

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

**TLAKOVÉ POMĚRY A RYCHLOST PROUDĚNÍ PLYNŮ
V PODMÍNKÁCH POŽÁRU**

**PRESSURE RATIOS AND GAS FLOW RATE IN FIRE
CONDITIONS**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Martin Spáčil

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

2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Spáčil Jméno: Martin Osobní číslo: 423859

Zadávací katedra: Katedra konstrukcí pozemních staveb

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Tlakové poměry a rychlost proudění plynů v podmínkách požáru

Název diplomové práce anglicky: Pressure Ratios and Gas Flow Rate in Fire Conditions

Pokyny pro vypracování:

- 1) Stav poznání v daném tématu
- 2) Analýza vztahu mezi změnou tlaku a rychlostí proudění plynů
- 3) Možnosti měření tlaku a rychlosti proudění za vysokých teplot
- 4) Tlakové poměry při zkouškách požární odolnosti stavebních konstrukcí a výrobků
- 5) Matematický CFD model pro tlakové a rychlostní poměry ve středněrozměrové peci miniFUR na UCEEB ČVUT

Seznam doporučené literatury:

- [1] MCCAFFREY, BJ. a G. HESKESTAD. A Robust Bidirectional Flow-Velocity Probe for Flame and Fire Application. 1976.
- [2] CHLÁDEK, Jiří. Malorozměrové zkoušky požární odolnosti. Praha, 2019. Diplomová práce k získání akademického titulu Ing. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Konstrukce pozemních staveb.
- [3] Fire Dynamics Simulator User's Guide. 6th ed. NIST, Fire Research Division Engineering Laboratory Gaithersburg, Maryland, USA, 2020
- [4] SFPE handbook of fire protection engineering. 3rd ed. Bethesda, Md.: Society of Fire Protection Engineers, 2002

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Marek Pokorný, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 24.9.2020

Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

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“.

24.9.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Martin Spáčil

Název diplomové práce: Tlakové poměry a rychlost proudění plynů v podmínkách požáru

Základní část: Tlakové poměry a rychlost proudění plynů v podmínkách požáru podíl: 100 %

Formulace úkolů: _____

1) Stav poznání v daném tématu

2) Analýza vztahu mezi změnou tlaku a rychlostí proudění plynů

3) Možnosti měření tlaku a rychlosti proudění za vysokých teplot

4) Tlakové poměry při zkouškách požární odolnosti stavebních konstrukcí a výrobků

5) Matematický CFD model pro tlakové a rychlostní poměry ve středněrozměrové peci miniFUR na UCEEB ČVUT

Podpis vedoucího DP:

Datum: 24. 9. 2020

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:

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1. stranou zadání již ve 2. týdnu semestru)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Tlakové poměry a rychlost proudění plynů v podmínkách požáru“ vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Marka Pokorného, Ph.D. a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované 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 1.1.2021

.....

Bc. Martin Spáčil

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat celé své rodině, která mě podporovala, pomáhala mi a poskytla mi zázemí po celou dobu mého studia. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Marku Pokornému, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce, za cenné rady, trpělivost a čas, který mi věnoval, dále za pomoc při realizaci požárního experimentu ve spolupráci s požární laboratoří na UCEEB ČVUT v Praze, které tímto také děkuji.

Obsah

Prohlášení	IV
Poděkování	V
Obsah	VI
Abstrakt	VIII
Abstract	IX
Seznam použitých symbolů a zkratk	X
1 Úvod	1
1.1 Motivace	1
1.2 Struktura práce	1
1.3 Cíle práce	2
2 Současný stav poznání	4
2.1 Rychlost proudění plynů	4
2.1.1 Druhy proudění	5
2.1.2 Laminární proudění	5
2.1.3 Turbulentní proudění	6
2.2 Tlakové poměry a proudění plynů v uzavřeném prostoru	6
2.2.1 Tlakové poměry a proudění plynů v uzavřeném prostoru s ventilačními otvory	7
2.2.2 Bernoulliho rovnice	10
2.2.3 Řešený příklad 1 – tlakové poměry a rychlost proudění ve ventilačních otvorech středněrozměrové požární pece	14
2.2.4 Tlakové poměry a jejich vývoj v prostoru s velkým ventilačním otvorem	18
2.2.5 Tlakové poměry v uzavřeném prostoru	19
2.3 Měření rychlosti proudění a tlaku za vysoké teploty	19
2.3.1 Anemometr	20
2.3.2 Částicová obrazová velocimetrie	21
2.3.3 Prandtlova trubice	21
2.3.4 Tlakoměry	22
2.4 Obousměrná rychlostní sonda	23
2.4.1 Řešený příklad 2 – výpočet rychlost proudění v horním ventilačním otvoru středněrozměrové požární pece	25
2.4.2 Aplikace obousměrné rychlostní sondy	26
2.5 Zkoušky požární odolnosti stavebních konstrukcí a výrobků	30
2.5.1 Požadavky na tlak v požárním zkušebním zařízení	31
2.5.2 Požadavky na atmosféru v požárním zkušebním zařízení	32
2.5.3 Požadavky na teplotu v požárním zkušebním zařízení	32
2.5.4 Požadavky na neutrální rovinu v požárním zkušebním zařízení	33
2.5.5 Středněrozměrová požární pec na UCEEB ČVUT v Praze	33
3 CFD model tlakových a rychlostních poměrů ve středněrozměrové požární peci ...	37
3.1 Software	37
3.2 Nastavení simulace turbulencí	37
3.3 Výpočetní oblast modelu	38

