplotě  $t_{PRAC}$  [ $\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$ ]

**Molární objem při teplotě  $t_{PRAC}$  se vypočítá:**

$$V_t = V_0 \cdot \frac{T_{PRAC} \cdot p_0}{T_0 \cdot p_{PRAC}}$$

**kde:**

$V_0 = 22,4135 \text{ m}^3\cdot\text{kmol}^{-1}$  (při teplotě  $T_0$  a tlaku  $p_0$ )

$p_0 = 101325 \text{ Pa}$

$T_0 = 273,15 \text{ K}$

$T_{PRAC} = t_{PRAC} + 273,15 \text{ [K]}$

$t_{PRAC}$  pracovní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$p_{PRAC}$  pracovní tlak [ $\text{Pa}$ ]

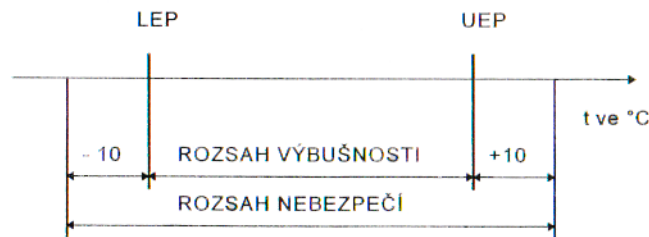
V uzavřeném prostoru se pro hodnocení nebezpečí výbuchu par hořlavých kapalin používá teplotních mezí výbušnosti. Nebezpečí výbuchu hrozí, jestliže platí:

$$LEP - \Delta t \leq t_{PRAC} \leq UEP + \Delta t$$

**kde:**

$LEP, UEP$  dolní a horní bod (teplotní mez) výbušnosti [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Ve smyslu norem ČSN 650201 a ČSN 332320 je bezpečnostní hodnota  $\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$ . Rozsah výbušnosti daný dolní a horní teplotní mezí výbušnosti rozšířený na každou stranu o  $\Delta t$  nám udává rozsah nebezpečí znázorněný na obrázku č. 1.



Obrázek č. 1 - Znárodnění rozsahu výbušnosti a nebezpečí par hořlavých kapalin na teplotní ose

Aerosoly a mlhy hořlavých kapalin mohou vytvářet výbušnou atmosféru i při teplotách pod dolním bodem výbušnosti LEP!

### 2.3 Vypařování kapalin do nepohyblivého prostředí

Při vypařování hořlavé kapaliny do nepohyblivého prostředí se jedná o **molekulární difúzi**. Je to poměrně pomalý děj, který neumožňuje šíření par kapaliny na větší vzdálenosti a naopak umožňuje nahromadění par v místě jejich vzniku a tím **vytváření místních výbušných koncentrací**. V tomto případě je důležitý způsob rozdělení koncentrace par nad hladinou hořlavé kapaliny v závislosti na teplotě a na době vypařování, možné rozměry zóny s nebezpečnou koncentrací a množství vypařené kapaliny.

Výška nulové koncentrace par nad hladinou hořlavé kapaliny se mění v závislosti na teplotě a na době vypařování.

Měrná hmotnost par kapaliny se určí ze stavové rovnice:

$$\rho = \frac{M \cdot p}{R \cdot T}$$

**kde:**

M molární hmotnost plynu [ $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]

p tlak plynu [Pa]

R molární plynová konstanta  $8,314 \text{ [Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}] \text{ [J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}]$

T termodynamická teplota plynu [K]

Difúzní koeficient se vypočítá:

$$D = \frac{0,765}{\sqrt{M}}$$

**kde:**

M molární hmotnost [ $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ]

Vypařené množství se určí dle rovnice:

$$m_{VYP} = \frac{\varphi_s}{3} \cdot \rho \cdot S \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot D \cdot \tau}{1 - \varphi_s}} = 2 \cdot \varphi_s \cdot \rho \cdot S \cdot \sqrt{\frac{D \cdot \tau}{3 \cdot (1 - \varphi_s)}}$$

**kde:**

D	difúzní koeficient s opravou na teplotu směsi par se vzduchem [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
τ	doba vypařování [s]
φ <sub>s</sub>	objemové množství nasycených par při teplotě odpařování
S	výparná plocha [m <sup>2</sup> ]
ρ	měrná hmotnost par kapaliny [kg.m <sup>-3</sup> ]
τ	doba vypařování kapaliny [hod]

### **Vzorový příklad:**

Určete množství acetonu C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O, které se vypaří za 60 minut z otevřené namáčecí vany o ploše 1,5 m<sup>2</sup> do nepohyblivého prostředí při teplotě 20°C, když difúzní koeficient má hodnotu 0,04 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup>.

$$A = 6,356$$

$$B = 1277$$

$$C = 237,2$$

$$S = 1,5 \text{ m}^2$$

$$t = 20^\circ\text{C}$$

$$\tau = 60 \text{ min}$$

$$D = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$$

Výpočet molární hmotnosti:

$$M = 3 \cdot C + 6 \cdot H + 1 \cdot O$$

$$M = 3 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 1 \cdot 16$$

$$M = 58 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Výpočet tlaku nasycených par:

$$\log p_n = A - \frac{B}{C + t} \gg p_n = 10^{A - \frac{B}{C + t}}$$

$$p_n = 10^{A - \frac{B}{C + t}}$$

*Pozn.: teplota se dosazuje v C*

$$p_n = 10^{6,356 - \frac{1277}{237,2 + 20}}$$

$$p_n = 24,6 \text{ kPa}$$

Výpočet koncentrace nasycených par hořlavé kapaliny:

$$c_s = \frac{p_n}{p_0} \cdot 100$$

$$c_s = \frac{24,6}{101,325} \cdot 100$$

$$c_s = 24\%$$

Výpočet objemového množství nasycených par při dané teplotě:

$$\varphi_s = \frac{c_s}{100}$$

$$\varphi_s = \frac{24}{100}$$

$$\varphi_s = 0,24$$

Výpočet měrné hmotnosti par kapaliny ze stavové rovnice

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

$$p \cdot \frac{m}{\rho} = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho = \frac{101325 \cdot 58}{8,314 \cdot 293,15}$$

$$\rho = 2411 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} = 2,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Výpočet odpařeného množství kapaliny:

$$m = 2 \cdot c_s \cdot \rho \cdot S \cdot \sqrt{\frac{D \cdot \tau}{3 \cdot (1 - c_s)}}$$

$$m = 2 \cdot 0,24 \cdot 2,4 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{\frac{0,04 \cdot 1}{3 \cdot (1 - 0,24)}} = 0,23 \text{ kg}$$

$$m = 0,23 \text{ kg}$$

Závěr:

Z otevřené namáčecí vany o ploše 1,5 m<sup>2</sup> se odpaří za 60 minut 0,23 kg acetonu při teplotě okolí 20°C.

Určete množství ETHANOLU C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O, které se po rozlití do záchytné jímky o rozměrech 2 x 2 m odpaří za 1 hodinu. Dále zjistěte, zda odpařené množství vytvoří nebezpečnou koncentraci. Jímka je umístěna v hale o rozměrech 15 x 10 x 4 m, teplota okolí je 20 °C, dolní mez výbušnosti etanolu je 3,3 obj. % a hustota etanolu je 789 kg.m<sup>-3</sup>.



$$A = 7,23347$$

$$B = 1591,28$$

$$C = 226,095$$

$$t = 20^{\circ}\text{C}$$

$$\text{DMV} = 3,3 \text{ \% obj.}$$

$$\rho = 789 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Výpočet molární hmotnosti:

$$M = 2\cdot C + 6\cdot H + 1\cdot O$$

$$M = 2\cdot 12 + 6\cdot 1 + 1\cdot 16$$

$$M = 46 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Výpočet odparné plochy:

$$S = a \cdot b$$

$$S = 2 \cdot 2$$

$$S = 4 \text{ m}^2$$

Výpočet tlaku nasycených par:

$$\log p_n = A - \frac{B}{C + t} \gg p_n = 10^{A - \frac{B}{C + t}}$$

$$p_n = 10^{A - \frac{B}{C + t}}$$

*Pozn.: teplota se dosazuje v C*

$$p_n = 10^{7,23347 - \frac{1591,28}{226,095 + 20}}$$

$$p_n = 5,9 \text{ kPa}$$

Výpočet koncentrace nasycených par hořlavé kapaliny:

$$c_s = \frac{p_n}{p_0} \cdot 100$$

$$c_s = \frac{5,9}{101,325} \cdot 100$$

$$c_s = 5,8\%$$

Výpočet objemového množství nasycených par při dané teplotě:

$$\varphi_s = \frac{c_s}{100}$$

$$\varphi_s = \frac{5,8}{100}$$

$$\varphi_s = 0,058$$

Výpočet difúzního koeficientu:

$$D = \frac{0,765}{\sqrt{M}}$$

$$D = \frac{0,765}{\sqrt{46}}$$

$$D = 0,113 \text{ m}^2 \cdot \text{hod}^{-1}$$

Výpočet odpařeného množství kapaliny:

$$m = 2 \cdot \varphi_s \cdot \rho \cdot S \cdot \sqrt{\frac{D \cdot \tau}{3 \cdot (1 - \varphi_s)}}$$

$$m = 2 \cdot 0,058 \cdot 789 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{0,113 \cdot 1}{3 \cdot (1 - 0,058)}}$$

$$m = 73,21 \text{ kg}$$

Výpočet objemu uniklé kapaliny:

$$V_{kap} = \frac{m}{\rho}$$

$$V_{kap} = \frac{73,21}{789}$$

$$V_{kap} = 0,0928 \text{ m}^3$$

Výpočet objemu místnosti (haly):

$$V_{mist} = a \cdot b \cdot c$$

$$V_{mist} = 15 \cdot 10 \cdot 4$$

$$V_{mist} = 600 \text{ m}^3$$

Výpočet skutečné koncentrace:

$$c_{skut} = \frac{\frac{\rho \cdot V_{kap}}{M} \cdot \frac{R \cdot T}{p}}{V_{mist}}$$

$$c_{skut} = \frac{\rho \cdot V_{kap} \cdot R \cdot T}{M \cdot p \cdot V_{mist}}$$

$$c_{skut} = \frac{789 \cdot 10^3 \cdot 0,0928 \cdot 8,314 \cdot 293,15}{46 \cdot 101325 \cdot 600}$$

$$c_{skut} = 0,0638 = 6,38 \%$$

Závěr:

Ze záchytné jímky o rozměrech 2x2 m se za 1 hodinu odpaří 73,21 kg etanolu při teplotě 20 °C. Toto množství etanolu vytvoří v hale o rozměrech 15 x 10 x 4 m koncentraci 6,38 obj. %, což je hodnota, která leží nad dolní mezí výbušnosti a proto bude v hale nebezpečná koncentrace.

### 2.3.1 Nebezpečná výška nad hladinou hořlavé kapaliny

Nebezpečná výška nad hladinou hořlavé kapaliny  $x_{NEB}$ , kde je koncentrace vyšší než  $\frac{1}{2}LEL$ , se stanoví:

$$x_{neb} = \sqrt{\frac{12 \cdot D \cdot \tau}{1 - \varphi_s}} \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{0,5 \cdot DMV}{\varphi_s}} \right)$$

*kde:*

D difúzní koeficient s opravou na teplotu směsi par se vzduchem  
[m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]

$\tau$  doba vypařování kapaliny [s]

$\varphi_s$  objemové množství nasycených par při teplotě odpařování

DMV dolní mez výbušnosti

#### Vzorový příklad:

Vypočítejte, v jaké vzdálenosti od hladiny acetonu v namáčecí vaně o ploše 1,5 m<sup>2</sup> bude dosaženo a) dolní meze výbušnosti a v jaké vzdálenosti bude dosaženo b) nebezpečné koncentrace? Když víte, že difúzní koeficient má hodnotu 0,04 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup>, dolní mez výbušnosti acetonu je 1,6 obj. % a teplota okolí je 20°C.

A = 6,356

B = 1277

C = 237,2

S = 1,5 m<sup>2</sup>

t = 20°C

$\tau$  = 60 min

D = 0,04 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup>

DMV = 1,6 obj. % = 0,016

Výpočet tlaku nasycených par:

$$\log p_n = A - \frac{B}{C + t} \gg p_n = 10^{A - \frac{B}{C+t}}$$

$$p_n = 10^{A - \frac{B}{C+t}}$$

*Pozn.: teplota se dosazuje v C*

$$p_n = 10^{6,356 - \frac{1277}{237,2+20}}$$

$$p_n = 24,6 \text{ kPa}$$

Výpočet koncentrace nasycených par hořlavé kapaliny:

$$c_s = \frac{p_n}{p_0} \cdot 100$$

$$c_s = \frac{24,6}{101,325} \cdot 100$$

$$c_s = 24\%$$

Výpočet objemového množství nasycených par při dané teplotě:

$$\varphi_s = \frac{c_s}{100}$$

$$\varphi_s = \frac{24}{100}$$

$$\varphi_s = 0,24$$

**a) Výpočet vzdálenosti, kde bude dosaženo dolní meze výbušnosti.**

$$x_{neb} = \sqrt{\frac{12 \cdot D \cdot \tau}{1 - \varphi_s}} \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{DMV}{\varphi_s}} \right)$$

$$x_{neb} = \sqrt{\frac{12 \cdot 0,04 \cdot 1}{1 - 0,24}} \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{0,016}{0,24}} \right)$$

$$x_{neb} = 0,59 \text{ m}$$

**b) Výpočet vzdálenosti, kde bude dosaženo nebezpečné koncentrace.**

$$x_{neb} = \sqrt{\frac{12 \cdot D \cdot \tau}{1 - \varphi_s}} \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{0,5 \cdot DMV}{\varphi_s}} \right)$$

$$x_{neb} = \sqrt{\frac{12 \cdot 0,04 \cdot 1}{1 - 0,24}} \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{0,5 \cdot 0,016}{0,24}} \right)$$

$$x_{neb} = 0,65 \text{ m}$$

Závěr:

Za 60 minut odpařování acetonu z namáčecí vany o ploše 1,5 m<sup>2</sup> při teplotě 20°C bude dosaženo dolní meze výbušnosti ve vzdálenosti 0,59 m a nebezpečné koncentrace, která odpovídá ½ DMV bude dosaženo ve vzdálenosti 0,65 m od hladiny.

### 2.3.2 Intenzita vypařování $I_N$

Intenzita vypařování  $I_N$  [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ] do nepohyblivého prostředí se určí z empirického vztahu:

$$I_N = 1,155 \cdot \varphi_s \cdot \rho_t \cdot S \cdot \sqrt{\frac{D}{(1 - \varphi_s) \cdot \tau}}$$

**kde:**

$\varphi_s$  objemové množství nasycených par při teplotě odpařování [-]

$\rho_t$  hustota par při teplotě odpařování [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$S$  výparná plocha [ $\text{m}^2$ ]

$D$  difúzní koeficient s opravou na teplotu směsi par se vzduchem [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\tau$  doba vypařování [s]

#### **Vzorový příklad:**

Vypočtete intenzitu vypařování do nepohyblivého prostředí technického benzínu z plochy  $1 \text{ m}^2$  za 1 hodinu při teplotě okolí  $25^\circ\text{C}$ , tlaku nasycených par technického benzínu  $14,2 \text{ kPa}$ . Molární hmotnost je  $102,2 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  a difúzní koeficient má hodnotu  $6,6\cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ .

$$S = 1 \text{ m}^2$$

$$t = 25^\circ\text{C}$$

$$\tau = 1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$$

$$p_n = 14,2 \text{ kPa}$$

$$M = 102,2 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$D = 6,6\cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$$

Výpočet koncentrace nasycených par hořlavé kapaliny:

$$c_s = \frac{p_n}{p_0} \cdot 100$$

$$c_s = \frac{14,2}{101,325} \cdot 100$$

$$c_s = 14\%$$

Výpočet objemového množství nasycených par při dané teplotě:

$$\varphi_s = \frac{c_s}{100}$$

$$\varphi_s = \frac{14}{100}$$

$$\varphi_s = 0,14$$

Výpočet měrné hmotnosti par kapaliny ze stavové rovnice

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

$$p \cdot \frac{m}{\rho} = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho = \frac{101325 \cdot 102,2}{8,314 \cdot 298,15}$$

$$\rho = 4177 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} = 4,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Výpočet intenzity vypařování do nepohyblivého prostředí:

$$I_N = 1,155 \cdot \varphi_s \cdot \rho \cdot S \cdot \sqrt{\frac{D}{(1 - c_s) \cdot \tau}}$$

$$I_N = 1,155 \cdot 0,14 \cdot 4,2 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{6,6 \cdot 10^{-6}}{(1 - 0,14) \cdot 3600}}$$

$$I_N = 3,14 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 0,0314 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$$

Závěr:

Intenzita vypařování technického benzínu z plochy 1 m<sup>2</sup> do nepohyblivého prostředí při teplotě okolí 25 °C je 0,0314 g.s<sup>-1</sup>.

