

## Calculation of selected fire properties of flammable liquids and liquid mixtures

### Výpočet vybraných požiarotechnických parametrov horľavých kvapalín a kvapalných zmesí

Rastislav Veľas<sup>1\*</sup>, Danica Kačíková<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technical University in Zvolen, Faculty of Wood Sciences and Technology; Department of Fire Protection, xvelasr@tuzvo.sk

<sup>2</sup> Technical University in Zvolen, Faculty of Wood Sciences and Technology; Department of Fire Protection, kacikova@tuzvo.sk

*Original scientific paper*

*Received: May 29, 2018; Accepted: July 20, 2018; Published: July 31, 2018;*

#### Abstract

The storage of flammable liquids in tanks constitutes a significant fire-related threat. In the event of a major fire, a domino effect occurs causing neighbouring tanks and adjacent objects to be hit by fire and the fire will continue to spread. The main objective of this paper is to evaluate the usability of the calculation methods used to estimate the burning rate, flame height and intensity of released heat in the combustion of pure flammable liquids (n-Heptane) and liquid mixtures (gasoline, diesel fuel S-500) and compare them with experimental values which have been already published. The obtained results of the calculation methods indicated a better match with the experimental results of chemically pure liquids compared to the liquid mixtures. The burning rate is not a constant value; and in real fire conditions it varies depending on several factors, e.g. temperature, vessel diameter, the height of level liquid, liquid composition. In the case of the heat release rate, the water contained on the bottom of the tank affected the achieved results. In the case of a mean flame height of n-Heptane at a vessel diameter of 0.30 m, the experimental result at 96 % was consistent with the Thomas computation method.

**Keywords:** mass burning rate; mean flame height; heat release rate; calculation methods; flammable liquids

#### 1 Introduction

The number of liquid fuel tanks and storage facilities due to the worldwide increase in demand for energy along with the development of modern industrial technologies is rapidly increasing. These tanks containing flammable liquids represent a significant threat associated with a fire [1]. In the past several theoretical and experimental studies have been conducted about burning flammable liquids stored in tanks. The experiments were carried out mainly with tanks with a diameter of few centimetres [2].

#### 1 Úvod

Počet nádrží a skladov kvapalných palív vzhľadom na celosvetový nárast dopytu po energii spolu s rozvojom moderných priemyselných technológií rýchlo rastie. Tieto nádrže obsahujúce horľavé kvapaliny predstavujú významnú hrozbu súvisiacu s požiarom [1]. V minulosti bolo vykonaných niekoľko teoretických a experimentálnych štúdií horenia horľavých kvapalín skladovaných v nádržiach. Experimenty boli realizované najmä v nádobách s priemerom niekoľkých centimetrov [2].

Jiang, Lu [3] investigated the influence of the crosswind on the mass burning rate and flame tilt when burning aviation fuel in open-air tanks. They found that the course of the mass burning rates can be divided into three stages: a radiation dominant stage, combined radiation and convection dominant stage and a convection dominant stage.

Zhen, Xiaolin [4] based on experiments of burning crude oil in vessels analyzed several models in relation to burning rate, flame shape and radiation intensity. They conclude that the calculation model of the burning rate proposed by Babrauskas [5], with a diameter of about 10 m, is accurate. Thomas [6] model for flame calculation is suitable for tank diameter of 5 m. On the contrary, model Heskestad [7] is more suitable for diameters over 10 m. If the intensity of heat radiation is greater than  $5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  the Shokri Beyler model is more suitable. But, if the heat radiation intensity is less than  $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  the point source model is more appropriate. Chatris et al. [2] conducted experimental studies of hydrocarbon combustion (gasoline, diesel) in vessels with diameter of 1 m, 5 m, 3 m and 4 m. They studied the mass burning rate, the temperature of the flame, and the influence of wind speed on the rate of combustion. They analyzed periods at the onset of burning and the end of the process, as well as determined the average burning rate during a steady fire as a function of the tank diameter. Kang et al. [8], based on experimental combustion tests of n-Heptane in vessels with a diameter of 0.10 m, 0.14 m, 0.20 m and 0.30 m, studied burning rate, flame height and fuel temperature. Based on the results, four phases of combustion have been established: the pre-steady burning stage; the quasi-steady stage; the boiling stage and the decay stage. Kong et al. [9] conducted experiments focusing the crude oil burning in the open space. They used three circular vessels with diameters of 0.1 m, 0.15 m and 0.2 m. During the experiments, they recorded the burning rate, flame height and fuel temperature distribution. Similarly, Kang's et al. [8] divided the burning process into four phases. They concluded that the mass burning rate and the height of the flame in the boiling phase are significantly higher than in the steady-burning phase. In the steady state of burning, the initial thickness of

Jiang, Lu [3] skúmali vplyv bočného vetra na hmotnostnú rýchlosť odhorievania a uhol sklonu plameňa pri spaľovaní leteckého paliva v nádobách v otvorenom priestore. Zistili, že priebeh zmeny hmotnostnej rýchlosti odhorievania je možné rozdeliť na tri stupne: radiačný dominantný stupeň, kombinovaný dominantný stupeň radiácie a konvekcie a stupeň dominantnej konvekcie.

Zhen, Xiaolin [4] na základe experimentov horenia ropy v nádobách analyzovali niekoľko modelov v súvislosti s rýchlosťou horenia, tvarom plameňa a intenzitou žiarenia. Dospeli k záverom, že výpočtový model rýchlosti horenia, ktorý navrhuje Babrauskas [5] je presný s priemerom okolo 10 m. Thomasov [6] model na výpočet plameňa je vhodný do priemeru nádrže 5 m, naopak model Heskestad [7] je vhodnejší pre priemery nad 10 m. Ak je intenzita tepelného žiarenia väčšia ako  $5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  je vhodnejší model Shokri Beyler. Naopak, ak je intenzita tepelného žiarenia menšia ako  $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  je vhodnejší model bodového zdroja. Chatris et al. [2] realizovali experimentálne štúdie horenia uhľovodíkov (benzín, nafta) v nádobách s priermi 1 m, 5 m, 3 m a 4 m. Študovali rýchlosť odhorievania, teplotu plameňov a vplyv rýchlosti vetra na rýchlosť horenia. Analyzovali obdobia na začiatku horenia a zánik celého procesu, ako aj stanovenie priemernej rýchlosti horenia počas ustáleného požiaru ako funkcie priemeru nádrže. Kang et al. [8] na základe experimentálnych skúšok horenia n-Heptánu v nádobách s priermi 0,10 m, 0,14 m, 0,20 m a 0,30 m študovali rýchlosť horenia, výšku plameňa a teplotu paliva. Na základe výsledkov stanovili štyri fázy horenia. Fázu rozhorievania, fázu ustáleného stavu horenia, fázu varu a fázu dohorievania. Kong et al. [9] uskutočnili experimenty horenia surovej ropy v otvorenom priestore. Použili tri kruhové nádoby s priermi 0,1 m, 0,15 m a 0,2 m. Počas celej doby horenia zaznamenávali rýchlosť horenia, výšku plameňa a rozloženie teploty paliva. Podobne ako v práci Kang et al. [8] rozdelili proces horenia do štyroch fáz. Dospeli k záverom, že hmotnostná rýchlosť odhorievania a výška plameňa vo fáze varu sú výrazne vyššie ako vo fáze ustáleného horenia. Vo fáze ustáleného stavu horenia má pôvodná hrúbka palivovej vrstvy obmedzený vplyv na rýchlosť horenia a výšku plameňa.

the fuel layer has a limited effect on burning rate and flame height.