3.4	Nastavení výkonu hořáku pece, referenční zkouška.....	39
3.5	Neutrální rovina v CFD modelu pece	46
3.6	Fáze tlakových poměrů v CFD modelu pece	47
3.7	Tlaky v CFD modelu pece.....	49
3.8	Rychlost proudění v CFD modelu pece	51
4	Experimenty pro ověření tlakových a rychlostních poměrů ve středněrozměrové požární peci	53
4.1	Experiment 1 – ověření rychlosti proudění ve středněrozměrové požární peci	54
4.2	Výsledky experimentu 1.....	55
4.3	Experiment 2 – ověření tlakových poměrů ve středněrozměrové požární peci	58
4.4	Výsledky experimentu 2.....	59
5	Diskuze získaných výsledků.....	60
5.1	Porovnání CFD modelu a experimentu 1 a 2	60
5.2	Porovnání CFD modelu a řešeného příkladu 1.....	62
6	Závěr	64
6.1	Závěrečné shrnutí práce	64
6.2	Doporučení pro navazující činnost	64
6.2.1	Tlakové poměry v uzavřeném prostoru.....	64
6.2.2	Přeskok plamene k ventilačním otvorů.....	65
	Seznam obrázků	66
	Seznam tabulek.....	70
	Literatura	71
	Příloha 1 – Zdrojový kód pro CFD model – referenční zkouška	73

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá tlakovými poměry a rychlostí proudění plynů v podmínkách požáru. Hlavním cílem práce je zmapovat tlakové a rychlostní poměry v CFD modelu středněrozměrové požární pece pro zkoušení požární odolnosti stavebních konstrukcí a výrobků na UCEEB ČVUT v Praze (dále jen zkušební peci). V teoretické části diplomové práce jsou popsány tlakové poměry a proudění plynů pro typickou požární situaci, tedy požár v místnosti s otvory, a s tím související analytické řešení. Dále teoretická část shrnuje měření tlaků a rychlosti proudění plynů za požární situace, a to se zaměřením na obousměrnou rychlostní sonda. V závěru teoretické části práce jsou popsány základní požadavky související s tématem diplomové práce na prostředí ve zkušebních požárních zařízeních, jako je zkušební pec. V řešené části diplomové práce bude představen upravený CFD model zkušební pece pro zkoumání tlakových a rychlostních poměrů. Dále bude popsán požární experiment na skutečné zkušební peci za účelem validace některých výsledků z CFD modelu zkušební pece. Závěr práce se věnuje vyhodnocení získaných výsledků a poznatků z CFD modelu a experimentu.

Klíčová slova

tlakové poměry; rychlost proudění; obousměrná rychlostní sonda; požární experiment; měření; tlak; teplota; FDS; CFD; Reynoldsovo číslo; středněrozměrová zkouška

Abstract

The thesis focuses on pressure ratios and velocity of gases in fire conditions. The main goal of this work is to map the pressure and velocity ratios in the CFD model of a medium-sized fire furnace for testing the fire resistance of building structures and products at UCEEB CTU in Prague (hereinafter referred to as test furnaces). The theoretical part of the thesis describes the pressure conditions and gas flow in a typical fire situation, thus, a fire in a room with openings, and the associated analytical solution. Furthermore, the theoretical part summarizes the measurement of pressures and flow rates of gases in a fire situation while focusing on a bidirectional velocity probe. At the end of the theoretical part of the thesis, the basic requirements related to the topic of the thesis are described for the environment in test fire equipment such as a test furnace. In the practical part of the thesis a modified CFD model of the test furnace will be introduced for the investigation of pressure and speed conditions. Furthermore, a fire experiment on a real test furnace will be described in order to validate some results from the CFD model of the test furnace. The conclusion of the work is devoted to the evaluation of the obtained results and findings from the CFD model and experiment.