## 2.4 Vypařování kapalin do pohyblivého prostředí

Na rozdíl od molekulární difúze par kapalin do nepohyblivého se prostředí, které probíhá poměrně pomalu, je difúze do pohyblivého se prostředí mnohem rychlejší.

### 2.4.1 Intenzita vypařování $I_{POHYB}$

Intenzita vypařování  $I_{POHYB}$  [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ] do pohyblivého prostředí (proudícího vzduchu se určí z empirického vztahu:

$$I_{POHYB} = S \cdot p_s \cdot M \cdot (0,734 + 1,637 \cdot w) \cdot 10^{-9}$$

*kde:*

S	plocha povrchu odpařované kapaliny [ $\text{m}^2$ ]
$p_s$	tlak nasycených par odpařované kapaliny [Pa]
M	molární hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$ ]
w	rychlost pohybu vzduchu nad povrchem kapaliny [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

### Vzorový příklad:

Vypočtěte intenzitu vypařování technického benzínu z plochy  $1 \text{ m}^2$  do pohyblivého prostředí s rychlostí proudění  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tlak nasycených par technického benzínu je  $14,2 \text{ kPa}$  a molární hmotnost je  $102,2 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

$$S = 1 \text{ m}^2$$

$$p_s = 14,2 \text{ kPa} = 14200 \text{ Pa}$$

$$M = 102,2 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$w = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Výpočet intenzity vypařování do nepohyblivého prostředí:

$$I_{POHYB} = S \cdot p_s \cdot M \cdot (0,734 + 1,637 \cdot w) \cdot 10^{-9}$$

$$I_{POHYB} = 1 \cdot 14200 \cdot 102,2 \cdot (0,734 + 1,637 \cdot w) \cdot 10^{-9}$$

$$I_{POHYB} = 0,013 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1} = 13 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$$

Závěr:

Intenzita vypařování technického benzínu z plochy  $1 \text{ m}^2$  do pohyblivého prostředí s rychlostí proudění  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  je  $13 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## 2.5 Zařízení s dýchací trubicí

Normální provoz mnoha zařízení vyžaduje spojení vnitřního objemu s okolním prostředím. Množství hořlavých par vystupujících do okolní atmosféry dýchací trubicí závisí nejenom na fyzikálních vlastnostech kapaliny, ale také na počtu dýchání.

**Dýchání zařízení lze rozdělit na dvě skupiny:**

- 1) **Velké dýchání** – je děj, kdy dochází k vytěsnění par hořlavých kapalin nebo nasání vzduchu dovnitř nádrže při změně hladiny kapaliny.
- 2) **Malé dýchání** – je děj, kdy dochází k vytěsnění par hořlavé kapaliny nebo nasání vzduchu dovnitř nádrže na základě změny teploty.

Je nutné si uvědomit, že vstup vzduchu do zařízení může snížit koncentraci par hořlavé kapaliny pod horní mez výbušnosti a v zařízení se vznikne výbušná koncentrace.

Při výstupu směsi z dýchací trubice se bude vytvářet výbušná koncentrace par hořlavé kapaliny, bude-li teplota vyšší než teplota vzplanutí FP s uvažovaným bezpečnostním koeficientem:

$$t_{PRAC} \geq FP - 10^{\circ}C$$

Velikost zamořené oblasti závisí na množství uniklých par a na pohybu vzduchu.

**Předpoklady pro výpočet:**

- Koncentrace v celém zařízení stejná a je rovna koncentraci nasycených par při dané teplotě  $c_s$

**Počáteční hodnoty:**

- $V_1$  počáteční objem
- $t_1$  počáteční teplota
- $p_1$  počáteční tlak
- $\varphi_1$  počáteční objemové množství par
- $1-\varphi_1$  počáteční objemové množství vzduchu

**Konečné veličiny:**

- $V_2$  konečný objem
- $t_2$  konečná teplota
- $p_2$  konečný tlak
- $\varphi_2$  konečné objemové množství par
- $1-\varphi_2$  konečné objemové množství vzduchu

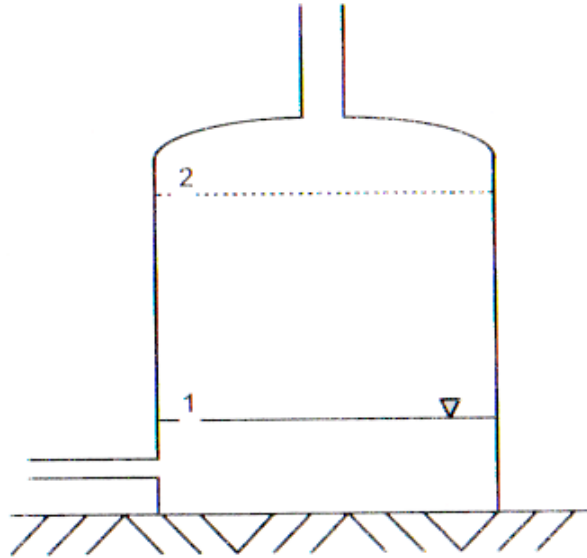
**Měněné veličiny:**

- $V_1 \rightarrow V_2$
- $t_1 \rightarrow t_2$
- $p_1 \rightarrow p_2$



### 2.5.1 Velké dýchání

Velké dýchání je založeno na změně hladiny kapaliny, kdy dochází k vytěsnění par při plnění nádrže, nebo k nasátí vzduchu do nádrže při vyprazdňování nádrže. Změna hladiny při velkém dýchání nádrže je znázorněna na obrázku č. 2.



Obrázek č. 2 – Velké dýchání nádrže – změna hladiny 1 – počáteční stav, 2 – konečný stav

Ztráty při velkém dýchání se vypočítají dle následující rovnice.

#### Předpoklady:

$$V_1 \rightarrow V_2$$

$$t_{PRAC} = \text{konst.} \Rightarrow T_1 = T_2$$

$$p_{PRAC} = \text{konst.} \Rightarrow p_1 = p_2$$

$$\varphi = \text{konst.} = \varphi_S$$

$$m_{velke} = (V_1 - V_2) \cdot \frac{p_{PRAC}}{T_{PRAC}} \cdot \varphi_S \cdot \frac{M_{PAR}}{R}$$

#### kde:

$m_{velke}$	množství uniklé kapaliny [g]
$V_1, V_2$	objem nad hladinou kapaliny (objem pro páry) na počátku děje a na konci děje [m <sup>3</sup> ]
$p_{PRAC}$	pracovní tlak [Pa]
$T_{PRAC}$	pracovní teplota [K]
$M_{PAR}$	molární hmotnost par [kg.kmol <sup>-1</sup> ]
$R$	univerzální plynová konstanta 8,314 [J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> ]
$\varphi_S$	objemové množství nasycených par při dané teplotě [bezrozměrné číslo]

$$\varphi_s = \frac{c_s}{100}$$

$$c_s = \frac{p_n}{p_0} \cdot 100$$

**kde:**

$c_s$  koncentrace nasycených par hořlavé kapaliny [obj.%]  
 $p_n$  tlak nasycených par kapaliny při dané teplotě [Pa]  
 $p_0$  atmosférický tlak [Pa]

**Vzorový příklad:**

Určete množství uniklé kapaliny metylalkoholu CH<sub>3</sub>OH při vyprázdnění a naplnění zařízení o objemu 5000 l při teplotě 20°C. Stupeň naplnění je 0,8.

$$A = 7,02$$

$$B = 1474$$

$$C = 229$$

Výpočet molární hmotnosti:

$$M = 1 \cdot C + 4 \cdot H + 1 \cdot O$$

$$M = 1 \cdot 12 + 4 \cdot 1 + 1 \cdot 16$$

$$M = 32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Určení počátečního a koncového objemu:

$$V_1 = 5 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 0,2 \cdot 5$$

$$V_2 = 1 \text{ m}^3$$

Výpočet tlaku nasycených par:

$$\log p_n = A - \frac{B}{C + t} \gg p_n = 10^{A - \frac{B}{C + t}}$$

$$p_n = 10^{A - \frac{B}{C + t}}$$

Pozn.: teplota se dosazuje v C

$$p_n = 10^{7,02 - \frac{1474}{229 + 20}}$$

$$p_n = 12,6 \text{ kPa}$$

Výpočet koncentrace nasycených par hořlavé kapaliny:

$$c_s = \frac{p_n}{p_0} \cdot 100$$

$$c_s = \frac{12,6}{101,325} \cdot 100$$

$$c_s = 12$$

Výpočet objemového množství nasycených par při dané teplotě:

$$\varphi_s = \frac{c_s}{100}$$

$$\varphi_s = \frac{12}{100}$$

$$\varphi_s = 0,12$$

Výpočet množství uniklých par:

$$m_{velke} = (V_1 - V_2) \cdot \varphi_s \cdot \frac{M}{R} \cdot \frac{p_{prac}}{T_{prac}}$$

$$m_{velke} = (5 - 1) \cdot 0,12 \cdot \frac{32}{8,314} \cdot \frac{101325}{293,15}$$

$$m_{velke} = 638 \text{ g}$$

Závěr:

Při vyprázdnění a naplnění nádrže o objemu 5000 l metylalkoholu se stupněm naplnění 0,8 a teplotě okolí 20°C unikne 638 g kapaliny.

### 2.5.2 Malé dýchání

Malé dýchání je založeno úniku par nebo nasátí vzduchu do nádrže při změně teploty.

**Předpoklady:**

$$V_1 = V_2 = \text{konst.}$$

$$p_{PRAC} = \text{konst.} \Rightarrow p_1 = p_2$$

$$T_1 \rightarrow T_2 \Rightarrow \varphi_1 \rightarrow \varphi_2$$

$$m_{male} = V \cdot p_{PRAC} \cdot \left( \frac{1 - \varphi_1}{T_1} - \frac{1 - \varphi_2}{T_2} \right) \cdot \frac{\varphi_{stř}}{1 - \varphi_{stř}} \cdot \frac{M_{PAR}}{R}$$

**kde:**

$m_{male}$	množství uniklé kapaliny [g]
$V$	volný objem nad hladinou kapaliny (objem pro páry) [m <sup>3</sup> ]
$p_{PRAC}$	pracovní tlak [Pa]
$T_1, T_2$	teplota na počátku a na konci děje [K]
$M_{PAR}$	molární hmotnost par [kg.kmol <sup>-1</sup> ]
$R$	univerzální plynová konstanta 8,314 [J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> ]
$\varphi_{STR}$	střední hodnota objemového množství [-]

$$\varphi_{STR} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$$

$\varphi_1, \varphi_2$  objemové množství nasycených par při dané teplotě na začátku a na konci děje [bezrozměrné číslo]

$$\varphi_s = \frac{c_s}{100}$$

$$c_s = \frac{p_n}{p_0} \cdot 100$$

**kde:**

$c_s$  koncentrace nasycených par hořlavé kapaliny [obj.%]  
 $p_n$  tlak nasycených par kapaliny při dané teplotě [Pa]  
 $p_0$  atmosférický tlak [Pa]

**Vzorový příklad:**

Vypočítejte množství uniklé kapaliny metylalkoholu CH<sub>3</sub>OH při přesunu nádoby z teploty -5°C do teploty 25°C. Objem nádrže je 100 l a je naplněna z 40%. Pracovní tlak je atmosférický.

$$p_{prac} = p_{atm}$$

$$t = -5^\circ\text{C} \Rightarrow T = 268,15\text{K}$$

$$t = 25^\circ\text{C} \Rightarrow T = 298,15\text{K}$$

$$A = 7,02$$

$$B = 1474$$

$$C = 229$$

Výpočet molární hmotnosti:

$$M = 1 \cdot C + 4 \cdot H + 1 \cdot O$$

$$M = 1 \cdot 12 + 4 \cdot 1 + 1 \cdot 16$$

$$M = 32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Určení volného objemu nad hladinou:

$$V = 1 - 0,4 \cdot V_{\text{NADRŽE}}$$

$$V = 1 - 0,4 \cdot 100\text{l}$$

Výpočet tlaku nasycených par:

$$\log p_n = A - \frac{B}{C + t} \gg p_n = 10^{A - \frac{B}{C + t}}$$

$$p_n = 10^{A - \frac{B}{C + t}}$$

Pozn.: teplota se dosazuje v C

Pro teplotu prostředí  $t_1$ :

$$p_{n1} = 10^{7,02 - \frac{1474}{229 - 5}}$$

$$p_{n1} = 2,75 \text{ kPa}$$

Pro teplotu prostředí  $t_2$ :

$$p_{n2} = 10^{7,02 - \frac{1474}{229 + 25}}$$

$$p_{n2} = 16,47 \text{ kPa}$$

Výpočet koncentrace nasycených par hořlavé kapaliny:

$$c_t = \frac{p_n}{p_0} \cdot 100$$

Pro teplotu prostředí  $t_1$ :

$$c_{t1} = \frac{2,75}{101,325} \cdot 100$$

$$c_{t1} = 2,7$$

Pro teplotu prostředí  $t_2$ :

$$c_{t2} = \frac{16,47}{101,325} \cdot 100$$

$$c_{t2} = 16,3$$

Výpočet objemového množství nasycených par při dané teplotě:

$$\varphi_s = \frac{c_s}{100}$$

Pro teplotu prostředí  $t_1$ :

$$\varphi_s = \frac{2,7}{100}$$

$$\varphi_s = 0,027$$

Pro teplotu prostředí  $t_2$ :

$$\varphi_s = \frac{16,3}{100}$$

$$\varphi_s = 0,163$$

Výpočet střední hodnoty objemového množství:

$$\varphi_{STR} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$$

$$\varphi_{STR} = \frac{0,027 + 0,163}{2}$$

$$\varphi_{STR} = 0,095$$

Výpočet množství uniklých par:

$$m_{male} = V \cdot p_{prac} \cdot \left( \frac{1 - c_{s1}}{T_1} - \frac{1 - c_{s2}}{T_2} \right) \cdot \frac{c_{stř}}{1 - c_{stř}} \cdot \frac{M_{PAR}}{R}$$

$$m_{male} = 60 \cdot 10^{-3} \cdot 101325 \cdot \left( \frac{1 - 0,027}{268,15} - \frac{1 - 0,163}{298,15} \right) \cdot \frac{0,095}{1 - 0,095} \cdot \frac{32}{8,314}$$

$$m = 2,23 \text{ g}$$

### Závěr:

Při přesunutí nádrže o objemu 1000 l metylalkoholu z teploty  $-5^{\circ}\text{C}$  do teploty  $25^{\circ}\text{C}$  při stupni naplnění 0,4 unikne 2,23 g kapaliny.

