

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

124 DPM – Diplomová práce

**CHARAKTERISTIKA POŽÁRU HOŘLAVÝCH
KAPALIN NA OHRANIČENÉ PLOŠE**

CHARACTERISTICS OF POOL FIRE BURNING

Bc. Daniela Divišová

Vedoucí práce: Ing. Marek Pokorný, Ph.D.

2018

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Charakteristika požáru hořlavých kapalin na ohraničené ploše* jsem vypracovala samostatně pod vedením Ing. Marka Pokorného, Ph.D. a s použitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 7.1.2018

.....
Bc. Daniela Divišová

Poděkování

V přední řadě bych chtěla poděkovat rodině a přítelovi za podporu nejenom v průběhu studia. Dále bych chtěla velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Marku Pokornému, Ph.D., za vstřícnost a odborné vedení práce.

Obsah

Abstrakt	7
Abstract	7
Seznam použitých symbolů a zkratk	8
1 Úvod	1
1.1 Motivace	1
1.2 Struktura	2
1.3 Cíle	2
2 Současný stav poznání	3
2.1 Úvod	3
2.2 Požárně technické charakteristiky	3
2.2.1 Teplota vzplanutí	4
2.2.2 Teplota vznícení	5
2.2.3 Oblast výbušnosti	8
2.3 Parametry ovlivňující proces hoření	9
2.3.1 Teplota varu	9
2.3.2 Rychlost odhořívání	11
2.3.3 Rychlost uvolňování tepla (HRR)	13
2.3.4 Doba trvání hoření	15
2.3.5 Charakteristika plamene	15
2.3.6 Možnosti hašení	19
2.4 Procesy sdílení tepla hořících kapalin	21
2.4.1 Kondukce	21
2.4.2 Radiace	21
2.4.3 Konvekce	22
2.4.4 Entalpická bilance hmotnostního toku	23
2.4.5 Radiační tok od plamene	24
2.5 Závěr	25
3 Experimentální hodnocení parametrů procesu hoření kapaliny v nádobě	27
3.1 Úvod	27
3.1.1 Požární scénáře	28
3.1.2 Hořlavé kapaliny	29
3.1.3 Aparatura	29
3.1.4 Software	30
3.1.5 Průběh experimentů	31
3.2 Experiment 1: Vliv geometrie nádoby na parametry hoření methanolu	32
3.2.1 Požární zkouška	32
3.2.2 Matematický model	36
3.2.3 Výsledky a diskuze	39
3.3 Experiment 2: Vliv geometrie nádoby na parametry hoření motorové nafty	40
3.3.1 Požární zkouška	40
3.3.2 Shrnutí	44
3.4 Experiment 3: Proces hoření kapalin v místnosti	44
3.4.1 Požární zkouška – motorová nafta	45
3.4.2 Požární zkouška – methanol	47
3.4.3 Výsledky a diskuze	48
3.5 Kalibrační methanolová zkouška	49

3.5.1	Úvod.....	49
3.5.2	Požární zkouška.....	49
3.5.3	Matematický model.....	53
3.5.4	Výsledky a diskuze.....	56
4	Závěr a doporučení.....	57
5	Literatura.....	60
	Seznam obrázků.....	62
	Seznam tabulek.....	63
	Přílohy.....	66

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá hořlavými kapalinami se zaměřením na hoření kapaliny v nádobě. Definuje důležité požárně technické charakteristiky kapalin. Dále popisuje parametry, které ovlivňují proces hoření kapaliny tzn. teplotu varu, rychlost odhořívání, průběh HRR nebo charakteristiku plamene, přičemž zmiňuje i možnosti následného hašení kapalin. Práce dále uvádí způsoby přenosu tepla v hořící kapalině, tj. kondukcí, konvekci a radiaci. Praktická část práce se věnuje provedeným experimentům, které jsou následně simulovány v matematickém CFD modelu pomocí software FDS. Experimenty jsou zaměřeny, jak na volné hoření, tak hoření v místnosti, a to motorové nafty a methanolu. Sledovanou hodnotou je hmotnostní úbytek, ze kterého se pomocí analytických výpočtů získávají další parametry hoření – HRR, doba trvání hoření a charakteristika plamene. Praktická část diplomové práce se věnuje i kalibrační methanolové zkoušce kalorimetru s následným porovnáním hodnot z předchozího experimentu.

Klíčová slova

Hořlavá kapalina; plošný požár; požárně technické charakteristiky; HRR; hmotnostní úbytek; přenos tepla; kalibrační methanolová zkouška; methanol; motorová nafta; CFD model; FDS

Abstract

The diploma thesis deals with flammable liquids, focusing on the pool fire. It defines important fire technical characteristics of liquids. It also describes the parameters that influence the burning process such as burning temperature, burning rate, HRR or flame characteristics, mentioning the possibilities of subsequent extinguishing liquids. Theoretical part also describes the processes of heat transfer in the pool fire as conduction, convection and radiation. The practical part deals with the experiments, which are subsequently simulated in the mathematical CFD model using the software FDS. The experiments are focused on free burning and burning in the room of methanol and diesel fuel. The observed value is the weight loss, from which further combustion parameters as HRR, duration of combustion and flame characteristics. The practical part of the diploma thesis also deals with the calibration methanol test of the calorimeter with comparison of the values from the previous experiment.

Keywords

Flammable liquid; pool fire; fire technical characteristics; HRR; burning rate; heat transfer; calibration methanol test; methanol; diesel fuel; CFD model; FDS

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

S	Plocha	m^2
D	Průměr	m
A_f	Plocha požáru	m^2
ΔH	Reakční teplo	kJ/mol
ΔH_{eff}	Efektivní výhřevnost	kJ/kg
Q	Rychlost uvolňování tepla	W
ΔH_c	Celková výhřevnost	kJ/kg
H	Počáteční výška hladiny kapaliny	m
h	Počáteční výška vodní vrstvy v nádobě	m
g	Gravitační zrychlení	m/s^2
L_f	Výška plamene	m
Re	Reynoldsovo číslo	-
Δh_c	Měrná výparná entalpie kapaliny	kJ/kg
T_f	Teplota plamene	K
T_s	Teplota stěn nádoby	K
T_l	Teplota kapaliny	K
T_b	Teplota varu kapaliny	K
T_∞	Teplota okolního vzduchu	K
\dot{m}''	Hmotnostní rychlost odhořívání	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
\dot{m}''_∞	Asymptotická hmotnostní rychlost odhořívání kapaliny	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
\dot{Q}_{knd}	Tepelný tok kondukcí	W
\dot{Q}_{rad}	Tepelný tok radiací	W
\dot{Q}_{knv}	Tepelný tok konvekcí	W
\dot{q}_{knv}	Intenzita tepelného toku konvekcí	W/m^2
\dot{q}_{knd}	Intenzita tepelného toku kondukcí	W/m^2
\dot{q}_r	Intenzita tepelného toku radiací	W/m^2
\dot{q}_{rr}	Intenzita tepelného toku re-radiací	W/m^2

c_p	Tepelná kapacita kapaliny	J/K
grad T	Změna teploty	K
R	Vzdálenost ke středu plamene od předmětu	m
E	Sálavý výkon plamene	W/m ²
$F_{1 \rightarrow 2}$	Konfigurační faktor	-
V	Objem	m ³
v_1	Rychlost odhořívání kapaliny	m/h
v_2	Rychlost prohořívání vrstvy kapaliny	m/h

Řecké symboly

λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m · K)
α	Koeficient přestupu tepla	K/(m ² · s)
$k\beta$	Materiálová charakteristika kapalin	(1/m)
ρ	Hustota	kg/m ³
ρ_a	Hustota vzduchu	kg/m ³
ε	Emisivita plamene	-
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	W/(m ² · K ⁴)
χ_f	Součinitel celkové sálavé energie	-
u	Objemová rychlost odhořívání	m ³ /(m ² · s)
μ	Viskozita	kg/(m · s)
χ_s	Součinitel efektivního spalování	-

Zkratky

CFD	Výpočtová dynamika tekutin (angl. = Computational Fluid Dynamics)
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
PTCH	Požárně technické charakteristiky
HRR/RHR	Rychlost uvolňování tepla (angl. = Heat Release Rate)
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov
IZS	Integrovaný záchranný systém

1 Úvod

1.1 Motivace

Kapalina je hořlavá, pokud splňuje následující kritéria, která jsou daná příslušnou normou na hořlavé kapaliny ČSN 65 0201 [1], tzn., aby při atmosférickém tlaku 101 kPa:

- byla při teplotě +35 °C látkou kapalnou,
- měla při teplotě +50 °C tlak nasycených par nejvýše 294 kPa,
- měla bod vzplanutí nejvýše +250 °C,
- měla bod hoření.

Pokud kapalina splňuje všechny výše uvedené body, je považována za hořlavou a musí se při jejím skladování a manipulaci dbát na zvýšenou bezpečnost.

Hořlavé kapaliny mají mnohé přednosti jako mísitelnost, dělitelnost či schopnost vypařování se. Jejich využití je proto, napříč různými obory či technologiemi, vysoké. S širokým využitím se pojí i snadná dostupnost, která může vést k potenciálnímu riziku vzniku požáru např. vlivem neodborné manipulace či skladování. Značného rizika spojeného s hořením nebo i následným hašením hořlavých kapalin se lze vyvarovat díky znalostem požárně technických charakteristik (PTCH). PTCH vychází z fyzikálních a chemických vlastností dané kapaliny a do značné míry předpovídají chování dané kapaliny, a to nejenom při požáru. Na základě znalosti PTCH je poté možné volit účinná preventivní opatření na ochranu proti vzniku požáru.

Podle ohraničené hladiny lze rozdělit způsob hoření kapaliny na dva základní případy. Hoření kapaliny v neohraničeném prostoru se nazývá *tryskající požár* (angl. = spill fire). Jako příklad tryskajícího požáru může sloužit např. požár při úniku kapaliny z potrubí. Naopak hoření kapaliny v uzavřeném prostoru s volnou hladinou, tedy v nádobě, se nazývá *plošný požár* (angl. = pool fire). Plošný požár kapaliny patří k nejčastějším havarijním projevům zejména v průmyslových a skladovacích prostorách.

Hoření kapaliny se, zejména v nádobách o velkých průměrech, vyznačuje vysokým sálavým teplem. Sálavé teplo může být nebezpečné pro ostatní předměty umístěné v okolí hořící kapaliny nebo při zásahu složek IZS. Dále je u hoření kapaliny charakteristický velmi rychlý nárůst teplot, kdy se kapalina dostává v podstatě ihned po iniciaci do fáze ustáleného hoření.

Tato práce je zaměřená pouze na hoření kapaliny v nádobě. Diplomová práce je rozdělena na část teoretickou, kde shrnuje současné poznatky o hoření kapalin a část experimentální, která uvažuje konkrétní dvě kapaliny – methanol a motorovou naftu. V rámci experimentální části byly provedeny malorozměrové požární zkoušky, při kterých byl sledován průběh hoření kapaliny s následnou simulací pomocí matematického CFD modelu. Výhodou malorozměrových požárních zkoušek oproti velkorozměrovým je především jejich proveditelnost a nákladnost. Při malorozměrové požární zkoušce se simuluje reálný požár v menším měřítku. Naměřené výsledky poté pomáhají lépe poznávat chování kapaliny při hoření.

1.2 Struktura

Kapitola „*Úvod*“ zahrnuje motivaci pro tuto práci, včetně uvedení do problematiky hořlavých kapalin. Dále jsou zde sestaveny cíle a struktura diplomové práce. Teoretická kapitola „*Současný stav poznání*“ vyjmenovává PTCH důležité pro hořlavé kapaliny. Tato kapitola dále zmiňuje možnosti hašení hořlavých kapalin v závislosti na jejich druhu a popisuje přenosy tepla v hořící kapalině. Kapitola „*Experimentální hodnocení parametrů procesu hoření kapaliny v nádobě*“ se zabývá praktickým řešením volného hoření kapalin a hoření kapalin v místnosti. Uvažuje pouze dvě konkrétní kapaliny – methanol a motorovou naftu. Vybrané požární zkoušky jsou simulovány v matematickém CFD modelu pomocí software FDS a dále zpracovány analytickými výpočty. Kapitola „*Závěr a doporučení*“ rekapituluje a hodnotí získané informace z této práce a následně navrhuje možnosti pro práce budoucí.

1.3 Cíle

Stanovené cíle diplomové práce jsou:

- definice základních PTCH hořlavých kapalin a parametrů jejich procesu hoření,
- vysvětlení procesů sdílení tepla při požáru hořlavých kapalin v nádobě,
- analýza naměřených dat z uskutečněných požárních zkoušek s hořlavými kapalinami s následnou diskuzí výsledků,
- simulace vybraných požárních scénářů pomocí matematického CFD modelu,
- zpracování naměřených dat pomocí analytických výpočtů,
- popsání průběhu methanolové kalibrační zkoušky s následným vyhodnocením naměřených dat a simulací pomocí matematického CFD modelu.

2 Současný stav poznání

2.1 Úvod

Současný stav poznání shrnuje problematiku požáru hořlavých kapalin na ohraničené ploše, tedy v nádobě. Definuje významné požárně technické charakteristiky a parametry hořlavých kapalin. Dále popisuje možnosti hašení a způsoby přenosu tepla hořící kapaliny.

2.2 Požárně technické charakteristiky

Hořlavá kapalina se vypařuje za každé teploty. Čím je teplota kapaliny vyšší, tím je proces vypařování rychlejší. Následně uvolněné páry kapaliny se poté mísí s okolním vzduchem a vzniká tzv. *hořlavá směs*, kterou je nutno iniciovat pro následný proces hoření.

Způsoby iniciace procesu hoření mohou být různé a s pomocí fyzikálně chemických vlastností je popisují požárně technické charakteristiky (PTCH). Mezi PTCH hořlavých kapalin patří zejména teplota vzplanutí, teplota vznícení a oblast výbušnosti. PTCH jsou nestálé a časově závislé, tudíž jsou stanovovány, dle příslušných zkušebních norem, experimentálně v akreditovaných zkušebnách. V praxi se na základě znalostí PTCH kapalin volí např. vhodný taktický postup nasazení sil a prostředků při zásahu IZS nebo vhodné zabezpečení oblasti s výskytem této kapaliny. Jak PTCH, tak fyzikálně chemické vlastnosti jednotlivých hořlavých kapalin lze dohledat v příslušném bezpečnostním listě (obr. 1).

ODDÍL 9: Fyzikální a chemické vlastnosti	
- 9.1 Informace o základních fyzikálních a chemických vlastnostech	
- Vzhled:	
Skupenství:	Kapalné
Barva:	Bezbarvá
Zápach (vůně):	Alkoholový
Prahová hodnota zápachu:	10-20000 ppm
- Hodnota pH:	Neutrální
- Změna stavu	
Teplota (rozmezí teplot) tání:	-98 °C
Teplota (rozmezí teplot) varu:	64,7 °C
- Bod vzplanutí:	9,7 °C
- Teplota rozkladu:	Není určeno.
- Samozápalnost:	Teplota samovznícení: 455 °C
- Nebezpečí exploze:	U produktu nehrozí nebezpečí exploze. Při používání může vytvářet hořlavé nebo výbušné směsi par se vzduchem.
- Meze výbušnosti:	
Dolní mez:	5,5 Vol %
Horní mez:	36,5 Vol %
- Tenze par při 20 °C:	128 hPa
	při 50 °C 552 hPa
- Hustota při 20 °C:	0,79 g/cm ³
- Relativní hustota par při 20 °C	1,11 (air=1)
- Rychlost odpařování při 20 °C	5,3 (Diethylether=1)
- Rozpuštěnost ve / směřitelnost s vodě:	Úplně mísitelná.
- Rozdělovací koeficient n-oktanol/voda:	-0,77 log Pow
- Viskozita:	
Dynamicky při 20 °C:	0,597 mPas

obr. 1: Výňatek fyzikálních a chemických vlastností z bezpečnostního listu pro methanol [2]

2.2.1 Teplota vzplanutí

Zásadní a velmi důležitou PTCH pro hořlavé kapaliny je *teplota (bod) vzplanutí*. Teplota vzplanutí udává nejnižší teplotu kapaliny, při které se uvolní takové množství par, které po smíšení s okolním vzduchem vytvoří hořlavou směs. Hořlavá směs je poté schopná vlivem krátkého přiblížení iniciačního zdroje vzplanout a opět zhasnout. Pokud hořlavá směs vzplane a dále hoří, alespoň 5 s bez přerušení, dochází k procesu zvanému *trvalé hoření*.

Proces vzplanutí je závislý na rychlosti odpařování hořlavé směsi utvořené nad hladinou kapaliny. Rychlost odpařování je při teplotě vzplanutí tak malá, že nedochází k vytvoření dostatečného množství par potřebného k trvalému hoření, tudíž směs pouze vzplane, ale nehoří. Lze tedy říci, že vzplanutí je děj, kdy je rychlost hoření větší nežli rychlost tvorby hořlavé směsi [2].

Rychlost odpařování směsi je ovlivněná jak fyzikálními, tak chemickými vlastnostmi kapalin, a to především tím, zdali je kapalina tvořena směsí, či nikoliv. Následující tabulka (tab. 1) popisuje fyzikální vlastnosti homologické řady¹ alkoholů. Vyplývá z ní, že spolu se zvyšováním molární hmotnosti se zvyšuje i bod varu a hustota, což vede ke zvyšování teploty vzplanutí.

Při srovnání dvou kapalin z jiných homologických řad ale toto pravidlo neplatí. Například benzen a ethanol mají jinou chemickou strukturu, přičemž benzen má vyšší molární hmotnost, ale jeho teplota vzplanutí je nižší nežli teplota vzplanutí ethanolu. Z toho vyplývá, že teplotu vzplanutí, kromě fyzikálních vlastností, ovlivňují i ty chemické [3].

tab. 1: Fyzikální vlastnosti homologické řady alkoholů [3]

<i>Hořlavá kapalina</i>	<i>Molární hmotnost [g/mol]</i>	<i>Hustota [kg/m³]</i>	<i>Teplota varu [°C]</i>	<i>Tlak nasycených par [Pa]</i>	<i>Teplota vzplanutí [°C]</i>
<i>Methanol [CH₃OH]</i>	32	790	64,7	11820	7
<i>Ethanol [C₂H₅OH]</i>	46	789	78,4	5865	11
<i>Propanol [C₃H₇OH]</i>	60	804	97,8	1933	20
<i>Butanol [C₄H₉OH]</i>	74	810	118,0	628	31

Pokud je kapalina tvořena hořlavou a nehořlavou látkou, tedy směsí, (např. methanol – voda, ethanol – voda) dochází při zahřívání k frakční destilaci, která má za následek separaci jednotlivých složek podle teploty varu. Složka s nižší teplotou varu odhoří dříve než s vyšší teplotou varu, což vede k rozdílným hodnotám teploty vzplanutí v závislosti na poměru složek (tab. 2).

¹ Řada organických sloučenin s podobnými chemickými vlastnostmi a stejným obecným vzorcem, lišící se o přírůstek „-CH₂-“. Spolu s rostoucí velikostí molekuly rostou i fyzikální vlastnosti.

tab. 2: Teploty vzplanutí hořlavých kapalin v závislosti na obsahu alkoholu ve směsi [4]

Obsah alkoholu [obj. %]	Teplota vzplanutí [°C]	
	Methanol	Ethanol
100	7	11
70	18	22
40	30	25
5	Nevzplanul	60
3	Nevzplanul	Nevzplanul

Z výše uvedené tabulky (tab. 2) vyplývá, že hodnota teploty vzplanutí stoupá spolu s nárůstem složky nehořlavé látky. Pokud je směs dostatečně zředěna nehořlavou látkou, ke vzplanutí nedochází. Naopak, pokud směs tvoří dvě hořlavé látky, teplota vzplanutí se přibližuje k teplotě vzplanutí jedné z nich [4].

Příslušná norma zabývající se hořlavými kapalinami – ČSN 65 0201 [1] udává, že se každá kapalina, která má stanovenou teplotu vzplanutí, uvažuje jako hořlavá. Teplota vzplanutí se stanovuje (dle [5], [6]) zkušební metodou tzv. otevřeného nebo uzavřeného kelímku, přičemž hořlavá kapalina vzplane dříve (při nižší teplotě) v kelímku uzavřeném. U obou metod se teplota vzplanutí vztahuje k atmosférickému tlaku 101,325 kPa [2].

V praxi je znalost teploty vzplanutí zásadní zejména pro zařazení hořlavých kapalin podle **třídy nebezpečnosti** (tab. 3). Rozdělení do tříd nebezpečnosti je závislé na hodnotě teploty vzplanutí, přičemž do té nejprísnejší, tedy I. třídy nebezpečnosti, se zařazují hořlavé kapaliny s teplotou vzplanutí do 21 °C. Do stejnojmenné třídy se dále zařazují hořlavé kapaliny třídy II. a III., které jsou vlivem okolních podmínek zahřívány na svou teplotu vzplanutí nebo i teplotu vyšší a v neposlední řadě také kapaliny, u kterých nebyla příslušnou zkouškou stanovena teplota vzplanutí [1].

tab. 3: Třídy nebezpečnosti hořlavých kapalin [1]

Třída nebezpečnosti	Teplota vzplanutí [°C]
I	<21
II	21–55
III	55–100
IV	>100

2.2.2 Teplota vznícení

Teplota vznícení udává nejnižší teplotu kapaliny, při které se uvolní takové množství par, které je schopné se po smíšení s okolním vzduchem vznítit. Průběh vznícení je popsán jako chemická reakce způsobená směsí plynů, vypařující se nad hladinou kapaliny a okolním vzduchem, za objevení otevřeného plamene.

V praxi se lze setkat se zařazením hořlavé kapaliny podle hodnoty teploty vznícení do tzv. **teplotní třídy**, dle příslušné normy ČSN EN 14522 [7] (tab. 4). Je nutné dbát zřetel

na rozdílnost mezi teplotní třídou a třídou nebezpečnosti hořlavých kapalin. Jsou totiž hořlavé kapaliny (např. methanol a ethanol), které jsou zaříděny do stejné třídy nebezpečnosti, ale různých teplotních tříd vlivem obdobné teploty vzplanutí, ale rozdílné teploty vznícení.

tab. 4: Teplotní třídy hořlavých kapalin [7]

<i>Teplotní třída</i>	<i>Teplota vznícení [°C]</i>	<i>Hořlavá kapalina</i>
<i>T1</i>	<i>>450</i>	<i>methanol</i>
<i>T2</i>	<i>300-450</i>	<i>ethanol</i>
<i>T3</i>	<i>200-300</i>	<i>motorová nafta</i>
<i>T4</i>	<i>135-200</i>	<i>acetaldehyd</i>
<i>T5</i>	<i>100-135</i>	<i>sirouhlík</i>
<i>T6</i>	<i>85-100</i>	<i>ethylnitrit</i>

Proces vznícení je definován jako pochod, který probíhá v hořlavé směsi až do počátku hoření, přičemž k jeho započatí je nutná aktivační energie. Podle způsobu dodání aktivační energie lze vznícení rozdělit na dvě formy. Je-li energie dodána vnějším zdrojem, hovoří se o *vznícení* (vnějším zapálení) a naopak, jestliže potřebnou energii dodává sama látka, hovoří se o *samovznícení* [3].

Vznícení

Vnější aktivační energie hořlavé směsi může mít více podob, přičemž ta nejčastější je ve formě tepelné, ale může to být i energie světelná, elektrostatická nebo mechanická. Přívod tepelné energie zaktivizuje molekuly hořlavé směsi, které po dosažení hodnot této energie iniciují reakci hoření.

Obecně lze vznícení rozdělit na tzv. *okamžité* a *dlouhodobé*. Jak vyplývá z názvu, u okamžitého zapálení je aktivační energie dodána v krátkém časovém intervalu v podobě např. exploze, jiskry nebo různých mechanických nárazů. Proces hoření je u okamžitého zapálení mnohem intenzivnější a je ovlivněn jak teplotou zdroje, tak tepelnou kapacitou kapaliny. Příklad dlouhodobě připravovaného hoření je konstantní působení vysokých teplot na kapalinu, např. od rozžhavené stěny [3].

Samovznícení

Pokud si kapalina sama vytváří vlivem fyzikálních, biologických nebo chemických pochodů, energii, která zapříčiní vznícení a následné hoření, jedná se o tzv. samovznícení. Teplota samovznícení je nejmenší teplota, na kterou je zapotřebí ohřát danou látku tak, že je dále schopna se zahřívát sama až k procesu hoření.

Samovznícení může být jak tepelné (vlivem oxidačních reakcí), tak řetězové (vlivem štěpení chemických vazeb). V praxi, zejména u hořlavých kapalin, uložených v zásobnících, se lze setkat s požáry vzniklými tepelným samovznícením. Tepelné samovznícení probíhá pouze za vyšších teplot, vlivem oxidačních reakcí, které se projevují ve formě uvolňování tepla a následného počátku samozahřívání kapaliny. Množství uvolněného tepla směsi hořlavé

kapaliny popisuje následující vztah (1), ze kterého vychází, že uvolněné teplo je závislé na hodnotě spalného tepla a rychlosti oxidační reakce hořlavé směsi:

$$Q_1 = \Delta H \cdot V \cdot v \quad (1)$$

kde Q_1 množství tepla, které se uvolní za časovou jednotku [kJ/s],
 ΔH reakční teplo [kJ/mol],
 V objem hořlavé směsi [m³],
 v rychlost oxidační reakce [(K · mol)/(s · m³)].

Uvolněné teplo, které postupně zahřívá hořlavou směs, dále postupuje skrz stěny nádoby do okolního prostředí. Lze konstatovat, že množství odvedeného tepla se rovná rozdílu teploty hořlavé směsi kapaliny a stěn nádoby dle rovnice:

$$Q_2 = \alpha \cdot S \cdot (T - T_s) \quad (2)$$

kde Q_2 množství tepla, odvedeného ze směsi za časovou jednotku [kJ/s],
 α koeficient přestupu tepla ze směsi na stěnu nádoby [K/(m² · s)],
 S povrch nádoby [m²],
 T teplota hořlavé směsi [K],
 T_s teplota stěn nádoby [K].

Podmínkou pro počátek procesu samozahřívání a následného samovznícení je, aby množství uvolněného tepla (Q_1) bylo větší, než množství tepla odváděného do okolního prostředí (Q_2). Pokud nastane jev opačný, ke samovznícení nedochází [3].

Teplota samovznícení pro hořlavinu není konstantní veličina. Je ovlivněna okrajovými podmínkami zejména pak objemem či tlakem. S vyšším objemem kapaliny se teplota samovznícení snižuje, a naopak, s menším objemem se teplota samovznícení zvyšuje (tab. 5). Tento děj, ale neprobíhá neomezeně. Pokud je objem kapaliny velmi malý, povrch, který odvádí teplo připadající na jednotku objemu, se zvyšuje a tím i uvolňované teplo, které poté nepřevýší teplo odváděné a k samovznícení nedochází.

tab. 5: Hodnoty teploty samovznícení v závislosti na objemu kapaliny v nádobě [8]

Hořlavá kapalina	Teplota [°C]				
	0,008 dm ³	0,035 dm ³	0,2 dm ³	1,0 dm ³	12,0 dm ³
Benzín	-	283	248	243	224
Methanol	498	473	441	428	386
Benzen	668	519	579	559	-
Aceton	676	570	519	491	467

Další veličina, která ovlivňuje teplotu samovznícení, je tlak. Jestliže je tlak hořlavé kapaliny vyšší, částice hořlavých látek se uskupují blíže a dochází k přenosu tepla na kratší

vzdálenosti, což má za následek nižší teplotu vznícení. Následující tabulka (tab. 6) udává hodnoty teploty vznícení při různém tlaku pro vybrané kapaliny [4].

tab. 6: Hodnoty teploty samovznícení v závislosti na tlaku [4]

Hořlavá kapalina	Teplota [°C]					
	0,1 MPa	0,5 MPa	1,0 MPa	1,5 MPa	2,0 MPa	2,5 MPa
Benzen	680	620	590	520	500	490
Benzín	480	350	310	290	280	250
Petrolej	460	330	250	220	210	200

Zásadní roli mají v teplotě samovznícení i katalyzátory, které způsobují zpomalení nebo urychlení reakce vznícení. Jako katalyzátory mohou působit různé nečistoty, příměsi nebo i materiál stěn nádoby. Příkladem může být ethanol, který má teplotu samovznícení v ocelové nádobě 391 °C, ale v nádobě platinové 518 °C (tab. 7).

tab. 7: Hodnoty teploty samovznícení v závislosti na materiálu nádoby [3]

Hořlavá kapalina	Teplota [°C]				
	V železné trubce	V křemenné trubce	Ve skleněné baňce	V ocelovém bloku	V platinovém kelímku
Benzín	685	585	-	-	300
Methanol	740	565	475	474	-
Benzen	753	723	580	649	-
Ethanol	724	641	421	391	518

2.2.3 Oblast výbušnosti

Oblastí výbušnosti je nazýváno koncentrační rozmezí hořlavé směsi vypařující se nad hladinou kapaliny, které je při zapálení iniciačním zdrojem schopno výbuchu a následného dalšího šíření požáru. **Dolní koncentrační mez výbušnosti** je nejnižší koncentrace hořlavých par ve směsi s oxidačním prostředkem (vzduchem), která je schopna při iniciaci zápalným zdrojem šířit plamen. **Horní koncentrační mez výbušnosti** je nejvyšší koncentrace hořlavých par ve směsi s oxidačním prostředkem (vzduchem), která je ještě výbušná. Koncentrace těchto hořlavých par se udávají v objemových procentech.

