


Výbuchové charakteristiky energoplynu

 30.12.2020

Explosion characteristics of energogas

Jan Skřínský, Jan Koloničný, Karel Borovec, Jakub Čespiva, Oleksandr Molchanov, Aleš Richter

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

plyn

výbuchový tlak

výbuchy plynu

predikce

Abstrakt

Výzkumné energetické centrum disponuje technologiemi a experimentálním vybavením nejenom k přípravě, ale i studiu výbuchových charakteristik energoplynu. Tato kombinace umožňuje unikátní studium tohoto nebezpečného paliva za reálných podmínek, při kterých se v technologii vyskytuje. Dílčí cíl zahrnuje provedení série experimentálních simulací při vybraných typických provozních režimech za účelem získání provozních charakteristik a vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů na bezpečnost provozu jednotky. Bude zahrnovat bezpečnost provozu a stanovení požárně technických charakteristik. Výsledky bilancí mohou být využity i jinými komerčně či experimentálně využívanými zplyňovacími jednotkami.

Klíčová slova: plyn, výbuchový tlak, predikce maximálního výbuchového tlaku, rychlost nárůstu výbuchového tlaku, deflagrační index, čas do dosažení maxima výbuchového tlaku, laminární rychlost hoření

Abstract

The Energy Research Center has technologies and experimental equipment not only for the preparation but also for the study of explosion characteristics of energogas. This combination allows the unique study of this hazardous fuel under the real conditions under which it occurs in technology. The partial goal includes performing a series of experimental simulations in selected typical operating modes in order to obtain operating characteristics and evaluate the influence of individual parameters on the safety of unit operation. It will include operational safety and determination of fire technical characteristics. The results of the balances can also be used by other commercially or experimentally used gasification units.

Keywords: gas, explosion pressure, maximum explosion pressure prediction, maximum rate of pressure rise, deflagration index, time to reach the maximum explosion pressure, laminar burning velocity

1. Úvod

Vzhledem k teprve nedávnému rozvoji technologií zplyňování existuje velice omezený počet studií zabývajících se nebezpečnými vlastnostmi energoplynu. Během posledních 5 let byl publikován velmi omezený počet teoretických a experimentálních studií, který můžeme v literatuře nalézt také pod pojmem „energogas“, „syngas“, „synthetic gas“ nebo „bio syngas“. V letech 2019-2020 byl prováděn, experimentální výzkum explozivního chování směsi syntetického plynu, vznikajícího při procesu zplyňování dřeva, se vzduchem. Měření probíhalo v uzavřené výbuchové komoře a atmosférickém tlaku. Zjišťovány byly hodnoty maximálního výbuchového tlaku p_{\max} , maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku $(dp/dt)_{\max}$ a deflagračního indexu K_G . Před samotným měřením byly pro stanovení specifických poměrů paliva se vzduchem, a tedy pro snížení počtu experimentálních měření provedeny dvě analýzy. Termodynamická, ve které byl použitím programu GASEQ stanoven adiabatický, resp. maximální teoretický výbuchový tlak p_{ad} , pro různé poměry paliva se vzduchem, a kinetická, ve které byla pomocí softwaru CHEMKIN vypočítána laminární rychlost hoření S_L . Dále bylo popsáno studium výbuchového charakteristik směsí syntetického plynu se vzduchem s obsahem vlhkosti. Experimentálně byly studovány výbuchové parametry, jmenovitě maximální výbuchový tlak, p_{\max} , doba do dosažení výbuchového tlaku, t_{exp} , maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku, $(dp/dt)_{\max}$ a deflagrační index, K_G . Dále byl vyhodnocován vliv stechiometrického poměru ϕ , počáteční teploty T_0 , poměru oxidu uhelnatého s vodíkem ve složení testovaného paliva a ředícího poměru vody na tyto parametry, které jsou důležité pro vyhodnocení nebezpečí výbuchu. Měření probíhalo při počátečním tlaku $p_0 = 1\text{bar}$, počátečních teplotách $T_0 = 373\text{ K}$, 423 K a 473 K , molárním zlomku oxidu uhelnatého $X_{\text{CO}} = 0,5 - 0,95$ a poměru vody 10 %, 20% a 30 % v palivu. Na základě měření bylo zjištěno, že se zvyšujícím se stechiometrickým poměrem se snižuje hodnota výbuchového tlaku směsi, čas jeho dosažení a zvyšuje se laminární rychlost plamene. Se zvyšováním poměru oxidu uhelnatého a vodíku se maximální výbuchový tlak příliš nemění, ale dochází ke zvýšení času do dosažení výbuchového tlaku a snížení laminární rychlosti hoření. V závislosti na zvyšující se počáteční teplotě klesá maximální výbuchový tlak, rychlost nárůstu výbuchového tlaku, deflagrační index a čas do dosažení výbuchového tlaku, ale laminární rychlost hoření stoupá. Menší část výzkumu byla věnována experimentům za účelem zkoumání výbuchového charakteristik stechiometrické směsi syntetického plynu o objemových podílech vodíku 10 % - 90 %. Vývoj výbuchového tlaku byl zaznamenán v různých turbulentních podmínkách s turbulentní intenzitou $rms = 0 - 1,309\text{ m/s}$. Z křivek výbuchového tlaku byl stanoven maximální výbuchový tlak p_{\max} , čas do dosažení výbuchového tlaku t_{exp} a čas zpoždění výbuchu t_{zp} , což je doba, za kterou se od momentu iniciace rozšíří tlaková vlna od středu experimentální nádoby k její stěně. Dále byla odvozena rychlost nárůstu výbuchového tlaku a doba do dosažení výbuchového tlaku. Cílem práce bylo také sestavení empirického vzorce pro deflagrační index v závislosti na turbulenci a přidavku vodíku. Z prováděných experimentů vyplývá, že se zvýšením objemového procenta vodíku ve směsi, nebo se zvýšením intenzity turbulencí, se zvyšuje maximální výbuchový tlak a rychlost nárůstu výbuchového tlaku. Se zvyšováním objemového podílu vodíku klesá jak čas zpoždění výbuchu, tak čas do dosažení výbuchového tlaku.

