

OBECNÉ METODY HODNOCENÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ PALIV

Martin Staš, Hugo Kittel, Lukáš Matějovský, Lukáš Kejla, Pavel Šimáček

Ústav technologie ropy a alternativních paliv, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha, Martin.Stas@vscht.cz

Tento článek je dalším ze série článků zaměřených na představení obecných metod pro hodnocení konvenčních i alternativních paliv. V textu je uveden přehled fyzikálních vlastností stanovovaných pro kapalná a plynná paliva. Dále jsou prezentovány metody pro stanovení těchto vlastností. Diskutován je také význam jednotlivých stanovení. Důraz je kladen zejména na normované parametry a zkoušky, ale v některých případech jsou popisované i zkoušky, které příslušnými normami nejsou požadované. Hlavním cílem článku je poskytnout ucelený přehled toho, které fyzikální vlastnosti se sledují u jednotlivých paliv, proč se tyto vlastnosti sledují a jaké metody se k tomuto účelu používají.

Klíčová slova: konvenční paliva, alternativní paliva, fyzikální vlastnosti, hustota, viskozita, destilace, tlak par, bod vzplanutí, spalné teplo a výhřevnost, mazivost, nízkoteplotní vlastnosti

Došlo 19. 07. 2023, přijato 19. 09. 2023

1. Úvod

Analýza paliv nebo palivových frakcí je nepostradatelná jak pro monitorování surovin, výrobního procesu, tak pro hodnocení již vyrobených paliv. U konvenčních i alternativních paliv se sleduje řada fyzikálních a chemických vlastností, které se používají ke kvalitativnímu hodnocení těchto paliv. V tomto článku představujeme přehled fyzikálních vlastností, které se sledují u kapalných a plynných konvenčních i alternativních paliv. Jedná se o hustotu, viskozitu, destilační charakteristiky, tlak par, bod vzplanutí, spalné teplo a výhřevnost, mazivost a nízkoteplotní vlastnosti. Prezентujeme také metody používané ke stanovení těchto fyzikálních vlastností a rovněž důvody jejich sledování v jednotlivých palivech. Důraz je kladen na parametry a zkoušky předepsané příslušnými normami kvality paliv. V menší míře jsou však diskutovány i parametry a alternativní metody, které nejsou pro příslušná paliva předepsané žádnou normou. I když některé ze zde popisovaných metod jsou použitelné i pro hodnocení tuhých paliv, tak analýza tuhých paliv je mimo primární zaměření tohoto článku.

2. Hustota

2.1. Hustota paliv

Hustota vyjadřuje hmotnost objemové jednotky látky.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

V této rovnici ρ představuje hustotu v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, m je hmotnost v kg a V je objem v m^3 .

Hodnota hustoty souvisí se složením paliva. U uhlovodíků stejné molekulové hmotnosti roste hustota v následovném pořadí: alkany, alkeny, cykloalkany, aromáty. Hustota rovněž roste s rostoucí molekulovou hmotností, resp. s bodem varu. Z hodnoty hustoty proto lze u uhlovodíkových paliv provést hrubý odhad jejich složení. Jestliže má směs uhlovodíků nízkou hustotu, jedná se buď o směs s vyšším obsahem nízkovroucích podílů

nebo alkanických uhlovodíků, příp. kombinace obojího [1]. Velká hustota obvykle značí přítomnost těžších a/nebo cykloalkanických či aromatických podílů [1].

Hodnota hustoty je závislá na teplotě, proto při údajích o hustotě musí být vždy uvedena teplota měření. U kapalných paliv se uvádí hustota obvykle při $15\text{ }^\circ\text{C}$. S rostoucí teplotou hustota klesá, přičemž tento pokles je větší u lehčích frakcí než u frakcí těžších [2]. Rovněž tak je pokles větší u cykloalkanických a aromatických frakcí než u frakcí alkanických se stejným bodem varu [2].

Hustota představuje základní parametr pro výpočet indexů používaných v rafineriích pro charakterizování uhlovodíkových frakcí, jakými jsou např. Watsonův/UOP charakterizační faktor K_w nebo Bureau of Mines Correlation Index (BMCI). Hustota se také používá např. pro vzájemný přepočítání kinematické a dynamické viskozity a pro výpočet cetanového indexu motorové nafty. Pro bilanční účely se v rafineriích hustota vždy přepočítává na hodnotu při $15\text{ }^\circ\text{C}$. Hustota představuje důležitý parametr při obchodování s pohonnými hmotami. Pokud je distribuitori pohonných hmot nakupují v tunách a prodávají v litrech, pak čím nižší je hustota nakoupeného paliva, tím vyšší je prodej v litrech. Spotřebitel ale v jednotce objemu paliva získá méně energie. Hustota paliva nakupovaného na čerpací stanici také závisí na teplotě ve výdejní, nejčastěji podzemní nádrži. Určité rozmezí hustoty paliva je pak důležité pro správnou funkci palivového systému a motoru. Přehled hustot konvenčních i alternativních motorových paliv je uveden v tab. 1.

2.2. Stanovení hustoty

Pro stanovení hustoty je pro paliva uvedena v tab. 1 předepsané stanovení hustoměrem (ČSN EN ISO 3675) [3] anebo v U-trubicí (ČSN EN 12185) [4].

2.2.1 Stanovení hustoty ponorným hustoměrem

Měření hustoměrem je založeno na vztlaku tělesa (hustoměru) plovoucího v měřené kapalině. Hloubka ponoru hustoměru je nepřímo úměrná hustotě měřené kapaliny.

Tab. 1 Hodnoty hustoty při 15 °C předepsané příslušnými normami pro kapalná paliva

Tab. 1 Density Values at 15 °C Prescribed by Relevant Standards for Liquid Fuels

| Palivo | Hustota (kg·m ⁻³) | ČSN EN ISO (ASTM) | Typ metody |
|---------|-------------------------------|--------------------|-----------------------|
| E5, E10 | 720–775 | 3675 12185 | hustoměr U-trubice |
| E85 | 755–800 | | |
| E95 | <808,4 (20 °C) | 12185 | U-trubice |
| Jet A-1 | 775–840 | (D1298) (D4052) | hustoměr U-trubice |
| PMN | 765–800 780–810 | | |
| B7, B10 | 820–845 | | |
| B20 | 820–860 | 3675 | hustoměr |
| B30 | 825–865 | 12185 | U-trubice |
| SMN 30 | 820–860 | | |
| FAME | 860–900 | | |
| ŘO | 900–930 | | |

Hustota se odečítá na stupnici. Rozsah jednoho hustoměru je omezený a je proto potřeba mít k dispozici hustoměr, resp. sadu hustoměrů s odpovídajícím rozsahem.

Stanovení hustoty paliv hustoměrem se provádí dle normy ČSN EN ISO 3675 [3]. Vzorek vytemperovaný na teplotu měření se přenesení do válce hustoměru vytemperovaného na přibližně stejnou teplotu. Vytemperovaný hustoměr se ponoří do vzorku a po dosažení teplotní rovnováhy se odečte hodnota na stupnici hustoměru a teplota vzorku. Aby bylo zamezeno nadměrnému kolísání teplot, může být válec s obsahem umístěn do temperované lázně [3].