Hranice koncentračních mezí jsou závislé na okrajových podmínkách, a to především na počáteční teplotě a tlaku vypařující se směsi. Při zvýšení teploty a tlaku se sníží dolní mez výbušnosti a horní se naopak zvýší, což způsobí rozšíření výbuchové oblasti. Čím větší je toto rozmezí a čím vyšší je horní mez výbušnosti, tím je kapalina nebezpečnější. Naopak se snížením počátečního tlaku se zmenšuje riziko výbuchu až do úplného zamezení iniciace výbuchu směsi. Je tedy možné použít podtlak jako ochranu proti výbuchu [4].



obr. 2: Schéma mezí výbušnosti

Hořlavá směs je zapalitelná pouze uvnitř oblasti výbušnosti (obr. 2). Pokud je koncentrace hořlavé směsi pod dolní mezí výbušnosti, není tato směs ani výbušná, ani hořlavá. Pokud koncentrace hořlavých směsí překročí horní mez výbušnosti, výbuch nenastane, ale při odpovídajícím zředěním pomocí vzduchu se může stát opět výbušnou [2].

2.3 Parametry ovlivňující proces hoření

Hoření kapaliny v nádobě ovlivňuje mnoho parametrů, kterým je věnována tato kapitola. Proces je popsán jako hoření s volnou hladinou na ohraničené ploše, přičemž, v návaznosti na experiment Garo et al (1994), se výška hladiny kapaliny uvažuje min. 10 mm. U kapalin v nádobě, které mají výšku hladiny nižší, dochází k tepelným ztrátám ode dna nádoby, které mohou být natolik vysoké, že teplota kapaliny klesá pod svůj bod vzplanutí a dochází tak k samovolnému uhašení [9].

Hořící kapalina v nádobě má tendenci hořet do kruhového tvaru, a to nezávisle na tvaru nádoby. Při hoření v nádobě totiž dochází k proudění vzduchu od obvodu stěn směrem ke středu a dále svisle vzhůru. V nádobách jiných tvarů je potom nižší teplota v rozích, vůči středu hladiny kapaliny, což může vést i k delší době trvání hoření.

Mezi parametry, které ovlivňují hoření kapaliny se zařazuje zejména teplota varu, rychlost odhořívání, rychlost uvolňování tepla a charakteristika plamene. Kapitola dále doplňuje možnosti hašení kapaliny v závislosti na typu kapaliny nebo možnosti výpočtu doby trvání požáru.

2.3.1 Teplota varu

Kapalina začíná vřít po určité době při zvyšování její teploty. Prostřednictvím bublinek, které se tvoří jak v kapalině, tak na stěnách nádoby, dochází ke změně skupenství, a to z kapalného na plynné. Teplota (bod) při kterém začíná docházet k tomuto procesu se nazývá **teplota varu**. Teplota varu je tedy nejvyšší teplota, které je možno v kapalině dosáhnout spolu s maximální rychlostí vypařování, za normálního tlaku.

Hladina kapaliny je při hoření vždy ve varu, přičemž se z ní uvolňuje maximální množství par, které reaguje s kyslíkem. Rychlost uvolňování par z hladiny kapaliny může být vyšší než

proces přijímání kyslíku do zóny hoření, což může vést k přebytku těchto par a k jejich následnému vzplanutí mimo prostor hoření.

Teplotu varu ovlivňují okolní podmínky, zejména tlakové. Při zvyšování tlaku se zvyšuje i teplota varu a naopak (tab. 8). V praxi to může znamenat vysoké nebezpečí při skladování kapaliny v uzavřené nádobě. Pokud je vystavena vyšším teplotám, vzrůstá tlak v nádobě a může dojít k ničivé explozi. Je tedy zcela nevyhnutelné nádoby ihned odstranit z dosahu požáru nebo ochlazovat pomocí vody.

tab. 8: Teplota varu ethanolu v závislosti na tlaku [10]

<i>Tlak [atm.]</i>	<i>Teplota [°C]</i>
1,0	78
2,2	100
4,2	120
7,5	140
12,4	160
19,4	180

Veškeré chemicky čisté kapaliny mají stanovenou teplotu varu, která se vztahuje k atmosférickému tlaku a je vždy uvedena v příslušném bezpečnostním listě. Pokud se tedy nezmění tlak, není možné, aby se kapalina zahřála na vyšší teplotu, než je její teplota varu. Dále platí i to, že u kapalin s nízkou teplotou varu, tzv. nízkovroucí kapaliny, je intenzita hoření nejvyšší [10].

Utajený var

Zvláštní jev, vyskytující se při varu je tzv. **utajený var**. K utajenému varu dochází v případě, že teplota kapaliny dosáhne teploty varu, při odpovídajícím tlaku, ale k varu stejně nedochází. Stačí ale lehká iniciace či popud a může dojít k vystříknutí kapaliny z nádoby nebo explozi. Proto je tento jev značně nebezpečný a v praxi se mu předchází např. vložením ostrých tělísek (např. ocelový plech) do kapaliny. Na tělískách se poté lépe utvářejí bublinky, které poté unikají ven z kapaliny [10].

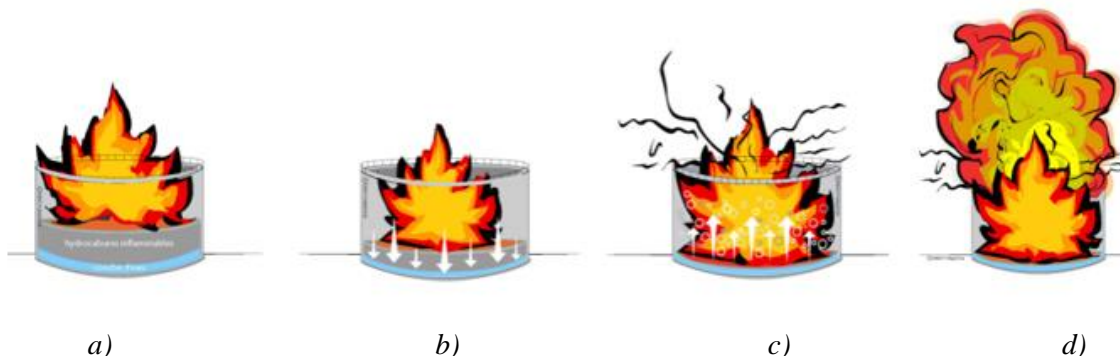
Vzkypění

Další jev, který může doprovázet var je **vzkypění**. Ke vzkypění dochází především u kapalin, které nejsou čisté a obsahují stopy vody, např. ropa. Následující text je v souvislosti s experimentální částí zaměřen na ropu, jakožto produkt, ze kterého se získává motorová nafta.

Voda, která má vyšší hustotu než ropné látky, klesá ke dnu, kde se usazuje. Při zahoření kapaliny v nádobě dochází k vytvoření horké vrstvy, která se pohybuje směrem ke dnu, přičemž předává teplo do chladnějšího produktu (tedy vody). Chladnější produkt vlivem zahřátí přejde do varu a začne uvolňovat lehčí podíly, které probublávají směrem vzhůru až nad hladinu, kde vstupují do procesu hoření (obr. 3) [11].

Ke vzkypění ropy v nádobě dochází pouze v návaznosti na var. Při posunu horké vrstvy směrem dolů (obr. 3b) a prvního kontaktu s chladnější vrstvou dochází k odpařování, vlivem

přenosu tepla z ropy do vody (obr. 3c). Tepelné působení na vrstvu vody způsobuje prudké ohřátí a nastává var v objemu, který vede k nárůstu tlaku u dna nádrže a následnému překypění a vyvržení hořící ropy (obr. 3d) [11].



obr. 3: Jednotlivé fáze vzkypění: a) var kapaliny; b) posouvání horké vrstvy; c) odpařování; d) vzkypění [12]

Ropa je následně vyvržena do vzdálenosti 8 až 10 průměrů nádob za stálého hoření. V okamžiku vzkypění jsou plameny mnohem jasnější a větší. Jejich výška může vzrůst až na trojnásobek. Vlivem kombinace zvětšení intenzity hoření a vzrůstu plamene dochází k intenzivnějšímu sálání tepla v okolí požáru [4].

Přesné množství objemu kapaliny, které je vyvrženo z nádoby, závisí na množství kapaliny a velikosti průměru nádoby. Čím menší je průměr nádoby a čím více je množství kapaliny, tím je množství vyvržené kapaliny větší. Doba počátku vzkypění ropy z nádoby lze určit pomocí následujícího vztahu:

$$t = \frac{H - h}{v_1 + v_2} \quad (3)$$

kde	H	počáteční výška hladiny kapaliny [m],
	h	počáteční výška vodní vrstvy v nádobě [m],
	v_1	rychlost odhořívání kapaliny [m/h],
	v_2	rychlost prohořívání vrstvy kapaliny [m/h].

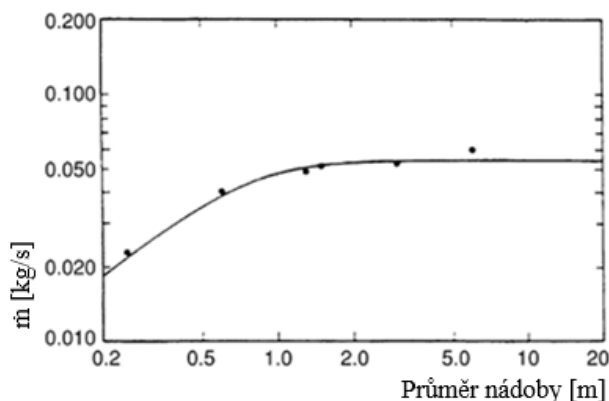
2.3.2 Rychlost odhořívání

Jeden z nejdůležitějších parametrů, který charakterizuje hoření hořlavých kapalin, je **rychlost odhořívání**. Rychlost odhořívání udává množství kapaliny, která shoří za určitou časovou jednotku z jednoho metru čtverečního nebo jednoho metru kubického objemu. Parametr rychlosti odhořívání se v průběhu hoření mění v závislosti na vlastnostech kapaliny a podmínkách při požáru.

Obecně se rozlišují dva druhy rychlosti odhořívání: **lineární** a **hmotnostní**. V rámci lineární rychlosti odhořívání se sleduje pokles hladiny kapaliny v nádrži za časovou

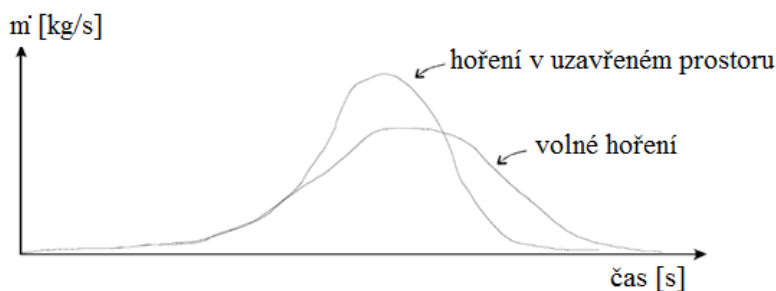
jednotku (mm/s). U hmotnostní rychlosti odhořívání se sleduje úbytek množství kapaliny za časovou jednotku z jednoho metru čtverečního ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) [11].

Průběh rychlosti odhořívání látky ovlivňuje více faktorů, ale nejpodstatnější je geometrie nádoby. Dle výsledků experimentů Babrauskase [13] lze tvrdit, že rychlost odhořívání je do značné míry závislá na průměru nádoby. U nádob, které mají menší průměr, dochází k vyššímu nárůstu rychlosti odhořívání, zatímco po překonání určité velikosti průměru se rychlost odhořívání ustálí (tzv. asymptotická rychlost odhořívání) nebo dokonce mírně sníží (obr. 4).



obr. 4: Rychlost odhořívání v závislosti na velikosti průměru nádoby [13]

Dalším faktorem ovlivňujícím rychlost odhořívání je umístění kapaliny. Průběh hoření kapaliny v místnosti je oproti volnému hoření rozdílný. Pokud dochází k hoření kapaliny v uzavřeném prostoru, rychlost odhořívání je vyšší. V místnosti se totiž kumuluje kouřová vrstva, která zpětně ohřívá hladinu kapaliny a tím urychluje proces jejího odhořívání (obr. 5) [14].



obr. 5: Srovnání průběhů rychlosti odhořívání pro volné hoření a hoření v uzavřeném prostoru [13]

Zabetakis a Burgess (1961) odvodili vztah na výpočet hmotnostní rychlosti odhořívání dle následujícího vztahu. Hmotnostní rychlost odhořívání je vztažena na jednotku plochy a jednotku času a platí pouze pro volné hoření kapalin s průměrem plochy odhořívání větším než 0,2 m [9]:

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} \cdot (1 - e^{-k\beta D}) \quad (4)$$

kde \dot{m}''_{∞} asymptotická hmotnostní rychlost odhořívání kapaliny [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],

\dot{m}'' hmotnostní rychlost odhořívání vztažená na jednotku plochy [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],

$k; \beta$ materiálová konstanta hořlavé kapaliny [m^{-1}],
 D charakteristický průměr plochy odhořívání [m].

Pokud je plocha hoření kapaliny jiného než kruhového průřezu, je možné určit charakteristický průměr nádoby pomocí následujícího vztahu:

$$D = \sqrt{\frac{4A_f}{\pi}} \quad (5)$$

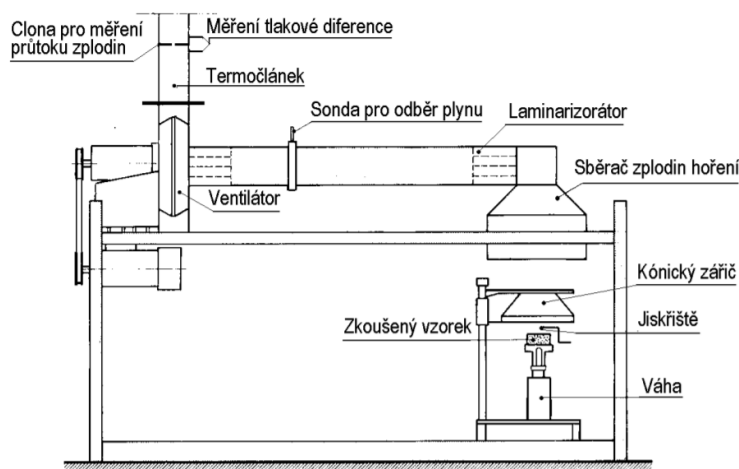
kde A_f charakteristická plocha požáru [m].

Rychlost odhořívání v tomto případě závisí nejen na průměru, ale také na dvou empirických konstantách (k ; β), které charakterizují použitou kapalinu a jsou funkcí zpětného tepelného toku z plamene na hladinu kapaliny. Tyto dvě konstanty se pro plošné požáry kapalin uvádějí společně, přičemž spolu s asymptotickou hmotnostní rychlostí odhořívání plynou z experimentů, tudíž je lze vyčíst z literatury.

2.3.3 Rychlost uvolňování tepla (HRR)

Rychlost uvolňování tepla (angl. = Heat release rate – HRR nebo Rate of heat release – RHR²) představuje energii uvolňovanou hořící látkou za jednotku času. Veličina je časově proměnlivá, tudíž neuvádí pouze celkové množství uvolněného tepla, ale i časovou závislost v průběhu požáru. Tento fakt může mít za následek, že stejný objem dvou shodných hořlavých kapalin má rozdílnou křivku HRR, při rozdílných okrajových podmínkách požáru. Rychlost uvolňování tepla se obvykle pohybuje v řádu stovek kilowatt až několika megawatt [15].

HRR se stanovuje především měřením pomocí kyslíkové kalorimetrie (obr. 6), za předpokladu, že většina látek uvolňuje konstantní množství energie na jednotkové množství spotřebovaného kyslíku, tedy cca 13,1 MJ na 1 kg spotřebovaného kyslíku [9].



obr. 6: Schéma kónického kalorimetru [16]

² RHR = značení dle Eurokódu. Ve výpočtech se dále uvažuje jako Q .

Hodnotu HRR lze zjistit i neexperimentálně, pomocí jednoduchých analytických výpočtů, přičemž předpokladem je znalost rychlosti odhořívání a výhřevnosti dané kapaliny, viz:

$$Q = \dot{m}'' \cdot \Delta H_{eff} \quad (6)$$

kde Q rychlost uvolňování tepla [kW],

ΔH_{eff} efektivní výhřevnost [kJ/kg].

Výhřevnost je určována laboratorními zkouškami za přesně definovaných podmínek, tudíž se může lišit od reálných hodnot při požáru. V praxi se tedy počítá pouze s efektivní hodnotou výhřevnosti, která zohledňuje nedokonalost procesu spalování, a to dle následující rovnice:

$$\Delta H_{eff} = \Delta H_c \cdot \chi_s \quad (7)$$

kde χ_s součinitel účinnosti spalování [-],

ΔH_c celková výhřevnost [kJ/kg].

Poměr mezi celkovou a efektivní výhřevnosti se nazývá účinnost spalování (χ_s). Pro příklad kapalina, kterou při hoření doprovází dýmový kouř, může mít, při nedostatečném přísunu kyslíku, účinnost spalování v rozmezí 0,6-0,7 např. motorová nafta. Zatímco kapaliny, které hoří s minimálním množstvím sazí, např. alkoholy, mají účinnost spalování rovno 1,0, což se rovná dokonalému spalování [15]. Součinitel pro účinnost spalování je možné přirovnat k součiniteli k_{pl} , který lze vyčíst z normy uvádějící výhřevnosti hořlavých látek – ČSN 73 0824 [17]. V praxi součinitel k_{pl} vyjadřuje podíl požární výhřevnosti a čisté výhřevnosti a tím upravuje celkovou výhřevnost v závislosti na látce.

Rovnici (6) lze následovně upravit, pokud je známa tzv. horizontální hořící plocha, tedy hodnota rychlosti odhořívání, která je vztažená na jednotku plochy:

$$Q = A_f \cdot \dot{m}'' \cdot \Delta H_c \cdot \chi_s \quad (8)$$

Následující tabulka udává charakteristické hodnoty vybraných hořlavých kapalin pro určení jak hmotnostní rychlosti odhořívání, tak rychlosti uvolňování tepla:

tab. 9: Charakteristické hodnoty vybraných hořlavých kapalin [12]

<i>Hořlavá kapalina</i>	<i>Hmotnostní rychlost odhořívání \dot{m}'' [kg/(m² · s)]</i>	<i>Empirická konstanta k_{β} [m⁻¹]</i>	<i>Efektivní výhřevnost ΔH_{eff} [kJ/kg]</i>	<i>Hustota ρ [kg/m³]</i>
<i>Nafta, těžká</i>	0,035	1,7	39 700	940
<i>Benzín</i>	0,055	2,1	43 700	740
<i>Benzen</i>	0,085	2,7	40 100	874
<i>Petrolej</i>	0,039	3,5	43 200	820
<i>Aceton</i>	0,041	1,9	25 800	791

2.3.4 Doba trvání hoření

Pro stanovený objem hořlavé kapaliny v nádobě lze určit celkovou dobu trvání hoření. Z následujícího vztahu vyplývá, že pokud je hořlavá kapalina stejného objemu v nádobě s menším průměrem, její doba trvání hoření je delší než u kapaliny s průměrem vyšším. Její průměr hořící plochy je totiž nižší [9]:

$$\tau = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2 \cdot v} \quad (9)$$

kde v objemová rychlost odhořívání [$m^3/(m^2 \cdot s)$].

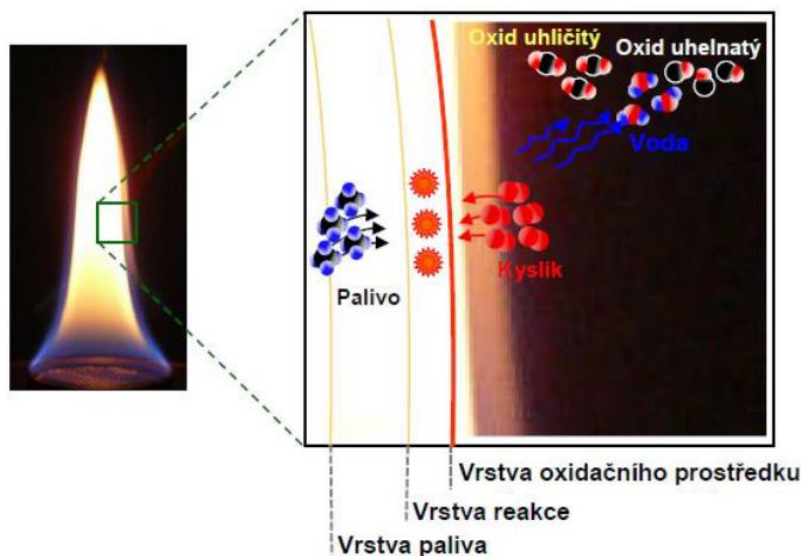
Při hoření v nádobě se kapalina postupně vypařuje a ubývá, což má za následek snižování výšky její hladiny. Objemová rychlost odhořívání popisuje tento děj jako objemovou ztrátu kapaliny vztaženou na jednotku plochy povrchu za časovou jednotku:

$$v = \frac{\dot{m}''}{\rho} \quad (10)$$

kde ρ hustota kapaliny [kg/m^3].

2.3.5 Charakteristika plamene

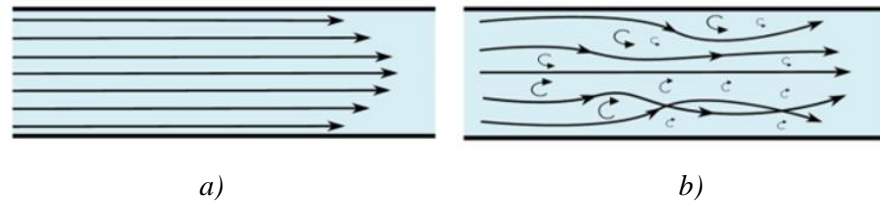
Po iniciaci zápalným zdrojem začne kapalina hořet vlivem vznícení hořlavé směsi, přičemž následuje vytvoření difúzního plamene, který je charakterizovaný jako zářící plynná část hoření, skládající se ze směsi vzduchu a jiného hořlavého plynu (páry). Proces molekulární difúze vzniká na základě rozdílnosti parciálních tlaků na rozhraní skupenství (kapalina – plyn). Molekuly páry pronikají do vzduchu a mísí se s ním. Rozhraní, kde dochází k tomuto míšení se nazývá **reakční vrstva plamene** (obr. 7). Plamen obecně charakterizují jeho svítivost, tvar, teplota a výška [10].



obr. 7: Vrstvy difúzního plamene [18]

Tvar

Difúzní plamen může hořet dvěma způsoby. Buď laminárně nebo turbulentně. Laminární plamenné hoření je typické pro velmi malé difúzní plameny, např. svíčky. Jednotlivé vrstvy jsou u laminárního plamene navzájem rovnoběžné (obr. 8a). Turbulentní plamenné hoření je charakteristické pro plameny větší, kde dochází k míšení vrstev a vzniku tzv. vírů (obr. 8b).



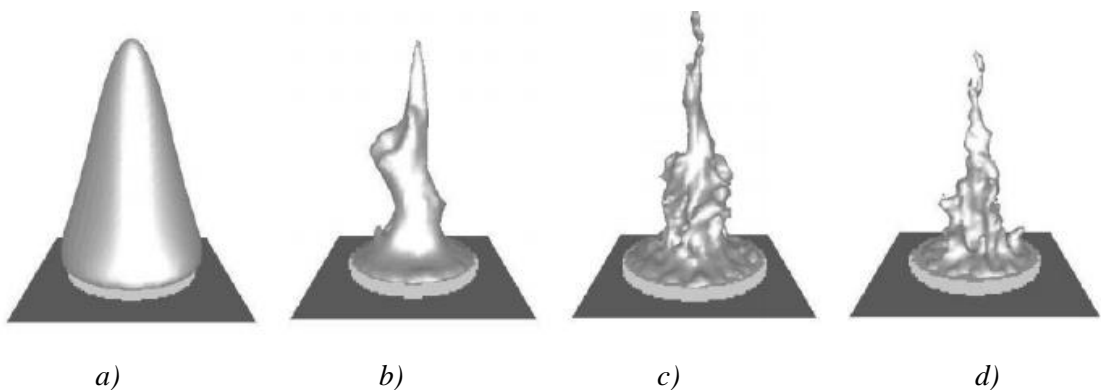
obr. 8: Schématické znázornění režimů proudění: a) laminární proudění; b) turbulentní proudění [18]

Režim plamenného hoření lze stanovit z velikosti bezrozměrné hodnoty **Reynoldsova čísla** (Re), přičemž jeho velikost je závislá mj. i na průměru nádoby, tedy plochy odhořívání kapaliny. Čím větší tato plocha je, tím vyšší je hodnota Reynoldsova čísla. Pokud je hodnota Reynoldsova čísla menší než 2300 režim plamene je laminární a naopak, pokud je hodnota vyšší než 2300, nastává turbulentní plamenné hoření.

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (11)$$

kde Re Reynoldsovo číslo [-],
 μ viskozita par [$m^2/(m \cdot s)$].

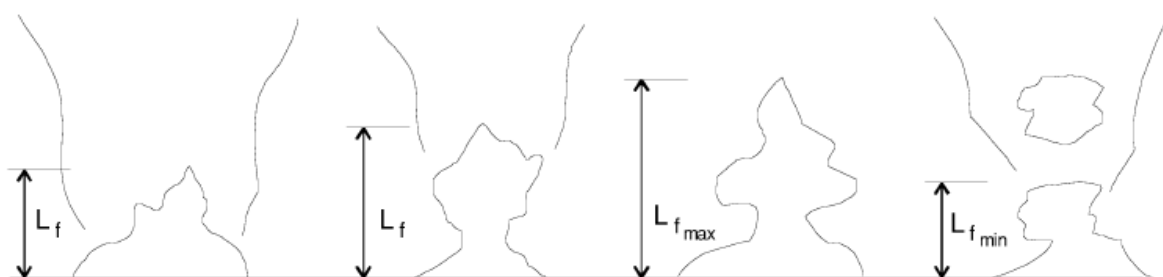
Hostikka a spol. [19] se zabývali rozsáhlou experimentální studií se zaměřením na hoření kapaliny v nádobách o různých průměrech (od 0,01 m do 1,0 m). Studie potvrdila, že je úzká souvislost mezi průměrem nádoby, tedy plochou odhořívání kapaliny, a režimem hoření. Pokud je plocha menší, dochází k laminárnímu plamennému hoření (obr. 9a). Spolu s růstem plochy odhořívání se mění režim proudění z laminárního na turbulentní, přičemž u průměrů okolo hodnoty 0,1 m (obr. 9b) dochází k tzv. přechodové fázi režimu hoření.



obr. 9: Modelová představa tvaru plamene při hoření methanolu v nádobách o různých průměrech: a) 0,01 m; b) 0,1 m; c) 0,3 m; d) 1,0 m [10]

Výška

Pro hořlavé kapaliny je charakteristické turbulentní plamenné hoření, které je nestálé, přerušované s pulzující charakteristikou (zejména na obvodě a vrcholu). Vzhledem k tomuto faktu je obtížné určit přesnou výšku plamene, a proto existuje hned několik metod, které ji definují. Některé jsou založené na teplotních kritériích, další ji zase definují jako výšku, kterou si plamen udrží alespoň polovinu času z celkové doby hoření (obr. 10) [20].



obr. 10: Struktura plamene [21]

Pro analytický výpočet výšky plamene lze uvést následující dva vztahy, přičemž první byl definován Heskestadem a druhý Thomasem. Předpoklad využití Heskestadovi rovnice je znalost tepelného výkonu a velikost průměru nádoby, která je rovna celkové ploše odhořívání kapaliny. Výšku plamene lze stanovit následovně:

$$L_f = 0,235 \cdot \dot{Q}^{\frac{2}{5}} - 1,02 \cdot D \quad (12)$$

kde L_f výška plamene [m].