The boiling phase and intensity of boiling increase with the initial thickness of the fuel layer and decrease with the diameter of the tank. Ferrero et al. [10] conducted diesel fuel experiments and concluded that the burning rate and flame height has rising tendency with the increasing diameter of the vessel and increases when the liquid is boiling. Kuang et al. [11] examined the effect of ambient pressure on ethanol burning in round vessels. The results of the experiment showed that the mass burning rate is lower with decreasing ambient pressure. The flame height increased when the ambient pressure decreased, until it reached the turning point and then dropped.

The tanks of flammable liquids nowadays have much larger dimensions and store several times larger volume than the volumes studied under experimental conditions. One of the ways to get data at larger tank diameters are computational methods that can be used to obtain values that are useful for rating the burning of flammable liquids.

The aim of this study was to evaluate the applicability of the calculation methods used to estimate the burning rate, the flame height and the intensity of released heat in combustion of pure flammable liquids and liquid mixtures in vessels of different diameters and to compare them with experimental values published by other authors. In the case of pure combustible liquids, the combustion values of n-heptane will be compared, in the case of the combustion experiment of liquid mixtures, this will be gasoline and diesel fuel S-500.

## 2 Material and Methods

For the study the experiment published by Kang et al. [8], about combustion of pure combustible liquid n-Heptane in tanks of different diameters, was chosen. In experiment, four stainless steel circular vessels of 0.10 m, 0.14 m, 0.20 m and 0.30 m diameter were used, a vessel height of 0.04 m with a wall thickness of 0.003. Electronic scales, temperature measuring device and a CCD cameras were used. In each test, at each vessel, the following volume of n-Heptane was burnt:  $1.02 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  (for tank with diameter  $D = 0.10 \text{ m}$ ),  $2.0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  (for  $D = 0.14$

Fázy nábehu varu a intenzita varu sa zvyšujú s počiatočnou hrúbkou palivovej vrstvy a klesajú s priemerom nádrže. Ferrero et al. [10] uskutočnili experimenty s motorovou naftou a dospeli k záveru, že rýchlosť horenia a výška plameňa majú stúpajúcu tendenciu so zväčšujúcim sa priemerom nádoby a zväčšujú sa taktiež v prípade výskytu varu kvapaliny. Kuang et al. [11] skúmali vplyv okolitého tlaku na horenie etanolu v okrúhlych nádobách. Výsledky experimentu ukázali, že hmotnostná rýchlosť odhorievania sa znižuje, keď tlak okolitého prostredia klesá. Výška plameňa pri znižovaní okolitého tlaku sa zvyšovala až do dosiahnutia bodu obratu a potom klesala.

Aktuálnosť témy článku vyplýva zo skutočnosti, že zásobníky horľavých kvapalín v súčasnosti predstavujú niekoľko násobne väčší objem, oproti objemom študovaných v experimentálnych podmienkach. Jedným zo spôsobov ako získať údaje pri väčších priemeroch nádrží sú výpočtové metódy, kde možno získať hodnoty, ktoré majú praktické využitie pri hodnotení horenia horľavých kvapalín.

Cieľom práce je hodnotenie aplikovateľnosti výpočtových metód používané na odhad rýchlosti odhorievania, výšky plameňa a intenzity uvoľneného tepla pri horení čistých horľavých kvapalín a kvapalných zmesí v nádobách rôznych priemerov a porovnať ich s experimentálnymi hodnotami publikovanými inými autormi. V prípade čistej horľavej kvapaliny budú porovnávané hodnoty horenia n-Heptánu, v prípade experimentu horenia kvapalných zmesí to bude benzín a motorová nafta S-500.

## 2 Materiál a metódy

Pre spracovanie experimentálnej časti bol vybraný experiment publikovaný Kangom et al. [8] horenia čistej horľavej kvapaliny n-Heptánu v nádobách rôznych priemerov. Experimentálne zariadenie pozostávalo z nádoby, prístroja na meranie hmotnosti, prístroja na meranie teploty a CCD kamier. Boli použité štyri kruhové nádoby z nehrdzavejúcej ocele s priermi 0,10 m, 0,14 m, 0,20 m a 0,30 m, výšky nádoby 0,04 m s hrúbkou steny 0,003 m. Pri každom teste a pri každom priemere nádoby bol spálený nasledovný objem n-Heptánu:  $1,02 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$

m),  $4,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  (for  $D = 0,20 \text{ m}$ ) and  $9,19 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  (for  $D = 0,30 \text{ m}$ ).

The measurement was carried out at a temperature range from  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  to  $14,5 \text{ }^\circ\text{C}$  with humidity of air from 10% to 54% (climatic conditions in the test room at the time of measurement). During the test, changes in the weight of the liquid were recorded by electronic scales every second. Flame height values were captured by CCD cameras.

In case of combustion of liquid mixtures (gasoline, diesel S-500) the experiment published by Leite, Centeno [1] was chosen. Five tanks with following dimensions (diameter  $D$  x height  $H$ ) were used:  $0,04 \text{ m} \times 0,012 \text{ m}$ ,  $0,20 \text{ m} \times 0,06 \text{ m}$ ,  $0,40 \text{ m} \times 0,12 \text{ m}$ ,  $0,80 \text{ m} \times 0,24 \text{ m}$  and  $4,28 \text{ m} \times 0,65 \text{ m}$ . At each test and at each vessel diameter, there were burnt the following fuel volumes:  $3,77 \cdot 10^{-3} \text{ L}$  (for tank with diameter  $D = 0,04 \text{ m}$ ),  $94,25 \cdot 10^{-3} \text{ L}$  (for  $D = 0,20 \text{ m}$ ),  $377 \cdot 10^{-3} \text{ L}$  (for  $D = 0,40 \text{ m}$ ),  $1,51 \text{ L}$  (for  $D = 0,80 \text{ m}$ ) and  $43,16 \text{ L}$  (for  $D = 4,28 \text{ m}$ ). The total volume of liquid (fuel + water) was 80% of the volume for all tanks. During the burning, no influence of the presence of water under the fuel was observed, which is manifested by the sudden evaporation of water. The test with a  $4,28 \text{ m}$  diameter vessel was performed in an open environment. Tests were conducted in days without wind, ambient temperature ranging from  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  to  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , ambient pressure was 1 atm. Gasoline density was  $745 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  and diesel density was S-500  $840 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . The tanks were opened (without the roof) during the test, approaching the real fire conditions in the liquid tanks. The tests were repeated 6 times. The variation in fuel mass measurement was  $\pm 0,1 \text{ g}$ .