2.2.2 Stanovení hustoty v hustoměru s U-trubicí

Stanovení dle ČSN EN 12185 [4] probíhá v temperované křemenné U-trubicí o konstantním objemu. Po naplnění vzorkem se trubice rozkmitá a měří se rezonanční frekvence oscilací. Tato oscilační frekvence závisí na hmotnosti trubice, a tedy i na hustotě vzorku. Z periody oscilace přístroj podle kalibračních dat automaticky vypočítává hustotu. Stanovení se vyznačuje vysokou přesností, rychlostí, nenáročností a malou spotřebou vzorku [4].

2.2.3 Další způsoby stanovení hustoty

Z dalších způsobů stanovení hustoty se uplatňuje zejména pyknometrické stanovení. Pyknometr je nádoba určená ke stanovování hustoty kapalin, která při úplném naplnění a uzavření zábrusovou zátkou s kapilárou pojme vždy stejný, snadno reprodukovatelný objem kapaliny. Princip pyknometrického stanovení hustoty spočívá v úplném naplnění vytemperovaného pyknometru o známém objemu a známé hmotnosti stanovovaným vzorkem a jeho zvážení. Objem pyknometru se stanovuje

pomocí kapaliny o známé hustotě, nejčastěji se jedná o destilovanou vodu. Pyknometricky lze kromě kapalných neviskózních vzorků měřit i vzorky viskózní nebo polotuhé či tuhé. Ke stanovení se používá pyknometr se širokým hrdlem, např. Hubbardův pyknometr. V tomto případě se pyknometr plní vzorkem jenom částečně a po zvážení se doplňuje kapalinou, která nerozpouští vzorek, např. voda, a obsah se zváží [1,2].

3. Viskozita

3.1. Viskozita paliv

Viskozita vyjadřuje míru vnitřního tření v kapalině. Jedná se o velmi důležitou vlastnost paliva. Viskozita je značně závislá na teplotě, proto při údajích o viskozitě musí být vždy uvedena teplota měření. Se stoupající teplotou viskozita klesá u kapalin a roste u plynů. U uhlovodíkových směsí roste viskozita s molekulovou hmotností, resp. s bodem varu. U uhlovodíků stejné molekulové hmotnosti roste viskozita v následovném pořadí: alkany, alkeny, cykloalkany, aromáty [1].

V rafineriích je viskozita důležitá z hlediska manipulace s kapalinami, především zbytkovými frakcemi, s vysokou hustotou. U motorových paliv pak viskozita ovlivňuje čerpatelnost paliva, kvalitu jeho atomizace při vstřikování do spalovacího prostoru a do jisté míry i mazivostní vlastnosti, které jsou potřebné pro spolehlivou funkci palivového systému.

Tab. 2 Hodnoty kinematické viskozity při 40 °C předepsané příslušnými normami pro kapalná paliva

Tab. 2 Kinematic Viscosity Values at 40 °C Prescribed by Relevant Standards for Liquid Fuels

| Palivo | Viskozita (mm ² ·s ⁻¹) | ČSN EN (ASTM) | Typ metody |
|----------------------|---|---------------|------------|
| Jet A-1 | <8,0 (-20 °C) | (D 445) | kapilární |
| B7, B10, PMN, SMN 30 | 2,00–4,50 | ISO 3104 | kapilární |
| B20 | 2,00–4,62 | | |
| B30 | 2,00–4,65 | | |
| FAME | 3,50–5,00 | | |
| ŘO | <36,0 | | |

Hodnoty viskozit konvenčních i alternativních paliv jsou uvedeny v tab. 2. Příslušné normy předepisují pro tato paliva limitní hodnoty pro kinematickou viskozitu, zkoušení se provádí kapilární metodou popsanou v kap. 3.2.

3.2. Stanovení kinematické viskozity

Kinematická viskozita se stanovuje kapilárními nebo také výtakovými viskozimetry, např. Ubbelohde, Ostwald-Fensky, Pinkevič atd. Princip stanovení spočívá v měření doby objemového průtoku vzorku kapilárou viskozimetru za stálé teploty. Kapalina protéká kapilárou samospádem, tedy vlivem gravitace. Měří se doba průtoku vzorku mezi horní a dolní ryskou viskozimetru. Pro

dosažení požadované přesnosti měření musí být zachována určitá minimální doba průtoku, např. 200 s, proto se používají sady viskozimetrů s různým průměrem kapiláry. Kinematickou viskozitu lze měřit pouze u tzv. newtonovských kapalin. Pro neneutronovské kapaliny toto stanovení nelze použít – rychlostní gradient zde není konstantní, ale roste se vzdáleností od osy kapiláry [1].

Pro paliva uvedená v tab. 2 jsou předepsané hodnoty kinematické viskozity. Zkoušení se provádí dle normy ČSN EN ISO 3104 [5]. Hodnota kinematické viskozity se vypočítá z naměřené doby průtoku vzorku a kalibrační konstanty viskozimetru [5].

3.3. Stanovení dynamické viskozity

Dynamickou viskozitu lze stanovit výpočtem z naměřené hodnoty kinematické viskozity a hustoty vzorku podle níže uvedeného vztahu (2). Hodnotu dynamické viskozity lze rovněž stanovit experimentálně, a to metodou padající kuličky nebo rotační metodou.

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

V této rovnici v představuje kinematickou viskozitu v $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, η je dynamická viskozita v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ a ρ je hustota v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

3.3.1 Metoda padající kuličky

Měření dynamické viskozity metodou padající kuličky se provádí v tzv. kuličkových nebo tělískových viskozimetrech, které měří rychlost pádu kuličky vzorkem za stálé teploty. Měří se dynamická viskozita newtonovských kapalin a plynů. Na tomto principu pracuje Höpplerův viskozimetr. Tento typ viskozimetru měří dobu pádu kuličky v mírně nakloněné skleněné trubici opatřené ryskami a umístěné v temperovaném skleněném plášti. Viskozimetr je otočný, takže lze měření snadno a rychle opakovat. Hodnota dynamické viskozity se vypočítá z naměřené doby, za kterou urazí kulička definovanou dráhu a z kalibrační konstanty použité kuličky [1].

3.3.2 Metoda rotační

Měření dynamické viskozity rotační metodou se provádí ponorně rotačními viskozimetry. Měří se kroutící moment potřebný k rotaci vřetene různých tvarů ponořeného do vzorku. Tímto způsobem lze měřit dynamickou viskozitu newtonovských i neneutronovských kapalin. Viskozita tekutin se zde určuje z odporu, který tekutina klade otáčivému pohybu vhodně zvoleného tělesa. Obvykle se v temperované válcové nádobě s měřenou tekutinou otáčí souosý válec. Při nastavených otáčkách rotoru (je možné zvolit několik rychlostí) se měří smykové napětí pomocí deformace torzní pružiny, na které je rotor zavěšen. Kroutící moment pružiny je indikován potenciometrem umístěným přímo na hnací ose. Některé přístroje mohou pracovat v opačném módu, kdy se vkládá smykové napětí a měří se smyková rychlost [6].