## **2.6 Množství par hořlavé kapaliny uniklých při odhermetizování**

K únikům hořlavých kapalin při otevírání z důvodu plnění či vyprazdňování zařízení.

$$m = V \cdot \frac{\varphi_s}{T_{PRAC}} \cdot (p_{PRAC} - p_{OKOLI}) \cdot \frac{M}{R}$$

### **kde:**

m	množství hořlavých par uniklé do prostředí při otevření [g.cykl <sup>-1</sup> ]
V	volný prostor zařízení [m <sup>3</sup> ]
R	univerzální plynová konstanta 8,314 [J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> ]
$\varphi_s$	objemové množství nasycených par při dané teplotě na [bezrozměrné číslo]
$p_{PRAC}$	pracovní tlak [Pa]
$p_{OKOLI}$	okolní tlak (atmosférický) [Pa], $p_{OKOLI} = 101325$ Pa
$T_{PRAC}$	pracovní teplota zařízení [K]
R	univerzální plynová konstanta 8,314 [J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> ]

### **Vzorový příklad:**

Určete množství par metylalkoholu  $\text{CH}_3\text{OH}$ , které unikne ze zařízení, které pracuje při pracovním tlaku 0,2 MPa a teplotě  $50^{\circ}\text{C}$ . Objem zařízení je 20 m<sup>3</sup>.

$$A = 7,02$$

$$B = 1474$$

$$C = 229$$

$$V = 20 \text{ m}^3$$

$$t_{PRAC} = 50^{\circ}\text{C}$$

$$T_{PRAC} = 323,15 \text{ K}$$

$$p_{PRAC} = 0,2 \text{ MPa} = 200000 \text{ Pa}$$

$$p_{OKOLI} = 101325 \text{ Pa}$$

### Výpočet molární hmotnosti:

$$M = 1 \cdot C + 4 \cdot H + 1 \cdot O$$

$$M = 1 \cdot 12 + 4 \cdot 1 + 1 \cdot 16$$

$$M = 32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

### Výpočet tlaku nasycených par:

$$\log p_n = A - \frac{B}{C + t} \gg p_n = 10^{A - \frac{B}{C + t}}$$

$$p_n = 10^{A - \frac{B}{C + t}}$$

Pozn.: teplota se dosazuje v C

$$p_n = 10^{7,02 - \frac{1474}{229+50}}$$

$$p_n = 54,56 \text{ kPa}$$

Výpočet koncentrace nasycených par hořlavé kapaliny:

$$c_s = \frac{p_n}{p_0} \cdot 100$$

$$c_s = \frac{54,56}{101,325} \cdot 100$$

$$c_s = 53,85$$

Výpočet objemového množství nasycených par při dané teplotě:

$$\varphi_s = \frac{c_s}{100}$$

$$\varphi_s = \frac{53,85}{100}$$

$$\varphi_s = 0,54$$

Výpočet uniklého množství při odhermetizování:

$$m = V \cdot \frac{\varphi_s}{T_{PRAC}} \cdot (p_{PRAC} - p_{OKOLI}) \cdot \frac{M}{R}$$

$$m = 20 \cdot \frac{0,54}{323,15} \cdot (200000 - 101325) \cdot \frac{32}{8,314}$$

$$m = 12693 \text{ g} \cdot \text{cykl}^{-1} = 12,7 \text{ kg} \cdot \text{cykl}^{-1}$$

Závěr:

Za jeden cyklus odhermetizování unikne ze zařízení 12,7 kg.

## **Příklady**

- 1) Vypočítejte dobu vypařování acetonu do výšky 1,5 m, ve které jsou umístěny analyzátoři a vypínače přívodu. Dolní mez výbušnosti je 1,6 obj. %, a tlak nasycených par 24,7 kPa.
- 2) Vypočtete, jak velké množství etanolu  $C_2H_6O$  v kapalném stavu je zapotřebí, aby v místnosti o rozměrech 6 x 6 x 3 metry byla po odpaření výbušná atmosféra. Teplota okolí je  $20^\circ C$ , dolní mez výbušnosti etanolu je 3,3 obj. % a hustota etanolu je  $789 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .
- 3) Vypočtete intenzitu vypařování do nepohyblivého prostředí toluenu z plochy  $5 \text{ m}^2$  za 5 hodin při teplotě okolí  $22^\circ C$ , Molární hmotnost je  $92,14 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .
- 4) Určete množství uniklé kapaliny toluenu  $C_7H_8$  při vyprázdnění a naplnění zařízení o objemu 200 l při teplotě  $25^\circ C$ . Stupeň naplnění je 0,2.
- 5) Určete množství par toluenu  $C_7H_8$ , které unikne ze zařízení, které pracuje při pracovním tlaku 150 kPa a teplotě  $30^\circ C$ . Objem zařízení je  $10 \text{ m}^3$ .



## **Výsledky**

- 1)  $\tau = 2,15 \text{ hod}$
- 2)  $V = 8,62 \text{ l}$
- 3)  $I_N = 0,025 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$
- 4)  $m_{\text{velke}} = 4,81 \text{ g}$
- 5)  $m = 569 \text{ g} \cdot \text{cykl}^{-1} = 0,6 \text{ kg} \cdot \text{cykl}^{-1}$

### 3. Hořlavé plyny

#### 3.1 Úvod

V plynném skupenství jsou částice hořlavého plynu rozptýleny v prostoru a poskytnutý prostor zcela zaplňují a mohou se mísit se vzduchem a vytvářet tak výbušnou atmosféru. Proto, aby nedocházelo ke ztrátám na životech, majetku či životním prostředí způsobeném výbuchem plynu je nutné znát možnosti tvorby nebezpečné koncentrace plynu ať už při únicích, poškozeních nebo haváriích zařízení pracujících s hořlavým plynem.

#### 3.2 Hořlavé plyny

U plynů a přehřátých par hořlavých kapalin ve směsi se vzduchem, s kyslíkem, chlorem a jinými oxidačními činidly hrozí nebezpečí výbuchu, jestliže platí:

$$k_{b1} \cdot LEL < c_{SKUT} < c_{neb,H} = 100 - \frac{(100 - UEL)}{k_{b2}}$$

**Bezpečnostní koeficienty se obvykle uvažují:**

$$k_{b1} = 0,5,$$

$$k_{b2} = 1,04 \text{ až } 1,1 \text{ pro nízké hodnoty UEL,}$$

$$k_{b2} = 1,32 \text{ až } 2,52 \text{ pro vysoké hodnoty UEL,}$$

(např.  $H_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_3OH$ .)

**Výpočet skutečné objemové koncentrace plynu  $c_{SKUT}$  [obj. %]:**

$$c_{SKUT} = \frac{V_{plynu}}{V_{míst}} \cdot 100$$

**Výpočet skutečné hmotnostní koncentrace  $c_{SKUT}$  [g.m<sup>3</sup>]:**

$$c_{SKUT} = \frac{V_{plynu}}{V_{míst}} \cdot \rho$$

**kde:**

$V_{plynu}$       objem hořlavého plynu [m<sup>3</sup>]

$V_{míst}$       objem místnosti [m<sup>3</sup>]

$\rho$             hustota plynu [g.m<sup>3</sup>]

**Stavová rovnice ideálního plynu**

Stavová rovnice ideálního plynu vyjadřuje vzájemnou závislost stavových veličin a lze ji vyjádřit ve tvaru:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

*kde:*

p tlak plynu [Pa]

V objem plynu při daném tlaku a teplotě [m<sup>3</sup>]

n látkové množství [mol]

R molární plynová konstanta 8,314 [Pa.m<sup>3</sup>.K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>] [J.k<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>]

T termodynamická teplota plynu [K]

*Látkové množství je určeno vztahem:*

$$n = \frac{m}{M}$$

*kde:*

m hmotnost plynu [kg]

M molární hmotnost plynu [kg.mol<sup>-1</sup>]

*Výpočet objemu plynu ze stavové rovnice ideálního plynu:*

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

$$V_{\text{plynu}} = \frac{m \cdot R \cdot T}{M \cdot p}$$

*Výpočet hustoty plynu ze stavové rovnice ideálního plynu:*

$$\rho = \frac{m}{V_{\text{plynu}}}$$

$$V_{\text{plynu}} = \frac{m}{\rho}$$

$$\frac{m}{\rho} = \frac{m \cdot R \cdot T}{M \cdot p}$$

$$\rho = \frac{M \cdot p}{R \cdot T}$$

Pokud hustotu plynu porovnáváme s hustotou vzduchu (1,2 - 1,3 kg.m<sup>-3</sup>) zjistíme, zda je lehčí či těžší než vzduch.

### ***Možnost vytváření nebezpečných koncentrací při havárii a poškození zařízení***

Při havárii zařízení a potrubí se výbušné prostředí vytváří nejen v blízkém okolí místa úniku, ale obvykle v celém prostoru místnosti či haly nebo na volném prostranství.

#### **3.2.1 Místní poškození zařízení**

$$m_{HAV} = \varphi \cdot S \cdot w \cdot \rho \cdot \tau$$

***kde:***

$m_{HAV}$	množství hořlavé látky uniklé ze zařízení [kg]
$\varphi$	výtokový součinitel 0,25 ÷ 0,85 [-]
$S$	plocha průřezu výtokového otvoru [m <sup>2</sup> ]
$w$	výtoková rychlost [m.s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	hustota unikající látky [kg.m <sup>-3</sup> ]
$\tau$	doba úniku [s]

#### **Vzorový příklad:**

Určete, kolik unikne metanu z porušeného potrubí o průměru 2 cm, když víte, že výtoková rychlost plynu je 2 m. s<sup>-1</sup>, únik bude trvat 15 minut a hustota metanu je 0,66 kg.m<sup>-3</sup>.

$$d = 2 \text{ cm} = 0,02\text{m}$$

$$w = 2 \text{ m. s}^{-1}$$

$$\tau = 15 \text{ min} = 900 \text{ s}$$

$$\rho = 0,66 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\varphi = 0,5$$

Výpočet plochy potrubí:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$S = \frac{\pi \cdot 0,02^2}{4}$$

$$S = 0,000314 \text{ m}^2$$

Výpočet množství uniklého plynu:

$$m_{HAV} = \varphi \cdot S \cdot w \cdot \rho \cdot \tau$$

$$m_{HAV} = 0,5 \cdot 0,000314 \cdot 2 \cdot 0,66 \cdot 900$$

$$m_{HAV} = 0,19 \text{ kg}$$

### Závěr:

Z porušeného potrubí o průměru 2 cm unikne za 15 minut 0,19 kg metanu.

### **3.2.2 Výtok kapalin**

Při stálém tlaku uvnitř zařízení nebo potrubí bude rychlost výtoku poškozeným místem:

$$w = \sqrt{2 \cdot \left( \frac{p_{PRAC} - p_{OKOLI}}{\rho_{KAP}} + g \cdot h_{KAP} \right)}$$

**kde:**

- g gravitační zrychlení  $g = 9,81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$   
p<sub>PRAC</sub> pracovní tlak nad kapalinou [Pa]  
p<sub>OKOLI</sub> okolní tlak, do něhož probíhá výtok (obvykle atmosférický)  
p<sub>OKOLI</sub> = 101325 [Pa]  
ρ<sub>KAP</sub> hustota kapaliny při dané teplotě [kg.m<sup>-3</sup>]

### **3.2.3 Výtok plynů a přehřátých par kapalin**

Výpočet kritického tlaku:

$$p_{KRIT} = p_{PRAC} \cdot \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

**kde:**

- p<sub>PRAC</sub> pracovní tlak nad kapalinou [Pa]  
κ Adiabatický koeficient

Hodnoty adiabatických koeficientů

<b>ADIABATICKÉ KOEFICIENTY BĚŽNÝCH LÁTEK</b>		
<b>Látka</b>	<b>Teplota [°C]</b>	<b><math>\kappa</math></b>
AMONIAK	15	1,31
	100	1,28
	300	1,32
ACETYLÉN	15	1,26
BENZÉN	15	1,26
VODÍK	-20	1,42
	15	1,42
	200	1,40
	800	1,38
METANOL	77	1,20
	100	1,26
VZDUCH	0	1,40
	100	1,40
	1000	1,36
CH <sub>4</sub>	15	1,31
H <sub>2</sub>	15	1,32
	300	1,38
ETANOL	90	1,13
ETAN	15	1,22
	50	1,21
ETYLÉN	15	1,25
	100	1,18

Kritický tlak je nutné porovnat s atmosférickým tlakem a na základě porovnání zvolit výpočet pro kritický či podkritický režim.

Pro podkritický režim, kdy  $p_{OKOLÍ} > p_{KRIT}$ , se rychlost výtoku vypočítá:

$$w_{pod} = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \cdot r \cdot T_{PRAC} \left[ 1 - \left( \frac{p_{OKOLÍ}}{p_{PRAC}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}$$

Pro kritický režim, kdy  $p_{OKOLI} < p_{KRIT}$  se rychlost výtoku vypočítá:

$$w_{krit} = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa + 1} \cdot r \cdot T_{PRAC}}$$

**kde:**

$\kappa$	Adiabatický koeficient
$T_{PRAC}$	pracovní teplota [K]
$p_{PRAC}$	pracovní tlak nad kapalinou [Pa]
$p_{OKOLI}$	okolní tlak, do něhož probíhá výtok (obvykle atmosférický $p_{OKOLI} = 101325$ [Pa])
$r$	individuální plynová konstanta [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$$r = \frac{8314,31}{M}$$

### Vzorový příklad:

V hale o rozměrech 32 x 12 x 7 m je umístěno hlavní a vedlejší rozvodné potrubí zemního plynu. Potrubí mají průměry hlavní 4,4 cm a vedlejší 2,1cm. Tlak v potrubí je 230 kPa při teplotě 20 °C. Zjistěte, za jak dlouho se vytvoří nebezpečná koncentrace zemního plynu v hale. Dolní mez výbušnosti je 5 obj. %, adiabatický koeficient je 1,31, výtokový součinitel je 0,7, molární hmotnost metanu je  $16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  a bezpečnostní koeficient je 0,5.

$$d_H = 4,4 \text{ cm}$$

$$d_V = 2,1 \text{ cm}$$

$$p = 230 \text{ kPa}$$

$$t = 20^\circ\text{C}$$

$$DMV = 5 \text{ obj. \%}$$

$$\kappa = 1,31$$

$$\varphi = 0,7$$

$$M = 16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$k_B = 0,5$$

Výpočet objemu místnosti:

$$V_c = a \cdot b \cdot c$$

$$V_c = 32 \cdot 12 \cdot 7$$

$$V_c = 2688 \text{ m}^3$$

Výpočet měrné plynové konstanty:

$$r = \frac{R}{M}$$

$$r = \frac{8314}{16}$$

$$r = 519,625 \text{ [J.Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

Výpočet kritického tlaku:

$$p_{krit} = p_{prac} \cdot \left(\frac{2}{\chi+1}\right)^{\frac{\chi}{\chi-1}}$$

$$p_{krit} = 230 \cdot \left(\frac{2}{1,31+1}\right)^{\frac{1,31}{1,31-1}}$$

$$p_{krit} = 125,1 \text{ kPa}$$

**Porovnat s atmosférickým tlakem**

**125,1 kPa > 101,325 kPa => KRITICKÝ TOK**

Výpočet kritické rychlosti:

$$w_{krit} = \sqrt{\frac{2 \cdot \chi}{\chi+1} \cdot r \cdot T_{prac}}$$

$$w_{krit} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,31}{1,31+1} \cdot 519,625 \cdot 293,15}$$

$$w_{krit} = 415,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

**Hlavní potrubí:**

Výpočet plochy úniku:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$S = \frac{\pi \cdot (4,4 \cdot 10^{-2})^2}{4}$$

$$S = 1,52 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Výpočet intenzity úniku:

$$I = \varphi \cdot w_{krit} \cdot S$$

$$I = 0,7 \cdot 415,6 \cdot 1,52 \cdot 10^{-3} = 0,443 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet doby do vytvoření nebezpečné koncentrace:

$$LEL = \frac{V_l}{V_c}$$

$$LEL = \frac{I \cdot \tau}{V_c}$$

$$\tau = \frac{LEL \cdot V_c}{I}$$

$$\tau = \frac{0,5 \cdot 0,05 \cdot 2688}{0,443}$$

$$\tau = 151,7 \text{ s}$$



### **Vedlejší potrubí:**

Výpočet plochy úniku:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$S = \frac{\pi \cdot (2,1 \cdot 10^{-2})^2}{4}$$

$$S = 3,46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Výpočet intenzity úniku:

$$I = \varphi \cdot w_{krit} \cdot S$$

$$I = 0,7 \cdot 415,6 \cdot 3,46 \cdot 10^{-3}$$

$$I = 0,101 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet doby do vytvoření nebezpečné koncentrace:

$$LEL = \frac{V_l}{V_c}$$

$$LEL = \frac{I \cdot \tau}{V_c}$$

$$\tau = \frac{DMV \cdot V_c}{I}$$

$$\tau = \frac{0,5 \cdot 0,05 \cdot 2688}{0,101} = 665,4 \text{ s}$$

Závěr:

Při poškození potrubí bude docházet ke kritickému úniku. V případě poškození hlavního potrubí s metanem se v hale vytvoří nebezpečná koncentrace plynu za 151,7 s a při poškození vedlejšího potrubí se v hale nebezpečná koncentrace metanu vytvoří za 665,4 s.