To calculate the selected fire properties were used the following calculation relations:

- The mass burning rate

The mass burning rate of the free burning splash depends on the diameter and the two empirical material constants that represent the specific fuel used and are a function of the heat flux from the flame to the surface of the fuel [12]. The dependence of the mass burning rate on the diameter of the burning area for a particular flammable liquid is expressed by the relation:

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-k \cdot \beta \cdot D}) \quad (1)$$

(pre nádrž s priemerom  $D = 0,10 \text{ m}$ ),  $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  (pre  $D = 0,14 \text{ m}$ ),  $4,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  (pre  $D = 0,20 \text{ m}$ ) a  $9,19 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  (pre  $D = 0,30 \text{ m}$ ). Meranie prebiehalo pri teplote od  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $14,5 \text{ }^\circ\text{C}$  s vlhkosťou vzduchu od 10 % do 54 % (klimatické podmienky v testovacej miestnosti v čase merania). V priebehu skúšky boli zmeny hmotnosti kvapaliny zaznamenávané elektronickými váhami v intervale raz za sekundu. Hodnoty výšky plameňa boli zachytené CCD kamerami.

V prípade horenia kvapalných zmesí (benzín, motorová nafta S-500) bol vybraný experiment publikovaný autormi Leite, Centeno [1]. Bolo použitých päť nádrží o veľkosti (priemer  $D$  x výška  $H$ ):  $0,04 \text{ m} \times 0,012 \text{ m}$ ,  $0,20 \text{ m} \times 0,06 \text{ m}$ ,  $0,40 \text{ m} \times 0,12 \text{ m}$ ,  $0,80 \text{ m} \times 0,24 \text{ m}$  a  $4,28 \text{ m} \times 0,65 \text{ m}$ . Pri každom teste a pri každom priemer nádob boli spálené nasledovné objemy palív:  $3,77 \cdot 10^{-3} \text{ L}$  (pre nádrž s priemerom  $D = 0,04 \text{ m}$ ),  $94,25 \cdot 10^{-3} \text{ L}$  (pre  $D = 0,20 \text{ m}$ ),  $377 \cdot 10^{-3} \text{ L}$  (pre  $D = 0,40 \text{ m}$ ),  $1,51 \text{ L}$  (pre  $D = 0,80 \text{ m}$ ) a  $43,16 \text{ L}$  (pre  $D = 4,28 \text{ m}$ ). Celkový objem kvapaliny (palivo + voda) predstavoval 80 % objemu pre všetky nádrže. Počas horenia nebol spozorovaný vplyv prítomnosti vody pod palivom, čo sa prejavuje prostredníctvom náhleho odparovania vody. Skúška s nádobou o priemeru  $4,28 \text{ m}$  bola vykonaná v otvorenom prostredí. Testy prebiehali v dňoch bez vetra, teplota okolia sa pohybovala v rozmedzí od  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , tlak okolitého prostredia bol 1 atm. Hustota benzínu bola  $745 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a motorovej nafty S-500  $840 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Nádrže počas testu boli otvorené (bez strechy), čím sa približovali k podmienkam reálnych požiarov v zásobníkoch kvapalín. Skúšky boli opakované 6-krát. Odchýlka pri meraní hmotnosti paliva predstavovala  $\pm 0,1 \text{ g}$ .

Na výpočet vybraných požiarotechnických charakteristík boli použité nasledujúce výpočtové vzťahy:

- Hmotnostná rýchlosť odhorievania

Rýchlosť úbytku hmotnosti voľne horiacej kaluže závisí od priemeru a od dvoch empirických materiálových konštánt, ktoré predstavujú konkrétne použité palivo a sú funkciou tepelného toku z plameňa k povrchu paliva [12]. Závislosť hmotnostnej rýchlosti odhorievania od priemeru plochy odhorievania pre konkrétnu horľavú kvapalinu vyjadruje vzťah:



where  $\dot{m}''$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) is the mass burning rate,  $\dot{m}''_{\infty}$  ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) asymptotic mass burning rate of the liquid,  $k\cdot\beta$  ( $\text{m}^{-1}$ ) material constant of combustible liquid,  $D$  (m) diameter of the area of burning [13].

- Heat release rate

The course of the fire is generally characterized by the rate of heat release depending on time. This variable is the basic parameter for determining the burning intensity. It is true that the higher the rate of heat release, the greater the risk of fire [14, 15]. If we know the total area of burning  $A_f$  ( $\text{m}^2$ ), one way of determining the rate of heat release  $\dot{Q}$  (kW), is the calculation using area velocity of burning, total combustion heat  $\Delta H_c$  ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and combustion efficiency  $\chi_s$  (%) [13]:

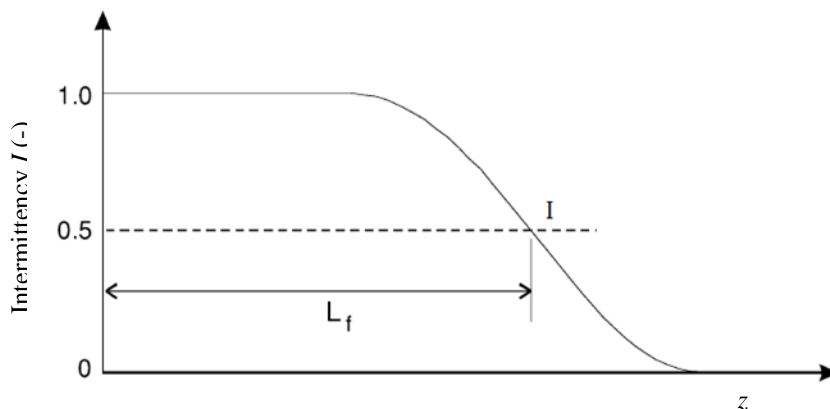
$$\dot{Q} = A_f \cdot \dot{m}'' \cdot \chi_s \cdot \Delta H_c \quad (2)$$

The rate of heat release can also be calculated in the following way [16]:

$$\dot{Q} = \dot{m}'' \cdot \Delta H_c \cdot A_f \cdot (1 - e^{-k\cdot\beta\cdot D}) \quad (3)$$

- Flame height

Flame height along with flame temperature are important parameters when assessing the possibility of ignition of inflammables [14]. In order to calculate the flame height, it is first necessary to define the mean flame height. This is best determined by averaging the visible flame height depending on time. The intermittency, denoted  $I$ , is shown on the vertical axis. The value of 1 on this axis indicates the complete appearance of the flame.



**Fig. 1** The mean flame height [12]  
**Obr. 1** Stredná výška plameňa [12]

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-k\cdot\beta\cdot D}) \quad (1)$$

kde  $\dot{m}''$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) je hmotnostná rýchlosť odhorievania,  $\dot{m}''_{\infty}$  ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) asymptotická hmotnostná rýchlosť odhorievania kvapaliny,  $k\cdot\beta$  ( $\text{m}^{-1}$ ) materiálová konštanta horľavej kvapaliny,  $D$  (m) priemer plochy odhorievania [13].

- Rýchlosť uvoľňovania tepelnej energie

Priebeh požiaru je všeobecne charakterizovaný rýchlosťou uvoľňovania tepla v závislosti na čase. Táto veličina je základným parametrom pre určenie intenzity horenia. Platí, že čím je rýchlosť uvoľňovania tepla vyššia, tým je väčšie nebezpečenstvo požiaru [14, 15]. Ak poznáme celkovú plochu odhorievania  $A_f$  ( $\text{m}^2$ ), jedným zo spôsobov stanovenia rýchlosti uvoľňovania tepla  $\dot{Q}$  (kW), je výpočet pomocou plošnej rýchlosti odhorievania, celkového spaľovacieho tepla  $\Delta H_c$  ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) a účinnosti spaľovania  $\chi_s$  (%) [13]:

$$\dot{Q} = A_f \cdot \dot{m}'' \cdot \chi_s \cdot \Delta H_c \quad (2)$$

Rýchlosť uvoľňovania tepla možno vypočítať aj nasledovným spôsobom [16]:

$$\dot{Q} = \dot{m}'' \cdot \Delta H_c \cdot A_f \cdot (1 - e^{-k\cdot\beta\cdot D}) \quad (3)$$

- Výška plameňa

Výška plameňa spolu s teplotou plameňa patria medzi dôležité parametre pri posudzovaní možnosti vznietenia okolitých horľavín [14]. Na výpočet výšky plameňa je potrebné najskôr definovať strednú výšku plameňa. Tá sa najlepšie určuje s priemerovaním viditeľnej výšky plameňa v závislosti od času.