Hlavním výbuchovým parametrem reálného plynu v uzavřené nádobě je především maximální výbuchový tlak. Pro jeho zjištění je zapotřebí u takto složitého paliva, provést velké množství zkoušek a komplikovaných výpočtů. Jednoduché hodnocení stechiometrického poměru palivo-vzduch totiž nemusí nutně znamenat zjištění maximálních hodnot. Proto je nutné změřit širokou škálu koncentrací kolem stechiometrického poměru.

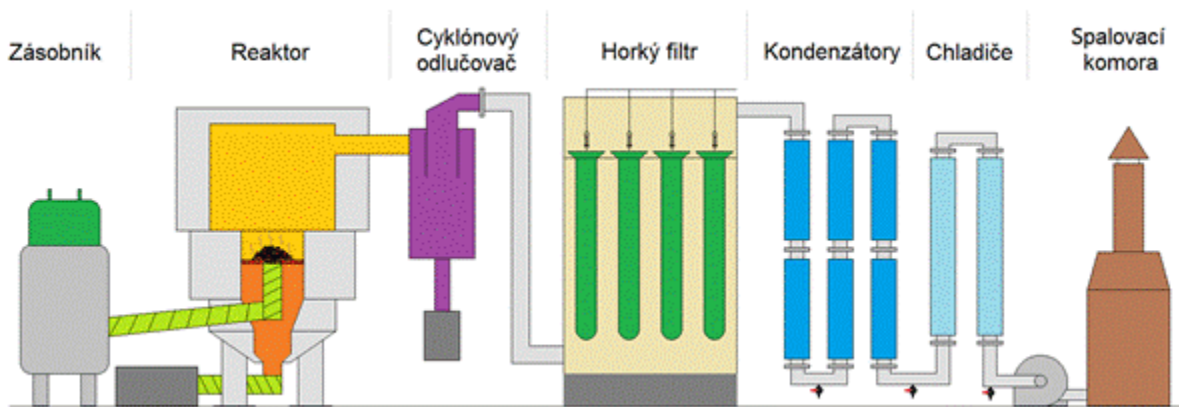
2. Experiment

2.1 Příprava vzorku

Technologie zplyňování sestává z řady komponentů tvořících technologický celek, jehož primární funkcí je konverze

tuhého paliva na energeticky vydatný syntézní plyn. Zplyňování probíhá jako výrazně pod stechiometrický proces spalování, kdy k rozpadu hořlavých složek paliva dochází především vlivem vysoké teploty, která běžně překračuje 750 °C.