### **Zařízení pracující s pod tlakem**

U těchto zařízení není nebezpečí úniku látky ze zařízení, ale existuje nebezpečí nasávání okolního vzduchu poškozeným místem dovnitř zařízení a tím vytváření nebezpečné koncentrace uvnitř zařízení. Intenzita nasávaného množství se dá vypočítat podle následujícího vztahu.

$$I = \varphi \cdot S \cdot \frac{T_{PRAC}}{T_{VZDUCHU}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_{VAK}}{\rho_{VZDUCHU}}}$$

**kde:**

I	množství vzduchu nasátého do zařízení [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$\varphi$	výtokový součinitel $0,6 \div 0,75$ [-]
S	plocha průřezu otvoru [ $\text{m}^2$ ]
$p_{\text{VAK}}$	velikost podtlaku [Pa]
$\rho_{\text{VZDUCHU}}$	hustota nasávaného vzduchu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
$T_{\text{VZDUCHU}}$	teplota nasávaného vzduchu [K]

**Výpočet intenzity úniku plynů a par do místnosti**

$$I = \varphi \cdot S \cdot w \text{ nebo } I = \frac{m}{\rho \cdot \tau}$$

**kde:**

I	intenzita úniku [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$\varphi$	výtokový součinitel páry či kapaliny [-]
S	plocha průřezu otvoru [ $\text{m}^2$ ]
w	výtoková rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$\rho$	hustota unikající látky [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
$\tau$	doba úniku [s]
m	hmotnost látky [kg]

**Doba do vytvoření nebezpečné koncentrace**

**1) bez větrání**

$$\tau = \frac{LEL \cdot k_b \cdot V_{\text{VOLNY}}}{100 \cdot I}$$

**2) s větráním**

$$\tau = \frac{V_{\text{VOLNY}}}{a} \cdot \ln \left( \frac{I}{I - a \cdot \frac{LEL}{100} \cdot k_b} \right)$$

**kde:**

$\tau$	doba potřebná pro vytvoření nebezpečné koncentrace [s]
$V_{\text{VOLNY}}$	volný objem místnosti [ $\text{m}^3$ ]
I	intenzita úniku par a plynů do místnosti [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
a	výkon ventilační soustavy [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
LEL	dolní mez výbušnosti [obj. %]
$K_b$	bezpečnostní koeficient [-]

### Vzorový příklad:

Vypočítej, za jak dlouho dojde k vytvoření výbušné koncentrace v pájecím boxu v případě nezapálení hořáku. Jako médium je použito zemního plynu. Prostor má rozměry 2,5 x 1 x 2,1 m. Intenzita úniku je 7,2 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> bezpečnostní koeficient je 0,5 a dolní mez výbušnosti je 4,4 obj. %. Výkon ventilační soustavy je pro 10 pájecích boxů 3000 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Výpočet proved' pro případ použití ventilace i pro případ bez použití nucené ventilace.

$$I = 7,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$k_B = 0,5$$

$$\text{DMV} = 4,4 \text{ obj. \%}$$

Výpočet objemu místnosti:

$$V_c = a \cdot b \cdot c$$

$$V_c = 2,5 \cdot 1 \cdot 1,2$$

$$V_c = 5,25 \text{ m}^3$$

### Bez ventilace:

$$LEL = \frac{V_{\text{plynu}}}{V_c}$$

$$V_{\text{plynu}} = k_b \cdot LEL \cdot V_c$$

$$V_{\text{plynu}} = 0,5 \cdot 0,044 \cdot 5,25$$

$$V_{\text{plynu}} = 0,1155 \text{ m}^3$$

$$\tau = \frac{V_{\text{plynu}}}{v}$$

$$\tau = \frac{0,1155}{7,2}$$

$$\tau = 0,0160 \text{ h} = 0,9625 \text{ min} = 57,75 \text{ s}$$

### S ventilací:

$$\tau = \frac{V_{\text{vol}}}{a} \cdot \ln \left( \frac{I}{I - a \cdot \frac{LEL}{100} \cdot k_b} \right)$$

$$\tau = \frac{5,25}{300} \cdot \ln \left( \frac{7,2}{7,2 - 300 \cdot \frac{4,4}{100} \cdot 0,5} \right)$$

$$\tau = 0,0435 \text{ hod} = 2,61 \text{ min} = 156,6 \text{ s}$$

### Závěr:

V případě nezapálení hořáku dojde k vytvoření výbušné koncentrace v pájecím boxu bez ventilace za 57,75 s a v případě ventilace se výbušná atmosféra vytvoří za 156,6 s.

### 3) pro vypařování kapalin

$$\tau = \frac{8,64 \cdot 10^4 \cdot V \cdot LEL}{k \cdot p_s \cdot \sqrt{M} \cdot S}$$

*kde:*

- M molární hmotnost [kg.mol<sup>-1</sup>]  
V objem místnosti [m<sup>3</sup>]  
LEL dolní mez výbušnosti [obj. %]  
k koeficient vyjadřující vliv rychlosti a teploty proudícího vzduchu nad výparnou plochou  
S výparná plocha [m<sup>2</sup>]

*Pozn. Velikost výparné plochy*

- 1 litr směsi a roztoku obsahující méně než 0,7 hmot. % podílu rozpouštědla se rozlije na ploše  $S = 0,5 \text{ m}^2$
- 1 litr ostatních kapalin se rozlije na ploše  $S = 1 \text{ m}^2$

$p_n$  tlak nasycených par při střední aritmetické teplotě kapaliny v zařízení a teplotě vzduchu v místnosti  $p_s$  při teplotě  $t = \frac{t_{KAPALINY} + t_{VZDUCHU}}{2}$

Hodnoty koeficientu k

Rychlost proudění [m.s <sup>-1</sup> ]	Hodnoty koeficientu k v závislosti na teplotě				
	Teplota [°C]				
	10°C	15°C	20°C	30°C	35°C
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

Konstanty Antoineovy rovnice

Látka	Vzorec	A	B	C
Brom	Br <sub>2</sub>	6,886373	1559,320	261,270
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	8,758183	1286,470	268,654
Fosgen	COCl <sub>2</sub>	5,962703	950,480	231,924
Chlor	Cl <sub>2</sub>	6,132153	886,330	248,560
Kyanovodík	HCN	7,268653	1318,330	232,334
Voda	H <sub>2</sub> O	7,196210	1730,630	233,426
Peroxid vodíku	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	5,817000	1264,740	171,561
Kyselina sírová	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	7,641563	3073,770	214,699
Jod	I <sub>2</sub>	7,954273	2995,210	220,099
Amoniak	NH <sub>3</sub>	11,094593	3596,830	426,382
Oxid dusnatý	NO	5,487703	266,740	227,619
Oxid dusičitý	NO <sub>2</sub>	8,040653	1798,220	276,800
Síra	S	4,902133	1466,990	62,060
Oxid siřičitý	SO <sub>2</sub>	7,593493	1512,400	280,699
Sulfurylchlorid	SO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	7,221793	1856,210	286,602
Tetrachlormethan	CCl <sub>4</sub>	5,991140	1202,900	225,140
Sirouhlík	CS <sub>2</sub>	5,992293	1135,840	238,372
Formaldehyd	CH <sub>2</sub> O	6,547500	1062,400	253,230
Mravenčí kyselina	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	6,502800	1563,280	247,060
Chlormethan	CH <sub>3</sub> Cl	6,119350	902,450	243,600
Nitromethan	CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>	6,401940	1444,380	227,364
Methan	CH <sub>4</sub>	5,820510	405,420	267,777
Methanol	CH <sub>4</sub> O	7,251640	1608,390	242,080
Methylamin	CH <sub>5</sub> N	6,621800	1079,150	240,230
Acetylen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	8,115220	1162,050	274,005
Keten	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	5,802970	711,140	236,760
Acetonitril	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	6,345220	1388,446	238,294
Ethylen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5,872460	585,000	255,000
Ethanal	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	6,141000	1034,500	230,000
Oxiran	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	6,385900	1115,100	244,135
Octová kyselina	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	6,682060	1642,540	233,386
Ethan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5,959420	663,700	256,470
Ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	7,233470	1591,280	226,095
Dimethylether	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	6,441360	1025,560	256,050

1,2-Ethandiol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	6,984650	1928,080	189,700
Propadien	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	4,838600	458,060	196,070
Propin	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	5,909750	803,730	229,080
Propen	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	5,944500	785,000	247,000
Aceton	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	6,204700	1166,990	230,000
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	5,928880	803,810	246,990
1-Propanol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	6,868740	1437,906	198,529
2-Propanol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	6,860870	1357,514	197,364
1,3-Butadien	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	5,974890	930,540	238,844
Acetanhydrid	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	6,246550	1427,770	198,037
1-Buten	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	5,967800	926,100	240,000
Cis-2-buten	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	5,994160	960,100	237,000
Trans-2-buten	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	5,994420	960,800	240,000
2-Methyl-1-propen	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	5,966240	923,200	240,000
Octan ethylnatý	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	6,227230	1245,239	217,911
Butan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	5,933860	935,860	238,730
2-Methylpropan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	6,035380	946,350	246,680
Diethylether	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	6,051150	1062,409	228,183
1-Butanol	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	6,541720	1336,026	176,802
Cyklopentan	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	6,008000	1122,210	231,139
1-Penten	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	5,969990	1043,962	233,383
Pentan	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	5,987990	1070,140	232,665
2-Methylbutan	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	5,958050	1040,730	235,445
2,2-Dimethylpropan	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	5,765320	900,540	230,039
1-Pentanol	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	6,309900	1290,230	161,731
Benzen	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	6,019070	1204,682	220,078
Fenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	6,259470	1516,072	174,569
Anilin	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	6,406270	1702,817	202,995
Cyklohexen	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	5,997320	1221,899	223,172
Cyklohexanon	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	6,103300	1495,511	209,552
Cyklohexan	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	5,966200	1201,531	222,647
Cyklohexanol	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	6,163400	1381,500	156,600
Hexan	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	6,004310	1172,040	224,403
Toluen	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	6,086270	1349,122	219,996
Heptan	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	6,026330	1268,583	217,096
Styren	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	6,082010	1445,580	209,430

Ethylbenzen	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	6,069910	1416,922	212,434
o-Xylen	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	6,131320	1480,155	214,346
p-Xylen	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	6,147790	1475,767	217,909
m-Xylen	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	6,140830	1467,244	215,708
Oktan	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	6,056320	1358,800	209,855
Propylbenzen	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	6,074380	1490,610	207,121
Isopropylbenzen	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	6,059490	1459,975	207,738
Nonan	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	6,059300	1429,460	201,820
Naftalen	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	6,194870	1782,509	207,520
Dekan	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	6,092060	1510,415	195,504

### **3.4 Přehled požárně technických charakteristik vybraných hořlavých plynů a kapalin**

V následujících tabulkách jsou uvedeny požárně technické charakteristiky vybraných plynů a kapalin.

CAS číslo	Název Vzorec	Relativní hustota (vzduch = 1)	Bod tání [°C]	Bod varu [°C]	Bod vzplanu- tí [°C]	Do ní me� vypuštnost [%obj.]	Horní me� vypuštnost [%obj.]	Do ní me� vypuštnost [g/m <sup>3</sup> ]	Horní me� vypuštnost [g/m <sup>3</sup> ]	Teplota vzn- cení [°C]	Nezapalný směs [%obj.]	MESG [mm]	g <sub>100</sub> - g <sub>100</sub> [mm]	Poměr MIC	Teplotní třída	Skupina zařazení	Metoda klasifika- ce
50-00-0	Formaldehyd (= Methanal) (= Methylaldehyd) (= Methylenoxid) HCHO	1,03	-92	-6	60	7,0	73,0	88	920	424		0,57			T2	IIB	a
51-80-9	N,N,N',N'-tetramethyl methanediámin (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NCH <sub>2</sub> N(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3,5	-140	84	< -13	1,61		67		180		1,06			T4	IIA	a
57-14-7	1,1-dimethylhydrazin (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NNH <sub>2</sub>	2,07	-58	63	-18	2,4	20,0	60	490	240		0,85			T3	IIB	a
60-29-7	1,1'-oxybisethan (= Diethyleter) (= Diethyloxid) (= Ethylether) (= Ethyloxid) (= Ether) (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O	2,55	-116	35	-45	1,7	39,2	50	1 210	175	3,47	0,87	0,01	0,88	T4	IIB	a
62-53-3	Benzenamin (= Aminobenzen) (= Anilin) (= Fenylamin) C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub>	3,22	-6	184	75	1,2	11,0	47	425	615					T1	IIA	d
64-17-5	Ethanol (= Alkohol) (= Ethylalkohol) CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	1,59	-114	78	12	3,1	19,0 při 80°C 27,7 při 100°C	59	532 při 100°C	400	6,5	0,89	0,02	0,88	T2	IIB	c
64-18-6	Kyselina mravenčí (= Kyselina hydrogen- karboxylová) (= Kyselina methanová) HCOOH	1,60	8	101	42	18,0	57,0	190	1 049	525		1,86			T1	IIA	a
CAS číslo	Název Vzorec	Relativní hustota (vzduch = 1)	Bod tání [°C]	Bod varu [°C]	Bod vzplanu- tí [°C]	Do ní me� vypuštnost [%obj.]	Horní me� vypuštnost [%obj.]	Do ní me� vypuštnost [g/m <sup>3</sup> ]	Horní me� vypuštnost [g/m <sup>3</sup> ]	Teplota vzn- cení [°C]	Nezapalný směs [%obj.]	MESG [mm]	g <sub>100</sub> - g <sub>100</sub> [mm]	Poměr MIC	Teplotní třída	Skupina zařazení	Metoda klasifika- ce
64-19-7	Kyselina octová (= Kyselina ethanová) (= Ledová kyselina octová) CH <sub>3</sub> COOH	2,07	17	118	39	4,0	19,9	100	428	510		1,76		2,67	T1	IIA	b
64-67-5	Diethylester kyseliny sírové (= Diethylsulfát) (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5,31	-25	208	104					380		1,11			T2	IIA	a
67-56-1	Methanol (= Karbinol) (= Methylalkohol) CH <sub>3</sub> OH	1,11	-98	65	9	6,0	36,0 při 80°C 50,0 při 100°C	73	665 při 100°C	440	11,0	0,92	0,03	0,82	T2	IIA	c
67-63-0	2-Propanol (= Dimethylkarbinol) (= Isopropanol) (= Isopropylalkohol) (= Propan-2-ol) (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHOH	2,07	-88	83	12	2,0	12,7	50	320	399		1,00			T2	IIA	a
67-64-1	2-Propanon (= Aceton) (= Dimethylketon) (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	2,00	-95	56	< -20	2,5	14,3 při 100°C	60	345 při 100°C	539	5,9	1,01		1,00	T1	IIA	c
68-12-2	N,N-dimethylformamid (= Dimethylformamid) HCON(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2,51	-61	153	58	1,8	16,0	55	500	440		1,08			T2	IIA	d
71-23-8	1-propanol (= Propan-1-ol) (= n-propylalkohol) CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	2,07	-126	97	15	2,1	17,5	52	353	385		0,89			T2	IIB	a