Keywords

pressure ratios; flow velocity; bi-directional probe; fire experiment; measurement; pressure; temperature; FDS; CFD; Reynolds number; medium-scale test

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

V	Objemový průtok	[m ³ /s]
A_u	Plocha horního otvoru	[m ²]
A_l	Plocha dolního otvoru	[m ²]
A_s	Plocha pod skutečnou teplotní křivkou	[m ²]
A	Plocha	[m ²]
m	Hmotnostní průtok	[kg/s]
m_a	Hmotnostní průtok vzduchu	[kg/s]
m_g	Hmotnostní průtok plynů	[kg/s]
v	Rychlost proudění	[m/s]
v_a	Rychlost vzduchu	[m/s]
v_g	Rychlost plynů	[m/s]
g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]
h	Výška hladiny nad plochou	[m]
h_i	Výška (vzdálenost) od středu dolního otvoru k neutrální rovině	[m]
h_u	Výška (vzdálenost) od středu horního otvoru k neutrální rovině	[m]
$h_{n.r.}$	Výška od podlahy pece k neutrální rovině	[m]
H_N	Výška neutrální roviny	[m]
H_D	Výška kouřové vrstvy	[m]
H	Výška mezi středy otvorů	[m]
P	Tlak	[Pa]
P_c	Celkový tlak	[Pa]
P_s	Statický tlak	[Pa]
ΔP	Rozdíl tlaků měřený rychlostní sondou	[Pa]
ΔP_u	Rozdíl tlaků pro horní otvor (u = upper)	[Pa]
ΔP_l	Rozdíl tlaků pro spodní otvor (l = lower)	[Pa]
D	Vnitřní průměr obousměrné rychlostní sondy	[mm]

T	Teplota	[°C]
T_a	Teplota okolí	[°C]
T_g	Teplota plynů	[°C]
T_0	Teplota 273,15 K	[K]
T_s	Teplota plynu v odtahovém potrubí	[K]
V_{298}	Objemový průtok v obousměrném potrubí	[m ³ /s]
C_s	Sutherlandova konstanta	[-]
C	Průtokový koeficient	[-]
k_t	Kalibrační konstanta	[-]
k_p	Reynoldsova číselná korekce pro obousměrnou rychlostní sondu	[-]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
t	Čas	[min]
M	Molekulová hmotnost vzduchu	[kg/mol]
R	Ideální plyn konstantní	[J/K.mol]

Řecké symboly

ρ	Hustota tekutiny/plynu	[kg/m ³]
ρ_{298}	Hustota vzduchu při 25 °C a atmosférickém tlaku	[kg/m ³]
ρ_a	Hustota okolního vzduchu	[kg/m ³]
ρ_g	Hustota plynů	[kg/m ³]
μ	Dynamická viskozita vzduchu při dané teplotě vzduchu	[centipois]
μ_0	Referenční viskozita vzduchu při T_0	[centipois]

Zkratky

ČR	Česká republika
ČVUT	České vysoké učení technické
UCEEB	Universitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze
ORS	Obousměrná rychlostní sonda
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)

RCT	Room Corner Test
SBI	Single Burning Item
PT	Plate Thermometers (deskové snímače teploty)
TC	Thermocouple (plášťový termoelektrický článek)
LDA	Laser Doppler Anemometry
SPIV	Stereoscopic particle image velocimetry (částicová obrazová velocimetrie)
ZOKT	Zařízení pro odvod kouře a tepla
VZT	Vzduchotechnika
LES	Large Eddy Simulation (velká vířivá simulace)
DES	Direct Numerical Simulation (přímá numerická simulace)
OBST	Předmět (programovací příkaz v programu FDS)
VENT	Otvor (programovací příkaz v programu FDS)
MB	Měřicí bod (namodelovaný v programu FDS)
HRRPUA	Heat Release Rate per Unit Area
ŘP1	Podkapitola (Řešený příklad 1)

1 Úvod

1.1 Motivace

Proudění vzduchu a horkých plynů dovnitř a ven okny, dveřmi a průduchy z prostoru zasaženého požárem je řízen tlakovým rozdílem v těchto ventilačních otvorech a hraje zásadní roli v průběhu požáru. Tento proces poskytuje informace o energetické rovnováze v místnosti a umožňuje tak provést výpočty, které vedou k zásadním znalostem o požáru, jako je teplota horkého plynu, výška kouřové vrstvy v místnosti atd.

Spolu s teplotou je měření rychlosti proudění a tlaku při požárních experimentech nebo zkouškách požární odolnosti jedním z nejzákladnějších způsobů jak porozumět požáru a jeho chování a jak charakterizovat požární prostředí. Měření rychlosti proudění vzhledem k vysokým teplotám, zplodinám hoření, dynamice požáru a dalším faktorům může být problematické a v některých případech nepřesné. Pro měření rychlosti proudění za vysokých teplot je nejčastěji používána obousměrná rychlostní sonda “(dále jen ORS)” známá také jako Pitotova trubice. Toto měřicí zařízení, resp. tato měřicí metoda, je nepřímou měřicí metodou, neboť neměříme přímo rychlost proudění plynů, ale měříme rozdíl tlaků spolu s teplotu v blízkosti ORS, dále rychlost proudění dopočítáváme skrze příslušné vzorce vycházejícího z Bernoullioho zákona. Ač jde o nejpoužívanější měřicí zařízení, ne vždy je toto měření přesné a použitelné pro běžné rychlosti proudění u požárních experimentů.