Vztah odvozený Thomasem vychází za předpokladu znalosti vstupních podmínek, kterých je oproti modelu dle Heskestada více. Pro jeho výpočet je nutné zadat nejenom průměr nádoby, ve které se kapalina nachází, ale také rychlost odhořívání, hustotu okolního vzduchu a gravitační zrychlení, a to následovně [20]:

$$L_f = 42 \cdot D \cdot \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}} \right)^{0,61} \quad (13)$$

kde g gravitační zrychlení [m/s^2],

ρ_a hustota vzduchu [kg/m^3].

Pokud je nádoba jiného rozměru než kruhového, lze průměr odvodit podle velikosti plochy dle rovnice (5) uvedené v kapitole 2.3.2.

Teplota

Vlivem pulzující charakteristiky turbulentního plamenného hoření, které mísí vzduch o různých teplotách, je teplota plamene velmi nestálá. Hodnota teploty par nad hladinou kapaliny odpovídá teplotě varu kapaliny, a čím více se tyto páry přibližují k druhé zóně plamene (zóně hoření), tím je jejich teplota vyšší. Teplota plamene dále roste se zvyšující se vzdáleností od hladiny kapaliny

vlivem zužování průměru plamene. K nejvyšší teplotě plamene dochází zhruba ve třetině celkové výšky plamene, přičemž směrem k vrcholu plamene klesá [10]. Teplotu plamene lze stanovit více způsoby např. průměrem teplot, které jsou měřeny v různých částech plamene nebo stanovením tzv. adiabatické teploty. Adiabatická teplota je maximální teoretická hodnota, při níž se uvažuje hoření bez tepelných ztrát, tedy hoření, při kterém dochází k dokonalému spalování. Hodnota adiabatické teploty je tedy vyšší než hodnota teploty plamene při reálném požáru.

Dle teorie McCaffrey (1979) [20], který rozsáhle studoval plamenné turbulentní hoření, lze rozdělit plamen z hlediska teplot do tří zón, které platí pouze pro volné hoření:

- **Oblast nepřetržitého plamene**, která se nachází mírně nad hladinou kapaliny. Teploty jsou konstantní, tj. pod 900 °C.
- **Oblast přerušovaného plamene** je nad oblastí nepřetržitého plamene. Zde teploty klesají v závislosti na vzdálenosti od hladiny kapaliny. Viditelná část plamene má teplotu okolo 320 °C.
- **Tepelná oblast** se nachází v blízkém okolí plamene a není viditelná. Teploty klesají se vzdáleností od plamene.

Výše uvedené hodnoty byly potvrzeny i vědci z francouzské univerzity v Poitiers, kteří provedli téměř totožný experiment s velmi podobnými výsledky. Lze tedy tvrdit, že maximální teploty turbulentního difúzního plamene volného hoření jsou odhadovány okolo 900 °C pro požáry menších průměrů (do 1 m) a okolo 1100 °C pro požáry s průměrem vyšším [20].

Svítilivost

Většina kapalin hoří difúzním plamenem, který má charakteristickou sytě žlutou až bílou barvu. Barevnost plamene je způsobena nespálenými molekulami uhlíku v podobě sazí, které jsou vlivem silného tepelného záření spalovány. Lze tedy tvrdit, že svítilivost plamene je tím vyšší, čím vyšší je teplota spalovaného uhlíku. Naopak hořlavé kapaliny s malým množstvím uhlíku, např. methanol (obr. 11) hoří plamenem nesvítilivým, který je světle modrý a na denním světle skoro neviditelný.



obr. 11: Plamen hořícího methanolu

2.3.6 Možnosti hašení

Podle příslušné normy na třídy požáru – ČSN EN 2 lze požáry, v návaznosti na typu hořlavé látky, zařadit do pěti tříd (*A, B, C, D* a *F*). Požáry hořlavých kapalin patří do skupiny B a F. Do třídy B se zařazují kapaliny nebo látky přecházející do kapalného skupenství. Třída F je pak pro požáry rostlinných nebo živočišných olejů a tuků používaných na kuchyňských spotřebičích. Podle třídy požáru se určí způsob hašení látky [22].

Požáry třídy B

Pro požáry třídy B lze použít následující hasební látky nebo jejich kombinace:

- voda,
- pěna,
- inertní plyny,
- prášky.

Hašení pomocí vody se používá především na ochlazování nádoby s kapalinou. Hořící kapalina dosahuje vysokých teplot, které mohou mít za následek deformaci konstrukcí v blízkosti požáru, růstu tlaku uvnitř uzavřené nádoby a následného možného vzkypění kapaliny. Ochlazování se provádí od počátku hašení až do úplného konce zásahu, dokud nedojde k dostatečnému snížení teploty na bezpečnou hranici. Ochlazování nádrží musí být rovnoměrné, aby nedocházelo k prasklinám a deformacím způsobeným pnutím materiálu vlivem rozdílných teplot. Vodu lze využít i na ředění hořlavého prostředí pomocí skrápění plamene přímo v ohnisku požáru vodní mlhou nebo ve formě tříštěných plamenů [23].

Hašení požáru pomocí pěny je u třídy požáru B velmi efektivní. Lze provést dva způsoby hašení pěnou – *plošné* a *objemové*. U plošného hašení se pěna rovnoměrně aplikuje na hladinu, čímž vytvoří kompaktní vrstvu, která izoluje a zabraňuje vypařování kapaliny do zóny hoření (obr. 12). U objemového hašení dochází k preventivnímu vyplnění prostoru s nebezpečím výbuchu. Hasební pěnu lze rozdělit na těžkou, střední a lehkou, přičemž rozdíl mezi nimi je ve způsobu přípravy a číslu napěnění³.

K plošnému hašení se využívá především těžká a střední pěna, přičemž k objemovému hašení pěna lehká. Těžkou pěnou se hasí v úvodu zásahu, kdy jsou ztížené podmínky a nelze se přiblížit k prostoru hoření. Při hašení ji lze vrhat z větší dálky pomocí proudnice a díky velkému obsahu vody napomáhá k ochlazování prohřáté vrstvy hořící kapaliny.

Střední pěna se aplikuje po snížení intenzity hoření, kdy je možné přiblížení k místu hoření a vytvoření souvislé vrstvy na hladině kapaliny, kterou izoluje. Použití lehké pěny může být problematické na volném prostranství, neboť může být odnášena konvektivním prouděním. Její využití je tedy především v uzavřených prostorech při objemovém nebo preventivním hašení.

³ Číslo napěnění = poměr mezi objemem vyrobené pěny a objemem použitého roztoku pěnidla.



obr. 12: Hašení hořící nafty pomocí pěny [24]

Hašení pomocí inertních plynů je na volném prostranství proveditelné pouze při požárech v malých měřítkách, a to pomocí přenosných hasicích přístrojů. Způsob hašení je založen na zředění okolního vzduchu a snížení koncentrace kyslíku do takové míry, že hoření ustane.

Hašení pomocí prášku je vhodné po předchozím ochlazování nebo v kombinaci s jinými hasebními prostředky, např. pěnou či vodou. Prášek pouze zpomaluje reakci hoření a nemá ochlazovací efekt. Pokud je tedy okolní zařízení zahřáté na teplotu vznícení, může dojít k opětovnému započetí hoření ihned po ukončení dodávky prášku [23].

Požáry třídy F

Důvodem, proč se látky kapalného skupenství dělí do dvou tříd požáru, jsou jejich rozdílné PTCH (tab. 10). Pro požáry třídy F nelze efektivně použít běžné hasební prostředky, které účinkují na požáry třídy B. Oleje při požáru vysoce převyšují svou teplotu vznícení vlivem vysoké akumulace tepla. Při hoření tedy dochází k přehřátí, což způsobuje čerání na hladině, které má mj. negativní dopad na správnou funkci pěnícího hasebního prostředku, jelikož narušuje jeho souvislou vrstvu.

tab. 10: Porovnání PTCH hořlavých kapalin třídy požáru B a F [25]

<i>Hořlavá kapalina</i>	<i>Bod vzplanutí [°C]</i>	<i>Teplota vznícení [°C]</i>	<i>Spalné teplo [MJ/kg]</i>
<i>Methanol</i>	7	385	22,8
<i>Nafta</i>	60	250	42,5
<i>Řepkový olej</i>	329	409	38,5

Použití vody jako hasebního prostředku je také nevhodné. Každá kapka vody při dopadu do hořícího oleje zvětší svůj objem nejméně 1700krát, což má za následek vyvržení hořící kapaliny z nádrže. Hasební prášek je taktéž velmi nevhodný k hašení požáru třídy F, jelikož dochází k nárazu prášku na hladinu kapaliny a následnému vystřelování prachových částic obalených olejem do okolí.

Požáry třídy F jsou proto velmi specifické. Lze je hasit pouze certifikovanými hasebními prostředky pro požáry třídy F. V zásadě, ale využívají hasební prostředky pro požáry třídy

F principu přerušení hoření vlivem vytvoření tuhé izolační vrstvy na povrchu hořící kapaliny, která v důsledku chemické reakce zabraňuje přístupu vzduchu [25].

2.4 Procesy sdílení tepla hořících kapalin

Při hoření kapaliny v nádobě dochází ke všem třem způsobům přenosu tepla – kondukcí, radiací a konvekcí, přičemž některé jsou dominantnější v závislosti mj. na velikosti plochy odhořívání. Následující kapitola uvádí a popisuje tyto tři způsoby přenosu tepla.

2.4.1 Kondukcce

Přenos tepla kondukcí (vedením) probíhá v hmotném prostředí (pevná, kapalná i plynná fáze) a tepelná energie je předávána sousedními částicemi vlivem vzájemných srážek z oblastí s vyšší energií do oblastí s energií nižší. Tento proces je označován jako difúze energií, a proto se lze setkat s tzv. *teplnou difúzí* jako označením pro přenos tepla kondukcí [26].

V nádobách s hořící kapalinou dochází ke kondukcí mezi hořící kapalinou a okrajem nádoby. Intenzita tepelného toku je, dle Fourierova zákona, popsána následujícím vztahem:

$$\dot{q}_{knd} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (14)$$

kde \dot{q}_{knd} intenzita tepelného toku kondukcí [W/m^2],
 λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$],
 $\text{grad } T$ změna teploty [K],

přičemž tepelný tok lze odvodit následovně:

$$\dot{Q}_{knd} = \int \dot{q}_{knd} \, dS \quad (15)$$

resp. pro hořící kapalinu v nádobě:

$$\dot{Q}_{knd} = \lambda \cdot \pi \cdot D (T_f - T_l) \quad (16)$$

kde \dot{Q}_{knd} tepelný tok kondukcí [W],
 T_f teplota plamene [K],
 T_l teplota kapaliny [K].

2.4.2 Radiace

Přenos tepla radiací (sáláním) není závislý na hmotném prostředí a tepelná energie je přenášena elektromagnetickým zářením [26]. Radiace je stěžejní složkou v procesu přenosu tepla u intenzivního – plně rozvinutého požáru hořlavých kapalin.

K radiaci dochází mezi složkou plamene a hladinou kapaliny, přičemž její tepelný tok je závislý na teplotě plamenů a emisivitě. Emisivita vyjadřuje, do jaké míry jsou schopny horké plameny vyzařovat tepelné záření. Intenzitu tepelného toku radiací lze vyjádřit tzv. Stefan-Boltzmannovým zákonem pomocí následující rovnice:

$$\dot{q}_r = \sigma \cdot T_f^4 \cdot \varepsilon \quad (17)$$

kde \dot{q}_r intenzita tepelného toku radiací [W/m^2],
 ε emisivita plamene [-],
 σ Stefan-Boltzmannova konstanta [$W/(m^2 \cdot K^4)$].

Následný vztah pro tepelný tok radiací je následovný:

$$\dot{Q}_r = S \cdot \sigma \cdot T_f^4 \cdot \varepsilon \quad (18)$$

U hořících kapalin v nádobách působí radiace mezi plamenem a hladinou kapaliny, přičemž dochází i k tzv. re-radiaci, tedy zpětné radiaci z povrchu hladiny kapaliny. Intenzitu tepelného toku re-radiací lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$\dot{q}_{rr} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_f^4 - T_l^4) \quad (19)$$

kde \dot{q}_{rr} intenzita tepelného toku re-radiací [W/m^2].

2.4.3 Konvekce

Přenos tepla konvekcí (prouděním) nastává v kapalně nebo plynné fázi. Při konvekci dochází k přenosu tepelné energie vlivem difúze a advekce. Náhodný pohyb molekul v kapalině se nazývá difúze. Advekce znamená, že se tekutina pohybuje ve velkém množství molekul, tedy objemově, a to v jakýkoliv okamžik. Přenos energie pak nastává vlivem superpozice těchto dvou mechanismů [26].

U hořící kapaliny v nádobě dochází ke konvekci mezi složkou plamene a hladinou kapaliny. Následující vztah popisuje intenzitu tepelného toku vycházející z Newtonova ochlazovacího zákona:

$$\dot{q}_{knv} = \alpha \cdot (T_f - T_l) \quad (20)$$

kde \dot{q}_{knv} intenzita tepelného toku konvekcí [W/m^2],
 α součinitel přestupu tepla [$W/(m^2 \cdot K)$],

přičemž následující vztah určuje velikost tepelného toku:

$$\dot{Q}_{knv} = S \cdot \alpha \cdot (T_f - T_l) \quad (21)$$

2.4.4 Entalpická bilance hmotnostního toku

Vlivem přenosů tepelných toků se ohřívá kapalina v nádobě a dochází k intenzivnímu hmotnostnímu toku par, které se v určité vzdálenosti nad hladinou vznítí. Celková intenzita tepelného toku hořící kapaliny je tedy úměrná energii potřebné k vypařování kapaliny. Tento jev je popsán následující entalpickou bilancí [13]:

$$\dot{m}'' \cdot [\Delta h_v + c_p \cdot (T_b - T_\infty)] = \dot{q}'' \quad (22)$$

kde Δh_v měrná výparná entalpie kapaliny [J/kg],

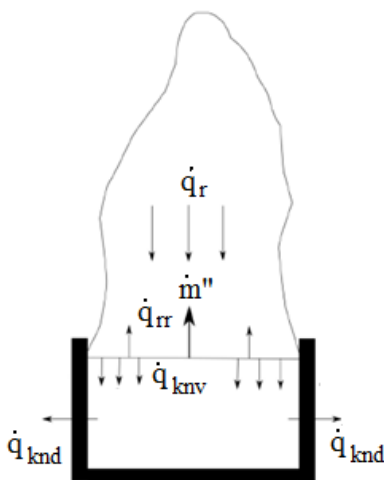
c_p tepelná kapacita kapaliny [J/K],

T_∞ teplota okolního vzduchu [K],

T_b teplota varu kapaliny [K].

Celková intenzita toku tepla (\dot{q}'') se skládá ze součtu intenzity přenosu tepla pomocí konvekce na hladinu kapaliny (\dot{q}_{knv}) a intenzity toku tepla radiací od plamene na hladinu (\dot{q}_r). Tuto hodnotu poté snižují tepelné ztráty, ke kterým dochází pomocí intenzity přenosu tepla kondukcí z okraje nádoby (\dot{q}_{knd}) a re-radiací z povrchu hladiny (\dot{q}_{rr}) [9]. Rovnici (23) lze tedy upravit na následující tvar, který je schematicky zobrazen na obr. 13:

$$\dot{m}'' \cdot [\Delta h_v + c_p \cdot (T_b - T_\infty)] = \dot{q}_{knv} + \dot{q}_r - \dot{q}_{knd} - \dot{q}_{rr} \quad (23)$$



obr. 13: Schématické znázornění intenzity hmotnostního a tepelného toku hořící kapaliny v nádobě:
 q_{knv} – konvekce mezi hladinou a plamenem; q_r – radiace z plamene; q_{rr} – re-radiace z povrchu hladiny; q_{knd} – ztráty způsobené kondukcí [21]

Složky tepelného toku re-radiace a kondukcce jsou tak malé, že je možné jejich zanedbání. Hlavními složkami přenosu tepla u hořících kapalin je tedy radiace a konvekce, přičemž jedna z forem je vždy dominantnější v závislosti na velikosti průměru nádoby (tab. 11).

tab. 11: Hodnoty tepelných toků při hoření methanolu v nádobách o různých průměrech [27]

Průměr nádrže [m]	Přenos tepla radiací [kW/m ²]	Přenos tepla konvekcí [kW/m ²]
0,01	5,7	175,5
0,1	18,7	27,3
0,3	35,4	25,9
1	56,1	25,7

U průměrů menších, tedy mezi 0,05-0,2 m, převládá konvekce a u větších než 0,2 m je dominantní přenos tepla pomocí radiace. U průměrů nad 0,2 m lze tedy zanedbat jak složku re-radiace a kondukce, tak i složku konvekce. Lze tedy počítat pouze se zjednodušenou bilanční rovnicí, která jako celkovou hodnotu intenzity hmotnostního toku uvažuje pouze složku radiace [20]:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}_r}{\Delta H_{eff}} = \frac{\sigma \cdot T_f^4 \cdot \varepsilon}{\Delta H_{eff}} \quad (24)$$

Pokud by hoření kapaliny probíhalo v uzavřeném prostoru, k celkové intenzitě tepelného toku by se přičetla intenzita tepelného toku z ohřáté kouřové vrstvy, kumulující se v horní části prostoru. Kouřová vrstva, vlivem radiačního toku, sálá zpět na hladinu kapaliny a tím ji opět zahřívá.

2.4.5 Radiační tok od plamene

Vzhledem k tomu, že přenos tepla pomocí radiace je nezávislý na hmotném prostředí, vzniká vysoká pravděpodobnost, že dojde k ohřátí okolních předmětů. Pro zjištění hodnoty radiace v určité vzdálenosti od plamene, bylo stanoveno hned několik výpočetních modelů.

Radiační model bodového zdroje

Jedním z modelů je tzv. *radiační model bodového zdroje* (Point Source Radiation Model), který patří z koncepčního hlediska mezi ty jednodušší. Předpoklad tohoto modelu je plamen založený na bodovém zdroji umístěném ve středu plamene. Vzdálenost (R) je poté vzdálenost mezi předmětem umístěným mimo plamen a středem plamene v jeho polovině výšky (P):

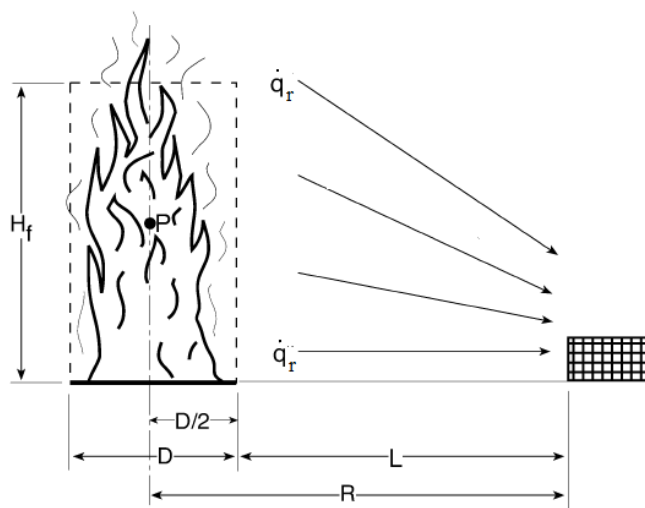
$$\dot{q}_r = \frac{\chi_r \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (25)$$

kde χ_r součinitel radiačního toku [-],

R vzdálenost ke středu plamene od předmětu [m]

Q rychlost uvolňování tepla [kW]

Součinitel χ_r závisí na typu paliva (kapaliny) a vlastnostech plamene. Obecně platí, že u paliv, které hoří plamenem s malým množstvím sazí (např. alkoholy) je hodnota součinitele cca 0,15, zatímco u paliv, které hoří s velkým výskytem sazí se součinitel pohybuje okolo hodnoty 0,6. Vzdálenost R je poté odvozena podle Pythagorovy věty (obr. 14) [20].



obr. 14 Schéma intenzity sálání radiálního modelu bodového zdroje na předmět mimo plamen [20]

Radiační model pevného plamene

Druhý model, který se nazývá **radiační model pevného plamene** (*Solid Flame Radiation Model*), je o něco složitější. Vychází z předpokladu, že požár může být simulován hořením pevného tělesa jednoduchého geometrického tvaru. Vyjadřuje, že radiace je vyzařována pouze z povrchu tělesa, tedy plamene, přičemž plyny dále nepřispívají k celkové intenzitě tepelného toku. Radiace od plamenů hořící kapaliny na tělesa mimo plamen lze vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$\dot{q}_r = E \cdot F_{1 \rightarrow 2} \quad (26)$$

kde E radiální výkon plamene [kW/m^2],

$F_{1 \rightarrow 2}$ konfigurační faktor [-].

Sálavý výkon plamene je celkové sálavé teplo opouštějící povrch požáru jednotkou plochy za jednotku času dle následujícího vztahu:

$$E = 58 \cdot (10^{-0,00823 \cdot D}) \quad (27)$$

Konfigurační faktor je geometrická veličina, která je funkcí cílového místa, výšky plamene a průměru plamene. Hodnota této veličiny se pohybuje v rozmezí mezi 0 až 1, přičemž, pokud je předmět velmi blízko plamene, zadává se hodnota 1 a s jeho vzdáleností od plamene hodnota úměrně klesá [20].

2.5 Závěr

Kapitola „Současný stav poznání“ shrnuje teoretickou problematiku hořlavých kapalin. Celkem je rozdělena do tří kapitol. V první kapitole uvádí PTCH významné pro hořlavé kapaliny, a to teplotu vzplanutí, teplotu vznícení a oblasti výbušnosti. Další kapitola shrnuje parametry, které ovlivňují procesy hoření kapalin. Mezi tyto parametry se řadí zejména var, rychlost odhořívání, průběh HRR nebo charakteristika plamene. V rámci této kapitole jsou dále uvedeny možnosti

hašení hořlavých kapalin v závislosti na jejich druhu. V neposlední řadě se teoretická část diplomové práce věnuje procesům přenosu tepla v hořící kapalině.

Teoretická část řeší kapaliny obecně, oproti části praktické, která už je úzce zaměřená pouze na dvě konkrétní kapaliny – methanol a motorovou naftu. V části teoretické jsou uvedeny analytické vzorce, které jsou následně využity v části praktické.

3 Experimentální hodnocení parametrů procesu hoření kapaliny v nádobě

3.1 Úvod

Experimentální část se zabývá procesem hoření kapalin v nádobách. Je rozdělena do celkem čtyř kapitol, přičemž každá z kapitol řeší odlišný model hoření. První dvě kapitoly jsou zaměřené na volné hoření kapaliny v nádobách o různých tvarech se stejnou půdorysnou plochou (obr. 15a). Průběh těchto dvou experimentů je totožný, přičemž je použita akorát rozdílná kapalina – methanol a motorová nafta. Hlavním sledovaným parametrem je potom vliv rozdílnosti tvaru použitých nádob na hmotnostní úbytek, HRR a charakteristiku plamene, tedy výšku, svítivost a teplotu.

Třetí kapitola je poté zaměřena na hoření kapaliny v místnosti s následnou možností porovnání s volným hoření kapaliny z kapitol předešlých (obr. 15b). Sledovaným parametrem je průběh hoření a teplota jak uvnitř, tak mimo místnost.

Poslední kapitola popisuje průběh methanolové kalibrační zkoušky. Hlavním sledovaným parametrem je průběh HRR. Průběh HRR je porovnán s průběhem z volného hoření methanolu z kapitoly předešlé.

Jednotlivé výše uvedené kapitoly jsou nazvány podle typu použité kapaliny nebo způsobu hoření, následovně:

- Experiment 1: Vliv geometrie nádoby na parametry hoření methanolu,
- Experiment 2: Vliv geometrie nádoby na parametry hoření motorové nafty,
- Experiment 3: Proces hoření kapalin v místnosti,
- Kalibrační methanolová zkouška.



a)

b)

obr. 15: Požární zkoušky: a) Experiment 1; b) Experiment 3

Experiment 1 a kalibrační methanolová zkouška jsou následně simulovány v matematickém CFD modelu pomocí software FDS. Matematické CFD modely jsou založeny na obecných PTCH použitých hořlavých kapalin. Chemické složení, jež ovlivňuje průběh hoření kapalin, se může lišit od kapalin použitých při požární zkouškách. V experimentální části diplomové práce jsou porovnány výstupní hodnoty požárních scénářů, nicméně nelze očekávat zcela shodné výstupy. Pro požární scénáře s motorovou naftou nejsou tyto CFD modely uváděny, neboť pro získání relevantních výstupů by bylo nutné provést chemický rozbor složení nafty.

3.1.1 Požární scénáře

Experiment 1 a 2

Tyto dva experimenty se od sebe liší pouze v typu použité kapaliny. V experimentu 1 je použit methanol a v experimentu 2 je jako výchozí kapalina použita motorová nafta. Oba experimenty zahrnují celkem tři požární scénáře:

- volné hoření methanolu, resp. nafty v nádobě o čtvercovém tvaru půdorysné plochy,
- volné hoření methanolu, resp. nafty v nádobě o kruhovém tvaru půdorysné plochy,
- volné hoření methanolu, resp. nafty v nádobě o obdélníkovém tvaru půdorysné plochy.

Cílem těchto dvou experimentů je porovnat vliv odlišné geometrie nádob na volné hoření kapaliny při zachování stejné půdorysné plochy dna. V jednotlivých požárních scénářích jsou sledovány parametry hoření kapaliny, tj. hmotnostní úbytek kapaliny, HRR, teploty v okolí plamene a charakteristika plamene kapaliny s využitím analytických výpočtů z části teoretické. Požární scénáře s methanolem jsou dále modelovány pomocí matematického CFD modelu.

Experiment 3

Experiment 3 se zabývá hořením kapaliny v nádobě situované v místnosti. Sledovány jsou především teploty a průběh hoření kapaliny. V rámci tohoto experimentu jsou posuzovány dva následující požární scénáře, které se liší v použité kapalině:

- hoření motorové nafty v místnosti,
- hoření methanolu v místnosti.

Tento experiment má za cíl popsat průběh procesu hoření kapaliny v místnosti s následným porovnáním s volným hořením kapaliny z experimentu 1 a 2. Použitá nádoba je v obou případech čtvercového tvaru půdorysné plochy (obr. 16).

Kalibrační methanolová zkouška

V rámci této požární zkoušky je hlavním sledovaným parametrem průběh HRR s následným možným porovnáním průběhu HRR methanolu v kruhové nádobě z experimentu 1. Kalibrační methanolová zkouška je simulována pomocí matematického CFD modelu.

3.1.2 Hořlavé kapaliny

Pro experimentální část práce byly vybrány dvě hořlavé kapaliny – methanol a motorová nafta. Methanol neboli methylalkohol, s chemickým vzorcem CH_4O , resp. CH_3OH spadá do skupiny alkoholů jako nejjednodušší alifatický alkohol. Je to bezbarvá, čirá tekutina s alkoholovým zápachem. Fyzikální a chemické vlastnosti použitého methanolu popisuje následující tabulka:

tab. 12: Fyzikální a chemické vlastnosti methanolu [28]

<i>Fyzikální a chemické vlastnosti</i>	<i>Hodnota</i>
<i>Bod varu</i>	64-65 °C
<i>Bod vzplanutí</i>	11 °C
<i>Bod vznícení</i>	455 °C
<i>Hustota (20 °C)</i>	790 kg/m ³
<i>Výhřevnost</i>	19,83 MJ/kg ¹⁾
¹⁾ Údaj je převzat z jiného zdroje, viz [29]	

Jako druhá kapalina byla použita motorová nafta, resp. diesel. Motorová nafta je směs kapalných uhlovodíků. Kapalina má nažloutlou barvu a typický naftový zápach. Je hojně využívána v průmyslu nebo jako palivo pro vznětové motory. Její fyzikální a chemické vlastnosti popisuje následující tabulka:

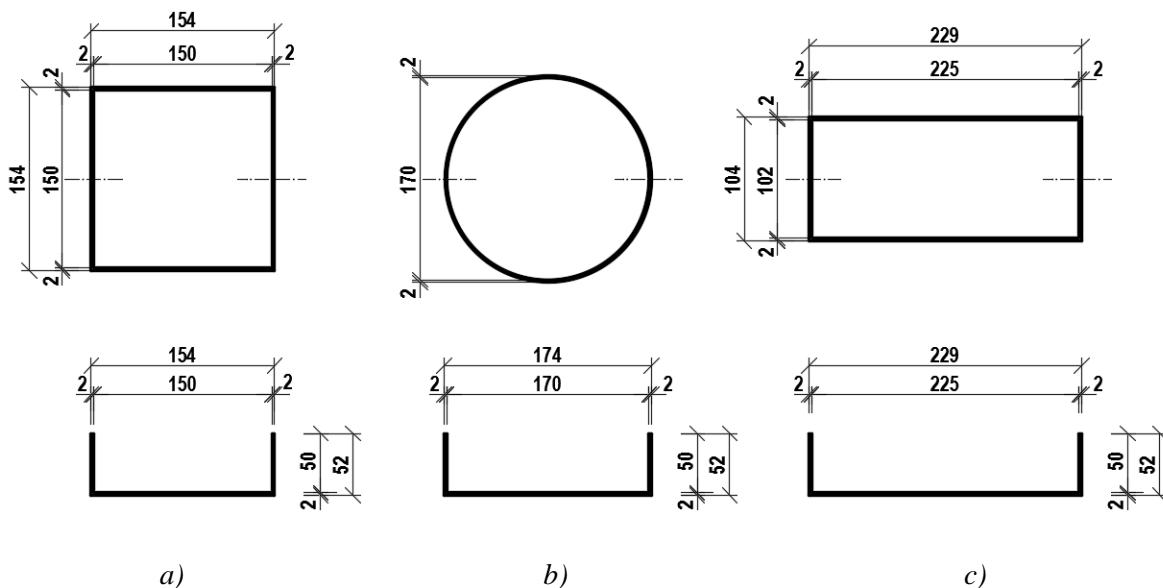
tab. 13: Fyzikální a chemické vlastnosti motorové nafty [30]

<i>Fyzikální a chemické vlastnosti</i>	<i>Hodnota</i>
<i>Bod varu</i>	170-360 °C
<i>Bod vzplanutí</i>	<56 °C
<i>Bod vznícení</i>	<225 °C
<i>Hustota (20 °C)</i>	800 kg/m ³
<i>Výhřevnost</i>	42 MJ/kg ¹⁾
¹⁾ Údaj je převzat z jiného zdroje viz [17]	

Tyto dvě kapaliny byly vybrány záměrně pro demonstraci chování kapalin s rozdílnými fyzikálně chemickými vlastnostmi za požáru. Z tab. 12 a tab. 13 vyplývá, že methanol je vysoce hořlavá kapalina, která díky velmi nízké teplotě vzplanutí spadá do I. třídy nebezpečnosti, zatímco motorovou naftu lze zařadit do III. až IV. třídy nebezpečnosti. Co se týče teploty vznícení, methanol spadá do nejméně rizikové teplotní třídy, tedy T1, zatímco motorová nafta s bodem vznícení okolo 225 °C je zaříděna do třídy T3.