4. Destilace

4.1. Destilační charakteristiky paliv

Bod varu je důležitým parametrem čistých látek. U směsí se uvádí rozmezí bodů varu nebo tzv. destilační křivka, tedy závislost teploty varu na předdestilovaném množství vzorku. Body varu rostou především s rostoucí molekulovou hmotností, ale do jisté míry závisí i na skupinovém složení uhlovodíkových směsí. Platí například, že s rostoucím větvením uhlovodíkového řetězce dochází ke snižování bodů varu. Cyklany mají vyšší bod varu než alkany se stejnou molekulovou hmotností. Bod varu je funkcí tlaku a s klesajícím tlakem body varů látek klesají [1].

Destilační křivka může zejména pro uhlovodíková paliva poskytovat informace o typu paliva nebo uhlovodíkové frakce. Na základě charakteristického průběhu destilační křivky sledovaného paliva tedy lze určit, zda se jedná o automobilový benzín, letecký petrolej, motorovou naftu, nebo jinou uhlovodíkovou frakci. Z destilační křivky lze získat informace o případném znečištění paliva cizorodou frakcí a případně také odhadnout původ tohoto znečištění. Z destilační křivky je také možné odhadnout i další parametry paliva, např. hustotu, bod vzplanutí atd. Střední bod varu, vypočítaný z destilační křivky, se používá společně s hustotou k výpočtu indexů K_w a BMCI, které jsou důležité pro charakterizaci frakcí v rafinériích. Střední destilační teplota odpovídá teplotě odtahu boční frakce z destilačních a redestilačních kolon [1].

Destilační zkouška se provádí na definovaném zařízení za definovaných podmínek. Obvykle se vyhodnocuje závislost destilační teploty varu na předdestilovaném množství paliva. Předdestilované množství se udává nejčastěji v objemových jednotkách. Z naměřené destilační křivky se odečítají hodnoty začátku a konce destilace, předdestilované množství paliva při stanovené teplotě [1].

V soustavách evropských, amerických a jiných norem lze najít několik destilačních zkoušek, které se liší typem použitého zařízení, či podmínkami stanovení. V analytice paliv se však rutinně používají pouze některé z těchto metod. Nejčastěji používané destilační zkoušky jsou uvedeny v tab. 3 a v následujících kapitolách.

4.2. Atmosférická destilační zkouška

Nejvíce používaným typem destilační zkoušky je atmosférická destilační zkouška specifikovaná v normě ČSN EN ISO 3405 [7]. Tato norma je ekvivalentem normy ASTM D86. Stanovení se provádí za atmosférického tlaku. Vzorek se zahřívá ve frakční baňce na teplotu varu. Teplota par se snímá teploměrem vsunutým do hrdla frakční baňky. Páry se odvádějí postranní trubici do chladiče, kde kondenzují a zkapávají do odměrného válce. Zaznamenává se (i) začátek destilace, (ii) teploty, při kterých předdestiluje 10, 20, 30 ... 90 obj. % vzorku, (iii) teplota konce destilace a (iv) množství destilačního zbytku. Jako začátek destilace se udává teplota, při které skápně do jímací nádoby první kapka. Jako konec destilace se pak udává nejvyšší pozorovaná teplota.

Tab. 3 Přehled nejpoužívanějších destilačních zkoušek pro zkoušení kapalných paliv a ropných frakcí

Tab. 3 Overview of the Most Commonly Used Distillation Tests for Liquid Fuels and Petroleum Fractions

| Metoda | Popis |
|--|---|
| ASTM D86 ČSN EN ISO 3405 | Atmosférická destilační zkouška ropných frakcí s bodem varu do 400 °C. |
| ASTM D1078 | Organické kapaliny s bodem varu 30–350 °C, destilace za atmosférického tlaku. |
| ASTM D2892 Křivka pravých bodů varů (TBP) | Destilace na koloně s účinností více než 15 teoretických pater. Pracuje se za atmosférického tlaku, při vyšších bodech varu již za vakua. |
| ASTM D1160 | Vakuová destilační zkouška výševroucích ropných frakcí a bionafty. |
| ASTM D5236 | Vakuová destilace výševroucích ropných frakcí s body varu nad 150 °C. |
| ČSN EN ISO 3924 Simulovaná destilace | GC-FID analýza, nepolární (100 % PDMS) kapilární kolona, kalibrace na směs n-alkanů. |

Kromě toho se u destilační zkoušky sleduje množství destilačního zbytku a ztráty, které jsou charakteristické především pro benzíny. U těch se pak sleduje nikoliv předestilované množství, nýbrž odpařené množství, které je větší právě o výše zmíněné ztráty [1,7].

Tab. 4 Destilační zkoušky předepsané příslušnými normami pro kapalná paliva

Tab. 4 Distillation Tests Prescribed by Relevant Standards for Liquid Fuels

| Palivo | Norma ČSN EN (ASTM) | Typ destilace |
|-------------------|---------------------|------------------------------|
| E5, E10 | ISO 3405 | atmosférická |
| Jet A-1 | (D86) (D2887) | atmosférická simulovaná |
| PMN | ISO 3405 ISO | atmosférická si- mulovaná |
| B7, B10, B20, B30 | 3924 | simulovaná |
| SMN 30 | ISO 3405 | atmosférická |

4.3. Vakuová destilační zkouška

Vakuová destilační zkouška se používá pro vysokovroucí ropné vzorky, u kterých hrozí při zahřívání za atmosférického tlaku termické štěpení. Získané body varu lze přepočítat na normální body varu odpovídající atmosférickému tlaku. Principiálně se provádí vakuová destilační zkouška stejným způsobem jako atmosférická destilační zkouška, rozdíl spočívá především ve sníženém tlaku. Naměřená destilační křivka se používá pro klasifikaci a charakterizaci rop (crude assays, [8]), při návrzích destilačních kolon, příp. pro kontrolu kvality frakcí [9].

