

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**

**ÚTLUM TEPELNÉHO TOKU PŘI PROSTUPU  
VODNÍ CLONOU**

HEAT FLOW ATTENUATION THROUGH WATER SPRAY CURTAIN

Bc. Vojtěch Trsek

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

2017



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Trsek</u>	Jméno: <u>Vojtěch</u>	Osobní číslo: <u>410127</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra konstrukcí pozemních staveb</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Integrální bezpečnost staveb</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Útlum tepelného toku při prostupu vodní clonou</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Heat Flow Attenuation through Water Spray Curtain</u>	
Pokyny pro vypracování: 1) Shrňte stav poznání v oblasti interakce tepelného toku s vodní clonou, tj. popis zařízení vodní clony, chování kapek v rozstříkovém kuželu, účinnost vodní clony při působení účinků požáru 2) Analyzujte postup výpočtu potřebné intenzity dodávky vody pro návrh vodní clony 3) Uveďte specifika modelování vodní clony v matematickém CFD modelu 4) Vytvořte matematický CFD model s důrazem na analýzu působení jednotlivých složek sdílení tepla (konvekce, radiace) na vodní clonu	
Seznam doporučené literatury: 1) Normy požárního kodexu řady ČSN 73 08 xx a normy související 2) RYBÁŘ, P. Stabilitní hasicí zařízení: vodní a pěnová. Praha: Profesionální komora požární ochrany, 2015. Edice Profesionální komory požární ochrany. 3) Fire Dynamics Simulator User's Guide. 6th ed. NIST, Fire Research Division Engineering Laboratory Gaithersburg, Maryland, USA, 2014 4) SFPE handbook of fire protection engineering. 3rd ed. Bethesda, Md.: Society of Fire Protection Engineers, 2002. 5) Technické podklady organizací International Water Mist Association   National Fire Protection Association (NFPA)   FM Global	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Marek Pokorný, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>2.10.2017</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>7.1.2018</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

Datum převzetí zadání	Podpis studenta
-----------------------	-----------------

---

# SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Vojtěch Trsek

Název diplomové práce: Útlum tepelného toku při prostupu vodní clonou

Základní část: Útlum tepelného toku při prostupu vodní clonou podíl: 100 %

Formulace úkolů:

1) Shrňte stav poznání v oblasti interakce tepelného toku s vodní clonou tj. popis zařízení vodní clony, chování kapek v rozstříkovém kuželu, účinnost vodní clony při působení účinků požáru

2) Analyzujte postup výpočtu pro potřebnou intenzitu dodávky vody při návrhu vodní clony

3) Uveďte specifika modelování vodní clony v matematickém CFD modelu

4) Vytvořte matematický CFD model s důrazem na analýzu působení jednotlivých složek sdílení tepla (konvekce, radiace) na vodní clonu

Podpis vedoucího DP:..... Datum: .....

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

-

-

Podpis konzultanta:..... Datum: .....

3. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

-

-

Podpis konzultanta:..... Datum: .....

4. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

-

-

Podpis konzultanta:..... Datum: .....

---

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Útlum tepelného toku při prostupu vodní clonou“ jsem vypracoval 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. Vojtěch Trsek

---

## **Poděkování**

Děkuji své rodině a přítelkyni za veškerou podporu při studiu. Velmi děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marku Pokornému, Ph.D., za vstřícný přístup nejen při vedení diplomové práce. Dále děkuji Ing. Daliboru Balnerovi, Ph.D., Ing. Martinu Eliášovi a Františku Čermákovi za jejich pomoc při zpracování práce.

---

# Obsah

<b>Abstrakt</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VII</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivace .....	1
1.2 Cíle.....	2
1.3 Struktura.....	2
<b>2 Současný stav poznání</b> .....	<b>3</b>
2.1 Technické charakteristiky stabilního hasicího zařízení .....	3
2.1.1 Systavy sprinklerových hasicích zařízení .....	4
2.1.2 Vodní sprejová zařízení.....	5
2.1.3 Požadavky na vodní clony.....	6
2.1.4 Instalace vodních clon .....	7
2.2 Technické charakteristiky trysek .....	9
2.2.1 Sprejové hubice .....	10
2.2.2 Velikost kapek.....	11
2.2.3 Distribuce velikosti kapek .....	13
2.2.4 Metody měření velikosti kapek .....	14
2.2.5 Rozstříkový kužel.....	14
2.2.6 Rychlost a pohyb kapek .....	16
2.3 Tepelný tok v interakci s vodní clonou.....	19
2.3.1 Sálání tepla – radiace.....	20
2.3.2 Metody měření tepelného toku.....	23
2.4 Optické a tepelné vlastnosti vodní clony .....	23
2.4.1 Two-flux model.....	27
2.4.2 Monte Carlo Method – MCM .....	28
2.4.3 Discrete Transfer Method – DTM.....	29
2.4.4 Discrete Ordinate Method – DOM.....	31
2.4.5 Finite Volume Method – FVM.....	33
2.4.6 Mieova teorie rozptylu .....	34
2.4.7 Rayleighova teorie rozptylu .....	37
2.4.8 Vliv plynné fáze na prostup radiace .....	37
2.5 Specifika CFD modelu pro vodní clonu .....	38
2.5.1 Model rozstříkového kužele .....	38
2.5.2 Model radiačního tepelného toku.....	40
2.5.3 Model interakce tepelného toku a vodních kapek .....	40
2.6 Analytický návrh vodní clony.....	42
2.6.1 Rychlost odhořívání .....	43
2.6.2 Množství uvolněného tepla .....	44
2.6.3 Intenzita dodávky vody .....	46
<b>3 Experimentální ověření účinnosti vodní clony</b> .....	<b>48</b>
3.1 Laboratorní model vodní clony.....	48
3.1.1 Instalovaná zařízení a geometrie prostoru.....	48
3.1.2 Výstřikové charakteristiky trysek.....	51
3.1.3 Referenční požární zkouška .....	52
3.1.4 Požární scénáře s aktivovanou vodní clonou .....	53

---

3.1.5	Shrnutí a diskuze výsledků.....	56
3.2	CFD model vodní clony.....	56
3.2.1	Modelovaný prostor a výpočetní síť .....	57
3.2.2	Vstupní data.....	58
3.2.3	Specifika výpočetního modelu .....	60
3.2.4	Porovnání laboratorního a CFD modelu referenční požární zkoušky.....	61
3.2.5	Porovnání laboratorního a CFD modelu s tryskou NF 300.....	63
3.2.6	Porovnání laboratorního a CFD modelu s tryskou C–FSFH 34.....	66
3.2.7	Shrnutí a diskuze výsledků.....	70
<b>4</b>	<b>Závěry a doporučení .....</b>	<b>72</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>75</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>76</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>77</b>
	Zdrojový kód pro referenční požární zkoušku .....	77
	Zdrojový kód pro trysku NF 300.....	79
	Zdrojový kód pro trysku C–FSFH 34.....	79
	<b>Literatura .....</b>	<b>81</b>

---

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá prostupem tepelného toku vodní clonou. V práci jsou definovány jak technické pojmy spojené s problematikou návrhu vodních clon, tak fyzikální zákony, jimiž lze chování vodních clon popsat. V diplomové práci je popsáno zařízení vodní clony s detailnějším zaměřením na koncové prvky pro vodní clony, tj. hubice s plochým výstřikovým proudem. Jádro práce spočívá v popsání klíčových jevů, které se odehrávají v rozstříkovém kuželu včetně působení účinků požáru na tento kužel. Zároveň jsou popsány možnosti pro měření vybraných charakteristik, např. tepelný tok nebo velikost vodních kapek. V neposlední řadě je v práci uveden analytický návrh vodní clony. V části řešeného příkladu je měřen tepelný tok při prostupu tepla vodní clonou. Příklad je simulován pomocí CFD modelu s využitím softwaru FDS.

### Klíčová slova

Vodní clona; tryska; rozstříkový kužel; tepelný tok; radiace; RTE; Mieův rozptyl; CFD model

## Abstract

The diploma thesis deals with heat transfer through the water curtain. The thesis defines both the technical concepts associated with the design of water curtains and the physical laws that can describe the behaviour of the water curtains. In the diploma thesis the water curtain device with a more detailed focus on nozzles for the water curtains, i.e. the flat fan nozzle is described. The core of the work is to describe the crucial phenomena that occur in the splash cone, including the effects of fire on this cone. Concurrently, options for measuring selected characteristics such as heat flux or droplet size are described. Last but not least, a numerical design for a water curtain is described. In the computation part of this thesis, the heat flow is measured during the water vapor transmission. The example is simulated using a CFD model with the FDS software.

### Keywords

Water curtain; nozzle; spray pattern; heat flux; radiation; RTE; Mie Scattering; CFD model



---

## Seznam použitých symbolů a zkratek

### Latinské symboly

$Q$	průtok	l/min
$K$	konstanta stanovená výrobcem	–
$P$	tlak	bar
$\bar{F}$	vnější síla	N
$m$	hmotnost	kg
$\bar{v}$	vektorová rychlost kapky	m/s
$\bar{v}_1$	vektorová rychlost vzduchu	m/s
$\bar{g}$	gravitační zrychlení	m <sup>2</sup> /s
$C_D$	součinitel odporu vzduchu	–
$d$	poloměr kapky	m
$m_w$	hmotnostní průtok vody	l/s
$p$	tlak na trysce	bar
$r$	poloměr	m
$h$	Planckova konstanta $6,6256 \cdot 10^{-34}$	J·s
$c$	rychlost šíření záření v daném prostředí	m/s
$k$	Boltzmannova konstanta $1,3806 \cdot 10^{-23}$	J/K
$T$	teplota	K
$b$	Wienova konstanta 2,898	mm · K
$a$	absorpce	–
$r$	reflektance	–
$t$	transmitance	–
$s$	směrový vektor	–
$I_\lambda(x, s)$	intenzita radiace při dané vlnové délce	kW/m <sup>2</sup>
$K(x, s)$	koeficient absorpce	–
$B(x, s)$	celkové emitované záření z okolních zdrojů	kW/m <sup>2</sup>
$x_0, y_0$	souřadnice vrcholu dílčí plochy	m
$\Delta x, \Delta y$	rozměry dílčí plochy měřené od $x_0, y_0$	m

---

$R_x, R_y$	náhodné veličiny nabývající hodnot od 0 do 1	–
$I_n$	intenzita paprsku před vstupem do kontrolního objemu	$\text{kW/m}^2$
$I_{n+1}$	intenzita paprsku za kontrolním objemem	$\text{kW/m}^2$
$B$	koeficient absorpce pro metodu DTM	–
$L_k$	délka dráhy paprsku skrz kontrolní objem	m
$n$	celkový počet směrů	–
$N$	počet směrových kosinů	–
$I_p$	intenzita záření v bodě P	$\text{kW/m}^2$
$I_E, I_N, I_W, I_S$	intenzita záření v daném směru	$\text{kW/m}^2$
$Q_s$	koeficient rozptylu	–
$Q_a$	koeficient absorpce	–
$Q_e$	koeficient zániku	–
$I_b$	záření absolutně černého tělesa	$\text{kW/m}^2$
$U(x)$	absolutní rozptýlená intenzita	–
$\dot{q}_r$	absorbovaný radiální tepelný tok	$\text{kW}$
$m_p$	hmotnost kapky	kg
$I_{krit}$	kritická hustota tepelného toku	$\text{kW/m}^2$
$t$	čas	s, min
$S_{fi}$	povrchová plocha hořlavých látek	$\text{m}^2$
$h_{sc}$	výška hořlavých látek	m
$v_p$	rychlost odhořívání pro požár řízený palivem	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}$
$K_d$	součinitel ekvivalentního množství dřeva	–
$F_0$	parametr odvětrání	$\text{m}^{1/2}$
$S_0$	plocha otvorů	$\text{m}^2$
$h_0$	výška otvorů	m
$S_k$	plocha stavebních konstrukcí	$\text{m}^2$
$k_3$	součinitel geometrie prostoru	–
$v_v$	rychlost odhořívání pro požár řízený ventilací	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}$
$Q_{rad}$	množství tepla uvolněného radiací	$\text{kW/m}^2$
$Q_{kon}$	množství tepla uvolněného konvekcí	$\text{kW/m}^2$
$T_0$	teplota kapek ve vodní cloně	K

---

---

$Nu$	Nusseltovo kritérium	–
$L$	charakteristický rozměr – délka / šířka vodní clony	m
$Pr$	Prandtlovo kritérium	–
$c_p$	měrná tepelná kapacita	J/kg·K
$k_c$	podíl tepla sdílený prouděním z celkového tepla	–
$k_v$	parametr vyjadřující dynamiku rozvoje požáru	MW <sup>0,5</sup> ·s
$a$	součinitel vyjadřující rychlost odhořívání	–
$p$	požární zatížení	kg/m <sup>2</sup>
$V$	množství vody potřebné pro vodní clonu	l/s
$S_{ot}$	plocha chráněného otvoru	m <sup>2</sup>
$H$	měrná entalpie vodní páry	kJ/kg
$D^*$	charakteristický průměr požáru	–
$Q_{celk}$	celkové množství uvolněného tepla	kW
$c_p$	měrná tepelná kapacita	kJ/kg·K
$T_{\infty}$	teplota okolního vzduchu	K
$g$	gravitační zrychlení	m/s <sup>2</sup>
$x$	velikost kontrolního objemu	m
$q_{gauge}$	celkový tepelný tok dopadající na radiometr	kW
$\varepsilon_{gauge}$	emisivita radiometru	–
$q_{inc,rad}$	dopadající radiační záření	kW
$T_{gauge}$	teplota radiometru	K
$h$	součinitel přestupu tepla prouděním	W/m <sup>2</sup> ·K
$T_{gas}$	teplota okolního vzduchu	K
$HRR$	množství uvolněného tepla	kW
$HRRPUA$	množství uvolněného tepla z jednotkové plochy	kW/m <sup>2</sup>
$A$	plocha	m <sup>2</sup>
<b>Řecké symboly</b>		
$\rho_w$	hustota vody	kg/m <sup>3</sup>
$\Phi(s, s')$	cyklická funkce na dané oblasti	–

---

---

$\lambda_{max}$	vlnová délka maxima spektrální hustoty vyzařování	m
$\kappa(x, \lambda)$	koeficient absorpce v rovnici RTE	–
$\sigma_s(x, \lambda)$	koeficient rozptylu v rovnici RTE	–
$\lambda$	vlnová délka	m
$\overline{\sigma_p}$	efektivní koeficient rozptylu	–
$\rho_p(x)$	celková hustota kapek v kontrolním objemu	kg/m <sup>3</sup>
$\gamma$	součinitel rychlosti odhořívání	kg/m <sup>5/2</sup> ·min
$\gamma_{DOM}$	váhový součinitel nabývající hodnot 0 až 1	–
$\alpha$	parametr velikosti	–
$\phi$	inicializační úhel	–
$\beta$	parametr distribuce	–
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	W/m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup>
$\alpha_c$	soočinitel přestupu tepla	W/m <sup>2</sup> ·K
$\lambda_v$	součinitel tepelné vodivosti	W/m·K
$\nu$	kinematická viskozita	m <sup>2</sup> /s
$\mu$	účinnost vodní clony	–
$\rho_\infty$	hustota vzduchu	kg/m <sup>3</sup>

### Zkratky

A1, A2, B, C, D, E, F	Třídy reakce na oheň
R, E, I, W, C, S	Mezní stavy požární odolnosti
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
PBŘ	Požárně bezpečnostní řešení
ČSN	Česká technická norma
SHZ	Stabilní hasicí zařízení
PTCH	Požárně technická charakteristika
CAS	Cisternová automobilová stříkačka
EPS	Elektrická požární signalizace
ZOKT	Zařízení pro odvod kouře a tepla

---

PHZ	Polostabilní hasicí zařízení
DHZ	Doplňkové hasicí zařízení
SMD	Sauter Mean Diameter
MVD	Mean Volume Diameter
MND	Mean Numerical Diameter
RTE	Radiative Transfer Equation
MCM	Monte Carlo Method
DTM	Discrete Transfer Method
DOM	Discrete Ordinate Method
FVM	Finite Volume Method
FDS	Fire Dynamics Simulator
GŘ HZS ČR	Generální ředitelství hasičského záchranného sboru České republiky
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov
NF	Nozzle Fan
C-FSFH	Circle – Flat Single Fluid Head

# 1 Úvod

## 1.1 Motivace

Jedním ze základních principů požární prevence je rozdělení objektu do požárních úseků. Obecným pravidlem při návrhu objektu je minimalizace počtu požárních úseků s ohledem na provozní a dispoziční řešení. Efektivní rozdělení objektu do požárních úseků má za následek nejen splnění požadavků na omezení šíření účinků požáru, ale také na finanční náročnost při výstavbě a provozu objektu. V rámci projektu hrají požadavky na požárně dělicí konstrukce významnou roli jak pro ostatní profese, tak pro investora a koncového zákazníka.

Požární úseky lze oddělit požárně dělicími konstrukcemi popř. požárně bezpečnostními zařízeními. Zejména v prostorách, kde je instalováno vodní stabilní hasicí zařízení, je možné použití vodních clon či skrápěcích zařízení namísto „klasických“ požárně dělicích konstrukcí. Tato zařízení však mohou být použita jen ve specifických případech, jež jsou definovány v kmenových normách požární bezpečnosti staveb ČSN 730802 [1] nebo ČSN 730804 [2].

Funkce vodní clony je založena na **omezení sálavé složky** tepla a snížení teploty prostupujících zplodin hoření. Při působení tepelného záření na vodní clonu lze pozorovat několik fyzikálněchemických jevů, jež ovlivňují chování vodní clony. Jednotlivé mechanismy jsou v práci podrobně popsány, přičemž jsou uvedeny spojitosti s matematickým CFD modelováním těchto jevů. S ohledem na návrh vodních clony vždy pro konkrétní situaci lze návrh zgeneralizovat pouze se značnou mírou nepřesnosti. Požární inženýrství založené na matematických modelech by v této souvislosti mohlo přinášet přesnější informace pro návrh vodních clon.

Při návrhu vodní clony jsou rozhodující především vlastnosti trysek a jejich rozmístění, jež ovlivňují výsledný tvar vodní clony, velikost kapek a jejich rozptyl. Předpokladem pro technickou správnost návrhu je přesný hydraulický výpočet. Na základě výpočtu je znám tlak na trysce, na jehož základě lze navrhovat konkrétní trysky. Každá tryska je definována několika fyzikálnětechnickými parametry, jež ovlivňují tvar a funkci vodní clony.

Princip funkce vodní clony je založen na odebírání tepla při odpařování kapek a tlumení tepelného záření absorpcí a rozptylem při průchodu vodní clonou. Funkci vodní clony ovlivňuje nejen působení tepelného záření, ale také provoz v objektu, velikost chráněného otvoru a požární větrání uvažované při požáru v daných požárních úsecích. Vliv vodních clon na šíření požáru má pouze omezující účinek a s ohledem na konvektivní složku sdílení tepla by měl být jejich návrh spojen s návrhem požárního větrání.

## 1.2 Cíle

Hlavními cíli pro diplomovou práci jsou:

- 1) zatřídění vodních clon v rámci stabilních hasicích zařízení a popis jednotlivých armatur,
- 2) analýza chování kapek ve vodním spreji v souvislosti s technickými charakteristikami trysek,
- 3) analýza a modelování interakce radiačního tepelného toku s vodní clonou,
- 4) uvedení specifik CFD modelování v souvislosti s útlumem tepelného toku,
- 5) rozbor analytického návrhu vodní clony pro praktické použití,
- 6) provedení požárních experimentů pro vybrané požární scénáře,
- 7) ověření účinnosti vodní clony pomocí matematického CFD modelování.

## 1.3 Struktura

Kapitola „*Úvod*“ obsahuje motivaci pro řešení daného tématu a stanovuje cíle a strukturu diplomové práce.

Kapitola „*Současný stav poznání*“ představuje zařízení vodních clon včetně jednotlivých armatur, analyzuje chování kapek v rozstříkovém kuželu a vysvětluje principy útlumu radiačního tepelného toku. V závěru kapitoly je uveden analytický návrh vodní clony.

V kapitole „*Experimentální ověření účinnosti vodní clony*“ jsou popsány tři požární scénáře, jež byly realizovány jak v laboratorním, tak v matematickém CFD modelu. Naměřené hodnoty hustoty tepelného toku jsou vzájemně porovnány a diskuze získaných výsledků je uvedena na konci jednotlivých kapitol.

Kapitola „*Závěry a doporučení*“ shrnuje klíčové poznatky diplomové práce a uvádí doporučení pro další navazující činnost.

V kapitole „*Přílohy*“ jsou uvedeny vstupní zdrojové kódy pro software FDS pro všechny modelované požární scénáře.

## 2 Současný stav poznání

### 2.1 Technické charakteristiky stabilního hasicího zařízení

Stabilní hasicí zařízení (SHZ) je definováno jako vyhrazené požárně bezpečnostní zařízení [3] a patří do skupiny aktivních prostředků požární ochrany. SHZ se navrhuje pro konkrétní případy v závislosti na požárně technických charakteristikách (PTCH) hořlavých látek, jejich rozložením v prostoru a pro konkrétní provozní podmínky.

SHZ tvoří komplexní systém spadající do kategorie technických zařízení budov a lze jej rozdělit do několika kategorií, např. dle druhu hasiva, dle zásobování hasivem, dle typu soustavy, dle typu ovládání ad. Zařízení vodní clony je zpravidla instalováno v rámci vodních SHZ.

Voda je nejčastěji používané hasivo a její hasební účinek závisí zejména na velikosti kapek v rozstříkovém kuželu. Z hlediska velikosti kapek se SHZ dělí na mlhová a sprinklerová. (tab. 1).

tab. 1: Velikost kapek sprinklerových a mlhových SHZ; [4]

SHZ	Sprinklerová	Mlhová		
		nízkotlaká	středotlaká	vysokotlaká
Průměr kapek [mm]	1-3	0,4-1	0,2-0,4	0,025-0,2

Mezi praktické výhody použití vody jako hasiva patří nízká cena, snadná dostupnost, ekologická nezávadnost ad. Z hlediska hašení jsou pak podstatné především fyzikálněchemické vlastnosti vody – kinematická a dynamická viskozita, tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita či měrné skupenské teplo vypařování. Na základě těchto vlastností lze určit hasební efekt vody.

Ochlazovací schopnost vody je dána fyzikálními vlastnostmi, zejména pak díky vysokému výparnému teplu<sup>1</sup>, díky němuž voda dokáže pohltit značné množství tepla. Dalším hasebním efektem vody je dusivý efekt. Jeho princip spočívá ve zvětšení objemu vody při přeměně na páru. S rostoucí teplotou nabírá vodní pára na objemu (tab. 2<sup>2</sup>) a z požářiště tak vytěsňuje vzdušný kyslík. Při hašení hořlavých kapalin lze pozorovat také efekt ředící, neboť voda funguje jako rozpouštědlo například pro líh nebo aceton.

<sup>1</sup> Teplo potřebné k převedení 1 kg kapaliny při bodu varu do plynného skupenství.

<sup>2</sup> Velikost objemu vodní páry lze pro další teploty určit ze stavové rovnice ideálního plynu.



tab. 2: Zvětšení objemu vodní páry v závislosti na teplotě;[5]

Teplota [°C ]	Zvětšení objemu vodní páry
100	1700x
250	2400x
650	4200x

### 2.1.1 Soustavy sprinklerových hasicích zařízení

Sprinklerové hasicí zařízení je nejspolehlivější a nejrozšířenější druh SHZ v současné době. Sestává ze zařízení pro zásobování vodou, zásobování elektrickou energií, ventilových stanic a soustavou potrubí s koncovými prvky – tryskami. Součástí SHZ je poplachové a monitorovací zařízení.

Pro účinnost vodní clony nebo skrápěcího zařízení je nutno znát některé charakteristiky soustavy. Při aktivaci hlavice dochází k výstřiku proudu vody okamžitě nebo se zpožděním v závislosti na zásobování a typu soustavy. Cílem je především co nejrychlejší aktivace sprinkleru a následného výstřiku vody.

Zásobování vodou pro SHZ hraje důležitou roli zejména při určování součinitelů  $c_3$  a  $\Delta c_2^3$ , které dále ovlivňují výpočet požárního a ekonomického rizika. Dle zásobování vodou lze rozlišit [6]:

- SHZ, které disponuje vlastním zásobováním vodou s možností doplňování vody z cisternových automobilových stříkaček (CAS),
- polostabilní hasicí zařízení (PHZ), které je závislé pouze na dodání vody z CAS,
- doplňkové hasicí zařízení (DHZ), které nesplňuje normativní požadavky na zásobování vodou dle ČSN EN 12845 [7]. Jedná se zejména o případy, kdy je nedostatečná intenzita dodávky vody z vodovodního řádu nebo v objektu nelze umístit dostatečně kapacitní zásobní nádrž.

Mimo samotné hlavice může rychlost výstřiku vody ovlivnit také zavodnění soustavy nebo součinnost s ostatními požárně bezpečnostními zařízeními, např. elektrickou požární signalizací (EPS) nebo zařízením pro odvod kouře a tepla (ZOKT). Zařízení EPS může být napojeno na řídicí ventil soustavy SHZ a samočinně ovládat jeho pozici. Dle zavodnění rozlišujeme tyto základní druhy soustav [6]:

- Mokrý soustava – navrhuje se v prostorech, kde nehrozí zamrznutí vody v potrubním systému. Výjimku tvoří soustavy naplněné nemrznoucí kapalinou. Soustava je závislá na funkci řídicího ventilu, jenž po aktivaci hlavice vyhlásí požární poplach. Jak název napovídá, soustava je zavodněna v celé délce potrubí až k hlavicím, čímž je zajištěn kratší reakční čas, než u soustavy suché.

<sup>3</sup> Součinitel  $c_3$  je uveden v souvislosti s ČSN 73 0802 [1]. Součinitel  $\Delta c_2$  pak uvádí ČSN 73 0804 [2].

- Suchá soustava – navrhuje se v prostorách s teplotami menšími než 5 °C nebo vyššími než 70 °C. Potrubní rozvody za řídicím ventilem jsou naplněny stlačeným vzduchem. Při otevření hlavice dojde k poklesu tlaku v potrubí a k aktivaci řídicího ventilu.
- Předstihová soustava typu A – suchá soustava, u níž je řídicí ventil ovládán pomocí EPS. K výstřiku vody dochází při současném otevření hlavice a vyhlášení požárního poplachu pomocí EPS. Výhodou soustavy je nezatěžování nosné konstrukce zavodněným potrubím, či zamezení nežádoucímu výstřiku vody při mechanickém poškození sprinkleru.
- Předstihová soustava typu B – funkcí podobná soustavě typu A, nicméně k zavodnění soustavy dojde při aktivaci sprinkleru i bez činnosti EPS. Výsledkem je zkrácení reakčního času výstřiku vody.

Požadavky na SHZ jsou uvedeny v ČSN EN 12845. V praxi se však lze setkat i s návrhem podle často přísnějších požadavků zahraničních dokumentů. Jedná se především o řadu dokumentů NFPA či FM Global. Pro návrh vodních sprejových zařízení je užívána ČSN P CEN /TS 14816 [8] a pro návrh vodních clon a skrápěcích zařízení ČSN 73 0873 [9].

### 2.1.2 Vodní sprejová zařízení

Vodní sprejová zařízení spadají do skupiny SHZ, přičemž koncovými prvky jsou vodní sprejové hubice a k řízení dodávky vody do potrubního systému jsou použity zaplavovací ventilové stanice. Ventilové stanice dále slouží k uvedení poplachových zařízení do činnosti a ke kontrole jejich funkčnosti. Ventilová stanice může být otevřena ručně nebo samočinně na základě signálu od detekčního zařízení. Vodní sprejová zařízení lze rozdělit na [10]:

- zařízení s elektrickým ovládním,
- zařízení s pneumatickým ovládním,
- zařízení s hydraulickým ovládním.

Vodní sprejová zařízení zpravidla nejsou určena pro uhašení požáru, ale zejména pro ochlazování povrchů stavebních konstrukcí / technologických zařízení (skrápěcí zařízení) nebo pro omezení šíření sálavého tepla (vodní clony). Při instalaci sprejových zařízení za účelem uhašení požáru se jedná o sprejová SHZ.

Vstupním údajem pro návrh sprejových zařízení je intenzita dodávky vody, jež je stanovena návrhovým dokumentem pro konkrétní provoz. V závislosti na druhu nebezpečí se pohybuje od 5 do 30 mm/min. Vzhledem k častému použití sprejových zařízení v blízkosti technologických zařízení je nutné brát ohled na bezpečnost osob před úrazem elektrickým proudem. Další typickou problematikou související se zajištěním trvalé provozuschopnosti je zanesení sprejových hubic mechanickými nečistotami. Výjimku tvoří hubice, jež využívají nárazový způsob tříštění vodního proudu. Řešením může být instalace potrubí z nerezové oceli, použití sít u koncovek nebo protiprachových krytek ve vysoce prašných prostředích [11].

### 2.1.3 Požadavky na vodní clony

Požadavky pro návrh, instalaci a údržbu vodních clon jsou popsány v příloze A ČSN 73 0873 [9]. Příloha je pouze informativní a její použití tak není závazné. Dle čl. A. 2.4 ČSN 73 0873 se u vodních clon požaduje samočinné spuštění a současné zavodnění všech hubic – otevřených výstřikových koncovek. Zavodnění systému vodní clony je tak závislé na aktivaci detekčního sprinkleru nebo na systému EPS, jež otevře řídicí ventil pro potrubní rozvody vodní clony.

Vodní clona nahrazuje požárně dělicí konstrukci po celou dobu její požární odolnosti. Další podmínky pro realizaci vodních clon jsou:

- prvky vodní clony (hubice, detekční sprinklery, ventily) musí být certifikovány,
- v ploše chráněného otvoru nesmí vzniknout žádná nechráněná plocha, tj. celá plocha otvoru musí být pokryta výstřikovými diagramy jednotlivých hubic,
- potrubní rozvody musí být provedeny z nehořlavých hmot,
- na přívodním potrubí musí být instalován ruční uzávěr vody,
- přetlak v místech osazení hubic má být větší než 0,4 MPa.

Pokud je zavodnění vodní clony závislé na aktivaci detekčního sprinkleru, je nutno posoudit velikost chráněného otvoru vzhledem k rozsahu detekce sprinkleru. Sprinkler musí být umístěn tak, aby nebyl v případě požáru ochlazován jiným (již aktivovaným) sprinklerem a zároveň, aby byl schopen pokrýt celou šíři otvoru.

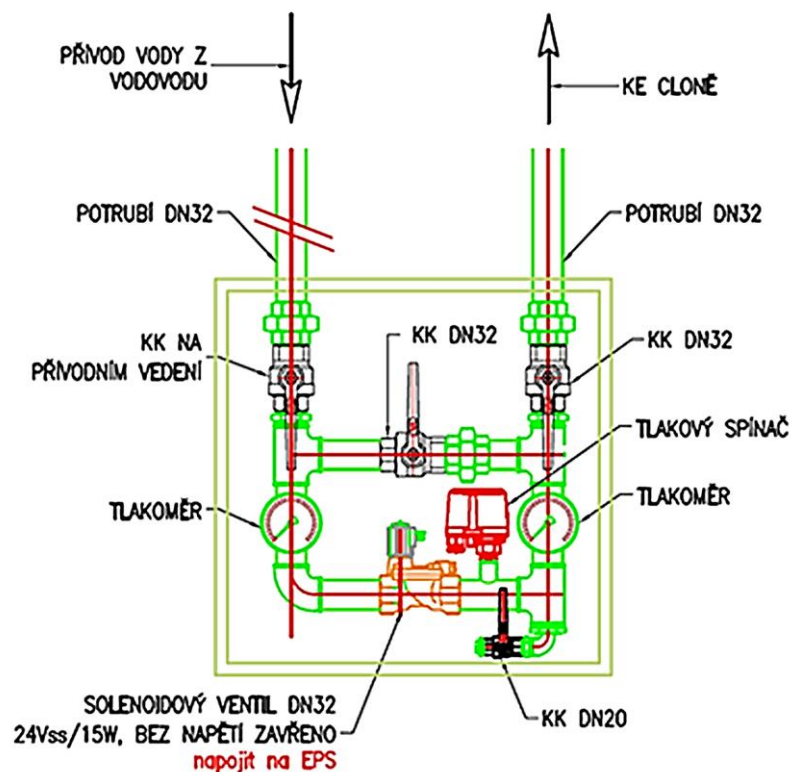
Pro určení mezních rozměrů otvoru nebo počtu detekčních sprinklerů je možné se orientovat dle tab. 3. Například pro třídu nebezpečí OH (např. garáže) připadá dle ČSN EN 12845 na jeden detekční sprinkler šířka otvoru 4 m, přičemž tento sprinkler musí být umístěn v ose otvoru, tj. ve vzdálenosti 2 m na každou stranu. Detekční sprinkler musí být instalován v obou požárních úsecích, jež vodní clona odděluje. Je tak zajištěno spuštění při požáru v libovolném z dvojice požárních úseků.

tab. 3: Maximální plocha a umístění sprinklerů při standardním uspořádání; [7]

<i>Třída nebezpečí</i>	<i>Maximální plocha chráněná jedním sprinklerem [m<sup>2</sup>]</i>	<i>Maximální vzdálenost sprinklerů [m]</i>	<i>Vzdálenost od stěny [m]</i>
<i>LH</i>	21	4,6	2,3
<i>OH</i>	12	4	2
<i>HHP/HHS</i>	9	3,7	1,85

Při spuštění vodní clony řídicím ovládacím ventilem, jež je nejčastěji řízen systémem EPS, dochází k zavodnění potrubí při detekci některého z požárních hlásičů. Pro zamezení spuštění vodní clony při planém poplachu je nutný signál alespoň ze dvou hlásičů, přičemž umístění jednoho z těchto hlásičů se předpokládá v blízkosti vodní clony.

Zpravidla se k zařízení vodní clony instaluje ovládací skříň, ve které se nachází ovládací ventil napojený na EPS a další armatury (obr. 1). Po obdržení signálu EPS dojde k otevření solenoidového ventilu, jež odděluje mokrou a suchou část. Otevřením ventilu dochází k průtoku vody do potrubí vodní clony a k tryskám. Ventil je možné spustit i pomocí tlačítka v obou požárních úsecích, jež jsou clonou odděleny nebo ručně ovládaným kohoutem. Po ukončení funkce vodní clony je nutno uzavřít uzávěr na přívodu vody, rozvody vodní clony odvodnit, uvést ventil do pohotovostního stavu a znovu otevřít přívod vody.



obr. 1: Schéma ovládací skříně vodní clony; [12]

Chod zařízení signalizuje tlakový spínač, jenž se aktivuje při průtoku vody. Signál je zpravidla vysílán do místa stálé služby (ústředny EPS). Kulový kohout na přívodním potrubí slouží k uzavření vody v případě výměny či opravy armatury v ovládací skříni. Kulový kohout na výstupním potrubí slouží k uzavření vody v případě provádění funkčních zkoušek. Při hydraulickém výpočtu je nutno dosáhnout požadovaného tlaku na koncových prvcích – hubicích. Pro měření tlaku v ovládací skříni slouží tlakoměry, jejichž hodnota musí být v souladu s výpočtem.

## 2.1.4 Instalace vodních clon

Při prokázání účinnosti z hlediska požadavků na požární odolnost, může vodní clona nahradit požární stěny nebo požární uzávěr v nevýrobních objektech v případech, kdy se jedná o [1]:

- prostup technického nebo technologického zařízení,

- části konstrukcí, které z provozních důvodů nelze požárně uzavřít s výškou max. 4 m a plochou max. 25 m<sup>2</sup> v požárních úsecích s výškovou polohou  $h_p \leq 45$  m.

Vodní clony či skrápěcí zařízení lze použít i u otvorů větších než 25 m<sup>2</sup>, pokud:

- je v požárních úsecích, jež jsou tímto zařízením odděleny, instalováno SHZ popř. DHZ,
- požární úseky mají výškovou polohu menší  $h_p < 12$  m,
- je posouzena tvorba a pohyb zplodin hoření a je prokázáno, že unikající osoby a požární jednotky v době zahájení zásahu nebudou ohroženy zplodinami hoření.

Při instalaci vodní clony musí být posouzeny podmínky omezení hustoty tepelného toku a zároveň musí být doložen způsob zábrany průniku kouře otvorem krytým vodní clonou do sousedního požárního úseku.