CAS číslo	Název Vzorec	Relativní hustota (vzduch = 1)	Bod tání [°C]	Bod varu [°C]	Bod vzplanu- tí [°C]	Dojití mez vypalnosti [%obj.]	Horní mez vypalnosti [%obj.]	Dojití mez vypalnosti (g/m <sup>3</sup> )	Horní mez vypalnosti (g/m <sup>3</sup> )	Teplota vzní- cení [°C]	Nejvyšší snesitelnost [%obj.]	MESG [mm]	g <sub>100</sub> - g <sub>6</sub> [mm]	Poměr MIC	Teplotní třída	Skupina zařazení	Metoda klasifika- ce	
71-36-3	1-butanol (= n-butylalkohol) (= n-butanol) (= Butylalkohol) (= 1-hydroxybutan) (= n-propylkarbinol) CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	2,55	-89	118	35	1,4	12,0	52	372	343	115 mg/l	0,91			T2	IIA	a	
71-41-0	1-pentanol (= n-amyalkohol) (= n-butylkarbinol) (= Pentan-1-ol) (= n-pentylalkohol) (= n-pentanol) CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH <sub>2</sub> OH	3,03	-78	138	42	1,06	10,5	36	385	320	100 mg/l	0,99			T2	IIA	a	
71-43-2	Benzen (= Fenylhydrid) C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	2,70	6	80	-11	1,2	8,6	39	280	498		0,99		1,00	T1	IIA	c	
74-82-8	Methan (viz 5.2.4) CH <sub>4</sub>		-182	-162		plyn	4,4	17,0	29	113	600	1,12		1,00	T1	IIA	a	
74-82-8	Methan (důlní plyn viz 5.2.4) CH <sub>4</sub>	0,55				plyn	4,4	17,0	29	113	595	8,2	1,14	0,11	T1	I	a	
74-84-0	Ethan CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	1,04	-183	-86		plyn	2,4	15,5	30	194	515	5,9	0,91	0,02	0,82	T1	IIA	c
74-85-1	Ethen (= Ethylen) CH <sub>2</sub> =CH <sub>2</sub>	0,97	-169	-104		plyn	2,3	36,0	26	423	440	6,5	0,65	0,02	0,53	T2	IIB	a
74-86-2	Ethyn (= Acetylen) (= Ethyn) CH≡CH	0,9				plyn	2,3	100	24	1 092	305	8,5	0,37	0,01	0,28	T2	IIC	c
CAS číslo	Název Vzorec	Relativní hustota (vzduch = 1)	Bod tání [°C]	Bod varu [°C]	Bod vzplanu- tí [°C]	Dojití mez vypalnosti [%obj.]	Horní mez vypalnosti [%obj.]	Dojití mez vypalnosti (g/m <sup>3</sup> )	Horní mez vypalnosti (g/m <sup>3</sup> )	Teplota vzní- cení [°C]	Nejvyšší snesitelnost [%obj.]	MESG [mm]	g <sub>100</sub> - g <sub>6</sub> [mm]	Poměr MIC	Teplotní třída	Skupina zařazení	Metoda klasifika- ce	
74-87-3	Methylchlorid (= Chlormethan) (= Monochlormethan) CH <sub>3</sub> Cl	1,78		-24		plyn	7,6	19,0	160	410	625	1,00			T1	IIA	a	
74-89-5	Methylamin (= Aminomethan) (= Karbinamin) CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	1,00	-92	-6		plyn	4,2	20,7	55	270	430	1,10			T2	IIA	a	
74-90-8	Kyselina kyanovodíková (= Kyanovodík) (=Kyselina kyanovodíková) (= Methannitril) (= Kyanovodíková kyselina) HCN	0,90	-13	26	< -20		5,4	46,0	60	520	538	18,4	0,80	0,02	T1	IIB	a	
74-93-1	Methanthiol (= Merkaptomethan) (= Methylmerkaptan) (= Methylsulfhydrát) CH <sub>3</sub> SH	1,80	-126	6		plyn	4,1	21,0	80	420	340	1,15			T2	IIA	a	
74-96-4	Bromethan (= Ethylbromid) (= Monobromethan) CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> Br	3,75	-119	38			6,7	11,3	306	517	511				T1	IIA	d	
74-98-6	Propan (= Dimethylmethan) (= Propylhydrid) CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	1,56	-188	-42		plyn	1,7	10,9	31	200	450	4,2	0,92	0,03	0,82	T2	IIA	c
74-99-7	Propin (= Alkylen) (= Methylacetylen) CH <sub>3</sub> C≡CH	1,38	-103	-23		plyn	1,7	16,8	28	280	340				T2	IIB	d	

CAS číslo	Název Vzorec	Relativní hustota (vzduch = 1)	Bod tání [°C]	Bod varu [°C]	Bod vzplanu- tí [°C]	Dořítí mež výbušnosti [%obj.]	Horní mež výbušnosti [%obj.]	Dořítí mež výbušnosti [g/m <sup>3</sup> ]	Horní mež výbušnosti [g/m <sup>3</sup> ]	Teplota vzní- cení [°C]	Nežádnější směs [%obj.]	MESG [mm]	g <sub>10</sub> - g <sub>50</sub> [mm]	Poměr MIC	Teplotní třída	Skupina zařazení	Metoda klasifika- ce
625-55-8	1-methylethylester kyseliny mravenčí (= Isopropylfomiát) (= Isopropylester kyseliny mravenčí) (= 1-Methylethylfomiát) HCOOCH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3,03		68	< -6					460		1,10			T1	IIA	a
626-38-0	1-methylbutylester kyseliny octové (= sec-amyloacetát) (= 1-methylbutylacetát) (= 2-pentanolacetát) (= 2-pentylester kyseliny octové) CH <sub>3</sub> COOCH(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	4,50		134	23	11,0	7,5									IIA	d
628-63-7	Pentylester kyseliny octové (= n-amyloacetát) (= Amylooctester) (= Amyloctoether) (= 1-pentanolacetát) (= Pentylacetát) (= Pentylester kyseliny octové) (= Primární amyloacetát) CH <sub>3</sub> COO-(CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> -CH <sub>3</sub>	4,48	-71	140	25	1,0	7,5	55	387	360	110 mg/l	1,02			T2	IIA	a
629-14-1	1,2-diethoxyethan (= 3,6-Dioxaoktan) C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	4,07	-74	122	16					170		0,81			T4	IIB	a
630-08-0	Oxid uhelnatý (vodou nasycený vzduch při 18 °C viz 5.2.3) CO	0,97				plyn	10,9	74,0	126	607	40,8	0,84	0,03		T1	IIB	a
CAS číslo	Název Vzorec	Relativní hustota (vzduch = 1)	Bod tání [°C]	Bod varu [°C]	Bod vzplanu- tí [°C]	Dořítí mež výbušnosti [%obj.]	Horní mež výbušnosti [%obj.]	Dořítí mež výbušnosti [g/m <sup>3</sup> ]	Horní mež výbušnosti [g/m <sup>3</sup> ]	Teplota vzní- cení [°C]	Nežádnější směs [%obj.]	MESG [mm]	g <sub>10</sub> - g <sub>50</sub> [mm]	Poměr MIC	Teplotní třída	Skupina zařazení	Metoda klasifika- ce
1333-74-0	Vodík H <sub>2</sub>	0,07	-250	-253		plyn	4,0	77,0	3,4	680	27	0,29	0,01	0,25	T1	IIC	c
1498-84-2	O-ethylfosfordichlorodithioat C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OPSCl <sub>2</sub>	7,27			75					234		1,20			T3	IIA	a
1634-04-4	2-methoxy-2-methylpropan (= tero-butylmethylether) (= Methyltero-butylether) CH <sub>3</sub> OC(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	3,03	-100	55	-27	1,5	8,4	54	310	385		1,00			T2	IIA	a
1640-99-7	Ethylcyklopentan CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub>	3,40	-138	103	< 5	1,05	6,8	42	280	282					T3	IIA	d
1678-91-7	Ethylcyklohexan CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH <sub>2</sub>	3,87	-113	132	< 24	0,9	6,6	42	310	238					T3	IIA	d
1712-64-7	1-methylethylester kyseliny dusičné (= Isopropylnitrát) (= Isopropylester kyseliny dusičné) (= Propan-2-nitrát) (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHONO <sub>2</sub>	3,62		101	11	2,0	100	75	3 738	175					T4	IIB	d
1719-53-5	Dichlordiethylsilan (= Diethylchlorosilan) (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> SiCl <sub>2</sub>	5,42	-96	130	24	3,4		233				0,45				IIC	a
1738-25-6	3-(dimethylamino)propion- nitril (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NHCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CN	3,38	-43	170	50	1,57		62		317		1,14			T2	IIA	a
2032-35-1	2-brom-1,1-diethoxyethan (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> O) <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> Br	7,34		170 až 172	57					175		1,00			T4	IIA	a

CAS číslo	Název Vzorec	Relativní hustota (vzduch = 1)	Bod tání [°C]	Bod varu [°C]	Bod vzplanu- tí [°C]	Dojití mez výbušnosti [%obj.]	Horní mez výbušnosti [%obj.]	Dojití mez výbušnosti [g/m <sup>3</sup> ]	Horní mez výbušnosti [g/m <sup>3</sup> ]	Teplota vzní- cení [°C]	Nežádnější směs [%obj.]	MSG [mm]	g <sub>10</sub> - g <sub>6</sub> [mm]	Poměr MIC	Teplotní třída	Skupina zařízení	Metoda klast- řence	
7383-71-3	2,2,3,3-tetrafluorpropylakrylát (= 2,2,3,3-tetrafluorpropylester kyseliny akrylové) (= 2,2,3,3-Tetrafluorpropylprop- 2-enoat) CH <sub>2</sub> =CHCOOCH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> H	6,41		135	45	2,4		182		357		1,18			T2	IIA	a	
7397-82-8	Butylester kyseliny hydroxyoctové (= Butylglykolát) (= Butyl-2-hydroxyacetát) HOCH <sub>2</sub> COOC <sub>4</sub> H <sub>9</sub>	4,45	-26	187	61						4,2	0,88	0,02				II B	a
7864-41-7	Amoniak (= Bezvodý amoniak) NH <sub>3</sub>	0,59	-78	-33	plyn	15,0	33,6	107	240	630	24,5	3,18		6,85	T1	IIA	a	
7783-06-4	Sírovodík (= Kyselina sirovodíková) (= Kalový plyn) (= Sírovodík) H <sub>2</sub> S	1,19	-88	-60	plyn	4,0	45,5	57	650	260		0,83			T3	II B	a	
8006-61-9	Benzín (= Motorové palivo) (= Benzin natural) (= motorový benzin)	3,0			-46	1,4	7,6			280					T3			
8006-64-2	Terpentýnový olej		-50 až -60	154 až 170	35	0,8				253					T3	IIA	d	
8008-20-6	Kerosin (petrolej) (= Motorová nafta č. 1) (= Palivová nafta č. 1)				38 až 72	0,7	5,0			210					T3	IIA	d	
17639-76-8	Methyl-3-methoxypropionát CH <sub>3</sub> CH(CH <sub>3</sub> O)COOCH <sub>3</sub>	4,06		42 při 200 mbar	48	1,2		58		211		1,07			T3	IIA	a	

CAS číslo	Název Vzorec	Relativní hustota (vzduch = 1)	Bod tání [°C]	Bod varu [°C]	Bod vzplanu- tí [°C]	Dojití mez výbušnosti [%obj.]	Horní mez výbušnosti [%obj.]	Dojití mez výbušnosti [g/m <sup>3</sup> ]	Horní mez výbušnosti [g/m <sup>3</sup> ]	Teplota vzní- cení [°C]	Nežádnější směs [%obj.]	MSG [mm]	g <sub>10</sub> - g <sub>6</sub> [mm]	Poměr MIC	Teplotní třída	Skupina zařízení	Metoda klast- řence
45102-52-1	2,2,3,3- Tetrafluorpropylmethakrylát (= 2,2,3,3-Tetrafluorpropyl- 2-methylprop-2-enoat) CH <sub>2</sub> =C(CH <sub>3</sub> )COOCH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> H	6,90		70 při 68 mbar		1,9		155		389		1,18			T2	IIA	a
68476-34-6	Nafta motorová, č. 2 (= Motorové palivo č. 2) (= Palivová nafta č. 2)				52 až 98	0,6	6,5			254 až 285					T3		
bez CAS	1-Chlor-2,2,2- trifluoethylmethylether CF <sub>3</sub> CHClOCH <sub>3</sub>	5,12			4	8,0		484		430		2,80			T2	IIA	a
bez CAS	Koksárenský pecní plyn (viz 5.2.1)				plyn											II B nebo II C	d
bez CAS	Topný olej č. 6				66 až 132												
bez CAS	4-Methylentetrahydropyran OCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> C(=CH <sub>2</sub> )CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub>	3,78			2	1,5		60		255		0,89			T3	II B	a
bez CAS	2-Methylhexa-3,5-dien-2-ol CH <sub>2</sub> =CHC=CHC(OH)(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3,79			24					347		1,14			T2	IIA	a
bez CAS	Směs vodních plynů CO + H <sub>2</sub>														T1	II C	d

## **Příklady**

- 1) Zjistěte koncentraci metanu ( $\text{CH}_4$ ) v místnosti o rozměrech 3 x 3 x 2 m pokud víme, že uniklo 20g metanu. Zjistěte, zda je lehčí nebo těžší než vzduch. Při teplotě  $20^\circ\text{C}$  a tlaku  $p_0=101\,325\text{ Pa}$ ,  $M=16\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .
- 2) Za jak dlouho se vytvoří výbušná koncentrace koksárenského plynu při úniku  $2\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  v turbokompresoru o rozměrech 30 x 16 x 6 m, LEL=5,3 obj. %.
- 3) Vypočítej dobu, za kterou se v prostoru o objemu  $220,5\text{ m}^3$  vytvoří nebezpečná koncentrace metanu. Zařízení pracuje pod tlakem 20 MPa a pracovní teplotě  $26\text{ }^\circ\text{C}$ . Plyn uniká netěsností o průměru 0,042m, výtokový součinitel je 0,75, adiabatický koeficient je 1,4, dolní mez výbušnosti metanu je 5 obj. %, bezpečnostní koeficient je 0,5.

## **Výsledky**

- 1)  $c_{SKUT\ CH_4} = 0,167\ \text{obj.}\%$   
 $\rho_{CH_4} = 0,665\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} < 1\ \text{metan je lehčí než vzduch}$
- 2)  $\tau = 76320\ \text{s} = 21,2\ \text{hod.}$
- 3)  $\tau = 12,44\ \text{s}$

## 4. Hořlavý prach

### 4.1 Úvod

Aerosoly kapalin a mlhy tvoří kapičky o velikosti menší než 1 mm. V praxi se často vyskytují mlhy a aerosoly, které mají kapičky o velikosti 0,001 mm a 0,1 mm. Výbušné vlastnosti aerosolů kapalin a mlh se posuzují podobně jako vlastnosti aerosolů tuhých prachových částic.

Prach tvoří částice pevné látky menší než 0,5 mm. U vláknin může být délka vlákna větší než 0,5 mm. Některé atypické materiály se mohou chovat jako prachy i při větších rozměrech částic (např. peří).

Termín prach zahrnuje rozmělněné pevné látky označené jako pudr, moučka, prášek, úlomky vláken atp. Hořlavý prach se může v průmyslu vyskytovat jako produkt (např. mouka, cukr, škrob, uhlí, kovy, plasty nebo barviva). V některých případech může být prach přítomen jako vedlejší produkt (např. textilní prach, dřevěné piliny a prach z procesů, kde jsou pevné látky a materiály řezány, leštěny nebo čištěny).

Hořlavý prach je schopen oxidační reakce doprovázené vývinem tepelné a světelné energie. Tato reakce je doprovázená zásadní změnou původní hmoty. Hořlavý prach může vznikat z hmoty, která obsahuje více než 10 hmot. % látky schopné oxidace.

***Prach se vyskytuje ve dvou stavech:***

- **Aerogel** (usazený prach)
- **Aerosol** (rozvířený prach)

Prach může snadno přejít z jednoho stavu do druhého. Usazený prach lze rozvířit (např. vibracemi, otřesy, proudem vzduchu ...) a naopak rozvířený prach sedimentací přechází do usazeného stavu.

Podle místa výskytu může být prach uvnitř výrobního zařízení a vně výrobního zařízení, tj. uvnitř výrobní haly (provozovny).

Prach v usazeném stavu může podle druhu látky hořet plamenem (bavlna, plastické hmoty), žhnout (dřevěné uhlí), nebo doutnat (kdy se tepelným rozkladem vytvářejí pyrolyzní produkty v tak malém množství, že se nedosáhne koncentrace potřebné k plamennému hoření) a hoření se může šířit různou rychlostí.