Tato diplomová práce částečně navazuje na předchozí diplomovou práci [1], kde byla zhotovena požární pec pro středněrozměrové zkoušky požární odolnosti, a kde dále byla tato pec namodelována v FDS programu. Středněrozměrová požární pec se nachází v požární laboratoři na UCEEB ČVUT v Praze a je v současné době využívána právě pro testování výrobků a konstrukcí různých výrobců. Tato diplomová práce má dále za cíl o něco zdokonalit CFD model této pece a lépe zmapovat procesy z úvodu této kapitoly, tedy tlakové a rychlostní poměry v této zkušební peci. Tlakové poměry a proudění plynů hraje významnou roli v průběhu požární zkoušky a v chování samotného testovaného stavebního výrobku.

Podmínky prostředí ve středněrozměrové požární peci, resp. zkušebním zařízení, jako je tlak, výšku neutrální roviny, teplota atd., je z legislativy limitováno a sledování těchto hodnot, je důležitým aspektem zkoušek požární odolnosti, v této diplomové práci některé tyto sledované veličiny popíšeme a pro CFD model pece zhodnotíme.

1.2 Struktura práce

Diplomová práce je rozdělena do šesti kapitol a je doplněna technickou přílohou.

Kapitola 1 s názvem „Úvod“ uvádí hlavní motivaci pro zpracování diplomové práce v oblasti tlakových poměrů a rychlosti proudění plynů.

Kapitola 2 s názvem „**Současný stav poznání**“ řeší proudění plynů a tlakové poměry z fyzikálního hlediska. Součástí kapitoly je i popsání vzorců, resp. vztahů spojených s tématem a její praktické představení na řešeném případě, resp. zadání modelu pece, skrze toky a tlakové rozdíly ve ventilačních otvorech této pece. Dále tato kapitola popisuje měření rychlosti proudění a tlaků za požární situace se zaměřením na ORS. V poslední část kapitoly je představena požární zkušební pec, jsou popsány požadavky na prostředí ve zkušební peci, resp. legislativní požadavky jako je tlak, teplota, obsah kyslíku, výška neutrální roviny atd., která jsou kladeny na takovéto zkušební zařízení.

Kapitola 3 s názvem „**CFD model tlakových poměrů a rychlosti proudění ve středněrozměrové požární peci**“ popisuje matematický CFD model, vytvořený v programu FDS, jeho úpravu od předchozího modelu [1] a výsledné simulace. Jedná se o model požární pece pro středněrozměrové zkoušky požární odolnosti na UCEEBU ČVUT v Praze. Model zkušební pece se zabývá rychlostí proudění v této peci a ve ventilačních otvorech pece, dále zkoumá tlakové poměry ve vnitřku této pece. Okrajově kapitola řeší vylepšení původního modelu [1].

Kapitola 4 s názvem „**Experiment pro ověření tlakových poměrů a rychlosti proudění ve středněrozměrové požární peci**“ se zabývá dvěma požárními experimenty, které jsou provedeny v požární laboratoři na UCEEB ČVUT v Praze. Experimenty jsou provedeny na již zmiňované zkušební peci a mají za cíl validovat některé výsledky z CFD modelu pece.

Kapitola 5 s názvem „**Diskuze získaných výsledků**“ shrnuje porovnání CFD modelu pece se skutečnou zkušební pecí a diskutuje získané výsledky a poznatky. Okrajově také kapitola porovnává některé vybrané zajímavé výsledky CFD modelu a porovnává je s řešeným příkladem z teoretické části práce.

Kapitola 6 s názvem „**Závěr**“ shrnuje získané poznatky z provedených simulací a požárních experimentů v souvislosti s tlakovými poměry a prouděním plynů. V závěru této kapitoly jsou uvedena doporučení pro případnou další navazující práci, hlavně v oblasti matematického modelování.

V Příloze 1 je uveden zdrojový kód CFD modelu.

1.3 Cíle práce

Hlavní cíle diplomové práce jsou:

- Shrnout proudění plynů a tlakové poměry v uzavřeném prostoru s otvory (ventilací) z fyzikálního hlediska, včetně příslušných vztahů.
- Popsat měření rychlosti proudění a tlaků za požární situace a představit nejpoužívanější měřicí zařízení těchto měření.
- Představit obousměrnou rychlostní sondou, její výhody, nevýhody a související vztahy přepočtu tlaku a teploty na rychlost proudění.

- Upravit stávající CFD model zkušební pece [1] a shrnout legislativní požadavky, které jsou na vnitřní prostředí takového zkušebního zařízení kladeny.
- Provést simulace zkoumající tlakové poměry a proudění plynů v CFD modelu, představit výsledky.
- Provést požární experiment na skutečné středněrozměrové zkušební peci v požární laboratoři na UCEEB ČVUT v Praze, představit výsledky.
- Porovnat a shrnout poznatky a výsledky z požárních experimentů a z CFD modelu.
- Navrhnout možné další oblasti zkoumání daného tématu.