Obdobná pravidla platí i pro výrobní objekty. Ve výrobních objektech však lze oddělit dva sousední požární úseky pouze v případech, kdy se jedná o 1. až 6. skupinu výrob a provozů nebo o 1. až 5. skupinu výrob a provozů pro otvory větší než 25 m<sup>2</sup>. Dále je možné použití vodní clony i v prostupu požárním stropem, pokud alespoň jeden z jeho rozměrů nepřesahuje 2,5 m a plocha otvoru je menší než 10 m<sup>2</sup> a zároveň je zajištěno zabránění průniku zplodin hoření a kouře.

Při spuštění vodní clony se nepředpokládá zabránění průniku zplodin hoření a kouře samotným zařízením. Je proto nutno navrhnout požární odvětrání, případně prostup ve stropě oddělit např. kouřovými přepážkami [13].

V praxi je nutno řešit každý návrh vodní clony individuálně. S vodními clonami se lze nejčastěji setkat u pásových dopravníků, eskalátorů či kabelových kanálů. Zpravidla se jedná o liniové prvky, jež prochází více požárními úsecy a během provozu nemohou být konstrukčně odděleny. Příklad instalace vodní clony je zobrazen na obr. 2. Zobrazená vodní clona nahrazuje požární uzávěr v požární stěně mezi prostory skladu a přístřešku. Plastová tabule v otvoru není součástí vodní clony či zkrápění a nevykazuje požární odolnost.



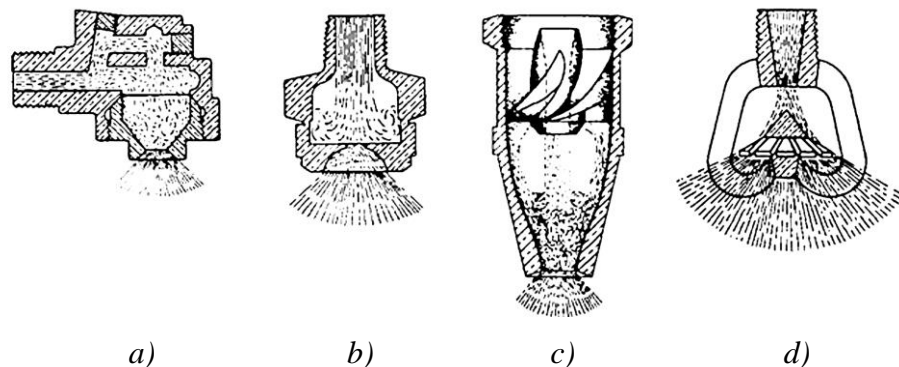
obr. 2: Příklad realizace vodní clony pro ochranu technologického prostupu; [12]

## 2.2 Technické charakteristiky trysek

Sprejové trysky se liší konstrukcí, úhlem výstřiku, průtokem (vyjádřeným jako u sprinklerů K faktorem), tvarem výstřiku a výstřikovou rychlostí. Sprejové trysky lze rozlišit dle rychlosti sprejového proudu na středně a vysoko rychlostní. Středně rychlostní sprejové trysky jsou určeny pro hašení hořlavých kapalin s bodem vzplanutí nižším než 66 °C. Pro ostatní kapaliny se používají vysokorychlostní trysky.

Konstrukce sprejové trysky oproti sprinklerové hlavici je podstatně jednodušší. Odpadá zde nutnost těsnění, seřizování a umístování tepelné pojistky. Sprejové trysky sestávají pouze z těla, jehož součástí je zpravidla i tříštič, který formuje rozstříkový kužel. Vodní kužel může vznikat následujícím způsoby:

- sražením více vodních proudů nebo mísením se vzduchem (obr. 3a).
- tlakem vody na dutinu s úzkým průměrem (obr. 3b),
- vytvořením spirálovitých proudů uvnitř trysky (obr. 3c),
- nárazem jednoho proudu vody na tříštič (obr. 3d),



obr. 3: Sprejové hubice při tvorbě vodního kužele; [14]

Formování rozstříkového kužele ovlivňuje objemový rozptyl kapek a jejich pozice v kuželu. Přesné informace o velikosti kapek jsou důležitým faktorem pro celkovou účinnost vodní clony. Proces tvorby vodních kapek se nazývá **atomizace**.

Potenciální energie vodního proudu (případně vodního proudu a vzduchu) spolu s geometrií trysky způsobuje, že kapalina vychází z trysky ve formě jednotlivých částí spojených vazbami, tzv. provazce<sup>4</sup>. Až následně se z těchto částí tvarují jednotlivé kapky. V závislosti na konstrukci trysky vznikají jednotlivé druhy rozstříkových kuželů, například dutý, plný či plochý rozstříkový kužel. Aby bylo možné přesně vyhodnotit a porozumět údajům o velikosti kapky, je třeba vzít v úvahu všechny klíčové proměnné zejména s ohledem na vlastnosti trysky. Mezi tyto faktory patří typ a kapacita trysky, tlak vody před tryskou, úhel rozstříku ad. [15].

<sup>4</sup> Převzato z anglického termínu *ligament*

### 2.2.1 Sprejové hubice

Základním rysem při výběru hubice pro jakýkoliv systém hasicího zařízení je **K faktor**. K faktor vyjadřuje jmenovitý průtok dané hubice při tlaku 1 bar. Průtok vody ze sprejové hubice lze vypočítat z následující rovnice [8]:

$$Q = K \cdot \sqrt{P} \quad (1)$$

Kde:  $Q$  – průtok [l/min]

$K$  faktor – konstanta stanovená výrobcem [l/min]

$P$  – tlak [bar]

Pro vodní clony lze použít drenčerové hlavice<sup>5</sup>. Důležitou roli z hlediska tvaru rozstříkového kužele hraje úhel tříštiče. Čím méně je špička tříštiče ostrá, tím větší dosah má rozstříkový kužel. Trysky mají zpravidla plný nebo dutý rozstříkový kužel a velikost kapek je obdobná jako u sprinklerových hlavíc tj. 1-3 mm.

Diametrálně odlišné vlastnosti z hlediska průtoku a velikosti kapek mají mlhové hubice. Za mlhové hubice lze považovat takové trysky, jejichž 90 % kapek má menší průměr než 1 mm. K faktor mlhových hubic se pohybuje v řádu jednotek. U klasických sprinklerů se jedná obvykle o hodnoty v řádu desítek až stovek.

Na obr. 4a je zobrazena hlavice pro mlhové hasicí zařízení. Tvorba kapek s velmi malým průměrem je zajištěna konstrukcí tryšky a k atomizaci dochází bezprostředně po výstřiku proudu z hubice. Na obr. 4b je zobrazena tryška, jejíž rozstříkový kužel vzniká nárazem dvou proudů vody, čímž dochází k atomizaci vodních kapek. Tato tryška je vhodná pro vodní clony zejména kvůli plochému výstřikovému proudu. Hustota kapek se tak rozdělí výhodně v podélném směru, rovnoběžně s chráněným prostorem, čímž je zvýšena účinnost vodní clony.

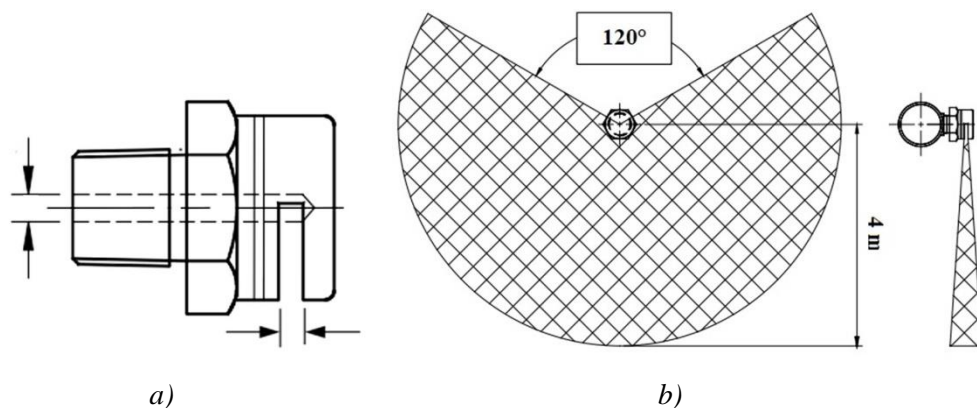


obr. 4: Mlhové hubice: a) tradiční hubice pro mlhové hasicí zařízení; b) mlhová hubice s plochým rozstříkovým kuželem; [16, 17]

<sup>5</sup> Drenčerové hlavice tvoří podskupinu sprejových hubic (trysek). Jedná se o otevřené hubice, jejichž tělo je podobné klasickým sprinklerům a ke vzniku rozstříkového kužele dochází díky konstrukci tříštiče (obr. 3d).

Nejčastěji používanou skupinou hubic pro vodní clony jsou **clonové hubice**. Clona vzniká roztrášením vodního proudu uvnitř trysky a díky půlkruhovému tvaru dutiny získává výsledný tvar. Zpravidla se jedná o trysky, jež jsou schopny efektivně pracovat při široké škále provozního tlaku a zároveň tvoří plochý výstřikový proud. Schematické zobrazení konstrukce trysky a rozstříkového kužele je zobrazeno na obr. 5.

Tryska je schopna při provozním tlaku 2-5 bar dostříknout 4 m na každou stranu v rovnoběžném směru s chráněným prostorem. Konkrétně pro tuto trysku výrobce doporučuje překrytí rozstříkových kuželů jednotlivých trysek alespoň o 50 %. Pro zamezení střetnutí rozstříkových kuželů se doporučuje odsadit vždy dvě sousední trysky v kolmém směru na vodní clonu alespoň o 200 mm.



obr. 5: Clonová hubice: a) konstrukce trysky; b) rozstříkový kužel; [18]

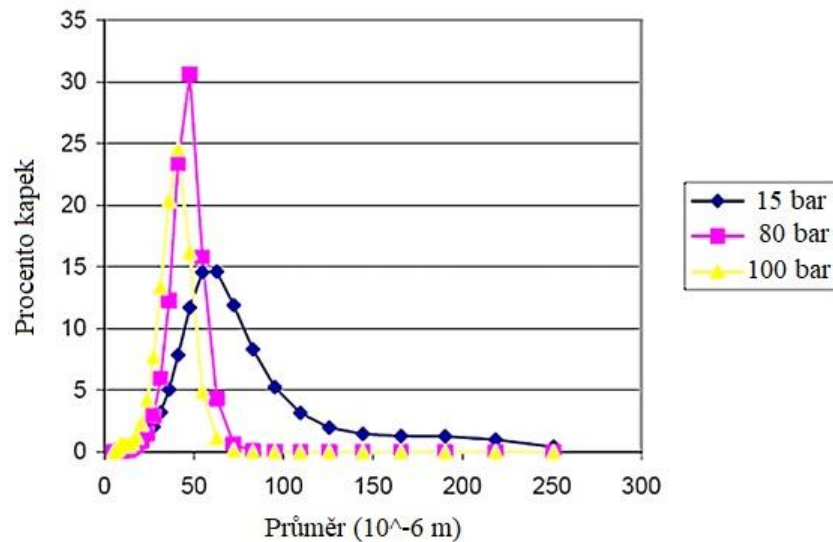
V technických listech výrobců jsou v různé míře popsány technické vlastnosti jednotlivých trysek. Účinnost trysek při útlumu tepelného toku je v technických listech obvykle řešena odkazem na legislativní dokumenty. Příkladem může být dokument NFPA 15 [19], kde lze dohledat požadavek na návrhovou hustotu vody. Pro požáry pevných látek a kapalin se jedná o  $6 \text{ l/min}\cdot\text{m}^2$  až  $20,4 \text{ l/min}\cdot\text{m}^2$ , přičemž návrh by měl být založen na poznatcích z testů podobných konkrétní situaci.

### 2.2.2 Velikost kapek

Pro určení velikosti kapek se nejčastěji používají statistické metody. Pro jednotlivé metody je stanovena terminologie, jež souvisí vždy s danou metodou měření. Při porovnávání velikostí kapek mezi jednotlivými tryskami tak musí být použita vždy hodnota měřená stejným postupem.

Pro určení středního průměru kapek se používá **Sauterův střední průměr SMD** (*Sauter Mean Diameter*). Hodnota SMD udává poměr objemu vody k jejímu povrchu a je určující pro celý rozstříkový kužel. Nahrazuje nepravidelné rozdělení kapek stejným počtem kapek o středním průměru tak, aby byl zachován jejich objem. Zásadním faktorem ovlivňujícím velikostní rozptyl kapek je tlak na trysce. Porovnání tří experimentů, jež se zabývaly rozptylem kapek, je zobrazeno na obr. 6.





obr. 6: Rozptyl kapek při tlaku 15, 80, 100 barů; [20]

Z naměřených dat lze určit hodnotu SMD. Z grafu je patrné, že průměr kapek se zmenšuje při vyšším tlaku, nicméně hodnota SMD se při nárůstu tlaků o 85 barů zmenší pouze o polovinu (tab. 4).

tab. 4: Hodnota SMD při daném tlaku; [20]

Tlak	15 bar	80 bar	100 bar
SMD	41,30 $\mu\text{m}$	33,07 $\mu\text{m}$	23,70 $\mu\text{m}$

Hodnoty naměřené v experimentech [21] jsou typické pro vysokotlaké vodní mlhy. Velikosti kapek jsou měřeny v mikrometrech<sup>6</sup>. Při praktických výpočtech lze uvažovat průměr kapek u klasických sprinklerů 1-3 mm a u trysek pro vodní mlhu průměr menší než 1 mm.

Pro identifikaci průměru kapek v rozstřikovém kuželu se dále používá hodnota  $D_{v0,5}$  – **střední objemový průměr MVD** (*Median Volume Diameter*), pro kterou platí, že 50 % rozprášeného celkového objemu mají kapky, jejichž průměr je menší / větší než MVD. Dále hodnota  $D_{v0,9}$ , při které 90 % rozprášeného celkového objemu mají kapky s průměrem menším než  $D_{v0,9}$ . Poslední hodnotou je  $D_{N0,5}$  – **střední numerický průměr MND** (*Mean nominal diameter*), při které 50 % kapek z celkového počtu kapek je menší / větší než MND. Průměr kapek se měří ve svislé rovině ve vzdálenosti 1 m od hubice [22].

Pro metody měření kapek a jednotlivé obory existují ještě další hodnoty. Například pro detailnější studii absorpce kapek se používá střední průměr povrchu  $D_{21}$ , pro výpočet rychlosti odpařování pak aritmetický průměr povrchu  $D_{10}$  [15].

<sup>6</sup> 1  $\mu\text{m}$  = 0,000 001 m

### 2.2.3 Distribuce velikosti kapek

Velikost kapek v rozstříkovém kuželu lze zobecnit stanovením určité hodnoty, jež slouží jako reprezentativní pro celý kužel. V matematických modelech nebo v laboratorních měřicích zařízeních však lze velikost kapek zkoumat podrobněji. Distribuci velikosti kapek lze zpřesnit stanovením distribuční funkce, kterou se rozptyl velikostí kapek řídí. Distribuci kapek lze popsat pomocí jednotlivých funkcí, přičemž tyto funkce mohou být rozděleny do dvou základních skupin. První skupinu tvoří **čistě empirické vzorce** založené na tvaru a měřítku distribuce kapek. Patří sem například Weibullovo, Rosin – Rammlerovo, Nukyama – Tanasawa nebo  $\chi^2$  rozdělení. Obecně lze distribuční funkci pro tato rozdělení zapsat takto [23]:

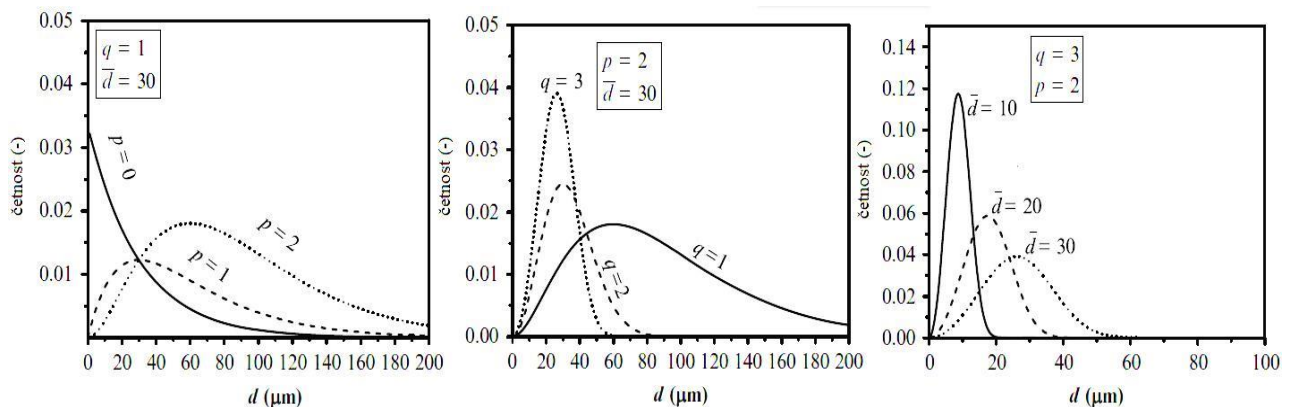
$$f(d) = \left[ \frac{q}{\bar{d}} \left( \frac{d}{\bar{d}} \right)^{p-1} \right] \exp \left[ - \left( \frac{d}{\bar{d}} \right)^q \right] \quad (2)$$

Kde:  $p$  – parametr tvaru [–]

$\bar{d}$ ,  $q$  – parametry měřítka [–]

$d$  – charakteristická velikost kapky [ $\mu\text{m}$ ]

Stanovení jednotlivých parametrů a jejich závislostí mezi sebou definují jednotlivé přístupy. Rozdělení kapek v závislosti na vlivu jednotlivých parametrů je znázorněno na obr. 7. Na vodorovné ose je zobrazeno měřítko pro velikost kapky, na svislé pak četnost výskytu dané velikosti. Parametr  $\bar{d}$  jasně posunuje distribuci velikosti v jejím rozsahu, neboť je v rovnici (2) přímo spojen s charakteristickou velikostí kapky. Parametr  $q$  ovlivňuje zejména četnost výskytu dané velikosti a parametr  $p$  celkový tvar distribuce.



obr. 7: Vliv parametrů na distribuční funkci kapek; [23]

Druhou skupinou popisující distribuci velikosti kapek je **Log-normální rozdělení**, které lze obecně vyjádřit takto [24]:

$$f(d) = \frac{1}{d\gamma_g\sqrt{2\pi}} \exp \left( - \frac{(\ln(d) - \ln(\bar{d}_g))^2}{2\gamma_g^2} \right) \quad (3)$$

Kde:  $\bar{d}_g$  – geometrický střední průměr [ $\mu\text{m}$ ]

$\gamma_g$  – standardní odchylka [–]

$d$  – charakteristická velikost kapky [ $\mu\text{m}$ ]

Log-normální rozdělení je nejrozšířenější metodou pro jednostranně ohraničená data. V našem případě to znamená, že velikost kapek dosahuje vždy kladné hodnoty, resp. má přirozeně definovaný počátek v nule. Právě log-normální rozdělení je vhodné pro popis veličin popisujících rozdělení v těsné blízkosti tohoto počátku, např. pro velmi malé velikosti kapek.

## 2.2.4 Metody měření velikosti kapek

Existují dvě metody odebrání vzorků velikostí kapek – prostorová metoda a metoda toku. **Prostorová metoda** se používá při okamžitém odběru kapek v daném objemu. Obecně se tato měření provádí pomocí holografických prostředků, např. vysokorychlostní fotografování nebo pomocí přístrojů pro měření rozptylu světla. Prostorová metoda je velmi citlivá na počet jednotlivých kapek v dané velikostní třídě v jednotkovém měřeném objemu.

**Metoda toku** zkoumá „průtok“ kapek měřenou oblastí v časovém intervalu. Metoda toku je měřena pomocí optických přístrojů, které jsou schopné snímat jednotlivé kapky. Tento typ měření je citlivý na pohyb kapek v dané části.

Distribuce toku může být přeměněna na prostorovou distribuci vydělením počtu vzorků v každé velikosti třídy průměrnou rychlostí kapek v této velikostní třídě. Pokud by se všechny kapky v rozstříkovém kuželu pohybovaly stejnou rychlostí, pak je tokové a prostorové rozdělení totožné. Obecně lze říci, že při použití prostorové metody jsou naměřeny menší průměrné velikosti kapek než při použití metody toku. To dokazuje i následující tab. 5, v níž jsou uvedeny hodnoty VMD, resp.  $Dv_{0,5}$  pro stejnou trysku instalovanou za stejných podmínek při použití průtokových a prostorových vzorků [15].

tab. 5: Porovnání výsledků měření pomocí prostorové a průtokové metody; [15]

Hodnota VMD ( $Dv_{0,5}$ )	
Metoda toku	Prostorová metoda
650 $\mu\text{m}$	530 $\mu\text{m}$

Při zavádění různých metod měření je nutno k získaným datům udávat také způsob, jakým byla naměřena. Vzhledem k značným odchylkám by uvádění metod měření do technických listů trysek zamezilo vzniku nesrovnalostí v datech.

## 2.2.5 Rozstříkový kužel

Rozstříkový kužel je definován konstrukcí trysky, přičemž při tvorbě rozstříkového kužele hraje roli několik fyzikálních faktorů – tlak před hubicí, průtok tryskou, dostřik spreje, úhel výstřiku a velikost kapek. V praxi existuje několik typů rozstříkových kuželů, přičemž mezi tři základní

patří plný kužel, dutý kužel a plochý kužel. Plné kuželové rozstříky mají zpravidla největší velikost kapek. Následují je ploché a duté kuželové rozstříky. Tento trend lze pozorovat jak pro hydraulické, tak pro trysky založené na mísení vzduchových a vodních proudů, jež vytvářejí zpravidla velmi jemné kapky.

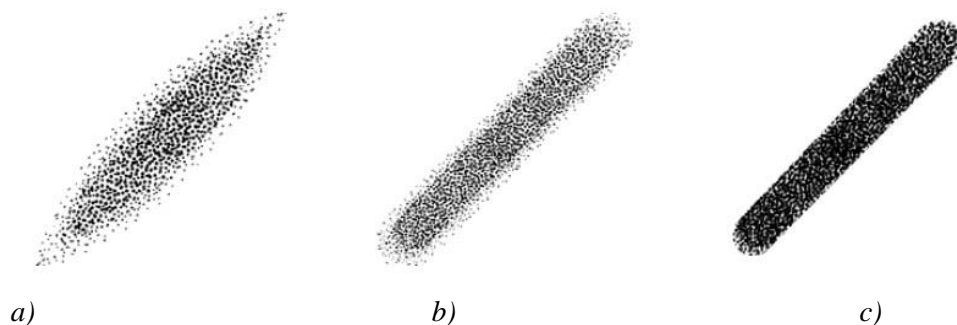
Pro vznik plochého kužele jsou používány dva typy trysek. U trysek na obr. 8 vzniká plochý rozstříkový kužel hydraulicky. Drážka ve tvaru písmene „v“ protíná nejčastěji polokulovou dutinu, čímž způsobuje atomizaci proudu a tvoří obdélníkový nebo eliptický tvar. Této metodě se říká **metoda axiálního proudění** (*axial flow method*), neboť výsledný tvar vodního proudu je ve stejné rovině jako drážka ve tvaru „v“ (obr. 8a).

Druhá metoda je známa jako **metoda tangenciálního proudění** (*tangential flow method*) nebo metoda deflektoru (*deflector method*). Proud vody v hubici vede dutinou, jež vyústí na zakřivenou rovinu deflektoru. Oproti tryskám, jež využívají axiálního proudění, zde nedochází k atomizaci v tak velkém rozsahu. Na druhou stranu jsou tyto trysky schopné velmi vysokých rozstříkových úhlů. Další výhodou těchto trysek je jejich jednoduchá konstrukce a relativně velké dutiny, u kterých nehrozí ucpání nečistotami (obr. 8b).



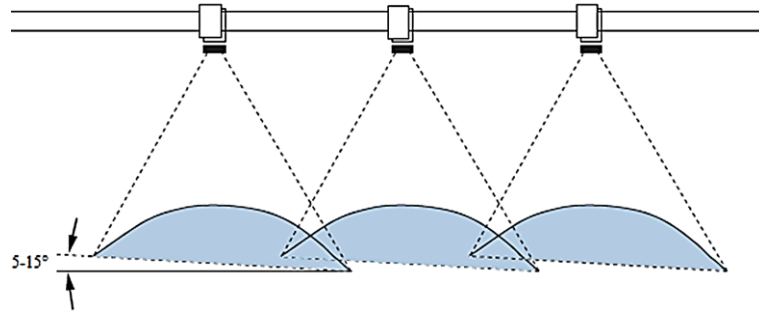
obr. 8: Trysky s plochým rozstříkovým kuželem: a) axiální proudění; b) tangenciální proudění; [25, 26]

Dalším faktorem, jenž definuje jednotlivé trysky, je distribuce kapek vzhledem k pozici v rozstříkovém kuželu. Distribuci kapek lze zjednodušeně rozdělit na dva typy – **rovnoměrnou** a **parabolickou** (obr. 9).



obr. 9: Distribuce kapek: a) parabolická distribuce; b) rovnoměrná distribuce při axiálním proudění; c) rovnoměrná distribuce při tangenciálním proudění; [15]

V závislosti na konstrukci trysky lze dosáhnout jak rovnoměrné, tak parabolické distribuce. Při návrhu vodních clon jsou však častěji instalovány trysky s parabolickým rozdělením. Parabolu si v tomto případě lze představit jako spojnici bodů, jež jsou tvořeny histogramem vodních sloupců v daném místě. V případě vodních clon toto rozdělení není považováno za nevýhodné, neboť clony jsou navrženy tak, aby se jednotlivé výstřikové diagramy překrývaly (obr. 10).



obr. 10: Princip překrytí plochých proudů při parabolické distribuce; [27]

### 2.2.6 Rychlost a pohyb kapek

Na pohybu kapek se podílí několik vnějších sil. Největší vliv na dráhu a směr kapky má síla gravitační a třecí. Z Newtonova druhého pohybového zákona lze analyticky zjistit sílu působící na jednu kapku. Pro analytické řešení je potřeba několik zjednodušujících předpokladů – zejména zanedbání sil, jež nemají větší vliv na pohyb kapek. Rovnice odvozena pro jednu kapku ve vodním spreji má tvar:

$$\bar{F} = \frac{d}{dt}(m \cdot \bar{g}) = m \cdot \bar{g} - C_D \cdot \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \rho_l}{8} \cdot (\bar{v} - \bar{v}_l) \cdot |\bar{v} - \bar{v}_l| \quad (4)$$

Kde:  $\bar{F}$  – výsledná síla působící na kapku [N]

$m$  – hmotnost kapky, viz rovnici (5) [kg]

$\bar{v}$  – vektorová rychlost kapky [m/s]

$\bar{v}_l$  – vektorová rychlost okolního vzduchu [m/s]

$\bar{g}$  – gravitační zrychlení [m/s<sup>2</sup>]

$C_D$  – součinitel odporu vzduchu – souvisí s Reynoldsovým číslem kapky

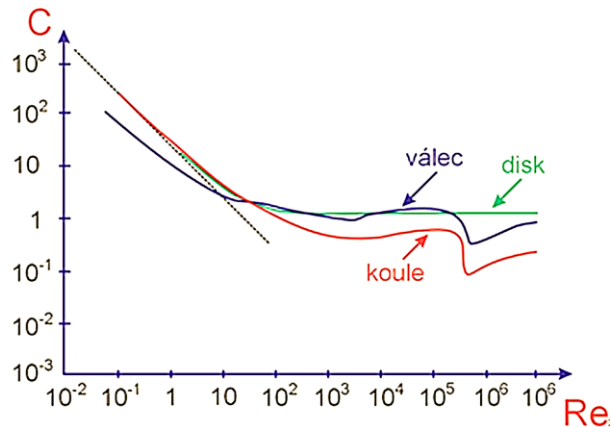
$$m = \rho_w \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{6} \quad (5)$$

Kde:  $\rho_w$  – hustota vody [kg/m<sup>3</sup>]

$d$  – průměr kapky [m]

Součinitel odporu vzduchu se stanoví v závislosti na Reynoldsově čísle z dat, jež byla naměřena experimentálně. Vztah Reynoldsova čísla a součinitele odporu vzduchu lze vyčíst

z grafu na obr. 11. Vzhledem k třecí síle kapka ztrácí svoji rychlost v průběhu letu. Pokud se výsledná síla rovná nule, lze z pravé strany rovnice (4) zjistit konečnou rychlost kapky<sup>7</sup>.

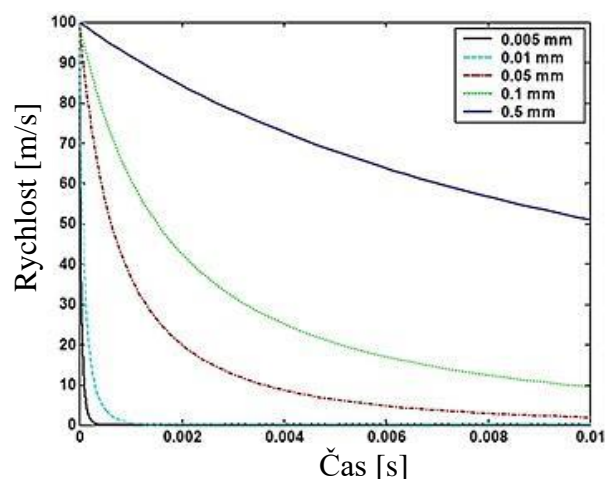


obr. 11: Graf závislosti Reynoldsova čísla na součiniteli odporu vzduchu; [28]

Pokud je Reynoldsovo číslo menší než 1, pak může být součinitel odporu vzduchu spočten na základě Stokesova čísla pomocí následujícího vzorce:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (6)$$

To znamená, že rovnice (4) může být řešena analyticky pro kapky s poloměrem menším než 80  $\mu\text{m}$ . Křivka Stokesova zákona je v grafu na obr. 11 zobrazena tečkovaně. Analytické řešení je vhodné pouze pro případy, kdy se rychlost kapky pohybuje blízko konečné rychlosti. Například pro zónu v blízkosti hubice lze předpokládat rychlost kapky nejvyšší a výpočet odporu pro tuto oblast musí být stanoven experimentálně. Na obr. 12 jsou uvedeny výsledky měření, jež se zabývají porovnáním rychlostí kapek v závislosti na jejich poloměru a čase. Počáteční rychlost je stanovena na 100 m/s a rychlost proudění okolního vzduchu se rovná nule.



obr. 12: Zpomalení kapek s různým průměrem při stanovené počáteční rychlosti; [21]

<sup>7</sup> Nejvyšší rychlost, kterou je schopna kapka dosáhnout při volném pádu vzduchem. Při dosažení této rychlosti se gravitační a třecí síla rovnají a obě směřují opačným směrem. Rychlost kapky tak zůstává konstantní.

Z obr. 12 je patrné, že kapky s menším poloměrem zpomalují velmi rychle. Například kapka s poloměrem 100  $\mu\text{m}$ , typická pro vodní mlhu, zpomalí během 0,01 vteřiny ze 100 m/s na 10 m/s přičemž urazí vzdálenost pouze 0,3 m. Podobný průběh lze očekávat i pro výpočty dle rovnice (4). V rovnici je však zanedbáno odpaření části kapky, v důsledku čehož se zmenší její velikost a změní se součinitel odporu vzduchu. Tyto změny však nemají podstatný vliv na výslednou sílu pohybující kapkou [29].

Kapka ztrácí svou rychlost především kvůli odporu vzduchu. Během zpomalování je okolní vzduch ovlivněn pohybem kapky a v její blízkosti se začne pohybovat stejným směrem. Z širšího pohledu to má za následek nasávání čerstvého vzduchu do rozstříkového kužele. Dochází tak ke vzniku proudění v blízkosti vodního kužele, což zvyšuje dolet kapek. Pro rychlost proudění vzduchu ve rozstříkovém kuželi byl odvozen vzorec [21]:

$$v_l = \frac{\sqrt{m_w \cdot p^{0,5}}}{r} \quad (7)$$

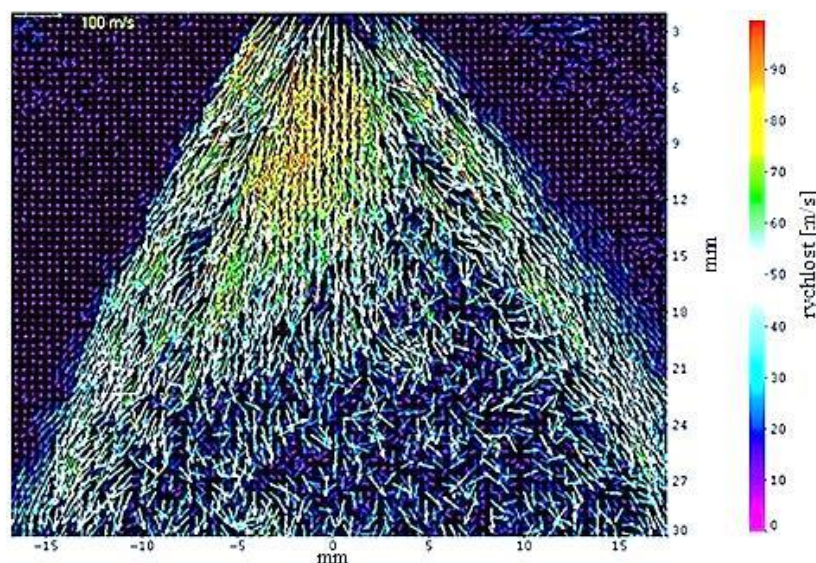
Kde:

$m_w$  – hmotnostní průtok vody [l/s]

$p$  – tlak na trysce [bar]

$r$  – poloměr [m]

Výpočet doletu kapek pro situaci, kdy není zanedbán vliv proudění okolního vzduchu, se více blíží reálnému modelu. Pro zjištění pohybu a rychlosti kapek je nejpresnější měření **metodou PIV** (*Particle Induced Velocimetry*). Princip této metody spočívá v odebrání dvou snímků v krátkém časovém intervalu pomocí laseru. Výsledkem je tak zjištění polohy, směru vektorové rychlosti a její velikosti. Výsledek experimentu provedeného touto metodou je zobrazen na obr. 13.



obr. 13: Měření rychlosti kapek metodou PIV; [21]

Jedná se o měření dutého rozstříkového kužele při tlaku 80 bar a poloměru dutiny na konci hlavice 0,8 mm. Z obr. 13 lze vyčíst, že ve vzdálenosti 0,3 m ve svislém směru od hlavice mají kapky rychlost okolo 10-30 m/s. Jejich směr je patrný pouze v krajích rozstříkového kužele, zatímco uvnitř kužele se kapky pohybují všemi směry v závislosti na okolních podmínkách v daném místě.

### 2.3 Tepelný tok v interakci s vodní clonou

Pro popsání chování vodní clony při účincích tepelného toku hraje zásadní roli velikost jednotlivých kapek. Geometrické veličiny (plocha, objem, poloměr ad.) ovlivňují dolet a životnost kapky. Z hlediska účinků odebrání tepla lze kapky rozdělit do několika kategorií. Dle provedených experimentů lze obecně říci, že kapky o průměru menším než 0,3 mm jsou dostatečně malé, aby se snadno odpařily v horké vrstvě zplodin hoření a zároveň mají dostatečnou hmotnost k tomu, aby nebyly odváděny prouděním vzduchu [30]. Kapky o průměru větším než 1 mm se při průchodu zplodinami hoření nedokáží dostatečně odpařit. Tyto kapky se pak přímo podílí na ochlazování konstrukcí případně hašení požáru.

