

# Výbuchové parametry par kapalin: směs etanolu a vzduchu

31.01.2018

## Explosion parameters of liquid vapors: ethanol and air

Jan Skřínský

Výzkumné energetické centrum, VŠB-TU Ostrava, 17. Listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava, Česká republika; tel. +420 597 324 931, e-mail: [jan.skrinsky@vsb.cz](mailto:jan.skrinsky@vsb.cz)

etanol

směsi

výbuchy

výbuchové charakteristiky

### Abstrakt

V tomto článku jsou prezentovány maximální výbuchový tlak,  $p_{max}$ , maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku,  $(dp/dt)_{max}$ , deflagrační index,  $K_G$ , spodní mez výbušnosti,  $LEL$ , horní mez výbušnosti,  $UEL$  a limitní koncentrace kyslíku,  $LOC$  směsi etanolu se vzduchem při počátečních teplotách 25 °C, 65 °C, 80 °C a tlaku 1 bar. Autor prezentuje hodnoty  $p_{max}$ : 9,1±0,91 bar,  $(dp/dt)_{max}$ : 388±38 bar/s,  $K_G$ : 105±11 bar·m/s,  $LEL$ : 4,0-0,2 obj. %,  $LOC / N_2$ : 8,5±0,2 obj. % ( $p_{sat}^{C_2H_5OH} = 0,078$  bar) pro 25 °C;  $p_{max}$ : 8,3±0,83 bar,  $(dp/dt)_{max}$ : 372±37 bar/s,  $K_G$ : 100±10 bar·m/s,  $LEL$ : 3,5-0,2 obj. %,  $UEL$ : 19,0±0,2 obj. %,  $LOC / N_2$ : 8,0±0,2 obj. % ( $p_{sat}^{C_2H_5OH} = 0,583$  bar) pro 65 °C;  $p_{max}$ : 8,0±0,80 bar,  $(dp/dt)_{max}$ : 259±26 bar/s,  $K_G$ : 70±7 bar·m/s,  $LEL$ : 3,0-0,2 obj. %,  $UEL$ : 23,0±0,2 obj. %,  $LOC / N_2$ : 7,5±0,2 obj. % ( $p_{sat}^{C_2H_5OH} = 1,083$  bar) pro 80 °C.

**Klíčová slova:** 0,02 m<sup>3</sup> autokláv; etanol; maximální výbuchový tlak; rychlost nárůstu výbuchového tlaku; deflagrační index; spodní mez výbušnosti; horní mez výbušnosti; limitní koncentrace kyslíku

### Abstract

The maximum explosion pressure,  $p_{max}$ , the maximum rate of explosion pressure rise,  $(dp/dt)_{max}$ , the deflagration index,  $K_G$ , lower explosion pressure,  $LEL$ , upper explosion pressure,  $UEL$  and limiting oxygen concentration,  $LOC$  of ethanol with air mixture at initial temperatures 25 °C, 65 °C, 80 °C and pressure 1 bar are presented in this article. The author presents  $p_{max}$ : 9,1±0,91 bar,  $(dp/dt)_{max}$ : 388±38 bar/s,  $K_G$ : 105±11 bar·m/s,  $LEL$ : 4,0-0,2 obj. %,  $LOC / N_2$ : 8,5±0,2 obj. % ( $p_{sat}^{C_2H_5OH} = 0,078$  bar) for 25 °C;  $p_{max}$ : 8,3±0,83 bar,  $(dp/dt)_{max}$ : 372±37 bar/s,  $K_G$ : 100±10 bar·m/s,  $LEL$ : 3,5-0,2 obj. %,  $UEL$ : 19,0±0,2 obj. %,  $LOC / N_2$ : 8,0±0,2 obj. % ( $p_{sat}^{C_2H_5OH} = 0,583$  bar) for 65 °C;  $p_{max}$ : 8,0±0,80 bar,  $(dp/dt)_{max}$ : 259±26 bar/s,  $K_G$ : 70±7 bar·m/s,  $LEL$ : 3,0-0,2 obj. %,  $UEL$ : 23,0±0,2 obj. %,  $LOC / N_2$ : 7,5±0,2 obj. % ( $p_{sat}^{C_2H_5OH} = 1,083$  bar) for 80 °C.