Palivem pro tento proces bývá především materiál na bázi dřevní biomasy ve formě pelet, ale i jiné zdroje, jako například palivo ze separovaného odpadu, nebo torifikovaná biomasa. Doprava paliva ze zásobníku do zplyňovacího reaktoru je realizována sestavou synchronizovaných, šnekových dopravníků. Výsledkem vratných, termochemických, oxidačních a redukčních reakcí v roštové oblasti a nad jádrem reaktoru je plyn s výhřevností 4- 7 MJ•m⁻³. Cennými složkami tohoto plynu jsou CO a H₂, které tvoří podstatnou část jeho energetické hodnoty a můžou po vyčištění a extrakci tvořit takzvaný syntetický plyn s výhřevností cca 12 MJ•m⁻³.



Obrázek 1 - Aktuální schéma zplyňovací technologie

Pro přehled o kvalitě zplyňovacího procesu byl na konci uskutečněn další synchronizovaný odběr čistého plynu, který byl zaveden do plynového analyzátoru Pollutek 3000p. Na analyzátoru bylo měřeno online reálné složení plynu. Uvedené hodnoty v Tabulce 2 vypovídají o aktuálním průměrném molekulární složení plynu v době realizace všech odběrů. Zahrnuta je také míra výhřevnosti plynu Q_1 . Odchylka hodnot v intervalu odběrů je $\pm 0,5\%$.

CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	Q ₁
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[MJ/M ³]
15,4	5,8	5,1	10,8	1,6	61,3	4,4

Tabulka 2 - Složení vyrobeného energoplynu v čistém stavu

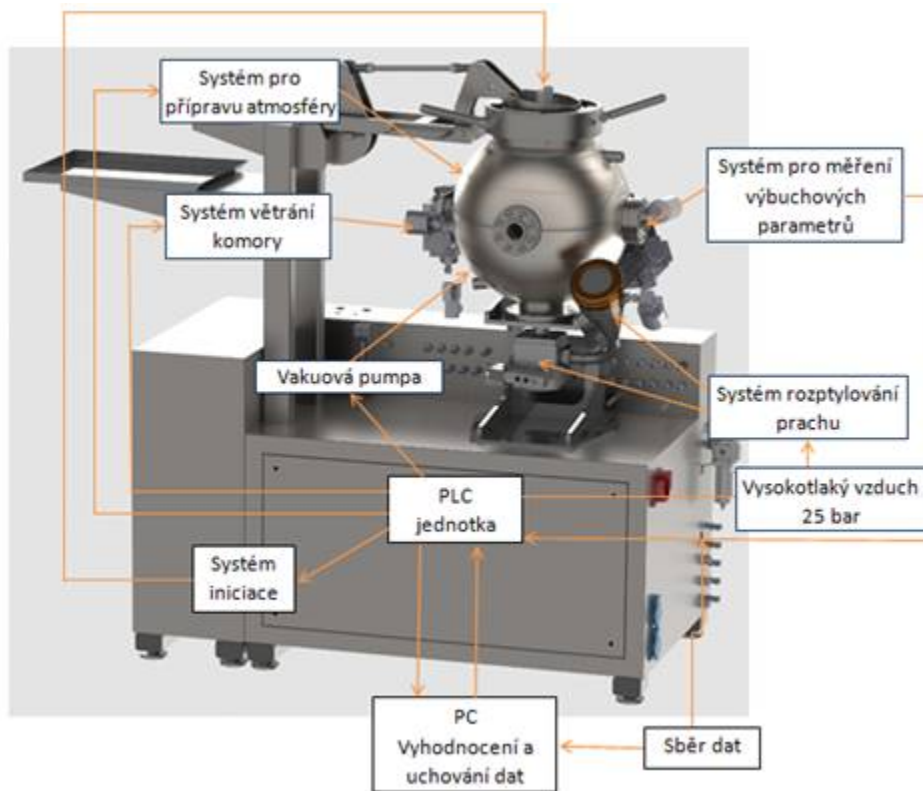
2.2 Stanovení výbuchových charakteristik

Pro experimentální stanovení výbuchových charakteristik energoplynu a vodíku, který tento plyn obsahuje, byla použita výbuchová komora CA 20-L od společnosti OZM Research s.r.o., která vyhovuje požadavkům českých technických norem ČSN EN 1839:2013 [1] a ČSN EN 15967:2012 [2]. Tělo výbuchové komory je tvořeno kulovou dvouplášťovou nádobou z nerezové oceli, o vnitřním průměru 0,362 m a objemu přibližně 0,02 m³. Nádoba je také vybavena skleněným otvorem, umožňujícím snadné pozorování dějů uvnitř autoklávy. Použitý materiál a součásti autoklávy vyhovují použití zařízení pro experimenty za atmosférického tlaku a počáteční teploty do 160 °C a maximálního provozního tlaku autoklávy 3 MPa.