Podrobněji lze řešit životnost a dolet kapek při dané teplotě. Závislost průměru kapky a teploty okolního prostředí je zobrazena v tab. 6. Je patrné, že kapky při letu ztrácejí svoji hybnost a čím je jejich poloměr menší, tím méně dokáží pronikat prostředím se zvýšenou teplotou.

tab. 6: Dolet kapky v závislosti na jejím průměru a okolní teplotě; [31]

$T_g$ [°C]	Průměr kapky $D$ [ $\mu\text{m}$ ]					
-	1	10	50	100	500	1000
400	1,5 pm	15 nm	9,1 $\mu\text{m}$	146 $\mu\text{m}$	2,5 m	9,9 m
600	0,88 pm	9 nm	5,5 $\mu\text{m}$	87 $\mu\text{m}$	1,5 m	6,0 m
800	0,63 pm	6 nm	3,9 $\mu\text{m}$	63 $\mu\text{m}$	1,1 m	4,3 m
1000	0,49 pm	5 nm	3,0 $\mu\text{m}$	49 $\mu\text{m}$	0,8 m	3,3 m

Kapky odebrávají teplo z okolního prostředí prostřednictvím svého povrchu a pro rychlost odpařování kapky je tak určující povrchová plocha jednotlivých kapek. **Přestože při návrhu vodní clony je výstupním údajem potřebná intenzita dodávky vody, pro účinnost vodní clony je určující velikost jednotlivých kapek.** Při daném objemu vody pro vodní clonu pak lze jednoduchými matematickými vzorci dopočítat povrchovou plochu kapek, pokud známe jejich průměr.

Přestože data v tab. 6 jsou určena přesně pro jednotlivé průměry kapek, v praxi je chování rozstříkového kužele nutno popisovat komplexně. V kuželu se nachází kapky o různých průměrech v odlišných částech kužele v závislosti na jejich distribuci. Z toho vyplývá, že při reálném či matematickém modelování je nutno zaměřit se na vstupní data pro výstřikové charakteristiky sprejových hubic.



Patrně nejčastěji používanou charakteristikou trysky je tlak, který je na tuto trysku vyvíjen. Paradoxně však tlak na trysce nemá větší vliv na životnost kapky při působení tepelného toku. Čím vyšší je tlak na trysce, tím vyšší je počáteční rychlost kapek a jejich velikost se zpravidla zmenšuje. V tab. 7 je uvedeno porovnání volně padajících kapek s kapkami o počáteční rychlosti 100 m/s.

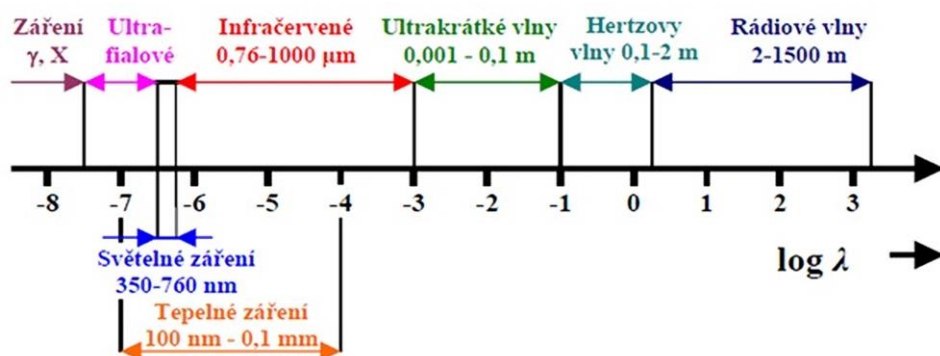
tab. 7: Životnost kapek v závislosti na jejich průměru a počáteční rychlosti; [21]

Průměr kapky [ $\mu\text{m}$ ]	Životnost kapky, $v_0 = 0 \text{ m/s}$	Životnost kapky, $v_0 = 100 \text{ m/s}$
5	3,9 ms	3,9 ms
10	15,6 ms	15,5 ms
50	391,2 ms	372,0 ms
100	1564,8 ms	1400,0 ms

Měření životnosti kapek je provedeno při teplotě okolního prostředí 150 °C. Rozdíly mezi životností kapek s rozdílnou počáteční rychlostí jsou nepatrné při jakémkoliv průměru kapky. Z měření tak vyplývá, že počáteční rychlost (tlak na trysce) nemá podstatný vliv na rychlost odpařování kapek.

### 2.3.1 Sálání tepla – radiace

Sálání (tepelné záření) je přenos tepelné energie při jakékoli vlnové délce. Obecně lze říci, že každá plocha s danými povrchovými vlastnostmi a teplotou vyzařuje tepelné záření. Sálání probíhá mezi všemi povrchy bez nutnosti přítomnosti látkového prostředí pro přenos energie. Oblast elektromagnetického spektra, kterou se požární bezpečnost zabývá, lze omezit na rozsah vlnové délky  $\lambda$  od **0,1  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$**  (obr. 14). V daném rozhraní elektromagnetického spektra hrají zásadní roli molekuly vody a oxidu uhličitého vzhledem ke svým absorpčním a vyzařovacím schopnostem.



obr. 14: Elektromagnetické spektrum; [32]

Z hlediska vyzařování radiace z kužele požáru hrají zásadní roli pevné částice ve zplodinách hoření. Například materiály na bázi ropy uvolňují při hoření uhlovodíkové plyny,

kteří značně absorbují tepelné záření z plamenů. U většiny požárů pak tepelné záření z pevných částic ve zplodinách hoření převládá nad vyzařováním tepelného záření z plamenů [33].

Přenos tepla zářením je popsán několika fyzikálními zákony. Mezi základní patří **Planckův vyzařovací zákon**, **Wienův posunovací zákon**, **Stefan-Boltzmannův zákon** a **Kirchhoffovy zákony**. Všechny zákony pracují s pojmem hustota záření (zářivost)  $E$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. Při úplné přeměně energie záření na teplo pak můžeme tento pojem zaměnit za hustotu tepelného toku. Tepelným zářením se lze zabývat z pohledu termodynamiky záření a kvantové mechaniky.

Pro definici Planckova vyzařovacího zákona je nutno znát pojem absolutně černé těleso<sup>8</sup>, pro které zákon stanovuje spektrální hustotu zářivého toku  $E_\lambda$  [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]. Zákon definuje množství energie připadající na jednotkový interval dané vlnové délky a lze zapsat následovně [34]:

$$E_\lambda = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{\pi}{\left(\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1\right)} \quad (8)$$

Kde:

$h$  – Planckova konstanta  $6,6256 \cdot 10^{-34}$  [ $\text{J}\cdot\text{s}$ ]

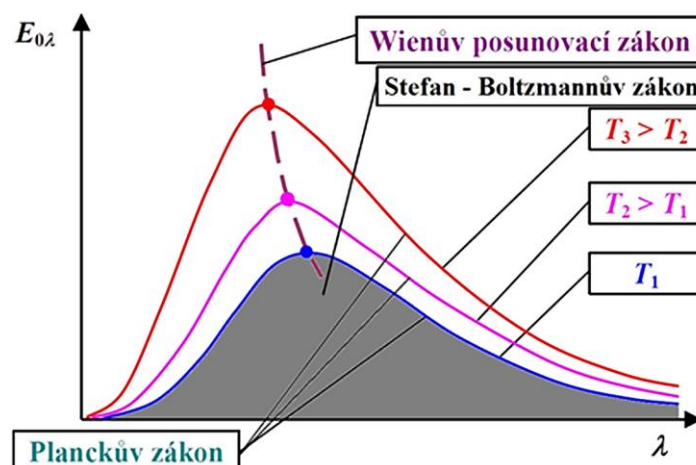
$c$  – rychlost šíření záření v daném prostředí [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$\lambda$  – vlnová délka [ $\text{m}$ ]

$k$  – Boltzmannova konstanta  $1,3806 \cdot 10^{-23}$  [ $\text{J}/\text{K}$ ]

$T$  – teplota [ $\text{K}$ ]

Znázornění vyzařování absolutně černého tělesa lze vyjádřit závislostí na vlnové délce při různých teplotách (obr. 15). Obecně lze konstatovat, že pro nižší frekvence roste hustota záření s druhou mocninou, pro vyšší frekvence pak exponenciálně klesá. Izotermy v grafu jsou tak vždy nejdříve stoupající a poté klesající, čímž je dáno maximum vždy pro danou teplotu. Spojnicí nejvyšších bodů jednotlivých izoterm vznikne křivka, jež popisuje Wienův posunovací zákon.



<sup>8</sup> Absolutně černé těleso je ideální těleso, které pohlcuje veškeré záření všech vlnových délek (ideální absorbér). Současně je také ideální zářič, neboť dokáže vyzařovat největší možné množství zářivé energie při dané teplotě.

obr. 15: Grafické znázornění vybraných zákonů popisujících sdílení tepla radiací; [32]

Pro Wienův posunovací zákon platí, že maximální hodnota spektrální hustoty záření se s rostoucí teplotou posouvá ke kratším vlnovým délkám[32]:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (9)$$

Kde:

$\lambda_{max}$  – vlnová délka maxima spektrální hustoty vyzařování [m]

$b$  – Wienova konstanta 2,898 [mm · K]

Hustotu tepelného toku lze v neposlední řadě vyjádřit také Stefan-Boltzmannovým zákonem. Matematicky lze Stefan-Boltzmannův zákon uvažovat jako integrál pod izotermou danou Planckovým zákonem (obr. 15). Jeho zjednodušený zápis může vypadat takto:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (10)$$

Kde:

$\sigma$  – Stefan-Boltzmannova konstanta  $5,6697 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>]

Zpravidla se pro přesnost do rovnice zavádí několik faktorů, jež ovlivňují výslednou hustotu záření. Nejčastěji se jedná o emisivitu sálajícího povrchu  $\varepsilon$  [–]. Emisivita povrchu nabývá hodnot od 0 do 1. U absolutně černých těles lze uvažovat emisivitu sálajícího povrchu 1. V praxi se zpravidla užívá také hodnota  $\varepsilon = 1$  především z důvodu návrhu na straně bezpečné.

Z hlediska sdílení tepelné energie zářením lze rozlišit tři jevy, jež se na dopadajícím povrchu odehrávají. Jedná se o pohlcování (absorpce), odraz (reflektance) či průchod (transmitance) zářivého toku tělesem. Těmito způsoby se musí rozdělit veškerá energie dopadající na povrch, aby byla zachována energetická rovnováha. Z hlediska energetické bilance lze zapsat tvar 1. Kirchhofova zákona:

$$a + r + t = 1 \quad (11)$$

Kde:

$a$  – absorpce [–]

$r$  – reflektance [–]

$t$  – transmitance [–]

U pevných neprůhledných látek lze uvažovat nulovou hodnotu transmitance. Naopak u dvouatomových plynů lze uvažovat hodnotu transmitance  $t = 1$ . U víceatomových plynů (vodní pára, CO<sub>2</sub>...) pak je nutno posuzovat jednotlivé složky podrobněji. Z hlediska působení tepelného záření na vodní kapky hraje správné určení jednotlivých složek významnou roli.

### 2.3.2 Metody měření tepelného toku

Při laboratorních zkouškách se nejčastěji používají vodou chlazené snímače tepelného toku – radiometry, jež jsou zpravidla vybaveny černým absorberem. Radiometry měří celkový tepelný tok – tedy radiační i konvekční složku. Princip radiometru spočívá v absorpci dopadajícího tepelného toku, jenž je přeměněn na teplo proudící do těla radiometru a generování výstupního signálu jako změnu elektrického napětí. Tělo radiometru je chlazeno cirkulující vodou tak, aby bylo zabráněno přehřívání a byla udržena referenční úroveň prostředí pro daný okamžik [35].

Pro měření tepelného toku při průchodu vodní clonou hraje pozice radiometrů podstatnou roli pro přesnost výsledků. Radiometr musí být umístěn tak, aby dopadající tepelný tok procházel skrz vodní clonu (nikoliv okolo) a zároveň aby povrch radiometru nebyl vodní clonou ochlazován. Pro zpřesnění výsledků je možné zmenšit zorné pole absorberu. Absorbér pohlcuje veškerý tepelný tok od všech povrchů v daném prostoru. Zorné pole absorberu by mělo být zaměřeno v ideálním případě pouze na zdroj tepelné energie (sálavý panel, plameny hořáku apod.). V praxi může být toho efektu dosaženo například osazením radiometru do hliníkové konstrukce, jež bude přesahovat vnější líc radiometru a zúží jeho zorné pole. Použití hliníku je vhodné zejména s ohledem na emisivitu materiálu  $\varepsilon = 0,05 - 0,07$ . [36]

Pro správnost měření tepelného toku, je vhodné provést sérii referenčních měření se zdrojem o známém tepelném výkonu. Po ověření výsledků po těchto měřeních mohou být provedena měření, kdy jsou hodnoty tepelného toku neznámé – například při aktivované vodní cloně.

## 2.4 Optické a tepelné vlastnosti vodní clony

Pro rozbor chování vodní clony při účincích tepelného toku je nutno řešit jak působení tepelného toku, tak optické vlastnosti vodního kužele. Nejjednodušším způsobem pro výpočet transportu tepelné energie je použití **Lambert-Beerova zákona**, který určuje míru absorpce záření při průchodu látkou (v případě vodní clony kapkou) pro danou vlnovou délku. Velikost absorpce lze vyjádřit takto [37]:

$$a = \varepsilon_{\lambda} \cdot l \cdot C \quad (12)$$

Kde:

$\varepsilon_{\lambda}$  – molární absorpční koeficient [ $l/mol \cdot cm$ ]

$C$  – molární koncentrace roztoku [ $mol/l$ ]

$l$  – tloušťka vrstvy (průměr kapky) [ $cm$ ]

V některých studiích jsou zkoumány optické vlastnosti vodních kapek, tak aby byla zjištěna optimální velikost vodní kapky pro útlum radiačního záření. V rozsahu  $1 \mu m$  až  $10 \mu m$  průměru kapky je útlum tepelného toku největší, pokud se průměr kapky rovná vlnové délce

působícího záření [38]. I přes znalost výsledků útlumu tepelného toku pro různé poloměry kapek se nelze v reálném případě na tyto hodnoty spolehnout, neboť při reálném požáru je radiace vyzařována v různých vlnových délkách a také kapky ve vodním kuželu mají různé průměry. Pro reálné chování vodní clony při účincích požáru se používají sofistikovanější metody.

Základním mechanismem útlumu tepelného toku vodní clonou je absorpce pomocí kapek a plynných par (zejména CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) a rozptyl tepelného záření uvnitř jednotlivých kapek. Předpokladem pro popis chování vodní clony je uvažování sdílení radiálního tepla v semitransparentním (poloprůhledném) prostředí, tj. uvažování všech tří složek uvedených v 1. Kirchhoffově zákoně. Působením radiálního tepla na kapky se zabývají požární zkoušky, matematické modelace nebo zjednodušené výpočty. Pro komplexní řešení chování radiace v semitransparentním materiálu musí být řešena tzv. **rovnice přenosu záření** (*radiative transfer equation – RTE*). Obecný zápis rovnice pro prostředí, ve kterém dochází k absorpci, emisi a rozptylu, má tvar<sup>9</sup> [39]:

$$\underbrace{s \cdot \nabla I_\lambda(x, s)}_{\substack{\text{změna} \\ \text{intenzity} \\ \text{paprsku v} \\ \text{délce}}} = \underbrace{-\kappa(x, \lambda) I_\lambda(x, s)}_{\substack{\text{pohlčená} \\ \text{intenzita} \\ \text{(absorpce)}}} - \underbrace{\sigma_s(x, \lambda) I_\lambda(x, s)}_{\substack{\text{rozptýlená} \\ \text{intenzita do} \\ \text{okolí} \\ \text{(rozptyl)}}} + \underbrace{B(x, \lambda)}_{\substack{\text{emitovaná} \\ \text{intenzita} \\ \text{(emise)}}} + \underbrace{\frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s' s) I_\lambda(x, s') ds'}_{\substack{\text{rozptýlená intenzita z} \\ \text{okolí}}}$$
 (13)

Kde:

$s$  – směrový vektor

$I_\lambda(x, s)$  – intenzita radiace při dané vlnové délce [ $kW/m^2$ ]

$\kappa(x, \lambda)$  – koeficient absorpce

$\sigma_s(x, s)$  – koeficient rozptylu

$B(x, s)$  – celkové emitované záření z okolních zdrojů

$\Phi(s, s')$  – cyklická funkce na dané oblasti

Pro zjednodušené (v praxi nereálné) situace lze tuto rovnici řešit přímo analytickým výpočtem. Pro modely, ve kterých se neuvažuje s rozptylem záření, lze využít Lambert-Beerův zákon. Zjednodušené modely založené jsou zpravidla založené na Maxwellových rovnicích<sup>10</sup>. Mezi tyto modely patří například tzv. *two-flux model*.

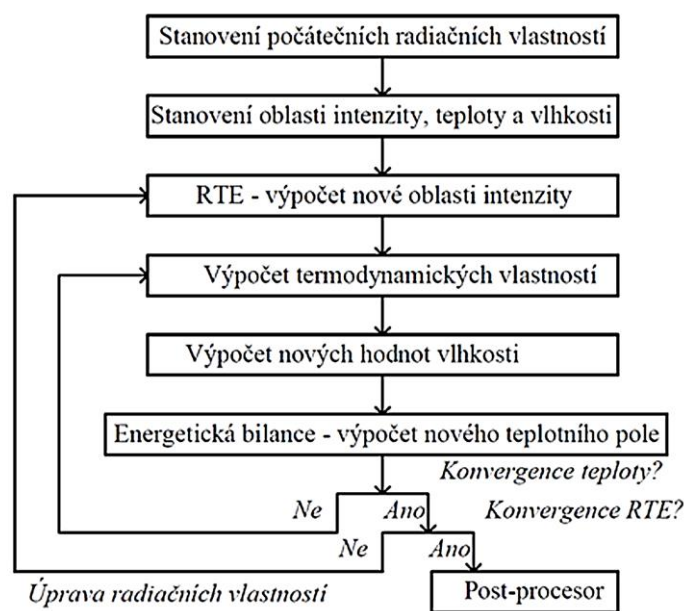
Ve většině praktických příkladů však zjednodušení rovnice není možné. Pro řešení je nutno určit okrajové podmínky, jež závisí na geometrii objektu a trojrozměrném šíření záření. Při výpočtu musí být brány v úvahu všechny úhly, kterými může záření na povrch objektu dopadat.

<sup>9</sup>Operátor  $\nabla$  vyjadřuje parciální derivaci podle souřadných os – v kartézském souřadném systému tedy podle os  $x, y, z$ .

<sup>10</sup>Základní rovnice popisující chování elektromagnetického pole v daném bodě nebo oblasti.

Změna intenzity záření je na počátku výpočtu neznámá a radiační vlastnosti povrchu lze stanovit až po jejich počátečním odhadu a následném výpočtu pro dostatečně velký počet paprsků záření. Tento postup umožní zlepšení odhadů okrajových podmínek a zároveň zpřesnění řešení integrálu řešícího rozptýlenou intenzitu z okolí (*in-scattering integral*), viz vztah (13).

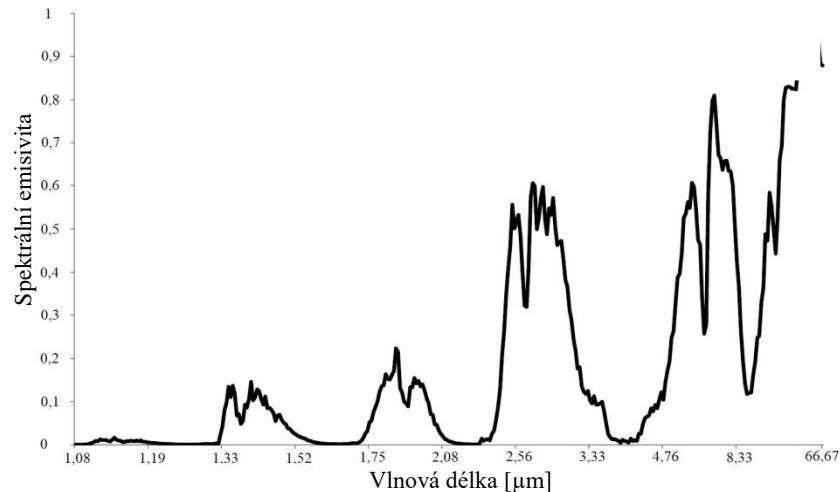
Neznámé veličiny potřebné pro výpočet rovnic sdílení tepla při požáru jsou teplota a radiační vlastnosti závislé na složení zplodin hoření. Při každé smyčce se aktualizují vlastnosti plynné fáze, přičemž se berou v úvahu skutečné frakce objemu  $H_2O$  a  $CO_2$ . Radiační vlastnosti daného požáru by měly být stanoveny na základě koncentrací jednotlivých druhů zplodin hoření v plynné fázi. Díky této vazbě teplotních a radiačních vlastností média vyžaduje řešení RTE vnější smyčku iterací, která se provádí, dokud řešení nevyhovuje všem rovnicím tepelného toku a RTE. Popis procesu výpočtu je zobrazen na obr. 16 [40, 41].



obr. 16: Schéma výpočetního postupu; [41]

Nakonec jsou radiační vlastnosti zplodin hoření závislé na vlnové délce záření a pro přesné simulace je nutné provádět spektrálně vyřešené výpočty radiace<sup>11</sup> nebo modelovat vliv závislosti vlnové délky. Výsledky těchto metod pak lze publikovat jako grafy emisivity nebo absorpce v závislosti na vlnové délce. Příkladem může být graf na obr. 17, založený na experimentálně změřených datech. Na grafu je měřena spektrální emisivita plamenů vodíkového hořáku. V práci [40] je posouzen vztah mezi naměřenou spektrální emisivitou a celkovou radiací vyzářenou z plamenů hořáku. “Kolísavý” charakter grafu je promítnut i do grafu celkové vyzářené radiace. Emisivita zplodin hoření je tak podstatným faktorem pro určení celkové radiace z požáru.

<sup>11</sup> Výpočty se zabývá obor spektrometrie (spektroskopie). V požární bezpečnosti pak zejména infračervená spektrometrie. Tato technika zkoumá absorpční a emisní vlastnosti jednotlivých vzorků materiálů.



obr. 17: Spektrální emisivita vodíkového hořáku v závislosti na vlnové délce; [40]

Při hoření dochází k oxidaci paliva na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Tyto tříatomové plyny jsou hlavním zdrojem tepelného záření u nesvítivých plamenů, naopak dvouatomové plyny  $\text{N}_2$  a  $\text{O}_2$  jsou pro tepelné záření značně transparentní. Pokud jsou ve zplodinách hoření obsaženy pevné částice (saze), pak je vyzařováno i viditelné světlo. Množství kyslíku pro úplnou oxidaci  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  udává tzv. stochiometrický poměr [42].

Algoritmy pro výpočet intenzity záření fungují jako funkce polohy ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) v úhlovém směru ( $\theta$ ,  $\varphi$ ) a v nejpřesnějších modelech také jako funkce vlnové délky. V průběhu let byla vyvinuta celá řada metod řešení radiačního přenosu tepla. Metody zpravidla zahrnují různé analytické aproximační postupy a soubory numerických metod. Aktuálně jsou zpravidla používány tyto čtyři radiační algoritmy<sup>12</sup>:

- Monte Carlo Method – MCM [43],
- Discrete Transfer Method – DTM [44],
- Discrete Ordinate Method – DOM [45–48] ,
- Finite Volume Method – FVM [49–51].

Každá z těchto metod má jiný přístup k úhlové závislosti a prostorové změny intenzity záření. Metody Monte Carlo a DTM jsou založené na sledování jednotlivých paprsků. Poslední dvě metody pak používají numerickou diskretizaci (dělení) distančních a směrových integrálů. U těchto metod tak není zřejmé spojení se sledováním paprsků [52].

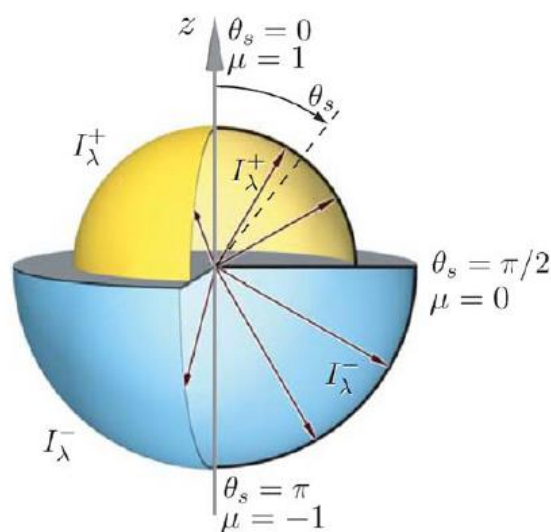
<sup>12</sup> Názvy jsou uvedeny pouze v anglickém jazyce, neboť se české ekvivalenty v odborné literatuře zpravidla nepoužívají.

### 2.4.1 Two-flux model

Two-flux model je zjednodušeným modelem pro výpočet rozptylu a absorpce tepelného záření. Oproti Lambert-Beerovu zákonu je model zpřesněn především díky uvažování závislosti rozptylu na vlnové délce a řešení rozptýlené intenzity záření z okolí.

Tepelné záření absorbované jednotlivými kapkami závisí na spektrálním obsahu a intenzitě dopadajícího záření a na absorpci jednotlivých kapek. Cílem modelování je simulování spektrálního záření tak, jak je rozptýleno a absorbováno po celé cestě od zdroje ke kapce. Pro kapky v rozmezí desítek až stovek mikronů [ $\mu\text{m}$ ] může být rozptyl významný a neizotropní<sup>13</sup>. Lambert-Beerův zákon má v tomto ohledu tendenci nadhodnocovat celkový útlum vodní clonou – zejména s rostoucí délkou dráhy, kterou musí paprsky urazit.

Záření probíhá podél určitého paprsku skrz prostředí, ve kterém může být částečně absorbováno nebo rozptýleno do jiného směru. Zároveň může radiace rozptýlená z jednoho směru přispět k radiaci v jiném směru (*in-scattering*). Právě tento proces rozptýlení způsobuje hlavní potíže při řešení problému přenosu radiace. Two-flux model je založen na předpokladu, že intenzita záření v libovolném bodě je vyzařována rovnoměrně přes přední a zadní hemisféru (obr. 18).



obr. 18: Schéma intenzity vyzařování při použití two-flux modelu; [53]

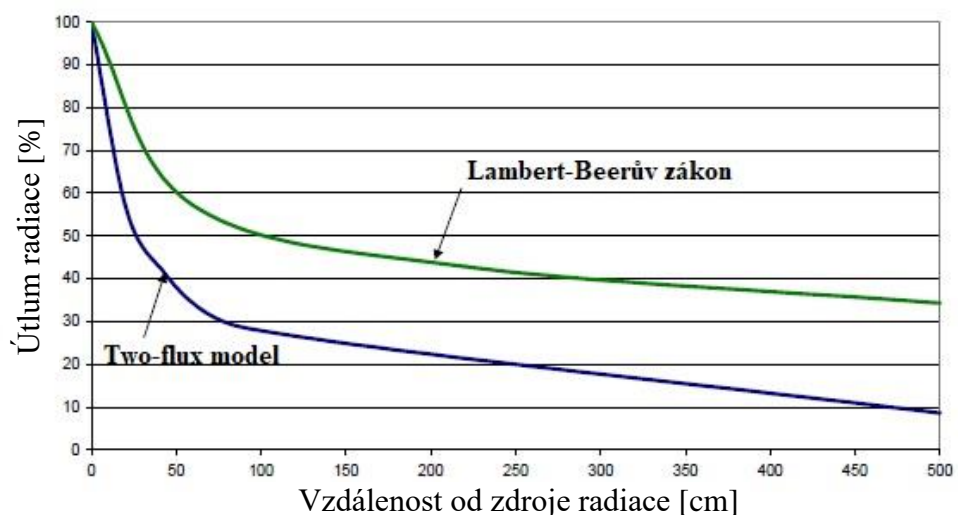
Při řešení rovnice RTE se uvažuje intenzita záření jako závislá na vlnové délce. Pro two-flux model se zpravidla užívají azimutální a polární souřadnice pro zjednodušení řešení rovnice. V tomto případě je (v souvislosti s obr. 18) stanovena hodnota  $\mu = \cos(\theta_s)$ . V tomto modelu jsou řešeny jednotlivé hemisféry samostatnými rovnicemi, přičemž se liší pouze okrajovými podmínkami. Zároveň je stanovena funkce, jež určuje část paprsků, které jsou vyzářeny z jedné hemisféry do druhé.

<sup>13</sup> Izotropie popisuje vlastnosti, které jsou ve všech směrech stejné.



Při modelování chování kapek při útlumu tepelného záření pomocí Lambert-Beerova zákona bylo zjištěno, že maximálního útlumu je dosaženo, když poloměr kapky je roven vlnové délce [36]. Při modelování pomocí two-flux modelu bylo dosaženo podobných výsledků, nicméně při uvažování kapek s průměrem mezi 15 až 200  $\mu\text{m}$ , jsou menší kapky při snižování přenosu tepla zářením účinnější. Dle měření [53] bylo zjištěno, že větší vliv na útlum tepelného toku má hmotnostní průtok vody, než velikost kapek.

Jak je uvedeno výše, rozdíl mezi two-flux modelem a Lambert-Beerovým zákonem je především v uvažování rozptylu z okolí. Rozptyl zvyšuje proces útlumu tepelného toku, neboť přerozděluje záření ve všech směrech a tím zvyšuje pravděpodobnost, že tepelný tok bude absorbován. Médium, které rozptyluje a absorbuje, účinněji snižuje záření, než pouze absorbující médium (pokud je absorpce stejná). Na obr. 19 je zobrazeno porovnání útlumu radiačního záření pomocí Lambert-Beerova zákona a two-flux modelu. Útlum radiace způsobený rozptylem se rovná rozdílu křivek v daném místě. Graf na obr. 19 je uvažován pro zdroj o teplotě 2100 K, přirozeném tlaku okolního prostředí a velikosti kapek 15  $\mu\text{m}$ .



obr. 19: Porovnání Lambert-Beerova zákona a two-flux modelu; [53]

Pro menší kapky je typický více izotropní rozptyl, neboť větší množství paprsků je rozptýleno z původního směru. Čím jsou tedy kapky menší, tím více nepřesný je Lambert-Beerův zákon.

## 2.4.2 Monte Carlo Method – MCM

Výpočet radiačního tepla pomocí metody Monte Carlo spočívá v uvolnění statisticky velkého množství energetických svazků a sledováním jejich postupu z vyzařovaných bodů skrz prostředí (médium). Tato metoda je založena na sledování paprsků (*Ray-Tracing Method*). Metoda nemusí být závislá na souřadnicovém systému a je tedy použitelná pro libovolně tvarované a složité konfigurace. Energie jednotlivého svazku je vyjádřena jako celková emise dané oblasti

(vyzařovací dílčí plochy) dělená počtem svazků uvolněných z této oblasti. V závislosti na prostředí může každý svazek získat nebo ztrácet energii po své cestě.

Svazek záření nakonec narazí na povrch, jehož vlastnosti je nutné zjistit. Na dopadajícím povrchu se mohou odehrávat všechny možnosti přenosu radiace. Metoda Monte Carlo je založena na pravděpodobnostním rozdělení těchto veličin:

- místo a směr emise energetických svazků,
- frakce emise, absorpce a rozptylu v prostředí a na dopadajícím povrchu.

Na počátku výpočtu jsou stanoveny hodnoty  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ , jež určují pozici emitujícího zdroje. Pro dvourozměrný obdélníkový povrch (dílčí plocha) může být pozice na ploše určena podle [52]:

$$x = x_0 + R_x \Delta x \quad (14)$$

$$y = y_0 + R_y \Delta y \quad (15)$$

Kde:

$x_0, y_0$  – souřadnice vrcholu dílčí plochy

$\Delta x, \Delta y$  – rozměry dílčí plochy měřené od  $x_0, y_0$

$R_x, R_y$  – náhodné veličiny nabývající hodnot od 0 do 1

Pro výpočet se zpravidla používají polární nebo azimutální souřadnice. Na základě absorpčního koeficientu a délky paprsků záření, jež musí urazit, se spočte celková vyzářená energie a absorbovaná energie na dopadající ploše. Při dopadu na povrch je nutno stanovit součinitel pohltivosti povrchu. Na základě pravděpodobnosti je stanovena hodnota  $R_\alpha$  v rozsahu od 0 do 1. Pokud je hodnota  $R_\alpha$  větší než součinitel pohltivosti povrchu, pak je paprsek pohlcen. V opačném případě je paprsek odražen [34, 52].

Metoda Monte Carlo má široké využití v CFD simulacích. Metoda poskytuje kvantitativní řešení a zároveň udává odhady chyb spojených s řešením. Proto často bývá udávána jako referenční k jiným metodám. Její použití je možné ve všech úrovních složitosti (složitá geometrie, rozptylové prostředí, plynové spektrální vlastnosti ad.). Nevýhodou této metody je její složitost a nároky na software. Aktuálním tématem v této oblasti je snížení výpočetního času, tak aby se použití této metody mohlo vyrovnat ostatním [54].

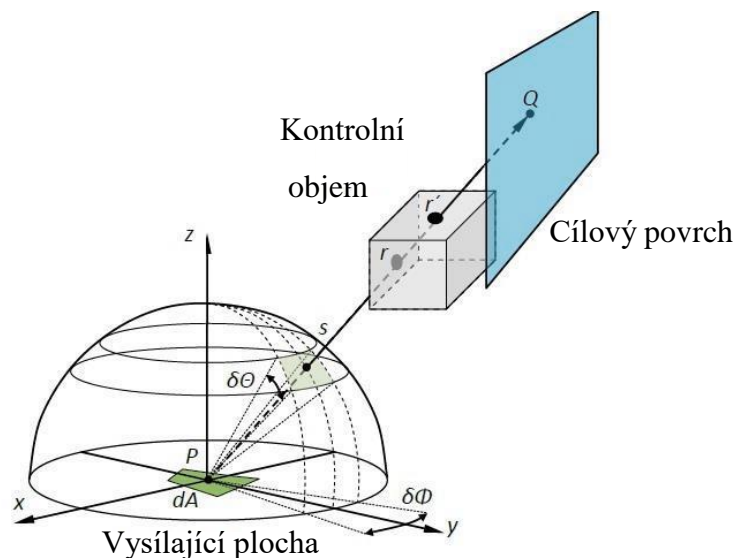
### 2.4.3 Discrete Transfer Method – DTM

Metoda DTM je podobně jako metoda MCM založena na sledování paprsků. Rozdílem je především uvažování vysílání paprsků z hemisféry, nikoliv kolmo k povrchu. Předpokládá se, že paprsky, jež jsou vysílány z povrchu ve specifickém rozsahu úhlů, lze sloučit do jednoho paprsku. Metoda je tak méně náročná na výpočet a její použití v CFD modelech je praktičtější. Výhoda použití je především v nastavení přesnosti výpočtu. Čím menší je rozsah úhlů, tím více je sledovaných paprsků, výpočetní čas se prodlužuje a přesnost zvyšuje [55].

Princip metody spočívá v rozdělení hemisféry v závislosti na zvoleném počtu paprsků  $N_\Theta$  v horizontálním a  $N_\Phi$  ve vertikálním směru od středu polokoule. Stanovením úhlů  $\Theta$  a  $\Phi$  se povrch polokoule rozdělí na daný počet výpočetních ploch. Středem každé plochy prochází sledovaná paprsky tepelného záření (obr. 20). Paprsek během cesty narazí na několik výpočetních objemů, přičemž v každém z nich je vypočten příspěvek daného média. Vliv výpočetního objemu závisí na optické tloušťce daného prostředí. Průměrná intenzita záření se pak uvažuje jako aritmetický průměr vstupní a výstupní intenzity pro každý výpočetní objem.

Zdroj záření (plocha na povrchu polokoule) se předpokládá konstantní na celé dílčí ploše. Tím je podstatně zjednodušen výpočet, nicméně díky tomuto zjednodušení nelze popsat anizotropii rozptylu.

Výpočet spočívá ve vyhodnocení počátečního tepelného toku  $q_+$  na povrchu a stanovení celkového dopadového tepelného toku  $q$  součtem příspěvků přes všechny pevné úhly. Hodnota  $q$  se dopočítává zpětně, směrem k počátku záření. Vzhledem k tomu, že hodnoty  $q_+$  a  $q$  jsou na sobě závislé, je nutno použít iterační přístup [52].



obr. 20: Princip výpočtu pomocí metody DTM; [34]

Útlum intenzity paprsku je závislý na délce prostupu kontrolním objemem a koeficientu absorpce. Útlum intenzity je počítán pro každý výpočetní objem následovně [34]:

$$I_{n+1} = I_n \cdot e^{-\beta \cdot L_k} \quad (16)$$

Kde:

$I_n$  – intenzita paprsku před vstupem do kontrolního objemu

$I_{n+1}$  – intenzita paprsku za kontrolním objemem

$B$  – koeficient absorpce

$L_k$  – délka dráhy paprsku skrz kontrolní objem

Provedenými studiemi bylo prokázáno, že výpočet pomocí metody je až 500x rychlejší než použití metody MCM při zanedbání rozptylu a zhruba 10x rychlejší při uvažování rozptylu [52]. Hlavními výhodami metody DTM je zpřesňování výpočtu na základě zvyšování počtu paprsků a aplikace pro prostředí se širokou škálou optických šířek. Nevýhodou je zanedbání odrazů jednotlivých paprsků, neboť všechny povrchy jsou uvažovány jako difúzní<sup>14</sup> [55].