2 Současný stav poznání

V této kapitole je popsáno proudění plynu a rychlost proudění plynů a co tuto rychlost ovlivňuje, dále jsou zde popsány tlakové poměry a proudění plynů v uzavřeném prostoru s ventilačními otvory, jejich vliv na proudění plynů a průběh požáru. Okrajově kapitola zmiňuje tlakové poměry v uzavřeném prostoru. Kapitola dále řeší vzorce související s rychlostí proudění a tlaky, a prakticky je představuje na řešeném příkladu zkušební pece.

Kapitola dále shrnuje měřicí zařízení a měření rychlosti proudění a tlaků za požární situace se zaměřením na obousměrnou rychlostní sondu a základní vztahy, které jsou s tímto měřicím zařízením spojeny, dále výhody a nevýhody tohoto měřicího zařízení a některé zajímavé experimenty, kde bylo tohoto měřicího zařízení užito.

Kapitola také představuje zkušební pec, na které budou tlakové poměry a rychlosti proudění zkoumány v další části práce a shrnuje požadavky, které jsou na takovéto zkušební zařízení z hlediska vnitřního prostředí kladeny.

2.1 Rychlost proudění plynů

Rychlost proudění plynu lze nejčastěji popsat jako vzdálenost, kterou urazí určitá pohyblivá se částice za jednotku času, nejčastěji se udává v metrech za sekundu. Proudění plynu se může uskutečnit převážně dvěma způsoby:

- prouděním ve volném prostoru (např. kouř odcházející okny a dveřmi při požáru v místnosti),
- prouděním v zúženém omezeném prostoru (např. proudění plynu v potrubí, při odtahu kouře prostřednictvím ZOKT).

Rychlost proudění závisí na objemovém (V) nebo hmotnostním (m) průtoku.

Objemový průtok potrubím:

$$V = A \cdot v \quad (1)$$

Hmotnostní průtok potrubím:

$$m = V \cdot \rho \quad (2)$$

Rychlost proudění (závislá na objemovém průtoku V):

$$v = \frac{V}{A} \quad (3)$$

Rychlost proudění (závislá na hmotnostním průtoku m):

$$v = \frac{m}{A \cdot \rho} \quad (4)$$

kde

V – objemový průtok [m^3/s]

A – plocha potrubí [m^2]

ρ – hustota látky v [kg/m^3]

m – hmotnostní průtok [kg/s]

v – rychlost proudění [m/s]

2.1.1 Druhy proudění

Proudění lze rozdělit na dvě skupiny podle chování proudící látky, a to na **turbulentní** nebo **laminární** proudění. Proudění závisí na vnitřních třecích a setrvačných silách, tlaku, teplotě, tvaru otvoru, kterým proudící látka prochází a na Reynoldsově čísla. Reynoldsovo číslo se používá pro posouzení druhu proudění, je to poměr mezi setrvačnými silami a silami třecími. Dalším důležitým parametrem je kritická hodnota Reynoldsova čísla. Kritická hodnota závisí na průřezu, např. u vody se nejčastěji pohybuje kolem hodnoty 2000 [-]. Tato hodnota určuje, zda jde o laminární nebo turbulentní proudění [2].

Reynoldsovo číslo lze vyjádřit následovně:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (5)$$

kde

Re – Reynoldsovo číslo [-]

μ – dynamická viskozita [$Pa \cdot s$]

D – průměr potrubí [mm]

ρ – hustota tekutiny [kg/m^3]

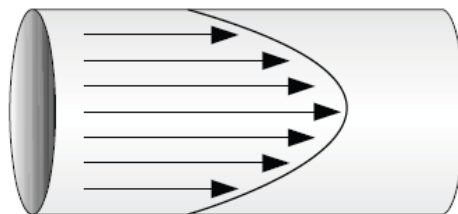
v – rychlost proudění [m/s]

Reynoldsovo číslo bude důležité v další části diplomové práce, kde tato veličina figuruje ve vzorci pro výpočet rychlost proudění při použití ORS.

2.1.2 Laminární proudění

Laminární proudění (Obr. 1) představuje pohyb látky, u který se částice pohybují v rovných dráhách, které jsou rovnoběžné a vzájemně se nekříží nebo nemísí. Rychlost pohybu těchto částí

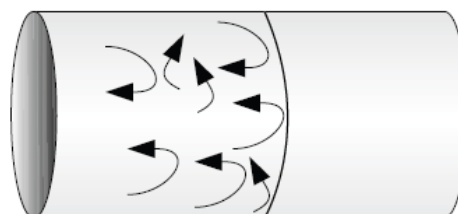
se od stěny směrem doprostřed zrychluje. Hodnota Reynoldsova čísla pro laminární proudění u vody je přibližně do hodnoty 2000. Pro ostatní látky hodnotu ovlivňuje viskozita, druhu proudící látky, tvaru materiálu, kterým látka proudí atd [2].



Obr. 1: Laminární rychlostní profil [2]

2.1.3 Turbulentní proudění

Turbulentní proudění (Obr. 2) představuje pohyb látky, u který se částice pohybují v neuspořádaných navzájem se křížících směrech, které nejsou rovnoběžné a vzájemně se mísí a vytvářejí se víry. Tento chaotický pohyb nastává při vyšších rychlostech proudění. Hodnota Reynoldsova čísla pro turbulentní pohyb u vody je přibližně nad hodnotu 4000 [2].