3.1.3 Aparatura

Použitá aparatura se sestrojila pro účely těchto požárních zkoušek. Nádoby byly svařeny z ocelového plechu 1 × 2 m, tl 2 mm podle níže určených rozměrů (obr. 16). Půdorysná plocha dna nádob je 225 cm² (± 2 cm²).



obr. 16: Rozměry jednotlivých nádob: a) čtvercová nádoba; b) kruhová nádoba; c) obdélníková nádoba

Experiment 1 a 2

Hmotnostní úbytek vzorku byl měřen pomocí stolní váhy KERN GAB s maximální váživostí 30 kg a s přesností 0,2 g. Váha je přizpůsobena na okolní teploty do 40 °C. Byla tedy oddělena od prostoru, kde se měřilo, nehořlavou minerální vatou tak, aby nedošlo k případnému poničení vlivem působení vysokých teplot. V průběhu měření byl displej vah snímán kamerou SJCAM SJ4000, což umožnilo následné odečtení a přepsání hmotnostního úbytku do programu MS Excel 2010, jelikož váha neumožňuje přímé zapisování. Za měřicí prostor bylo situováno měřítko, které bylo nastaveno po 10 cm s nulovou hladinou v místě dna nádoby, pro vyhodnocování výšky plamene hořící kapaliny.

Teplotu v ose plamenem měřilo pět termoelektrických článků (dále jen termočlánků). Vzdálenosti termočlánků od dna nádoby jsou schematicky zobrazeny na obr. 17 a obr. 18. Termočlánky se zapojily do ústředny, která byla dále propojena s počítačem. Zapisování hodnot probíhalo v intervalu 5 s, a to až do úplného vyhoření kapaliny v nádobě.

Experiment 3

K simulaci obvodových stěn místnosti se použily pórobetonové tvárnice tl. 50 mm a sádkartonové desky tl. 12,5 mm. K měření teploty docházelo pomocí tří termočlánků umístěných v prostoru místnosti a napojených skrze ústřednu do počítače. Zapisování hodnot probíhalo v intervalu 5 s až do úplného vyhoření kapaliny.

3.1.4 Software

Pro matematické CFD simulace byl použit software FDS ve verzi 6.5.2. Software FDS je vyvíjen Národním institutem standardů a technologie v USA (NIST = angl. National Institute of Standards and Technology). FDS pracuje na základě numerických výpočtů Navierovy-Stokesovy rovnice pro nízké rychlosti toku tekutin [31]. Software nedisponuje pre-procesorem

a zdrojový kód je obvykle psán v textovém souboru, který obsahuje informace ohledně výpočetní oblasti, pevných objektech, otevřenosti/uzavřenosti ploch, vlastností jednotlivých materiálů a výstupů.

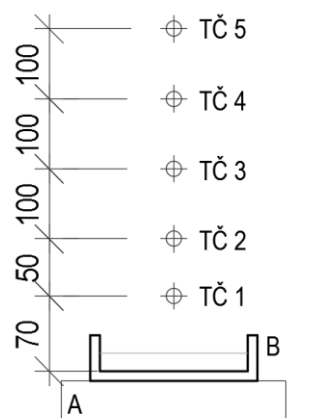
Výstupem je poté soubor ve formátu csv, který může být pomocí programu DataPlot jednoduše převeden do uživatelsky přívětivějšího xsl souboru. Jako vizualizační nástroj byl použit software Smokeview verze 6.3.12.

3.1.5 Průběh experimentů

Všechny požární zkoušky proběhly v zázemí požární laboratoře na UCEEB ČVUT v Praze. Veškerá měření byla provedena dvakrát z důvodu případné eliminace možných vzniklých chyb a pro vyšší spolehlivost výsledků.

Experiment 1 a 2

Před začátkem experimentu se sestavila a rozmístila aparatura pro co nejlepší možné zachycení průběhů výsledků. Schéma půdorysného rozmístění použité aparatury je zobrazeno na obr. 17



obr. 17: Schéma rozmístění aparatury – Experiment 1 a 2, kde A – měřící váha; B – nádoba s kapalinou

Termočlánky byly umístěny svisle nad osou nádoby. Vzdálenosti termočlánků od dna nádoby jsou následující (obr. 17):

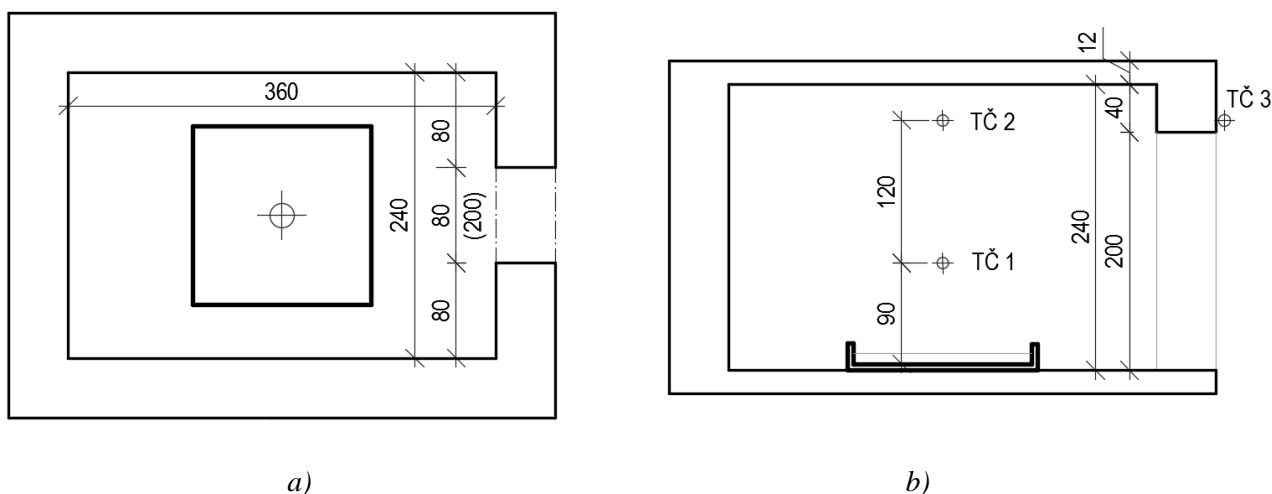
- TČ 1: 70 mm,
- TČ 2: 120 mm,
- TČ 3: 220 mm,
- TČ 4: 320 mm,
- TČ 5: 420 mm.

Zkouška proběhla pro všechny tři nádoby postupně. První měření se konalo s nádobou čtvercového tvaru, poté s kruhovou a poslední byla nádoba obdélníková. Po úplném vyhoření kapaliny se nádoba zchladila na okolní teplotu tak, aby byly stejné počáteční podmínky pro další měření.

Kapalina se nejdříve odměřila a následně nalila do připravené nádoby na vynulované váze. Objem kapaliny byl pro všechny tři nádoby stejný a to 530 ml. Poté se spustilo pomocí počítače zapisování teplot z termočlánků a záznam kamer. Po uplynutí 30 s se zapálila kapalina. Methanol byl zapálen pomocí krbových zápalek, jelikož má nízkou teplotu vzplanutí. Iniciace motorové nafty bylo obtížnější a trvala delší dobu, jelikož má vyšší teplotu vzplanutí než methanol. Ukončení záznamu proběhlo až po úplném vyhoření kapaliny a zchlazení termočlánků na pokojovou teplotu.

Experiment 3

Pro účely hoření kapaliny v místnosti byla sestavena místnost o vnitřních rozměrech $240 \times 360 \times 240$ mm, která odpovídala rozměrům laboratorní pece na UCEEB ČVUT v Praze v měřítku 1:10 (obr. 18). Obvodové stěny místnosti byly sestaveny z pórobetonových tvárnic, přičemž stropní a podlahová deska se zhotovila, z důvodu odlehčení, ze sádkartonových desek.



obr. 18: Schéma Experimentu 3 [mm]: (a) Půdorys; (b) Řez

Vzdálenosti jednotlivých termočlánků od dna nádoby jsou následující (obr. 18b):

- TČ 1: 90 mm;
- TČ 2: 210 mm;
- TČ 3: 210 mm.

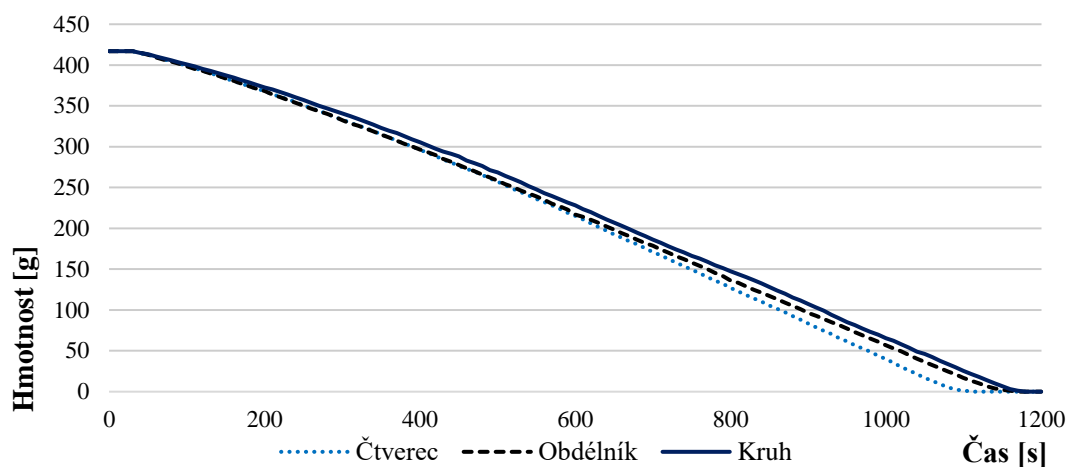
Ucelená místnost se spolu se čtvercovou nádobou umístila na váhu. Po vynulování váhy se nalila kapalina. Nejdříve byl zkoušen methanol a poté motorová nafta.

3.2 Experiment 1: Vliv geometrie nádoby na parametry hoření methanolu

3.2.1 Požární zkouška

Počáteční objem methanolu v nádobě je pro všechny požární scénáře stejný, tedy 530 ml s hmotností 0,417 kg, při hustotě 790 kg/m^3 . Prvním sledovaným parametrem je hmotnostní

úbytek hořícího methanolu. Hmotnostní úbytek byl odečítán z kamerového záznamu, který byl pořízen během požární zkoušky, a to v intervalu 10 s.



obr. 19: Hmotnostní úbytek methanolu – Požární zkouška

Methanol byl v nádobách iniciován ve 30 s. Od iniciace lze pozorovat (obr. 19), že jsou křivky pro všechny typy nádob lineárně klesající, bez viditelných odchylek. Tento fakt je způsoben tím, že methanol má nízkou teplotu varu. Přechod do varu od iniciace kapaliny je téměř okamžitý. U nádoby čtvercového tvaru dochází k nejrychlejšímu odhoření methanolu, přičemž nádoby obdélníkového a kruhového tvaru dohořívají v delším časovém intervalu, a to v téměř totožném čase.

Průměrná hodnota úbytku hmotnosti methanolu, pro jednotlivé tvary nádob, vztažená na 1 m^2 za 1 s , je uvedena v následující tabulce (tab. 14). V tabulce jsou dále uvedeny hodnoty uvolněného tepla, pro jednotlivé tvary nádob, které vychází z rovnice (8) z kapitoly 2.3.3. Vyplývá, že methanol ve čtvercové nádobě odhoří jako první, jelikož má vyšší hodnotu úbytku hmotnosti než methanol v nádobě kruhového a obdélníkového tvaru.

tab. 14: Průměrné hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti a uvolněného tepla methanolu – Požární zkouška

<i>Tvar</i>	\dot{m}'' [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	Q^1 [kW]
Čtverec	0,0171	7,65
Obdélník	0,0163	7,27
Kruh	0,0161	7,18

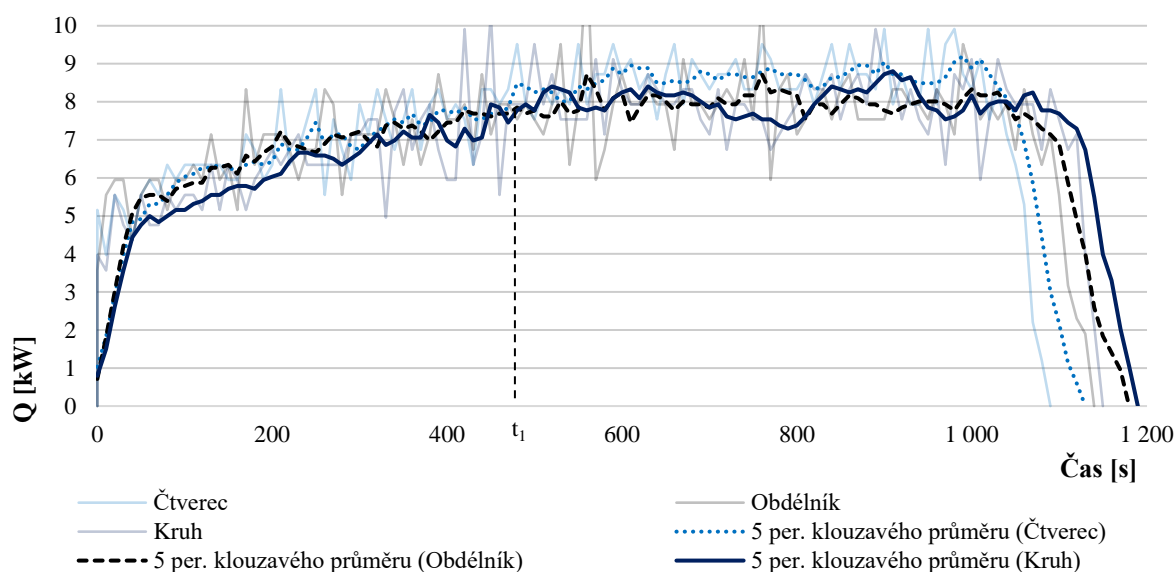
¹⁾ Účinnosti spalování $\chi_s = 1,0$; efektivní výhřevnost $\Delta H_{\text{eff}} = 19,83 \text{ MJ/kg}$.

HRR

Mezi další sledované parametry patří průběh HRR v závislosti na tvaru nádoby. Průběh HRR vychází z analytického výpočtu uvolněného tepla, který je uveden v kapitole 2.3.3. Hodnoty jednotlivých křivek jsou tedy závislé na hodnotách hmotnostního úbytku, viz graf – obr. 20.

Průběh křivek HRR je velmi obdobný pro všechny nádoby s methanolem. Ihned po iniciaci dochází k rychlému vývinu tepla, které se v grafu projeví jako strmé stoupání křivky HRR. K ustálení dochází až v čase t_1 . Maximální hodnoty uvolněného tepla se v závislosti na tvaru

nádoby pohybují v rozmezí 8 až 9 kW. Nejnižších hodnot dosahuje methanol v nádobě kruhové a nejvyšších v nádobě čtvercové.



obr. 20: Průběh HRR methanolu – Požární zkouška

Průměrná hodnota uvolněného tepla methanolu v jednotlivých nádobách je zapsána v tab. 14. Efektivní výhřevnost a plocha požáru je u všech nádob s methanolem stejná, tudíž jediný parametr, který ovlivňuje průběh HRR je hmotnostní úbytek. Průběh křivek HRR pro jednotlivé nádoby s methanolem odpovídá hodnotám hmotnostního úbytku.

Doba trvání hoření

Ze získaných hodnot uvedených výše (tab. 14) je možné pomocí analytického výpočtu uvedeného v kapitole 2.3.4 stanovit předpokládanou dobu hoření methanolu. Následující tabulka (tab. 15) uvádí hodnoty pro jednotlivé požární scénáře. Předpokládaná doba hoření, stanovená analyticky, je nepatrně nižší než hodnota stanovená experimentem. Nejkratší doba hoření je určena u methanolu ve čtvercové nádobě a nejdelší u methanolu v nádobě kruhové. V rámci analytického výpočtu se veškeré plochy, jiného než kruhového tvaru, přepočítávají dle vzorce (5) z kapitoly 2.3.2. V tomto případě je tedy vliv tvaru geometrie nádoby zanedbatelný.

tab. 15: Doba trvání hoření methanolu – Požární zkouška

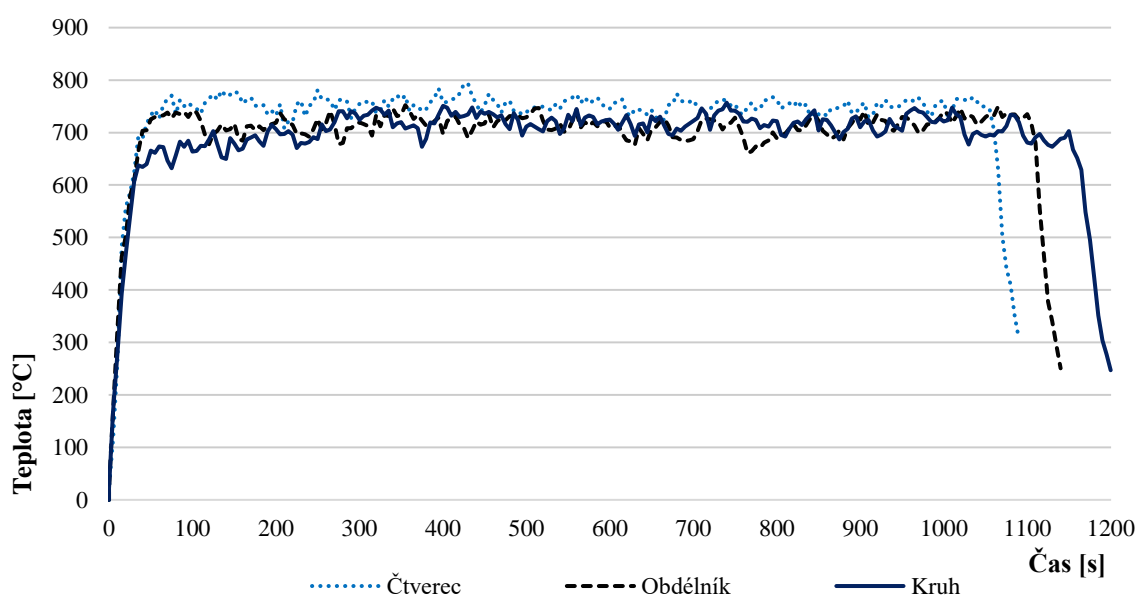
<i>Tvar</i>	<i>Doba trvání požáru stanovená výpočtem [s]</i>	<i>Doba trvání požáru stanovená požární zkouškou[s]</i>
<i>Čtverec</i>	1140	1100
<i>Obdélník</i>	1196	1170
<i>Kruh</i>	1211	1190

Charakteristika plamene

V rámci charakteristiky plamene se měřila teplota, pomocí pěti termočlánků rozmístěných v ose plamene (obr. 17). Teploty zachycené termočlánky jsou ovlivněny značnou fluktuací plamene.

Nejvíce odpovídající je proto termočlánek 1 (TČ 1), který je situován nejbližší hladině kapaliny (obr. 17). Naměřené hodnoty z TČ 1 jsou zobrazeny na následujícím grafu (obr. 21). Z křivek pro jednotlivé nádoby s methanolem lze pozorovat obdobný průběh. Po velmi rychlém nárůstu se hodnoty ustálí okolo 700-750 °C.

Hodnota teplot odpovídá teorii dle McCaffreyho (viz kapitolu 2.3.5), která stanovuje teploty v blízkosti hladiny kapaliny jako konstantní pod 950 °C. Nejvyšších teplot dosahuje methanol v nádobě čtvercové s teplotami okolo 750 °C, což odpovídá i jeho nejrychlejšímu odhoření. Nejnižších naopak dosahuje methanol v nádobě kruhové. Rozdíly jsou ale nepatrné. Průměrná teplota se pohybuje okolo 700-750 °C, a to pro všechny tři požární scénáře.



obr. 21: Průběhy teplot methanolu zaznamenané termočlánekem 1 – Požární zkouška

Hoření methanolu doprovázel charakteristický světle modrý, turbulentní plamen (obr. 22), který značně fluktoval. Výška plamene byla při požární zkoušce stanovena pro methanol v nádobě kruhové a obdélníkové nepatrně nižší než u methanolu v nádobě čtvercové. Vyšší plamen u čtvercové nádoby koresponduje s vyšším úbytkem hmotnosti, kdy dochází k opětovnému zahřívání hladiny kapaliny, vlivem radiace od plamene.

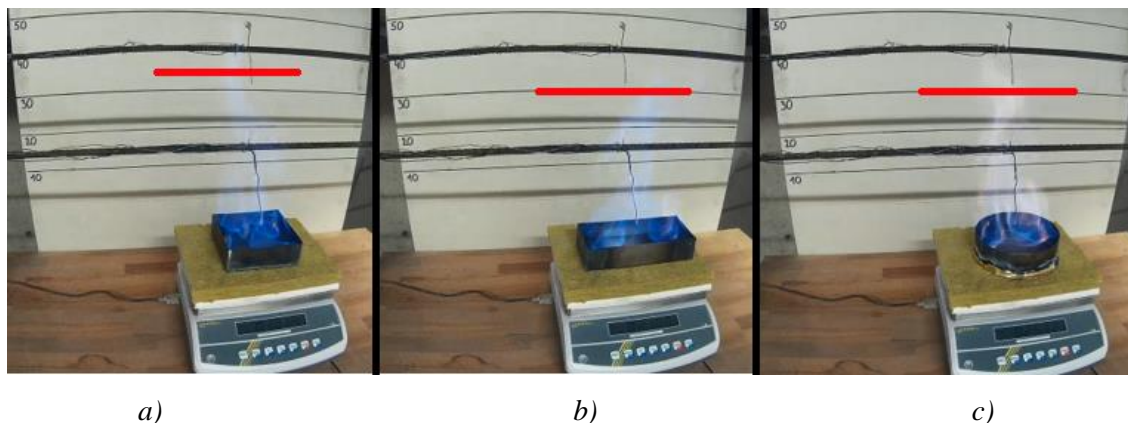
Následující tabulka (tab. 16) udává hodnoty střední výšky plamene vypočtené dle Heskestada a dle Thomase (viz rovnici (12) a (13)). Dále uvádí střední hodnoty výšky plamene naměřené v průběhu požární zkoušky. Na obr. 22 jsou zobrazeny fotky jednotlivých nádob s methanolem se zachycenou střední výškou plamene methanolu.

tab. 16: Střední výška plamenů methanolu – Požární zkouška

<i>Tvar</i>	<i>Thomas</i> ¹⁾ [m]	<i>Heskestad</i> [m]	<i>Požární zkouška</i> [m]
Čtverec	0,46	0,35	0,35
Obdélník	0,44	0,35	0,30
Kruh	0,45	0,34	0,30

¹⁾ hustota okolního vzduchu $\rho_a = 1,18 \text{ kg/m}^3$; gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Z tabulky (tab. 16) vyplývá, že hodnoty získané dle Heskestada odpovídají hodnotám získaných při požární zkoušce více nežli hodnoty určené podle Thomase. U výpočtu dle Heskestada je odchylka od požárních zkoušek v řádech centimetrů, na rozdíl od Thomase, kde je výpočet konzervativnější a výsledky jsou odlišné v řádech decimetrů.



obr. 22: Plamen methanolu zachycený při požární zkoušce s červeně vyznačenou střední výškou:
a) čtvercová nádoba; b) obdélníková nádoba; c) kruhová nádoba

Shrnutí naměřených výsledků

Z charakteristiky hoření kapaliny v nádobě plyne, že by jako první měl odhořet methanol v nádobě kruhové. Kapalina má tendenci hořet v kruhovém tvaru, a to nezávisle na tvaru nádoby, ve které je uložena. Byl předpoklad, že čtvercová a obdélníková nádoba odhoří později vlivem chladnějších rohů, oproti methanolu v nádobě kruhové. Požární zkouška tento předpoklad nepotvrdila. Rozdíl mezi hodnotami je ale tak minimální, že jsou výsledky v podstatě srovnatelné. Značejší rozdíly by se projevíly u nádob větších průměrů, kde jsou procesy přenosu tepla uvnitř kapaliny ustálenější.

3.2.2 Matematický model

Požární zkouška experimentu 1 je dále simulována v matematickém CFD modelu pomocí software FDS. Výpočet se provedl pro všechny tři požární scénáře, přičemž mezi sledované parametry patří především průběh HRR. Pro matematickou CFD simulaci byl použit software FDS ve verzi 6.5.2. Jako vizualizační nástroj posloužil software Smokeview ve verzi 6.3.12.

Vstupní parametry

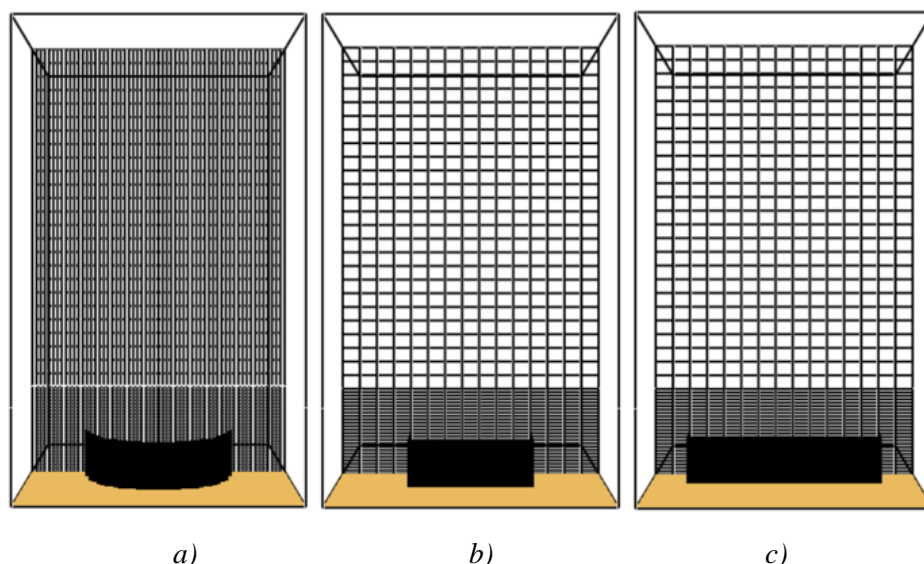
Výpočetní prostor byl zvolen tak, aby byl následující výpočet co nejefektivnější a zároveň odpovídal jednotlivým požárním scénářům. Byla modelována pouze nádoba s kapalinou, situována do výpočetního prostoru, který byl ohraničen otevřenými plochami o rozměrech $30 \times 30 \times 50$ mm. Ocelová nádoba je spolu s kapalinou definována jako pevná překážka, které jsou přiřazeny materiálové charakteristiky. Umístění jednotlivých pevných překážek je definováno pomocí souřadnic x , y , z . Souřadnice je určena dvěma body, vyjadřujícími polohu plochy. Poloha termočlánků vychází ze schématu na obr. 17.