Atmosféru uvnitř autoklávy je nutné homogenizovat z důvodů rovnoměrného rozložení koncentrací a teplot, a to jak při

přípravě směsí plynů a par s oksylichovadlem, tak při ohřevu. Proto je autokláv vybaven míchadlem, které je poháněno elektromotorem s možností homogenizace 1400 ot./min. Ohřev autoklávu je realizován pomocí teplotního regulačního systému Presto A30 vyráběného společností Julabo. Tyto systémy jsou využívány pro extrémně rychlý ohřev a chlazení vnějších systémů. [3].

Iniciace směsi je realizována pomocí série indukčních jisker mezi dvěma elektrodami z wolframu, které jsou umístěny ve středu nádoby a musí tvořit hroty s průměrem maximálně 4 mm a úhlem špiček 60°. Vzdálenost mezi špičkami musí být $5,0 \pm 0,1$ mm. Pro vytváření 50 J zápalných jisker se používá vysokonapěťový transformátor s efektivní hodnotou napětí 10 kV a zkratovým proudem 40 mA. Primární vinutí vysokonapěťového transformátoru musí být připojeno k napájecí síti přes časovač nastavený na požadovanou dobu výbojů. Doba výbojů musí být nastavena na 0,2 s. Pokud tato doba výbojů nevede k zapálení zkušební směsi, může být zkouška opakována s dobou výbojů prodlouženou na 0,5 s [3].