Obr. 2: Turbulentní rychlostní profil [2]

Hodnota Reynoldsova pro hodnoty od 2000 do 4000 představuje proudění, u kterého nejde jednoznačně určit, zda jde o proudění laminární nebo turbulentní.

Výše uvedené platí pro proudění v zúženém omezeném prostoru, dále se zaměříme na rychlost proudění pro typičtější požární situaci, tedy proudění plynů v místnosti s otvory.

2.2 Tlakové poměry a proudění plynů v uzavřeném prostoru

V této kapitole se podíváme na tlakové poměry a rychlosti proudění pro typický příklad požáru, a to požár v místnosti s otvory jako jsou dveře nebo okno. Na tomto příkladu budou popsány tlakové poměry a proudění plynů přes otvory způsobené tlakovým rozdílem, kde tento proces, kdy je přiváděn studený vzduch a odváděn horký plyn skrze otvory, poskytuje informace o hmotnostní a energetické rovnováze, ze které je možno dopočítat pro naše téma důležité fyzikální veličiny jako je rychlost proudění, tlak, výška neutrální roviny atd. Dále zde popíšeme tyto procesy na příkladu prostoru s jedním velkým otvorem, nebo se dvěma menšími otvory, kde jeden bude v horní části a druhý v dolní části prostoru. V závěru budou krátce zmíněny přetlaky vyvolané požárem v prostoru bez otvorů. Nejvíce nás bude zajímat prostřední případ, tedy prostor s menšími

otvory v dolní a horní části prostoru, který se modelově podobá zkušební požární peci, která bude v další části této diplomové práce důležitá.

2.2.1 Tlakové poměry a proudění plynů v uzavřeném prostoru s ventilačními otvory

Tok tekutin, v našem případě plynu, vždy probíhá z místa s vysokým tlakem do místa s nízkým tlakem. Kvantifikace tlakových rozdílů tedy činí významnou roli. Rozdíly v tom, čím je tlak řízen, je vhodné rozdělit do dvou kategorií. V první kategorii je tlakový rozdíl řízený požárem, a to ze dvou příčin. První příčina je **roztážnost horkých plynů** a druhá příčina je **vztlak horkých par** (viz dále). Ve druhé kategorii jsou tlakové rozdíly způsobené běžnými podmínkami, které jsou v budově vždy přítomny, nebo jsou vytvořeny rozdíly mezi prostředím v budově vůči venkovnímu prostředí [3]:

Kategorie 1: Tlakové rozdíly způsobené požárem

- Tlakové rozdíly způsobené tepelnou roztážností plynů v uzavřeném prostoru v případě požáru. Když plyny zahřejeme, tak se roztahují. Ve velmi těsně uzavřené místnosti to může způsobit zvýšení tlaku. Téměř ve všech budovách nebo místnostech však existují oblasti netěsností, které způsobí průnik plynů ven z budovy. Díky těmto netěsnostem je nárůst tlaku téměř nepodstatný a tento jev je ve výpočtech zanedbáván. V určitých typech místností, které jsou těsně uzavřeny, jako je např. strojovna na lodi, by tento nárůst tlaku ale byl enormní a musel by se ve výpočtech samozřejmě zohledňovat.
- Rozdíly tlaku v důsledku vztlaku horkých plynů, respektive v důsledku rozdílů hustoty mezi horkými a studenými plyny. Toto je nejčastější příčina toku kouře ven z budovy a přítoku studeného vzduchu dovnitř do budovy, tomuto jevu se také říká komínový efekt.

Kategorie 2: Takové rozdíly způsobené běžnými podmínkami

Tlakové rozdíly způsobené přirozenými podmínkami v budově tvořené rozdílnou hustotou, resp. teplotou uvnitř/vně budovy (zima a léto versus teplota v budově), dále tlakové rozdíly způsobené atmosférickými proudy větru a zatížením větru a jeho pohybů v budově, nuceným větráním (ZOKT), klimatizací VZT atd. Jak je patrné z výše uvedeného, nejčastější příčinou proudění kouře v budově a z ní jsou rozdíly hustoty mezi horkými a studenými plyny. Průtok plynů dovnitř a ven těmito ventilačními otvory je řízen tlakovým rozdílem vnitřního a vnějšího prostředí.

Pokud existuje tlakový rozdíl napříč otvorem, plyn bude tlačěn skrz tento otvor. Plyn zde není brán jako ideální, plyn bude tedy klást odpor, ten je v rovnicích vyjádřen koeficientem průtoku, který uvádí, že bude protékat otvorem pouze z části. Abychom si mohli popsat proudění, je nejprve nutné představit si tlak a další s tématem související pojmy [3].