#### 2.4.4 Discrete Ordinate Method – DOM

Metoda DOM řeší rovnici RTE (13) pro daný počet pevných úhlů, přičemž každý z nich má daný směrový vektor  $\vec{s}$  určený pomocí globálního kartézského souřadnicového systému (x,y,z). Přesnost výpočtu závisí obdobně jako u metody DTM na výběru počtu paprsků. Na rozdíl od metody DTM se metoda DOM neaplikuje pomocí sledování paprsků. Namísto toho se rovnice (13) upraví dle intenzity určené prostorovými souřadnicemi (x,y,z). Rovnice RTE je tak diskretizována na tolik rovnic, kolik je zvolených směrů [56].

V prostoru je směrový vektor  $\vec{s}$  dán třemi směrovými kosiny  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\mu$  a velikostí výsledného vektoru<sup>15</sup>. Jemnost výpočtu stanoví hodnota  $S_N$  (např.  $S_2, S_4, S_6, \dots, S_N$ ), přičemž vztah mezi touto hodnotou a celkovým počtem směrů  $n$  je dán vzorcem:

$$n = N \cdot (N + 2) \quad (17)$$

Kde:

$n$  – celkový počet směrů

$N$  – počet směrových kosinů

Čím více je zvoleno směrů, tím přesněji lze popsat působící záření. Příkladem mohou být data v tab. 8.

tab. 8: Souřadnice a váha vektoru pro zpřesnění  $S_2$  a  $S_4$ ; [52]

SN zpřesnění	Souřadnice (směrové kosiny)			Velikost
	$\xi$	$\eta$	$\mu$	
$S_2$ – symetricky	0,5773,	0,5773	0,5773	1,57079
$S_2$ – nesymetricky	0,5000	0,7071	0,5000	1,57079
$S_4$	0,2959	0,2959	0,9082	0,52359
	0,2959	0,9082	0,2959	0,52359
	0,9082	0,2959	0,2959	0,52359

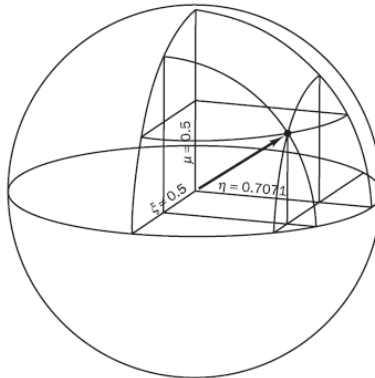
Nejzákladnějším zpřesněním metody DOM je použití  $S_2$ . U této metody stačí použití dvou různých směrových kosinů, aby mohl být určen hlavní směr vektoru. Pro zpřesnění  $S_2$  lze

<sup>14</sup> Difúzní povrch odráží dopadající záření rovnoměrně do všech směrů.

<sup>15</sup> Vektor lze zapsat pomocí jeho velikosti a třech úhlů, které svírá s kladně orientovanými osami vztažného souřadnicového systému. Kosiny těchto úhlů jsou označovány jako směrové kosiny daného vektoru.

dosadit do vzorce (17) za  $N = 2$  a vyjde celkový počet směrů. Pro zpřesnění S2 se tedy používá 8 směrů, podél kterých probíhá výpočet rovnice RTE. Zobrazení hlavního směru pro použití zpřesnění S2 pro nesymetrické souřadnice je zobrazeno na obr. 21.

Princip výpočtu pomocí metody DOM spočívá ve stanovení kvadratické sítě (nejčastěji pravoúhlé ortogonální), přičemž v každém výpočetním elementu (objemu) je určena průměrná intenzita záření pomocí váhového faktoru  $\gamma_{DOM}$ . Váhový faktor se zavádí pro porovnání intenzity na okraji buněk s průměrnou intenzitou objemu prostoru. Výpočet spočívá v řešení lineárních rovnic, kdy se počítá rovnováha intenzity na hranici řešeného prostoru [34].



obr. 21: Geometrie v prostoru při použití metody DOM – zpřesnění S2 – nesymetricky; [52]

Schéma pro výpočet intenzity tepelného záření je zobrazeno na obr. 22. Cílem výpočtu je stanovit intenzitu záření na východní (*East*) a severní (*North*) straně. Pro výpočetní čtverec jsou známy intenzity záření z jižní (*South*) a západní (*West*) strany. Výpočet intenzity záření pro východní a severní stranu výpočetního čtverce je upřesňován takto [52]:

$$\gamma_{DOM} I_E = I_p - (1 - \gamma) I_W \quad (18)$$

$$\gamma_{DOM} I_N = I_p - (1 - \gamma) I_S \quad (19)$$

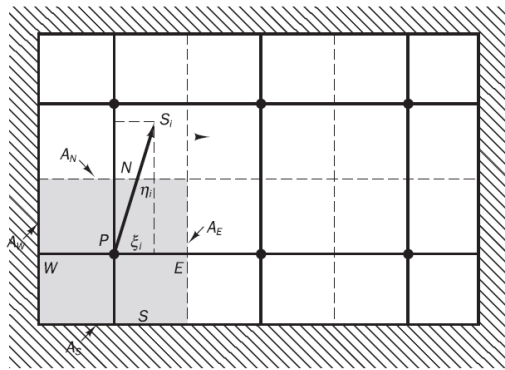
Kde:

$\gamma_{DOM}$  – váhový součinitel nabývající hodnot 0 až 1

$I_p$  – intenzita záření v bodě P [ $kW/m^2$ ]

$I_E, I_N, I_W, I_S$  – intenzita záření v daném směru [ $kW/m^2$ ]

Výpočet se opakuje pro každý výpočetní čtverec směrem od zdroje sálání. Výstupní hodnoty tepelného záření  $I_E$  a  $I_N$  tvoří vstupní okrajové podmínky pro výpočet v dalších čtvercích. Celý postup je nutno iterovat neboť počáteční intenzity jsou vypočteny pomocí povrchových teplot a lze je aktualizovat pouze tehdy, pokud jsou známy všechny vstupní intenzity. Pro výpočet útlumu tepelného toku při prostupu výpočetním čtvercem se zavádí váhový koeficient  $A_i$ , jenž je určen pomocí váhového faktoru  $\gamma$  vždy pro danou osu (x,y). Intenzita záření působící v daném směru (podél osy x nebo y) se přenásobí koeficientem  $A$  příslušné osy a vypočte se výsledná intenzita záření na hranici nebo uprostřed čtverce [52].



obr. 22: Geometrie v rovině při použití metody DOM; [52]

### 2.4.5 Finite Volume Method – FVM

Metoda FVM nebo-li *metoda konečných objemů* je pro řešení radiální složky velmi podobná metodám konečných objemů, které zpravidla řeší problematiku konvekční složky sdílení tepla. S ohledem na řešený příklad v této práci je metoda FVM řešena především ve vztahu k použitému software FDS.

Metoda konečných objemů je založena na rozdělení prostoru na konečný počet malých kontrolních objemů. Veškeré rovnice potřebné popisující spojité prostředí jsou pak diskretizovány do soustavy algebraických rovnic. Geometricky pak síť vypadá stejně jako při použití metody DOM zobrazené na obr. 22.

V oblasti radiace má metoda několik omezení. Prvním problematickým bodem je řešení koeficientu absorpce pro kouř a zplodiny hoření. Koeficient je komplikovanou funkcí ovlivněnou složením plynu, vlnovou délkou záření a teplotou prostředí. Zpravidla je pro výpočty používán zjednodušený spalovací model, který zohledňuje chemické složení kouře (zejména sazí), které ovlivňují absorpci a emisi tepelného záření. Za druhé je přenos tepelného záření diskretizován přibližně přes 100 pevných úhlů. Při větších vzdálenostech od ohniska požáru tak může být rozložení teplot nepřesné. Počet pevných úhlů lze v software FDS manuálně zvětšit, následkem je však prodloužení doby výpočetního času [57]. Použitím této metody se zabývá například studie [58], přičemž mezi nejzajímavější výsledky patří tyto:

- Při nárůstu tvorby sazí z 1 na 2 % dojde ke zvýšení tepelného toku ze simulovaného metanového hořáku zhruba o 15 %.
- Při zanedbání účinků sazí se zářivý tepelný tok sníží o 20 %.
- Pro přesnost měření bylo (v rámci provedené studie) nezbytné zvýšit počet kontrolních úhlů trojnásobně.
- V originálním nastavení je použito šest reprezentativních skupin vlnových délek pro definování tepelného záření. Při navýšení skupin ze šesti na deset dochází k zpřesnění výpočtu, nicméně na výslednou hodnotu tepelného toku nemá tato úprava vliv.
- **Při chybně zadané hodnotě absolutní teploty o 20 % se chyba v měření tepelného toku rovná 100 %.**

Z hlediska radiace platí, že zdroj tepelného záření je funkcí závislou na absorpčním koeficientu, přičemž celý tento výraz je násoben čtvrtou mocninou teploty. Zjednodušeně se jedná o použití Stefan-Boltzmanova zákona v semitransparentním prostředí<sup>16</sup>. To vysvětluje vysokou citlivost výsledného tepelného toku na teplotu a složení sazí.

## 2.4.6 Mieova teorie rozptylu

U všech metod řešících transport radiace pomocí rovnice RTE hraje absorpce a rozptyl prostředí významnou roli. Tepelné záření může být v různé škále rozptýleno po celé délce prostředí, kterou prochází. Z hlediska absorpce a rozptylu se jinak chová vzduch, zplodiny hoření, kouř i vodní kapky. Pro určení koeficientu absorpce a fázové funkce rovnice RTE se používá Mieova teorie rozptylu, jež je funkcí vlnové délky záření.

Použití Mieovy teorie rozptylu je značné především v matematickém modelování vzhledem k náročnosti na výpočty díky množství výpočetních algoritmů. Použití této teorie je možné kdekoliv, kde lze uvažovat sférické částice. Teorie má své místo především ve validaci programů, které se zabývají rozptylem a absorpcí. Jedná se především o oblasti tepelného přenosu, optiky či laserových měření vzdáleností (Lidar) [59].

Mieova teorie se zabývá řešením absorpce, rozptylu a zániku záření v závislosti na parametru velikosti  $\alpha$  (obvod kapek normalizovaný vlnovou délkou) a relativním komplexním indexu lomu. Z teorie vyplývá závislost vlnové délky jak na velikosti kapek, tak na změnách indexu lomu [53].

**Parametr velikosti  $\alpha$**  se zavádí pro zjednodušení výpočtů interakce záření s kapkou. Pro velmi malé parametry velikosti se používá Rayleighův rozptyl, pro velké parametry pak geometrické optické rozdělení. Parametr velikosti je definován takto [60]:

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (20)$$

Kde:

$\alpha$  – parametr velikosti

Základním principem Mieova rozptylu je výpočet jednotlivých koeficientů absorpce  $Q_a$ , rozptylu  $Q_s$  a zániku  $Q_e$ , přičemž platí, že součet koeficientů absorpce a rozptylu se rovná koeficientu zániku.

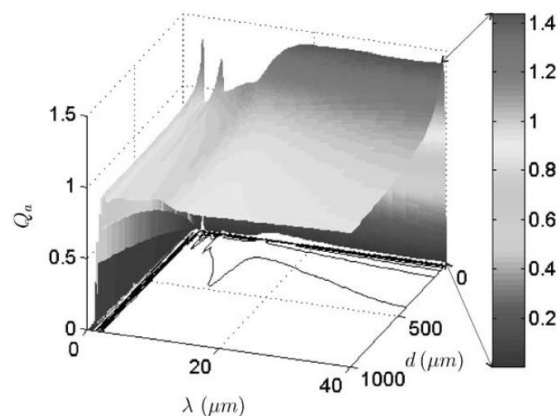
Mieova teorie je počítána pro interakci tepelného záření s rovnoměrnými izotropními částicemi nejjednodušší formy (koule, nekonečný válec ad.). Obecný postup interakce lze rozdělit do několika kroků [61]:

- zavedením sférického souřadnicového systému v počátku dané částice,

<sup>16</sup> Semitransparentní prostředí ovlivňuje absorpci a rozptyl záření. V modelování hoření se jedná především o kouř a zplodiny hoření.

- určení rozsahu rovinných vlnových délek záření jako vektorové sférické funkce,
- rozšíření rozsahu vlnových délek záření elektromagnetického pole a pole uvnitř částice ve sférických vektorových funkcích,
- stanovení koeficientů pro rozšíření funkcí pro pole uvnitř částice,
- koeficientu rozptylu  $Q_s$  a zániku  $Q_e$  se vypočítá integrováním polohovacího vektoru vzhledem k úhlovým a prostorovým proměnným.

**Koeficient absorpce** (obr. 23) je určen po výpočtu koeficientů rozptylu a zániku. Maximální absorpční schopnost se vyskytuje u relativně velkých kapek, kde se lomové záření uvnitř koule uvolňuje podél dráhy, tj. ve směru záření. U menších průměrů existují tři oblasti, kde je absorpce značná. Jde o oblasti s vlnovou délkou  $\lambda = 3 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 6 \mu\text{m}$  a  $\lambda \in [10-40 \mu\text{m}]$ . V těchto oblastech dochází ke změnám optických vlastností vody. Naopak pro vlnové délky menší než  $2 \mu\text{m}$  vodní clony téměř neabsorbují tepelné záření. To může být problematické především u požáru s vysokými teplotami, kde je větší množství intenzity záření vyzařováno s kratší vlnovou délkou.

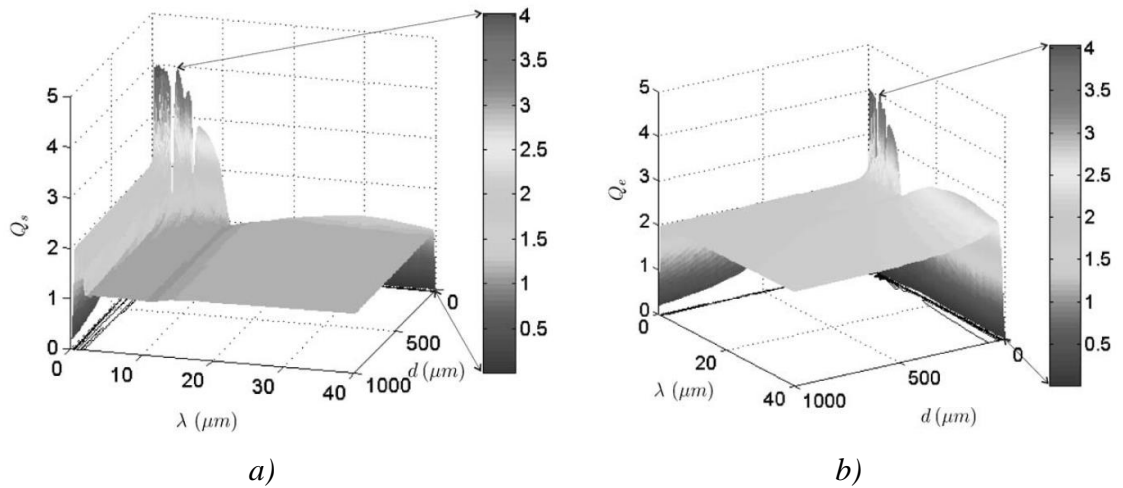


obr. 23: Koeficient absorpce v závislosti na vlnové délce a průměru kapky; [60]

V případě vlnových délek nad  $2 \mu\text{m}$  a průměrem větším než  $10 \mu\text{m}$  platí, že rozptyl je téměř rovnoměrný a **koeficient rozptylu** se rovná  $Q_s = 1,1$  (obr. 24a). To je způsobeno zejména difrakcí záření blízko kapky a částečně odrazem záření na povrchu kapky. V tomto případě je optická tloušťka kapky dostatečně vysoká, aby zmírnila odraženou částí příchozího záření. Pro menší průměry a vlnové délky se rozptyl zvyšuje. Pro tyto případy se namísto Mieova rozptylu používá Rayleighův rozptyl.

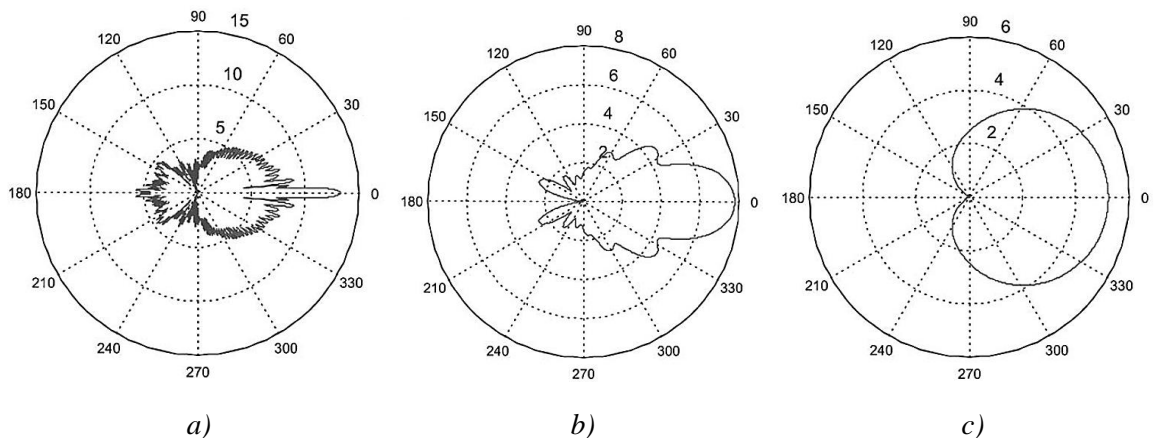
Pro **koeficient zániku** (obr. 24b) platí, že pokud mají kapky větší průměr než je vlnová délka záření, pak lze uvažovat  $Q_e = 2$ . Pro menší částice platí, že snížení absorpční schopnosti je vyváženo nárůstem rozptylu, dokud extinkce nedosáhne hodnoty blízké  $Q_e = 4$ . K maximu zániku odchází, pokud se průměr kapek rovná vlnové délce.





obr. 24: a) Koeficient rozptylu; b) koeficient zániku; [60]

**Fázová funkce** ovlivňuje úhlové rozptýlení záření. Rozptýlená intenzita se mění s velikostí částice a s vlnovou délkou působícího záření. Ve studii [60] byly uvažovány tři varianty pro průměr kapky  $d = 10 \mu\text{m}$ . Vykreslení fázové funkce je zobrazeno na obr. 25.



obr. 25: Fázová funkce: a) s vysokým parametrem  $\alpha$ ; b) se středním parametrem  $\alpha$ ; c) s nízkým parametrem  $\alpha$ ; [60]

Parametr velikosti  $\alpha$  má podstatný vliv na tvar fázové funkce. Pokud uvažujeme konstantní průměr kapky pro všechna měření, tj.  $10 \mu\text{m}$ , pak se v rovnici (20) nachází jediná proměnná, a tou je vlnová délka záření. Pro první případ (obr. 25a) je uvažována vlnová délka  $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ . Parametr velikosti dosahuje vysokých hodnot a následkem je rozptyl záření především v dopředném směru. Tento jev, i když ne tak výrazný, je možno vidět i na obr. 25b, kde je vlnová délka  $\lambda = 4,3 \mu\text{m}$ . Posledním případem je posouzení fázové funkce při nízkém parametru velikosti (zde při vlnové délce  $\lambda = 17 \mu\text{m}$ ). Pro nízké parametry velikosti je fázová funkce méně orientována směrem dopředu. Při nižších hodnotách je oblast zpětného rozptylu ekvivalentní oblasti dopředného rozptylu. Jedná se o případ blízký izotropnímu rozptylu, známému také jako Rayleighův rozptyl.

### 2.4.7 Rayleighova teorie rozptylu

Rayleighův rozptyl lze v praxi použít v omezené míře, neboť je limitován maximální velikostí částic, pro které lze tuto metodu použít. Obecně lze říci, že metoda Mieova rozptylu je komplexnější a náročnější na výpočet než metoda Rayleighova rozptylu. Rayleighův rozptyl lze použít pouze pro částice, jež mají mnohem menší rozměry, než je vlnová délka záření. Pokud uvažujeme tepelné záření v rozsahu 0,1  $\mu\text{m}$  až 100  $\mu\text{m}$  (obr. 14) a velikosti kapek 0,025 mm pro vysokotlaké MHz až 3 mm pro SHZ, je patrné, že Rayleighův rozptyl pro oblast útlumu radiace při prostupu vodní clonou není použitelný.

Obecně lze rozeznat rozdíly mezi oběma metodami například pomocí obr. 26. Lze pozorovat, že při uvažování menších částic pro Rayleighův rozptyl, je záření rozptýleno do všech stran. Přestože největší podíl záření odebírá zpětný a dopředný rozptyl, i rozptyl do stran má značnou váhu. Pro Mieův rozptyl (tedy větší částice) převládá dopředný rozptyl [62].



obr. 26: Rozptyl záření při použití Rayleighovy a Mieovy metody; [63]

*Rayleighův rozptyl v přírodě:*

*Vzhledem k velikosti částic, jež jsou potřeba pro Rayleighův rozptyl, lze jeho účinky pozorovat například při působení světelného záření na molekuly vzduchu, zejména molekuly  $\text{N}_2$  a  $\text{O}_2$ . Z hlediska světelného záření vykazuje nejmenší vlnovou délku fialové a modré záření. Ty se v atmosféře rozptýlí až 16x lépe než červené záření, které je na druhém konci barevného spektra. Přestože například fialové záření má nejkratší vlnovou délku a tím pádem se nejlépe rozptýlí v atmosféře, lidské oko nedetekuje fialovou barvu tak dobře jako modrou. Z toho vyplývají některé přírodní jevy, např. zbarvení oblohy.*

### 2.4.8 Vliv plynné fáze na prostup radiace

Při řešení rovnice (13) je hledáno řešení vždy pro určitý interval vlnových délek, neboť výpočet záření pro každou vlnovou délku by byl časově náročný. Pro jednotlivé skupiny je řešen výpočet a jsou stanoveny vlastnosti částic, které se podílejí na přenosu záření. Tento způsob řešení se nazývá **širokopásmový model** (*wide band model*) neboť rozsah vlnových délek je v dané oblasti zastoupen jednou reprezentativní hodnotou.

Pro model útlumu tepelného toku při prostupu vodní clonou lze zjednodušeně uvažovat prostředí, které je tvořeno především  $\text{H}_2\text{O}$  a  $\text{CO}_2$ . Tyto dvě složky se nejvíce podílejí na

absorpci, emisi a rozptylu záření. Uvažování vlivu těchto molekul má význam především u hoření, při kterém nevznikají saze, tj. například hoření plynů či hořlavých kapalin.

Pokud při spalování dochází ke vzniku sazí, je možné, a časově efektivní, zanedbání vlivu  $H_2O$  a  $CO_2$ , neboť saze mají na sdílení tepla radiací větší vliv. Radiční spektrum pro saze je modelováno jako konstantní, a proto může být uvažována pouze jedna skupina vlnových délek a tedy i jeden absorpční koeficient pro celou plynnou fázi.

V matematickém modelování lze širokopásmový model zpřesňovat drobnějším dělením jednotlivých pásem. Zpravidla se však používá šest pásem. Hranice vlnových délek ohraničujících tato pásma by měla být stanovena pro každý zdroj hoření zvlášť, neboť složení zplodin je závislé na zdroji hoření. V tab. 9 jsou uvedeny částice, které jsou v prostředí uvažovány pro dané pásmo vlnové délky při hoření propanu při modelování v software FDS. [64]

tab. 9: Širokopásmový model pro hoření propanu ( $C_3H_8$ );[57]<sup>17</sup>

Pásmo	1	2	3	4	5	6	
Uvažované částice	saze, $CO_2$ , $H_2O$	$CO_2$ , $H_2O$ , saze	$C_3H_8$ , saze	$CO_2$ , $CO$ , $H_2O$ , saze	$C_3H_8$ , $H_2O$ , saze	$CO_2$ , $H_2O$	
Vlnová délka $\lambda$ [ $\mu m$ ]	1,00	2,63	2,99	3,92	6,06	8,51	200

Použití širokopásmového modelu není jedinou variantou modelování vlivu prostředí na přenos radiace. Například pro situace, kdy se v prostředí nachází pouze  $H_2O$  a  $CO_2$ , lze vliv molekul stanovit na základě určení množství částic v prostředí. To je vyjádřeno zpravidla molární frakcí  $H_2O$  a  $CO_2$  v prostředí. Při tomto postupu bylo ve studii [60] uvedeno, že lze uvažovat 96 % vodní clony jako vzduch, který má zanedbatelné absorpční schopnosti. Dokonce při modelování pouze  $CO_2$  a  $H_2O$  byla složka  $CO_2$  natolik zanedbatelná, že byly použity pouze vlastnosti vodní páry závislé na teplotě prostředí [60, 65].

## 2.5 Specifika CFD modelu pro vodní clonu

Jednotlivé teorie, postupy a odvozené zákony je nutno implementovat do výpočetního softwaru, tak aby bylo možné jejich správné použití. S ohledem na matematické modelování v řešeném příkladu jsou specifika uvedena pouze pro software FDS.

### 2.5.1 Model rozstříkového kužele

Jednotlivé kapky jsou modelovány pomocí Langrangeových částic. **Langrangeovy částice** reprezentují objekty, které nemohou být řešeny v rámci výpočetních objemů. Vodní kapky patří

<sup>17</sup> Uvedení dat pro hoření propanu je vztaženo k řešenému příkladu, ve kterém je pro zdroj hoření použit propanový hořák. Data pro jiné zdroje hoření lze dohledat v [57].

do této skupiny vzhledem k malé velikosti výpočetních objemů. Jednotlivým částicím mohou být přiřazeny vlastnosti, např. hmotnost, absorpční schopnost, vypařovací schopnost apod.

Vzhledem k množství rovnic, které musí být řešeny pro každou kapku, je jejich počet defaultně omezen na 5 000. Počet částic lze navýšit pro získání přesnějších výsledků za cenu prodloužení výpočetního času. Tvar kapek je uvažován jako kulový.

Pohyb kapek je simulován na základě Newtonovy pohybové rovnice, viz kapitolu 2.2.6. Problematika určení součinitele odporu vzduchu je funkcí Reynoldsova čísla založená na průměru kapky. Software FDS uvažuje se třemi rovnicemi pro výpočet součinitele odporu vzduchu [57]:

$$C_D = \begin{cases} 24/Re_D & Re_D < 1 \\ 24(0,85 + 0,15Re_D^{0,687})/Re_D & 1 < Re_D < 1000 \\ 0,44 & 1000 < Re_D \end{cases} \quad (21)$$

Pro rovnice (21) jsou stanoveny podmínky pro jejich použití, dané velikostí Reynoldsova čísla. Použití jednotlivých rovnic zhruba popisuje graf závislosti součinitele odporu vzduchu a Reynoldsova čísla na obr. 11.

Pro modelování **velikostního rozdělení kapek** je defaultně nastavena kombinace Rosin–Rammlerova a Log–normálního rozdělení, přičemž Rosin–Rammlerovo je použito pro průměr kapek větší než  $D_{v0,5}$  a Log–normální pro průměr větší nebo roven  $D_{v0,5}$  [66]. Rozdělení lze pro jednotlivé rozstříkové kužely nastavit i manuálně.

**Inicializace vodního spreje** je simulována od fiktivní sférické plochy, jejíž průměr je odstupová vzdálenost od otvoru trysky. Umístění sférické plochy má význam vzhledem k atomizaci kapek, neboť se předpokládá, že v této fázi jsou již kapky plně atomizovány. Vzdálenost kapky od její počáteční pozice je náhodně vybrané číslo, přičemž je použito rovnoměrného rozdělení. Úhel, pod kterým je kapka iniciována, je náhodně vybrán na základě distribuce [57]:

$$f(\phi) = \exp \left[ -\beta \left( \frac{\phi - \phi_{min}}{\phi_{max} - \phi_{min}} \right)^2 \right] \quad (22)$$

Kde:

$\phi$  – inicialiční úhel (kolmo dolů je uvažována hodnota  $\phi=0$ )

$\beta$  – parametr distribuce (defaultně  $\beta = 5$ )

Stanovená počáteční rychlost kapek je stejná pro všechny kapky vysílané podél normál k fiktivnímu sférickému povrchu.

## 2.5.2 Model radiačního tepelného toku

Radiační tepelný tok je v FDS popsán pomocí rovnice RTE (13), přičemž řešení této rovnice (stejně jako dalších rovnic např. zachování energie, hybnosti, hmotnosti) je založeno na metodě konečných objemů FVM. Rovnice je řešena v rámci širokopásmového modelu, defaultně pro 6 skupin o různých vlnových délkách.

Člen „ $B$ “ v rovnici RTE vyjadřující **emitující zdroj záření** lze pro každé pásmo vlnové délky určit jako součin koeficientu absorpce a vyzářené radiace z černého tělesa. Problematika určení koeficientu absorpce je složitá, nicméně při většině simulací tvoří saze dominantní zdroj radiace. Radiační spektrum sazí je uvažováno jako konstantní a je tedy uvažováno jen jedno pásmo vlnové délky, viz kapitolu 2.4.8. Defaultní nastavení výpočtu vyzařované radiace při uvažování pouze jednoho absorpčního koeficientu záření absolutně černého tělesa je stanoveno rovnicí [67]:<sup>18</sup>

$$I_b(x) = \frac{\sigma T(x)^4}{\pi} \quad (23)$$

Kde:

$I_b$  – záření absolutně černého tělesa

Pro plameny, kde je tvorba sazí malá v poměru s  $\text{CO}_2$  nebo  $\text{H}_2\text{O}$ , může tento předpoklad vést k naddimenzování výpočtu vyzářené radiace. Pro určité látky (např. propan) je vhodnější použití vícepásmového modelu. Při uvažování šedého prostředí pak platí, že čistá zářivá energie získaná kontrolním objemem se rovná rozdílu absorbovaného a emitovaného záření z tohoto objemu.

Pro určení množství radiační energie z celkové tepelné energie zdroje se používá pojem **radiační frakce**. Radiační frakce je funkcí teploty plamene a chemického složení, přičemž je nutno zmínit, že ani jeden z parametrů nelze přesně určit pro požáry ve větším měřítku. Při modelování velkého prostoru s hrubou sítí je zóna plamenného hoření simulována nepřesně, zejména s ohledem na hraniční část plamenného hoření. Zjednodušením, kterým lze vyřešit tento fenomén, je zavedení radiační frakce obecně pro dané palivo. Obvykle se hodnota radiace pohybuje v rozmezí 30 až 40 % celkového uvolněného tepelného toku. V FDS je hodnota radiační frakce při hoření propanu nastavena defaultně na 30 % [68].

## 2.5.3 Model interakce tepelného toku a vodních kapek

Vodní kapky ovlivňují prostup tepelného toku vodní clonou kombinací absorpce a rozptylu záření. Interakce musí být řešena jak pro předpoklad radiačního pole (prostředí), tak pro

<sup>18</sup> Pro zónu hoření se do rovnice zavádí korekční součinitel  $C$ . Korekce je v této oblasti nutná, neboť teplota okolí plamene je značně nižší než teplota v plameni. Průměrná teplota v buňce počítána z okrajových podmínek na hranici kontrolního objemu, pak nemusí odpovídat reálnému stavu, podrobněji v [57].

energetickou bilanci při prostupu kapkou. V modelu FDS je uvažováno semitransparentní prostředí, pro něž je stanoven absorpční koeficient závislý na chemickém složení plynu a teploty. Koeficienty absorpce lze dohledat v publikaci RadCal [69]. Pro vodní kapky lze rovnici RTE (13) upravit takto:

$$s \cdot \nabla I_\lambda(x, s) = -[\kappa_p(x, \lambda) + \sigma_p(x, \lambda)]I_\lambda(x, s) + \kappa_p(x, \lambda)I_{b,p}(x, \lambda) + \frac{\sigma_p(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s's)I_\lambda(x, s')ds' \quad (24)$$

Kde:

$\kappa_p$  – absorpční koeficient kapky

$I_{b,p}$  – emise záření vyzářená kapkami

$\sigma_p$  – koeficient rozptylu kapky

Absorpční koeficient a koeficient rozptylu kapky je určen na základě Mieovy teorie rozptylu. Uvnitř kontrolního objemu buňky je skutečná distribuce kapek modelována jako monodisperzní suspenze<sup>19</sup>, jejíž průměr odpovídá Sauterovu průměru ( $d_{32}$ ) polydisperzního spreje. Tento předpoklad vede ke zjednodušenému vyjádření koeficientů [71, 72]:

$$\kappa_p(x, \lambda) = A_p(x)Q_a(r_{32}, \lambda) \quad (25)$$

$$\sigma_p(x, \lambda) = A_p(x)Q_s(r_{32}, \lambda) \quad (26)$$

Kde:

$A_p$  – plocha průřezu na jednotku objemu kapek

Plocha průřezu  $A_p$  se určí jednoduše sečtením všech průřezových ploch kapek v daném kontrolním objemu a vydělí se objemem kontrolního objemu. Koeficienty absorpce a rozptylu nejsou opakovaně počítány během simulace. Namísto toho jsou uvedeny na začátku simulace pro každé pásmo vlnové délky a celou řadu různých Sauterových průměrů.

Pro řešení posledního členu rovnice RTE na pravé straně, tj. integrálu pro rozptýlenou intenzitu z okolí, je nutno zavést výpočtové zjednodušení. Přesný výpočet integrálu by byl časově velmi náročný, neboť by se v iteračním procesu musely započítat všechny intenzity v daných směrech. Namísto výpočtu jednotlivých směrů rozptylu jsou zavedeny parametry  $U(x)$  vyjadřující absolutní intenzitu rozptýlenou z celé koule (kapky) a  $\overline{\sigma_p}$  efektivní koeficient rozptylu. Zjednodušenou rovnici je možno při použití koeficientů integrovat přes celé spektrum vlnových délek, čímž je určena rovnice RTE pro dané pásmo vlnové délky.

<sup>19</sup> Monodisperzní suspenze je systém, ve kterém se nachází dvě nebo více složek – zde plynné prostředí (vzduch) a vodní kapky (voda) - přičemž je jeden ze systémů rozptýlen ve druhém. Pojem monodisperzní znamená, že uvažované částice mají stejnou velikost [70].

Pro výpočet zániku tepelného toku při působení na kapku je nutno určit součinitel přestupu tepla z plynné fáze do kapky. Výpočet součinitele přestupu tepla je v software FDS založen na Nusseltově a Prandtlově kritériu. Tepelný tok absorbovaný jednou kapkou lze určit z rovnice:

$$\dot{q}_r = \frac{m_p}{\rho_p(x)} \kappa_p(x) [U(x) - 4\pi I_{b,p}(x)] \quad (27)$$

Kde:

$\dot{q}_r$  – absorbovaný radiační tepelný tok [kW]

$m_p$  – hmotnost kapky [kg]

$\rho_p(x)$  – celková hustota kapek v kontrolním objemu [kg/m<sup>3</sup>]

## 2.6 Analytický návrh vodní clony

Vodní clony se dle čl. A 2.3 ČSN 73 0873 [9] navrhují individuálně v závislosti na konkrétních podmínkách v daném provozu. Pro návrh je nutno posoudit podmínky větrání a výpočtu útlumu tepelného toku na požadovanou hodnotu. Dle čl. 5.3.5 ČSN 73 0810 [73] lze účinnost vodní clony posuzovat pro dva specifické případy.