Hořlavý prach v rozvířeném stavu je schopen prudké oxidační reakce, která má charakter výbuchu a za určitých podmínek může tento děj přejít až v detonaci.

Nebezpečí požáru hořlavých prachů hrozí tam, kde se prach usazuje v souvislé vrstvě schopné šířit požár. Za vrstvu schopnou šířit požár se považuje již vrstva 1 mm.

Je nutné si uvědomit, že každý požár může velmi snadno přejít ve výbuch a naopak výbuch může přejít v hoření zbytků nezreagovaného prachu (při výbuchu prachu v optimálním případě shoří nejvýše polovina rozvířené hmoty prachu). Po výbuchu nemusí následovat požár, pokud je výbuchem spotřebován vzdušný kyslík, resp. Pokud je obsah kyslíku snížen pod limitní obsah kyslíku.

Prostředí s nebezpečím výbuchu prachu se vytváří v prostoru, kde se může vytvořit nebezpečné množství výbušné směsi prachu se vzduchem, to znamená, že při zapálení směsi může dojít přímým nebo nepřímým účinkem ke zranění osob a poškození věcí. Aby se mohla vytvořit výbušná směs hořlavého prachu se vzduchem, musí být k dispozici dostatečné množství prachových částic, tj. skutečná koncentrace  $c_{SKUT}$  musí být větší než nebezpečná koncentrace  $c_{NEB}$ .

$$c_{SKUT} \geq c_{NEB}$$

Nebezpečná koncentrace  $c_{NEB}$  se určuje na základě dolní meze výbušnosti daného prachu LEL:

$$c_{NEB} = k_b \cdot LEL$$

**kde:**

$k_b$  bezpečnostní koeficient

(Pro vnitřní prostory výrobních zařízení se uvažuje bezpečnostní koeficient 0,5.)

U prachů je nutné si uvědomit, že oblak rozvířené prachu není obvykle homogenní a koncentrace se může v oblaku měnit na základě víření usazeného prachu a jeho rozptýlení do atmosféry. Na rozdíl od plynů a par mohou prachy rozvířením místní vrstvy či hromádky prachu vytvářet místní koncentrace.

## 4.2 Nebezpečí výbuchu prachu uvnitř výrobního zařízení

Skutečná koncentrace v zařízení  $c_{SKUT}$  [ $\text{g}\cdot\text{m}^3$ ] se vypočítá podle vztahu:

$$c_{SKUT} = \frac{m}{V}$$

*kde:*

$m$  hmotnost daného prachu [g]

$V$  objem zařízení, v němž je prach rozvířen [ $\text{m}^3$ ]

Při proudění prachu v potrubí se skutečná koncentrace prachu  $c_{SKUT}$  [ $\text{g}\cdot\text{m}^3$ ] určí podle vztahu:

$$c_{SKUT} = \frac{m_p}{V_p} = \frac{m_p}{S \cdot w}$$

*kde:*

$m_p$  množství přepravovaného prachu [ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$V_p$  množství proudícího vzduchu [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$S$  průřez potrubí [ $\text{m}^2$ ]

$w$  rychlost proudícího vzduchu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

Horní mez výbušnosti se při bezpečnostních úvahách u prachů nepoužívá, protože provoz při koncentraci nad horní mezí výbušnosti není možno považovat za bezpečný. Není totiž možné zabezpečit homogenitu prachového oblaku a také je nutné uvažovat možnou změnu koncentrace sedimentací. Nebezpečí výbuchu proto hrozí i tehdy, když je skutečná koncentrace vyšší než horní mez výbušnosti. Horní mez výbušnosti prachu je navíc velmi vysoká až několik tisíc [ $\text{g}\cdot\text{m}^3$ ] a této vysoké koncentrace i v uzavřených technologických zařízeních lze jen velmi obtížně dosáhnout.



### 4.3 Nebezpečí výbuchu prachu vně výrobního zařízení

Vně výrobního zařízení tzn. v hale nebo místnosti výrobního objektu se skutečná průměrná koncentrace  $c_{SKUT}$  [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] prachu vypočítá:

$$c_{SKUT} = \frac{m}{V_{míst}} = \frac{l \cdot b \cdot s \cdot \rho}{l \cdot b \cdot h} = \frac{s \cdot \rho}{h}$$

**kde:**

$m$	hmotnost usazeného prachu na půdorysné ploše místnosti [g]
$V_{míst}$	objem místnosti [ $\text{m}^3$ ]
$l, b, h$	délka, šířka, výška místnosti [m]
$s$	tloušťka usazené prachové vrstvy [m]
$\rho$	sytná hustota prachu [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

**Nebezpečná koncentrace se vypočítá:**

$$c_{NEB} = k_b \cdot LEL$$

**kde:**

$k_b$	bezpečnostní koeficient (Pro vnitřní prostory výrobního zařízení se uvažuje $k_b = 0,5$ )
LEL	dolní mez výbušnosti

**Tloušťka nebezpečné vrstvy  $s_{NEB}$  [m] se pak vypočítá:**

$$s_{NEB} = \frac{c_{NEB} \cdot h}{\rho} = \frac{k_b \cdot LEL \cdot h}{\rho}$$

U většiny hořlavých prachů vychází pro běžné výšky místností nebezpečná tloušťka vrstvy prachu menší než 1mm! To znamená, že u většiny hořlavých prachů rovnoměrná vrstva usazeného prachu na podlaze o tloušťce 1 mm stačí k tomu, aby se při jeho rozvíření vytvořila výbušná směs.

### **Vzorový příklad:**

Jaké množství dřevěného prachu vytvoří ve výrobní hale o rozměrech 30 x 15 x 6 m výbušnou koncentraci. Jaká tloušťka vrstvy usazeného prachu po celé hale je nebezpečná, když sytná hustota dřevěného prachu je  $380 \text{ kg.m}^{-3}$ . Dolní mez výbušnosti (LEL) uvažujte  $30 \text{ g.m}^{-3}$ .

$$l = 30 \text{ m}$$

$$b = 15 \text{ m}$$

$$h = 6 \text{ m}$$

$$\text{LEL} = 30 \text{ g.m}^{-3} = 0,03 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\rho_{\text{látky}} = 380 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$k_b = 1$$

Výpočet objemu místnosti:

$$V_{\text{míst}} = l \cdot b \cdot h$$

$$V_{\text{míst}} = 30 \cdot 15 \cdot 6$$

$$V_{\text{míst}} = 2700 \text{ m}^3$$

Výpočet hmotnosti prachu:

$$m = V_{\text{míst}} \cdot \text{LEL}$$

$$m = 2700 \cdot 30$$

$$m = 81000 \text{ g} = 81 \text{ kg}$$

Výpočet tloušťky nebezpečné vrstvy prachu:

$$s_{\text{NEB}} = \frac{c_{\text{NEB}} \cdot h}{\rho} = \frac{k_b \cdot \text{LEL} \cdot h}{\rho}$$

$$s_{\text{NEB}} = \frac{1 \cdot 0,03 \cdot 6}{380}$$

$$s_{\text{NEB}} = 0,00047 \text{ m} = 0,47 \text{ mm}$$

Závěr:

V místnosti o rozměrech 30 x 15 x 6 m vytvoří nebezpečnou koncentraci 81 kg dřevěného prachu. Tloušťka nebezpečné vrstvy prachu po celé haly činí 0,47 mm.

## 4.4 Přehled požárně technických charakteristik vybraných hořlavých prachů

V následujících tabulkách jsou uvedeny požárně technické charakteristiky vybraných prachů od různých autorů. V případě potřeby lze čerpat hodnoty požárně technických charakteristik prachu i z literatury [4], která uvádí odkaz na on-line databázi GESTIS-DUST-EX, která v současné době obsahuje vlastnosti hořlavosti a výbušnosti 4605 materiálů.

Název prachu	Spodní mez výbušnosti (g.m <sup>-3</sup> )		Teplota vznícení v usazeném stavu		Teplota vznícení v rozvířeném stavu		Minimální iniciační energie (MIE)		Výbušové parametry			Rychlost šíření hoření ve vrstvě usaz. prachu (s)	
	Stav A	Stav B	(°C)	(min)	(°C)	(ms)	(J)	(g.m <sup>-3</sup> )	P <sub>max</sub> (MPa)	(dp/dt) <sub>max</sub> (MPa.s <sup>-1</sup> )	C <sub>optim</sub> (g.m <sup>-3</sup> )	Stav A	Stav B
Černé uhlí (Fučík)	46	4	450	43	560	1020	2,55	1083	0,64	12,19	500		
Hnědé uhlí (Herkules Německo)		30	136	38	490	1190	0,21	500	0,58	9,66	500		14,7
ABS polymer	26	22	347	10	455	1251	0,088	667	0,65	9,33	600	3	1
Polyesterový prach (70%)	20	18	258	35	475	1528	0,52	500	0,61	5,98	1000	1	1
Aspirin (čistý)	90	36	440	15	560	1493	0,021	333	0,78	17,3	600	10	9
2-naftol	22	18	450	2	630	1353	0,062	667	0,72	13,0	600	1	1
Natučnění mléko sušené		36	220	80	450	679	>10		0,66	3,34	400		6
Cukr	36	36	320	25	420	510	0,52	1000	0,82	9,4	1200	8	7
Dřevný prach	34	30	203	71	480	649	1,24	668	0,52	7,17	900	2	2
Krmné droždí		46	260	60	460	1139	1,24	917	0,71	5,05	800		12
Vojtěška	80	68	245	30	490	489	6,3	750	0,65	4,25	600	25	14
Kostní moučka	44	38	190	40	460	1350	>10		0,48	2,6	800	7	5
Pekařská mouka	190	38	250	170	480	561	0,77	833	0,39	2,34	500	18	15
Pazdří ze lnu	32	30	250	40	530	610	7,61	417	0,57	5,77	1300	15	
Instant kakao	300	110	300	30	420		6,87	583				11	7
Chmel – prášek	74	72	174	34	490	398	8,33	583	0,40	3,64	800	1	1
Al - krupice	74	36	650	neg.	850	201	>10		0,75	7,72	1300		21

Název prachu	Spodní mez výbušnosti (g.m <sup>-3</sup> )		Teplota vznícení v usazeném stavu		Teplota vznícení v rozvířeném stavu		Minimální iniciační energie		Výbušové parametry			Rychlost šíření hoření ve vrstvě usaz. prachu (s)	
	Stav A	Stav B	(°C)	(min)	(°C)	(ms)	(J)	(g.m <sup>-3</sup> )	P <sub>max</sub> (Mpa)	(dp/dt) <sub>max</sub> (MPa.s <sup>-1</sup> )	C <sub>optim</sub> (g.m <sup>-3</sup> )	Stav A	Stav B
Směs dřevný prach - polyester + dřevo	26	26	260	45	460	1119	0,21	416	0,78	18,2	1200		
Polypropylen práškový	28	26	360	5	410	2971	0,032	750	0,72	11,4	300-800	6	5
Polystyren Krasten	80		380	40	500	1324	>10		0,47	2,74	1000	5	
Komaxit-epoxid. Barva	34	20	355	12	475	1324	0,097	667	0,51	5,18	1000	8,8	13,7
Fenolformaldehydová pryskřice		40	170	20	520	1734	0,52	916,6	0,77	15,0	600-1200		1,5
Metylhydroxypropyl 2-Kyan-4-nitranilin (barvivo)	20	20	202	37	410	300	2,52	667	0,67	10,36	800	2,7	3737
Ostacetová červeň		90	390	3	520	700	8,33	1333	0,67	5,13	1200		18
Midlonová žlut'	200	180	232	11	610		>10		0,57	3,89	600	18	18
Versálová červeň		36	410	15	640	1016	0,41	250	0,82	10,53	500		<1
Ketophenylhexazonum (léčivo)	14	14	450	5	550	1950	0,026	583	6,65	19,69	900	<1	<1
Amidopyrin (lék)	28	26	260	1	300	807	0,026	417	0,72	12,4	600	<1	<1
Sam- mýdl. prášek	700	56	370	30	590	874	>10		0,58	4,37	600	35	35
Chlortoluron k ochraně rostlin		40	410	1	530	1260	0,097	1415	0,53	4,55	1000		<1

COTTON WOOD PEAT	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS	
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN	
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class
Cotton			98	72		38	25	44	(100)	7.2	24	St. 1	560			350	3
Cellulose			92	71		20	3	51	60	9.3	66		500		250	380	5
Wood dust				90		47	7	33					500		100	320	
Wood dust	58		57	55		43	39	80					480		7	310	
Wood dust (chip board)				70		30		43	60	9.2	102	St. 2	490			320	3
Wood/cardboard/jute									30	5.8	26		610		245	360	5
Wood/card board/jute/resin									30	8.4	67		520		3	350	5
Lignin dust			96	85		66	57	18	15	8.7	208		470			> 450	5
Paper dust				91		83	73	<10		5.7	18		580			360	
Paper tissue dust			75	58				54	30	8.6	52	(St. 2)	540			300	4
Paper (phenolresin treated)				100		90	25	23	30	9.8	190		490			310	
Peat (15% moisture)			84	58		26	3	58	60	10.9	157	St. 1	480			320	4
Peat (22% moisture)			82	65		40	15	46	125	8.4	69	St. 1	470			320	4
Peat (31% moisture)			87	76		43	20	38	125	8.1	64		500			320	
Peat (41% moisture)			88	76		40	18	39		No ignition			500			315	
Peat (from bottom of sieve)			78	48		22		74	125	8.3	51	St. 1	490			310	4
Peat (dust deposit)				66		33	11	49	60	9.5	144		(360)			295	
Paper pulp				93		76		29		9.8	168						

FOOD FEED	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS	
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN	
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class
Gravy powder (21% starch)					100					5.1	12			500	>1000		
Citrus pellets					100				60	7.7	39			460	250		
Dextrose, ground			100		94	71		22				St. 2					2
Dextrose				38		5	4	80	60	4.3	18	St. 1	500			570	3
Fat/whey mixture	76		11	3				330		7.0	23		450		180	410	5
Fat powder (48% fat)		100	75		24	7		92	30	6.4	20	St. 2					2
Do.					100									430	> 100		
Fish meal	68		23		12			320	125	7.0	35		530				
Fructose (from filter)	99		39	17				150	60	9.0	102		430		< 1	melts	
Fructose	92		15					200	60	7.0	28		440		180	440q	
Fructose	81							400	125	6.4	27		530		>4000	melts	
Barley grain dust	79	51	25		8	3		240							100		4
Do.					100				125	7.7	83			400			
Oats grain dust	64		24		8			295	750	6.0	14	St. 1				350	3
Wheat grain dust				48		30		80	60	9.3	112	St. 1				290	3
Wheat grain dust	100	81	50		32	25		125				St. 2					3
Coffee (from filter)				100		99	89	< 10	60	9.0	90		470			> 450	
Coffee (refined)					100					6.8	11			460	> 500		4

FOOD FEED	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS						DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN	
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI- AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar-m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class
Cocoa bean shell dust					100				125	8.1	68				> 250		4
Cocoa/sugar mixture	53		20					500	125	7.4	43	St. 1	580			460	2
Potatoe granulate					100					6.4	21			440	> 250		3
Potatoe flour			86	53		26	17	65	125	9.1	69		480			> 450	
Lactose (from filter)				83		60	47	22	125	6.9	29		450		80	> 450	
Lactose (from cyclone)				97		70	41	23	60	7.7	81	St. 2	520			> 450	3
Maize seed waste (9% moisture)	98	67	40		23	16		165	30	8.7	117			440	> 10		
Milk powder			34	18				165	60	8.1	90		460		75	330	
Milk powder	98		15	8				235	60	8.2	75		450		80	320	
Milk powder (low fat, spray dried)	100	100	99		60	17		46	30	7.5	109				> 100		
Milk powder (full fat, spray dried)				30				88	60	8.6	83	St. 1	520			330	2
Whey fat emulgator	62		7	2				400		7.2	38		450		90	420	5
Olive pellets					100				125	10.4	74			470	>1000		
Rice flour					100				60	7.4	57			360	> 100		
Rye flour			94	76		58	15	29		8.9	79		490			> 450	
Soy bean flour				85		63	50	20	(200)	9.2	110	St. 1	620			280	2
Potatoe starch					100				30	7.8	43			420	>1000		
Potatoe starch				100		50	17	32		(9.4)	(89)		520		>3200	> 450	2