**Keywords:** 0,02 m<sup>3</sup> autoclave; ethanol; maximum explosion pressure; maximum rate of pressure rise; deflagration

index; lower explosion limit; upper explosion limit; limiting oxygen concentration

## 1. Úvod

### 1.1 Energetika

Jako kapalná paliva představují alkoholy a jejich směsi slibný potenciál pro snížení emisí znečišťujících látek a snížení závislosti na tradičních fosilních palivech. Výzkum naznačuje, že smíchání alkoholu s tradičními palivy má za následek lepší spalování a tím i snížení emisí sazí. Nižší alkoholy, jako je etanol, mohou být smíchány s benzinem jako oktanový zesilovač pro jejich vysoké oktanové číslo (hodnota oktanového čísla etanolu je 108,6; hodnota oktanového čísla bezolovnatého benzínu je 95 při 600 otáčkách za minutu) a proto, že mají s benzinem podobné fyzikální a chemické vlastnosti. Vůbec první návrh automobilu (Model T) poháněného směsí benzínu a čistého alkoholu navrhnul Henry Ford již v roce 1948 [1]. V minulosti však nedošlo k významnějšímu využití etanolu jako paliva vzhledem k jeho komplikované produkci a tím i vysoké ceně. V současnosti je možné etanol efektivně produkovat fermentací a destilací z biomasy např. cukrové třtiny, dřevní štěpky, kukuřice apod. a otevírá se tak možnost jeho většího využití.

### 1.2 Bezpečnost

Za standardních podmínek je etanol hořlavá kapalina s teplotou samovznícení 400 °C (EN 14522), zařazená do teplotní třídy T2 (EN 330371) a skupiny výbušnosti IIB (EN 60079-20-1). Hodnocení etanolu, jako alternativního paliva je však v současnosti omezeno na standardní podmínky. V praxi se však tato hořlavá kapalina používá za zvýšených teplot a tlaků. Tyto „reálné“ podmínky vyžadují systematický výzkum jeho bezpečnostních charakteristik za nestandardních teplot a tlaků. V této prvotní studii jsou prezentovány výbuchové charakteristiky pro posouzení rizik výbuchů směsí etanolu a vzduchu pro různé objemové koncentrace v závislosti na třech různých počátečních teplotách 25 °C, 65 °C a 80 °C.