V prvním případě se jedná o vodní clonu, jež nahrazuje požárně dělící konstrukci s mezním stavem EW, přičemž se uvažuje výskyt osob na odvrácené straně konstrukce. Unikající osoby mohou být vystaveny účinkům sálání po dobu maximálně 5 vteřin a tepelný tok musí být omezen na hodnotu nižší než 10 kW/m<sup>2</sup> v ose nejbližšího únikového pruhu. V případě, že jsou osoby vystaveny tepelnému toku po dobu delší než 5 sekund, lze určit kritickou hustotu tepelného toku z následující rovnice:

$$I_{krit} = 2,95 + 0,02(55 - t)^{1,5} \quad (28)$$

Kde:  $I_{krit}$  – kritická hustota tepelného toku [kW/m<sup>2</sup>]

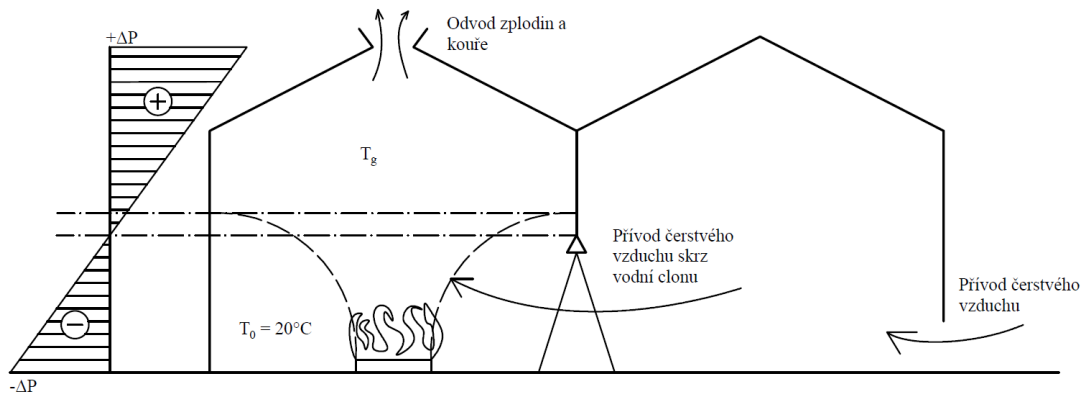
$t$  – doba vystavení osob požáru [s]

Druhý případ je založen na zabrání rozšíření požáru skrz vodní clonu. Kritérium je splněno, pokud je hustota tepelného toku nižší než 15 kW/m<sup>2</sup> ve vzdálenosti 1 m od povrchu stěny. Navíc v pásmu šíře 1 m nesmí být zabudováno zařízení, v němž se vyskytují látky s bodem vznícení do 300 °C nebo výrobky s materiály třídy reakce na oheň C až F.

K omezení účinků tepelného toku, je nutno řešit nejen radiační složku, ale také složku konvekční. Požární kodex se nijak konkrétně k této problematice nevyjadřuje, nicméně touto problematikou se částečně zabývá Ing. Vladimír Reichel, DrSc. v příručce [74] vydané na pokyn GŘ HZS ČR při změnách kmenové normy ČSN 730802.

V [74] je uvedeno, že návrh vodní clony by měl omezit radiační složku tepelného toku, zatímco zabránit průniku zplodin hoření a kouře by se mělo zabývat požární odvětrání, přičemž

je uvažován **přívod vzduchu skrz vodní clonu** a odvod kouře vně objektu. Princip je patrný z následujícího schématu (obr. 27).



obr. 27: Schéma požárního větrání při instalované vodní cloně; [74]

Z obr. 27 je patrné, že tlak plynů musí být v úrovni vodní clony záporný. Přestože ČSN 73 0802 neuvádí nezbytnost instalace požárního odvětrání, je nutno posoudit možnosti šíření zplodin hoření a kouře vodní clonou ve vztahu k unikajícím osobám.

### 2.6.1 Rychlost odhořívání

Pro návrh vodní clony pro daný provoz je potřeba spočítat tepelný tok, jež bude na clonu působit. Množství tepla, které se při požáru uvolní, je dáno množstvím a druhem hořlavé látky a působením okolních vlivů. Obecně lze rozlišit dva druhy požárů – požár řízený palivem a požár řízený ventilací.

Pro **požár řízený palivem** je nutno nejprve stanovit plochu, ze které se bude teplo uvolňovat. Lze použít například následující vzorec převzatý z ČSN 73 0845 [75]:

$$S_{fi} = 4 \cdot h_{sc}^3 \quad (29)$$

Kde:  $S_{fi}$  – povrchová plocha hořlavých látek [ $\text{m}^2$ ]

$h_{sc}$  – výška hořlavých látek [ $\text{m}$ ]

Dále lze stanovit rychlost odhořívání z hořícího povrchu dle ČSN 73 0804 [2]:

$$v_p = S_{fi} \cdot m \cdot K_d \quad (30)$$

Kde:  $v_p$  – rychlost odhořívání pro požár řízený palivem [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ ]

$m$  – hmotnost odhořelých látek z  $1 \text{ m}^2$  povrchu [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ ]

$K_d$  – součinitel ekvivalentního množství dřeva [–]

Hodnotu hmotnosti odhořelých kapalných i tuhých látek lze dohledat v ČSN 73 0804 [2] příloze D. Pro dohledání hodnoty součinitele ekvivalentního množství dřeva existuje hodnotová



ČSN 730824 [76]. Hodnotu rychlosti odhořívání je nutno stanovit i pro **požár řízený ventilací**. Porovnáním výsledných hodnot lze zjistit kritickou rychlost odhořívání pro daný scénář. Požár řízený ventilací je ovlivněn rozměry místnosti, ve které se nachází a také rozměry otvorů. Požární kodex tuto problematiku řeší zavedením parametru odvětrání v ČSN 73 0804 [2]:

$$F_0 = \frac{S_0 \cdot h_0^{1/2}}{S_k} \quad (31)$$

Kde:  $F_0$  – parametr odvětrání [ $m^{1/2}$ ]

$S_0$  – plocha otvorů [ $m^2$ ]

$h_0$  – výška otvorů [ $m$ ]

$S_k$  – plocha stavebních konstrukcí [ $m^2$ ]

V závislosti na hodnotě parametru odvětrání lze stanovit i hodnotu součinitele rychlosti odhořívání. Jejich vztah je uveden v ČSN 73 0804 [2]:

$$\gamma = 2,92 \cdot \log \frac{4}{F_0} \quad (32)$$

Kde:  $\gamma$  – součinitel rychlosti odhořívání [ $kg/m^{5/2} \cdot min$ ] v intervalu  $\langle 4,25; 8,47 \rangle$

Posledním parametrem, který ovlivňuje výslednou hodnotu rychlosti odhořívání, je součinitel, jež zohledňuje geometrii prostoru požáru. Jeho hodnotu lze spočítat z rovnice uvedené v ČSN 73 0804 [2]:

$$k_3 = \frac{S_k}{S} \quad (33)$$

Kde:  $k_3$  – součinitel geometrie prostoru [–]

Hodnotu rychlosti odhořívání zjistíme součinem spočtených hodnot z ČSN 73 0804 [2]:

$$v_v = \gamma \cdot F_0 \cdot k_3 \quad (34)$$

Kde:  $v_v$  – rychlost odhořívání pro požár řízený ventilací [ $kg/m^2 \cdot min$ ]

Porovnáním hodnot rychlosti odhořívání lze zjistit, zda je požár řízen palivem či ventilací. Obecný se předpokládá, že požár je řízen ventilací. Rychlost odhořívání pro požár řízený ventilací lze uvažovat například i v případě, kdy neznáme některou z hodnot pro rovnici (30). V případě, že hodnota rychlosti odhořívání  $v_p$  je menší než  $v_v$ , je uvažován požár řízený palivem.

## 2.6.2 Množství uvolněného tepla

Teplo z požářiště může být uvolňováno třemi způsoby – prouděním, sáláním a vedením. Pro návrh vodní clony lze zanedbat sdílení tepla vedením, neboť to se odehrává pouze v materiálech konstrukcí a na návrh vodní clony má zanedbatelný vliv.

Sdílení tepla sáláním se odehrává mezi všemi povrchy a tedy i mezi hořícím povrchem a kapkami vodní clony. Sálání lze popsat několika fyzikálními zákony, nicméně pro návrh vodní clony postačí zjednodušený Stefan-Boltzmannův zákon ve tvaru:

$$Q_{rad} = \sigma \cdot T^4 \quad (35)$$

Kde:  $Q_{rad}$  – množství tepla uvolněného radiací [ $kW/m^2$ ]

$\sigma$  – Stefan-Boltzmannova konstanta  $5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$

$T$  – teplota [ $K$ ]

Hodnotu teploty dosazenou do rovnice (35) je nutno uvažovat jako nejvyšší v intervalu požadované požární odolnosti. Teplotu lze vyčíst z teplotních křivek popisující průběh požáru. Nejčastěji používanou křivkou popisující průběh požáru je nominální normová teplotní křivka ISO 834 [77]:

$$T = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (36)$$

Kde:  $t$  – čas [ $min$ ]

Při výpočtu teploty dle nominální normové křivky je nutno dát pozor na jednotky, neboť křivka uvažuje výslednou teplotu ve stupních Celsia [ $^{\circ}C$ ], ovšem Stefan-Boltzmannův zákon uvažuje teplotu v Kelvinech [ $K$ ].

Složka tepla sdílená prouděním je na rozdíl od sálání závislá na látkovém prostředí a velikosti teplosměnné plochy. Sdílení tepla prouděním lze popsat Newtonovou rovnicí:

$$Q_{kon} = \alpha_c \cdot (T - T_0) \quad (37)$$

Kde:  $Q_{kon}$  – množství tepla uvolněného konvekcí [ $kW/m^2$ ]

$\alpha_c$  – součinitel přestupu tepla [ $W/m^2 \cdot K$ ]

$T_0$  – teplota kapek ve vodní cloně [ $K$ ]

Pro určení součinitele přestupu tepla se často používá tzv. Nusseltovo kritérium ( $Nu$ ). Pro požáry v uzavřených prostorech lze uvažovat turbulentní volnou konvekci [78]:

$$Nu = \frac{\alpha_c \cdot L}{\lambda_v} = 0,13 \left[ \left( \frac{g(T - T_0) \cdot L^3}{T \cdot \nu^2} \right) \cdot Pr \right]^{1/3} \quad (38)$$

Kde:  $Nu$  – Nusseltovo kritérium

$\lambda_v$  – součinitel tepelné vodivosti [ $W/m \cdot K$ ]

$L$  – charakteristický rozměr – délka / šířka clony [ $m$ ]

$g$  – gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ]

$\nu$  – kinematická viskozita [ $m^2/s$ ]

$Pr$  – Prandtlovo kritérium dané vzorcem [78]:

$$Pr = \frac{v \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda_v} \quad (39)$$

Kde:  $c_p$  – měrná tepelná kapacita [J/kg·K]

Součinitel přestupu tepla prouděním se pohybuje okolo 10 W/m<sup>2</sup>·K, přičemž při zvyšující se rychlosti proudění se hodnota součinitele zvyšuje. Přestože tyto vzorce mají jistý fyzikální základ, jejich použití v běžné praxi nemá příliš prostoru. Jednodušším řešením je empirický návrh dle ČSN 73 0802 [1] přílohy H. Lze zde dohledat rovnice pro množství uvolněného tepla sdíleného prouděním pro nevýrobní a výrobní objekty. Rovnice má tvar [1]:

$$Q_{kon} = \left(\frac{t}{k_v}\right)^2 \cdot k_c \cdot 10^3 \quad (40)$$

Kde:  $k_c$  – podíl tepla sdílený prouděním plynů z celkového uvolněného tepla –  $k_c = 0,6-0,8$

$k_v$  – parametr vyjadřující dynamiku rozvoje požáru [MW<sup>0,5</sup>·s]

Parametr  $k_v$  lze stanovit pro nevýrobní objekty dle rovnice [1]:

$$k_v = \frac{2000}{a \cdot p^{0,5}} \quad (41)$$

Kde:  $a$  – součinitel vyjadřující rychlost odhořívání [–]

$p$  – požární zatížení [kg/m<sup>2</sup>]

Pro výrobní objekty lze použít hodnoty pro jednotlivé skupiny provozů (tab. 10). Tyto hodnoty mohou být dále ovlivněny instalací SHZ či DHZ v prostoru požáru.

tab. 10: Parametr dynamiky rozvoje požáru v závislosti na skupině provozu; [1]

Skupina provozu	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.
$k_v$	500	380	290	230	190	160	130

Sečtením množství uvolněného tepla sdíleného radiací a konvekcí dosáhneme celkové hodnoty tepelného toku působící na jednotkovou plochu. Pro určení tepelného toku na otvor chráněný vodní clonou je nutno tuto hodnotu přenásobit plochou otvoru. V této fázi je určen jednak tepelný tok, který působí na vodní clonu, a také utlumený tepelný tok na odvrácené straně vodní clony.

### 2.6.3 Intenzita dodávky vody

Potřebné množství vody pro vodní clonu lze stanovit na základě fyzikálních vlastností vody. Pro zjednodušení výpočtu se lze zaměřit na jedinou vlastnost, a sice entalpii vodní páry při 100 °C.

Hodnota měrné entalpie<sup>20</sup> vodní páry při 100 °C dosahuje hodnoty 2675 kJ/kg. Rovnice pro výpočet množství vody má tvar:

$$V = \left[ \frac{(Q_{rad} + Q_{kon}) \cdot S_{ot}}{H} \right] \div \mu \quad (42)$$

Kde:  $V$  – množství vody potřebné pro vodní clonu [l/s]

$S_{ot}$  – plocha chráněného otvoru [m<sup>2</sup>]

$H$  – měrná entalpie vodní páry při 100°C = 2675 [kJ/kg]

$\mu$  – účinnost vodní clony

**Účinnost vodní clony** nabývá hodnot od 0 do 1. Při uvažování 100% účinnosti vodní clony bychom předpokládali, že veškeré kapky, jež se v rozstříku vyskytují, se přemění na páru a naváží na sebe potřebné množství tepla. Proto je potřeba k návrhu přistupovat konzervativně. Účinnost vodní clony se bude zvyšovat s větším průtokem trysky a s menším průměrem jednotlivých kapek.

Pro praktické účely je vhodné převést potřebné množství vody na jednotky [l/min], neboť v technických listech výrobců jsou zpravidla uvedeny průtoky trysek v těchto jednotkách. Průtok jednotlivých trysek musí být větší než požadované množství vody i se započítáním účinnosti vodní clony.

Dle ČSN 73 0873 [9] lze uvažovat intenzitu dodávky vody 0,2 až 1,0 l/s·m<sup>2</sup>. Pokud je počítáno s horní mezí intenzity dodávky vody, pak je možné se vyhnout podrobnému výpočtu, neboť norma uvádí tuto hodnotu jako maximální.

<sup>20</sup> Entalpie je fyzikální veličina, která vyjadřuje tepelnou energii uloženou v jednotkovém množství látky.

## 3 Experimentální ověření účinnosti vodní clony

Praktická část diplomové práce se zabývá požárními zkouškami a matematickým modelováním útlumu tepelného toku při prostupu vodní clonou. Pro výběr vhodné varianty modelu lze uvažovat následující možnosti, rozdělené na základě velikosti měřeného tepelného toku a komplexnosti modelu:

- 1) Měření útlumu paprsku záření dané vlnové délky (např. infračervené záření) při prostupu zmenšeným modelem vodní clony.
- 2) Měření útlumu radiace ze zdroje s konstantním výkonem (plynový hořák, sálavý panel), přičemž sdílení tepla prouděním lze předpokládat nulové vzhledem k dostatečnému odvodu kouře a zplodin hoření.
- 3) Měření útlumu radiace ze zdroje s konstantním výkonem, přičemž je uvažováno sálání i z horní kouřové vrstvy kumulující se pod stropem.
- 4) Komplexní model měření útlumu radiačního i konvekčního tepelného toku, kdy kouř a zplodiny hoření procházejí skrz vodní clonu.

Vzhledem k náročnosti jednotlivých modelů, možnosti měření a pro získání dostatečné přesných dat byla zvolena druhá varianta. Uvažován byl konstantní výkon plynového hořáku, přičemž zplodiny hoření byly odvedeny pomocí vzduchotechnického zařízení mimo laboratorní model. Při odvedení konvektivní složky tepelného toku lze uvažovat měření pouze **radiačního tepelného toku** na odvrácené straně vodní clony.

### 3.1 Laboratorní model vodní clony

Měření probíhalo v požární laboratoři v Univerzitním centru energeticky efektivních budov (UCEEB) ČVUT v Praze. Přestože požární komora slouží primárně pro provádění velkorozměrových požárních zkoušek dle ISO 9705–1 [79], resp. ČSN EN 14 390 [80], její vybavení je vhodné i pro model vodní clony.

#### 3.1.1 Instalovaná zařízení a geometrie prostoru

Zdrojem tepla je pískový propanový hořák s čtvercovým půdorysem o délce hrany cca 18 cm. Výkon hořáku je nastaven pro všechny požární scénáře na konstantní výkon 150 kW. Pro zvýšení účinků radiace byl hořák umístěn do rohové dispozice, tak aby bylo omezeno nasávání vzduchu pro hoření. Plameny mají tendenci ohýbat se směrem k povrchům bránícím nasávání vzduchu a jejich délka se značně prodlužuje oproti volnému hoření. Snížení přívodu vzduchu také způsobuje zvýšení teplot po délce plamene. Teplota plamene se zvyšuje díky redukci množství chladnějšího vzduchu, který se do kužele hoření (*fire plume*) nasává. Zplodiny hoření a

vzduch musí urazit delší vertikální trasu, než se projeví procesy spalování. Prodloužením plamene a zvýšením teploty je dosaženo intenzivnějšího vyzařování z plamene. [81]

Rohová dispozice je uměle vytvořena z ocelového rámu používaného pro požární zkoušky fasád dle ČSN ISO 13785–1 [82]. Panel se skládá z ocelové konstrukce a z nehořlavých desek tl. 15 mm. Pro požární zkoušku byly na ocelový rám s nehořlavými deskami dodatečně upevněny desky z minerální vaty tloušťky 30 mm v celé ploše.

Pro měření tepelného toku byly zvoleny vodou chlazené radiometry Schmidt-Boelterova typu. Princip fungování radiometrů je detailněji popsán v kapitole 2.3.2. Radiometry jsou částečně zapuštěny tak, aby hodnota měřeného tepelného toku byla vztažena s vyšší přesností na zónu plamenného hoření a aby byl minimalizován radiační tepelný tok odrážející se od okolních povrchů. Detail instalace radiometru je zobrazen obr. 28.

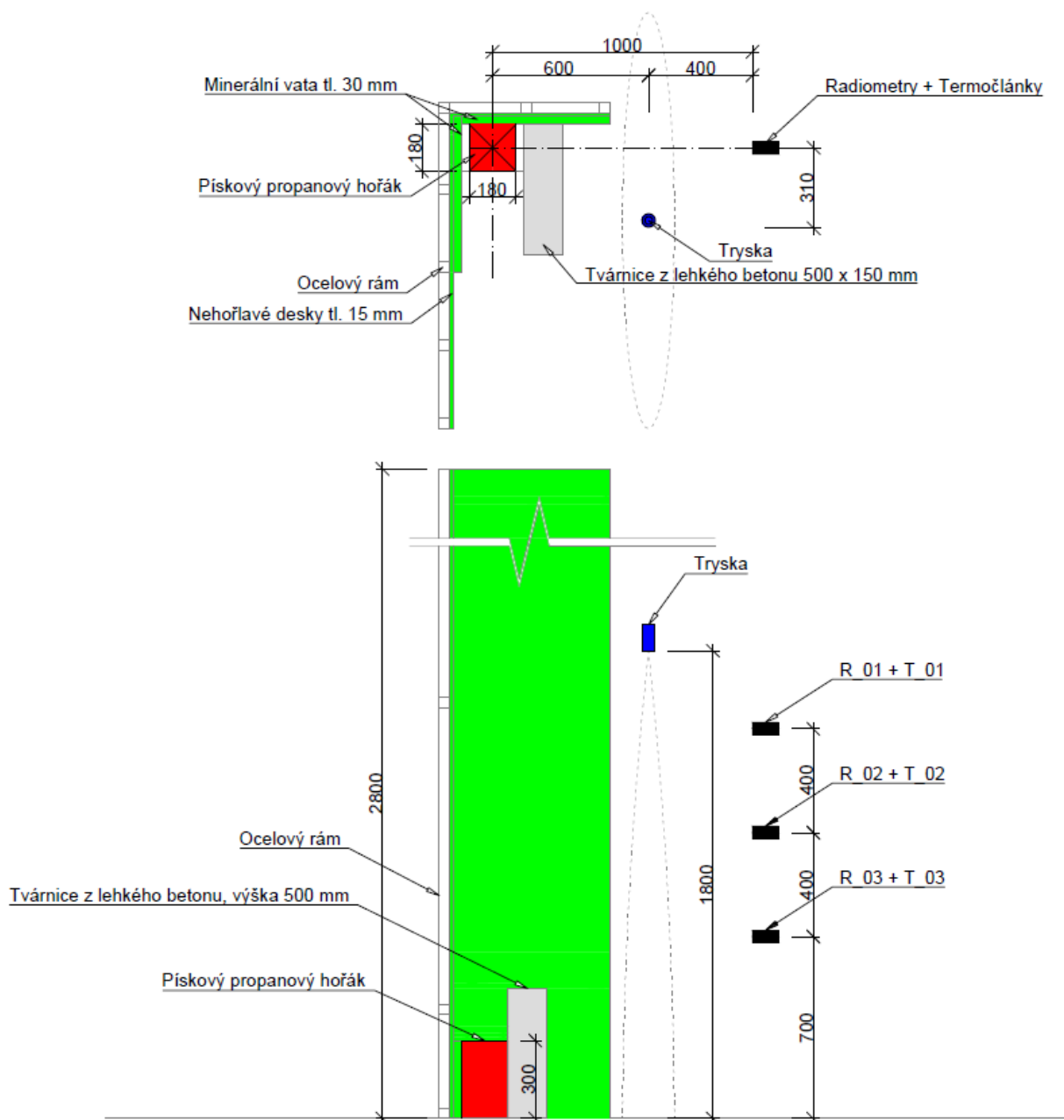


Částečné zapuštění radiometru v hliníkové konstrukci

*obr. 28: Detail instalace radiometru*

Kromě tepelného toku byl u každého radiometru umístěn plášťový termoelektrický článek (dále jen termočlánek) typu K o průměru 1,5 mm pro měření teplot. Data z radiometrů a termočláneků jsou svedena od koncových prvků do ústředny a následně do počítače, kde jsou promítnuta pomocí software, který slouží pro vyhodnocení zkoušek dle ISO 9705. Geometrie prostoru s vyznačením jednotlivých zařízení je popsána na obr. 29.

Pro určení pozic jednotlivých zařízení byly udávající především výstřikové charakteristiky trysek. Cílem bylo instalovat zařízení tak, aby získaná data byla relevantní k danému scénáři a nebyla ovlivňována nepříznivými vlivy. Z hlediska měření tepelného toku a teploty je nutno osadit radiometry a termočláanky v dostatečné vzdálenosti od rozstříkového kužele tak, aby na těchto zařízeních nezůstávaly kapky vody. Výšková úroveň radiometrů a termočláneků je zvolena s ohledem na rozstřík trysky. Zařízení jsou umístěna ve svislé ose, přičemž jsou odsazena o 400 mm mezi sebou a spodní radiometr a termočlánek o 400 mm od horního líce propanového hořáku. Výšková pozice trysky byla určena tak, aby i radiometr v nejvyšším místě měřil hodnoty tepelného toku skrz rozstřík trysky.



Legenda: R = radiometr; T = termočlánek

obr. 29: Půdorys a pohled na laboratorní model vodní clony<sup>21</sup>

Zároveň bylo nutno osadit trysku tak, aby jejím rozstříkem nebyl ovlivňován výkon hořáku. Vzhledem k proudění v blízkosti propanového hořáku bylo nutno k hořáku umístit stínící tvárnici, tak aby nedocházelo k nasávání vzduchu s kapkami vody do prostoru hoření. Tento jev by při reálném požáru působil pozitivně na snížení tepelného toku, nicméně pro laboratorní model je cílem měření tepelného toku při konstantním výkonu hořáku. Pokud by kapky byly nasávány do kužele požáru, pak by mohlo docházet k negativnímu ovlivňování výkonu hořáku.

<sup>21</sup> Zobrazení rozstříkového kužele je pouze schematické. Rozsah rozstříku je detailněji popsán v dalších kapitolách.

Kompletní laboratorní model (obr. 29), je umístěn pod odsávacím zvonem tak, aby byly zplodiny hoření odsávány mimo model a měřen byl pouze radiační tepelný tok. S ohledem na možný podtlak vznikající v prostoru hoření při nuceném odvětrání byl ventilátor nastaven na minimální možný výkon (30 %). Ventilátor je spouštěn za účelem dostatečného odvodu kouře tak, aby nedocházelo k úniku mimo požární laboratoř. Nepředpokládá se, že by aktivace ventilátoru měla výraznější vliv na průběh hoření.

### 3.1.2 Výstřikové charakteristiky trysky

Pro měření byly použity dvě vodní trysky. Při výběru trysky byl kladen důraz na odlišné vlastnosti z hlediska výstřikových charakteristik. Při požárních zkouškách byly trysky zatíženy tlakem 13 bar. Veškeré charakteristiky, které lze k použitým tryskám dohledat v technických listech výrobců, jsou vypsány v tab. 11. Pokud údaj o dané trysce chybí, pak není uveden v technickém listu výrobce.

tab. 11: Technické charakteristiky trysky NF 300 a C-FSFH 34; [17, 25]

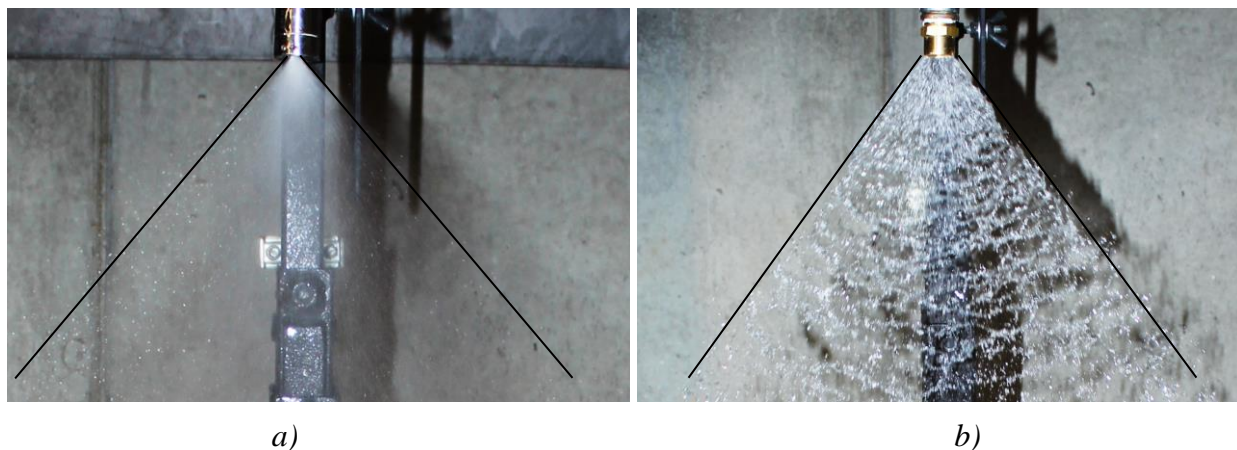
Označení trysky	C-FSFH 34	NF 300
Hmotnost	0,2 kg	0,17 kg
Materiál	Nerez	Mosaz
K faktor	1,6	68,4
Průtok při tlaku 13 bar (dopočteno)	5,8 l/min	247 l/min
Počet otvorů	8	1
Průměr otvoru / plocha otvorů	- / 3 mm <sup>2</sup>	10,7 mm / 90 mm <sup>2</sup>
Typ rozstříku	Plochý proud (eliptický)	Plochý proud
Úhel rozstříku	– <sup>22</sup>	80°
Distribuce kapek	–	rovnoměrná se zúženými kraji (pro překrytí kuželů)
Velikost kapek	$D_v = 70 \mu\text{m}$ <sup>23</sup>	–

Z dat uvedených v technických listech je patrné, že největším rozdílem je množství vody, které tryskou proteče za jednotkový čas. I díky velikosti otvorů v trysce je patrné, že tryska NF 300 bude mít násobně větší velikost kapek, než tryska C-FSFH 34 (obr. 30).

<sup>22</sup> V technickém listu jsou uvedeny poloměry elipsy pro vybrané výškové úrovně.

<sup>23</sup> Dopočteno z technického listu lineární interpolací.





obr. 30: Detail výstřiku trysky: a) C–FSFH 34; b) NF 300

Obě trysky využívají stejného způsobu tvorby vodních kapek. V případě trysky C–FSFH 34 se atomizace odehrává v bezprostřední blízkosti vodní trysky. K atomizaci dochází střetnutím dvou vodních proudů, které vycházejí vždy ze dvou protilehlých otvorů v drážce ve tvaru písmene V. Následně je vodní proud rozstříštěn na kapky o velikosti desítek mikrometrů. Konstrukce trysky NF 300 je značně jednodušší. Uvnitř trysky se nachází válcová dutina, jejíž konec je mírně zaoblen směrem dovnitř dutiny. Vodní proud procházející tryskou je laminární až do chvíle, než narazí na zaoblenou část. V tomto místě kraje proudu směřují dovnitř rozstříku a vzájemně se od sebe odrazí, čímž vzniká plochý proud. Ke konečné atomizaci však nedochází již v tomto místě, ale až o několik centimetrů níže. Jak je patrné z obr. 30b, nejprve se vytvoří poměrně homogení vodní film, který se rozdělí na jednotlivé kapky až po výšce rozstříkového kužele. Následkem je tvorba kapek o průměru v řádu milimetrů tj. obdobně jako u sprinklerových hlavíc.

### 3.1.3 Referenční požární zkouška

Požární zkouška obsahuje tři scénáře. Prvním scénářem je referenční zkouška bez aktivace vodní clony, ke které se vztahují všechna naměřená data. Pomocí referenční zkoušky bylo možné zjistit radiační tepelný tok naměřený pomocí radiometrů a na základě naměřených hodnot stanovit vzdálenost radiometrů od hořáku. Cílem zkoušky bylo sestavit takový model, při kterém by hodnoty tepelného toku byly dostatečně vysoké na to, aby při aktivaci vodní clony byl pozorovatelný případný rozdíl. Tepelný tok byl měřen pomocí tří radiometrů osazených dle obr. 29. Druhým sledovaným jevem byla teplota měřená pomocí tří termočlánků umístěných v těsné blízkosti radiometrů.

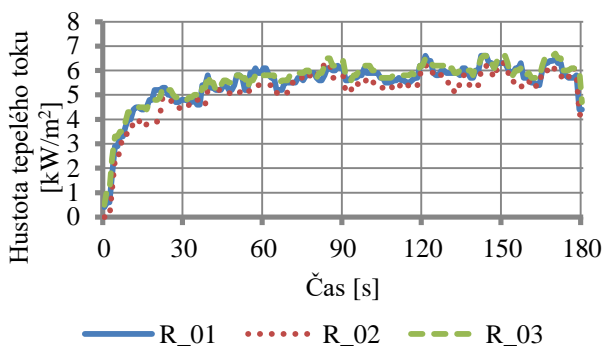
Záznam dat z referenční zkoušky trval po dobu 180 vteřin, přičemž v této době byl hořák nastaven na konstantní výkon 150 kW. Záznam byl proveden v každé vteřině měření, celkem tedy 180 hodnot pro daný časový interval. Před samotným měřením bylo provedeno několik úkonů, např. zapnutí ventilátoru, zapnutí kamery, zapálení pilotního hořáku pro automatické (dálkové) zapálení hlavního plynového hořáku.

Tepelný tok naměřený při referenční požární zkoušce je zobrazen pro tři radiometry na obr. 31. Zhruba od 60. vteřiny lze uvažovat hodnoty tepelného toku za ustálené. Hodnoty jsou na všech radiometrech téměř identické, což lze přiřadit poměrně konstantnímu vyzařování radiace po výšce plamene. Průměrná hodnota tepelného toku naměřená na jednotlivých radiometrech od 60. do 180. vteřiny je:

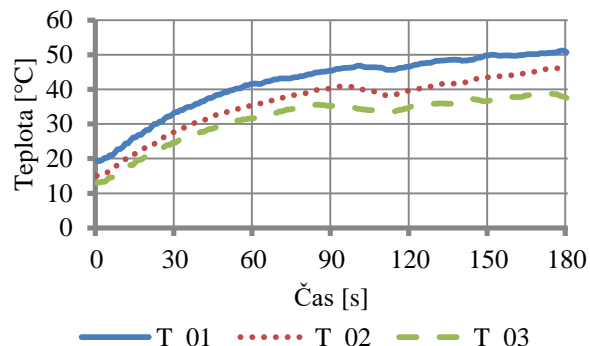
- pro radiometr R\_01 je ustálená průměrná hodnota tepelného toku 5,9 kW,
- pro radiometr R\_02 je ustálená průměrná hodnota tepelného toku 5,6 kW,
- pro radiometr R\_03 je ustálená průměrná hodnota tepelného toku 6,0 kW.

Naopak u průběhu teplot je patrný rozdíl daný rozdílnou výškovou úrovní termočlánků (obr. 32). Z průběhu teplot je patrný princip sdílení tepla radiací a konvekcí. Při radiačním záření dochází k minimálnímu ohřevu vzduchu, neboť radiace je sdílána především mezi povrchy. V tomto případě je povrch termočlánku ohříván radiačním zářením a zároveň ochlazován okolním vzduchem. Výsledkem jsou mírně zvýšené naměřené teploty. Počáteční teplotu okolního vzduchu lze vyčíst z obr. 32 v čase 0, tj. cca 15-20°C.

Okolní vzduch, který se stihne zahřát, zároveň sníží svojí hustotu a stoupá vzhůru. Vzhledem k pomalému nárůstu teplot se tento jev děje velmi pomalu a tomu odpovídá mírně stoupající průběh teplot. Stoupání teplejšího vzduchu má za následek delší působení na nejvýše položený termočlánek, na kterém jsou naměřeny nejvyšší hodnoty.



obr. 31: Průběh hustoty tepelného toku naměřené při referenční požární zkoušce



obr. 32: Průběh teplot naměřených při referenční požární zkoušce<sup>24</sup>

### 3.1.4 Požární scénáře s aktivovanou vodní clonou

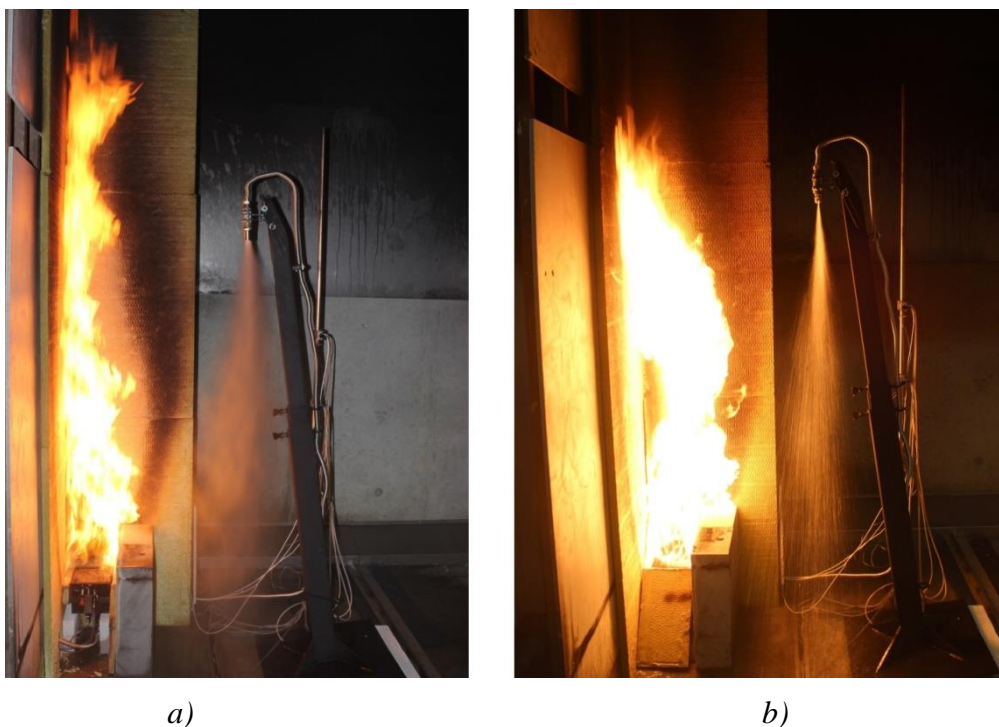
Následující dva požární scénáře mají identický průběh. Jediným rozdílem v modelu je instalovaná tryska. Geometrie modelu i časová osa měření zůstávají stejné. Při požárních scénářích s aktivní vodní clonou je hořák nastaven na výkon 150 kW po dobu 180 vteřin,

<sup>24</sup> Mírný pokles teplot v čase 100 až 110 vteřin je způsoben nepřesností měření, kdy zřejmě místní nedokonalostí došlo k nadměrnému proudění v oblasti termočlánků a následnému snížení teploty. Na hodnoty tepelného toku nemá tento jev vliv.

obdobně jako u referenční požární zkoušky. Po 120 vteřinách hoření dochází k aktivaci vodní clony, přičemž měření s aktivní vodní clonou trvá dalších 60 vteřin. Poté je požární zkouška ukončena a dochází k vypnutí hořáku, zavření přívodu vody a vypnutí čerpadla.