Tab. 5 Destilační charakteristiky předepsané příslušnými normami pro kapalná paliva

Tab. 5 Distillation Characteristics Prescribed by Relevant Standards for Liquid Fuels

| Palivo | Destilační zkouška | Hodn. % (V/V.) |
|---|-------------------------------|------------------------|
| E5, E10 | Odpařené množství při 70 °C | 22,0–50,0 ^a |
| | Odpařené množství při 100 °C | 46,0–72,0 ^b |
| | Odpařené množství při 150 °C | >75,0 |
| | Konec destilace (°C) | <210 |
| Jet A-1 | Destilační zbytek | <2 |
| | Předestilované mn. při 210 °C | >10 |
| | Konec destilace (°C) | <300 |
| B7, B10, B20, B30, SMN 30, PMN ^c | Ztráty | <1,5 |
| | Destilační zbytek | <1,5 |
| | při 250 °C předestiluje | <65 |
| B7, B10, B20, B30, PMN ^d | při 350 °C předestiluje | >85 |
| | 95 % předestiluje při (°C) | <360 |
| | při 180 °C předestiluje | <10 |
| | při 340 °C předestiluje | >95 |

a) platí pro E5 třídy C/C1, D/D1, E/E1 a F/F1;

b) platí pro E5 a E10; c) mírné klima; d) arktické klima

4.4. Křivka pravých bodů varu

V palivářské praxi se v některých případech uplatňuje tzv. křivka nebo destilace pravých bodů varu (TBP, z angl. *true boiling point*). Příkladem takovéto destilace je např. stanovení popsané v normě ASTM D2892 [10]. Jedná se o destilaci s vyšší separační účinností než destilace popsané v kap. 4.2 a 4.3, které obvykle dosahují pouze jednoho teoretického patra. Destilace popsaná v ASTM D2892 dosahuje 15 teoretických pater. TBP destilace na rozdíl od klasických destilací s nulovými refluxními poměry, vyžaduje sofistikovanější a dražší zařízení, ale poskytuje lepší separaci a tím pádem i přesnější data [10].

4.5. Simulovaná destilace

Pro některá paliva uvedená v tab. 4 je kromě atmosférické destilační zkoušky alternativně předepsaná metoda tzv. simulované destilace. Jedná se o metodu založenou na plynové chromatografii na nepolární koloně s plamenově-ionizačním (FID) detektorem. Konverze retenčních dat na body varu se provádí pomocí kalibrační směsi n-alkanů se známými body varu. Výhodou metody je nízká spotřeba vzorku v porovnání s atmosférickou destilací, která obvykle vyžaduje až 100 mL vzorku a možnost charakterizovat uhlovodíky s bodem varu vyšším než 360 °C, což atmosférickou destilací dle kap. 5.1. není možné. Výsledky simulované destilace lze přepočítat na hodnoty ekvivalentní atmosférické destilační zkoušce (ČSN ISO 3405, resp. ASTM D86) [9].

5. Tlak par

5.1. Charakteristika

Tlak par představuje tlak, při kterém je za dané teploty v rovnováze fáze plynná s fází kapalnou nebo pevnou. V rafineriích je tlak par veličina důležitá pro stanovení provozního tlaku ve výrobním zařízení, pro způsob skladování uhlovodíkových komponent a produktů, pro kontrolu ztrát uhlovodíků do atmosféry a technologie rekuperace uhlovodíkových par při plnění automobilových a železničních cisteren [1]. Na tlak par automobilových benzinů má významný vliv přídavek alkoholů, které s ropnými uhlovodíky tvoří azeotropy s nižším bodem varu a tím zvyšující tlak par paliva [11-13].

Tab. 6 Hodnoty tlaku par pro kapalná a plynná paliva předepsané příslušnými normami (pro paliva E5, E10 a E85 odpovídají hodnoty tlaku par hodnotám DVPE, viz kap. 5.2.1)

Tab. 6 Vapor Pressure Values for Liquid and Gaseous Fuels Prescribed by Relevant Standards (for fuels E5, E10, and E85, the values refer to DVPE values, see chap. 5.2.1)

| Palivo | Norma ČSN | Tlak par (kPa) (Maximální teplota, při které musí být tlak par min. 150 kPa, °C) | | | | | | Norma ČSN EN | Typ metody |
|---------|-----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------------|------------------------------|
| | | třída A | třída B | třída C | třída D | třída E | třída F | | |
| LPG | EN 589 | (-10) | (-5) | (0) | (10) | (20) | (-) | 8973 | Výpočet ze složení |
| E5, E10 | EN 228 | 45,0–60,0 | 45,0–70,0 | 50,0–80,0 | 60,0–90,0 | 65,0–95,0 | 70,0–100,0 | 13016-1 | ASVP→DVPE |
| E85 | EN 15293 | 35,0–60,0 | 50,0–80,0 | 55,0–80,0 | >60,0 | – | – | 13016-1 13016-3 | ASVP→DVPE trojitá expanze |

5.2. Stanovení tlaku par

Ke stanovení tlaku par kapalných paliv lze použít několik metod, jejichž přehled je uveden v práci Gaspar a kol. [14]. V tomto textu se budeme zabývat pouze metodami předepsanými pro jednotlivá kapalná a plynná paliva, viz tab. 6.

5.2.1 Stanovení tlaku par vzduchem nasycených par a výpočet ekvivalentu tlaku suchých par

Stanovení tlaku par vzduchem nasycených par (ASVP) a výpočet ekvivalentu tlaku suchých par (DVPE) se provádí dle normy ČSN EN 13016-1 [15], která je ekvivalentem normy ASTM D5191. Hodnota ASVP odpovídá součtu parciálního tlaku par vzorku a parciálního tlaku par rozpuštěného vzduchu. DVPE odpovídá ekvivalentu tlaku par, který se vypočítá statickou korelační rovnicí z DVPE naměřeného suchou Reidovou metodou dle ASTM D4953. Hodnotu DVPE lze také vypočítat z hodnoty ASVP výpočtem uvedeným v normě ČSN EN 13016-1 [15].

Hlavní součástí měřicí aparatury pro stanovení tlaku par je komora, která může být buď pevná evakuovaná anebo s pohyblivým pístem pro zajištění vakua po nástřiku vzorku. Poměr par ke kapalině je 4:1. Podstata měření spočívá v ochlazení zkoušeného vzorku o známém objemu na 0–1 °C a jeho nasycení vzduchem. Takto upravený vzorek je následně nastříknut do komory temperované na 37,8 °C (100 °F). Komora je před nebo po nástřiku vzorku evakuována. Po ustálení tlaku se odečte hodnota celkového tlaku, která odpovídá ASVP. Hodnota ASVP se přepočte na DVPE [15].

V analytice paliv se jedná o důležitou charakteristiku paliva. Hodnota tlaku par se sleduje u paliv obsahujících těkavé složky, tedy u paliv benzinového typu nebo u zkapalněných ropných plynů (LPG), viz tab. 6. V příslušných normách jsou obvykle pro tlak par uvedeny sezónní limitní hodnoty, tedy hodnoty letní a zimní. Nižší hodnoty tlaku par totiž v letním období snižují riziko nadměrného odparu paliva. Naopak vyšší hodnoty tlaku par v zimním období jsou nutné pro dostatečné vypařování paliva a spolehlivý start motoru za nízkých teplot. U LPG se hodnota tlaku par koriguje poměrem C₃ a C₄ uhlovodíků ve směsi. Proto jsou v normě ČSN EN 589 specifikované sezónní limity obsahu C₃ uhlovodíků.

5.2.2 Stanovení tlaku par a výpočet ekvivalentu tlaku suchých par metodou trojitě expanze

Toto stanovení odpovídá normě ČSN EN 13016-3 [16], která je ekvivalentem normy ASTM D6378. Stanovení je jednodušší než stanovení popsané výše, protože zde odpadá nutnost úpravy vzorku [16].