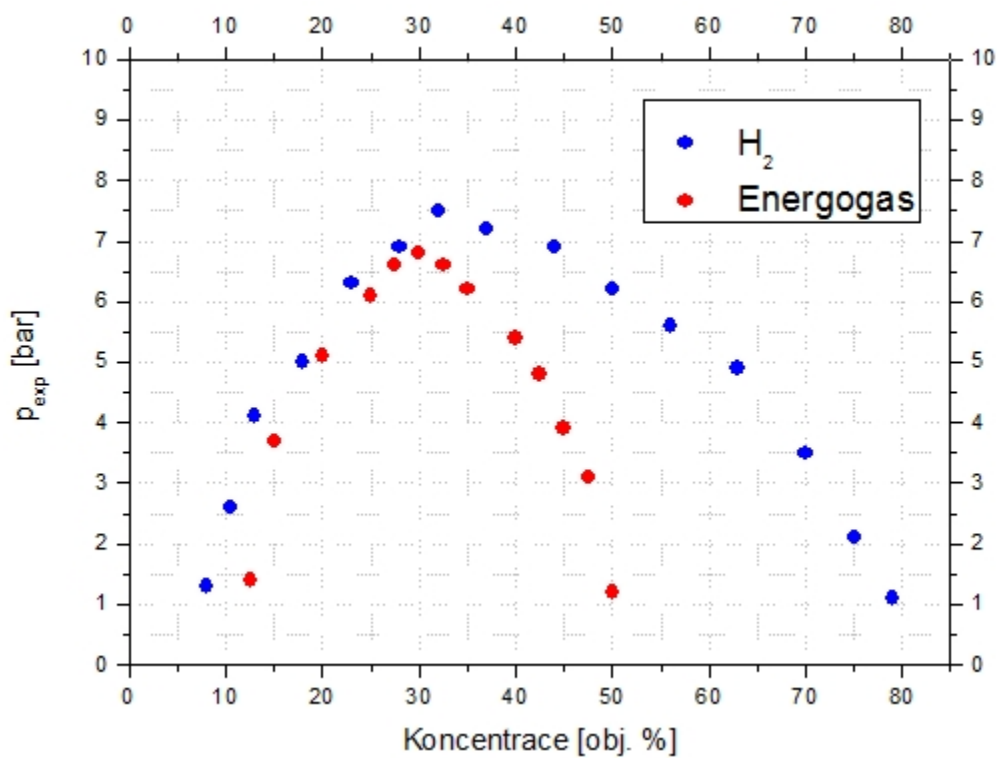
Obrázek 2 - Schéma zkušebního zařízení

3. Výsledky

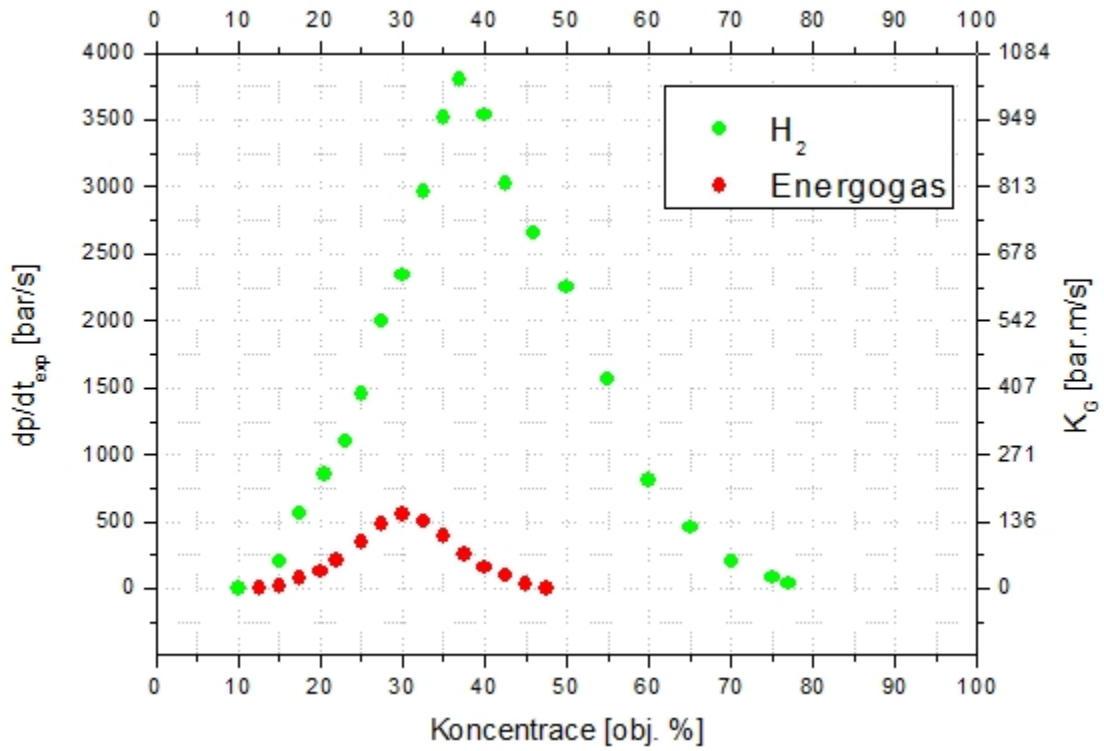
Obr. 3a ilustruje naměřený výbuchový tlak p_{exp} vybraných směsí energoplynu se vzduchem, při počátečním tlaku $p_0 = 1$ bar v závislosti na zvyšující se koncentraci. Z tohoto obrázku je patrné, že se zvyšující se koncentrací se od dolní hranice výbušnosti naměřené hodnoty výbuchového tlaku zvyšují až do okamžiku dosažení maximální hodnoty při stechiometrické koncentraci, a poté až do doby dosažení horní hranice výbušnosti tyto hodnoty klesají.

Z obr. 3a dále vyplývá, že největší výbuchový tlak byl naměřen pro směs energoplyn-vzduch ($p_{\max} = 6,9$ bar, při koncentraci 30,0 obj. %) s rozsahem výbušnosti od 12,5 obj. % do 50,0 obj. %. Jako referenční směs byl použit hořlavý soubor vodík-vzduch. Z provedených měření bylo zjištěno, že z uvedených směsí má tato směs rozsah výbušnosti od 10,0 obj. % do 77,0 obj. %. Nejmenší maximální výbuchový tlak energoplynu byl zjištěn u směsi reálný plyn-vzduch ($p_{\max} = 6,8$ bar, při koncentraci 30,0 obj. %) s rozsahem výbušnosti od 12,5 obj. % do 47,5 obj. %.

Na Obrázku 3b je znázorněna koncentrační závislost rychlosti nárůstu výbuchového tlaku $(dp/dt)_{\text{exp}}$ a deflagračního indexu KG směsí vodík-vzduch a energoplynu se vzduchem při počátečním tlaku $p_0 = 1$ bar. Hodnoty rychlosti nárůstu výbuchového tlaku $(dp/dt)_{\text{exp}}$ a deflagračního indexu KG se od dolní hranice výbušnosti zvyšují se zvyšující se koncentrací, dokud není dosaženo koncentrace stechiometrické, kde mají tyto hodnoty své maximum. Poté dochází k jejich poklesu, až do dosažení horní hranice výbušnosti. Z obr. 3b je zřejmé, že nejvyšších hodnot $((dp/dt)_{\max} = 3819$ bar/s a $KG = 1035$ bar.m/s, při koncentraci 36,0 obj. %) dosahuje směs vodík-vzduch. Studovaná směs energoplyn-vzduch dosahuje hodnot $(dp/dt)_{\max} = 544$ bar/s a $KG = 147$ bar.m/s, při koncentraci 30,0 obj. %.