Výpočetní síť

Výpočetní prostor je rozdělen po výšce na dvě sítě kvůli časové náročnosti výpočtu. Obě sítě počítaly souběžně na každém z jader použitého hardware. Sítě mají stejný počet buněk a to 90 000, resp. 180 000 v součtu, pro požární scénář s kruhovou nádobou a 5625, resp. 11 250, pro scénáře se čtvercovou a obdélníkovou nádobou (obr. 23b, c).

Jemnější výpočetní síť u požárního scénáře s kruhovou nádobou je stanovena, kvůli kruhovému tvaru nádoby. Spodní síť má celkové rozměry $300 \times 300 \times 10$ mm o velikosti jedné výpočetní buňky $5 \times 5 \times 4$ mm. Druhá, hrubší síť, má celkové rozměry $30 \times 30 \times 40$ mm s rozměry jedné výpočetní buňky $5 \times 5 \times 16$ mm (obr. 23a).

U požárních scénářů se čtvercovou a obdélníkovou nádobou jsou celkově sítě hrubější. Spodní síť, v oblasti kapaliny s nádobou, má rozměry jedné výpočetní buňky $20 \times 20 \times 4$ mm. Druhá, hrubější, má rozměry jedné výpočetní buňky $20 \times 20 \times 16$ mm (obr. 23b, c).



obr. 23: Zvolená výpočetní síť: a) kruhová nádoba; b) čtvercová nádoba; c) obdélníková nádoba

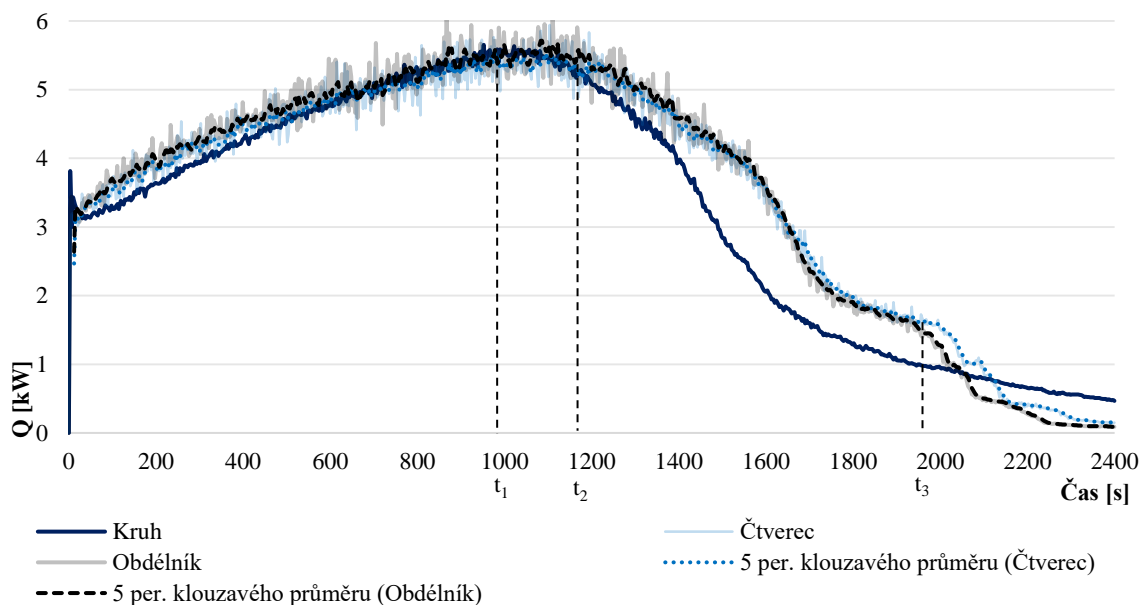
HRR

Hodnoty HRR pro jednotlivé požární scénáře jsou zobrazeny na následujícím grafu (obr. 24). U všech křivek HRR jsou znatelné tři fáze hoření. Křivka HRR roste ihned po iniciaci methanolu v nádobě až do času t_1 , kde se následně ustálí. V intervalu od času t_1 do času t_2 je methanol ve fázi ustáleného hoření. Od času t_2 křivka klesá až do úplného vyhoření kapaliny v nádobě.

Průběhy křivek HRR u požárního scénáře se čtvercovou a obdélníkovou nádobou jsou velmi podobné. Křivky se navzájem kopírují až do času t_3 , kde křivka čtverce mírně poklesne. Maximální hodnoty pro methanol v nádobě čtvercové a obdélníkové jsou stejné, a to 5,5 kW. Doba trvání hoření je také totožná pro obě dvě nádoby.

Požární scénář s kruhovou nádobou má průběh křivky HRR obdobný. Křivka roste až do fáze času t_1 , kde se následně ustálí na maximální hodnotě 5,5 kW. Fáze odhořívání je poté u

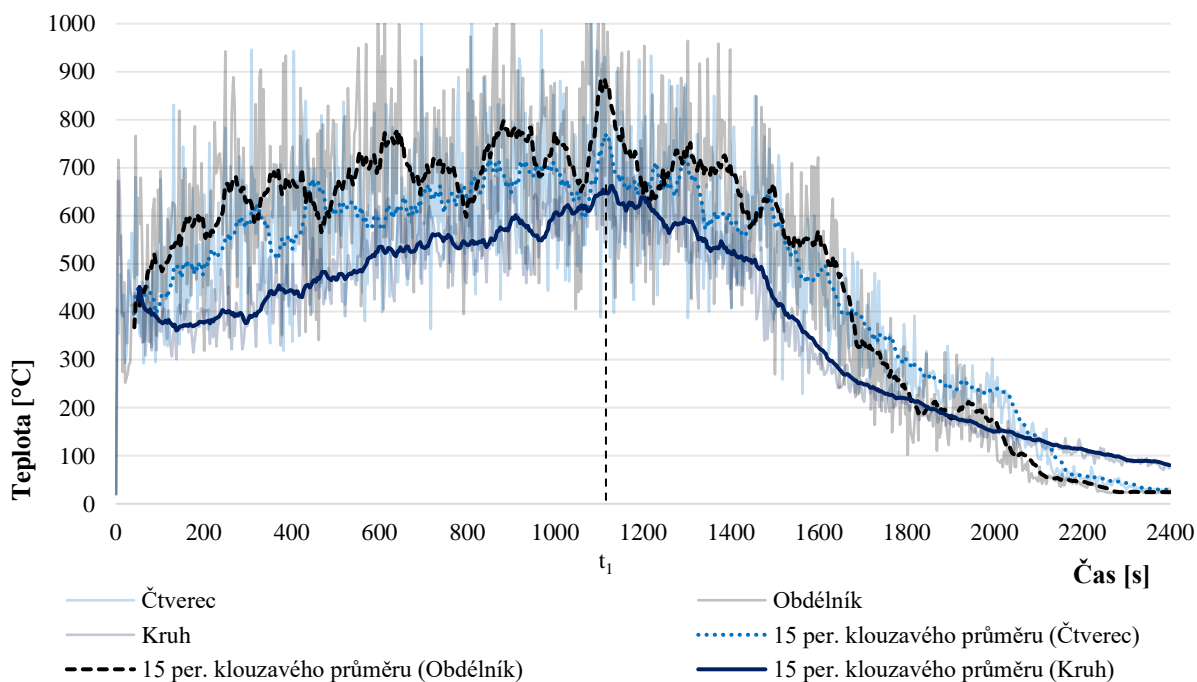
kruhové nádoby strmější, což vede k výsledku, že methanol v kruhové nádobě vyhoří jako první. Tento fakt může být způsoben i jemnější sítí, která byla použita u kruhové nádoby.



obr. 24: Průběh HRR methanolu – Matematický model

Charakteristika plamene

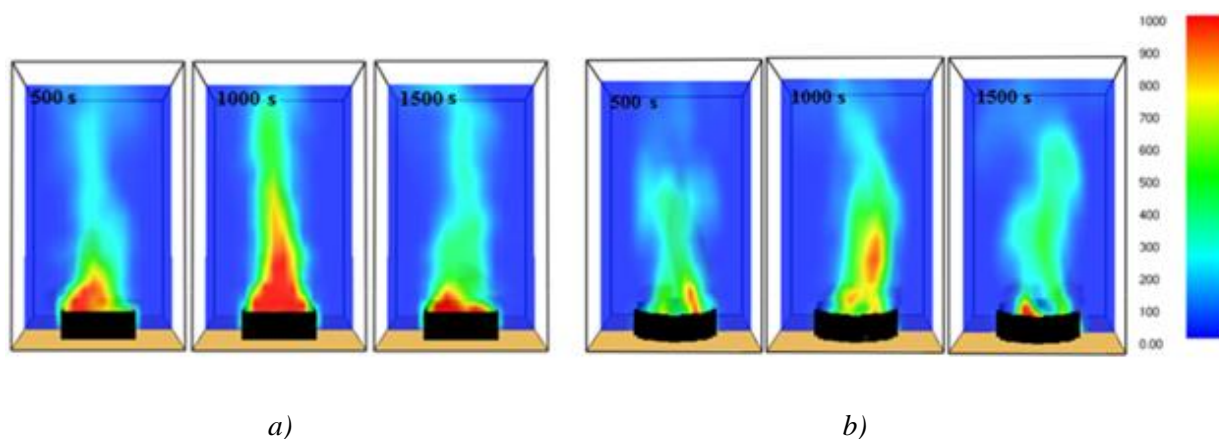
Hodnoty teplot měřených termočlánkem, umístěným v těsné blízkosti hladiny jsou zobrazeny na grafu (obr. 25). Průběhy křivek odpovídají průběhům HRR pro jednotlivé nádoby. Nejnižší hodnoty teplot má methanol v nádobě kruhové. Nejvyšších teplot dosahuje methanol v nádobě obdélníkové, přičemž jsou značně obdobné od hodnot teplot methanolu v nádobě čtvercové.



obr. 25: Průběhy teplot methanolu zaznamenané termočlánkem 1 – Matematický model

U křivek průběhů jednotlivých teplot jsou znatelné pouze dvě fáze. První fáze růstu se odehrává v intervalu od počátku hoření až do času t_1 , kde jsou teploty na své maximální hodnotě. Následně začíná fáze dohořívání, která trvá až do úplného vyhoření methanolu z nádoby. Teploty methanolu v nádobě kruhové jsou nižší oproti ostatním nádobám zhruba o 10 %. Tento fakt lze vysvětlit jemnější sítí, která byla použita u požárního scénáře s kruhovou nádobou. U methanolu v nádobách obdélníkového a čtvercového tvaru jsou teploty podobné s průměrnou hodnotou okolo 750 °C.

Celkově nižší teploty u methanolu v nádobě kruhové způsobují i nižší výšku plamene. Pro příklad je následující zobrazení (obr. 26), které porovnává výšky a teploty plamene methanolu v kruhové a čtvercové nádobě. Z obrázku je patrné, že vyšším plamenem disponuje methanol v nádobě čtvercové, což odpovídá jak teplotnímu grafu, tak grafu průběhu HRR, kde se křivka pohybuje výš nežli křivka methanolu v nádobě kruhové.



obr. 26: Porovnání plamene methanolu [°C] – Matematický model: a) čtvercová nádoba; b) kruhová nádoba

3.2.3 Výsledky a diskuze

Teorie před uskutečněnou zkouškou byla, že vyhoří jako první methanol v nádobě kruhové a poté až v nádobě čtvercové a obdélníkové, jelikož má kapalina tendenci odhořívát v kruhovém tvaru, a to nezávisle na tvaru nádoby. Hořící kapalina má v nádobách, které nemají kruhový tvar, v rozích nižší teplotu, což způsobuje i nižší celkový hmotnostní tok. Tento fakt se proběhlým experimentem nepotvrdil.

Při požárních zkouškách odhořel jako první methanol v nádobě čtvercové, poté v nádobě obdélníkové a jako poslední methanol v nádobě kruhové. Interval mezi vyhořením methanolu ve čtverci a v kruhu je menší než 100 s, tudíž velmi nepatrný oproti celkové době hoření. Na základě výsledků z uskutečněné požární zkoušky lze tvrdit, že vliv geometrie nádoby neměl zásadní význam na průběh hoření kapaliny. U menších průměrů dochází k tepelným ztrátám způsobených re-radiací a kondukcí skrz stěny nádoby, což může ovlivňovat výsledný hmotnostní úbytek.

Jednotlivé požární zkoušky byly následně simulovány pomocí matematického CFD modelu. Doba trvání hoření methanolu byla delší oproti požárním zkouškám. Výrazná byla fáze dohořívání, která trvala zhruba 1000 s. Jako první vyhořel methanol v nádobě kruhové, poté v nádobě obdélníkové a jako poslední v nádobě čtvercové.

Porovnání výsledků požární zkoušky a matematického modelu

HRR

Při srovnání průběhů křivek HRR matematického modelu s požární zkouškou je zřetelné, že při jednotlivých požárních zkouškách má methanol výrazně kratší interval doby dohořívání. Methanol při požárních zkouškách hoří zhruba o 1000 s kratší dobu než u matematických modelů. Hodnoty HRR matematického modelu jsou v porovnání s experimentem nižší o cca 30 %. Při zanedbání fáze dohořívání lze konstatovat, že je průběh křivek podobný, kdy od počátku dochází k růstu až do ustálené hodnoty. Fáze ustáleného hoření je v rámci matematického modelu výrazně kratší a hodnoty HRR jsou stejné jak pro methanol ve čtvercové nádobě, tak pro methanol v obdélníkové nádobě. Na rozdíl od požárních zkoušek, kde nejvyšších hodnot HRR dosahuje methanol pouze v nádobě čtvercové.

Teploty

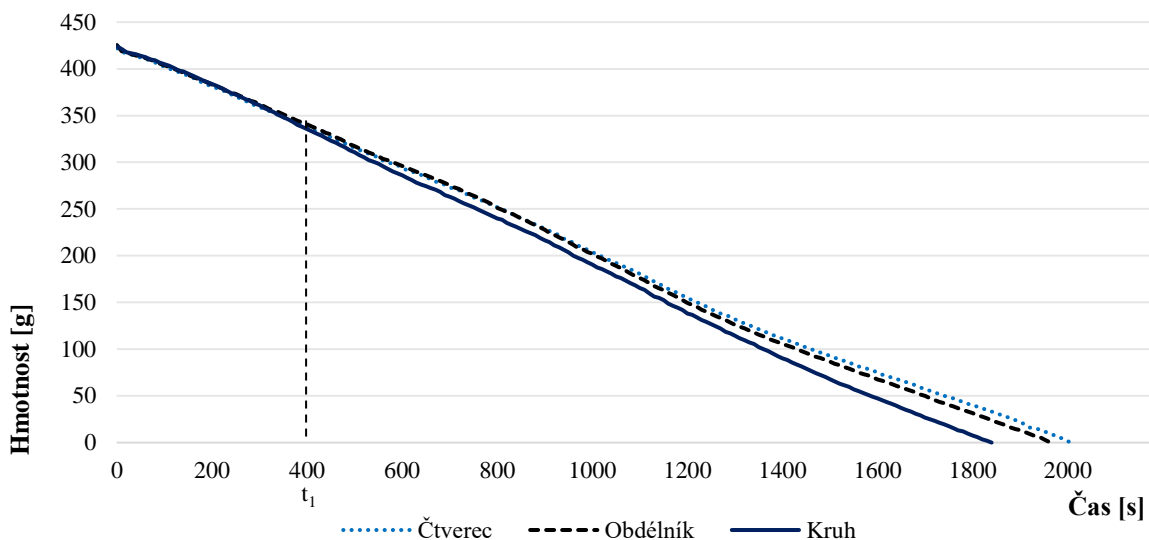
Průběhy jednotlivých křivek jsou ve srovnání s průběhy z požárních zkoušek odlišné. V matematickém modelu nedochází ihned po iniciaci k okamžitému nárůstu teplot na maximální hodnotu. Nárůst je zde pozvolnější a hodnoty teplot nejsou tak ustálené a celkově nižší, především u methanolu v nádobě kruhové, kde se teploty pohybují v průměru o 30 % níže oproti reálné požární zkoušce.

3.3 Experiment 2: Vliv geometrie nádoby na parametry hoření motorové nafty

3.3.1 Požární zkouška

Počáteční objem motorové nafty byl jako u zkoušky s methanolem ve všech nádobách stejný, tedy 530 ml. Při hustotě 800 kg/m^3 vycházela počáteční hmotnost kapaliny na 0,422 kg. Prvním sledovaným parametrem byl hmotnostní úbytek hořící motorové nafty. Hmotnostní úbytek se odečítal v intervalu 10 s. Následující graf (obr. 27) znázorňuje výsledné hodnoty pro všechny tři typy nádoby s hořící kapalinou.

Průběh jednotlivých křivek zaznamenaných na obr. 27 je lineární s tím, že jej lze rozdělit do dvou úseků. První úsek od počátku do hodnoty t_1 je pozvolnější a shodný pro všechny tři požární scénáře. Kapalina v tomto intervalu ještě nedosáhla varu. Druhý úsek, tedy od t_1 až do úplného vyhoření methanolu z nádoby, je nepatrně strmější, vlivem varu kapaliny. Interval má lehce odlišný průběh pro jednotlivé požární scénáře, kdy jako první odhoří motorová nafta v kruhové nádobě a poslední motorová nafta v nádobě čtvercové.



obr. 27: Hmotnostní úbytek motorové nafty – Požární zkouška

Průměrná hodnota úbytku hmotnosti motorové nafty pro jednotlivé tvary nádob, vztažená na 1 m^2 za 1 s , je uvedena v následující tabulce (tab. 17). V tabulce jsou dále uvedeny průměrné hodnoty uvolněného tepla hořícího methanolu, které byly odvozeny dle rovnice (8) uvedené v kapitole 2.3.3.

tab. 17: Průměrné hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti a uvolněného tepla motorové nafty – Požární zkouška

<i>Tvar</i>	\dot{m}'' [kg/(m ² · s)]	Q^1 [kW]
Čtverec	0,0093	6,15
Obdélník	0,0096	6,35
Kruh	0,0102	6,75

¹⁾ Účinnosti spalování $\chi_s = 0,7$; efektivní výhřevnost $\Delta H_{\text{eff}} = 42 \text{ MJ/kg}$.

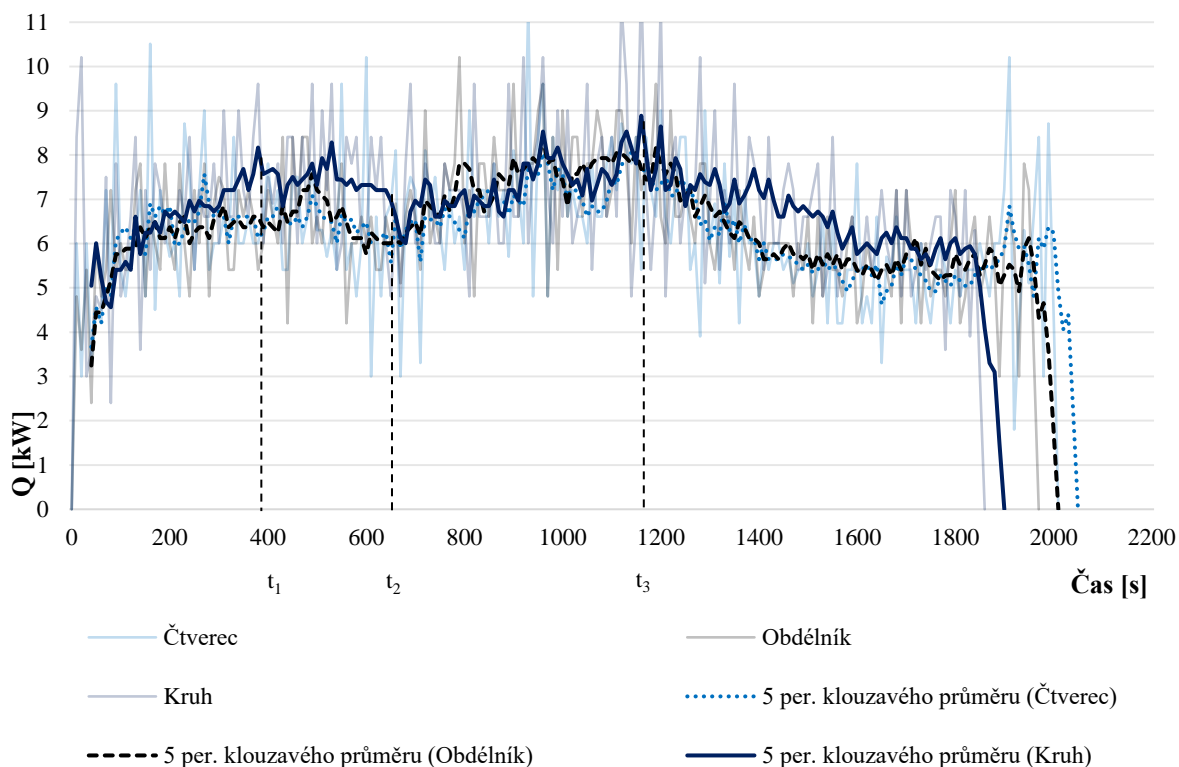
Nejvyšší rychlostní úbytek má motorová nafta v nádobě kruhové. Rozdíl oproti ostatním nádobám je ale jen nepatrný. Hodnoty rychlostního úbytku motorové nafty v nádobě čtvercové a obdélníkové jsou obdobné. Oproti experimentu s methanolem jsou jednotlivé hodnoty nižší, což má souvislost s účinností spalování motorové nafty. Motorová nafta hoří s poměrně vysokou tvorbou dýmu a sazí. Efektivní výhřevnost je tedy ponížena součinitelem účinnosti spalování, oproti methanolu, kdy je tento součinitel rovný hodnotě 1,0.

Motorová nafta má spolu s vysokou hodnotou teploty vzplanutí (III. Třída nebezpečnosti, viz kapitola 2.2.1) i vysokou hodnotu teploty varu. Oproti methanolu tak dosahuje varu až po výrazně delší době od iniciace, což následně přispívá i k nižším hodnotám hmotnostního úbytku a celkově delšímu trvání doby hoření.

HRR

U všech tří požárních scénářů dochází ihned po iniciaci k okamžitému nárůstu křivky HRR. Hodnoty se poté pohybují po celou dobu hoření v rozmezí cca 6-8 kW (obr. 28). Rostoucí tendence křivky je zřejmá od iniciace až do času t_1 , kdy dochází k varu kapaliny a následnému

mírnému poklesu uvolněného tepla v intervalu mezi časy t_1 a t_2 . Následně dochází k opětovnému mírnému růstu HRR v intervalu t_2 a t_3 . Křivka HRR začíná klesat od času t_3 , kdy se kapalina dostává do fáze odhořívání. Maximální hodnoty uvolněného tepla dosahuje methanol v nádobě kruhové v čase t_3 , kde dosahuje hodnoty až 9 kW. Nejnižší maximální hodnoty dosahuje methanol v nádobě čtvercové, a to cca 8 kW, přičemž charakter a průběh obou křivek je obdobný.



obr. 28 Průběh HRR motorové nafty – Požární zkouška

Doba trvání hoření

Výpočtová doba hoření motorové nafty pro jednotlivé požární scénáře je uvedena v následující tabulce (tab. 18). Rozdíly mezi výsledky analytických výpočtu (viz rovnici (9)) a požárních zkoušek je minimální. Dle analytických výpočtů, které korespondují s požárními zkouškami, odhoří jako první motorová nafta v nádobě kruhové, poté v nádobě obdélníkové a jako poslední v nádobě čtvercové.

tab. 18: Doba trvání hoření motorové nafty – Požární zkouška

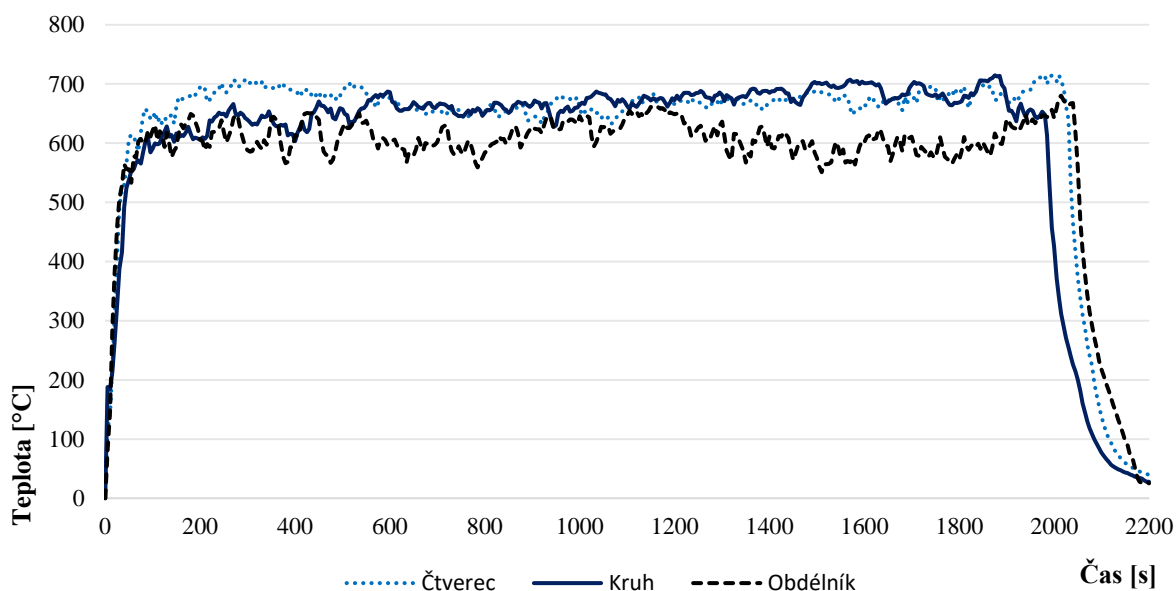
<i>Tvar</i>	<i>Doba hoření stanovená výpočtem [s]</i>	<i>Doba hoření stanovená požární zkouškou [s]</i>
<i>Čtverec</i>	2123	2000
<i>Obdélník</i>	2057	1960
<i>Kruh</i>	1936	1840

Charakteristika plamene

Teplota měřená v ose plamene je značně ovlivněná jeho fluktuací. Stejně jako u methanolové požární zkoušky je tedy uvažován pouze termočlánek TČ 1, který byl instalován v těsné blízkosti hladiny kapaliny. Hodnoty průběhů teplot jsou zobrazeny na následujícím grafu (obr. 29).

Jednotlivé průběhy křivek mají obdobný charakter. Všechny strmě rostou ihned po iniciaci kapaliny, přičemž se dostávají do ustálené fáze. Ustálená fáze trvá, s mírnými odchylkami, až do úplného vyhoření kapaliny z nádoby.

Nejvyšších hodnot dosahuje motorová nafta v nádobě kruhové, které se pohybují v průměru okolo 680 °C. Teploty motorové nafty v nádobě čtvercové jsou lehce pod hodnotami nafty z kruhové nádoby, přičemž průběh je do značné míry totožný. Nejnižší teploty jsou měřeny u motorové nafty v nádobě obdélníkové, kde se v průměru pohybují okolo 600 °C. Oproti požární zkoušce s methanolem jsou teploty nižší v průměru o 10 %, přičemž průběh křivek je obdobný.



obr. 29 Průběhy teplot motorové nafty zaznamenané termočlánkem 1 – Požární zkouška

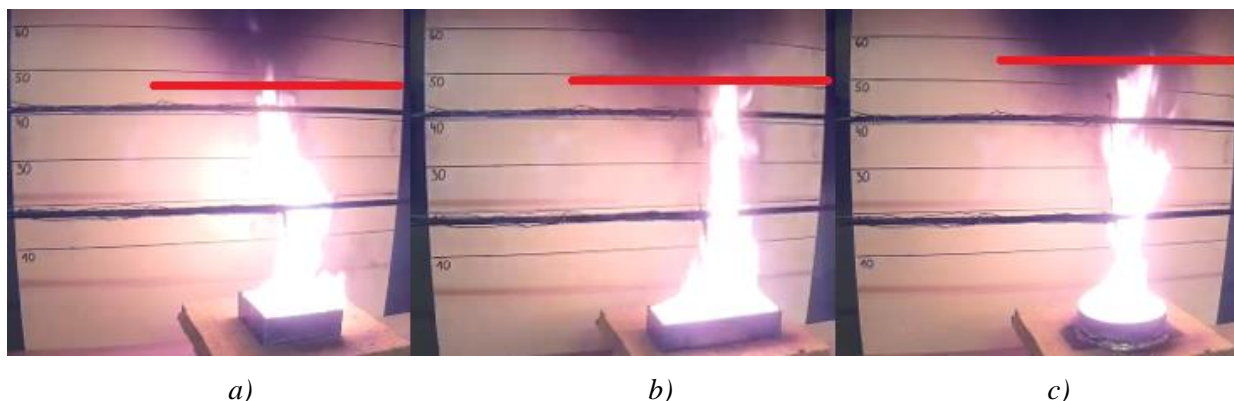
Plamen motorové nafty má žluté zbarvení a produkuje mnoho sazí a dýmu. Výška plamene byla oproti experimentu s methanolem výrazně vyšší. Motorová nafta v nádobách čtvercového a obdélníkového tvaru měla střední výšku plamene nepatrně nižší oproti motorové naftě v nádobě kruhové. Jak již bylo zmíněno vyšší plamen koresponduje s vyšším úbytkem hmotnosti, a proto má motorová nafta v kruhové nádobě plamen nejvyšší.