Rozstříkový kužel trysek tvoří vodní clonu mezi propanovým hořákem a všemi radiometry a termočlánky. Zároveň kapky v rozstříku přímo nedopadají na žádné z těchto zařízení. Pohled na laboratorní model při aktivované vodní cloně je zobrazen na obr. 33.

Při použití tryšky NF 300 mají větší kapky větší kinetickou energii a při pohybu jsou minimálně ovlivňovány okolním prouděním. U tryšky C-FSFH 34 s menšími kapkami dochází k částečné deformaci rozstříkového kužele nasáváním vzduchu do kužele požáru skrz vodní clonu. Nicméně ani při tomto jevu nedochází ke snižování výkonu hořáku díky dostatečné vzdálenosti od vodní tryšky.



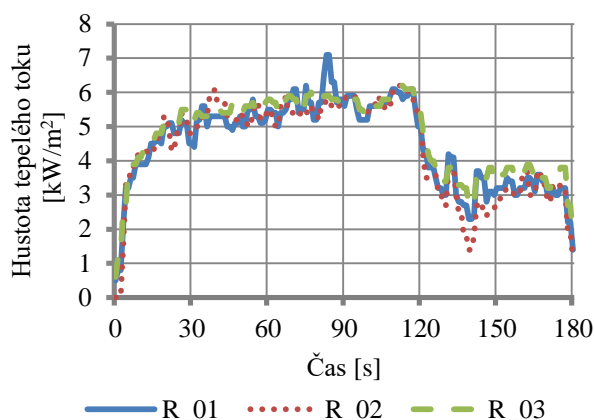
obr. 33: Pohled na laboratorní model při aktivované vodní cloně:

a) vodní clona s tryškou C-FSFH 34; b) vodní clona s tryškou NF 300

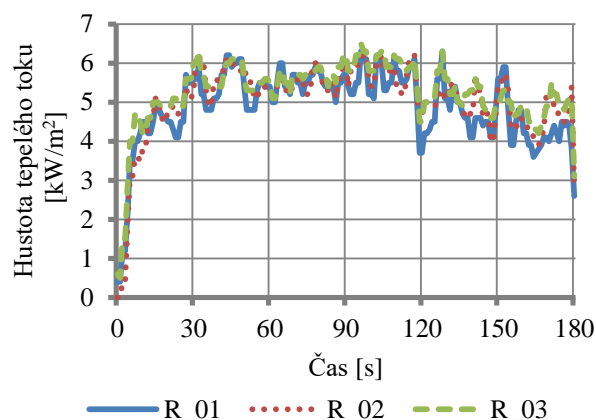
Výsledky naměřených hodnot tepelného toku jsou zobrazeny na obr. 34 a obr. 35. K aktivaci vodní clony dochází v čase 120 vteřin. Ustálená hodnota tepelného toku před aktivací vodní clony dosahuje zhruba 6 kW. Při aktivaci vodní clony se tepelný tok ustálí na hodnotě 3 kW. Radiometry měří po výšce zhruba stejné hodnoty. Vzhledem k nedokonalé stálosti plamene nelze odchylky v rámci desetin kilowatů přisuzovat fyzikálním jevům (např. odpařování kapek, změna rychlosti pohybu kapky, šířka rozstříkového kužele atd.).

Útlum tepelného toku při prostupu vodní clonou při použití tryšky NF 300 je v porovnání s tryškou C-FSFH 34 zhruba poloviční. Relativně nízký útlum tepelného toku je způsoben

především velikostí kapek a hybností kapek. Větší kapky mají vyšší hybnost a doba, kterou stráví v rozstříkovém kuželu je velmi krátká. Během pádu kapky nestíhají odebrat teplo z radiálního záření. Rozstříkový kužel trysky NF 300 je značně nehomogenní a mezi kapkami se nachází prázdné plochy, kudy může záření projít, aniž by bylo ovlivněno kapkami v rozstříkovém kuželu.



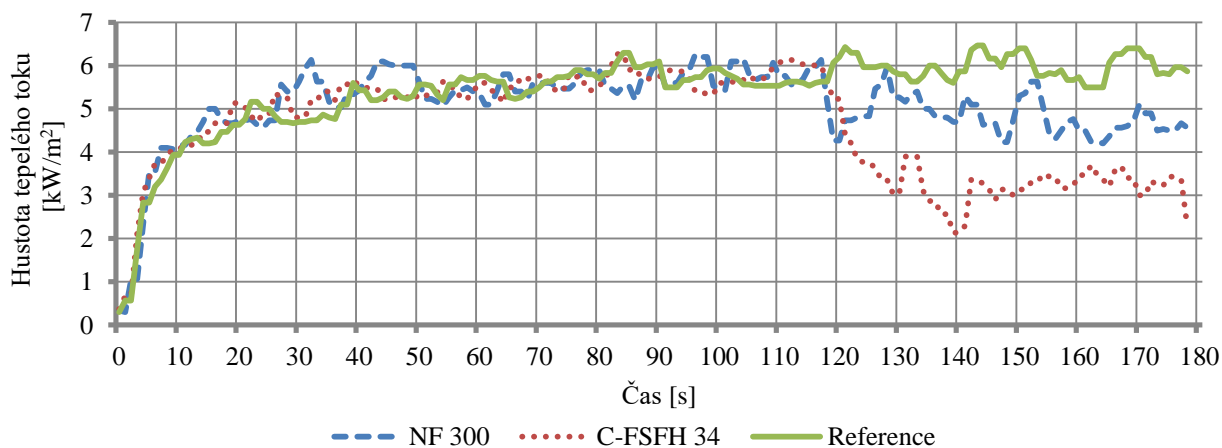
obr. 34: Útlum hustoty tepelného toku při aktivní trysce C-FSFH 34



obr. 35: Útlum hustoty tepelného toku při aktivní trysce NF 300

Vzhledem k obdobným naměřeným hodnotám na jednotlivých radiometrech je uveden další graf průměrného útlumu tepelného toku, viz obr. 36. Pomocí aritmetického průměru je pro každý požární scénář stanovena jedna křivka popisující průměrný útlum tepelného toku. Hodnoty lze dále zobecnit stanovením jediné referenční hodnoty tepelného toku pro časový interval 120 až 180 vteřin. Při referenční požární zkoušce lze uvažovat v tomto intervalu hodnotu tepelného toku 5,98 kW, při použití trysky NF 300 hodnotu 4,76 kW a při použití trysky C-FSFH 34 hodnotu 3,30 kW.

**Účinnost** rozstříkového kužele s kapkami o velikosti v řádu mikrometrů lze uvažovat zhruba 50%, u rozstříku s kapkami o velikosti v řádu milimetrů pak účinnost zhruba 20%. Tyto hodnoty lze uvažovat pouze pro použité typy trysek.



obr. 36: Porovnání průměrné hustoty tepelného toku při všech požárních scénářích

### 3.1.5 Shrnutí a diskuze výsledků

V rámci požárních experimentů provedených za účelem zjištění útlumu tepelného toku při prostupu vodní clonou byl sestaven laboratorní model, jehož cílem byl měřit radiální složku tepelného toku při prostupu vodní clonou. Model byl úspěšně sestaven a byly provedeny tři požární scénáře. Měření prokázala, že na účinnost vodní clony má vliv především velikost kapek nikoli průtok či tlak na trysce. Čím jemnější je rozptyl kapek, tím lépe je tlumeno radiální záření.

Z provedených zkoušek vyplývá, že návrh vodní clony na základě K faktoru není v tomto případě na místě. Důraz by měl být kladen především na velikostní rozptyl kapek v rozstříkovém kuželu. Vzhledem k obecnému nedostatku informací ohledně velikosti kapek u jednotlivých trysek je nutno hledat jiné varianty návrhu vodních clon.

Provádění obdobných měření pro všechny používané trysky na trhu by mohlo zavést detailnější informace o rozstříku do technických listů. Příkladem může být například zavedení hodnoty účinnosti tak, jak je uvedeno v závěru předchozí kapitoly a s nímž počítá i analytický návrh v kapitole 2.6.

## 3.2 CFD model vodní clony

Legislativa v České republice se zabývá vodními clonami pouze okrajově a jejich návrh je často postaven na empirických vzorcích. Návrh se tak může snadno stát neefektivním z hlediska financí i účinnosti pro některá řešení. Autorizovaný inženýr pro požární bezpečnost staveb může dle § 99 Zákona č. 133/1985 Sb. o požární ochraně [83] použít postup odlišný od postupu, který stanoví platná legislativa.

Nástrojem pro požární inženýrství jsou zpravidla fyzikální a matematické modely. Pro řešený příklad je zvolen matematický model typu pole (*CFD – Computational Fluid Dynamics*), jež využívá principu dynamického proudění tekutin. Model lze dále definovat jako deterministický, neboť je založen na matematických rovnicích, jež popisují fyzikální a chemické děje. Základním principem výpočtu je rozdělení výpočtové oblasti do konečného počtu buněk (objemů), na jejichž hranici se odehrávají stavové rovnice, rovnice zachování energie, hmoty a hybnosti [84].

Pro řešený příklad je použit jako výpočetní nástroj software FDS 6.6.0 a vizualizační nástroj SMV 6.6.0. Pro úpravu výsledných dat je použit program Microsoft Excel 2010. Výpočty jsou provedeny na dvou výpočetních stanicích s následujícími parametry: Dell XPS 702X, Intel Core i7 – 2670QM CPU 2,20 GHz, 8,00 GB RAM a HP Z240 Tower Workstation Intel Xeon CPU E3–1240 v5 3,5 GHz, 16,00 GB RAM.<sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> Výkon výpočetní stanice výrazně ovlivňuje výpočetní čas. Vstupní zdrojový kód byl upravován pro daný počet procesorů v závislosti na jejich počtu a je funkční na daných výpočetních stanicích. Vzhledem k citlivosti modelu na velikost jednotlivých výpočetních objemů a využití jednotlivých procesorů je možné, že při použití jiného počtu procesorů nebo jiné verze jádra operačního systému bude výpočet vykazovat numerickou nestabilitu.

Program FDS je pro řešený příklad dostatečně validován a verifikován [57, 85]. Validace byla provedena na základě porovnání výsledků ze software se skutečnými experimentálně naměřenými daty. Díky dostatečné verifikaci je model ověřen a jeho správná funkčnost je zajištěna kontrolou správnosti algoritmů, přesnosti výpočtů apod.

Při modelování je kladen důraz na korektní vstupní data. Hodnoty, které nejsou známy, byly dopočteny případně převzaty z jiné publikace. Výpočty byly opakovány pro dané požární scénáře několikrát v závislosti na přesnosti výpočetní sítě a na přesnosti přenosu radiačního záření. **Cílem modelování je získání výstupních dat odpovídajícím zadaným vstupním údajům, nikoli zpřesňování vstupních údajů v závislosti na výsledcích.** Porovnání naměřených hodnot je porovnáno s laboratorními zkouškami, přičemž odchylky ve výpočtech jsou, pokud je to možné, popsány v závislosti na jevech sledovaných při modelaci.

### 3.2.1 Modelovaný prostor a výpočetní síť

Geometrie modelovaného prostoru odpovídá laboratornímu modelu zobrazenému na obr. 29. Prostor je rozdělen na daný počet buněk, jejichž velikost je určena s pomocí software [86]. Vstupními údaji jsou rozměry modelovaného prostoru a množství uvolněného tepla. Pro všechny požární scénáře je použit hořák o výkonu 150 kW a prostor ve tvaru kvádra o šířce i délce 1,5 m a výšce 2,4 m (obr. 37a).

Výstupem jsou hodnoty velikosti hran jednotlivých výpočetních objemů pro jemnou, středně hrubou a hrubou síť (tab. 12). Na základě spočtených hodnot byla zvolena velikost výpočetního objemu o půdorysných rozměrech 30 x 30 mm a výšce 20 mm.

tab. 12: Velikost hrany výpočetního objemu v modelovaném prostoru

Jemná síť	Středně hrubá síť	Hrubá síť
28 mm	45 mm	112 mm

Pro ověření správnosti výpočtu je zpravidla používán bezrozměrný parametr  $D^*/x$ , který vyjadřuje vztah mezi charakteristickým průměrem požáru a nominální velikostí kontrolního objemu. Rovnice včetně dosazení má následující tvar [87]:

$$\frac{D^*}{x} = \frac{\left( \frac{Q_{celk}}{\rho_{\infty} \cdot c_p \cdot T_{\infty} \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}}{x} = \frac{\left( \frac{150}{1,204 \cdot 1,005 \cdot 293 \cdot \sqrt{9,81}} \right)^{\frac{2}{5}}}{0,03} = 14,97 \quad (43)$$

Kde:  $D^*$  – charakteristický průměrem požáru [–]

$Q_{celk}$  – celkové množství uvolněného tepla [kW]

$\rho_{\infty}$  – hustota okolního vzduchu 1,204 [kg/m<sup>3</sup>]

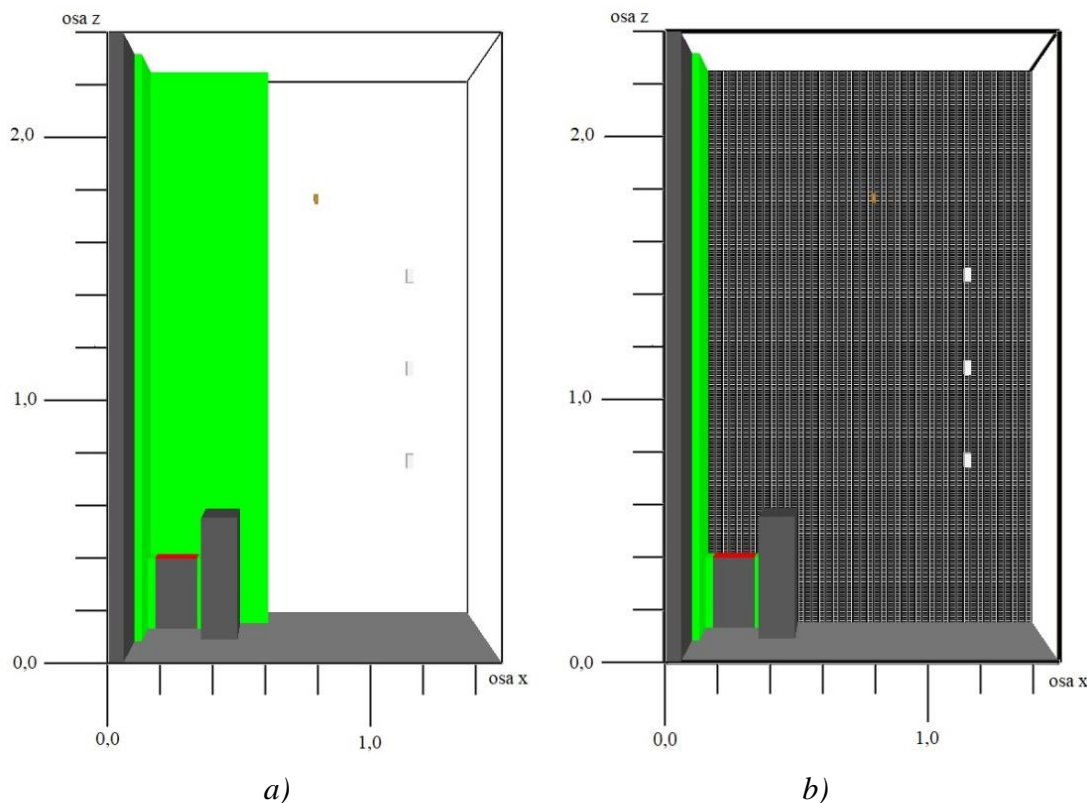
$c_p$  – měrná tepelná kapacita 1,005 [kJ/kg·K]

$T_{\infty}$  – teplota okolního vzduchu 293 [K]

$g$  – gravitační zrychlení  $9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$

$x$  – velikost kontrolního objemu  $[m]$

Bezrozměrný parametr by se měl pohybovat v rozmezí hodnot 4 až 16. Pro řešený příklad vychází hodnota parametru 14,97, čímž spadá do určeného intervalu. Na základě stanovených rozměrů a velikosti buněk je modelovaný prostor rozdělen na 300 000 výpočetních objemů (obr. 37b).



obr. 37: Výpočetní model FDS: a) modelovaný prostor; b) výpočetní síť

### 3.2.2 Vstupní data

Okrajové podmínky prostředí byly stanoveny s ohledem na podmínky při realizaci požárních zkoušek laboratorního modelu. Počáteční teplota okolního vzduchu je stanovena na  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $293 \text{ K}$ ) a počáteční proudění vzduchu je nulové.

V prostoru CFD modelu jsou zanedbány některé konstrukce a jevy, které se vyskytují v laboratorním modelu. V CFD modelu se na sdílení přenosu tepla podílejí pouze modelované konstrukce a prvky. Oproti laboratornímu modelu zde chybí například kovový stojan pro uchycení trysky nebo uchycení radiometrů a termočlánků. Dále jsou zanedbány veškeré rozvody sloužící pro sběr dat, k přívodu a odvodu vody k radiometrům nebo k přívodu vody k trysce. Vzhledem ke sdílení tepla radiací mezi všemi okolními povrchy je nutno uvést, že při laboratorním modelu se na sdílení tepla mohly podílet i konstrukce, které se vyskytují mimo modelovanou oblast CFD modelu. Zanedbáním těchto konstrukcí je dosaženo zjednodušení modelovaného prostoru, přičemž se předpokládá, že jejich absence nemá podstatný vliv na

výsledná data. Dále je zanedbán odtah vzduchu pomocí ventilátoru, jež byl nastaven na minimální výkon (30%).

Materiálové vlastnosti jednotlivých konstrukcí jsou stanoveny v tab. 13. Povrchová vrstva rohového panelu je modelována z minerální vaty, podlaha je uvažována jako betonová. Z hliníku je modelován prostor okolo radiometrů.

tab. 13: Materiálové vlastnosti modelovaných konstrukcí<sup>26</sup>

<i>Materiál</i>	<i>Měrná tepelná kapacita [kJ/kg·K]</i>	<i>Součinitel tepelné vodivosti [W/m<sup>2</sup>·K]</i>	<i>Objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>Emisivita [-]</i>
<i>Minerální vata</i>	0,96	0,04	100	0,9 (defaultně)
<i>Beton</i>	1,02	1,43	2300	0,85
<i>Hliník</i>	0,87	204	2700	0,09

Přestože je hliníkových konstrukcí v modelu minimum, jejich podíl na sdílení radiace může být značný a proto jsou pro přesnost výpočtu uvažovány. Hliníkové konstrukce se na procesu sdílení tepla nepodílejí jen radiací. Nechtěným jevem při instalaci radiometrů je sdílení tepla vedením v hliníkové konstrukci a následný možný přestup do těla radiometru. Radiometr tak může být, byť minimálně, ovlivněn ohřátým povrchem hliníku.

Obecně nelze naměřené hodnoty pomocí radiometru uvažovat za hodnoty sdílené čistě radiačním zářením. Mírně ohřátý vzduch při laboratorních modelech přispívá ke zvýšení přestupu tepla mezi proudícím vzduchem a radiometrem. Tepelný tok sdílený přestupem tepla prouděním na povrchu radiometru je závislý na rozdílu teploty vzduchu a teploty neustále chlazeného radiometru.

Na tuto skutečnost upozorňuje i uživatelský návod [87] pro software FDS. Proto je modelovaný radiometr nastaven pomocí příkazu „GAUGE HEAT FLUX“ tak, aby měřil jak tepelný tok sdílený radiací, tak i konvekcí [87]:

$$q_{gauge} = \varepsilon_{gauge}(q_{inc,rad} - \sigma T_{gauge}^4) + h(T_{gas} - T_{gauge}) \quad (44)$$

Kde:  $q_{gauge}$  – celkový tepelný tok dopadající na radiometr [kW]

$\varepsilon_{gauge}$  – emisivita radiometru [-]

$q_{inc,rad}$  – dopadající radiační záření [kW]

$T_{gauge}$  – teplota radiometru [K]

$h$  – součinitel přestupu tepla prouděním [W/m<sup>2</sup>·K]

$T_{gas}$  – teplota okolního vzduchu [K]

<sup>26</sup> Hodnoty jsou převzaty z technických tabulek a katalogů stavebních materiálů.



### 3.2.3 Specifika výpočetního modelu

Výkon propanového hořáku je určen hodnotou 150 kW, jež odpovídá množství tepla uvolněného z 1 m<sup>2</sup> hořící plochy. Pro získání absolutní hodnoty tepelného výkonu hořáku je nutno výkon podělit hořící plochou. Rovnice a její dosazení pro zjištění množství uvolněného tepla má tvar:

$$HRR = \frac{HRRPUA}{A} = \frac{150}{0,18 \cdot 0,18} = 4630 \quad (45)$$

Kde:  $HRR$  – množství uvolněného tepla [kW]

$HRRPUA$  – množství uvolněného tepla z jednotkové plochy [kW/m<sup>2</sup>]

$A$  – hořící plocha [m<sup>2</sup>]

V rámci modelu je uvolněné teplo sdíleno přirozeně kondukcí, konvekcí a radiací. Největší část tepla je sdílena ve formě proudění, neboť díky rozdílným teplotám vzduchu v modelu je většina tepla odvedena mimo modelovanou oblast (obdobně jako u laboratorních zkoušek). Měření hodnot tepelného toku je detailněji zaměřeno na modelování a měření radiální složky, případně konvekční složky, pokud i tato ovlivňuje naměřené hodnoty tepelného toku. Sdílení tepla kondukcí je v modelu uvažováno, nicméně pro model vodní clony nehraje podstatnou roli.

Řešení radiace v rámci CFD modelu je založeno na metodě koncových objemů *Finite Volume Method* – *FVM*. Metoda se zabývá řešením rovnice RTE (13), přičemž její princip spočívá v řešení této rovnice v každém výpočetním objemu pro dané okrajové podmínky. Detailněji viz kapitolu 2.4.5 a kapitolu 2.5.2.

Rovnice RTE řeší sdílení radičního záření velmi komplexně a její řešení zabírá zhruba 30 % výpočetního času. V rámci software FDS existuje několik způsobů, kterými lze zlepšit prostorovou a časovou přesnost metody FVM při řešení rovnice RTE. Defaultně je rovnice řešena pro 100 směrových úhlů, pod nimiž jsou vysílány jednotlivé paprsky. Pro zpřesnění výpočtů v rámci diplomové práce je hodnota navýšena na trojnásobek pomocí příkazu „NUMBER\_RADIATION\_ANGLES“, tedy 300 směrových úhlů.

Pro minimalizaci výpočetního času je model rozdělen do několika sítí (v závislosti na počtu jader v procesoru). Vzhledem k náchylnosti rovnice RTE na vstupní okrajové podmínky je navýšen počet iterací v jednom časovém kroku na dvojnásobek pomocí příkazu „RADIATION\_ITERATIONS“. Rovnice RTE je plně aktualizována každých 15 časových kroků – defaultně nastaveno. Zpřesnění výpočtu mají za následek zvýšení časové náročnosti výpočtu.

Modelování výstřikových charakteristik trysek je založeno na vstupních datech z technických listů uvedených v tab. 11. Zdrojové kódy, jež definují výstřikové charakteristiky trysek, jsou uvedeny v příloze této práce.

### 3.2.4 Porovnání laboratorního a CFD modelu referenční požární zkoušky

Referenční zkouška simuluje laboratorní model bez aktivace vodní clony. Jsou simulovány tři radiometry měřící celkový dopadající tepelný tok a tři termočlánky o průměru 1,5 mm, viz laboratorní model. Naměřené hodnoty tepelného toku a teplot jsou zobrazeny na obr. 38.

Průběh záznamu trval shodně jako u laboratorního modelu 180 vteřin. Vzhledem k objemnému množství získaných dat a většímu rozptylu dat je v grafech pro tepelný tok z CFD modelu zvýrazněna hodnota 10 % klouzavého průměru<sup>27</sup>.

tab. 14: Porovnání průměrných ustálených hodnot tepelného toku

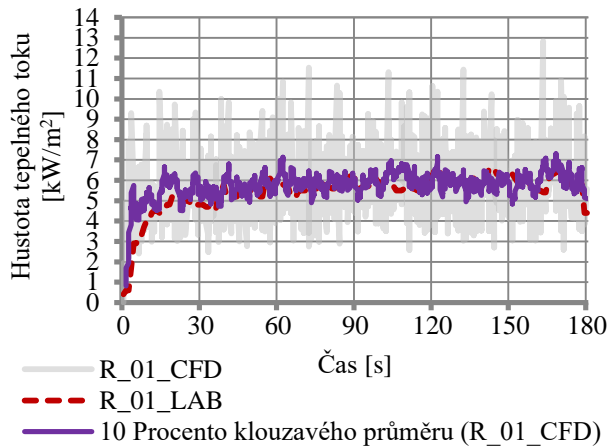
<i>Radiometr</i>	<i>Laboratorní model</i>	<i>CFD model</i>	<i>Odchylka</i>
<i>R_01</i>	<i>5,9 kW</i>	<i>6 kW</i>	<i>0,1 kW</i>
<i>R_02</i>	<i>5,6 kW</i>	<i>5,7 kW</i>	<i>0,1 kW</i>
<i>R_03</i>	<i>6 kW</i>	<i>4,2 kW</i>	<i>1,8 kW</i>

Modelovaný tepelný tok odpovídá naměřeným hodnotám při reálné požární zkoušce pro radiometry R\_01 a R\_02 s minimální odchylkou. Radiometr R\_03 měří v CFD modelu hodnoty tepelného toku zhruba o 2 kW nižší. Vzhledem ke shodě u dvou výše umístěných radiometrů není předpokládáno, že by ve vstupním zdrojovém kódu byla chyba. Odchylka je zřejmě spojena s řešením radiace v daném prostoru. Nejnižší položený radiometr se nachází pouze 20 cm nad hořící plochou hořáku a z velké části tak není namířen přímo na plameny hořáku na rozdíl od dvojice radiometrů umístěných výše. Počet modelovaných vyzářených paprsků je tak menší a jsou tedy měřeny i nižší hodnoty tepelného toku. Hodnota tepelného toku na nejnižší položeném radiometru je nižší také vzhledem k průběhu teplot v prostoru, kde s rostoucí výškou roste i teplota vzduchu. Pro ustálený tepelný tok (od 60. do 180. vteřiny) je v tab. 14 uvedeno porovnání průměrných hodnot včetně odchylky.

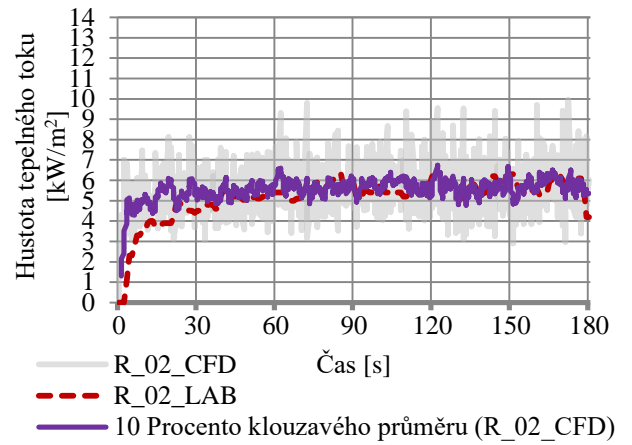
Druhou sledovanou veličinou je průběh teplot na jednotlivých termočláncích. Model potvrzuje rostoucí teplotu po výšce prostoru. Rozdíly v průběhu teplot jsou minimální obdobně jako u hodnot naměřených při reálném experimentu. Pro všechny termočlánky platí, že hodnoty měřené při reálné zkoušce převyšují ty modelované v řádech jednotek. Vzhledem k minimálnímu rozdílu není tento rozdíl pokládán za podstatný.

Naměřené hodnoty tepelného toku a teplot dosahují dostatečně shodných hodnot jako u laboratorního experimentu. Na základě úspěšně namodelované referenční zkoušky je možné provést modelaci požárních scénářů s aktivní vodní clonou. Mimo modelu trysky a jejich vlastností zůstává model pro následující scénáře nezměněn.

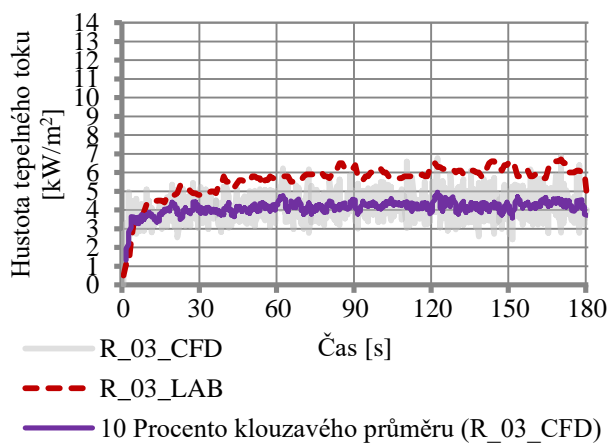
<sup>27</sup> Klouzavý průměr zobrazuje dlouhodobý trend v dané oblasti. V případě 10% klouzavého průměru se jedná o aritmetický průměr deseti po sobě jdoucích hodnot.



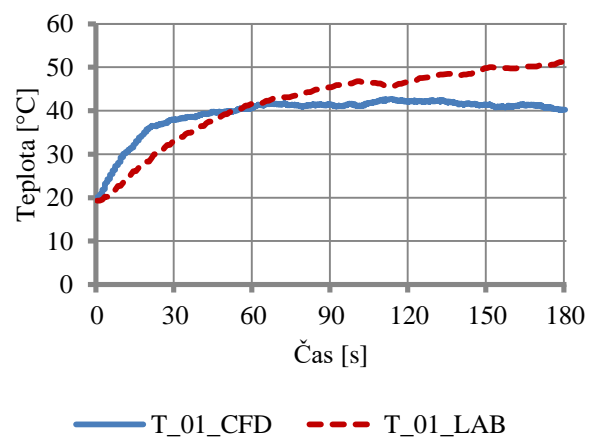
a)



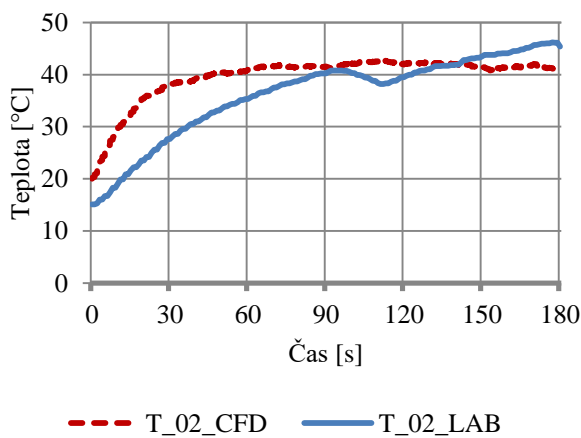
b)



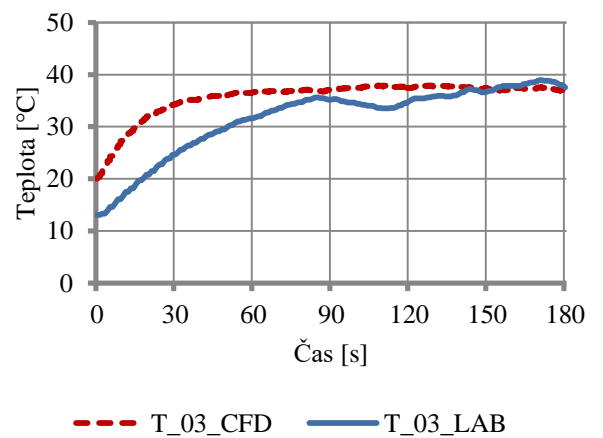
c)



d)



e)



f)

Legenda: LAB = výsledky laboratorního měření; CFD = výsledky CFD modelování

obr. 38: Porovnání hodnot tepelného toku a teploty: a) radiometr R\_01; b) radiometr R\_02; c) radiometr R\_03; d) termočlánek T\_01; e) termočlánek T\_02; f) termočlánek T\_03

### 3.2.5 Porovnání laboratorního a CFD modelu s tryskou NF 300

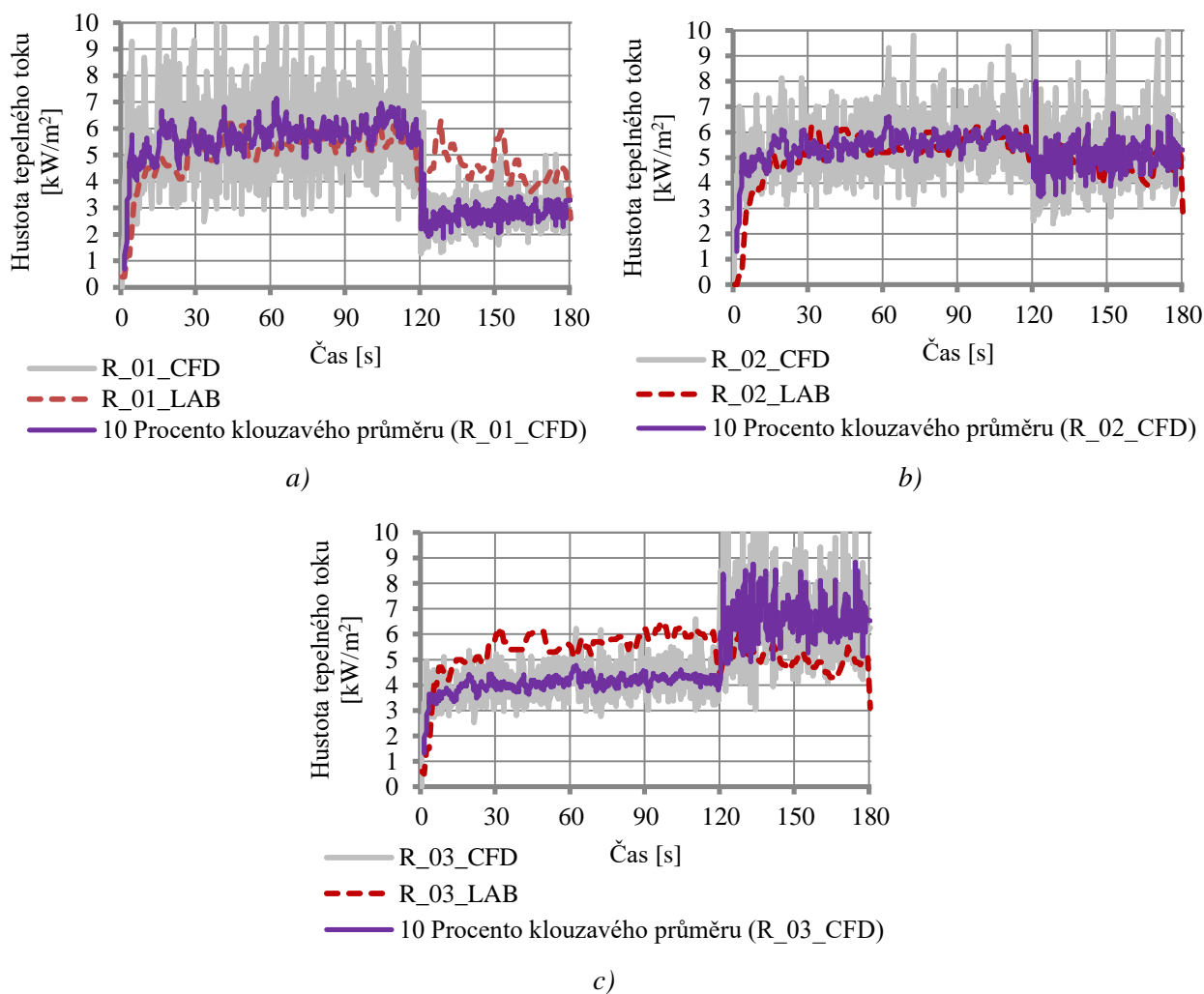
Hybnost kapek je výrazným faktorem ovlivňujícím prostup tepelného toku v průběhu požární zkoušky s aktivovanou vodní clonou s tryskou NF 300. V CFD modelu jsou uvažovány kapky o střední hodnotě  $D_{v0,5} = 2000 \mu\text{m}$ , přičemž spodní hranice průměru kapek byla  $1000 \mu\text{m}$  a horní hranice  $3000 \mu\text{m}$ . Hodnoty jsou zvoleny s ohledem na reálné chování rozstříkovaného kužele při požární zkoušce a velikosti kapek u klasických sprinklerových hlavíc.