The horizontal axis shows the distance above the fire source,  $z$ . At point 0.5 on the vertical axis is height at which the flame occurs in half the time. This flame height in Fig. 1 is defined as the mean flame height  $L_f$  [12].

Based on experimental correlations, Heskestad [7] deduced flame height in burning flammable liquids on a solid surface according to the following relation:

$$L_f = 0.23 \cdot \dot{Q}^{\frac{2}{5}} - 1.02 \cdot D \quad (4)$$

where  $L_f$  (m) is the flame height,  $\dot{Q}$  (kW) is the rate of heat release and  $D$  (m) is the diameter of the fire [17].

According to Thomas, the mean flame height can be calculated as follows:

$$L_f = 42 \cdot D \cdot \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}} \right)^{0.61} \quad (5)$$

where  $L_f$  (m) is the height of the flame,  $\dot{m}''$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) is the mass burning rate,  $\rho_a$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) density of ambient air and  $g$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) is gravitational acceleration [18].

### 3 Results and discussion

#### 3.1 Results of calculated *n*-Heptane parameters

We used the equation (1) to calculate the mass burning rate by the calculation method, even though the calculation relation was derived for vessels with a diameter above 0.2 m. The variables that enter the calculation were taken over from the table reported by Stroup et al. [19] and that are listed in Tab. 1.

The value of the empirical constant  $k\beta$  was taken from experimental data from the SFPE Handbook that Babrauskas determined [19].

Calculated values of the mass burning rate ( $\dot{m}''$ ) and the rate of heat release ( $\dot{Q}$ ) according to the relation (2) for the different vessel diameters are given in Tab. 2.

Prerušovaná čiara označená ako  $I$  je zobrazená na zvislej osi. Hodnotou 1 na tejto osi je označený celkový vzhľad plameňa. Horizontálna os znázorňuje vzdialenosť nad zdrojom požiaru,  $z$ . V bode 0,5 na vertikálnej osi je výška, v ktorej sa plameň objaví za polovicu času. Táto výška plameňa na obr. 1 je definovaná ako stredná výška plameňa  $L_f$  [12].

Na základe experimentálnych korelácií Heskestad [7] odvodil výšku plameňa pri horení horľavých kvapalín na pevnom povrchu podľa nasledujúceho vzťahu:

$$L_f = 0.23 \cdot \dot{Q}^{\frac{2}{5}} - 1.02 \cdot D \quad (4)$$

kde  $L_f$  (m) je výška plameňa,  $\dot{Q}$  (kW) je rýchlosť uvoľňovania tepla a  $D$  (m) je priemer požiaru [17].

Podľa Thomasa možno strednú výšku plameňa vypočítavať nasledovným spôsobom:

$$L_f = 42 \cdot D \cdot \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}} \right)^{0.61} \quad (5)$$

kde  $L_f$  (m) je výška plameňa,  $\dot{m}''$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) je hmotnostná rýchlosť odhorievania,  $\rho_a$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) hustota okolitého vzduchu a  $g$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) je gravitačné zrýchlenie [18].

### 3 Výsledky a diskusia

#### 3.1 Výsledky vypočítaných parametrov *n*-Heptánu

Pre výpočet hmotnostnej rýchlosti odhorievania výpočtovou metódou sme použili vzťah (1), aj napriek tomu, že výpočtový vzťah bol odvodený pre nádoby s priemerom nad 0,2 m. Veľičiny, ktoré vstupujú do výpočtu sme odčítali z tabuľkových hodnôt, ktoré uvádzajú autori Stroup et al. [20] a sú uvedené v tab. 1.

Hodnota empirickej konštanty  $k\beta$  bola prevzatá z experimentálnych údajov z príručky SFPE Handbook, ktoré určil Babrauskas [19].

**Tab. 1** Characteristics of n-Heptane required for calculation [20]

**Tab. 1** Charakteristiky n-Heptánu potrebné pre výpočet [20]

Flammable liquid / Horľavá kvapalina	$\dot{m}''_{\infty}$ ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$k\cdot\beta$ ( $\text{m}^{-1}$ )	$\Delta H_c$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\chi_s$ (-)
n-Heptane / n-Heptán	0.101	1.1	44 600	675	0.7

Experimental values of the mass burning rate are divided into several groups, depending on the burning rate and flame height, at a stable mass burning rate representing the second phase of steady combustion  $\dot{m}''_1$ , the maximum mass burning rate at the boiling point of the liquid  $\dot{m}''_2$ , the average mass burning rate during the entire process of burning  $\dot{m}''_3$ , the mass burning rate in the second and third phases of combustion  $\dot{m}''_4$  and the mass burning rate in the third stage of combustion  $\dot{m}''_5$ .

Vypočítané hodnoty hmotnostnej rýchlosti odhorievania ( $\dot{m}''$ ) a rýchlosti uvoľňovania tepla ( $\dot{Q}$ ) podľa vzťahu (2) pri rozdielnych priemerov nádob sú uvedené v tab. 2.

Experimentálne hodnoty rýchlosti odhorievania sú v závislosti na rýchlosti horenia a výšky plameňa rozdelené do niekoľkých skupín, a to na stabilnú rýchlosť odhorievania predstavujúcu druhú fázu ustáleného horenia  $\dot{m}''_1$ , na maximálnu rýchlosť odhorievania pri vare kvapaliny  $\dot{m}''_2$ , na priemernú rýchlosť odhorievania počas celej doby horenia  $\dot{m}''_3$ , na rýchlosť odhorievania v druhej a tretej fáze horenia  $\dot{m}''_4$  a na rýchlosť odhorievania v tretej fáze horenia  $\dot{m}''_5$ .

**Tab. 2** Calculated values  $\dot{m}''$  and  $\dot{Q}$  depending on vessel diameter required to calculate mean flame height

**Tab. 2** Vypočítané hodnoty  $\dot{m}''$  a  $\dot{Q}$  v závislosti od priemeru nádoby potrebné na výpočet strednej výšky plameňa

Vessels Diameter / Priemer nádoby $D$ (m)	$\dot{m}''$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$\dot{Q}$ (kW)	$\dot{Q}$ ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ )
0.10	0.011	2.747	343.375
0.14	0.014	6.556	437.067
0.20	0.020	19.356	624.387
0.30	0.028	62.065	874.155

Comparison of experimental values and results from the calculation relation are shown in Fig. 2. Calculated values of the mass burning rate  $\dot{m}''$  obtained by the calculation method for vessels with diameter of 0.10 m and 0.14 m most closely approximated to the experimental value of average mass burning rate during the whole time of burning. Calculated values approximate the experimental values obtained in the third burning phase at the vessels with a

Porovnanie experimentálnych hodnôt a výsledkov z výpočtového vzťahu sú zobrazené na obr. 2. Nami vypočítané hodnoty hmotnostnej rýchlosti odhorievania  $\dot{m}''$  výpočtovou metódou sa pri nádobách s priermi 0,10 m a 0,14 m najviac približujú k experimentálnej hodnote priemernej rýchlosti odhorievania počas celej doby horenia. Pri nádobách s priermi 0,20 m a 0,30 m sa vypočítané hodnoty približujú k experimentálnym hodnotám získané v tretej fáze

diameter of 0.20 m and 0.30 m. The experiment showed that the rate of burning is gradually increasing when the vessels with larger diameter, from 0.1 to 0.3 m are used. The calculated values of the mass burning rate were also gradually increasing.