Vzorek o známém objemu je nastříknut do komory se zabudovaným pístem temperované na 20 °C. Po utěsnění komory se teplota zvýší na 37,8 °C současně s první expanzí. Dále se provedou další dvě expanze do konečného zkušebního objemu, který je pětinašobkem původního objemu vzorku. Po dosažení expanze se změří celkový tlak par. Parciální tlak rozpuštěného vzduchu se vypočítá ze získaných tří hodnot tlaku. Odečtením parciálního tlaku rozpuštěného vzduchu od konečného celkového tlaku se získá hodnota tlaku par, ze které se vypočte DVPE [16].

5.2.3 Stanovení tlaku par LPG výpočtem ze složení

Tlak par se stanovuje výpočtem ze známého složení určeného metodou GC. Celkový tlak par se získá jako součet parciálních tlaků jednotlivých stanovených složek s ohledem na jejich zastoupení [17].

$$p_{vp} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p_{vp,i} \quad (3)$$

V této rovnici p_{vp} představuje tlak par směsi v kPa, $p_{vp,i}$ je tlak par čistých složek v kPa a x_i je molární zlomek složky.

6. Bod vzplanutí

6.1. Charakteristika

Bod vzplanutí je definován jako nejnižší teplota kapaliny, při které se v normovaném zařízení vytvoří taková směs par analyzované látky se vzduchem, která po přiblížení iniciačního plaménku vzplane a okamžitě zhasne [1].

V závislosti na bodu vzplanutí, resp. třídě nebezpečnosti, jsou stanoveny bezpečnostní požadavky na skladování, distribuci a použití paliv. Nižší bod vzplanutí, než je pro daný typ paliva předepsáno, představuje vždy zvýšené požárně-bezpečnostní riziko [1].

Princip měření bodu vzplanutí spočívá v postupném zahřívání vzorku v předepsané aparatuře až do dosažení bodu vzplanutí. V některých případech se provádí pouze měření typu vzplane/nevzplane při určité teplotě. Stanovení bodu vzplanutí lze provádět v uzavřeném nebo otevřeném kelímku. Hodnoty bodů vzplanutí naměřené v otevřeném kelímku jsou asi o 5–20 °C vyšší než teploty vzplanutí stanovené metodou uzavřeného kelímku [1,9].

Tab. 7 Hodnoty bodu vzplanutí předepsané příslušnými normami pro kapalná paliva

Tab. 7 Flash Point Values Prescribed by Relevant Standards for Liquid Fuels

| Palivo | Tepl. (°C) | Norma ČSN EN (ASTM) | Typ metody (kelímek) |
|-------------------------------|------------|----------------------|----------------------------------|
| E95 | >10 | ISO 13736 | Abel (uzavřený) |
| Jet A-1 | >38 | (D56) (D3828) | (uzavřený) |
| B7, B10 B20, B30 SMN 30 | >55 | ISO 2719 | P-M (uzavřený) |
| FAME | >101 | ISO 2719 ISO 3679 | P-M (uzavřený) RRM (uzavřený) |
| PMN | >55 | ISO 2719 | P-M (uzavřený) |
| ŘO | >220 | | |

P-M = Pensky-Martens, RRM = rychlá rovnovážná metoda

6.2. Stanovení bodu vzplanutí

Ke stanovení bodu vzplanutí lze použít několik metod, viz tab. 8.

6.2.1 Stanovení v uzavřeném kelímku podle Abela (Abela-Penskyho)

Stanovení je popsáno v normě ČSN EN ISO 13736 [18]. Je použitelné pro vzorky s bodem vzplanutí v rozsahu od -30 do 75 °C. Z paliv uvedených v tab. 7 je toto stanovení předepsané pro palivo E95. Podstata stanovení spočívá v zahřívání vzorku v předepsaném zařízení konstantní rychlostí za neustálého míchání. Zkušební plamínek se v pravidelných intervalech sklápí přes otvor ve víčku do prostoru kelímku za stálého míchání až do dosažení bodu vzplanutí při tlaku okolí.

Tab. 8 Metody stanovení bodu vzplanutí pro kapalná paliva

Tab. 8 Methods for Flash Point Determination of Liquid Fuels

| Rozsah teplot (°C) | Metoda | Kelímek | Norma ČSN EN | Norma ASTM |
|--------------------|--------------------|----------|--------------|------------|
| -30–75 | Abel (Abel-Pensky) | uzavřený | ISO 13736 | – |
| -30–110 | rovnovážná | | ISO 1523 | – |
| -30–300 | rychlá rovnovážná | | ISO 3736 | – |
| 40–370 | Pensky-Martens | | ISO 2719 | D93 |
| 79–400 | Cleveland otevřený | | ISO 2592 | D92 |

Zjištěná teplota se pomocí výpočetního vzorce zkorriguje na hodnotu standardního tlaku [18].

6.2.2 Stanovení v uzavřeném kelímku rovnovážnou metodou

Stanovení v uzavřeném kelímku rovnovážnou metodou je popsáno v normě ČSN EN ISO 1523 [19]. Stanovení je použitelné pro ropné frakce, rozpouštědla, barvy, laky s bodem vzplanutí od -30 do 300 °C [19]. Na stejném zařízení lze provádět měření typu vzplane/nevzplane (ČSN EN ISO 1516) [20].

Analýzovaný vzorek se umístí do zkušební kelímku umístěného v lázni temperované na požadovanou teplotu. Lázeň se pomalu zahřívá tak, aby rozdíl teplot lázně a vzorku v průběhu měření nepřekročil 2 °C a teplota lázně nerostla o víc než 0,5 °C/1,5 min. Zaznamenává se teplota, při které dojde ke vzplanutí vzorku [19].

6.2.3 Stanovení v uzavřeném kelímku rychlou rovnovážnou metodou

Toto stanovení je popsáno v normě ČSN EN ISO 3679 [21]. Je použitelné pro vzorky FAME, ropné frakce, rozpouštědla, barvy, laky s bodem vzplanutí v rozsahu od -30 do 300 °C. Touto metodou lze provádět stanovení typu vzplane/nevzplane (postup A) anebo stanovení bodu vzplanutí (postup B). Analýzovaný vzorek se umístí do zkušební kelímku temperovaného na požadovanou teplotu. Následně se aplikuje zdroj zapálení a stanovuje se, zda dojde nebo nedojde ke vzplanutí (postup A). Po stanovení skutečného bodu vzplanutí se realizuje nové měření s novým podílem vzorku za rozdílných teplot kelímku (postup B) [21].

6.2.4 Stanovení v uzavřeném kelímku podle Penskyho-Martense

Stanovení podle Penskyho-Martense je popsáno v normách ČSN EN ISO 2719 [22] a ASTM D93. Je použitelné pro vzorky s bodem vzplanutí od 40 do 370 °C.

Toto stanovení je předepsané pro stanovení bodu vzplanutí pro motorové nafty B7 a B10, směsné nafty s vysokým obsahem bionafty (B20, B30 a SMN 30), parafinickou motorovou naftu, FAME a řepkový olej [22].