Rozstříkový kužel je v modelu definován několika příkazy, nicméně iniciace proudu a skutečný tvar rozstříku ovlivňuje kombinace několika základních. Iniciace proudu je závislá na velikosti průměru otvoru trysky díky příkazu „ORIFICE\_DIAMETER“ = 0,0107 m. Na základě pracovního tlaku „OPERATING\_PRESSURE“ = 13 bar a K faktoru „K\_FACTOR“ = 68,4 je určena počáteční rychlost kapky. Počáteční rychlost je vypočtena dělením průtoku průměrem otvoru trysky. Počáteční pozice kapek je určena příkazem „OFFSET“ = 0,05 m, jež označuje průměr polokoule, z níž jsou kapky vystřikovány. Definice velikosti průměru polokoule hraje roli zejména ve vztahu k velikosti výpočetních objemů. Pokud by hodnota „OFFSET“ byla menší než hrana výpočetního objemu, pak by byly všechny kapky iniciovány v jednom objemu, což by mohlo vést k numerické nestabilitě nebo deformaci výstříkového kužele.

Tvar rozstříkového kuželu je eliptický, určený na základě technického listu výrobce. Úhel rozstříku v delším směru osy elipsy dosahuje  $80^\circ$ . Distribuce kapek je nastavena jako rovnoměrná s ohledem na uvedení této charakteristiky v technickém listu výrobce a pozorování při reálné požární zkoušce.

Časová osa požárního scénáře v CFD modelu odpovídá požární zkoušce. Po dobu 120 vteřin je uvažováno hoření propanového hořáku, poté dochází k iniciaci vodní clony. Požární scénář končí ve 180. vteřině. Hodnoty tepelného toku naměřené při reálné požární zkoušce a v CFD modelu jsou porovnány v grafech na obr. 39.

Po aktivaci trysky ve 120. vteřině dochází k patrným změnám průběhu tepelného toku na jednotlivých radiometrech. Největší pokles tepelného toku zobrazuje nejvýše položený radiometr R\_01. Radiometr R\_02 ve výšce 1,1 m vyhodnocuje mírný pokles po aktivaci vodní clony a vykazuje tak nejlepší shodu s naměřenými hodnotami při laboratorním experimentu. Naopak radiometr R\_03 umístěný 0,7 m nad úrovní podlahy zobrazuje hodnoty zhruba o 2,5 kW vyšší než před aktivací vodní clony.

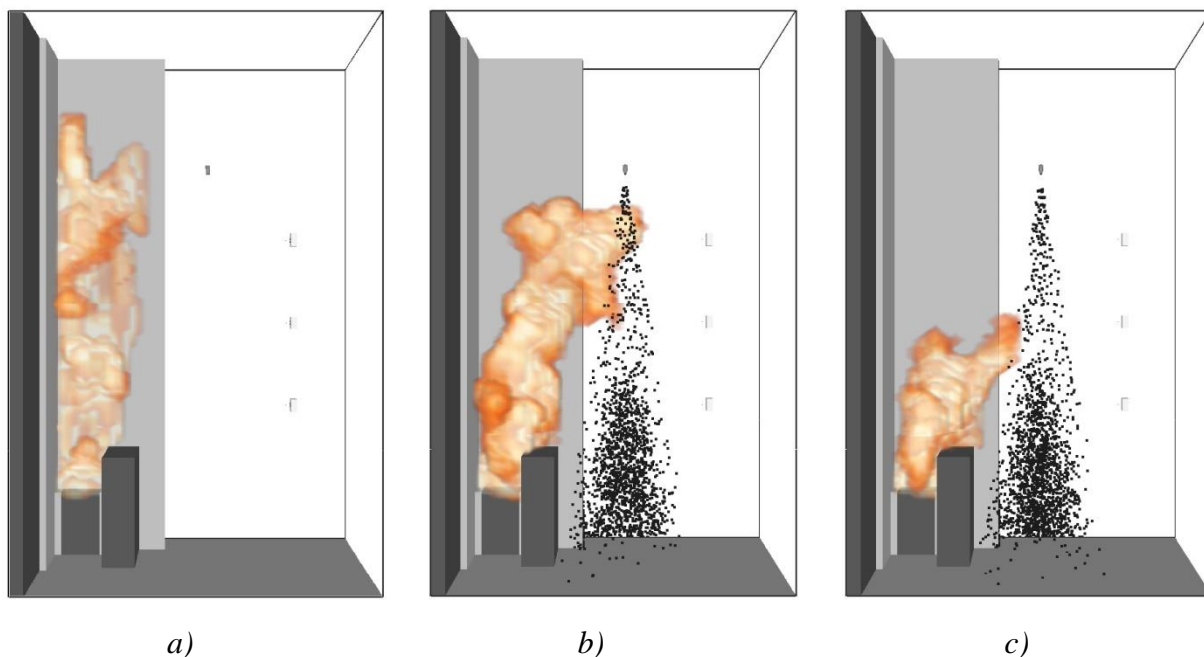


*Legenda: LAB = výsledky laboratorního měření; CFD = výsledky CFD modelování*

obr. 39: Porovnání hodnot tepelného toku při aktivní trysce NF300: a) radiometr R\_01; b) radiometr R\_02; c) radiometr R\_03

Z průběhu tepelného toku je patrné, že významnou roli hraje výšková poloha jednotlivých zařízení (hořáku, trysky, radiometrů). Pro pochopení naměřených hodnot při aktivní vodní cloně s tryskou NF 300 je uveden obr. 40, na němž jsou zobrazeny jednotlivé fáze chování hořáku v závislosti na aktivaci vodní clony.

Ve fázi volného hoření bez aktivní vodní clony dosahují plameny výšky okolo 2 m. Vzhledem k rohové dispozici je do kuželu požáru nasáván vzduch pouze ze dvou stran a plameny jsou tak odvráceny směrem ke stěnám panelu. V této fázi jsou nejvyšší hodnoty (zhruba 5,5 kW) měřeny na středním a nejvyšším radiometru. Hodnoty okolo 4 kW jsou měřeny na radiometru osazeném nejnižše. K nejméně intenzivnímu hoření plynu (propanu) dochází zhruba od poloviny výšky plamene. V těchto místech má plyn dostatek čerstvého vzduchu, který umožňuje proces chemických reakcí spalování.



obr. 40: Fáze požárního scénáře s tryskou NF 300: a) fáze hoření bez vodní clony; b) aktivace vodní clony; c) fáze hoření s aktivní vodní clonou

Při aktivaci vodní clony dochází ke změně proudění v blízkosti hořáku. Kapky o průměru v řádu milimetrů mají relativně vysokou hybnost a rozstříkový kužel má větší kinetickou energii než vztaková síla daná rozdílnou hustotou vzduchu po výšce modelu. Následkem je odklonění kužele požáru od panelu a posun plamenů směrem k trysce. Rozstříkový kužel nasává čerstvý vzduch, který se pohybuje ve směru kapek a strhává s sebou i plameny. Po ustálení proudění vzduchu při aktivní vodní cloně je k propanovému hořáku nuceně přiváděno více vzduchu. Následkem je spalování v nižších vrstvách, přičemž plameny pak dosahují zhruba poloviční výšky, než před aktivací vodní clony.

Snížením zóny plamenného hoření je zdroj radiačního záření umístěn blíže nejnižší položenému radiometru R\_01. V závislosti na velikosti plamenů je pak potvrzeno, že radiometr R\_01 měří nejvyšší hodnoty tepelného toku při aktivní vodní cloně, zatímco před aktivací je tomu opačně.

U průběhu tepelného toku jsou patrné značné výkyvy v měřených hodnotách. Nestálost hodnot je způsobena značnou fluktuací plamene a nestabilitou proudění závislou mimo jiné na hybnosti kapek v rozstříkovém kuželu. Hodnoty tepelného toku jsou proto v grafech na obr. 39 vyhlazeny 10% klouzavým průměrem.

Účinnost útlumu radiace z hlediska absorpce či rozptylu záření v rozstříku zcela jistě má svoji roli, nicméně vzhledem k hybnosti spreje je daleko významnějším faktorem proudění vzduchu v okolí vodní clony. Vzhledem k relativně malé velikosti modelu lze předpokládat, že při skutečném požáru bude vliv proudění mít ještě větší roli, neboť intenzita změny proudění je závislá jak na rozstříkovém kuželu vodní clony, tak na teplotách v jejím okolí. Z širšího hlediska

lze konstatovat, že dochází k útlumu tepelného toku, nicméně tento je způsoben zejména pohybem vzduchu mezi plamenným hořením a rozstříkovým kuželem.

Porovnání průměrných hodnot s požárním experimentem je uvedeno v tab. 15. Hodnoty jsou uvedeny pro časový interval 120 až 180 vteřin, tj. při aktivní trysce NF 300. Hodnoty je nelze uvažovat jako přímo vypovídající, neboť jsou zprůměrovány na základě měření pomocí tří radiometrů. Pro komplexní porovnání by bylo nutné měřit útlum tepelného toku ve všech bodech rozstříkového kužele.

tab. 15: Porovnání průměrných hodnot hustoty tepelného toku při aktivní trysce NF 300

	<i>Laboratorní model</i>	<i>CFD model</i>	<i>Odchylka</i>
<i>R_01</i>	<i>4,5 kW</i>	<i>2,9 kW</i>	<i>1,6 kW</i>
<i>R_02</i>	<i>4,8 kW</i>	<i>5,1 kW</i>	<i>-0,3 kW</i>
<i>R_03</i>	<i>5,0 kW</i>	<i>6,7 kW</i>	<i>-1,7 kW</i>
<i>Celkový utlumený průměrný tepelný tok</i>	<i>4,8 kW</i>	<i>4,9 kW</i>	<i>-0,1 kW</i>
<i>Celkový tepelný tok při referenční zkoušce</i>	<i>6,0 kW</i>	<i>5,3 kW</i>	<i>0,7 kW</i>
<i>Účinnost vodní clony</i>	<i>20 %</i>	<i>10%</i>	<i>-</i>

Rozdíly v hodnotách tepelného toku mezi laboratorním a CFD modelem jsou dány chováním hořáku při aktivaci vodní clony. Přestože je v obou modelech definován výkon hořáku na konstantní hodnotu 150 kW, v reálné zkoušce je možné snižování výkonu hořáku vzhledem k nedostatku přístupu kyslíku při aktivaci vodní clony. V CFD modelu je tento nedostatek výrazně kompenzován pohybem kužele směrem k vodní cloně. Vzhledem k definici hořáku v CFD modelu pomocí příkazu HRR není možné výkon snižovat na základě hašení, jakožto vedlejšího efektu vodní clony<sup>28</sup>. Tyto jevy mají za následek vyšší měřené hodnoty tepelného toku a tedy i nižší účinnost vodní clony.

Pro přesnější modelování by bylo nutné znát jednotlivé charakteristiky rozstříkového kužele, např. velikostní rozdělení kapek, počáteční rychlost kapek apod. Neznámé hodnoty byly zpravidla ponechány na defaultní hodnotu, která ovšem nemusí nutně vystihovat použitou trysku.

### 3.2.6 Porovnání laboratorního a CFD modelu s tryskou C–FSFH 34

Tryska C–FSFH 34 je specifická menší velikostí kapek. Dle technického listu lze uvažovat střední hodnotu  $D_{v0,5} = 70 \mu\text{m}$ . Spodní hranice průměru kapek je stanovena na  $20 \mu\text{m}$ <sup>29</sup>, horní na

<sup>28</sup> Hašení hořáku pomocí vodní clony je v obou modelech zabráněno, nicméně při reálné požární zkoušce nelze zcela vyloučit absenci kapek v prostoru plamenného hoření.

<sup>29</sup> Při uvažování kapek menších než  $20 \mu\text{m}$  dochází při výpočtu k numerické nestabilitě. Problematika výpočtu daného modelu je řešena pod vláknem „Numerical instability in particle energy transport, Y\_EQUIL < Y\_GAS\_NEW“. Vlákno je dostupné na: <https://groups.google.com/forum/#!topic/fds-smv/sSnW8yfMgCQ>.

1000  $\mu\text{m}$ . Na rozdíl od trysky NF300 byla počáteční rychlost kapek stanovena na hodnotu 31,8 m/s bez dalšího výpočtu. Hodnota rychlosti byla převzata z dokumentu [88], ve kterém byly řešeny vybrané charakteristiky rozstříkového kužele mimo jiné i pro trysku C-FSFH 34.

Pro střední objemovou hodnotu  $D_{v0,5}$  a mezní hodnoty průměrů kapek byla stanovena Rosin-Rammlerova distribuce, viz [88], nicméně rozsah distribuce definovaný příkazem „GAMMA\_D“, byl stanoven na defaultní hodnotu 2,4. Mezi sledovanými hodnotami byl v průběhu modelování i průměr kapek, přičemž lze konstatovat, že při zadaných vstupních hodnotách se velikost kapek pohybuje zpravidla od 20  $\mu\text{m}$  do 300  $\mu\text{m}$ . Větší počet kapek pak dosahuje průměru pod 70  $\mu\text{m}$ , což potvrzuje nastavenou hodnotu středního objemového průměru  $D_{v0,5}$ . Větší počet kapek o průměru menším než  $D_{v0,5}$  je vyrovnáván menším počtem kapek o průměru větším. Kapky o velikosti nad 300  $\mu\text{m}$  se vyskytují spíše ojediněle.

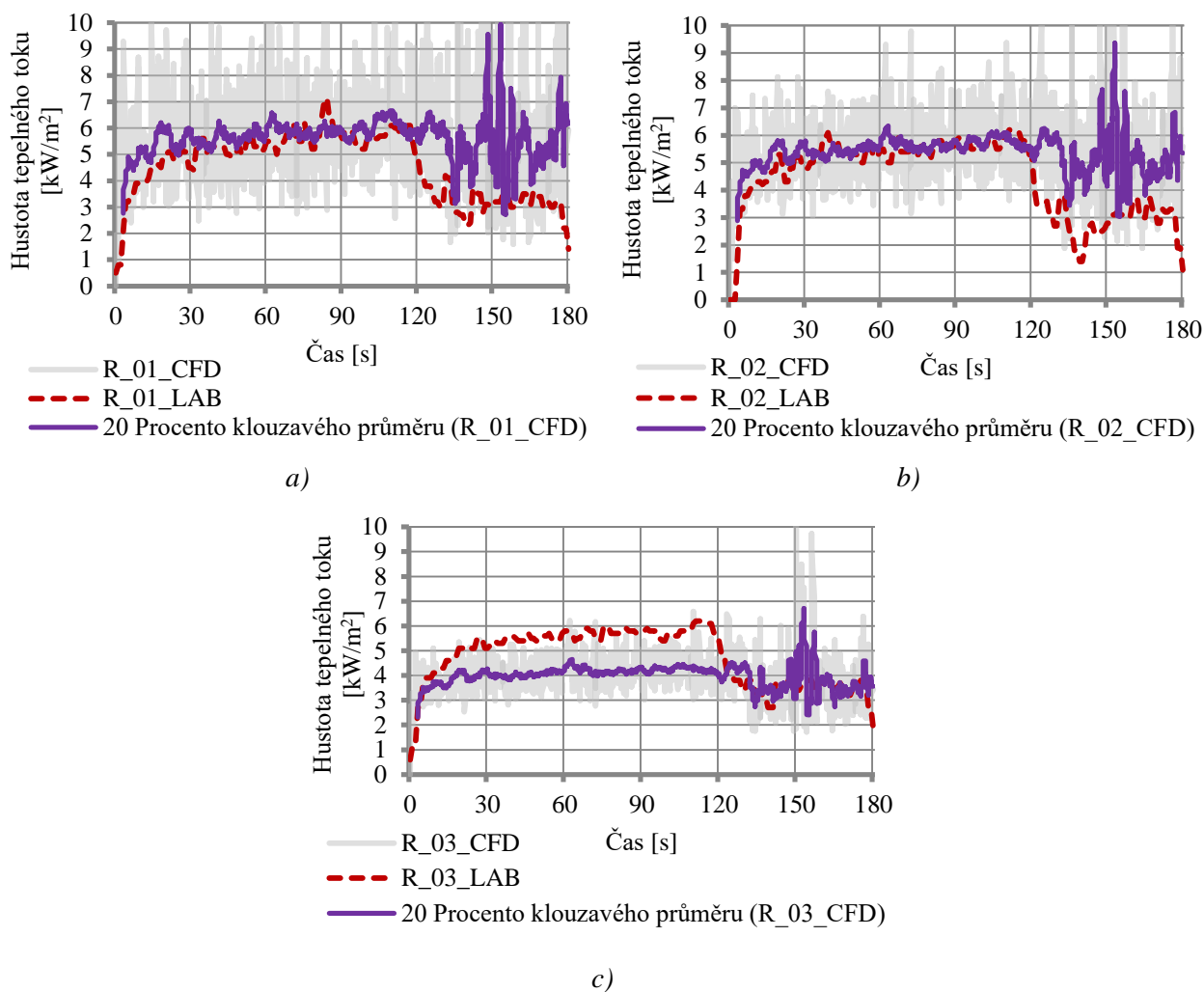
Požární scénář s vodní clonou při použití trysky C-FSFH 34 má identický průběh jako scénář s předchozí tryskou. Ve 120. vteřině dochází k aktivaci vodní clony po dobu 60 vteřin. Modelovaná požární zkouška končí ve 180. vteřině. Hodnoty tepelného toku naměřené při reálné požární zkoušce a v CFD modelu jsou porovnány v grafech na obr. 41.

Radiometry R\_01 (obr. 41a) a R\_02 (obr. 41b) vykazují při aktivní vodní cloně značný rozptyl naměřených hodnot. Tepelný tok se pohybuje od 2 do 15 kW, přičemž tato data jsou záměrně zkreslena díky 20 % klouzavého průměru. Výkyvy jsou způsobeny deformací rozstříkového kužele, díky nasávání plamenů hořáku směrem k radiometrům. Díky fluktuaci plamene a neustálé tvorbě nových kapek dochází ke značným výkyvům tepelného toku v této oblasti.

Na radiometru R\_03 (obr. 41c) je patrný útlum tepelného toku na hodnotu zhruba 3,5 kW. Útlum je způsoben nasáváním kapek ve spodní části rozstříku do plamenů hořáku. Kapky absorbují značnou část tepla, kterou odvedou při vypaření směrem vzhůru a zároveň je v tomto prostoru rozstříkový kužel natolik široký, aby alespoň částečně zabránil průniku radiačního záření.

Proudění vzduchu, jež ovlivňuje tvar rozstříkového kužele, je zobrazeno na obr. 42b. Proudění je zobrazeno na rovině XZ ve vzdálenosti  $Y = 1,08$ , tj. v ose plynového hořáku. Rychlost je zobrazena pomocí barevné škály, přičemž kladný směr proudění (kladný směr osy  $x$ ) je uvažován doprava. Záporné hodnoty jsou pak uvažovány proti směru osy  $x$ .



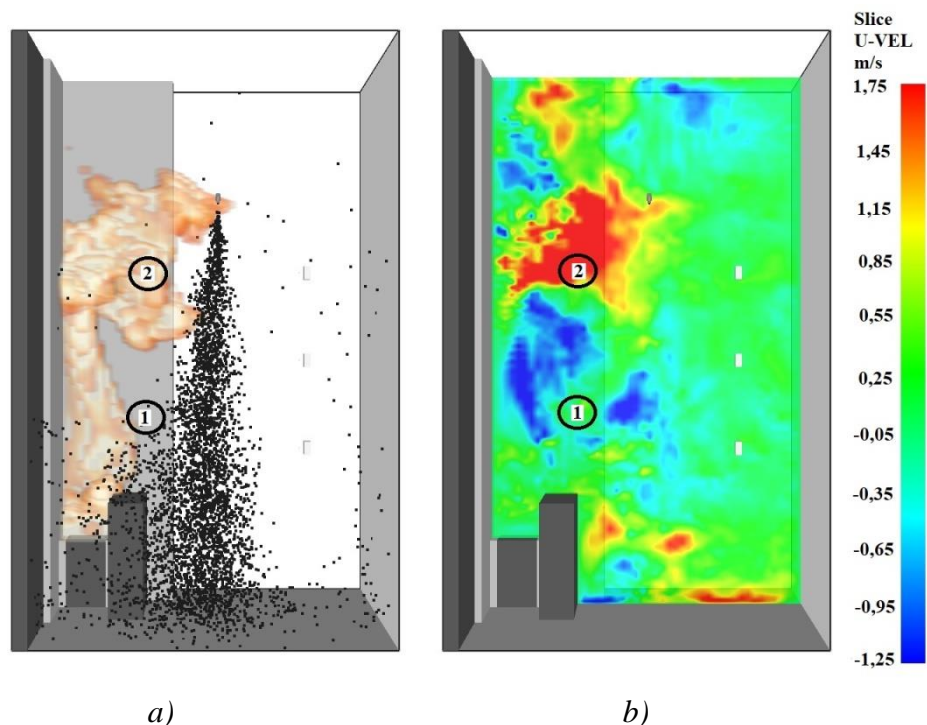


Legenda: LAB = výsledky laboratorního měření; CFD = výsledky CFD modelování

obr. 41: Porovnání hodnot tepelného toku při aktivní trysce C-FSFH 34: a) radiometr R\_01; b) radiometr R\_02; c) radiometr R\_03

Na obr. 42 jsou zobrazeny dvě oblasti, jež reprezentují dva dominantní směry proudění. V oblasti „1“ převládá nasávání rozstříkového kužele směrem ke zdroji hoření. Tímto jevem je ovlivněn jak tvar rozstříku, tak způsob proudění v daném prostoru. Ve spodní části je vztlaková síla hoření dostatečně vysoká na to, aby deformovala rozstříkový kužel. V této oblasti jsou plameny hořáku odsunuty od radiometrů a směřují podél obvodového panelu směrem vzhůru.

V oblasti „2“ je situace opačná. Rozstříkový kužel má při své iniciaci dostatečnou energii pro odklon plamenů od obvodového panelu a následný posun směrem k rozstříkovému kuželu. Rychlost proudění v této oblasti dosahuje hodnot až 1,75 m/s ve směru osy x.



obr. 42: CFD model vodní clony s tryskou C-FSFH 34: a) Pohled na průběh modelace; b) Proudění vzduchu v řezu  $Y=1,08$

Na obr. 42a je dále patrný pohyb kapek i mimo rozstříkový kužel. Jedná se o kapky o velikosti v řádu jednotek až desítek mikrometrů, které jsou více ovlivňovány prouděním vzduchu než gravitační silou. Tento jev podtrhává citlivost rozstříkového kužele na proudění vzduchu v blízkosti vodní clony.

Obdobně jako u požárního scénáře s tryskou NF 300, jsou i zde porovnány průměrné hodnoty utlumeného tepelného toku (tab. 16). Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, hodnoty je nutno uvažovat s dostatečným odstupem, neboť pro komplexní porovnání je nutno měřit útlum tepelného toku ve všech bodech rozstříkového kužele. Uvedené hodnoty v tab. 16 jsou stanoveny z aritmetického průměru od 120. do 180. vteřiny měření a modelace.

tab. 16: Porovnání průměrných hodnot tepelného toku při aktivní trysce C-FSFH 34

	<i>Laboratorní model</i>	<i>CFD model</i>	<i>Odchylka</i>
<i>R_01</i>	<i>3,2 kW</i>	<i>5,4 kW</i>	<i>-2,2 kW</i>
<i>R_02</i>	<i>3,0 kW</i>	<i>5,1 kW</i>	<i>-2,1 kW</i>
<i>R_03</i>	<i>3,6 kW</i>	<i>3,7 kW</i>	<i>-0,1 kW</i>
<i>Celkový utlumený průměrný tepelný tok</i>	<i>3,3 kW</i>	<i>4,8 kW</i>	<i>-1,5 kW</i>
<i>Celkový tepelný tok při referenční zkoušce</i>	<i>5,9 kW</i>	<i>5,3 kW</i>	<i>0,4 kW</i>
<i>Účinnost vodní clony</i>	<i>54 %</i>	<i>11%</i>	<i>–</i>

Při CFD modelování je účinnost vodní clony s tryskou C-FSFH 34 řádově nižší. Rozdíly v laboratorních a modelovaných hodnotách tepelného toku mohou být způsobeny nepřesnými vstupními údaji o trysce, nicméně tvar rozstříku i velikost kapek v CFD modelu věrohodně odpovídají sledovaným jevům při laboratorní zkoušce. Obdobně jako u předchozí trysky byly některé hodnoty ponechány jako defaultní, neboť jsou neznámé a jejich odhad by nemohl být založen na relevantním základu.

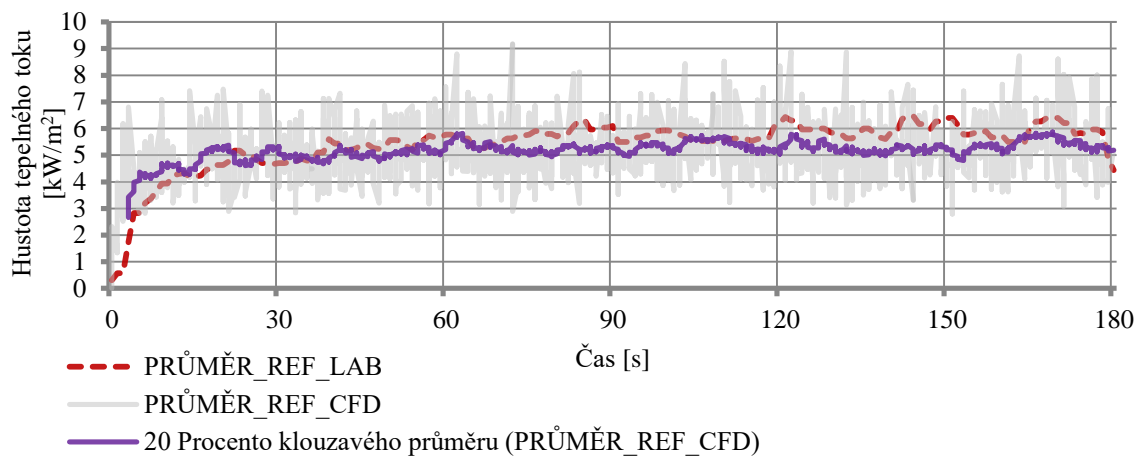
U požárních scénářů s aktivní vodní clonou je při CFD modelování patrná citlivost na proudění vzduchu v modelu. Proudění pak do značné míry ovlivňuje výsledky tepelného toku. Vliv proudění byl patrný i u průběhu laboratorního měření, nicméně v důsledku omezení nasávání vzduchu do kužele požáru byl požár spíše tlumen. V CFD modelu je tlumení hoření kompenzováno deformací plamenného hoření i rozstříkového kužele za účelem vygenerování dostatečného výkonu.

### 3.2.7 Shrnutí a diskuze výsledků

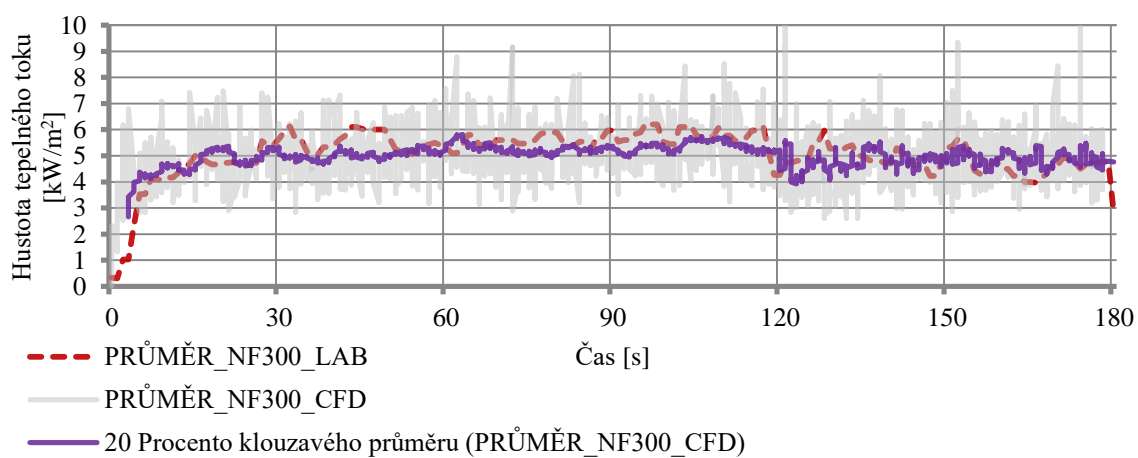
V rámci měření útlumu tepelného toku při prostupu vodní clonou byly provedeny tři laboratorní požární zkoušky a následně tři CFD modelace. Zjevným výsledkem laboratorních zkoušek byla vyšší účinnost trysky s menšími kapkami (v rámci desítek mikrometrů) než účinnost trysky s kapkami o velikosti v rámci milimetrů. Při trysce C-FSFH 34 klesl průměrný tepelný tok zhruba o 50 %, u trysky NF 300 pak zhruba jen o 20 %.

Při CFD modelování byly simulovány identické požární scénáře. Při referenční zkoušce bylo dosaženo velmi dobré shody s laboratorním modelem a mohly být následně provedeny požární scénáře s aktivní vodní clonou. Vzhledem k pevně stanovenému výkonu hořáku zřejmě nedocházelo k tlumení výkonu díky omezení nasávání vzduchu k plamenům. Z tohoto důvodu byl rozstříkový kužel trysek značně ovlivněn chováním plamenného hoření po výšce kužele požáru. Průběh modelace s aktivní vodní clonou byl dále značně ovlivněn prouděním vzduchu v modelu, což mělo za následek široký rozptyl naměřených hodnot tepelného toku.

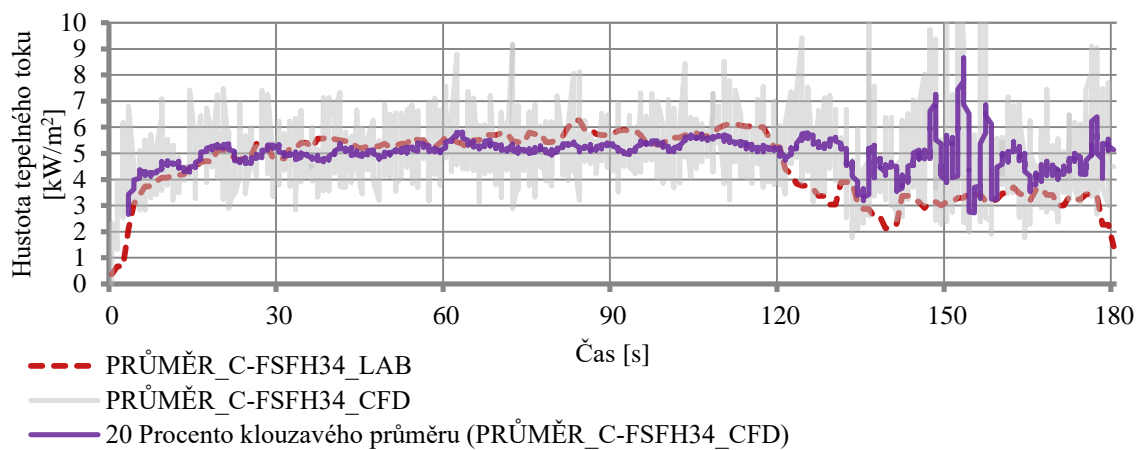
Výsledky, jež shrnují celkový utlumený tepelný tok v rámci všech tří požárních scénářů, jsou zobrazeny na obr. 43. Obecně lze říci, že při referenční požární zkoušce je shoda naměřených hodnot tepelného toku velmi dobrá. U trysky NF 300 pak byly rozdíly především u radiometrů R\_01 a R\_03, přičemž celkový průměrný tepelný tok má velmi podobný průběh jako průběh tepelného toku měřeného při laboratorní zkoušce. Nejmenší shoda panuje u modelu s tryskou C-FSFH 34, kde hodnoty ze CFD modelu vykazují největší odchylky od skutečného chování laboratorního modelu.



a)



b)



c)

Legenda: LAB = výsledky laboratorního měření; CFD = výsledky CFD modelování

obr. 43: Průběh průměrných hodnot tepelného toku: a) při referenční požární zkoušce; b) při aktivní trysce NF300; c) při aktivní trysce C-FSFH 34

## 4 Závěry a doporučení

V diplomové práci je řešen útlum tepelného toku při prostupu vodní clonou. Cílem teoretické i praktické části je rozbor vlastností rozstříkových kuželů a trysek, přičemž jsou popsány jevy spojené s útlumem tepelného toku při prostupu vodní clonou. Teoretická část se zabývá nejprve rozstříkovými charakteristikami trysek bez účinků namáhání tepelným tokem. Dále se zabývá řešením rovnice RTE v rámci působení radiačního záření při prostupu semitransparentním prostředím. V neposlední řadě je v teoretické části uvedena interakce radiačního tepelného toku a rozstříkového kužele vodní clony. Pro praktické použití je v závěru teoretické části uveden analytický návrh vodní clony.

Poznatky z teoretické části jsou přeneseny do laboratorních zkoušek a matematického CFD modelování. Pro chování vodní clony v reálném prostředí byl realizován laboratorní model, na němž byly provedeny celkem tři požární zkoušky. Prvním experimentem je referenční zkouška, k níž jsou vztaženy další požární experimenty. Dále byly provedeny dvě požární zkoušky, přičemž u každé byl použit jiný druh trysky. Trysky byly vybrány zejména s ohledem na velikost kapek v rozstříkovém kuželu.

Výsledky požárních zkoušek prokázaly, že pro návrh vodní clony není důležitým parametrem K faktor, průtok či tlak na trysce. Zásadní roli hraje velikost kapek a hybnost spreje, jež ovlivňují prostup radiace a proudění vzduchu v blízkosti rozstříkového kužele. Proudění vzduchu sice nemá vliv na intenzitu radiačního záření, nicméně může negativně ovlivňovat chování kapek v rozstříkovém kuželu, zejména s ohledem na blízkost kužele požáru. Vzhledem k proudění vzduchu v okolí vodní clony je nutno návrh přizpůsobit konkrétním podmínkám pro danou situaci.

Poznatky z laboratorních požárních zkoušek a z teoretické části byly využity v matematickém CFD modelování. Hlavním výstupem CFD modelu byl, obdobně jako u laboratorního modelu, průběh tepelného toku v čase. Při modelaci vodních clon byl zjevný značný vliv hybnosti spreje. Pokud má vodní clona větší kinetickou energii (danou hybností spreje), než je vztlak kužele požáru (daný rozdílem teplot), pak je nasávání vzduchu do kužele požáru značně omezeno a tvar plamenů, jež vyzařují radiační záření, je deformován. Vzhledem ke snížení plamenného hoření je značně utlumen prostup radiačního záření.

Pokud je vztlak kužele požáru v modelu dominantní, dochází k deformaci vodního kužele a jeho posunu směrem ke zdroji hoření. Plamenné hoření neubírá na intenzitě a prostup radiace skrz deformovaný vodní kužel závisí jen na absorpci a rozptylu kapek. S rostoucí výškou plamene roste i intenzita radiačního záření, naopak absorpce a rozptyl kapek je v blízkosti trysek nejmenší – závisí na vzdálenosti od trysky, ve které dochází k atomizaci a také na šířce kužele.

Cílem laboratorního i matematického CFD modelu bylo namodelovat takové požární scénáře s vodní clonou, při kterých by byl měřen pouze radiační tepelný tok. Při požárních zkouškách a modelacích byl pozorován značný vliv rozstříkového kužele na proudění okolního

vzduchu v blízkosti kužele. Absorpce a rozptyl intenzity záření v rozstříkovém kuželu má v tomto případě až sekundární vliv na prostup tepelného toku.