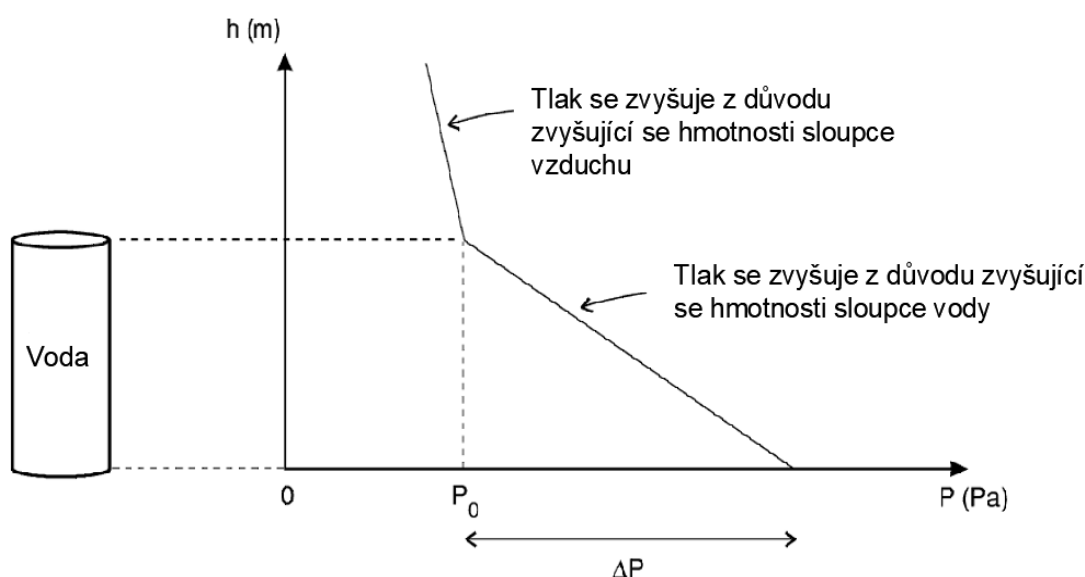
Atmosférický tlak

Atmosférický tlak je síla, kterou působí atmosféra planety na plochu v určitém místě. Atmosférický tlak dosahuje nejvyšších hodnot při povrchu země a s rostoucí výškou směrem k otevřenému vesmíru klesá. Jedna atmosféra na povrch země je cca $101,3 \cdot 10^3$ Pa, což je přibližně

1 bar → ve výpočtech, které zde budou dále představeny se používá rozdíl tlaků, tj. atmosférický tlak se v nich zanedbává.

Hydrostatický tlak

Hydrostatický tlak je tlak, který vzniká v kapalině nebo plynu jejich tíhou (kapalina nebo tlak jsou v klidu), tlak plynu můžeme nazývat jako aerostatický tlak. Na Obr. 3 vidíme nádobu s vodou. Na povrch působí tlak přibližně 1 atm., který se dále pod hladinou zvyšuje rychlostí 9810 Pa/m. Tento tlak lze vyjádřit jako tlakový rozdíl ve vztahu k atmosférickému tlaku, hydrostatický tlak je vyjádřen vztahem (6).



Obr. 3: Rozdíl hydrostatického tlaku působící kapalinou na povrch [3]

$$\Delta P = \frac{F}{A} = h\rho g \quad (6)$$

kde

ΔP – hydrostatický tlakový rozdíl [Pa]

h – představuje výšku vodní hladiny nad plochou [m]

ρ – hustota vody [kg/m^3]

g – tíhové zrychlení [m/s^2]

A – vodní plocha [m^2]

Hydrodynamický tlak

Působí hlavně přes otvory, kde objem tekutiny nebo plynu přejde z klidové fáze a začíná nabývat na rychlosti. Jako příklad si opět můžeme vzít Obr. 3 a představit si, že ve spodní části nádoby s vodou vyvrtáme díru, z této díry proudí voda, která by představovala právě hydrodynamický tlak.

V příkladu uvedeném na Obr. 4 uvažujeme jak okolní prostředí, tak plyn uvnitř místnosti v klidovém režimu. To ovšem neplatí u horního a dolního otvoru kudy proudí do místnosti vzduch a jsou tudy odváděny horké plyny. Je třeba říct že výše uvedené platí, pokud má plyn uvnitř místnosti větší teplotu, než je teplota okolního prostředí. Právě v těchto otvorech dochází k přeměně hydrostatického tlaku na tak hydrodynamický. Tento hydrodynamický tlak se musí rovnat hydrostatickému tlaku. Podle rovnice (7) z těchto dvou tlaků dostaneme vztahy mezi tlakovým rozdílem, výškou neutrální roviny, hustotu a rychlost. To nám umožní vypočítat rychlost proudění, hmotnostní a objemový průtok do a ven skrze ventilační otvory. Pro výpočet těchto hodnot bude použita Bernoulliho rovnice viz kapitola 2.2.2 [3].

Statický tlak

Statický tlak je tlak okolního vzduchu. Celkový tlak je součet statického a dynamického tlaku.