Následující tabulka (tab. 19) udává porovnání hodnot střední výšky plamene vypočtené dle teorie Heskestada a dle Thomase (viz kapitolu 2.3.5) s hodnotami naměřených v průběhu jednotlivých požárních zkoušek. Na obr. 30 jsou zachyceny plameny jednotlivých požárních zkoušek s vyznačením jejich střední výšky.

tab. 19: Střední výška plamenů motorové nafty – Požární zkouška

<i>Tvar</i>	<i>Thomas</i> ¹⁾ [m]	<i>Heskestad</i> [m]	<i>Požární zkouška</i> [m]
Čtverec	0,318	0,317	0,45
Obdélník	0,320	0,320	0,50
Kruh	0,330	0,330	0,60

¹⁾ hustota okolního vzduchu $\rho_a = 1,18 \text{ kg/m}^3$; gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.



obr. 30: Plamen motorové nafty zachycený při požární zkoušce s červeně vyznačenou střední výškou:
a) čtvercová nádoba; b) obdélníková nádoba; c) kruhová nádoba

3.3.2 Shrnutí

Motorová nafta vyhořela jako první v nádobě kruhové, poté v obdélníkové a následně ve čtvercové, přičemž mezi čtvercovou a obdélníkovou nádobou je rozdíl doby vyhoření pouze 40 s. Nafta v kruhové nádobě vyhořela o 120 s dříve. Dobám vyhoření odpovídají i ostatní charakteristiky, kdy je hmotnostní rychlost odhořívání či uvolněné teplo nejvyšší právě u motorové nafty v nádobě kruhové.

Vzhledem k celkové době trvání hoření, která byla pro motorovou naftu ve čtvercové nádobě stanovena na 2000 sekund, je maximální rozdíl 120 sekund zanedbatelný. Stejně jako u experimentu 1 lze říci, že se v rámci této požární zkoušky neprojevil vliv tvaru geometrie nádoby na průběh hoření motorové nafty.

V rámci tohoto experimentu se provedly pouze požární zkoušky pro jednotlivé nádoby s motorovou naftou. Požární zkoušky nebyly simulovány matematickým CFD modelem, jelikož nebylo známo přesné složení motorové nafty. Nebyl proveden chemický rozbor kapaliny pro zajištění možných vstupních dat potřebných pro formulaci CFD modelu. Chemická struktura motorové nafty mohla být ovlivněna přidáním různých směsí aditiv.

3.4 Experiment 3: Proces hoření kapalin v místnosti

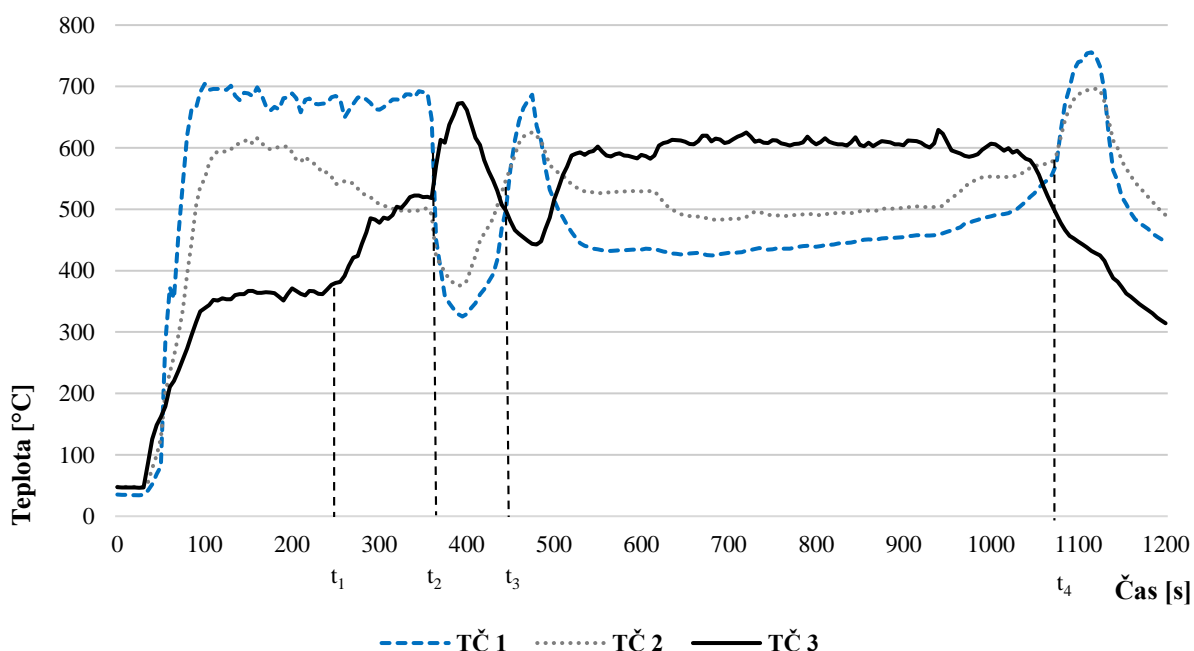
V rámci experimentu 3 se pro oba požární scénáře sledoval úbytek hmotnosti hořící kapaliny pomocí váhy, která byla vynulovaná a nastavená na počáteční hmotnost samotné kapaliny. Vlivem vysokých teplot se začala vypařovat vlhkost z materiálů, použitých pro simulaci místnosti, tedy pórobetonových tvárnic a sádkartonových desek. Váha po úplném vyhoření

kapalin končila v záporných číslech a naměřený úbytek hmotnosti byl nevypovídající. Hlavním sledovaným parametrem je tedy v obou případech pouze teplota měřená termočládky.

Objem použitých kapalin byl stejný jako u předešlých experimentů, tedy 530 ml. Použitá aparatura spolu s rozměry místnosti a vzdálenostmi jednotlivých termočládků jsou uvedeny v úvodu experimentální části (viz kapitolu 3.1).

3.4.1 Požární zkouška – motorová nafta

Hoření motorové nafty v místnosti probíhalo zcela odlišně ve srovnání s volným hořením z experimentu 2. Kapalinu se podařilo iniciovat v 55 s. Vzhledem k poměru jejího množství ku rozměrům místnosti se velmi rychle vytvořila kumulující vrstva kouře v horní části místnosti. Vrstva kouře poté zpětně ohřívala hladinu kapaliny a tím urychlovala proces hoření.



obr. 31: Průběh teplot motorové nafty v místnosti – Požární zkouška

Graf uvedený výše (obr. 31) zachycuje naměřené hodnoty teplot z instalovaných termočládků TČ 1, TČ 2 a TČ 3 (schéma umístění TČ – viz obr. 18). Ihned po iniciaci motorové nafty dochází k nárůstu teplot. V čase t_1 začíná probíhat var a dochází k prvnímu vyšlehnutí plamene skrz otvor ven z místnosti. Tento jev je možno pozorovat na křivce TČ 3 charakterizující termočlánek, který je umístěn vně místnosti přímo nad otvorem. Zde křivka změní svůj průběh a začíná mírně stoupat.

Vlivem vysokých teplot uvnitř místnosti dochází k velmi silnému varu motorové nafty. V závislosti na varu dochází ke vzkypění motorové nafty ven z nádoby. Během vzkypění poklesne teplota uvnitř místnosti – viz křivku TČ 1 a TČ 2 v bodě t_2 a naopak vlivem vyšlehnutí plamene skrz otvor se strmě zvýší teplota vně místnosti – viz křivku TČ 3. Vzápětí dochází k prostorovému vzplanutí, kdy začíná hořet i kumulující vrstva kouře v horní části místnosti. Prostorové vzplanutí je zachyceno čase t_3 , kdy křivky TČ 1 a TČ 2 strmě rostou,

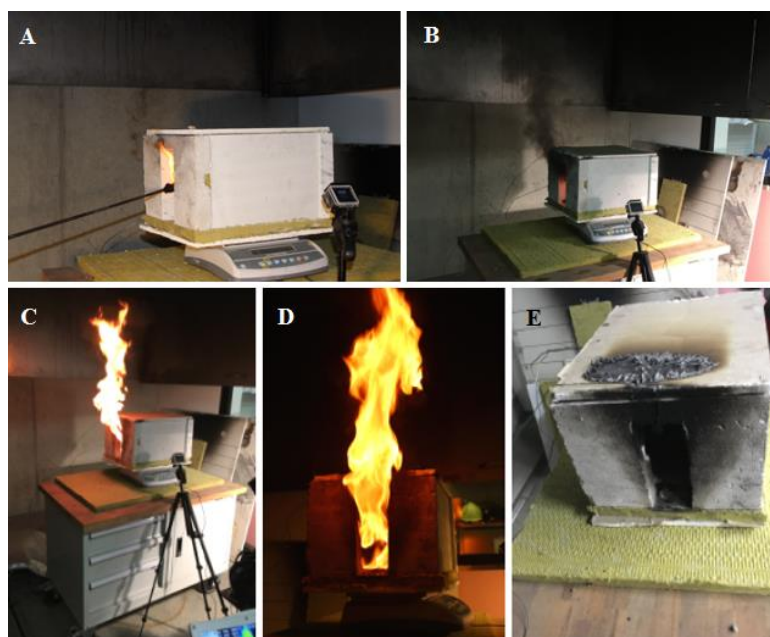
a naopak křivka TČ 3 klesá. Po prostorovém vzplanutí se hoření a s ním i teploty ustálí až do úplného vyhoření kapaliny v nádobě, ke kterému dochází ve 1200 s.

Strmý nárůst teplot v konečné fázi grafu, který je zachycený termočlánky uvnitř místnosti v časovém bodě t_4 , je zapříčiněn zmenšením plamene. Plamen motorové nafty se postupně „navrací“ zpátky do místnosti a tím současně, na krátký interval, zvýší teplotu uvnitř. Naopak teplota vně místnosti dál postupně klesá. Následující tabulka (tab. 20) uvádí časovou posloupnost požární zkoušky.

tab. 20: Průběh experimentu 3 – motorová nafta

Označení na grafu (obr. 31)	Čas [s]	Specifikace
-	-	Sestava aparatury
-	55	Iniciace motorové nafty
t_1	245	Var, vyšlehnutí plamene ven z místnosti
t_2	360	Vzkypění
t_3	450	Prostorové vzplanutí
t_4	1090	Navrácení plamene zpět do místnosti
-	1200	Vyhoření motorové nafty z nádoby

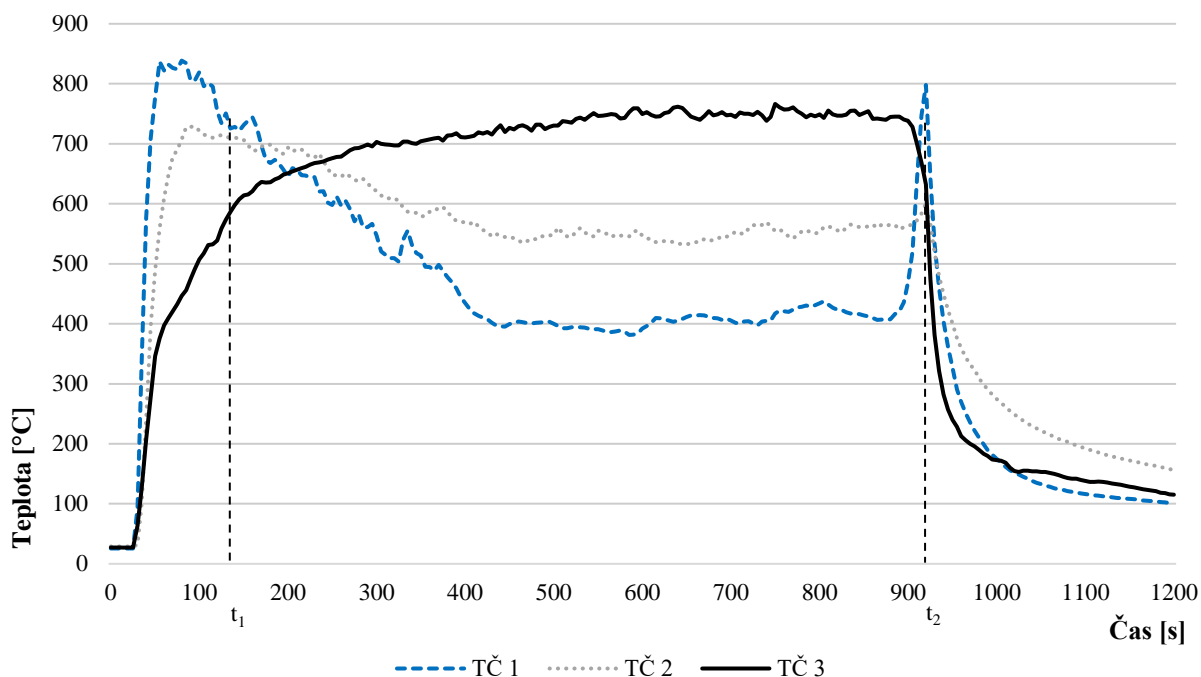
Motorová nafta měla v místnosti zcela odlišný průběh hoření (obr. 32) oproti průběhu volného hoření z experimentu 2. Výrazně nižší doba trvání požáru je přisouzena kumulující vrstvě kouře v horní části místnosti, která zpětně ohřívala hladinu kapaliny, a tím urychlovala proces hmotnostního toku par. Grafické znázornění teplot je přesnější vlivem nízké fluktuace plamene uvnitř místnosti. Oproti volnému hoření motorové nafty nejsou křivky teplot konstantního charakteru, díky dějům, které se vyskytly v průběhu hoření a ovlivnily tak chování kapaliny. Maximální hodnoty teplot zůstaly, ale stejné – okolo 700 °C.



obr. 32: Průběh experimentu 3: a) iniciace procesu hoření; b) kumulace kouřové vrstvy před následným vyšlehnutím plamene; c) Vyšlehnutí plamene – prostorové vzplanutí; d) Prostorové vzplanutí; e) Místnost po ukončení experimentu

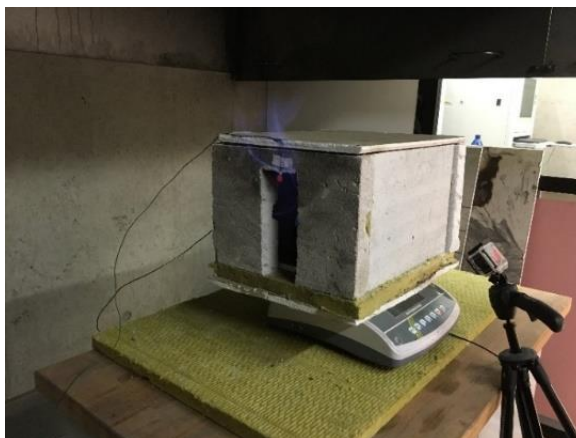
3.4.2 Požární zkouška – methanol

Hořící methanol, na rozdíl od motorové nafty, vytváří zcela minimální množství kouře. Nedochozí k tak výrazné kumulaci horní kouřové vrstvy, která by zpětně ohřívala hladinu kapaliny a zvyšovala tak hmotnostní tok. Následující graf (obr. 33) zaznamenává průběh teplot zachycených jednotlivými termočlánky.



obr. 33: Průběh teplot methanolu uvnitř místnosti – Požární zkouška

Ihned po iniciaci methanolu teplota roste na všech termočláncích, přičemž na termočláncích TČ 1,2 je stoupání výraznější díky umístění v blízkosti hladiny kapaliny. V čase t_1 dochází k prvnímu vyšlenutí plamene skrz otvor místnosti. Plamen methanolu je světle modrý, skoro neviditelný, proto bylo obtížné zachytit přesný okamžik jeho vyšlenutí v průběhu zkoušky. K prvnímu registrování tedy došlo až ve 315 s (obr. 34), přičemž na křivce grafu je tato část zratelná už přibližně ve 150 s, tedy v bodě t_1 .



obr. 34: Vyšlenutí plamene methanolu ven z místnosti

Vlivem vyšlehnutí plamene skrz otvor ven z místnosti se teplota uvnitř místnosti postupně snižuje. Snižování teploty uvnitř místnosti je znatelné od času t_1 na křivce TČ 1 a TČ 2. Vně místnosti se naopak teplota zvyšuje, což zachycuje termočlánek instalovaný nad otvorem do místnosti, který znázorňuje křivka TČ 3.

V čase t_2 opět dochází k navrácení plamene do místnosti, kdy se na malý okamžik zvýší teplota na termočláncích umístěných uvnitř místnosti. K úplnému vyhoření methanolu v nádobě dochází v čase okolo 1200 s. Následující tabulka (tab. 21tab. 20) uvádí časovou posloupnost požární zkoušky.

tab. 21: Průběh experimentu 3 – methanol

Označení na grafu (obr. 33)	Čas [s]	Specifikace
-	-	Sestava aparatury
-	30	Iniciace methanolu
t_1	150	Var, vyšlehnutí plamene ven z místnosti
t_2	920	Navrácení plamene zpět do místnosti
-	1200	Vyhoření methanolu z nádoby

Rozdíl mezi volným hořením methanolu v nádobě a v místnosti není tak zásadní jako u motorové nafty. Kumulující vrstva kouře u methanolu byla výrazně nižší a méně viditelná než u motorové nafty, tudíž tolik neovlivňovala průběh hoření. Doba trvání hoření methanolu v místnosti a při volném hoření se liší pouze o 100 s, což může vypovídat i o obdobné hodnotě hmotnostního úbytku v obou případech.

3.4.3 Výsledky a diskuze

Průběh požárních zkoušek uskutečněných v místnosti pro methanol a motorovou naftu je zcela odlišný. Při hoření motorové nafty došlo k jevům, které ovlivnily následný průběh a charakteristiku hoření. Naopak methanol hořel podobným způsobem jako při volném hoření v nádobě, a to bez vyskytujících se jevů, které by následně ovlivňovaly průběh jeho hoření.

U uskutečněných požárních zkoušek je možné vidět rozdílný způsob hoření jednotlivých kapalin při stejných počátečních podmínkách v závislosti na jejich odlišných materiálových charakteristikách. U motorové nafty došlo vlivem vysoké produkci dýmu a sazí k okamžitému utvoření husté kouřové vrstvy v horní části místnosti, která následně ovlivnila průběh hoření. Došlo jak k varu, vyšlehnutí plamene z místnosti, vzkypění, tak i následnému celkovému vzplanutí.

Na rozdíl od hoření methanolu, který produkoval minimální množství kouře, tudíž nedošlo k utvoření tak velké a husté kouřové vrstvy v horní části místnosti. Vlivem toho pak methanol v místnosti hořel obdobným způsobem jako při volném hoření. Došlo pouze k varu a následnému vyšlehnutí plamene ven z místnosti.

Při srovnání volného hoření a hoření v místnosti je znatelný rozdíl akorát u motorové nafty, Hoření motorové nafty doprovázely jevy, které se nevyskytovaly u volného hoření. Tyto

jevy ovlivnily i následnou dobu trvání hoření, kdy u volného hoření motorová nafta odhořela ve 2000 s, zatímco u hoření v místnosti ve 1200 s.

3.5 Kalibrační methanolová zkouška

3.5.1 Úvod

V průběhu diplomové práce se v zázemí požární laboratoře na UCEEB ČVUT v Praze konala kalibrační methanolová zkouška kalorimetru. V rámci kalibrační zkoušky se iniciovalo 10 l methanolu v kruhové nádobě o průměru 720 mm. Pro možné srovnání s výsledky z experimentu 1 se u kalibrační methanolové zkoušky dodatečně instalovaly termočlánky ve stejné vzdálenosti jako byly umístěny u experimentu 1 (obr. 35).

Hodnocenými parametry jsou jak hmotnostní úbytek, tak průběh HRR, charakteristika plamene a délka trvání hoření methanolu. Kalibrační methanolová zkouška byla dále simulovaná matematického CFD modelu s využitím software FDS, přičemž sledovaným parametrem byl průběh teploty a HRR.

3.5.2 Požární zkouška

Methanolová kalibrační zkouška kalorimetru proběhla dle normativních požadavků uvedených v *ISO 9705* [32] a platných pro Room Corner Test⁴, který předpokládá minimální jednorocní kalibraci měřících přístrojů.

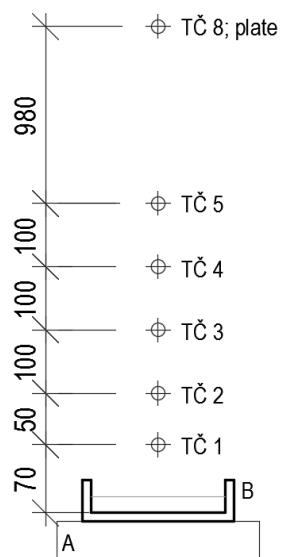
Požadavky dle ISO 9705

Objem použitého methanolu, který musí čistotu minimálně 98 %, je stanoven dle výchozí normy na 10 l. Kruhová nádoba by měla mít průměr 720 ± 10 mm a výšku 150 ± 10 mm, při tloušťce plechu 2 mm. Plocha dna poté vychází na $0,41 \pm 0,01$ m². Předpoklad pro správnou kalibraci kalorimetru vychází z hodnot uvolněného tepla, jehož maximální hodnota by se měla pohybovat okolo 140 kW. Následně získaná efektivní výhřevnost by se potom neměla lišit o více než 10 % od teoretické hodnoty 19,83 kJ/kg [32].

Průběh zkoušky

Kruhová nádoba s methanolem se umístí pod zvon kalorimetru na vynulovanou váhu, která měří úbytek hmotnosti kapaliny a současně v intervalu 1 s zapisuje naměřené hodnoty do počítače. Průběh HRR je měřen pomocí kalorimetru. Methanol se v rámci kalibrační zkoušky používá právě pro jeho schopnost téměř dokonalé účinnosti spalování, jelikož při hoření neprodukuje saze a dým, tak je jeho výsledná výhřevnost přímo úměrná hmotnostnímu úbytku.

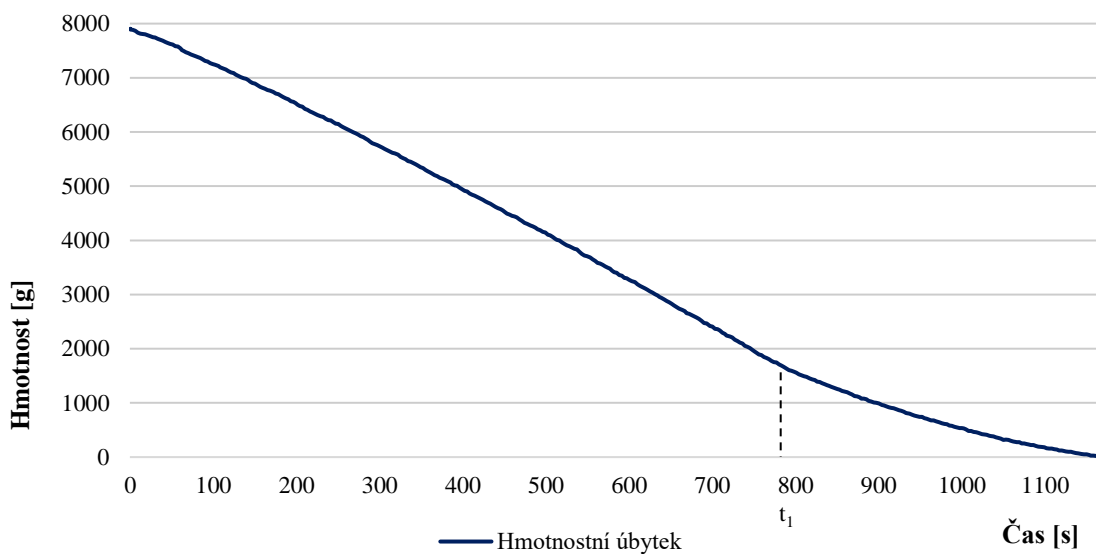
⁴ Room Corner Test je obecný název pro zkušební postup chování povrchových úprav (výrobků) v reálném měřítku.



obr. 35: Schéma rozmístění aparatury – kalibrační methanolvá zkouška: A – měřicí váha; B – nádoba s methanolem

Hmotnostní úbytek

Následující graf (obr. 36) popisuje naměřený hmotnostní úbytek methanolu. Methanol má při hustotě 790 kg/m^3 a objemu 10 l počáteční hmotnost $7\,900 \text{ g}$. K úplnému vyhoření kapaliny z nádoby dochází ve 1100 s .

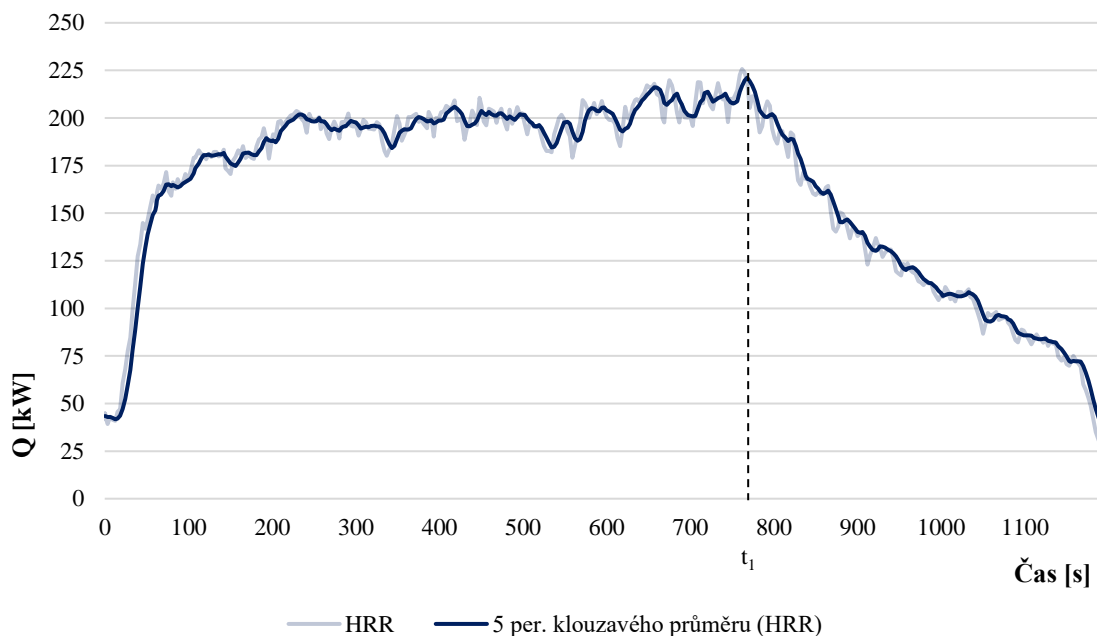


obr. 36: Hmotnostní úbytek methanolu – kalibrační methanolvá zkouška

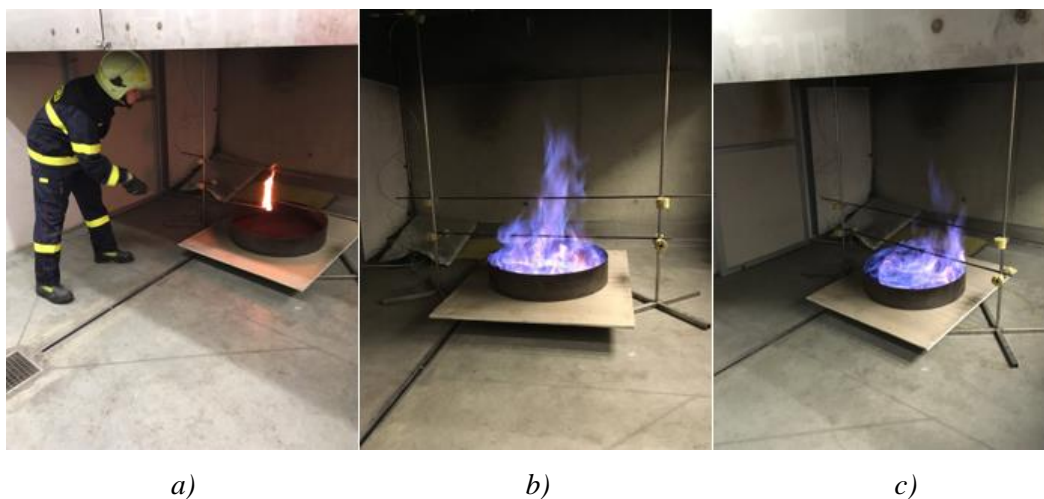
Křivka hmotnostního úbytku strmě klesá ihned po iniciaci methanolu. Klesání probíhá bez viditelných odchylek až do času t_1 , kde se lehce zmírňuje. Pozvolnější průběh klesání v konečné fázi dohořívání kapaliny může být způsobeno vlivem úplného vyhoření kapaliny uprostřed nádoby. Hmotnostní úbytek se snižuje, protože dochází k zmenšení celkové plochy odhořívání, jelikož odhořívá už jen plocha kapaliny situovaná při stěnách nádoby.