Furthermore, in Fig. 2, we can see that the burning liquid rate in vessels of different diameters is not the same. As mentioned by Demidov [21], this change in the rate of burning is related to the character of the vapor flux, which processing from the surface of the liquid to the combustion zone. At a diameter of more than 0.1 m, the flame begins to change its shape in the upper position, pulsates and divides into sections of varying volumes, transition from laminar to turbulent flow. This results in more intense heat transfer from the burning area to the surface of the liquid and consequently in increase in the rate of burning.

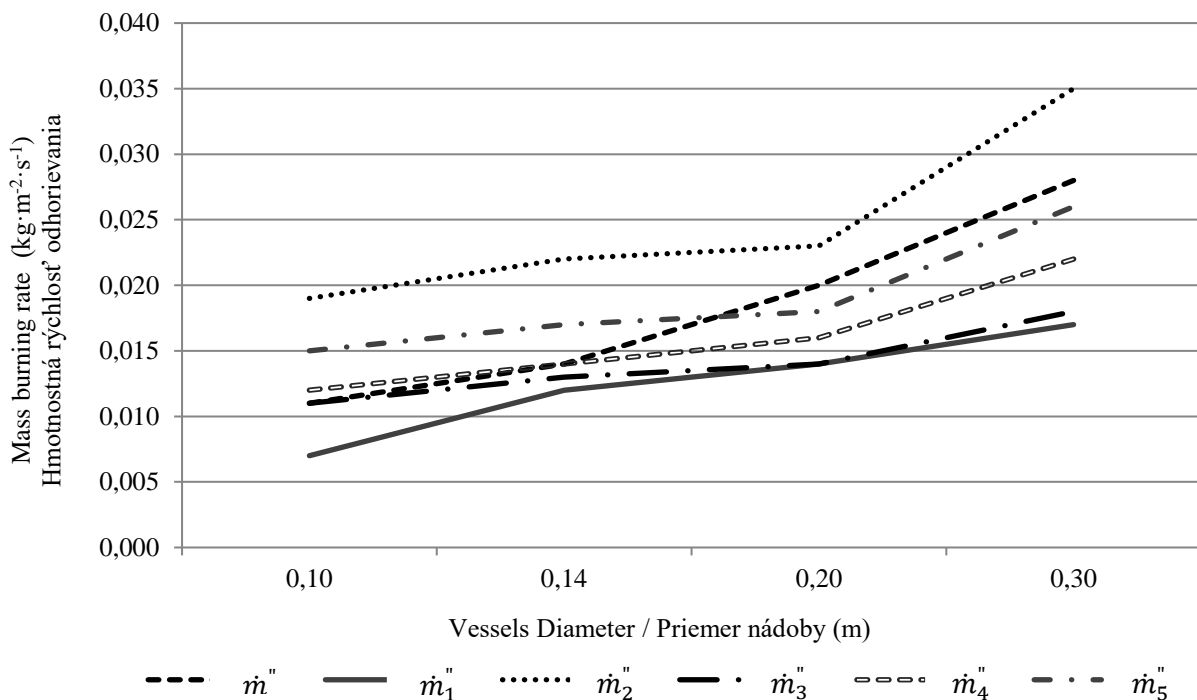
According to Novotný and Tureková [22], the other parameters of the vessel, the thickness of the walls, the height of the vessel, filling of the vessel with combustible liquid, the material of the vessel and the temperature of the liquid also have a significant influence on the rate of burning. Last but not least, combustible liquid representing pure substance or liquid mixture has also the impact.

horenia. Z experimentu vyplýva, že rýchlosť horenia sa od priemeru 0,1 až 0,3 m postupne zvyšuje. Nami vypočítané hodnoty rýchlosti odhorievania sa taktiež postupne zvyšujú.

Ďalej na obrázku 2 môžeme vidieť, že rýchlosť horenia kvapaliny v nádobách rôznych priemerov nie je rovnaká. Ako uvádza Demidov [21] táto zmena rýchlosti horenia súvisí s charakterom prúdu pár, ktoré postupujú od povrchu kvapaliny do pásma horenia. Pri priemere viac ako 0,1 m plameň začína v hornej polohe meniť tvar, pulzuje a rozdeľuje sa na časti o rôznych objemoch, prechod z laminárneho do turbulentného toku. To má za následok intenzívnejší prenos tepla z priestoru horenia k povrchu kvapaliny a následne aj k zväčšeniu rýchlosti horenia.

Ako uvádza Novotný a Tureková [22], výrazný vplyv na rýchlosť odhorievania majú aj ostatné parametre nádoby definujúce hrúbku stien, výšku nádoby, zaplnenie nádoby horľavou kvapalinou, materiál nádoby a teplota kvapaliny. V neposlednom rade má vplyv aj samotná horľavá kvapalina predstavujúca čistú látku alebo kvapalnú zmes.



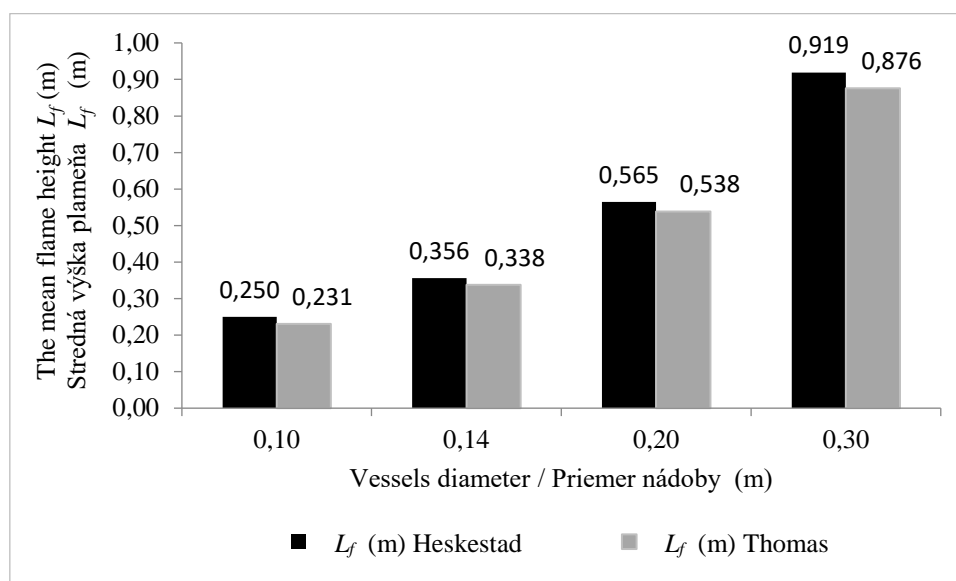


**Fig. 2** Comparison of the experimental and calculation values of the mass burning rate  
**Obr. 2** Porovnanie experimentálnych a vypočítaných hodnôt hmotnostnej rýchlosti odhorievania

We used two methods to calculate the mean flame height. The method by Heskestad and the method by Thomas. The results of the calculation of the mean flame height depending on the vessel diameter, differ slightly, where the higher flame values are achieved by the Heskestad method. This difference may be due to the input variables considered in the calculation. Heskestad considers the rate of heat release and the diameter of the vessel at the calculation.