## 2. Experimentální procedura a zařízení

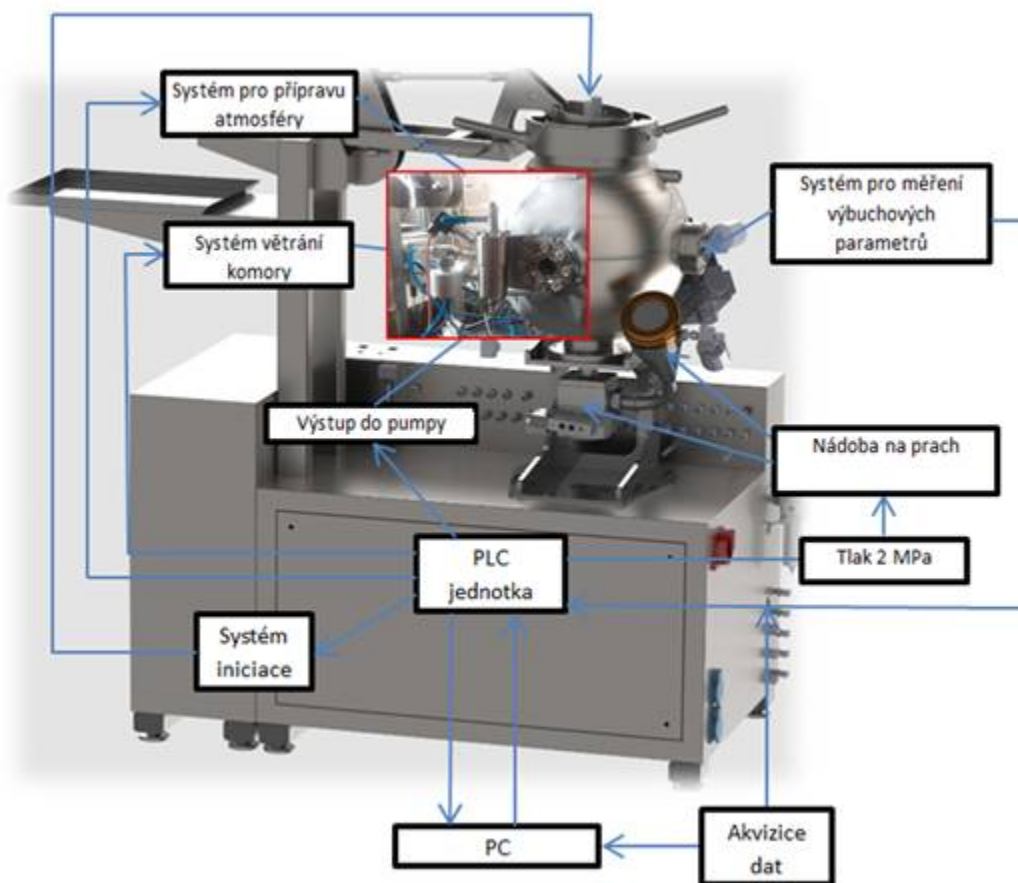
### 2.1 Experimentální procedura

Směs etanolu (Sigma Aldrich, 99,99 %) se vzduchem byla připravena metodou parciálních tlaků. Experimentální procedura se skládala ze čtyř kroků: (a) výbuchová komora byla ohřata na jednu z požadovaných teplot 25 °C, 65 °C nebo 80 °C a evakuována na 0,4 bar; (b) do komory byla nadávkována směs páry etanolu a vzduchu v různých stechiometrických poměrech a následně vzduch tak, aby celková hodnota  $p_0 = 1$  bar; (c) směs byla iniciována indukční jiskrou umístěnou ve středu komory po 3 minutách homogenizace; (d) po iniciaci byl uložen záznam časové křivky výbuchového parametru a komora vyvětrána. Pro stanovení  $p_{max}$ ,  $(dp/dt)_{max}$ ,  $K_G$ ,  $LEL$ ,  $UEL$ ,  $LOC$  není možné navrhnout jednu metodu, která by byla vhodná pro všechny tyto výbuchové charakteristiky. Z těchto praktických důvodů byla použita kombinace tří zkušebních metod pro stanovení výbuchových charakteristik detailně popsanych v EN 15967:2012 [2], EN 1839:2005 [3] a EN 14756:2007 [4].

### 2.2 Experimentální zařízení

Zkušební zařízení (OZM Research, s.r.o.) se skládá ze zkušební nádoby, zařízení pro přípravu zkušební směsi, iniciačního systému, zařízení pro měření teploty, systému pro měření tlaku, systému pro měření teploty a bezpečnostních přístrojů [5]. Zkušební nádoba je dvouplášťová nádoba z nerezové oceli (odolnost proti korozi a prvotním plynným směsím a jejich spalinám) kulového tvaru o vnitřním průměru 336 mm a objemu 0,02 m<sup>3</sup>. Tato nádoba a všechny zařízení na ní (ventily, snímače, atd.) jsou konstruovány tak, aby vydržely maximální pracovní tlak 30 barů. Zařízení pro přípravu zkušební směsi se skládá z kompresoru (Makita AC310H), měřidla pro měření podtlaku, tlakoměru a míchadla (1400 ot./min.) pro dosažení homogenní směsi (tj. rovnoměrného rozložení koncentrací a teplot).