Vzorek se v předepsaném zařízení zahřívá konstantní rychlostí za neustálého míchání. Zkušební plamínek se zapálí a ponořuje se v pravidelných intervalech do prostoru kelímku. Během ponoření plamínku je míchání přerušeno, a to až do dosažení bodu vzplanutí. Měření je automatické, při vzplanutí směsi par se vzduchem vznikají ionty, které umožní vznik proudového impulsu mezi dvěma elektrodami umístěnými ve víčku kelímku. Tento proudový impuls indikuje dosažení bodu vzplanutí, dochází k automatickému ukončení měření a spuštění chlazení [22].

6.2.5 Stanovení v otevřeném kelímku podle Clevelandse

Stanovení v otevřeném kelímku podle Clevelandse je popsáno v normách ASTM D92 a ČSN EN ISO 2592 [23].

Vzorek se zahřívá konstantní rychlostí. Malý plamínek se pohybuje přes povrch zahřívajícího vzorku v pravidelných intervalech až do dosažení bodu vzplanutí [23].

7. Spalné teplo a výhřevnost

Spalné teplo a výhřevnost poskytují informace o energetickém obsahu paliva. **Spalné teplo** (angl. označováno často jako *higher heating value* – HHV) je množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením jednotkového množství paliva. U vody uvolněné spalováním se předpokládá, že je v kapalném skupenství. **Výhřevnost** (angl. *lower heating value* – LHV) je množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením jednotkového množství paliva. U vody uvolněné spalováním se předpokládá, že je v plynném skupenství. Voda uvolněná při spalování přitom zahrnuje jak vodu obsaženou v původním palivu, tak vodu vzniklou spálením (množství je úměrné obsahu vodíku v palivu). Spalné teplo se tedy rovná součtu výhřevnosti a měrného skupenského tepla vody. V případě, že se při spalování neuvolňuje voda, spalné teplo je rovno výhřevnosti [6].

Spalné teplo se stanovuje kalorimetrickou metodou. Výhřevnost se stanovuje výpočtem ze spalného tepla a z obsahu vodíku ve vzorku stanoveného elementární analýzou [24].

Podstata kalorimetrického stanovení spalného tepla spočívá ve spálení vzorku o známé hmotnosti v kyslíkové atmosféře v tlakové nádobě kalorimetru za vysokého tlaku při předepsaných podmínkách. Kalibrace systému se provádí stanovením tepelné kapacity měřící cely kalorimetru spálením kyseliny benzoové – množství energie potřebné k jednotkové změně teploty v kalorimetru (o 1 K) [1].

8. Mazivost

Mazivost popisuje schopnost paliva ovlivnit tření a opotřebení povrchu při relativním pohybu pod zatížením [1]. Mazivost se sleduje u některých paliv naftového typu a u leteckých petrolejů viz tab. 9. Mazivost motorových naft pozitivně ovlivňuje zejména sloučeniny síry. Jelikož v minulých dekádách docházelo v rámci ekologizace paliv k významnému snižování obsahu sirných sloučenin, je nutno motorové nafty aditivovat mazivostními přísadami nebo musí obsahovat bionaftu, která rovněž mazivost zlepšuje.

Existuje celá řada zkoušek pro stanovení mazivosti. Principiálně však všechny zkoušky hodnotí velikost oděrové stopy vzniklé po testu, při kterém se vůči sobě pohybují dva kovové elementy mazané testovanou kapalinou.

Stanovení mazivosti diesellových paliv se provádí dle postupu popsání v ČSN EN ISO 12156-1 [25]. Mazivost paliva se vyhodnocuje pomocí oděrové stopy, která se měří v μm a vzniká na oscilující kuličce při styku s nehybnou destičkou, které jsou ponořené do zkoušeného paliva za definovaných podmínek měření. Zkoušený vzorek se nalije do zkušební nádoby temperované na teplotu měření. Ocelová kulička se proti destičce upevní do vodorovně umístěného držáku se zatížením. Kulička při zkoušce osciluje konstantní frekvencí a konstantní délkou zdvihu při úplném ponoření do kapaliny. Test probíhá za definovaných podmínek (kov kuličky a destičky, teplota kapaliny, zatížení, frekvence, délka zdvihu, teplota a vlhkost prostředí). Mazivost kapaliny se stanoví jako průměr oděrové stopy vzniklé na zkušební kuličce [1].

Tab. 9 Hodnoty mazivosti (průměr oděrové plochy při 60 °C) předepsané příslušnými normami

Tab. 9 Lubricity Values Prescribed by Relevant Standards for Liquid Fuels

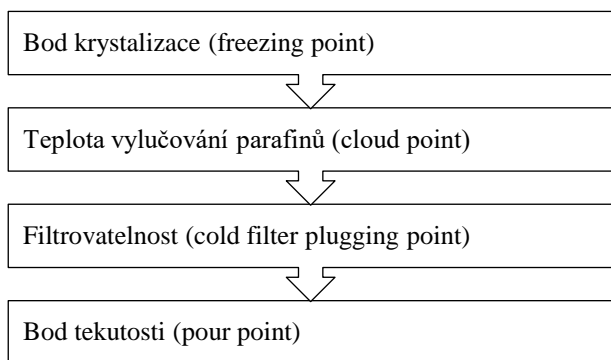
| Palivo | Mazivost. (μm) | Norma ČSN EN (ASTM) | Typ metody |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------|
| B7, B10 SMN 30 PMN Jet A-1 | <460 | ISO 12156-1 (D5001) | průměr oděrové plochy |

9. Nízkoteplotní vlastnosti paliv

Nízkoteplotní vlastnosti charakterizují chování paliv anebo maziv za nízkých teplot. Při dostatečně nízkých teplotách může totiž docházet k vylučování tuhých parafinů, s čímž je spojené zhoršení tekutosti, v extrémním případě i její ztráta. V rafineriích se jedná o parametr důležitý pro skladování paliva ve venkovních nádržích a pro manipulaci s palivem. Snižování tekutosti může vést k přerušování dodávky paliva do motoru, ke zvýšenému opotřebení nebo poškození palivového systému. Typickým příkladem mohou být problémy při startu studeného diesellového motoru za nízkých teplot (<0 °C). Paliva, pro

kteřá se sleduje jejich chování za nízkých teplot, jsou uvedena v tab. 10 [6,9].

Z nízkoteplotních vlastností se nejčastěji sledují bod krystalizace, teplota vylučování parafinů, filtrovatelnost a bod tekutosti. Vzájemný vztah mezi těmito parametry je uveden na obr. 1.