On the contrary, according to Thomas, the mean flame height can be determined based on the vessel diameter, mass burning rate, air density and gravitational acceleration. Differences in values are shown in Fig. 3.

Na výpočet strednej výšky plameňa sme použili dve metódy. Metódu podľa Heskestada a metódu podľa Thomasa. Výsledky výpočtových hodnôt strednej výšky plameňa v závislosti od priemeru nádoby sa mierne odlišujú, kde vyššie hodnoty plameňa sa dosahujú pri metóde podľa Heskestada. Tento rozdiel môže byť spôsobený vstupnými veličinami, s ktorými sa uvažuje pri výpočte. Heskestad uvažuje pri výpočte najmä s rýchlosťou uvoľňovania energie a priemerom nádoby. Naopak podľa Thomasa strednú výšku plameňa možno určiť na základe priemeru nádoby, hmotnostnej rýchlosti odhorievania, hustoty vzduchu a gravitačného zrýchlenia. Rozdiely v hodnotách sú znázornené na obr. 3.



**Fig. 3** Comparison of the mean flame height calculated by Heskestad and Thomas methods

**Obř. 3** Porovnanie vypočítanej strednej výšky plameňa podľa metód Heskestada a Thomasa

In Table 3, we compared the results of the calculation methods with the experimental value for a 0.30 m diameter vessel. The experimental value obtained by Heskestad method corresponds to 96 % with the calculation method according to Thomas. The difference could be due to the values of the variables entering the calculation. The value of the combustion efficiency of 0.7 may differ from the actual burning value in the experiment. The difference can also be caused by the value of heat release rate entering the calculation.

V tabuľke 3 uvádzame porovnanie výsledkov výpočtových metód s experimentálnou hodnotou pri nádobe s priemerom 0,30 m. Experimentálna hodnota sa na 96 % zhoduje s výpočtovou metódou podľa Thomasa. Tento rozdiel mohol byť spôsobený hodnotami veličín vstupujúcimi do výpočtu. Nami dosadzovaná hodnota účinnosti spaľovania 0,7 sa môže líšiť od skutočnej dosiahnutej hodnoty pri horení v experimente. Taktiež môže byť rozdiel spôsobený hodnotou rýchlosti uvoľňovania tepla, ktorá vstupuje do výpočtu.

**Tab. 3** Comparison of the mean height obtained by the calculation method with the experimental value

**Tab. 3** Porovnanie strednej výšky plameňa získanej výpočtovou metódou s experimentálnou hodnotou

Flammable liquid / Horľavá kvapalina	Diameter / Priemer $D$ (m)	Calculation method / Výpočtová metóda		Experimental value / Experimentálna hodnota $L_f$ (m) [8]
		$L_f$ (m) Heskestad	$L_f$ (m) Thomas	
n-Heptane / n-Heptán	0.30	0.919	0.876	0.839

### 3.2 Results of S-500 diesel and gasoline calculation methods

We used the equation (1) to calculate the mass burning rate by the calculation method. The values of the variables entering the calculation were obtained from the experimental values and are presented in Tab. 4.

### 3.2 Výsledky výpočtových metód benzínu a motorovej nafty S-500

Pre výpočet hmotnostnej rýchlosti odhorievania výpočtovou metódou sme použili vzťah (1). Hodnoty veličín vstupujúce do výpočtu sme získali z experimentálnych hodnôt a sú uvedené v tab. 4.

**Tab. 4** Gasoline and diesel S-500 fuel characteristics needed for calculation [20]  
**Tab. 4** Charakteristiky benzínu a motorovej nafty S-500 potrebné pre výpočet [20]

Flammable liquid / Horľavá kvapalina	$\dot{m}''_{\infty}$ ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$k\cdot\beta$ ( $\text{m}^{-1}$ )	$\Delta H_c$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
Gasoline / Benzín	0.055	2.1	43 700	745
Diesel fuel S-500 / Motorová nafta S-500	0.045	2.1	44 400	840

Calculated values of the mass burning rate and ( $\dot{m}''$ ) the rate of heat release ( $\dot{Q}$ ) calculated according to the relation (3) at the different vessel diameters are given in Tab. 5 and 6.

Vypočítané hodnoty hmotnostnej rýchlosti odhorievania ( $\dot{m}''$ ) a rýchlosti uvoľňovania tepla ( $\dot{Q}$ ) vypočítanej podľa vzťahu (3) pri rozličných priemerov nádob sú uvedené v tab. 5 a 6.

**Tab. 5** Comparison of calculated values ( $\dot{m}''$ ), experimental and literature data  
**Tab. 5** Porovnanie hodnôt ( $\dot{m}''$ ) vypočítaných, experimentálnych a údajov z literatúry

Diameter / Priemer $D$ (m)	$\dot{m}''$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )					
	Calculated values / Vypočítané hodnoty		Experimental value / Experi- mentálna hodnota		Data from literature / Údaje z literatúry [23, 18]	
	Gasoline / Benzín	Diesel fuel S-500 / Motorová nafta S-500	Gasoline	Diesel fuel S-500	Gasoline	Diesel fuel S-500
0.04	0.0044	0.0036	0.0141	0.0162	-	-
0.20	0.0188	0.0154	0.0165	0.0085	0.019	-
0.40	0.0313	0.0256	0.0199	0.0133	0.030	-
0.80	0.0447	0.0366	0.0313	0.0252	0.045	-
4.28	0.0550	0.0450	0.0451	0.0306	0.055	0.044

As we can see in the Tab. 5, calculated values of the mass burning rate of fuel per unit surface area of the liquid mixtures increase with the

Ako môžeme vidieť v tab. 5, vypočítané hodnoty plošnej rýchlosti odhorievania kvapalných zmesí sa zvyšujú s priemerom nádob. Pre väčšie

diameter of the vessels. For larger diameters, the mass burning rate for gasoline is about  $0.055 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , which is in line with the value in literature [23]. However, the comparison with the experimental value of  $0.0451 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  differs substantially. This difference may be due to a different methodology for determining this parameter. Also, in the case of a liquid mixture, the combustion process is more complicated opposite pure flammable liquids.

Similar results can also be observed for smaller vessel diameters. Further, we can notice that in the case of a vessel ( $D = 4.28 \text{ m}$ ), the gasoline and diesel fuel values approximate to the asymptotic mass burning rate.

priemery sa hodnota rýchlosti odhorievania pre benzín pohybuje okolo  $0,055 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , čo je v zhode s hodnotou z literatúry [23]. Avšak porovnanie s experimentálnou hodnotou  $0,0451 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  sa podstatne líši. Tento rozdiel môže byť spôsobený rozdielnou metodikou stanovenia tohto parametra. Taktiež v prípade kvapalnej zmesi je proces horenia komplikovanejší oproti čistým horľavým kvapalinám.