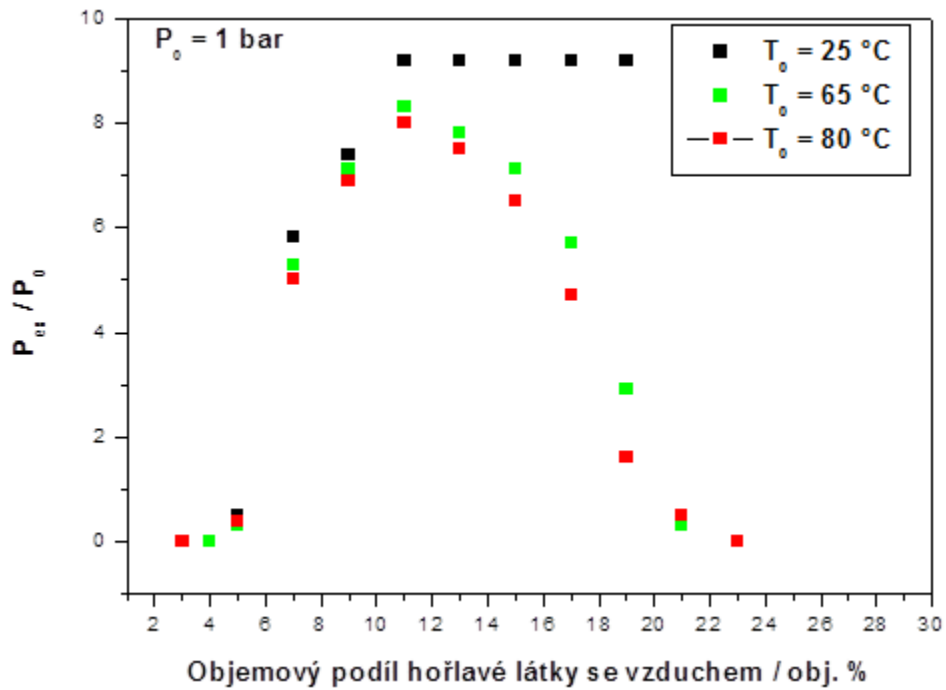
Je navrženo tak, že obsah hořlavé páry ve zkušební směsi je měřen s nejistotou měření do 2 obj. %. Pro dávkování etanolu byl použit speciální systém sestávající z dávkovací nádoby o objemu  $0,005 \text{ dm}^3$  a tlakové odolnosti 10,0 bar. Nádoba je připojena k autoklávu trubičkou zakončenou tryskou. Na této trubičce je umístěn dávkovací elektropneumatický ventil. Kapalina je do nádoby dávkována stříkačkou přes ruční kulový ventil. Po vstříknutí kapaliny do dávkovací nádoby je dávkovací nádoba natlakovaná vzduchem na tlak 5 bar. Po otevření dávkovacího ventilu je kapalina vzduchem protlačena přes trysku a rozprášena do vnitřního prostoru autoklávu, který byl předtím evakuován. Vzduch je do komory dávkován systémem sestávajícím z hlavního dávkovacího ventilu, automatického regulátoru průtoku a regulátoru tlaku. Iniciačním zdrojem je indukční jiskra o výkonu přibližně 10 W (za atmosférických podmínek) mezi dvěma elektrodami, umístěná ve středu zkušební nádoby. Pro vytváření jisker je použit vysokonapěťový transformátor připojený k napájecí síti přes časovač nastavený na požadovanou dobu výbojů (normální 0,2 s, prodloužená 0,5 s). Pro zaznamenávání teplot je použit termočlánek s odpovídajícím záznamovým zařízením. Záznam teploty je nezbytný, protože  $p_{max}$ ,  $(dp/dt)_{max}$ ,  $K_G$ ,  $LEL$ ,  $UEL$ ,  $LOC$  jsou na teplotě závislé. Systému pro měření tlaku se skládá ze snímače tlaku, zesilovače a záznamového zařízení. Výbuchový tlak je měřen pomocí dvou piezoelektrických tlakových čidel (Kistler, typ 701A). Nábojový zesilovač (Kistler, typ 5041E) má frekvenční rozsah 0-50 kHz. Záznamové zařízení (Tedia typ UDAQ-3644) má více než 12 bitové rozlišení a rychlost vzorkování 50 000 vzorků/s/kanál se šířkou pásma více než 20 kHz. Řízení autoklávu a vyhodnocení tlakových křivek bylo provedeno pomocí programu (Pm\_CA\_Unity verze 6.3). Schematické znázornění celého použitého systému je uvedeno na obr. 1.