FOOD FEED	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN		
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. < 250µm		
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class	
Maize starch				99		96	94	< 10		10.2	128		520		300	> 450	2	
Maize starch				94		81	60	16	60	9.7	158	St. 1	520			440	2	
Rice starch (hydrolyzed)				29		15		120	60	9.3	190	(St. 2)	480			555	5	
Rice starch				99		74	54	18					470		90	390	3	
Rice starch				86		62	52	18		10.0	190	(St. 2)	530			420	3	
Wheat starch						84	50	20	60	9.8	132	(St. 2)	500			535	3	
Tobacco				81	64			29	49	4.8	12		470			280		
Tapioca pellets				61		42		44	125	9.0	53	St. 1	(450)			290	4	
Tea (6% moisture)								100	30	8.1	68		510				≥ 3	
Tea (black, from dust collector)				64	48		26	16	76	125	8.2	59	St. 1	510			300	4
Meat flour				69	52		31	21	62	60	8.5	106	St. 1	540			> 450	2
Wheat flour									50				500		540	> 450		
Wheat flour				97	60		32	25	57	60	8.3	87		430			> 450	
Do.								100						400	> 100			
Wheat flour 550				60		34	25	56	60	7.4	42		470		400	> 450		
Milk sugar				99		92	77	10	60	8.3	75		440		14	melts	5	
Milk sugar				98		64	32	27	60	8.3	82	St. 1	490			460	2	
Sugar (icing-)				88		70	52	19					470			> 450		

COAL COAL PRODUCTS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN		
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. < 250µm		
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class	
Activated carbon				99		80	55	18	60	8.8	44		790			> 450		
Activated carbon				88		64		22	No ignition				670			335		
Activated carbon (18% moisture)				84	65		38		46	125	8.4	67		(630)				
Brown coal				83	69		40	20	41		9.1	123		420		160	230	4
Brown coal (from electrostatic filter)				75	60		27		55	60	9.0	143	St. 1	450			240	4
Brown coal (dust from grinding)				71	56		38	30	60		8.9	107		420		230	230	3
Brown coal/anthracite (80:20)				66		43	24	40	60	8.6	108		440		> 4000	230		
Brown coal/anthracite (20:80)				91		85	80	< 10		0.4	1		590			280		
Brown coal coke	93			18	13				290	250	8.4	115	St. 1	560			> 450	3
Brown coal (graphitized)				82		55	35	28	No ignition				> 850			> 450		
Char coal				99		88	67	14	60	9.0	10	St. 1	520			320	4	
Char coal				95		85	58	19	60	8.5	117		540			270		
Char coal	36							> 500	No ignition				> 850			> 450		
Asphalt				83		54	32	29	15	8.4	117		550			melts		
Bituminous coal				97		93	85	< 10		9.0	55		590			270		
Bituminous coal (Petchora)				76	65		46	37	38	125	8.6	86		610			360	
Anthracite (dust from filter)				99		97	85	< 10	No ignition				> 850			360		
Bituminous coal (high volat.)							99	4	60	9.1	59		510			260		

OTHER NATURAL ORGANIC PRODUCTS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS	
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN	
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class
Cotton seed expellers	66		24	10				245	125	7.7	35	St. 1	(480)			350	3
Dextrin				57		26	5	55		8.8	109	St. 1	490			> 450	2
Wheat gluten (after mill)				78		28	13	48	30	8.7	105		540			melts	
Blood flour			93	61		27	5	57	60	9.4	85		610			> 450	1
Hops, malted	52		14	9				490		8.2	90		420			270	
Leather dust (from collector)									(100)			(St. 2)					5
Linen (containing oil)	63		21					300		6.0	17		(440)			230	
Lycopodium					100	91							410			280	
Oil shale dust				99		79	50	20	125	5.2	35		520			290	2
Oil shale dust				71		50	39	32	No ignition				610			> 450	
Grass dust	96		26					200	125	8.0	47		470			310	
Walnut shell powder									(100)			St. 1					4

PLASTICS RESINS RUBBER	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS	
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN	
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class
Acrylonitrile-Butadiene-Styrene -Co-polym.	79	37	24					200	60	9.2	147	(St. 2)	480			> 450	5
Epoxy resin (for powder coating)		100	82		58	28		55	(100)			(St. 2)					2
Cellulose-2, 5-Acetate				100		89	53	19	30	9.8	180		520			> 450	
Polyester resin with glass	92	91	89		80	72		14	(100)			(St. 2)					5
Rubber				93		45		34	(100)	7.4	106	(St. 2)					5
Rubber (dust from grinding)				78	43	12		80	30	8.5	138		500		13	230	5
Resin (from filter)				97		44		40	30	8.7	108		460			melts	
Epoxy resin (60% resin + 36% TiO <sub>2</sub> )				99		67	43	23		7.8	155						
Epoxy resin				95		60	36	28	30	7.9	129	St. 1	510			melts	2
Epoxy resin with Al				90		46		34		8.9	208		570			melts	
Melamin resin				99		84	55	18	125	10.2	110	St. 1	840			> 450	2
Melamin resin				68		24	13	57	60	10.5	172	St. 1	470			> 450	2
Phenol resin				100		99	94	< 10	15	9.3	129	(St. 2)	610			> 450	2
Phenol Formaldehyde resin	100	98	81		50	30		60	(100)			St. 1					4
Polyamid resin				95		84	64	15	30	8.9	105		450			melts	
Polymethacrylate	58				100	33			15	8.0	199						(2)
Silicon resin	91		59	39		20	13	100	60	7.2	80		480			melts	
Caoutchouc				58	40	20		95	30	9.5	192		450			230	

PLASTICS RESINS RUBBER	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS						DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN	
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar-m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class
Synthetical caoutchouc			66	46		18	9	80	15	8.6	145	(St. 2)	450			240	5
Methylmethacrylate-Butadiene-Styrene			45	18				135	30	8.6	120		470		11	melts	5
Methylmethacrylate-Butadiene-Styrene			34	11				150	30	8.4	114		480		30	melts	5
Polyacrylamide (from filter)			100			95	81	10	250	5.9	12	St. 1	780			410	2
Polyacrylate (from filter)		100	63			11	1	62	125	6.9	38		460		>1800	420	5
Polyacrylonitrile (32% H <sub>2</sub> O)			95	47		16		63	60	7.4	41						
Polyamide flock (3.3 dtex 0.5 mm)			100			25	3	37	30	9.8	93	St. 1	520			melts	2(3)
Polyester								<10		10.1	194		570			melts	
Polyethylene			91	51		10		72		7.5	67		440			melts	
Polyethylene	82		8	2				280		6.2	20		470			melts	
Polyethylene (high-pressure)			98	93		65	10	26		8.7	104		490			> 450	
Polyethylene (low-pressure)						95	86	<10	(30)	8.0	156	(St. 2)	420			melts	2(5)
Polyethylene (low-pressure)			36	10				150	125	7.4	54	St. 1	480			melts	3(5)
Polyethylene (low-pressure)	90		20	9				245	125	7.5	46	St. 1	460			melts	3(5)
Polymethacrylate (from filter)				90		70	48	21	30	9.4	269	(St. 2)	550			melts	5
Polymethacrylimide			45	15				105	30	9.6	125	(St. 2)	530			melts	5
Polypropylene				92		61	40	25	(30)	8.4	101	(St. 2)	410			melts	3(5)
Polypropylene	100		12					162	(200)	7.7	38	St. 1	440			melts	2(5)

PLASTICS RESINS RUBBER	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS						DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN	
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar-m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class
Polystyrene (Copolymer)			32	11				155	30	8.4	110		450			melts	
Polystyrene (Hard-foam)	30		10	5				760		8.4	23						
Polyurethane					100	90		3	<30	(7.8)	(156)						5
Polyvinylacetate (Copolymer)						83	50	20	60	8.7	86	St. 1	660			melts	2
Polyvinylalcohol				74		55	44	26	60	8.9	128	(St. 2)	460			melts	5
Polyvinylalcohol				57		29	9	56	60	8.3	83	St. 1	460			melts	5
Polyvinylchloride					100			<10	30	8.4	188						
Polyvinylchloride			48	15				125	30	7.7	68		530				340
Polyvinylchloride (Em., 97.5% PVC)				97		73	26	25	125	8.2	42		750		>2000	> 450	
Polyvinylchloride (Em., 97% PVC)				60		31	14	51	125	8.5	63		790		>2000	350	
Polyvinylchloride (Susp.)			66	23				105	125	7.7	45	St. 1	510			> 450	2
Polyvinylchloride (Susp.)			30					137	No ignition				> 800			> 450	
Urea-formaldehyde (mold.-form.)				99		91	75	13	60	10.2	136	St.1	700			390	2
Melamine-formaldehyde (mold.-form.)				93		86	70	14	60	10.2	189	St. 1	800			> 440	2
El.stat. coating powder (Epoxy)			100			70		29	30	8.9	100	(St. 2)	540			melts	2(3)
El.stat. coating powder (Polyurethane)			100			66	22	29	30	7.8	89	St. 1	490			melts	2(2)
Shellac				100		33			15	7.6	144	(St. 2)					
Wax (NN Ethylene distearamide)				100		95		10	15	8.7	269	(St. 2)					2(2)



PHARMACEUTICALS COSMETICS PESTICIDES	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN		
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm		
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class	
Acetyl salicylic acid					100				15	7.9	217	(St. 2)		550				2(5)
Amino phenazone						100	98	< 10		10.3	238		330				> 450	
Ascorbic acid, L(+)-				93	75	61	14		60	6.6	48	(St. 2)	490				melts	2(2)
Ascorbic acid				92	38	15	39		60	9.0	111	(St. 2)	460				melts	2(2)
Coffein					100				30	8.2	165	(St. 2)		> 550			melts	2(5)
Cysteine hydrate				100		98	94	< 10	125	7.4	40		420		>2000		melts	
L-Cystin				100		95	69	15	60	8.5	142		400		40		melts	
Digitalis leaves				59		42		46	250	8.5	73							
Dimethylaminophenazone						100		< 10		10.0	337							
2-Ethoxybenzamide					100				15	8.6	214	(St. 2)		490			melts	2(5)
Fungicide (Captan)			100		99	93		5	(500)			St. 1						5
Fungicide (Org. zinc comp.)						99	96	< 10	60	9.0	154		480				300	
Fungicide (Maneb)				98		97	93	< 10					380		>2500		200	
Methionine				100		99	95	< 10	30	9.4	143		390		9		melts	5
Methionine				100		98	87	< 10	30	8.7	128		390		100		melts	5
Sodium - L(+) ascorbate				97		67	45	23	60	8.4	119	St. 1	380				380	2
Paracetamole					100				15	7.9	156	(St. 2)		> 550			melts	2(5)
Pesticide				99		98	95	< 10	60	8.6	151		410				320	

INTERMEDIATE PRODUCTS AUXILIARY MATERIALS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN		
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm		
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class	
Adipinic acid				98		92	86	< 10	60	8.0	97	(St. 2)	580				melts	2(5)
Aging protective					100	67		< 32	15	8.2	256	(St. 2)						2(3)
Anthracene	89		20	7					235	15	8.7	231		600			> 450	
Anthraquinone						100		< 10		10.6	364							
Anthraquinone				100		90	75	12	30	9.1	91							
Azodicarbonamide						100		< 10		12.3	176							
Benzoic acid									(30)			(St. 2)						2(5)
Betaine hydrochloride				93		85	78	< 10	60	9.8	114	(St. 2)	400				> 450	3
Betaine monohydrate	34		4						710	60	8.2	63	St. 1	510			> 450	5
Diphenol ketylene				98		80	60	15		9.0	270							
Calcium acetate			74	41		25	17	92	500	5.2	9	St. 1	730				> 460	2
Casein				99		65	40	24	30	8.5	115		560				> 450	
Sodium caseinate (from filter)				100		99	77	17	60	8.8	117		560		740		> 450	
Carboxy methyl cellulose				97		89		< 15		9.2	184							
Carboxy methyl cellulose				50		20	12	71	125	8.9	127	St. 1	390				320	3
Methyl cellulose				96		87	30	22		10.0	157		400		12		380	
Methyl cellulose				100		69	10	29	60	10.0	152		400		105		> 450	5
Methyl cellulose				93		37	12	37	30	10.1	209		410		29		450	5

INTERMEDIATE PRODUCTS AUXILIARY MATERIALS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN		
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>		MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class	
Ethyl cellulose				66		40		40		8.1	162		(330)				275	
Chloroacetamide	98	79	33		13	3		170	(200)			St. 1						2(2)
Cyanoacrylicacid methylester	69		20					260	30	10.1	269	(St. 2)	500				> 450	5
Dicyandiamide				99		98	97	< 10		3.7	9		> 850				> 450	
1,3-Diethyldiphenyl urea				98		93	83	< 10	15	8.8	163	(St. 2)	530				melts	2(5)
1,3-Diethyldiphenyl urea	8							1300	30	8.7	116	(St. 2)	600				melts	2(5)
Dimethyl terephthalate						60		27	30	9.7	247		460		2		> 450	
Diphenyl urethane	93		49	27				128	30	8.9	218	(St. 2)	660				melts	2
Diphenyl urethane	31							1100	30	7.6	51	(St. 2)	660				melts	2
Emulgator (50% CH, 30% fat)			89	50		11		71	30	9.6	167		430		17		390	
Ferrocene			71	33				95	15	8.3	267		500		5		> 450	5
Fumaric acid	100	75	24		15	11		215	(100)			(St. 2)						5
Epoxy resin hardener				97		85	60	17	60	10.0	64		> 850				melts	2
Urea	4	2	< 1					2900				St. 1						1(2)
Hexamethylene tetramine				100		69	42	27	30	10.5	286							
Hexamethylene tetramine	100		30	9				155		10.0	224		530				melts	
Cellulose ion exchange resin								< 10	60	10.0	91	(St. 2)	410				> 450	5
Cellulose ion exchange resin				27		9		112	30	9.4	112		(350)				> 465	

INTERMEDIATE PRODUCTS AUXILIARY MATERIALS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN		
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>		MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class	
Condensation product (phenol)				92		74	50	20	15	8.2	171	(St. 2)	560				melts	2(5)
D(-)-Mannite				61		24	13	67	60	7.6	54	St. 1	460				melts	2
Melamine				98		95	88	< 10	1000	0.5	1	St. 1	> 850				> 450	2
Melamine peroxide				61		56	46	24	250	12.2	73	St. 1	> 850				380	2
Melamine phosphate					100	79		22				St.1						2
Melamine phthalate				99		89	65	16	125	8.1	52	St. 1	910				melts	2
Metal soap (Ba/Pb-stearate)					100	48			15	8.1	180	(St. 2)						2(2)
Metal soap (Zn-behenate)					100	80			15	8.1	119	(St. 2)						2(3)
Methacrylamide	42							580		8.5	113		530		180		> 450	
Naphtalene	89		66		35	12		95	15	8.5	178		660		< 1		> 450	(5)
Naphtalic acid anhydride						97	69	16	60	9.0	90		690		3		melts	
2-Naphtol				100		96	94	< 10		8.4	137		430		5		> 450	
Sodium amide									(200)			(St. 2)						2
Sodium cyclamate	97	52	13		5	2		260				St. 1						5
Sodium hydrogen cyanamide				95	90		28	8	40	125	7.0	47		460			melts	
Sodium ligno sulphonate				100		63	20		58	(200)		St. 1						2
Oil absorber (hydrophobic cellulose)				65	51		31	21	65	7.2	42		540				> 450	
Paraformaldehyde				89		65	41	23	60	9.9	178	(St. 2)	460				> 480	5