Obdobné výsledky hodnôt môžeme pozorovať aj v prípade menších priemerov nádob. Ďalej si môžeme všimnúť, že v prípade nádoby ( $D = 4,28 \text{ m}$ ) sa hodnoty benzínu a motorovej nafty približujú k hodnote asymptotickej hmotnostnej rýchlosti odhorievania.

**Tab. 6** Comparison of values ( $\dot{Q}$ ) calculated, experimental data and from the literature

**Tab. 6** Porovnanie hodnôt ( $\dot{Q}$ ) vypočítaných, experimentálnych a údajov z literatúry

Diameter / Priemer $D$ (m)	$\dot{Q}$ (kW)					
	Calculated values / Vypočítané hodnoty		Experimental value / Experi- mentálna hodnota		Data from literature / Údaje z literatúry [23, 18]	
	Gasoline / Benzín	Diesel fuel S-500 / Motorová nafta S-500	Gasoline	Diesel fuel S-500	Gasoline	Diesel fuel S-500
0.04	0.0196	0.0163	0.0624	0.0718	-	-
0.20	8.853	7.3679	7.7881	4.0191	8.9458	-
0.40	97.677	81.169	62.229	41.577	93.623	-
0.80	799.432	655.054	559.42	451.13	804.25	-
4.28	34 574.84	28 741.64	28 347	19 227	34 575	28 103

A similar trend of values we can observe also in the case of the rate of heat release, where the calculated values according to the equation (3), approximate more the values introduced in available literature than the experimental values. This difference is mainly caused by the value of the mass burning rate, but also by the amount of water contained under the fuel. With increasing diameter of the vessels, the rate of heat release increased, what is the consequence of the larger volume of fuel in the combustion zone.

Tables 7 and 8 shows the results of the mean flame height values calculated by the above mentioned methods. Differences of calculated

Obdobný trend hodnôt môžeme pozorovať aj v prípade rýchlosti uvoľňovania tepla, kde nami vypočítané hodnoty podľa vzťahu (3) sa približujú viac k údajom z dostupnej literatúry ako k experimentálnym hodnotám. Tento rozdiel je ovplyvnený najmä hodnotou hmotnostnej rýchlosti odhorievania, ale i množstvom vody obsiahnutej pod palivom. So zväčšovaním priemeru nádob sa rýchlosť uvoľňovania tepla zvyšovala, čo je dôsledok väčšieho objemu paliva v zóne horenia.

V tabuľkách 7 a 8 uvádzame výsledky hodnôt strednej výšky plameňa vypočítané podľa spomínaných metód. Rozdiely vypočítaných hodnôt metódami Heskestada a Thomasa sú

values by the Heskestad and Thomas method are distinct especially at vessels with a diameter of 0.04 m and 4.28 m. Compared to a pure flammable liquid, where the flame height corresponded to 96 % with the calculated value, the differences are markedly different in case of liquid mixtures. The reason is that the process of burning in the case of liquid mixtures is more complicated and takes place in several phases. One of the processes is e.g. cracking, where during burning, a part of the energy is consumed to cleave hydrocarbons to radicals with shorter-chain. In addition, if a chemically pure liquid burns, the composition of the vapor above the level does not differ from the composition of the liquid. In the case of burning of the liquid mixtures, fractional distillation is carried out in the upper layer and the vapor composition differs from the composition of the liquid. In their burning, lighter fractions are evaporated more intensely and the liquid phase changes its composition and properties. Also, in the case of real fires, all real effects are considered, e.g. the presence of water at the bottom of the vessel.

zreteľné najmä pri nádobách s priemerom 0,04 m a 4,28 m. Oproti čistej horľavej kvapaline, kde sa hodnota výšky plameňa zhodovala na 96 % s vypočítanou hodnotou, v prípade kvapalných zmesí sú rozdiely markantne odlišné. Dôvodom je, že proces horenia v prípade kvapalných zmesí je komplikovanejší a prebieha vo viacerých fázach. Jedným z procesov je napr. krakovanie, kde počas horenia sa časť energie spotrebuje na štiepenie uhl'ovodíkov na radikály s kratšími reťazcami. Okrem toho, ak horí chemicky čistá kvapalina, zloženie pár nad hladinou sa nelíši od zloženia kvapaliny. V prípade horenia kvapalných zmesí prebieha v jej hornej vrstve frakčná destilácia a zloženie pár sa líši od zloženia kvapaliny. Pri ich horení dochádza k intenzívnejšiemu vyparovaniu ľahších frakcií, v dôsledku čoho kvapalná fáza mení svoje zloženie a vlastnosti. Takisto v prípade reálnych požiarov sú zohľadnené všetky reálne vplyvy napr. prítomnosť vody na dne nádoby.

**Tab. 7** Comparison of the mean flame height of the gasoline obtained by the calculation method with the experimental value

**Tab. 7** Porovnanie strednej výšky plameňa benzínu získanej výpočtovou metódou s experimentálnou hodnotou

Diameter / Priemer $D$ (m)	Calculation method / Výpočtová metóda		Experimental value / Experimentálna hodnota $L_f$ (m) [1]
	$L_f$ (m) Heskestad	$L_f$ (m) Thomas	
0.04	0.007	0.073	0.109
0.20	0.346	0.542	0.510
0.40	1.030	1.197	0.560
0.80	2.517	2.409	1.400
4.28	10.674	8.769	5.000



**Tab. 8** Comparison of the mean flame height of the diesel S-500 obtained by the calculation method with the experimental value

**Tab. 8** Porovnanie strednej výšky plameňa motorovej nafty S-500 získanej výpočtovou metódou s experimentálnou hodnotou

Diameter / Priemer <i>D</i> (m)	Calculation method / Výpočtová metóda		Experimental value / Experimentálna hodnota $L_f$ (m) [1]
	$L_f$ (m) Heskestad	$L_f$ (m) Thomas	
0.04	0.004	0.065	0.074
0.20	0.307	0.480	0.270
0.40	0.927	1.059	0.455
0.80	2.262	2.132	1.160
4.28	9.602	7.759	3.800

#### 4 Conclusions

In combustion process of flammable liquids, it is important to monitor their fire properties, especially the mass burning rate, the rate of heat release, the flame height, which are the main indicators of the fire hazard of flammable liquids.

In this work, we focused on implementation of calculation methods used to calculate the above-mentioned characteristics. We compared the calculation values with experimental values obtained from burning of pure flammable liquids (n-Heptane) and liquid mixtures (gasoline, diesel fuel S-500) in vessels of different diameters.

The mass burning rate of liquid mixtures varies in the course of a fire depending on their characteristic and the amount of heat transfer from the burning zone to the surface of the liquid. The burning rate is not a constant value and varies in real fire conditions depending on temperature, vessel diameter, vessel level, liquid composition, wind speed and many other factors. Therefore, it is important for the calculation relation also to take in account other factors, not just the diameter of the vessel.

Experimental values of the mass burning rate of n-Heptane are divided into several groups according to the burning phases. Calculated values of the mass burning rate at the vessel diameter of 0.10 m and 0.14 m corresponded to the average burning rate during the entire combustion process obtained by the experiment. With the vessels diameter of 0.20 m and 0.30 m, the calculated values approximately

#### 4 Záver

Pri procese horenia horľavých kvapalín je dôležité sledovať ich požiarotechnické charakteristiky najmä rýchlosť odhorievania, rýchlosť uvoľňovania tepla, výšku plameňa, ktoré sú hlavnými ukazovateľmi nebezpečenstva pri požiaroch horľavých kvapalín.