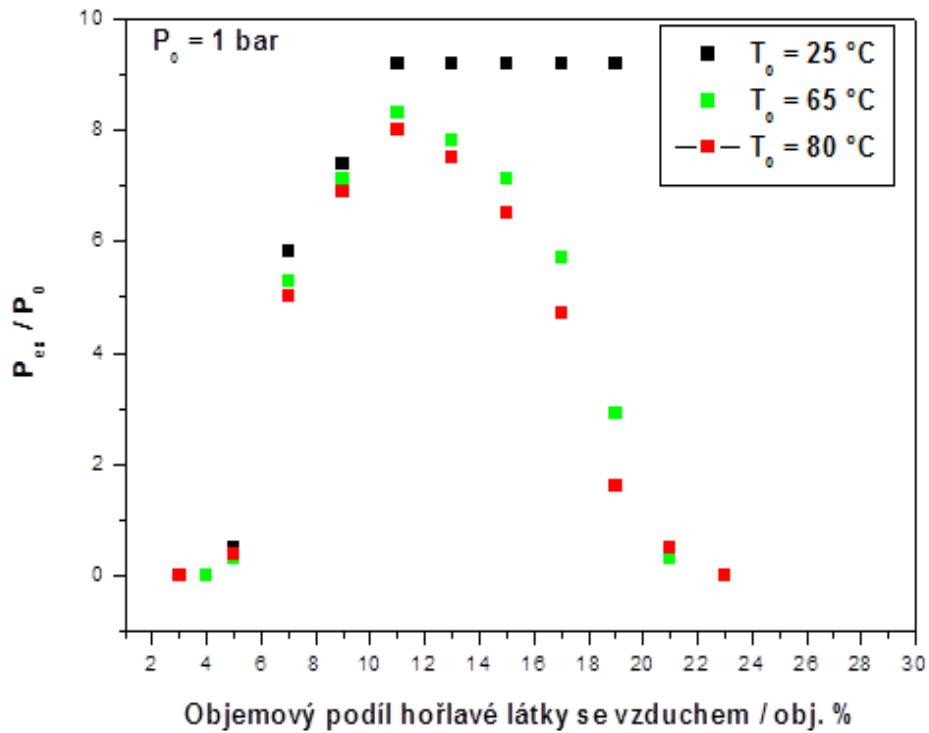
Obrázek 1: Zkušební zařízení s kulovou nádobou o vnitřním objemu  $0,020 \text{ m}^3$  [1]

### 3. Výsledky

Na Obr. 2-3 jsou uvedeny hodnoty normovaného výbuchového tlaku,  $p_{ex}/p_0$ , rychlost nárůstu výbuchového tlaku a deflagračního indexu pro počáteční tlak  $p_0 = 1$  bar a počáteční teploty  $T_0 = 25, 65$  a  $85$  °C.



**Obrázek 2: Normovaný výbuchový tlak, spodní a horní mez výbušnosti při teplotách 25 °C, 65 °C a 80 °C a tlaku 1 bar**



**Obrázek 3: Rychlost nárůstu výbuchového tlaku a deflagrační index při teplotách 25 °C, 65 °C a 80 °C a tlaku 1 bar**

Jak je vidět z obr. 2-3,  $p_{max}$ ,  $(dp/dt)_{max}$  a  $K_G$  poskytují odlišné hodnoty v závislosti na počáteční teplotě, a ukazují, jak