HRR

Průběh křivky HRR (obr. 37) odpovídá průběhu hmotnostního úbytku. K varu dochází velmi záhy po iniciaci – křivka HRR strmě roste a poté následuje ustálené hoření. V rámci intervalu ustáleného hoření se uvolněné teplo methanolu pohybuje okolo 160-220 kW (obr. 38b). Z grafu je pozorovatelný i interval dohořívání (obr. 38c), kdy křivka od času t_1 začíná pozvolna klesat.



obr. 37: Průběh HRR methanolu – kalibrační methanolová zkouška



obr. 38 Průběh methanolové kalibrační zkoušky: a) iniciace; b) ustálené hoření; c) dohořívání

Při kalibrační methanolové zkoušce by měla být maximální hodnota uvolněného tepla cca 140 kW. Celková efektivní výhřevnost, která vychází z podílu celkového uvolněného tepla a počáteční hmotnosti methanolu v nádobě (viz kapitolu 2.3.3), musí odpovídat teoretické hodnotě výhřevnosti methanolu, tj. 19,83 kJ/g ($\pm 10\%$) [32].

Následující tabulka (tab. 22) uvádí naměřené hodnoty a následnou vypočítanou celkovou výhřevnost použitého methanolu. Z tabulky vyplývá, že získaná efektivní výhřevnosti hodnoty

25,77 kJ/kg neodpovídá teoretické ani s přípustnou 10 % odchylkou. Provedená kalibrační zkouška tedy nesplnila podmínky dle příslušné normy. Důvodem odlišných výsledků je s největší pravděpodobností technická závada software či hardware.

tab. 22: Naměřené hodnoty výhřevnosti použitého methanolu – Kalibrační methanолоvá zkouška

<i>Celkové uvolněné teplo Q</i> [kW]	<i>Hmotnost m</i> [kg]	<i>Efektivní výhřevnost ΔH_{eff}</i> [kJ/kg]
203,45	7,895	25,77

Charakteristika plamene

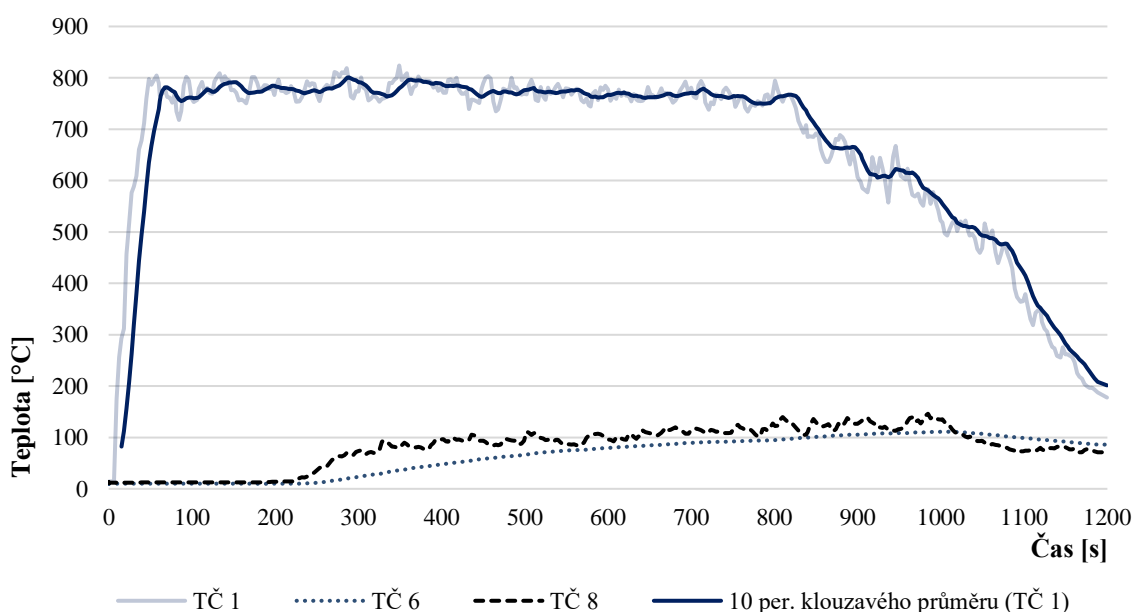
Střední výška plamenů je pro kalibrační zkoušku uvedena v tabulce (tab. 23), kde je následně porovnávána s výsledky z experimentu 1. Plameny jsou při kalibrační zkoušce výrazně vyšší nežli při experimentu 1. Nejblíže požární zkoušce je výpočet výšky plamenů dle Heskestada, který předpovídá výšku 1,06 m, přičemž reálná výška zachycená v průběhu měření byla cca 0,9 m.

tab. 23: Střední výška plamenů methanolu

<i>Nádoba; průměr [m]</i>	<i>Thomas ¹⁾ [m]</i>	<i>Heskestad [m]</i>	<i>Požární zkouška [m]</i>
<i>Kruhová nádoba; $d = 0,720$</i>	1,22	1,06	0,9
<i>Kruhová nádoba; $d = 0,170$</i>	0,44	0,34	0,3

¹⁾ hustota okolního vzduchu $\rho_a = 1,18 \text{ kg/m}^3$; gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Jak již bylo zmíněno průběhy teplot, které jsou zachyceny termočlánky, nejsou zcela přesné z důvodu značné fluktuace plamene. Umístění jednotlivých termočlánků je dle obr. 35. U kalibrační zkoušky byl využit i termočlánek typu „plate“ – na grafu znázorněn jako křivka TČ 8 ve výšce 1,4 m ode dna nádoby. Termočlánek typu „plate“ by měl zachycovat průběhy teplot přesněji bez značných odchylek. K následnému srovnání byl instalován ve stejné výšce termočlánek 7, který na grafu zachycuje křivka TČ 7.



obr. 39: Průběh teplot methanolu – kalibrační methanолоvá zkouška

Na křivce TČ 1 je zatelná fáze ustáleného hoření a dohořívání. Ustálené hoření probíhá zcela ihned po okamžiku iniciace a trvá bez značných fluktuací značnou část hoření. Teploty jsou ustálené na hodnotě v průměru okolo 750 °C, což odpovídá stejným hodnotám teplot jako u TČ 1 z experimentu 1 pro methanol v kruhové nádobě.

Fáze dohořívání nastává až v posledních 400 s, kdy křivka klesá. Důvodem, že je interval dohořívání zachycen podrobněji u kalibrační zkoušky oproti experimentu 1, může být velikost průměru. Methanol u kalibrační zkoušky nejdříve zcela vyhoří uprostřed nádoby a poté postupně odhořívá směrem ke stěnám. Termočlánky byly umístěné svisle nad středem nádoby, tudíž po odhoření methanolu z prostředka se teplota začala snižovat, což ovlivnilo průběh teplot v konečné fázi dohořívání.

Porovnání výsledků kalibrační methanolové zkoušky a experimentu 1 – methanol v kruhové nádobě

Průměrné hodnoty hmotnostního úbytku methanolu kalibrační zkoušky a experimentu 1 jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 24). Hodnoty jsou vztažené na 1 m² za 1 s a lze vyčíst, že jsou pro obě dvě nádoby stejné, na rozdíl od hodnot průměrného tepelného výkonu, který se liší řádově.

tab. 24: Průměrné hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti a uvolněného tepla methanolu

Nádoba; průměr [m]	\dot{m}'' [kg/(m ² s)]	$Q_{VÝPOČET}^{1)}$ [kW]	$Q_{EXPERIMENT}^{2)}$ [kW]
Kruhová nádoba; d = 0,720	0,0162	130,0	203,4
Kruhová nádoba; d = 0,170	0,0161	7,19	-

¹⁾ Účinnosti spalování $\chi_s = 1,0$; efektivní výhřevnost $\Delta H_{eff} = 19,83$ MJ/kg.
²⁾ Hodnota naměřená kónickým kalorimetrem.

Kruhová nádoba z kalibrační zkoušky má větší průměr, tudíž větší plochu pro odhořívání kapaliny a tím pádem vyšší tepelný výkon, zatímco nádoba z experimentu 1 má tepelný výkon nižší vlivem nižší plochy odhořívání. Tento fakt má za následek i to, že ač je objem methanolu u kalibrační zkoušky větší, celková doba hoření je pro oba dva požární scénáře velmi podobná. Methanol při kalibrační zkoušce vyhoří ve 1100 s a při experimentu 1 ve 1190 s.

3.5.3 Matematický model

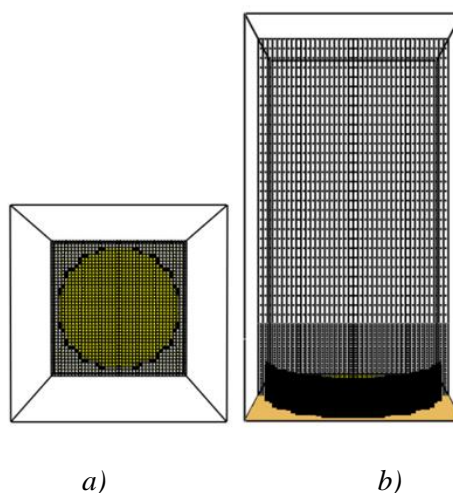
Kalibrační methanolová zkouška byla simulována pomocí matematického CFD modelu s využitím software FDS. Hlavním sledovaným parametrem byl průběh HRR.

Vstupní parametry

Výpočetní prostor byl zvolen tak, aby byl následný výpočet co nejefektivnější. Jelikož se jedná o volné hoření kapaliny, byla modelována pouze nádoba s kapalinou situována do výpočetního prostoru, který je ohraničen otevřenými plochami o rozměrech 80 × 80 × 150 mm. Umístění jednotlivých termočlánků vychází z požární zkoušky, přičemž HRR bylo měřeno v celém výpočetním prostoru.

Výpočetní síť

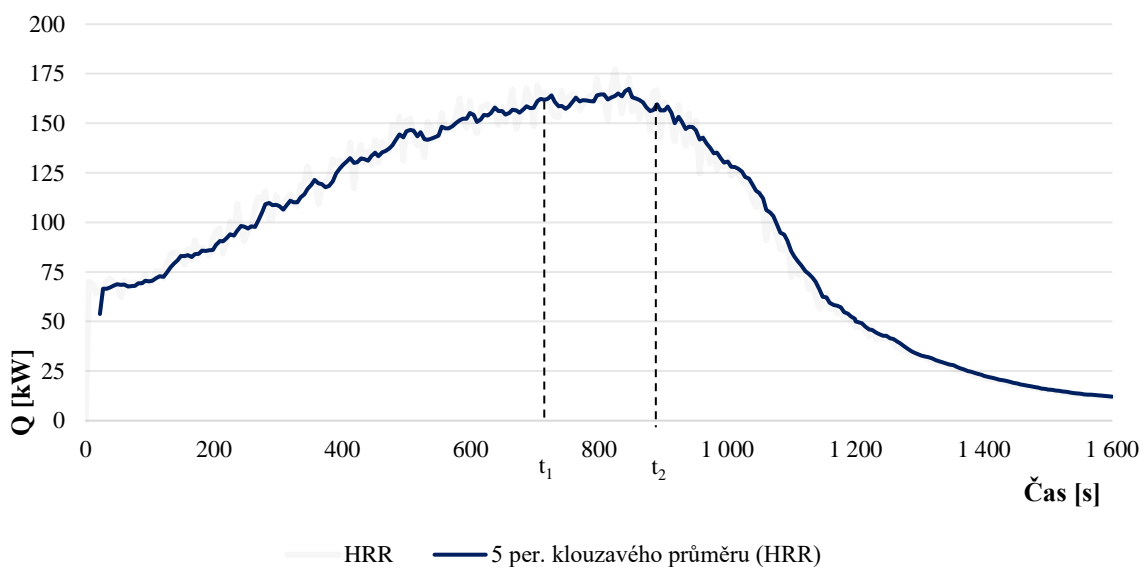
Výpočetní prostor je rozdělen po výšce na dvě sítě, přičemž první má rozměry $80 \times 80 \times 30$ mm a druhá, hrubější, má rozměry $80 \times 80 \times 120$ mm. Obě sítě mají stejný počet buněk, a to 48 000, resp. 96 000 v součtu. Výpočetní síť v oblasti nádoby s kapalinou je jemnější s rozměry jedné výpočetní buňky $20 \times 20 \times 10$ mm. Druhá síť má velikost jedné výpočetní buňky $20 \times 20 \times 40$ mm.



obr. 40: Zvolená výpočetní síť – kalibrační methanolová zkouška: a) půdorys; b) bokorys

HRR

Následující graf popisuje hodnoty HRR (obr. 41). Na křivce HRR jsou zřejmé tři fáze. V intervalu od 0 do t_1 dochází ke strmému nárůstu HRR, které se následně v intervalu mezi t_1 a t_2 ustálí na průměrné hodnotě okolo 160 kW. Poté nastává fáze dohořívání, při které křivka klesá.

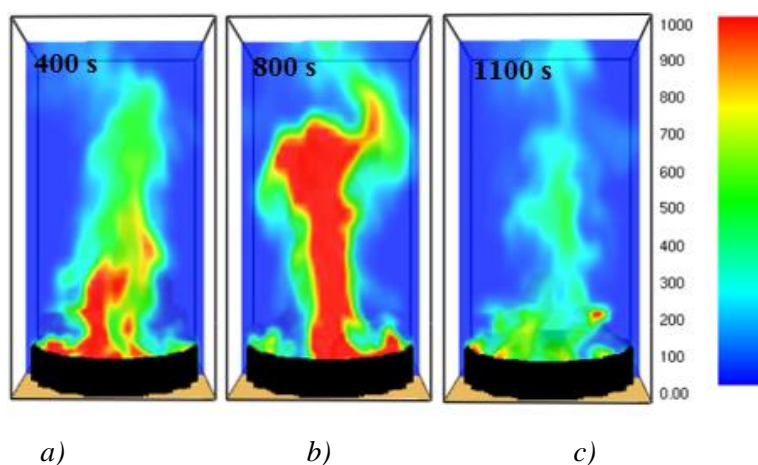


obr. 41: Průběh HRR – kalibrační methanolová zkouška – matematický model

Celková doba vyhoření methanolu v nádobě je dle matematického modelu cca 1600 s, což je zhruba o 500 s déle nežli u požární zkoušky. U požární zkoušky je interval nárůstu HRR velmi malý. Lze tvrdit, že na rozdíl od matematického modelu, dochází už od úplného počátku k ustálenému hoření. Průměrné hodnoty uvolněného tepla měřeného matematickým modelem vychází, při zanedbání fáze dohořívání, na 130 kW a efektivní výhřevnost na 16,4 MJ/kg.

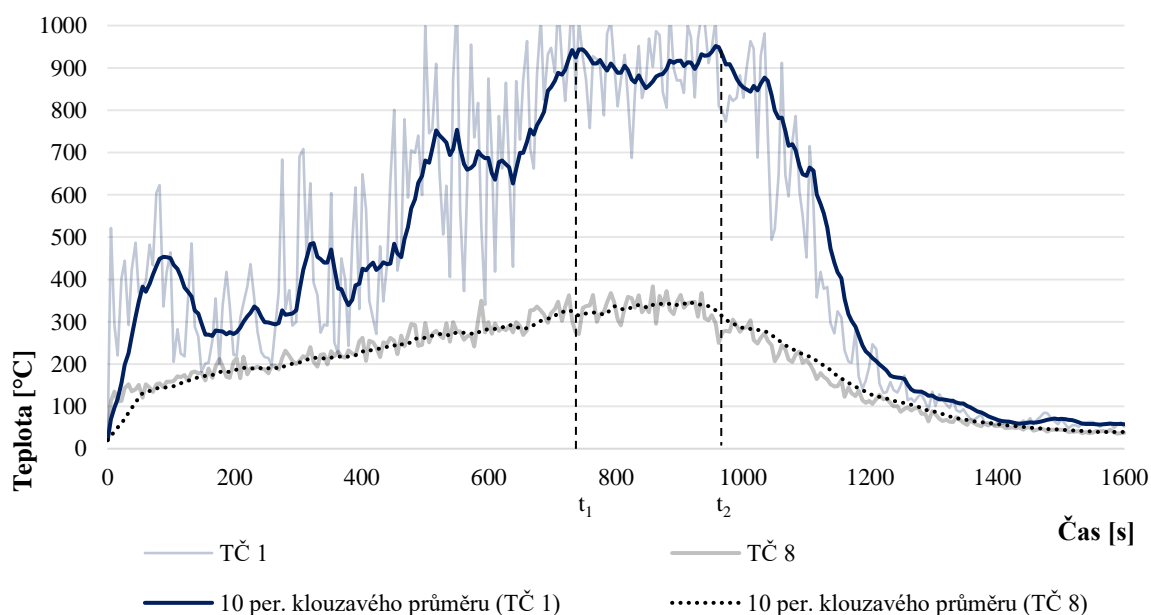
Charakteristika plamene

Tvar a teploty plamene odpovídají křivce HRR, kdy nejvyšších hodnot dosahuje methanol při ustáleném hoření v intervalu mezi časy t_1 a t_2 (obr. 41). Výška plamene v tomto intervalu odpovídá požární zkoušce, kdy je její hodnota okolo 0,9 m (viz obr. 42b).



obr. 42: Plamen methanolu – kalibrační methanolová zkouška – matematický model:
a) 400 s; b) 800 s; c) 1100 s

Graf (obr. 43) popisuje průběhy teplot termočlánku 1 a 8. Teploty plamene jsou v intervalu ustáleného hoření vyšší o cca 10 % oproti požární zkoušce. Průběh teplotní křivky odpovídá průběhu křivky HRR, kdy jsou znatelné fáze růstu, ustáleného hoření a následného dohořívání.



obr. 43: Průběh teplot – kalibrační methanolová zkouška – matematický model

Maximální hodnota teploty zachycená termočlánkem umístěným v blízkosti hladiny je 950 °C. Na grafu je tato hodnota znatelná v čase t_1 na křivce TČ 1. Termočlánek, který je nejvzdálenější od hladiny kapaliny (viz křivku TČ 8) zachycuje maximální teplotu ve fázi ustáleného hoření, a to okolo 350 °C.

3.5.4 Výsledky a diskuze

Methanolvá kalibrační zkouška kalorimetru proběhla dle normativních požadavků uvedených v *ISO 9705* [32] platných pro Room Corner Test. V rámci kalibrační zkoušky byl sledován úbytek hmotnosti methanolu a průběh HRR. Předpoklad pro správnou kalibraci kalorimetru vychází z hodnot uvolněného tepla, jehož maximální hodnota by se měla pohybovat okolo 140 kW. Zpětně získaná efektivní výhřevnost použitého methanolu by se neměla lišit od teoretické hodnoty 19,83 kJ/kg o více než 10 %.

Hodnota efektivní výhřevnosti methanolu v rámci provedené kalibrační methanolové zkoušky je 25,5 kJ/kg. Tato hodnota je nevyhovující i při úvaze normou přípustné odchylky do 10 %. Z naměřených hodnot při kalibrační zkoušce vychází, že kalorimetr není správně nastaven pro možné měření podle příslušné normy. Důvodem je s největší pravděpodobností zásah do měřících přístrojů při servisní kontrole kalorimetru, která proběhla před vlastní methanolovou kalibrační zkouškou.

Výsledky potvrdily důležitost kalibrace měřících přístrojů. Při nesprávném nastavení mohou přístroje generovat zcela irelevantní hodnoty. Správnost nastavení měřících přístrojů kontroluje právě kalibrační zkouška.

Data naměřená z kalibrační methanolové zkoušky se dále porovnála s daty z experimentu 1. Jde o srovnání kruhových nádob s methanolem se stejnou výškou hladiny, ale různými průměry. Hmotnostní úbytek, vztažený na 1 m² je stejný pro obě dvě nádoby, tedy 0,016 kg/(m² · s). Rychlost odhořívání je ale vyšší u methanolu v nádobě s větším průměrem, jelikož je jeho plocha hladiny, ze které může odhořívát větší. Hodnoty uvolněného tepla jsou řádově vyšší u methanolu z kalibrační zkoušky, tedy situovaného v nádobě s větším průměrem. Řádově rozdílné hodnoty uvolněného tepla vychází z průměru nádoby, kdy u větších průměru dochází k vyšší rychlosti odhořívání methanolu z hladiny.

Výsledky simulace methanolové kalibrační zkoušky pomocí matematického CFD modelu se blíží výsledkům reálně provedené kalibrační zkoušky. Doba trvání hoření je v rámci matematického modelu delší o 500 s vlivem pomalejší fáze dohořívání methanolu oproti požární zkoušce. Střední teploty plamene vychází cca o 10 % vyšší oproti požární zkoušce, což může být dáno i značnou fluktuací plamene při požární zkoušce. Výška plamene je totožná. Průměrná hodnota uvolněného tepla methanolu stanovená matematickým modelem je 130 kW, což je přijatelnější hodnota, oproti hodnotám naměřeným při reálné požární zkoušce.

4 Závěr a doporučení

Diplomová práce se zabývá tématem hoření kapalin v nádobách a je rozdělena na dvě hlavní kapitoly „*Současný stav poznání*“ a „*Experimentální hodnocení parametrů procesu hoření kapaliny v nádobě*“.

Kapitola „*Současný stav poznání*“ se zabývá teorií o hoření kapalin. Popisuje základní PTCH hořlavých kapalin jako je teplota vznícení, vzplanutí a oblast výbušnosti. Dále vysvětluje parametry ovlivňující způsob hoření kapaliny, tj. rychlost odhořívání, HRR a charakteristiku plamene, přičemž zmiňuje možnosti hašení kapalin v závislosti na jejich typu. V neposlední řadě se zabývá procesy sdílení tepla, které probíhají v hořící kapalině, tj. konvekce, kondukce a radiace.

Druhá část diplomové práce je praktické řešení s poznatky z části teoretické. Kapitola je zaměřená na konkrétní kapaliny, tedy methanol a motorovou naftu. Příklady vychází z požárních zkoušek, které proběhly v zázemí požární laboratoře UCEEB ČVUT v Praze. V rámci požárních zkoušek se zkoumal průběh hmotnostního úbytku, ze kterého se následně pomocí analytických výpočtů zjišťovaly další parametry jako průběh HRR, doba trvání hoření nebo charakteristiky plamene.

Experiment 1

Experiment 1 byl zaměřený na volné hoření methanolu v nádobách o stejných půdorysných plochách, ale rozdílných tvarech. V průběhu experimentu se měřil hmotnostní úbytek methanolu z nádoby. Z hodnot hmotnostního úbytku dále vycházely ostatní sledované parametry jako průběh HRR, doba trvání hoření či charakteristika plamene, tj. především jeho výška. Jednotlivé požární zkoušky byly následně simulovány pomocí matematického CFD modelu s využitím software FDS.

Z teorie o hoření kapalin plyne, že jako první by měl vyhořet methanol v nádobě kruhové, jelikož kapalina má tendenci hořet do kruhového tvaru, a to nezávisle na tvaru nádoby. U čtvercové a obdélníkové nádoby jsou potom místa v rozích nepatrně chladnější, což by mělo nepatrně ovlivnit celkový úbytek hmotnosti.

Výsledná naměřená data se ale pro jednotlivé nádoby liší jen nepatrně. Nejvyšších hodnot dosahuje methanol v nádobě čtvercové, který vyhořel jako první. Nejnižších zase methanol v nádobě kruhové, který vyhořel jako poslední. Rozdíly mezi jednotlivými nádobami, jak v celkové době hoření, tak v hodnotách hmotnostního úbytku jsou tak malé, že je lze zanedbat. Zásadnější výsledky by se daly očekávat u nádob větších rozměru, které mají procesy hoření ustálenější. Nedochozí u nich k tepelným ztrátám způsobených re-radiací a kondukci v takové míře jako u nádob s kapalinou menších průměrů.

Z výsledných naměřených dat v rámci požárních zkoušek lze konstatovat, že parametr tvaru nádob není tak zásadní pro proces hoření kapaliny, jako velikost plochy hladiny, tedy

průměr nádoby. Jednotlivé požární zkoušky mají při stejném průměru nádoby, ale jiném tvaru velmi obdobné výsledné hodnoty.

Požární zkouška je dále simulována pomocí matematického CFD modelu. Výsledná data jsou oproti požárním zkouškám nepatrně nižší. Jako první zde vyhořel methanol v nádobě kruhové, poté v nádobě obdélníkové a čtvercové, u kterých byly časy skoro totožné. Model s kruhovou nádobou měl jemnější síť oproti ostatním, kvůli zachycení kruhového tvaru v software FDS.

Experiment 2

Experiment 2 byl zaměřen na volné hoření motorové nafty v nádobě, přičemž vstupní podmínky byly totožné, jako u experimentu 1 s methanolem. Požární zkoušky s motorovou naftou nejsou simulovány pomocí CFD modelů, neboť pro získání relevantních výstupů by bylo nutné provést chemický rozbor složení nafty.

Motorová nafta vyhořela jako první v nádobě kruhové, poté v obdélníkové a následně v nádobě čtvercové. Rozdíl mezi dobou vyhoření mezi čtvercovou a kruhovou nádobou je oproti celkové době hoření zanedbatelný. Jednotlivým dobám vyhoření kapaliny odpovídají i ostatní charakteristiky, kdy je hmotnostní rychlost odhořívání, či uvolněné teplo nejvyšší právě u motorové nafty v nádobě kruhové.

Stejně jako u experimentu s methanolem lze říci, že se v rámci těchto požárních zkoušek neprojevil zásadní vliv tvaru nádob na parametry hoření motorové nafty.

Experiment 3

V rámci experimentu 3 bylo sledováno hoření kapalin v uzavřené místnosti. Požární zkouška se provedla jak s motorovou naftou, tak s methanolem. Sledovaný parametr měl být především úbytek hmotnosti. Při vysokých teplotách se ale v průběhu zkoušky vypařovala vlhkost z použitých materiálů, tudíž jsou výsledná naměřená data hmotnostního úbytku irelevantní. Sledován byl tedy pouze teplotní údaj zachycený termočlánky, instalovanými jak uvnitř místnosti, tak vně.

Z výsledných dat je možné zaznamenat rozdílný průběh hoření kapalin s jinou materiálovou charakteristikou, ale se stejnými počátečními podmínkami. U motorové nafty došlo k dějům, které následně zcela ovlivnily průběh hoření. Vlivem vysoké tvorby dýmového kouře se krátce po iniciaci v místnosti vytvořila kouřová vrstva, která zpětně ohřívala hladinu kapaliny. Vzápětí došlo k vyšlehnutí plamene skrz otvor místnosti a vzkypění motorové nafty z nádoby. Po vzkypění motorové nafty nastalo celkové vzplanutí prostoru, kdy hořela i kouřová vrstva vytvořená uvnitř místnosti. U motorové nafty tedy došlo jak k varu, vyšlehnutí plamene z místnosti, vzkypění, tak i k následnému celkovému vzplanutí.

Methanol, na rozdíl od motorové nafty produkoval při hoření velmi nízké množství kouře a dýmu. Utvořená kouřová vrstva byla tedy zcela minimální, tudíž neovlivňovala průběh hoření v takové míře, jako u požární zkoušky s motorovou naftou. Vlivem toho pak methanol

v místnosti hořel obdobným způsobem jako při volném hoření. Došlo pouze k varu a následnému vyšlehnutí plamene ven z místnosti.

Kalibrační methanolvá zkouška

Kalibrační methanolvá zkouška proběhla v zázemí požární laboratoře na UCEEB v Praze. V rámci této diplomové práce bylo cílem popsat průběh kalibrační zkoušky a následně zaznamenat data pro případné srovnání s experimentem 1. Methanolvá kalibrační zkouška byla dále simulována v matematickém CFD modelu pomocí software FDS.