a)



b)

Obrázek 3. a) p_{exp} a b) $(dp/dt)_{exp}$ a K_G v závislosti na koncentraci

Na základě hodnoty maximální rychlosti nárůstu tlaku přepočtenou na objem 1 m^3 , parametr $K_G = 1035 \text{ bar.m/s}$, lze zkoušený energoplyn zařadit do třídy G3 ($300+ \text{ bar(g).m/s}$).

4. Závěr

Proces zplyňování představuje riziko výbuchu od spuštění technologie až po její odstavení. Důvodem je, že koncentrace uměle vyrobeného plynu se po celou dobu pohybuje v rozsahu jeho výbušnosti. Iničiaci pak mohou vyvolat jiskry ve vrstvě dřeva nebo styk s horkým povrchem při jakékoli netěsnosti a jeho styku se vzduchem. Problémy s bezpečností tohoto plynu představuje především přítomnost vodíku a oxidu uhelnatého. Ačkoliv lehký vodík i oxid uhelnatý při úniku plynu do atmosféry nepředstavují vysoké nebezpečí, případný únik v uzavřeném nebo polouzavřeném prostoru zplyňovací technologie je extrémně nebezpečný. Oba plyny mají široký rozsah výbušnosti ve směsi se vzduchem a oxid uhelnatý je navíc vysoce toxický. Proto je znalost základních výbuchových charakteristik tolik potřebná k určení bezpečných pracovních podmínek a konstrukce větracích otvorů. Při studiích prováděných v minulosti byl reálný plyn často nahrazován simulovaným, který obsahoval pouze tyto dvě složky bez nečistot, z důvodu dosažení vyššího tepla a výkonu. Pozornost byla tedy zaměřována spíše na tento simulovaný plyn, než na plyn reálný. Avšak právě tyto karbonizované plyny jsou z hlediska studovaných výbuchových charakteristik a jejich chování klíčové. Kromě toho je pro zajištění bezpečnosti a zmírnění případného výbuchu potřeba znát výbuchové charakteristiky vznikajícího reálného plynu při reálných podmínkách. Cílem článku bylo experimentálně stanovit hodnoty výbuchových charakteristik reálného plynu (komplikovaná směs několika plynů) vyrobeného využitím zplyňovací technologie na VEC, VŠB-TU Ostrava. Výbuchové charakteristiky byly stanoveny pomocí 20-L výbuchové komory. Systém komory byl upraven pro potřeby měření o nadstavbu umožňující dávkování reálné směsi z vaků přímo do otápěného autoklávu. Za daných podmínek se jedná o unikátní experiment ve světovém měřítku. Budoucí směry navazující na výsledky práce je upravit metodiku pro možnost odběru většího množství plynu a provést odběry a analýzu plynu v nejrizikovějších režimech, tj. najíždění a odstavování technologie.

5. Poděkování

Tato práce byla vypracována v rámci specifického výzkumu SP 2020/113.

6. Použitá literatura

- [1] ČSN EN 1839. *Stanovení mezí výbušnosti a mezní koncentrace kyslíku (LOC) pro hořlavé plyny a páry*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [2] ČSN EN 15967. *Stanovení maximálního výbuchového tlaku a maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku plynů a par*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [3] *Výbuchová komora CA 20-L pro měření výbuchových parametrů prachových disperzí, plynů a par za standardních i zvýšených teplot - Uživatelský manuál pro instalaci, provoz, údržbu a odstraňování problémů: ver. 2*. OZM Research, 21. leden 2016. Dostupný na vyžádání z: <http://www.ozm.cz/en/>.

Vzorová citace

SKŘÍNSKÝ, Jan. Výbuchové charakteristiky energoplynu. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online]. 2020, roč. 13, č. 4. Dostupný z: <https://www.bozpinfo.cz/josra/vybuchove-charakteristiky-energoplynu>. ISSN 1803-3687.

Autor článku:

[Ing. Jan Skřínský, Ph.D.](#)

[Ing. Jan Koloničný, Ph.D.](#)

[Ing. Karel Borovec, Ph.D.](#)

[Ing. Jakub Čespiva](#)

[Ing. Oleksandr Molchanov](#)

[Ing. Aleš Richter](#)