INTERMEDIATE PRODUCTS AUXILIARY MATERIALS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS						DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN	
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar-m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class
Paraformaldehyde				86		58	37	27	60	10.7	222		460			> 450	
Pectin			86	61				59	60	9.5	162		460			300	
Pectinase				91	47	20	34	60	10.6	177			510		180	> 450	3
Pentaerythrite				100	98	86	< 10	30	9.6	120			470		< 1	melts	2(5)
Pentaerythrite (from filter)			90	33		6	3	85	30	9.1	188		490		6	melts	5
Pentaerythrite	86		47	36		20	12	135	30	9.0	158				27	melts	5
Phthalic acid anhydride									(100)			(St. 2)					5
Polyethylene oxide	99	83	53		29	14		115	(30)			(St. 2)					3(5)
Polysaccharide					100	78		23	(500)			St. 1					4
Propyleneglycol alginate			57	24				115	125	8.8	82		440			450	
Salicylic acid									(30)			(St. 2)					2(5)
Saponin				93		77	65	13		9.4	150	St. 1	440			> 450	3
Lead stearate			99	96		90	80	< 10					480		< 1	melts	
Lead stearate							90	12	30	9.2	152	(St. 2)	630			melts	5
Calcium stearate				99		92	84	< 10					520		9	melts	
Calcium stearate						92	80	< 10	30	9.2	99		580		16	> 450	
Calcium stearate	100		43	25				145	30	9.2	155		550		12	> 450	
Magnesium stearate									(100)			(St. 2)					2(2)

INTERMEDIATE PRODUCTS AUXILIARY MATERIALS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS						DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN	
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar-m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class
Sodium stearate				92		87	45	22	30	8.8	123	St. 1	670			melts	2
Zinc stearate									(100)			(St. 2)					2(5)
Zinc stearate				95		86	72	13					520		5	melts	
Stearin/Lead				99		95	75	15	60	9.1	111		600		3	> 450	
Stearin/Calcium				100		89	64	16	30	9.3	133		620		25	> 450	
Stearic acid	12							1300	8	7.2	34	(St. 2)	500			melts	1(1)
Terephthalic acid dinitrile					100	78			< 30	8.8	260	(St. 2)					5
2,2-Thiodiacetic acid				48		27	18	75	30	6.5	72	St. 1	350			410	2
Thio urea	56		1					460	250	3.5	8	St. 1	440			melts	2(2)
Trimellitic anhydride	4							1250	30	6.8	33		740		>2500	melts	2(5)
Trisodium citrate	36	2	1					800				St. 1					2
Tyrosine (final product)	100		99			48		10				(St. 2)					5
Tyrosine (raw product)	99		96		91	74		15				(St. 2)					5
Viscose flock					100	94		13	(100)			St. 1					4
Tartaric acid	100	5	1					480				St. 1					2
Zinc cyanamide				99		96	94	< 10		No ignition			> 850			> 450	3
Zinc cyanamide	47	34			27	14		600		(4.8)	(53)	No. ign.					2
Zinc pyridine thione						100			(500)			St. 1					2(5)

OTHER TECHNICAL/ CHEMICAL PRODUCTS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN		
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>		MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class	
Organic dyestuff (blue)				99		98	95	<10		9.0	73			710			360	
Organic dyestuff (khaki)				86		29	11	44						690			450	
Organic dyestuff (red)								<10	50	11.2	249			520			melts	
Organic dyestuff (red)				65		33	23	52	60	9.8	237	(St. 2)		470			> 450	5
Organic dyestuff (Azo,yellow)				100		98	95	<10	60	11.0	288	(St. 2)		480			melts	2(5)
Organic dyestuff (Disp., brilliant pink)			91	73				46						610		>4000	450	
Organic dyestuff (brown)									(200)				St. 1					4
Organic dyestuff (Phthalocyanine)				96		86		<10	(200)	8.8	73	(St. 1)		770			355	4
Fuchsin base				74		45	26	36		8.4	115			640			melts	
Bituminous hydrocarbon			23	11				260	30	7.6	63			500			melts	2
Light protection agent				97		92	83	<10		8.9	214			530			> 450	
Light protection agent				100		93		<15		10.0	310							
Soap								65	30	9.1	111			580			melts	
Surfacter (Epoxy based)					100	77		24	(200)				St. 1					2
Surfacter (Polyester based)					100	85		19	(500)				St. 1					2
Washing agent (Na-sulph.)	88		14					275	30	9.0	267	(St. 2)		330			melts	5
Wax raw material (Alkylaryl sulphonate)													St. 1					5
Wax raw material (Olefin sulphonate)			60	28				105	30	8.6	115			390			> 590	

METALS ALLOYS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN		
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>		MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class	
Aluminium powder				94		88	79	<10	60	11.2	515			560			430	
Aluminium powder				98		70	45	22		12.5	400			650			270	
Aluminium powder				99		64	47	22	30	11.5	1100			500			> 450	
Aluminium powder				94		60	17	29	30	12.4	415	(St. 3)		710			> 450	4
Aluminium grit				100		96		23	30	11.0	320			850			> 450	
Aluminium grit				99		16	2	41	60	10.2	100			> 850			> 450	
Aluminium grit	92		28	6				170		No ignition				> 850			> 450	1
Aluminium shavings	80		35	20				190						620		>1800	> 450	
Aluminium shavings	79		29	17				240		No ignition				> 850			> 450	
Aluminium/Iron (50:50)				93		68	48	21	250	9.4	230			760			> 450	
Aluminium/Magnesium			47					130		10.4	52	(St. 1)		> 850			> 450	2
Aluminium/Nickel				95		86		<10		11.4	300							
Aluminium/Nickel (50:50)				37		18		90		No ignition				> 850			> 450	
Bronze powder					97	60	18	750	4.1	31		(St. 1)		390			260	4
Calcium/Aluminium (30:70)					68	46	22			11.2	420			600			> 450	6
Calcium/Silicon (from cyclone)				94		75	48	21	60	9.8	200	(St. 2)		770			> 440	1
Calcium/Silicon				87		55		28						770		145	> 450	
Iron (from dry filter)				98		82	67	12	500	5.2	50			580			> 450	

METALS ALLOYS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN		
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI- AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm		
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class	
Iron carbonyl								96	< 10	125	6.1	111	(St. 2)	310			300	3
Ferrosilicon				96		82	73	< 10	500	6.4	86		> 850				> 450	
Ferromanganese				99		97	90	< 10		6.8	84		730				> 450	
FeSiMg (22:45:26)				99		77	57	17		9.4	169		670		210		> 450	
Ferrosilicon (22:78)				97		70	47	21	125	9.2	87		> 850				> 450	
Hard metal (TiC, TiN, WC, VC, Mo)		100	95		68	40		43	(200)			St. 1						4
Co-Al-Ti (62:18:20)				92		61	41	25	500	7.4	134		730				> 450	
Magnesium				100		70		28	30	17.5	508							
Magnesium	99		1					240	500	7.0	12	(St. 2)	760				> 450	5
FeSiMg (24:47:17)				99		70	47	21		9.9	267		560		35		> 450	
Manganese (electrolyt.)				82		70	57	16		6.3	157		(330)				285	
Manganese (electrolyt.)				70		41		33		6.6	69							
Molybdenum				100		96	92	< 10	No ignition				> 850				390	
Niobium (6% Al)	87	44	24		9	3		250	(200)			St. 1						2
Silicon				99		98	97	< 10	125	10.2	126		> 850		54		> 450	3
Silicon (from filter)						100	99	< 10	60	9.5	116		> 850		250		> 450	1
Silicon (from dust extr.)				90		70	57	16	60	9.4	100		800				> 450	
Steel (100 Cr6) dust				100		74			(30)	(4.0)	(82)	(St. 2)						2

METALS ALLOYS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS		
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN		
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI- AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm		
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class	
Tantalum/Niobium				97		90	80	< 10		6.6	37		700				450	
Titanium				98		55	24	30					450				> 450	
Titanium (pre-oxidized)				77		46	26	35					380				400	
Ti/TiO <sub>2</sub> (dust deposit)	61	40	28		12	6		310	(100)			(St. 3)						5
Zinc (from zinc coating)				91		72	53	19		6.0	85	St. 1	800				> 450	2
Zinc (from zinc coating)				93		70		21	250	6.8	93		790				> 450	
Zinc (dust from collector)								99	< 10	250	6.7	125	(St. 2)	570			440	3
Zinc (dust from collector)				97		91	72	10	125	7.3	176	St. 1						2

OTHER INORGANIC PRODUCTS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS	
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN	
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> /Dicyanamide (66:34)				60		42	35	50	250	7.0	21		390			> 450	
Graphite (99.5% C)					100	97		7	< 30	5.9	71			> 600		680	1
Carbon fibres (99% C)									(100)			St. 1					2
Molybdenum disulphide				92		75	53	19	250	5.6	37	St. 1	520			320	4
Petroleum coke				93		75	59	15	125	7.6	47	St. 1	690			280	4
Petroleum coke			83	51		22	14	71	125	3.8	3		750			> 450	3
Petroleum coke (calcinated)			94	86		64	47	22	250	6.8	14		> 850			> 450	3
Phosphorus (red)				100		92	59	18		7.9	526		400			340	5
Soot							99	5	60	9.2	85		760			590	
Soot (from filter)							< 10		30	8.8	88		840			570	
Sulphur				97		85	71	12					240		< 1	250	
Sulphur				96		70	51	20	30	6.8	151	(St. 2)	280				5
Sulphur				86		23		40					330		3	270	
Sulphur			53			7		120					370		5	270	
Titanium carbide									(100)			(St. 2)					4
Titanium hydride									(200)			St. 1					2
Titanium monoxide									(200)			(St. 2)					4

OTHER MATERIALS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS	
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN	
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class
Fiyash (from electrofilter)			100		99	92		6	125	1.9	35	No.ign.					1
Ash concentrate				87		61	48	21	60	8.6	91		580			260	
Bentonite/Asphalt/Coal/ Org. (15:45:35:5)		90			55			54	(100)			St. 1					2
Bentonite/Coal (50:50)		98	86		69	41		42	(100)			St. 1					2
Bentonite der. + org. comp.				89		45	23	35	60	7.4	123		430			> 450	3
Pb and Ca stearate mixture		98			70			35	(100)			(St. 2)					2(2)
Break liner (grinding dust)				98		95	89	< 10	250	6.9	71		530			310	
Brush dust (Al-brushes)				99		74	30	25	30	11.4	360		590		< 1	450	
CaC/Diamide lime/Mg (72:18:10)		99		93		87	80	8	125	5.8	30						4
Mud from settling chamber			99	91		62	45	23	60	7.7	96		430			260	5
Dust from polishing (Al)				44	26			150		5.0	18		440			320	5
Dust from polishing (Zn)		80	35		15	2		190	(200)			St. 1		400		350	2
Dust from polishing (brass)									(100)			St. 1					4
Dust from grinding (Al)					100	85			(30)	(5.7)	(214)	(St. 2)					4
Dust from grinding (Zn)					100	67			(500)	(2.3)	(24)	St. 1		480			1
Dust from grinding (cardboard)	70	64	44		25	10		160	(100)			St. 1					5
Dust from grinding (polyester)				98		95	93	< 10	30	9.5	153		500			> 450	5
Dust from grinding (polyester)			97	84		60	41	25		9.4	237		550			> 450	5

OTHER MATERIALS	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION								IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF DUST CLOUDS							DUST LAYERS	
									1 m <sup>3</sup> or 20 l vessel			Mod. H.	G.G.	BAM	VDI	DIN	
	WEIGHT % < SIZE [µm]							MEDI-AN	C <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	K <sub>St</sub>	EXPLOS. < 63 µm	T <sub>min</sub>	MIE	Glow temp.	Flamm. <250µm	
DUST TYPE	500	250	125	71	63	32	20	µm	g/m <sup>3</sup>	bar(g)	bar·m/s	Class	°C	°C	mJ	°C	Class
Dust from grinding (Ti)	89	64	37		18	4		170	(100)			(St. 2)					2
Dust from grinding + polish. (polyester)				99		96	91	< 10					530		< 1	> 450	
Blasting dust (light metals)					100	82			15	7.6	242	(St. 2)		370		280	4
Immersion polishing agent	46							600	(30)	6.2	11	St. 1	580			340	2
Textile fibres (nat. + synth.)									(30)			St. 1					5
Toner							100	< 10	60	8.9	196			520	4	melts	
Toner							100	< 10	30	8.7	137			530	< 1	melts	5
Toner				100		96	48	21	60	8.8	134			530	< 1	melts	(3)
Toner				100		95	30	23	60	8.8	145			530	8	melts	(3)
Toner/iron powder				58		37		60	60	8.2	169			570		> 450	
Toner resin				98		78	55	18						580	< 1	> 450	(5)
Zinc stearate/Bentonite (90:10)									(100)			(St. 2)					3
Zinc stearate/Bentonite (20:80)												(St. 1)					2

## **Příklady**

1) Vypočítejte hmotnost a tloušťku vrstvy polypropylénového prachu, která by při rozvíření stačila k vytvoření výbušné směsi. Rozměry místnosti: 15 x 10 x 5 m, LEL=32g.m<sup>-3</sup>, sypná hustota  $\rho_s=5 \cdot 10^5$  g.m<sup>-3</sup>,  $k_B=1$ .

2) Vypočítejte hmotnost a tloušťku vrstvy uhelného prachu, která by při rozvíření stačila k vytvoření výbušné směsi. Rozměry místnosti: 50 x 4 x 3 m, LEL=50g.m<sup>-3</sup>, sypná hustota  $\rho_s=200$ kg.m<sup>-3</sup>,  $k_B=1$ .

3) V místnosti o rozměrech 20 x 10 x 6 m je usazen prach o hmotnosti  $m=36$  kg, vypočítejte tloušťku usazené vrstvy prachu, která by při rozvíření stačila k vytvoření výbušné směsi a dále stanovte dolní mez výbušnosti. Sypná hustota  $\rho_s=380$  kg.m<sup>-3</sup>,  $k_B=1$ .



## **Výsledky**

- 1)  $m = 24000 \text{ g} = 24 \text{ kg}$   
 $t = 0,32 \text{ mm}$
- 2)  $m = 30000 \text{ g} = 30 \text{ kg}$   
 $t = 0,75 \text{ mm}$
- 3)  $t = 0,474 \text{ mm}$

## Literatura

- [1] ČSN EN 60079-20-1 – Výbušné atmosféry – Část 20-1: Materiálové vlastnosti pro kvalifikaci plynů a par – Zkušební metody a data. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, listopad 2010. 76 s.
- [2] ČSN EN 14491 – *Ochranné systémy pro odlehčení prachu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, leden 2013. 36 s.
- [3] ČSN EN 14994 – *Ochranné systémy pro odlehčení výbuchu plynu*. Praha: Český normalizační institut, září 2007. 28 s.
- [4] ČSN EN 14797 – *Zařízení pro odlehčení výbuchu*. Praha: Český normalizační institut, srpen 2007. 28 s.
- [5] DAMEC, Jarosla. a Ladislav ŠIMANDL. *Laboratorní praktikum protivýbuchové prevence technologických procesů*, Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství 2005, 38 s. ISBN 80-86634-57-4  
Dostupné z: [http://www.fbi.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fbi/040/cs/sys/resource/PDF/protivybuchova\\_prevence.pdf](http://www.fbi.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fbi/040/cs/sys/resource/PDF/protivybuchova_prevence.pdf)
- [6] DAMEC, Jaroslav. *EDICE SPBI SPEKTRUM 8.: Protivýbuchová prevence*. Dotisk 1. vydání. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005. 188 s. ISBN 80-86111-21-0.
- [7] DAMEC, Jaroslav. *Protipožární a protivýbuchová ochrana průmyslu*. 1. vydání. Praha: Svaz požární ochrany ČSSR, 1985. 462 s.
- [8] ECKHOFF, Rolf K. *Dust explosions in the process industries*. 3rd ed. Amsterdam: Gulf Professional Publishing, c2003. ISBN 0-7506-7602-7.
- [9] IFA INSTITUT FUR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG. *GESTIS-DUST-EX* [online]. [cit. 2013-10-15]. Dostupné z: <http://staubex.ifa.dguv.de/?lang=e>
- [10] VŠCHT: *Konstanty Antoineovy rovnice*. [online]. [cit. 2014-02-15]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/fch/cz/pomucky/TabIX.pdf>