Methanolvá kalibrační zkouška kalorimetru proběhla dle normativních požadavků uvedených v *ISO 9705* [32] platných pro Room Corner Test. Byl sledován úbytek hmotnosti methanolu a průběh HRR. Pro správný předpoklad kalibrace kalorimetru se uvádí maximální hodnota uvolněného tepla methanolu cca 140 kW. Zpětně získaná efektivní výhřevnost použitého methanolu by se neměla lišit od teoretické hodnoty 19,83 kJ/kg o více než 10 %. Z naměřených dat vychází hodnota efektivní výhřevnosti použitého methanolu 25,5 kJ/kg, což nesplňuje ani normou přijatelnou odchylku 10 %. Důvodem je s největší pravděpodobností zásah do měřících přístrojů při servisní kontrole kalorimetru, která proběhla před vlastní methanolvou kalibrační zkouškou. Výsledky tedy potvrdily důležitost kalibrace měřících přístrojů, jelikož při nesprávném nastavení mohou přístroje generovat zcela irelevantní hodnoty.

Hodnoty průměrného hmotnostního úbytku methanolu naměřeného při kalibrační methanolvé zkoušce se dále porovnály s hodnotou hmotnostním úbytkem methanolu v kruhové nádobě z experimentu 1. Hmotnostní úbytek je vztažen na 1 m² za 1 s. Výsledná naměřená data jsou stejná pro obě dvě nádoby, tedy 0,016 kg/(m² · s). U kalibrační methanolvé zkoušky je ale rychlost úbytku vyšší, jelikož methanol odhořívá z větší plochy. Větší plocha odhořívání methanolu ovlivňuje i uvolněné teplo, které je u kalibrační zkoušky řádově vyšší.

Výsledky simulace methanolvé kalibrační zkoušky pomocí matematického CFD modelu se blíží výsledkům reálně provedené kalibrační zkoušky. Doba trvání hoření methanolu v nádobě je v rámci matematického modelu delší, oproti požární zkoušce, a to vlivem delšího intervalu dohořívání. Teploty plamene jsou vyšší v rámci matematického modelu, přičemž jeho výška je stejná.

Doporučení pro další činnost

Na diplomovou práci lze navázat např. v těchto bodech:

- sledování parametrů hoření alkoholů v závislosti na chemickém složení,
- sledování změn parametrů hoření hořlavých kapalin při dosažení teploty varu,
- matematický CFD model hořlavé kapaliny v závislosti na tlakových podmínkách,
- modelování hoření hořlavých kapalin v místnosti, porovnání dvouzónového a matematického CFD modelu,
- matematické CFD modelování hašení hořlavých kapalin.

5 Literatura

- [1] ČSN 65 0201 Hořlavé kapaliny – Prostory pro výrobu, skladování a manipulaci 08/2003 + Z1 (02/2006) 2003. Praha: ÚNMZ
- [2] DOLEŽAL, Zdeněk. Preventivní opatření proti nebezpečným vlastnostem hořlavých kapalin. B.m.: Ústřední výbor ČS svazu požární ochrany Praha, 1964.
- [3] KATEŘINA ORLÍKOVÁ a Petr ŠTROCH. Chemie procesů hoření. SPBI Spektrum. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1999. ISBN 80-86111-39-3.
- [4] KVARČÁK, Miloš. Základy požární ochrany. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, nedatováno. ISBN 80-86634-65-5.
- [5] ČSN EN ISO 2592 – Stanovení bodu vzplanutí a bodu hoření – Metoda otevřeného kelímku podle Clevelanda 05/2004. Praha: ÚNMZ.
- [6] ČSN EN ISO 2719 – Stanovení bodu vzplanutí v uzavřeném kelímku podle Penskyho – Martense. 02/2017 + Opr. 1 05/2017. Praha: ÚNMZ.
- [7] ČSN EN 14522 – Stanovení teploty vznícení plynů a par 04/2006. Praha: ÚNMZ
- [8] SETCHKIN, Nicholas. Self-Ignition Temperatures of Combustible Liquids. NIST Journal of Research. 1954.
- [9] DRYSDALE, Dougal. An introduction to Fire Dynamics, Third Edition. University of Edinburgh, Scotland, UK: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, ISBN 978-0-470-31903-1.
- [10] REINHARDT, Heinz a Eberhard KIRCHHOF. Brennbare Flüssigkeiten Theorie und Praxis des chemisch-physikalischen Verhaltens. 1971.
- [11] KVARČÁK, Miloš. Dynamika požáru. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1999. ISBN 80-86111-44-X.
- [12] RT 1 – Risque industriel [online]. B.m.: Institut des Risques Majeurs, 2012. Dostupné z: <http://www.mementodumaire.net/risques-technologiques/rt-1-risque-industriel/>
- [13] BABRAUSKAS, Vytenis. Estimating large pool fire burning rates. 1983.
- [14] KARLSSON, Bjorn a James QUINTIERE. Enclosure Fire Dynamics. 1999. ISBN 978-0-8493-1300-4.
- [15] KUČERA, Petr. Požární inženýrství dynamika požáru. SPBI Spektrum. 2009. ISBN 978-80-7385-074-6.
- [16] FILIPI, Bohdan. Nauka o materiálu. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2003.
- [17] ČSN 73 0824 – Výchřevnost hořlavých látek 12/1992. Praha: ÚNMZ

-
- [18] Reynolds number [online]. B.m.: Nuclear Power for Everybody, 2017. Dostupné z: www.nuclear-power.net
- [19] HOSTIKKA, S, K. MCGRATTAN a A. HAMINS. Numerical Modeling of Pool Fires Using Les and Finite Volume Method for Radiation. 2003.
- [20] IQBAL, Naeem a Mark Henry SALLEY. Fire dynamics tools. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2004.
- [21] SKARSBO, Lars. An Experimental Study of Pool Fires and Validation of Different CFD Fire Models. Bergen Norway: Department of Physics and Technology, University of Bergen, 2011.
- [22] ČSN EN 2 Třídy požárů 07/1994. Praha: ÚNMZ.
- [23] TEPLÝ, Zdeněk. Požární taktika – Požáry otevřených technologických zařízení v chemickém a petrochemickém průmyslu. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, nedatováno. ISBN 80-86111-89-X.
- [24] SONTAKE, Anant R. a Sameer M. WAGH. The Phase-out of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and the Global Future of Aqueous Film Forming Foam (AFFF), Innovations in Fire Fighting Foam. B.m.: Chemical Engineering and Science, 2014.
- [25] PEKAR, Vasil Silvestr. Požární taktika – Metody zdolávání požárů jedlých tuků a olejů třídy F. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, nedatováno.
- [26] PAVELEK, M., E. JANOTKOVÁ, B. SEKANINA, F. KAVIČKA a M. JÍCHA. Termomechanika. Brno: Akademická nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2409-5.
- [27] ROUČKOVÁ, Eva. Matematické modelování lokálního hoření kapalin v řešiči FireFOAM. Ústav chemického inženýrství: Vysoká škola chemicko-technologická, 2016.
- [28] Bezpečnostní list – Methanol. Neratovice: Lach-Ner, s.r.o., 2016.
- [29] COTE, A. et al. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002.
- [30] Bezpečnostní list – Motorová nafta. Bratislava: SLOVNAFT, a.s., 2016.
- [31] MCGRATTAN, Kevin, Simo HOSTIKKA, Randall MCDERMOTT, Jason FLOYD, Craig WEINSCHENK a Kristopher OVERHOLT. Fire Dynamics Simulator User's Guide. Sixth. B.m.: NIST – National Institute of Standards and Technology and VTT Technical Research Centre of Finland, 2017.
- [32] ISO 9705-1:2016 Reaction to fire tests. B.m.: International Organization for Standardization, 2016.

Seznam obrázků

obr. 1: Výňatek fyzikálních a chemických vlastností z bezpečnostního listu pro methanol [2]	3
obr. 2: Schéma mezi výbušnosti.....	9
obr. 3: Jednotlivé fáze vzkypění: a) var kapaliny; b) posouvání horké vrstvy; c) odpařování; d) vzkypění [12].....	11
obr. 4: Rychlost odhořívání v závislosti na velikosti průměru nádoby [13].....	12
obr. 5: Srovnání průběhů rychlosti odhořívání pro volné hoření a hoření v uzavřeném prostoru [13].....	12
obr. 6: Schéma kónického kalorimetru [16].....	13
obr. 7: Vrstvy difúzního plamene [18].....	15
obr. 8: Schématické znázornění režimů proudění: a) laminární proudění; b) turbulentní proudění [18].....	16
obr. 9: Modelová představa tvaru plamene při hoření methanolu v nádobách o různých průměrech: a) 0,01 m; b) 0,1 m; c) 0,3 m; d) 1,0 m [10].....	16
obr. 10: Struktura plamene [21].....	17
obr. 11: Plamen hořícího methanolu.....	18
obr. 12: Hašení hořící nafty pomocí pěny [24].....	20
obr. 13: Schématické znázornění intenzity hmotnostního a tepelného toku hořící kapaliny v nádobě: q_{knv} – konvekce mezi hladinou a plamenem; q_r – radiace z plamene; q_{rr} – re-radiace z povrchu hladiny; q_{knd} – ztráty způsobené kondukcí [21].....	23
obr. 14 Schéma intenzity sálání radiačního modelu bodového zdroje na předmět mimo plamen [20].....	25
obr. 15: Požární zkoušky: a) Experiment 1; b) Experiment 3.....	27
obr. 16: Rozměry jednotlivých nádob: a) čtvercová nádoba; b) kruhová nádoba; c) obdélníková nádoba.....	30
obr. 17: Schéma rozmístění aparatury – Experiment 1 a 2, kde A – měřící váha; B – nádoba s kapalinou.....	31
obr. 18: Schéma místnosti s nádobou [mm] – Experiment 3: (a) Půdorys; (b) Řez.....	32
obr. 19: Hmotnostní úbytek methanolu – Požární zkouška.....	33
obr. 20: Průběh HRR methanolu – Požární zkouška.....	34
obr. 21: Průběhy teplot methanolu zaznamenané termočlánkem 1 – Požární zkouška.....	35
obr. 22: Plamen methanolu zachycený při požární zkoušce s červeně vyznačenou střední výškou: a) čtvercová nádoba; b) obdélníková nádoba; c) kruhová nádoba.....	36
obr. 23: Výpočetní síť: a) kruhová nádoba; b) čtvercová nádoba; c) obdélníková nádoba.....	37
obr. 24: Průběh HRR methanolu – Matematický model.....	38

obr. 25: Průběhy teplot methanolu zaznamenané termočlánkem 1 – Matematický model	38
obr. 26: Porovnání plamene methanolu – Matematický model: a) čtvercová nádoba; b) kruhová nádoba	39
obr. 27: Hmotnostní úbytek motorové nafty – Požární zkouška.....	41
obr. 28 Průběh HRR motorové nafty – Požární zkouška.....	42
obr. 29 Průběhy teplot motorové nafty zaznamenané termočlánkem 1 – Požární zkouška.....	43
obr. 30: Plamen motorové nafty zachycený při požární zkoušce s červeně vyznačenou střední výškou: a) čtvercová nádoba; b) obdélníková nádoba; c) kruhová nádoba	44
obr. 31: Průběh teplot motorové nafty v místnosti.....	45
obr. 32: Průběh experimentu 3: a) iniciace procesu hoření; b) kumulace kouřové vrstvy před následným vyšlehnutím plamene; c) Vyšlehnutí plamene – prostorové vzplanutí; d) Prostorové vzplanutí; e) Místnost po ukončení experimentu	46
obr. 33: Průběh teplot methanolu uvnitř místnosti.....	47
obr. 34: Vyšlehnutí plamene methanolu ven z místnosti	47
obr. 35: Schéma rozmístění aparatury – kalibrační methanolová zkouška: A – měřící váha; B – nádoba s methanolem	50
obr. 36: Hmotnostní úbytek methanolu – Kalibrační methanolová zkouška.....	50
obr. 37: Průběh HRR methanolu – Kalibrační methanolová zkouška	51
obr. 38 Průběh methanolové kalibrační zkoušky: a) iniciace; b) ustálené hoření; c) dohořívání	51
obr. 39: Průběh teplot methanolu – kalibrační methanolová zkouška	52
obr. 40: Zvolená výpočetní síť – kalibrační methanolová zkouška: a) půdorys; b) bokorys...	54
obr. 41: Průběh HRR – kalibrační methanolová zkouška – matematický model	54
obr. 42: Plamen methanolu – kalibrační methanolová zkouška – matematický model: a) 400 s; b) 800 s; c) 1100 s	55
obr. 43: Průběh teplot – kalibrační methanolová zkouška – matematický model	55

Seznam tabulek

tab. 1: Fyzikální vlastnosti homologické řady alkoholů [3].....	4
tab. 2: Teploty vzplanutí hořlavých kapalin v závislosti na obsahu alkoholu ve směsi [4].....	5
tab. 3: Třídy nebezpečnosti hořlavých kapalin [1].....	5
tab. 4: Teplotní třídy hořlavých kapalin [7]	6
tab. 5: Hodnoty teploty samovznícení v závislosti na objemu kapaliny v nádobě [8].....	7
tab. 6: Hodnoty teploty samovznícení v závislosti na tlaku [4]	8
tab. 7: Hodnoty teploty samovznícení v závislosti na materiálu nádoby [3]	8
tab. 8: Teplota varu ethanolu v závislosti na tlaku [10]	10

tab. 9: Charakteristické hodnoty vybraných kapalin [12]	14
tab. 10: Porovnání PTCH hořlavých kapalin třídy požáru B a F [25].....	20
tab. 11: Hodnoty tepelných toků při hoření methanolu v nádobách o různých průměrech [27]	24
tab. 12: Fyzikální a chemické vlastnosti methanolu [28].....	29
tab. 13: Fyzikální a chemické vlastnosti motorové nafty [30].....	29
tab. 14: Průměrné hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti a uvolněného tepla methanolu – Požární zkouška.....	33
tab. 15: Doba trvání hoření methanolu – Požární zkouška	34
tab. 16: Střední výška plamenů methanolu – Požární zkouška.....	35
tab. 17: Průměrné hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti a uvolněného tepla motorové nafty – Požární zkouška	41
tab. 18: Doba trvání hoření motorové nafty – Požární zkouška.....	42
tab. 19: Střední výška plamenů motorové nafty – Požární zkouška	44
tab. 20: Průběh experimentu 3 – motorová nafta	46
tab. 21: Průběh experimentu 3 – methanol.....	48
tab. 22: Naměřené hodnoty výhřevnosti použitého methanolu – Kalibrační methanolvá zkouška.....	52
tab. 23: Průměrné hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti a uvolněného tepla methanolu.....	53
tab. 24: Střední výška plamenů methanolu	52

Experiment 1 – čtvercová nádoba

```

&HEAD CHID = 'METHANOL_CTVEREC', TITLE = 'METHANOL_CTVEREC'/
&TIME T_END = 3000/
&DUMP DT_RESTART = 30.0/
&MESH ID='Mesh01' IJK = 15, 15, 25, XB = 0.1,0.4, 0.1,0.4, 0.0,0.1 /
&MESH ID='Mesh02' IJK = 15, 15, 25, XB = 0.1,0.4, 0.1,0.4, 0.1,0.5 /
&REAC FUEL = 'METHANOL', FYI = 'METHANOL, C_1 H_4 O_1', SOOT_YIELD = 0.00 /
&MATL ID = 'METHANOL LIQUID', EMISSIVITY = 1, NU_SPEC = 1, SPEC_ID = 'METHANOL'
HEAT_OF_REACTION = 1110.42, CONDUCTIVITY = 0.202, SPECIFIC_HEAT = 2.53,
BOILING_TEMPERATURE = 64.7, DENSITY = 790, ABSORPTION_COEFFICIENT = 52.0 /

&MATL ID='STEEL', SPECIFIC_HEAT = 0.46, CONDUCTIVITY = 45.8, DENSITY = 7850.0,
EMISSIVITY = 1.0/

&SURF ID = 'METHANOL POOL', COLOR = 'YELLOW', MATL_ID = 'METHANOL LIQUID',
BURN_AWAY = .TRUE., THICKNESS = 0.023 /

&SURF ID = 'STEEL SHEET', COLOR = 'BLACK', MATL_ID = 'STEEL', THICKNESS = 0.002 /

&OBST XB = 0.175,0.325, 0.175,0.175, 0.0,0.05, SURF_ID = 'STEEL SHEET', COLOR = 'BLACK' /
&OBST XB = 0.325,0.325, 0.175,0.325, 0.0,0.05, SURF_ID = 'STEEL SHEET', COLOR = 'BLACK' /
&OBST XB = 0.325,0.175, 0.325,0.325, 0.0,0.05, SURF_ID = 'STEEL SHEET', COLOR = 'BLACK' /
&OBST XB = 0.175,0.175, 0.175,0.325, 0.0,0.05, SURF_ID = 'STEEL SHEET', COLOR = 'BLACK' /

&VENT XB=0.1,0.4,0.1,0.1,0.0,0.5 SURF_ID = 'OPEN'/
&VENT XB=0.1,0.4,0.4,0.4,0.0,0.5 SURF_ID = 'OPEN'/
&VENT XB=0.1,0.1,0.1,0.4,0.0,0.5 SURF_ID = 'OPEN'/
&VENT XB=0.4,0.4,0.1,0.4,0.0,0.5 SURF_ID = 'OPEN'/
&VENT XB=0.1,0.4,0.1,0.4,0.5,0.5 SURF_ID = 'OPEN'/
&VENT ID='METHANOL LIQUID', SURF_ID='METHANOL POOL', XB=0.175,0.325,0.175,0.325,0.0,0.0,
TEXTURE_ORIGIN=1.0,1.0,0.1/

&DEVC ID='HRR', QUANTITY='HRR', XB = 0.1,0.4, 0.1,0.4, 0.0,0.1 /
&DEVC ID='HRR', QUANTITY='HRR', XB = 0.1,0.4, 0.1,0.4, 0.1,0.5 /
&DEVC ID='T1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.25,0.25,0.07/
&DEVC ID='T2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.25,0.25,0.12/
&DEVC ID='T3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.25,0.25,0.22/
&DEVC ID='T4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.25,0.25,0.32/
&DEVC ID='T5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.25,0.25,0.42/

&SLCF PBX=0.25, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=0.25, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
&TAIL/

```

Experiment 1 – obdélníková nádoba

Zdrojový kód je stejný jako u methanolu ve čtvercové nádobě. Mění se pouze geometrie nádoby, která je vyznačena níže.

```
&OBST XB = 0.137,0.362, 0.2,0.2, 0.0,0.05, SURF_ID = 'STEEL SHEET', COLOR = ' BLACK ' /
&OBST XB = 0.362,0.362, 0.2,0.3, 0.0,0.05, SURF_ID = 'STEEL SHEET', COLOR = ' BLACK ' /
&OBST XB = 0.362,0.137, 0.3,0.3, 0.0,0.05, SURF_ID = 'STEEL SHEET', COLOR = ' BLACK ' /
&OBST XB = 0.137,0.137, 0.2,0.3, 0.0,0.05, SURF_ID = 'STEEL SHEET', COLOR = ' BLACK ' /
```

Experiment 1 – kruhová nádoba

Zdrojový kód je stejný jako u methanolu ve čtvercové nádobě. Mění se pouze geometrie nádoby a jemnost sítě.

```
&MESH ID='Mesh01' IJK = 45, 45, 25, XB = -0.15,0.15,-0.15,0.15, 0.0,0.1 /
&MESH ID='Mesh02' IJK = 45, 45, 25, XB = -0.15,0.15,-0.15,0.15, 0.1,0.5 /
```

```
&OBST ID='PODLAHA', XB=-0.15,0.15,-0.15,0.15,0.0,0.0 /
&OBST XB=-0.086,-0.0855289,0,0.0089894,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0855289,-0.0841207,0.0089894,0.0178804,0.0,0.05,SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0841207,-0.0817909,0.0178804,0.0265755,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0817909,-0.0785649,0.0265755,0.0349794,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0785649,-0.0744782,0.0349794,0.043,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0744782,-0.0695755,0.043,0.0505495,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0695755,-0.0639105,0.0505495,0.0575452,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0639105,-0.0575452,0.0575452,0.0639105,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0575452,-0.0505495,0.0639105,0.0695755,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0505495,-0.043,0.0695755,0.0744782,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.043,-0.0349794,0.0744782,0.0785649,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0349794,-0.0265755,0.0785649,0.0817909,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0265755,-0.0178804,0.0817909,0.0841207,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0178804,-0.0089894,0.0841207,0.0855289,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=-0.0089894,0,0.0855289,0.086,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0,0.0089894,0.086,0.0855289,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.0089894,0.0178804,0.0855289,0.0841207,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.0178804,0.0265755,0.0841207,0.0817909,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.0265755,0.0349794,0.0817909,0.0785649,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.0349794,0.043,0.0785649,0.0744782,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.043,0.0505495,0.0744782,0.0695755,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.0505495,0.0575452,0.0695755,0.0639105,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.0575452,0.0639105,0.0639105,0.0575452,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.0639105,0.0695755,0.0575452,0.0505495,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.0695755,0.0744782,0.0505495,0.043,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.0744782,0.0785649,0.043,0.0349794,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
```

&OBST XB=0.0785649,0.0817909,0.0349794,0.0265755,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0817909,0.0841207,0.0265755,0.0178804,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0841207,0.0855289,0.0178804,0.0089894,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0855289,0.086,0.0089894,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.086,-0.0855289,0,-0.0089894,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0855289,-0.0841207,-0.0089894,-0.0178804,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0841207,-0.0817909,-0.0178804,-0.0265755,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0817909,-0.0785649,-0.0265755,-0.0349794,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0785649,-0.0744782,-0.0349794,-0.043,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0744782,-0.0695755,-0.043,-0.0505495,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0695755,-0.0639105,-0.0505495,-0.0575452,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0639105,-0.0575452,-0.0575452,-0.0639105,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0575452,-0.0505495,-0.0639105,-0.0695755,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0505495,-0.043,-0.0695755,-0.0744782,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.043,-0.0349794,-0.0744782,-0.0785649,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0349794,-0.0265755,-0.0785649,-0.0817909,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0265755,-0.0178804,-0.0817909,-0.0841207,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0178804,-0.0089894,-0.0841207,-0.0855289,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=-0.0089894,0,-0.0855289,-0.086,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0,0.0089894,-0.086,-0.0855289,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0089894,0.0178804,-0.0855289,-0.0841207,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0178804,0.0265755,-0.0841207,-0.0817909,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0265755,0.0349794,-0.0817909,-0.0785649,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0349794,0.043,-0.0785649,-0.0744782,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.043,0.0505495,-0.0744782,-0.0695755,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0505495,0.0575452,-0.0695755,-0.0639105,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0575452,0.0639105,-0.0639105,-0.0575452,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0639105,0.0695755,-0.0575452,-0.0505495,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0695755,0.0744782,-0.0505495,-0.043,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0744782,0.0785649,-0.043,-0.0349794,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0785649,0.0817909,-0.0349794,-0.0265755,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0817909,0.0841207,-0.0265755,-0.0178804,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0841207,0.0855289,-0.0178804,-0.0089894,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /
 &OBST XB=0.0855289,0.086,-0.0089894,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET' /

 &VENT ID='METHANOL LIQUID', RADIUS=0.085, XYZ=0.0,0.0,0.001, SURF_ID='METHANOL POOL',
 XB=-0.086,0.086,-0.086,0.086,0.001,0.001, TEXTURE_ORIGIN=1.0,1.0,0.1/

Kalibrační methanolová zkouška

&HEAD CHID='KRUH_KALIBRACE', TITLE='KRUH_KALIBRACE'
 &TIME T_END=5500.0/
 &DUMP DT_RESTART=30.0/
 &MESH ID='Mesh01', IJK=40,40,30, XB=0.1,0.9,0.1,0.9,0.0,0.3/

&MESH ID='Mesh01', IJK=40,40,30, XB=0.1,0.9,0.1,0.9,0.3,1.5/

&VENT XB=0.0,1.0,0.0,0.0,0.0,2.0 SURF_ID = 'OPEN'/

&VENT XB=0.0,1.0,1.0,1.0,0.0,2.0 SURF_ID = 'OPEN'/

&VENT XB=0.0,0.0,0.0,1.0,0.0,2.0 SURF_ID = 'OPEN'/

&VENT XB=1.0,1.0,0.0,1.0,0.0,2.0 SURF_ID = 'OPEN'/

&VENT XB=0.0,1.0,0.0,1.0,2.0,2.0 SURF_ID = 'OPEN'/

&OBST XB=0.141972,0.147867,0.53763,0.574848,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.147867,0.15762,0.574848,0.611246,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.15762,0.171124,0.611246,0.646425,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.171124,0.188231,0.646425,0.68,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.188231,0.208754,0.68,0.711603,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.208754,0.232468,0.711603,0.740887,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.232468,0.259113,0.740887,0.767532,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.259113,0.288397,0.767532,0.791246,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.288397,0.32,0.791246,0.811769,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.32,0.353575,0.811769,0.828876,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.353575,0.388754,0.828876,0.84238,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.388754,0.425152,0.84238,0.852133,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.425152,0.46237,0.852133,0.858028,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.46237,0.5,0.858028,0.86,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.5,0.53763,0.86,0.858028,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.53763,0.574848,0.858028,0.852133,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.574848,0.611246,0.852133,0.84238,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.611246,0.646425,0.84238,0.828876,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.646425,0.68,0.828876,0.811769,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.68,0.711603,0.811769,0.791246,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.711603,0.740887,0.791246,0.767532,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.740887,0.767532,0.767532,0.740887,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.767532,0.791246,0.740887,0.711603,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.791246,0.811769,0.711603,0.68,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.811769,0.828876,0.68,0.646425,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.828876,0.84238,0.646425,0.611246,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.84238,0.852133,0.611246,0.574848,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.852133,0.858028,0.574848,0.53763,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.858028,0.86,0.53763,0.5,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.141972,0.147867,0.46237,0.425152,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.147867,0.15762,0.425152,0.388754,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.15762,0.171124,0.388754,0.353575,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.171124,0.188231,0.353575,0.32,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.188231,0.208754,0.32,0.288397,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.208754,0.232468,0.288397,0.259113,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.232468,0.259113,0.259113,0.232468,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&OBST XB=0.259113,0.288397,0.232468,0.208754,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.288397,0.32,0.208754,0.188231,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.32,0.353575,0.188231,0.171124,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.353575,0.388754,0.171124,0.15762,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.388754,0.425152,0.15762,0.147867,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.425152,0.46237,0.147867,0.141972,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.46237,0.5,0.141972,0.14,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.5,0.53763,0.14,0.141972,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.53763,0.574848,0.141972,0.147867,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.574848,0.611246,0.147867,0.15762,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.611246,0.646425,0.15762,0.171124,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.646425,0.68,0.171124,0.188231,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.68,0.711603,0.188231,0.208754,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.711603,0.740887,0.208754,0.232468,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.740887,0.767532,0.232468,0.259113,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.767532,0.791246,0.259113,0.288397,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.791246,0.811769,0.288397,0.32,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.811769,0.828876,0.32,0.353575,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.828876,0.84238,0.353575,0.388754,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.84238,0.852133,0.388754,0.425152,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.852133,0.858028,0.425152,0.46237,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.858028,0.86,0.46237,0.5,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /
&OBST XB=0.141972,0.147867,0.425152,0.57484,0,0,0.15, SURF_ID='STEEL SHEET' /

&VENT XB=0.1,0.9,0.1,0.1,0.0,1.5 SURF_ID = 'OPEN'/
&VENT XB=0.1,0.9,0.9,0.9,0.0,1.5 SURF_ID = 'OPEN'/
&VENT XB=0.1,0.1,0.1,0.9,0.0,1.5 SURF_ID = 'OPEN'/
&VENT XB=0.9,0.9,0.1,0.9,0.0,1.5 SURF_ID = 'OPEN'/
&VENT XB=0.1,0.9,0.1,0.9,1.5,1.5 SURF_ID = 'OPEN'/

&OBST ID='PODLAHA', XB=0.0,1.0,0.0,1.0,0.0,0.0 /

&VENT ID='kruh', RADIUS=0.36, XYZ=0.5,0.5,0.001, SURF_ID='METHANOL POOL',
XB=0.14,0.86,0.14,0.86,0.001,0.001, TEXTURE_ORIGIN=1.0,1.0,0.1/

&DEVC ID='T1',QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.,0.,0.07/
&DEVC ID='T2',QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.,0.,0.12/
&DEVC ID='T3',QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.,0.,0.22/
&DEVC ID='T4',QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.,0.,0.32/
&DEVC ID='T5',QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.,0.,0.42/
&DEVC ID='T5',QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.,0.,1.4/

&SLCF PBX=0.5, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&SLCF PBX=0.5, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE /

&DEVC ID='HRR', QUANTITY='HRR', XB=0.1,0.9,0.1,0.9,0.0,0.3/
&DEVC ID='HRR', QUANTITY='HRR', XB=0.1,0.9,0.1,0.9,0.3,1.5/
&TAIL /