Obr. 1 Vzájemný vztah mezi diskutovanými nízkoteplotními parametry (teplota klesá seshora dolů)

Fig. 1 The relationship between the discussed low-temperature parameters (temperature decreases from top to bottom)

Tab. 10 Nízkoteplotní vlastnosti sledované u kapalných paliv

Tab. 10 Low-temperature Properties Monitored for Liquid Fuels

| Palivo | Norma ČSN (ASTM) | Norma ČSN EN (ASTM) | | |
|----------|------------------|---------------------|------|--------------|
| | | BK | TVP | CFPP |
| Jet A-1 | (D1655) | (D2386) (D5972) | – | – |
| B7 | EN 590 | – | ISO | 116 |
| B10 | EN 16734+A1 | – | 3015 | 16329 |
| B20, B30 | EN 16709 | – | | |
| SMN 30 | 65 6508 | – | | 116 |
| FAME | EN 14214+A2 | – | | 116 16329 |
| PMN | EN 15940 | – | | |

9.1. Bod krystalizace

Bod krystalizace představuje teplotu, při níž zmizí uhlovodíkové krystaly vytvořené po předchozím ochlazení a následném zvyšování teploty vzorku. Jedná se o důležitý parametr především pro letecké petroleje (Jet A-1). Princip stanovení spočívá v ochlazení vzorku s gradientem 15 °C/min do vyloučení krystalů. Poté se vzorek zahřívá s gradientem 10 °C/min a sleduje se rozpuštění posledních krystalků [6,9].

9.2. Teplota vylučování parafinů (Bod zákalu)

Teplota vylučování parafinů představuje nejvyšší teplotu, při které se čirá kapalná frakce zakalí vlivem vyloučení krystalků parafinů při ochlazení vzorku za

podmínek testu. Při stanovení se vzorek řízeně ochlazuje na předepsané lázni až do vytvoření zákalu. Zkumavka se vzorkem se nenaklání, vytvoření zákalu je sledováno prostým okem nebo je indikována optickým zařízením příslušného automatického přístroje [6,9].

9.3. Filtrovatelnost (CFPP)

Filtrovatelnost představuje nejvyšší teplotu, při které již neproteče 20 ml vzorku sítkem s definovanou velikostí otvorů za dobu kratší než 60 s. Hodnota CFPP leží zpravidla mezi teplotou vylučování parafinů a bodem tekutosti. Stanovení CFPP má význam především u motorových naft, kde simuluje filtraci nafty v palivovém systému vozidla za nízkých teplot. Motorové nafty se dělí na různé druhy právě podle hodnoty CFPP (někdy i podle teploty vylučování parafinů). Při stanovení CFPP se vzorek v předepsaném zařízení řízeně ochlazuje a po každém poklesu teploty o 1 °C se nasaje přes filtr. Když vzorek nejde nasát během 60 s nebo se nevrátí do nádoby, teplota se zaznamená a uvede jako hodnota CFPP [6,9].

9.4. Bod tekutosti

Bod tekutosti představuje nejnižší teplotu, při níž vzorek ropného výrobku chlazený za normalizovaných podmínek právě ještě teče. Postupná ztráta tekutosti je způsobena zvyšováním obsahu pevných parafinických podílů vznikajících při ochlazení vzorku. Bod tekutosti představuje nízkoteplotní parametr s nejnižší hodnotou. Udává tak v podstatě limitní hodnotu použitelnosti kapalných produktů. Vzorek je nejprve zahřát a následně ochlazen v odpovídající lázni. Každé 3 °C je zkumavka vyjmuta z lázně a nakloněna. Pokud se vzorek hýbe (teče), pokračuje se v ochlazení. Pokud se vzorek nepohne při náklonu min. 5 s, přičtou se k výsledku 3 °C a výsledná teplota se uvede jako bod tekutosti [6,9].

Bod tekutosti se u automobilových a leteckých paliv v současné době běžně nesleduje, sleduje se však u těžších (s vysokým bodem varu složek) námořních diesellových paliv, které mají svým charakterem blíže k těžkým topným olejům.

Filtrovatelnost, bod tekutosti, velikost krystalků parafinů a jejich tendenci v palivu sedimentovat lze snížit vhodnými aditivami, což se v rafineriích běžně využívá. Teplotu vylučování parafinů lze ale aditivací ovlivnit jen minimálně. Z tohoto důvodu se pro některé kvality zimních motorových naft předepisuje max. rozdíl mezi teplotou vylučování parafinů a filtrovatelností.

10. Závěr

V článku je uveden přehled sledovaných fyzikálních vlastností kapalných a plynných alternativních paliv. Z fyzikálních vlastností se prakticky u všech zde diskutovaných kapalných paliv sleduje hustota při 15 °C. Pouze pro palivo E95 je předepsaná hustota při 20 °C. Kinematická viskozita při 40 °C se sleduje u všech diesellových motorových paliv, pro benzínová paliva nejsou limitní hodnoty viskozity předepsané. Pro palivo Jet A-1

je příslušnou ASTM normou předepsaná hodnota maximální hodnota kinematické viskozity při $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Destilační charakteristiky jsou předepsané pro všechna paliva s výjimkou paliv E85, E95, řepkový olej a FAME. Zde je nutno konstatovat, že zejména pro FAME a paliva na bázi rostlinných olejů se často jako doplňková metoda používá metoda simulované destilace. Pro paliva obsahující těkavé složky se sleduje tlak par. Jedná se o benzíny E5 a E10, palivo E85 a rovněž LPG. Pro paliva E5, E10 a LPG jsou stanovené sezonní hodnoty pro tlak par, tedy hodnoty pro letní a zimní období. U LPG se tlak par reguluje poměrem C_3 a C_4 uhlovodíků ve směsi. Bod vzplanutí charakterizuje paliva z hlediska požární bezpečnosti a stanovuje se pro paliva naftového typu (B7–B30, FAME, SMN 30 a parafinická motorová nafta), dále též pro řepkový olej a palivo E95. Kromě paliva E95, pro které je předepsané stanovení v otevřeném kelímku, se pro všechna ostatní paliva používají metody na bázi uzavřeného kelímku. Mazivost se stanovuje pro letecký petrolej, motorové nafty B7 a B10, dále pro směsnou motorovou naftu SMN 30 a pro parafinickou motorovou naftu. Nízkoteplotní vlastnosti se stanovují u paliv naftového typu, leteckých petrolejů a rovněž u námořních paliv. U leteckých petrolejů se stanovuje bod krystalizace. Pro paliva B7–B30, FAME, SMN 30 a parafinickou motorovou naftu jsou předepsané hodnoty teploty vylučování parafinů a CFPP.

Poděkování

Tento výstup vznikl v rámci projektu Specifického vysokoškolského výzkumu – projekt č. A1_FTOP_2023_005.