Z hlediska praktické realizace vodní clony lze předpokládat větší intenzitu požáru a tedy i větší účinnost radiačního záření. Na základě provedených laboratorních experimentů je zjevné, že pro návrh vodní clony je vhodnější použití mlhových trysek (i nízkotlaké vodní mlhy – zde 13 bar) než trysek, u kterých lze očekávat průměry kapek větších než 1 mm. Při použití analytického návrhu vodní clony je důležité opatrně určovat hodnotu účinnosti vodní clony. Účinnost vodní clony lze zvyšovat se snižujícím se průměrem vodních kapek v rozstříkovém kuželu. Analytický návrh je však velmi hrubým odhadem postaveným na základě několika předpokladů, jež nemusí být vždy dodrženy. Účinnějším návrhem vodní clony může být dosaženo použitím matematického CFD modelování v rámci požárního inženýrství.

V neposlední řadě by měly být v technických listech výrobců uváděny rozstříkové charakteristiky vodních kuželů. Vzhledem k technologiím, které jsou k dispozici, není měření velikosti či rychlosti kapek v rozstříkovém kuželu problematické. Uvedení velikostního rozptylu kapek v technickém listu trysky by umožnilo a zároveň zpřesnilo návrh vodní clony jen na základě analytického výpočtu.

## Doporučení pro další činnost

Na základě poznatků zkoumané problematiky v rámci požární bezpečnosti staveb lze na diplomovou práci navázat například v těchto směrech:

- Realizace komplexnějšího laboratorního a CFD modelu pro řešení útlumu tepelného toku skrz vodní clonu se započtením kumulované horní kouřové vrstvy a sáním vzduchu skrz rozstříkový kužel vodní clony.
- Sledování proudění vzduchu při přirozené a nucené ventilaci v hořícím prostoru, kdy je přívod vzduchu navržen skrz vodní clonu, např. v rámci CFD modelování
- Sledování útlumu požáru při instalaci vodní clony na konci liniového prvku např. kabelový tunel, dopravníkový pás.
- Realizace laboratorního a CFD modelu vodní clony pro horizontální otvor umístěný ve stropní konstrukci.
- Měření rychlosti proudění uvnitř a podél rozstříkového kužele, analytický výpočet rychlosti pohybu kapek, porovnání rychlosti proudění v závislosti na K faktoru a tlaku na trysce.
- Popis metod zabývajících se měřením velikosti kapek, včetně sběru dat zjednodušenými metodami, např. pomocí mobilní aplikace.
- Studie vlivu chemického složení sazí a zplodin hoření na intenzitu radiace vyzařované z horní kouřové vrstvy.

- Popis závislosti vlnové délky na zdroji hoření, porovnání různých druhů zdrojů hoření.
- Popis jednotlivých metod řešení RTE, porovnání odlišností dle zvolené metody řešení.
- Porovnání měřených hodnot radiačního tepelného toku při odlišných příkazech pro měření radiace definovaných v softwaru FDS, popis rozdílů mezi jednotlivými příkazy a vztah k měření pomocí reálného radiometru.

## Seznam obrázků

obr. 1: Schéma ovládací skříně vodní clony; [12] .....	7
obr. 2: Příklad realizace vodní clony pro ochranu technologického prostupu; [12].....	8
obr. 3: Sprejové hubice při tvorbě vodního kužele;[14] .....	9
obr. 4: Mlhové hubice: a) tradiční hubice pro mlhové hasicí zařízení; b) mlhová hubice s plochým rozstříkovým kuželem; [16, 17] .....	10
obr. 5: Clonová hubice: a) konstrukce trysky; b) rozstříkový kužel; [18] .....	11
obr. 6: Rozptyl kapek při tlaku 15, 80, 100 barů; [20] .....	12
obr. 7: Vliv parametrů na distribuční funkci kapek; [23] .....	13
obr. 8: Trysky s plochým rozstříkovým kuželem: a) axiální proudění; b) tangenciální proudění; [25, 26].....	15
obr. 9: Distribuce kapek: a) parabolická distribuce; b) rovnoměrná distribuce při axiálním proudění; c) rovnoměrná distribuce při tangenciálním proudění; [15].....	15
obr. 10: Princip překrytí plochých proudů při parabolické distribuce; [27] .....	16
obr. 11: Graf závislosti Reynoldsova čísla na součiniteli odporu vzduchu; [28] .....	17
obr. 12: Zpomalení kapek s různým průměrem při stanovené počáteční rychlosti; [21] .....	17
obr. 13: Měření rychlosti kapek metodou PIV; [21].....	18
obr. 14: Elektromagnetické spektrum; [32] .....	20
obr. 15: Grafické znázornění vybraných zákonů popisujících sdílení tepla radiací; [32] .....	22
obr. 16: Schéma výpočetního postupu; [41] .....	25
obr. 17: Spektrální emisivita vodíkového hořáku v závislosti na vlnové délce; [40].....	26
obr. 18: Schéma intenzity vyzařování při použití two-flux modelu; [53] .....	27
obr. 19: Porovnání Lambert-Beerova zákona a two-flux modelu; [53].....	28
obr. 20: Princip výpočtu pomocí metody DTM; [34] .....	30
obr. 21: Geometrie v prostoru při použití metody DOM – zpřesnění S2 – nesymetricky; [52] ...	32
obr. 22: Geometrie v rovině při použití metody DOM; [52] .....	33
obr. 23: Koeficient absorpce v závislosti na vlnové délce a průměru kapky; [60].....	35
obr. 24: a) Koeficient rozptylu; b) koeficient zániku; [60].....	36
obr. 25: Fázová funkce: a) s vysokým parametrem $\alpha$ ; b) se středním parametrem $\alpha$ ; c) s nízkým parametrem $\alpha$ ; [60].....	36
obr. 26: Rozptyl záření při použití Rayleighovy a Mieovy metody;[63].....	37
obr. 27: Schéma požárního větrání při instalované vodní cloně; [74] .....	43
obr. 28: Detail instalace radiometru.....	49



obr. 29: Půdorys a pohled na laboratorní model vodní clony .....	50
obr. 30: Detail výstřiku trysky: a) C-FSFH 34; b) NF 300 .....	52
obr. 31: Průběh hustoty tepelného toku naměřené při referenční požární zkoušce .....	53
obr. 32: Průběh teplot naměřených při referenční požární zkoušce .....	53
obr. 33: Pohled na laboratorní model při aktivované vodní cloně: a) vodní clona s tryskou C-FSFH 34; b) vodní clona s tryskou NF 300 .....	54
obr. 34: Útlum hustoty tepelného toku při aktivní trysce C-FSFH 34 .....	55
obr. 35: Útlum hustoty tepelného toku při aktivní trysce NF 300 .....	55
obr. 36: Porovnání průměrné hustoty tepelného toku při všech požárních scénářích .....	55
obr. 37: Výpočetní model FDS: a) modelovaný prostor; b) výpočetní síť .....	58
obr. 38: Porovnání hodnot tepelného toku a teplo: a) radiometr R_01; b) radiometr R_02; c) radiometr R_03; d) termočlánek T_01; e) termočlánek T_02; f) termočlánek T_03 .....	62
obr. 39: Porovnání hodnot tepelného toku při aktivní trysce NF300: a) radiometr R_01; b) radiometr R_02; c) radiometr R_03 .....	64
obr. 40: Fáze požárního scénáře s tryskou NF 300: a) fáze hoření bez vodní clony; b) aktivace vodní clony; c) fáze hoření s aktivní vodní clonou .....	65
obr. 41: Porovnání hodnot tepelného toku při aktivní trysce C-FSFH 34: a) radiometr R_01; b) radiometr R_02; c) radiometr R_03 .....	68
obr. 42: CFD model vodní clony s tryskou C-FSFH 34: a) Pohled na průběh modelace; b) Proudění vzduchu v řezu $Y=1,08$ .....	69
obr. 43: Průběh průměrných hodnot tepelného toku: a) při referenční požární zkoušce; b) při aktivní trysce NF300; c) při aktivní trysce C-FSFH 34 .....	71

## Seznam tabulek

tab. 1: Velikost kapek sprinklerových a mlhových SHZ; [4] .....	3
tab. 2: Zvětšení objemu vodní páry v závislosti na teplotě; [5] .....	4
tab. 3: Maximální plocha a umístění sprinklerů při standardním uspořádání; [7] .....	6
tab. 4: Hodnota SMD při daném tlaku; [20] .....	12
tab. 5: Porovnání výsledků měření pomocí prostorové a průtokové metody; [15] .....	14
tab. 6: Dolet kapky v závislosti na jejím průměru a okolní teplotě; [31] .....	19
tab. 7: Životnost kapek v závislosti na jejich průměru a počáteční rychlosti; [21] .....	20
tab. 8: Souřadnice a váha vektoru pro zpřesnění $S_2$ a $S_4$ ; [52] .....	31
tab. 9: Širokopásmový model pro hoření propanu ( $C_3H_8$ ); [57] .....	38
tab. 10: Parametr dynamiky rozvoje požáru v závislosti na skupině provozu; [1] .....	46

tab. 11: Technické charakteristiky trysek NF 300 a C-FSFH 34; [17, 25] .....	51
tab. 12: Velikost hrany výpočetního objemu v modelovaném prostoru .....	57
tab. 13: Materiálové vlastnosti modelovaných konstrukcí .....	59
tab. 14: Porovnání průměrných ustálených hodnot tepelného toku .....	61
tab. 15: Porovnání průměrných hodnot hustoty tepelného toku při aktivní trysce NF 300 .....	66
tab. 16: Porovnání průměrných hodnot tepelného toku při aktivní trysce C-FSFH 34 .....	69

## Přílohy

### Zdrojový kód pro referenční požární zkoušku

Spuštěno pomocí příkazu: mpiexec -n 4 fds REF.fds

```
&HEAD CHID='REF' /
&TIME T_END=180.0/
&DUMP      DT_RESTART = 30.0/
&REAC FUEL = 'PROPANE', SOOT_YIELD = 0.01, RADIATIVE_FRACTION = 0.30 /

&MESH IJK=50,50,30 XB=0.0,1.5,0.0,1.5,0.0,0.6, MPI_PROCESS=0 /
&MESH IJK=50,50,30 XB=0.0,1.5,0.0,1.5,0.6,1.2, MPI_PROCESS=1/
&MESH IJK=50,50,30 XB=0.0,1.5,0.0,1.5,1.2,1.8, MPI_PROCESS=2/
&MESH IJK=50,50,30 XB=0.0,1.5,0.0,1.5,1.8,2.4, MPI_PROCESS=3/

&MATL ID='MW', SPECIFIC_HEAT=0.96, CONDUCTIVITY=0.04, DENSITY=100/
&MATL ID='CONCRETE', SPECIFIC_HEAT=1.02, CONDUCTIVITY=1.43, DENSITY=2300/
&MATL ID='ALUMINIUM', SPECIFIC_HEAT=0.87, CONDUCTIVITY=204, DENSITY=2700/

&SURF ID='INSULATION', COLOR='GREEN',MATL_ID='MW', THICKNESS = 0.3/
&SURF ID='FLOOR', COLOR='GRAY',MATL_ID='CONCRETE', THICKNESS = 0.1, EMISSIVITY = 0.85/
&SURF ID='HOLDER' COLOR='SILVER',MATL_ID='ALUMINIUM', THICKNESS = 0.1, EMISSIVITY = 0.09/

&VENT XB = 0.0,1.5,0.0,0.0,0.0,2.4, SURF_ID = 'OPEN'/
&VENT XB = 0.0,1.5,1.5,1.5,0.0,2.4, SURF_ID = 'OPEN'/
&VENT XB = 0.0,0.0,0.0,1.5,0.0,2.4, SURF_ID = 'INERT'/
&VENT XB = 1.5,1.5,0.0,1.5,0.0,2.4, SURF_ID = 'INERT'/
&VENT XB =0.0,1.5,0.0,1.5,2.4,2.4, SURF_ID = 'OPEN'/
&VENT XB = 0.0,1.5,0.0,1.5,0.0,0.0 SURF_ID = 'FLOOR'/

&SURF ID='BURNER', COLOR='RED', HRRPUA=4630, RAMP_Q='FIRERAMP' /
&VENT XB = 0.115,0.295,0.99,1.17,0.3,0.3, SURF_ID = 'BURNER', /
&OBST XB = 0.115,0.295,0.99,1.17,0.0,0.3, SURF_ID = 'INERT' COLOR = 'GRAY 27' /
```

---

&RAMP ID = 'FIRERAMP', T=0.0, F=1.0 /

&RAMP ID = 'FIRERAMP', T=180.0, F=1.0 /

&RADI NUMBER\_RADIATION\_ANGLES=300.0/

&RADI RADIATION\_ITERATIONS=2.0/

&OBST XB = 0.325,0.475,0.67,1.17,0.0,0.5, SURF\_ID = 'INERT' COLOR = 'GRAY 27' /

&OBST XB = 0.0,0.055,0.0,1.255,0.0,2.4, SURF\_ID = 'INERT' COLOR = ,GRAY 27' /

&OBST XB = 0.055,0.6,1.2,1.255,0.0,2.4, SURF\_ID = 'INERT' COLOR = ,GRAY 27' /

&OBST XB = 0.055,0.085,0.6,1.2,0.0,2.4, SURF\_ID = 'INSULATION' /

&OBST XB = 0.085,0.6,1.17,1.2,0.0,2.4, SURF\_ID = 'INSULATION' /

&OBST XB = 0.085,0.115,0.99,1.17,0.0,0.3, SURF\_ID = 'INSULATION' /

&OBST XB = 0.295,0.325,0.99,1.17,0.0,0.3, SURF\_ID = 'INSULATION' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.08,1.1,1.50,1.52, SURF\_ID = 'INERT', COLOR = ,BLACK' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.08,1.11,1.48,1.50, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.08,1.11,1.52,1.54, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.11,1.14,1.48,1.50, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.05,1.08,1.48,1.50, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.11,1.14,1.52,1.54, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.05,1.08,1.52,1.54, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.05,1.08,1.50,1.52, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.11,1.14,1.50,1.52, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.08,1.1,1.10,1.12, SURF\_ID = 'INERT', COLOR = ,BLACK' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.08,1.11,1.08,1.10, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.08,1.11,1.12,1.14, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.11,1.14,1.08,1.10, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.05,1.08,1.08,1.10, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.11,1.14,1.12,1.14, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.05,1.08,1.12,1.14, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.05,1.08,1.10,1.12, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.11,1.14,1.10,1.12, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.08,1.1,0.70,0.72, SURF\_ID = 'INERT', COLOR = ,BLACK' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.08,1.11,0.68,0.70, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.08,1.11,0.72,0.74, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.11,1.14,0.68,0.70, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.05,1.08,0.68,0.70, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.11,1.14,0.72,0.74, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.05,1.08,0.72,0.74, SURF\_ID = 'HOLDER' /

&OBST XB = 1.20,1.23,1.05,1.08,0.70,0.72, SURF\_ID = 'HOLDER' /

```

&OBST XB = 1.20,1.23,1.11,1.14,0.70,0.72, SURF_ID = 'HOLDER' /
&OBST XB = 1.20,1.23,1.08,1.11,0.70,0.72, SURF_ID = 'HOLDER' /

&PROP ID = ,R', GAUGE_TEMPERATURE=20.0, GAUGE_EMISSIVITY=1.0/
&DEVC XYZ =1.20, 1.09, 1.51, QUANTITY = ,GAUGE HEAT FLUX', ID = ,R_01',PROP_ID = ,R',IOR=-1 /
&DEVC XYZ =1.20, 1.09, 1.11, QUANTITY = ,GAUGE HEAT FLUX', ID = ,R_02',PROP_ID = ,R', IOR=-1/
&DEVC XYZ =1.20, 1.09, 0.71, QUANTITY = ,GAUGE HEAT FLUX', ID = ,R_03',PROP_ID = ,R', IOR=-1 /

&PROP ID = ,T', BEAD_DIAMETER = 0.0015 /
&DEVC XYZ = 1.18, 1.09, 1.51,QUANTITY = ,THERMOCOUPLE', PROP_ID = ,T', ID = ,T_01' /
&DEVC XYZ = 1.18, 1.09, 1.11,QUANTITY = ,THERMOCOUPLE', PROP_ID = ,T', ID = ,T_02' /
&DEVC XYZ = 1.18, 1.09, 0.71,QUANTITY = ,THERMOCOUPLE', PROP_ID = ,T', ID = ,T_03' /

&SLCF PBY = 1.08, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE. /
&SLCF PBY = 1.08, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE. /
&SLCF XB = 0.0,1.5,0.0,1.5,0.0,2.4, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE. /
&SLCF PBY = 1.08, QUANTITY = 'INTEGRATED INTENSITY',VECTOR = .TRUE.
,CELL_CENTERED=.TRUE./
&TAIL /

```

## Zdrojový kód pro trysku NF 300

Zdrojový kód je identický s kódem pro referenční požární zkoušku. Doplněna je pouze definice trysky a rozstříkovaného kužele.

```

&SPEC ID='WATER VAPOR'/
&PART ID='WATER', SPEC_ID='WATER VAPOR', DIAMETER=2000.0, MINIMUM_DIAMETER=1000.0,
MAXIMUM_DIAMETER=3000.0,DISTRIBUTION='ROSIN-RAMMLER-LOGNORMAL',GAMMA_D=2.4,
QUANTITIES='PARTICLE DIAMETER','PARTICLE TEMPERATURE','PARTICLE VELOCITY', AGE=60.0,
SAMPLING_FACTOR=1/
&PROP ID='WATER_SPRAY', PART_ID='WATER', OFFSET=0.05, PARTICLES_PER_SECOND=10000,
K_FACTOR=68.4, OPERATING_PRESSURE=13.0, ORIFICE_DIAMETER = 0.0107, SPRAY_ANGLE(1,1:2)=0.0,0.0,
SPRAY_ANGLE(2,1:2)=10.0,40.0, SPRAY_PATTERN_SHAPE = 'UNIFORM'/
&DEVC ID='NF300', PROP_ID='WATER_SPRAY', XYZ=0.805,0.77,1.8, ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0,
QUANTITY='TIME', SETPOINT=120.0/

```

## Zdrojový kód pro trysku C-FSFH 34

Zdrojový kód je identický s kódem pro referenční požární zkoušku. Doplněna je pouze definice trysky a rozstříkovaného kužele.

```

&SPEC ID='WATER VAPOR'/
&PART ID='WATER', SPEC_ID='WATER VAPOR', DIAMETER=70.0, MINIMUM_DIAMETER=10.0,
MAXIMUM_DIAMETER=1000.0,DISTRIBUTION='ROSIN-RAMMLER', GAMMA_D=1.0, QUANTITIES='PARTICLE
DIAMETER','PARTICLE TEMPERATURE','PARTICLE VELOCITY', AGE=60.0, SAMPLING_FACTOR=1/
&PROP ID='WATER_SPRAY', PART_ID='WATER', OFFSET=0.05, PARTICLES_PER_SECOND=10000,
K_FACTOR=1.6, OPERATING_PRESSURE=13.0, PARTICLE_VELOCITY=31.8, SPRAY_ANGLE(1,1:2)=0.0,0.0,
SPRAY_ANGLE(2,1:2)=13.0,80.0 SPRAY_PATTERN_SHAPE = 'GAUSSIAN'/

```

&DEVC ID='C-FSFH 34', PROP\_ID='WATER\_SPRAY', XYZ=0.805,0.77,1.8, ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0,  
QUANTITY='TIME', SETPOINT=120.0/

---

## Literatura

- [1] ČSN 730802 - Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty 05/2009 + Z1 (02/2013) + Z2 (07/2015). Praha: ÚNMZ, nedatováno.
- [2] ČSN 730804 - Požární bezpečnost staveb - Výrobní objekty 02/2010 + Z1 (02/2013) + Z2 (02/2015). Praha: ÚNMZ, nedatováno.
- [3] Vyhláška č. 246/2001 Sb. Vyhláška Ministerstva vnitra o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci) ve znění pozdějších předpisů. Praha: Ministerstvo Vnitra, 2001.
- [4] RYBÁŘ, P. Stabilní hasicí zařízení vodní a pěnová. Praha: Profesní Komora Požární Ochrany, 2014.
- [5] MACHT, Karel. Hašení vodou, vodní proudy, proudnice. První. Praha: Ministerstvo vnitra - generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky, 2001.
- [6] RYBÁŘ, Pavel. Sprinklerová zařízení. SPBI SPEKTRUM 77. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2011. ISBN 978-80-7385-106-4.
- [7] ČSN EN 12 845 - Stabilní hasicí zařízení - Navrhování, instalace a údržba 11/2015 + Z1 05/2016. B.m.: ÚNMZ, 2015.
- [8] ČSN P CEN/TS 14816 Stabilní hasicí zařízení - vodní sprejová zařízení - Navrhování, instalace a údržba. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [9] ČSN 73 0873 - Požární bezpečnost staveb - Zásobování požární vodou. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [10] RYBÁŘ, Pavel. Stabilní hasicí zařízení. 2007. Nové systémy v požární ochraně 2008.
- [11] RYBÁŘ, Pavel. Příklady použití stabilních hasicích zařízení v ochraně majetku a technologií. Praha: Ministerstvo vnitra -generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky, 2014. ISBN 978-80-86466-71-2.
- [12] SATKE a DOLEŽAL. DSPS- požárně bezpečnostní zařízení - vodní clona - Magna Exteriors & Interiors (Bohemia) s.r.o, Liberec. B.m.: MINIMAX GmbH & Co. KG, 2016.
- [13] KUTÁČ, Jaroslav. Požární bezpečnost stavebních objektů - sborník přednášek. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005. ISBN 80-86634-63-9.
- [14] FM GLOBAL - Fixed water spray systems for fire protection [online]. B.m.: Factory Mutual Insurance company, 2010. Property Loss Prevention Data Sheet, 4–1N. Dostupné z: <http://www.fmglobal.com/research-and-resources/fm-global-data-sheets>
- [15] SCHICK, Rudolf J. Spray Technology Reference Guide Understanding Drop Size [online]. Wheaton, IL, USA: Spray Analysis and Research Services, Spraying Systems Co., 2008. Dostupné z: [www.sprayconsultants.com](http://www.sprayconsultants.com)

- 
- [16] M Series Open Type Water Mist Nozzle [online]. Luyang District, Hefei City, Anhui Province, P.R.Chin: Lanzhong Mechanical and Electrical Engineering Co, 2016. Dostupné z: <http://watermist.com.cn>
- [17] C - FSFH 34 nozzle data sheet [online]. Warszawa, Poland: Telesto Sp, 2014. Dostupné z: <http://www.telesto.pl/en/>
- [18] GW water curtain nozzle - Data sheet n.o.: GW WS030 1001 D [online]. Glamsbjerg, Denmark: GW SPRINKLER A/S, 2016. Dostupné z: <http://www.gwsprinkler.com/Documents/>
- [19] ASSOCIATION, N.F.P. NFPA 15 : Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection. B.m.: National Fire protection Association, 2007.
- [20] HERTZBERG, T., A. HAHNE, C. JOSEFSSON, G. HOLMSTEDT a B. HUSTED. Vatten dimma: Teori. fysik och simulering. BRANDFORSK projekt 514-021. 2004.
- [21] BJARNE PAULSEN HUSTED, GORAN HOLMSTED a TOMMY HERTZBERG. The physics behind water mist systems. Rome: IWMA conference, 2004.
- [22] ASSOCIATION, N.F.P. NFPA 750 : Standard on Water Mist Fire Protection Systems. B.m.: National Fire protection Association, 2015.
- [23] MOREIRA, A.L.N a M.R. OLIVIEIRA PANAIO. Chapter 21 Spray - Wall Impact. In: Handbook of Atomization and Sprays - Theory and Applications. New York Dordrecht Heidelberg London: Springer Science + Business Media, 2011. ISBN 978-1-4419-7263-7.
- [24] DÉCHELETTE, A., E. BABINSKY a P.E. SOJKA. Chapter 23 - Drop Size Distribution. In: Handbook of Atomization and Sprays - Theory and Applications. New York Dordrecht Heidelberg London: Springer Science + Business Media, 2011. ISBN 978-1-4419-7263-7.
- [25] NF Standard Fan Nozzle [online]. B.m.: BETE Fog Nozzle, Inc. 2017. Dostupné z: <http://www.bete.com/products/nf.html>
- [26] OMER, K. a N. ASHGRIZ. Chapter 24 - Spray Nozzles. In: Handbook of Atomization and Sprays - Theory and Applications. New York Dordrecht Heidelberg London: Springer Science + Business Media, 2011. ISBN 978-1-4419-7263-7.
- [27] LECHLER. Flat fan nozzles [online]. B.m.: Lechler GmbH, 2016. Dostupné z: <http://www.lechler.de/Products/General-Industry/Flat-fan-nozzles/>
- [28] Mechanika tekutin [online]. Praha: Matematicko-fyzikální fakulta Univerzita Karlova, nedatováno. Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/www/fyzika.html](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/www/fyzika.html)
- [29] GARDINER, A.J. The mathematical modelling of the interaction between sprinkler sprays and the thermally buoyant layers of gases in fires. 1988.
- [30] HERTERICH, Oskar. Wasser als löschmittel. 1960.
-

- 
- [31] ANDERSSON, P., M. ARVIDSON a G. HOLMSTEDT. Small Scale Experiments and Theoretical Aspects of Flame Extinguishment with Water mist. Technical Report 3080. B.m.: Dept. of Fire Safety Engineering, Lund University, 1996.
- [32] PROF. ING. MILAN PAVELEK, CSC. TERMOMECHANIKA 19. Přenos tepla zářením [online]. B.m.: FSI VUT v Brně, Energetický ústav, nedatováno. Dostupné z: [http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/19\\_Zareni.pdf](http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/19_Zareni.pdf)
- [33] SFPE Handbook fo Fire Protection Engineering. 3. vyd. Bethesda, Maryland: Society of Fire Protection Engineers, 2002. ISBN 0-87765-451-4.
- [34] PLÁŠEK, Josef a Ondřej ŠIKULA. Modelování tepelného sálání v budovách. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2012. ISBN 978-80-214-4383-9.
- [35] POKORNÝ, Marek. Instalační šachty z požárního hlediska. Disertační práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze - Fakulta stavební, 2012.
- [36] BALNER, Dalibor. Ústní sdělení. VŠB - TUO Fakulta bezpečnostního inženýrství. 27. září 2017
- [37] VOLKA, K a M TKADLECOVÁ. Příklady z analytické chemie pro bakaláře. Praha: Vysoká škola chemicko - technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-610-9.
- [38] RAVIGURURAJAN, TS a MR BELTRAN. A model for attenuation of fire radiation through water droplets. B.m.: Fire Safety Journal, 1989. 15, 171–181.
- [39] VISKANTA, R a M P MENGUC. Progress in Energy and Combustion Science. Radiation Heat Transfer in Combustion Systems. 1987. 13, 97–160.
- [40] DEMBELE, Dr S a A HEIDARI. Water Spray Curtain for Shielding Hydrogen Flames - Effect of Flame Spectrum on Total Transmissivities. In: 13th Internation Water Mist Conference. Paris, France. 2013.
- [41] BOULET, P., A. COLLIN a G. PARENT. Heat transfer through a water spray curtain under the effect of a strong radiative source. Fire Safety Journal [online]. 2006, **41**(1), 15–30. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2005.07.007
- [42] HEWITT, G F, G L SHIRES a BOTT T R. Process heat transfer. B.m.: Boca Raton : CRC Press : Begell House, 1994. ISBN 0-8493-9918-1.
- [43] HOWELL, J.R. a M. PERLMUTTER. Monte Carlo Solution of Thermal Transfer in Nongrey Non-isothermal Gas with temperature Dependent Properties. 10. vyd. 1964. 562–567.
- [44] LOCKWOOD, F.C. a N.G. SHAH. A New Radiation Solution Method for Incorporation in General Combustion Prediction Procedures. Eighteenth Symposium (International) on Combustion: The Combustion Institute, nedatováno. 1405-1414.
- [45] CHANDRASEKHAR, S. Radiative Transfer. 1960.
-



- 
- [46] HYDE, D.J. a J.S. TRUELOVE. The Discrete Ordinates Approximation for Multidimensional Radiant Heat Transfer in Furnaces. B.m.: AERE Harwell, nedatováno. UKAEA, AERE-R-8502.
- [47] FIVELAND, W.A. A Discrete Ordinates Method for Predicting Radiative Heat Transfer in Axysymmetric Enclosures. 1982. ASME Paper 82-HT-20.
- [48] FIVELAND, W.A. Three-dimensional Radiative Heat Transfer Solutions by the Discrete Ordinates Method. 2. vyd. B.m.: F. Thermophys. Heat Transfer, 1988. 309–3016.
- [49] CHUI, E.H., G.D. RAITHBY a P.M. HUGHES. Prediction of Radiative Transfer in Cylindrical Enclosures with the Finite Volume Method. 6. vyd. B.m.: F. Thermophys. Heat Transfer, 1992. 605–611.
- [50] CHUI, E.H. a G.D. RAITHBY. Computation of Radiative Heat Transfer on a Non-orthogonal Mesh Using the Finite Volume Method. 23. vyd. B.m.: Numer. Heat Transfer, 1993. 269–288.
- [51] CHUI, E.H., P.M. HUGHES a G.D. RAITHBY. Implementation of the Finite Volume Method for Calculating Radiative Transfer in Pulverised Fuel Flame. 92. vyd. B.m.: Combust. Sci. Techn., 1993. 225–242.
- [52] VERSTEEG, H. K. a W. MALALASEKERA. An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method. B.m.: Pearson Education Limited, 2007. ISBN 978-0-13-127498-3.
- [53] YANG, Wenhua, Terry PARKER, H. D. LADOUCEUR a Robert J. KEE. The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression. Fire Safety Journal [online]. 2004, **39**(1), 41–66. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2003.07.001
- [54] JOSEPH, David, Patrice PEREZ, Mouna EL HAFI a Bénédicte CUENOT. Discrete Ordinates and Monte Carlo Methods for Radiative Transfer Simulation Applied to Computational Fluid Dynamics Combustion Modeling. Journal of Heat Transfer [online]. 2009, **131**(5), 052701. ISSN 00221481. Dostupné z: doi:10.1115/1.3013832
- [55] BAKKER, André. Lecture 13 - Heat Transfer, Applied Computational Fluid Dynamics. In: [online]. Dartmouth College. 2002. Dostupné z: <http://www.bakker.org>
- [56] Discrete Ordinates (DO) Radiation Model Theory [online]. B.m.: Fluent Inc., 2003. ANSYS Fluent User's guide. Dostupné z: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node580.htm>
- [57] MCGRATTAN, Kevin, Simo HOSTIKKA, Randall MCDERMOTT, Jason FLOYD, Weinschenk CRAIG a Kristopher OVERHOLT. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification. Special Publication 1018-2 Sixth Edition. B.m.: NIST - National Institute of Standards and Technology, 2017.
- [58] HOSTIKKA, Simo. Development of fire simulation models for radiative heat transfer and probabilistic risk assessment. Espoo, Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2008. VTT Publications 683.
-

- 
- [59] HERGERT, Wolfram a Thomas WRIEDT. Chapter 2 Mie Theory: A Review. In: The Mie Theory Basics and Applications [online]. B.m.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, 169. ISBN 978-3-642-28738-1. Dostupné z: 10.1007/978-3-642-28738-1
- [60] BEROUR, Nacer, David LACROIX, Pascal BOULET a Gérard JEANDEL. Radiative and conductive heat transfer in a nongrey semitransparent medium. Application to fire protection curtains. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* [online]. 2004, **86**(1), 9–30. ISSN 0022-4073. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-4073(03)00235-8
- [61] SURJIKOV, S.T. A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering: AtoZ. B.m.: Begellhouse, 2006. ISBN 978-0-8493-9356-3.
- [62] MAŇÁK, Roman. Rayleighův a Mieův rozptyl I. In: *Parhelium*. 2007.
- [63] NAVE, R. HyperPhysics - Light and Vision - Scattering - Mie Scattering [online]. B.m.: Georgia State University, 2016. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>
- [64] SIEGEL, R a J.R. HOWELL. *Thermal Radiation Heat Transfer*. 4. vyd. New York: Taylor & Francis, 2002.
- [65] PRETREL, H. 3 Etude du comportement thermodynamique de pulvérisations liquides sous l'ef et du rayonnement infrarouge. Application Va la protection incendie par rideau d'eau. B.m.: INSA de Lyon, 1997.
- [66] CHAN, T.S. Measurements of Water Density and Droplet Size Distributions of Selected ESFT Sprinklers. B.m.: *Journal of Fire Protection engineering*, 1994.
- [67] LUDWIG, C.B., W. MALKMUS, J.E. REARDON a J.A.L. THOMSON. *Handbook of Infrared Radiation and Combustion Gases*. NASA-SP-3080. B.m.: National Aeronautics and Space Administration, Office of Management, Scientific and Technical Information Program, 1973.
- [68] BEYLER, C.L. Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 4. vyd. Quincy, Massachusetts: National Fire protection Association, 2008.
- [69] GROSSHANDLER, W. RadCal: Narrow Band Model for Radiation Calculations in a Combustion Environment. NIST Technical Note 1402. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 1993.
- [70] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav [online]. Version 1.0. Praha: VŠCHT Praha, 2005. ISBN 80-7080-579-X. Dostupné z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_isbn-80-7080-579-X/pages-img/obalka-1.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-579-X/pages-img/obalka-1.html)
- [71] COLLIN, A., P. BOULET, G. PARENT a D. LACROIX. Numerical simulation of a water spray - Radiation attenuation related to spray dynamics. *International Journal of Thermal Sciences* [online]. 2007, **46**(9), 856–868. ISSN 1290-0729. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijthermalsci.2006.11.005
-

- 
- [72] MARUYAMA, S., H. NAKAI, A. SAKURAI a A. KOMIYA. Evaluation method for radiative heat transfer in plydisperse water droplets. B.m.: Journal of Quantative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2008.
- [73] ČSN 730810 - Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [74] REICHEL, Vladimír. R-HELP Výklad ČSN 730802: 2000 PBS - Nevýrobní objekty. B.m.: Čuhel Oskar ve spolupráci s MV - GŘ HZS ČR, nedatováno.
- [75] ČSN 730845 - Požární bezpečnost staveb - Sklady. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [76] ČSN 730824 - Požární bezpečnost staveb - Výhřevnost hořlavých látek. Praha: ÚNMZ, 1992.
- [77] ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha: ÚNMZ, 2004.
- [78] KUČERA, Petr, Rudolf KAISER, Tomáš PAVLÍK a Jiří POKORNÝ. Požární inženýrství - dynamika požáru. 65. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, nedatováno. ISBN 978-80-7385-074-6.
- [79] ISO 9705 - 1 Reaction to fire tests - Room corner test for wall and ceiling lining products - Part 1: Test method for a small room configuration. 1. vyd. B.m.: International Organization for Standardization, 2016.
- [80] ČSN EN 14 390 (73 0885) Požární zkouška - Velkorozměrová ověřovací zkouška výrobků pro povrchové úpravy. 2007.
- [81] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ARSON INVESTIGATORS, INTERNATIONAL ASSOCIATION OF FIRE CHIEFS a NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. Fire investigator: Principles and Practice to NFPA 921 and 1033. 3. vyd. 2012. ISBN 978-0-7637-5851-6.
- [82] ISO 13785-1 Reaction to fire tests for facades - Part 1 : Intermediate-scale test. 1. vyd. B.m.: International Organization for Standardization, 2002.
- [83] Zákon č. 133/1985 Sb. o požární ochraně. B.m.: Česká národní rada, 1985.
- [84] WALD, František, Marek POKORNÝ, Kamila CÁBOVÁ, Hana NAJMANOVÁ, Petr HEJTMÁNEK, Martin BENÝŠEK, Marta KUREJKOVÁ a Ivo SCHWARZ. Modelování dynamiky požáru v budovách. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
- [85] MCGRATTAN, Kevin, Simo HOSTIKKA, Randall MCDERMOTT, Jason FLOYD, Vanella MARCOS, Weinschenk CRAIG a Kristopher OVERHOLT. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation. Special Publication 1018-3 Sixth Edition. B.m.: NIST - National Institute of Standards and Technology, 2017.
- [86] OVERHOLT, Kristopher. FDS Mesh Size Calculator [online]. 2017. Dostupné z: <https://www.koverholt.com/fds-mesh-size-calc/>
-

- [87] 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.
- [88] ELIÁŠ, Martin a Marek POKORNÝ. Porovnání experimentální výstřikové charakteristiky vodních mlhových trysek a matematického CFD modelu. Požární ochrana 2017 Sborník přednášek XXVI. ročníku mezinárodní konference. Buštěhrad: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s., 2017. ISBN 978-80-7385-188-0.