jsou hodnoty těchto veličin citlivé na změnu teploty. Kvantitativně, snížení počáteční teploty o 55 °C zvýší hodnoty těchto parametrů: 8,0 bar → 9,1 bar; 259 bar/s → 388 bar/s a 70 bar·m/s → 105 bar·m/s. Zvýšení počáteční teploty také zvyšuje rozsah koncentračních mezí výbušnosti: 15,5 obj. % → 20 obj. %. Horní mez výbušnosti se zvyšuje: 19 → 23 obj. % a dolní klesá: 4 → 3 obj. %. Hodnota LOC / N<sub>2</sub> se změní z: 8,5 obj. % → 7,5 obj. %. Výsledné hodnoty jsou shrnuty v Tab. 1, kde nejistoty měření jsou dány zkušební metodou.

Charakteristika	T <sub>0</sub> = 25 °C	T <sub>0</sub> = 65 °C	T <sub>0</sub> = 80 °C
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (obj. %)	11,0±0,2	11,0±0,2	11,0±0,2
p <sub>max</sub> /p <sub>0</sub> (bar)	9,1±0,91	8,3±0,83	8,0±0,80
t <sub>Pmax</sub> (ms)	72	63	61
(dp/dt) <sub>max</sub> (bar/s)	388±38	372±37	259±26
K <sub>G</sub> (bar·m/s)	105±11	100±10	70±7
LEL (obj. %)	4,0-0,2	3,5-0,2	3,0-0,2
UEL (obj. %)	nestanoveno	19,0+0,2	23,0+0,2
LOC / N <sub>2</sub> (obj. %)	8,5±0,2	8,0±0,2	7,5±0,2

**Tabulka 1: Výsledné hodnoty výbušových charakteristik při p<sub>0</sub> = 1 bar**

#### 4. Závěr

Pro různé složení směsi palivo-vzduch, při třech různých počátečních teplotách a atmosférickém tlaku byla provedena experimentální studie výbušových charakteristik směsi etanolu se vzduchem v uzavřené kulové nádobě s centrální iniciací o objemu 0,02 m<sup>3</sup>. Prezentované hodnoty výbušových charakteristik mohou být prakticky využity při projektování technik ochrany proti výbuchu, jako jsou např. konstrukce odolné výbušovému tlaku a konstrukce odolné tlakovému rázu při výbuchu, odlehčení výbuchu a potlačení výbuchu. Dále mohou být použity pro vyloučení nebezpečí výbuchu zabráněním vzniku výbušné směsi plynů a také jako základ pro ochranu proti výbuchu pomocí „inertizace“.

#### Poděkování

Tato publikace byla vypracována v rámci projektu „Inovace pro efektivitu a životní prostředí - Growth“, identifikační kód LO1403 za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I.

#### Literatura

- [1] SWARD, K. *The legend of Henry Ford*. 1st ed. New York: Rinehart; 1948.
- [2] EN 15967:2012. *Stanovení maximálního výbušového tlaku a maximální rychlosti nárůstu výbušového tlaku plynů a par*.
- [3] EN 1839:2005. *Stanovení výbušnosti plynů a par*.
- [4] EN 14756:2007. *Stanovení mezní koncentrace kyslíku pro hořlavé plyny a páry*.
- [5] *Výbušová komora CA 20-L pro měření výbušových parametrů prachových disperzí, plynů a par za standardních i zvýšených teplot: uživatelský manuál pro instalaci, provoz, údržbu a odstraňování problémů: ver. 2 (21. leden 2016)*

. OZM Research, s.r.o. Dostupný na vyžádání z: <http://www.ozm.cz/en/>.

### **Vzorová citace**

SKŘÍNSKÝ, Jan. Výbuchové parametry par kapalin: směs etanolu a vzduchu. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online]. 2017, roč. 10, č. 3-4. Dostupný z: <http://www.bozpinfo.cz/josra/vybuchove-parametry-par-kapalin-smes-etanolu-vzduchu>. ISSN 1803-3687.

---

Autor článku:

[Ing. Jan Skřínský, Ph.D.](#)