Seznam zkratek

| | |
|----------|---|
| ASVP | tlak vzduchem nasycených par (air saturated vapor pressure) |
| BHCI | Bureau of Mines Correlation Index |
| BK | bod krystalizace |
| B7 | motorová nafta B7 |
| B10 | motorová nafta B10 |
| B20, B30 | motorové nafty s vysokým obsahem bionafty |
| CFPP | filtrvatelnost (cold filter plugging point) |
| DVPE | ekvivalent tlaku suchých par (dry vapour pressure equivalent) |
| E5 | automobilový benzín E5 |
| E10 | automobilový benzín E10 |
| E85 | ethanol E85 |
| E95 | ethanol E95 |
| FAME | methylestery mastných kyselin |
| GC | plynová chromatografie |
| HHV | spalné teplo |
| LHV | výhřevnost |
| P-M | Pensky-Martens |
| PMN | parafinická motorová nafta |
| RRM | rychlá rovnovážná metoda |
| ŘO | řepkový olej |
| SMN 30 | směsná motorová nafta |
| TBP | pravý bod varu (true boiling point) |

VI viskozitní index

Literatura

1. Šešulka V., *Analýza paliv*. 1970, Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury : Alfa.
2. Helm J., *Zkoušení ropy a jejích produktů*. 1957: Státní nakladatelství technické literatury.
3. ČSN EN ISO 3675: *Ropa a kapalné ropné výrobky - Laboratorní stanovení hustoty - Stanovení hustotěrem*.
4. ČSN EN ISO 12185: *Ropa a ropné výrobky - Stanovení hustoty - Metoda oscilační U-trubice*.
5. ČSN EN ISO 3104: *Ropné výrobky - Průhledné a neprůhledné kapaliny - Stanovení kinematické viskozity a výpočet dynamické viskozity*.
6. Kroufek J., Hála S., *Analýza paliv - výukový text*. 2011.
7. ČSN EN ISO 3405: *Ropa a ropné výrobky z přírodních nebo syntetických zdrojů - Stanovení destilační křivky při atmosférickém tlaku*.
8. Intertec. *Crude Oil Assays*. 2022 [staženo Aug. 24 2022]; dostupné z: <https://www.intertek.com/petro-leum/crude-oil-assay/>.
9. Kroufek J., *Návody na laboratorní práce Ústavu technologie ropy a alternativních paliv*. 2016.
10. ASTM D2892-20: *Standard Test Method for Distillation of Crude Petroleum (15-Theoretical Plate Column)*.
11. Mužíková Z., Baroš P., Pospíšil M., Šebor G.: *Tlak par a oxidační stabilita butanol-benzinových směsí*. Chemické listy (2013), **107** (9), 717-722.
12. Mužíková Z., Pospíšil M., Šebor G.: *Volatility and phase stability of petrol blends with ethanol*. Fuel (2009), **88** (8), 1351-1356, doi: 10.1016/j.fuel.2009.02.003.
13. Staš M., Matejovský L., Mužíková Z., Kroufek J., Šimáček P.: *Vlastnosti a analýza kapalných alternativních paliv II: Paliva obsahující ethanol*. Paliva (2023), **15** (1), 1-12, doi: 10.35933/paliva.2023.01.01.
14. Gaspar D.J., Phillips S.D., Polikarpov E., Albrecht K.O., Jones S.B., George A., Landera A., Santosa D.M., Howe D.T., Baldwin A.G.: *Measuring and predicting the vapor pressure of gasoline containing oxygenates*. Fuel (2019), **243** 630-644, doi: 10.1016/j.fuel.2019.01.137.
15. ČSN EN 13016-1: *Kapalné ropné výrobky - Tlak par - Část 1: Stanovení tlaku vzduchem nasycených par (ASVP) a výpočet ekvivalentu tlaku suchých par (DVPE)*.
16. ČSN EN 13016-3: *Kapalné ropné výrobky - Tlak par - Část 3: Stanovení tlaku par a výpočet ekvivalentu tlaku suchých par (DVPE) (Metoda trojité expanze)*.
17. ČSN EN ISO 8973: *Zkapalněné ropné plyny (LPG) - Výpočet hustoty a tlaku par*.
18. ČSN EN ISO 13736: *Stanovení bodu vzplanutí - Metoda uzavřeného kelímku podle Abela*.
19. ČSN EN ISO 1523: *Stanovení bodu vzplanutí - Rovnovážná metoda v uzavřeném kelímku*.

20. ČSN EN ISO 1516: Stanovení vzplane/nevzplane - Rovnovážná metoda v uzavřeném kelímku.
21. ČSN EN ISO 3679: Stanovení vzplane/nevzplane a bodu vzplanutí - Rychlá rovnovážná metoda v uzavřeném kelímku.
22. ČSN EN ISO 2719: Stanovení bodu vzplanutí v uzavřeném kelímku podle Penskyho-Martense.
23. ČSN EN ISO 2592: Ropa a ropné výrobky - Stanovení bodu vzplanutí a bodu hoření - Metoda otevřeného kelímku podle Clevelanda.
24. Staš M., Baroš P., Matějovský L., Kittel H., Šimáček P.: *Obecné metody hodnocení paliv I: Stanovení prvků a neuhlovodíkových sloučenin v kapalných a plynných palivech*. Paliva (2023), **15** (2), doi: 10.35933/paliva.2023.02.01.
25. ČSN EN ISO 12156-1: Motorová nafta - Odhad mazivosti za použití přístroje s vysokofrekvenčním vratným pohonem (HFRR) - Část 1: Zkušební metoda.

Summary

General Methods for the Analysis of Physical Properties of Fuels

Martin Staš, Hugo Kittel, Lukáš Matějovský, Lukáš Kejla, and Pavel Šimáček

This article is another in a series of articles focused on introducing general methods for evaluating conventional and alternative fuels. The text presents an overview of the physical properties determined for liquid and gaseous fuels. Additionally, methods for determining these properties are presented. The significance of individual determinations is also discussed. Emphasis is placed particularly on standardized parameters and tests, but in some cases, tests that are not required by the relevant standards are also discussed. The main goal of the article is to provide a comprehensive overview of which physical properties are monitored for each fuel, why these properties are monitored, and what methods are used for this purpose.

The article provides an overview of monitored physical properties for liquid and gaseous alternative fuels. Regarding the physical properties, density at 15 °C is practically monitored for all discussed liquid fuels. Only for E95 fuel, the density at 20 °C is prescribed. Kinematic viscosity at 40 °C is monitored for all diesel engine fuels, while there are no prescribed viscosity limits for gasoline fuels. For Jet A-1 fuel, the relevant ASTM standard prescribes the maximum value of kinematic viscosity at -20 °C. Distillation characteristics are prescribed for all fuels except E85, E95, rapeseed oil, and FAME. It should be noted that for FAME and fuels based on vegetable oils, the simulated distillation method is often used as a complementary method. Vapor pressure is monitored for fuels containing volatile components, including E5 and E10 gasoline, E85 fuel, and LPG. Seasonal values for vapor pressure are prescribed for E5, E10, and LPG fuels, representing values for summer and winter periods. The vapor pressure of LPG is regulated by the ratio of C₃ and C₄ hydrocarbons in the mixture. Flash point characterizes the fuel from a fire safety perspective and is determined for petroleum-type fuels (B7-B30, FAME, SMN 30, and paraffinic diesel), as well as for rapeseed oil and E95 fuel. Except for E95 fuel, which is determined using an open cup method, all other fuels use closed cup methods. Lubricity is determined for aviation kerosene, motor diesel fuels B7 and B10, blended motor diesel fuel SMN 30, and paraffinic diesel. Low-temperature properties are determined for petroleum-type fuels, aviation kerosene, and marine fuels. The crystallization point is determined for aviation kerosene. For fuels B7-B30, FAME, SMN 30, and paraffinic diesel, prescribed values include the temperature of wax precipitation and CFPP (Cold Filter Plugging Point).