V práci sme sa zamerali na zistenie zhody výsledkov výpočtových metód slúžiacie na výpočet vyššie uvedených charakteristík. Porovnávali sme výpočtové hodnoty s experimentálnymi hodnotami pri horení čistých horľavých kvapalín (n-Heptán) a kvapalných zmesí (benzín, motorová nafta S-500) v nádobách rôznych priemerov.

Rýchlosť odhorievania kvapalných zmesí sa v priebehu požiaru mení v závislosti na ich vlastnostiach a množstvom prestupujúceho tepla z pásma horenia na povrch kvapaliny. Rýchlosť horenia nie je konštantnou hodnotou a v reálnych podmienkach požiaru sa mení v závislosti na teplote, priemere nádoby, výške hladiny v nádobe, zloženia kvapaliny, rýchlosti vetra a mnoho ďalších faktorov. Preto je dôležité, aby výpočtový vzťah zohľadňoval i ostatné faktory, nie len priemer nádoby.

Experimentálne hodnoty hmotnostnej rýchlosti odhorievania n-Heptánu sme rozdelili do niekoľkých skupín podľa fáz horenia. Vypočítané hodnoty hmotnostnej rýchlosti odhorievania pri priemere nádoby 0,10 m a 0,14 m sa zhodovali s priemernou rýchlosťou odhorievania počas celej doby horenia získanej autormi experimentom. Pri priemere nádob 0,20 m a 0,30 m sa vypočítané hodnoty približne zhodovali

correspond with the experimental values obtained in the third combustion phase.

In case of the rate of heat release, the value increased with increasing the diameter of the vessel and the larger volume of fuel delivered. Differences in the results related to the calculation values, the experimental values and the values published in the literature can be attributed to the composition of mixed flammable liquids (gasoline, diesel fuel S-500).

In case of the mean flame height, the results of the calculation methods are consistent with the chemically pure liquids, compared to the liquid mixtures. In the case of n-Heptane at a vessel with diameter of 0.30 m, the experimental result at 96 % was consistent with the Thomas calculation method. As mentioned in the article, not only the diameter of the vessel has a major effect on the flame height, but there are other parameters that affect it considerably.

#### Acknowledgments

This work was supported by the KEGA Agency under the project No. 012TU Z-4/2016.

s experimentálnymi hodnotami získanými v tretej fáze horenia.

V prípade rýchlosti uvoľňovania tepla sa hodnota zvyšovala so zväčšením priemeru nádoby a väčším objemom dodaného paliva. Rozdiely výsledkov výpočtových hodnôt s experimentálnymi hodnotami a s hodnotami publikovanými v literatúre je možné pripísať zloženiu zmesných horľavých kvapalín (benzín, motorová nafta S-500).

V prípade strednej výšky plameňa sú výsledky výpočtových metód v zhode v prípade chemicky čistých kvapalín oproti kvapalným zmesiam. V prípade n-Heptánu pri priemere nádoby 0,30 m sa experimentálny výsledok na 96 % zhodoval s výpočtovou metódou podľa Thomasa. Ako už bolo v článku spomenuté, nie len priemer nádoby má hlavný vplyv na výšku plameňa, ale sú tu aj ostatné parametre, ktoré ju podstatne ovplyvňujú.

#### Podakovanie

Táto práca vznikla vďaka podpore KEGA č. 012TU Z-4/2016.

#### References / Literatúra

- [1] Leite RM, Centeno FR. 2018. Effect of tank diameter on thermal behavior of gasoline and diesel storage tanks fires. *Journal of Hazardous Materials* 342:544-552.
- [2] Chatris JM, Quintela J, Folch J, Planas E, Arnaldos J, Casal J. 2001. Experimental study of burning rate in hydrocarbon pool fires. *Combustion and Flame* 126:1373-1383.
- [3] Jiang P, Lu S-x. 2016. Pool Fire Mass Burning Rate and Flame Tilt Angle under Crosswind in Open Space. *Procedia Engineering* 135:261-274.
- [4] Zhen C, Xiaolin W. 2014. Analysis for Combustion Properties of Crude Oil Pool Fire. *Procedia Engineering* 84:514-523.
- [5] Babrauskas V. 1995. Designing products for fire performance: the State of the art of test methods and fire models. *Fire Safety Journal* 24:299-312.
- [6] Thomas PH. 1963. The size of flames from natural fires. *Symposium (International) on Combustion* 9:844-859.
- [7] Heskestad G. 1983. Luminous heights of turbulent diffusion flames. *Fire Safety Journal* 5:103-108.
- [8] Kang Q, Lu S, Chen B. 2010. Experimental study on burning rate of small scale heptane pool fires. *Chinese Science Bulletin* 55:973-979.
- [9] Kong D, Liu P, Zhang J, Fan M, Tao C. 2017. Small scale experiment study on the characteristics of boilover. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 48:101-110.
- [10] Ferrero F, Muñoz M, Arnaldos J. 2007. Effects of thin-layer boilover on flame geometry and dynamics in large hydrocarbon pool fires. *Fuel Processing Technology* 88:227-235.
- [11] Kuang C, Li Y, Zhu S, Li J. 2013. Influence of Different Low Air Pressure on Combustion Characteristics of Ethanol Pool Fires. *Procedia Engineering* 62:226-233.
- [12] Karlsson B, Quintiere JG. 2000. *Enclosure fire dynamics*. CRC Press.
- [13] Kučera P, Kaiser R, Pavlík T, Pokorný J. 2009. *Požární inženýrství: Dynamika požáru. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě*.

- [14] Bursíková P, Dvořák, O. 2009. Předpověď parametrů požárů rozlitých hořlavých kapalin. *Spektrum* 9:11-14.
- [15] Kučera P, Pokorný J, Pavlík T. 2013. Požární inženýrství: Aktivní prvky požární ochrany. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě.
- [16] Society of Fire Protection Engineers. 2002. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. National Fire Protection Association.
- [17] Stratton BJ, Spearpoint M, Fleischmann C, Engineering UoCDoC. 2005. Determining Flame Height and Flame Pulsation Frequency and Estimating Heat Release Rate from 3D Flame Reconstruction. Department of Civil Engineering, University of Canterbury.
- [18] Iqbal N, Salley MH. 2004. Fire Dynamics Tools (FDTs): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program : Final Report. United States Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research.
- [19] Babrauskas V. 1995. Burning rates. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA.
- [20] Stroup D, Taylor G, Hausman G. 2013. Fire Dynamics Tools (FDT<sup>s</sup>): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program. Supplement 1. United States Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research.
- [21] Demidov PG. 1963. Horenie a vlastnosti horľavých látok. Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry.
- [22] Novotný M, Tureková I. 2010. Vplyv hrúbky steny a výšky naplnenia modelovej nádoby na rýchlosť odhorievania etanolu. In *Environmentálne a bezpečnostné aspekty požiarov a havárií 2010: Konferencia s medzinárodnou účasťou*. Trnava: AlumniPress.226-236.
- [23] Babrauskas V. 1992. *Heat Release Rates in Fires*. E&FN Spon, Londres. 644 p.