Neutrální rovina

Můžeme si jí vysvětlit na příkladu s místností zasažené požárem, tato místnost má pouze dveře, kterými proudí jak horké, tak studené plyny (vzduch). Horké plyny budou vytékat horní částí otvoru a studené plyny budou protékat dovnitř jeho spodní částí. Průtok je způsoben tlakovým rozdílem přes výšku dveří, který je způsoben teplotním rozdílem plynů. V určité výšce nad danou referenční výškou (podlahou místnosti) bude tlakový rozdíl nulový, a právě tato výška se nazývá výškou neutrální roviny. Horké plyny budou proudit nad neutrální rovinou a studené plyny pod ní (Obr. 4) [3].

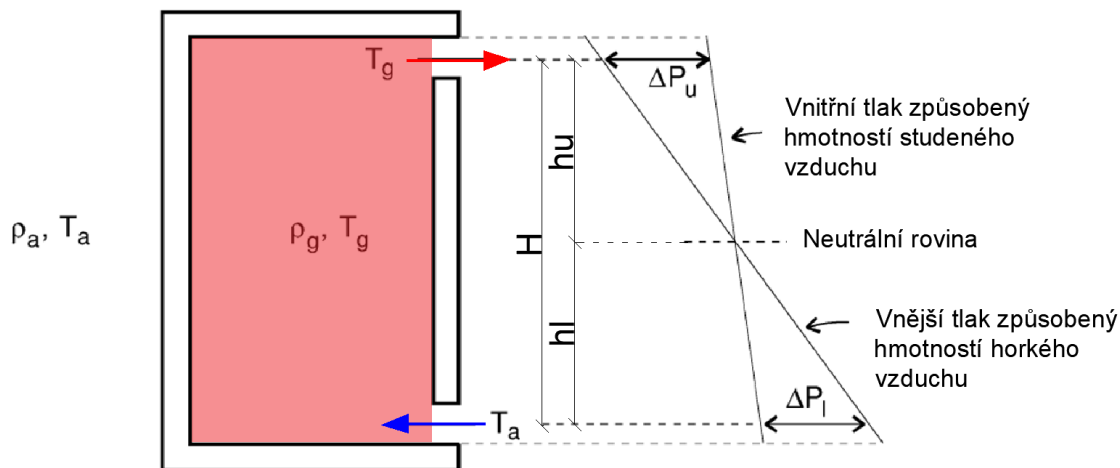
Příčinou proudění plynů při požáru je již zmíněný hydrostatický tlakový rozdíl, kde dolní otvor nasává chladný vzduch (negativní tlakový rozdíl ΔP_l) a horní vytlačuje horký plyn (pozitivní tlakový rozdíl ΔP_u) (Obr. 4).

kde

ρ_a , resp. T_a = je hustota, resp. je teplota okolí, (a = ambient) okolní vzduch

ρ_g , resp. T_g = je hustota, resp. je teplota plynů (g = gas)

ΔP_u resp. ΔP_l = je rozdíl tlaku pro horní (u = upper) a dolní (l = lower) otvor



Obr. 4: Popis proudění plynu/vzduchu v uzavřeném prostoru s ventilačními otvory způsobený tlakovým rozdílem [3]

Pokud je teplota plynu větší, než teplota okolního vzduchu, tedy je hustota plynu menší, než hustota okolního vzduchu, dochází k proudění [3]. Jevu, kde je dole nasáván vzduch a nahoře vytlačovány teplé plyny, se také říká komínový efekt.

2.2.2 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální tekutiny, také vyjadřuje vztah mezi tlakem, rychlostí a průtokem tekutiny (tekutina = kapalina nebo plyn).

$$P_1 + \frac{v_1^2 \cdot \rho_1}{2} + h_1 \cdot \rho_1 \cdot g = P_2 + \frac{v_2^2 \cdot \rho_2}{2} + h_2 \cdot \rho_2 \cdot g \quad (7)$$

$$(A) + (B) + (C) = (A) + (B) + (C)$$

kde

P – tlak [Pa]

h – výška nad určitým referenčním bodem [m]

g – tíhové zrychlení [m/s^2]

v – rychlost proudící látky [m/s]

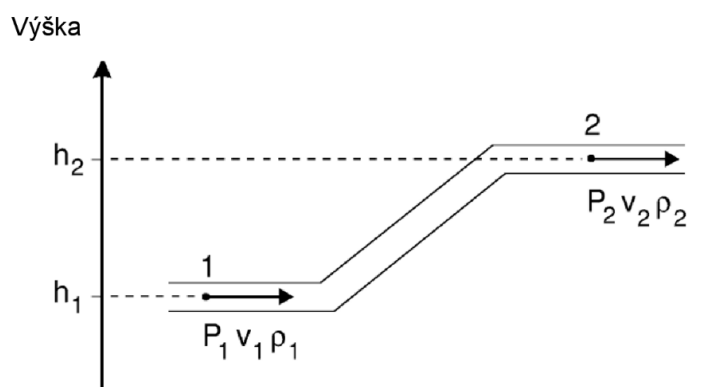
ρ – hustota látky [kg/m^3]

(A) – představuje statický tlak

(B) – tlak hydrodynamický

(C) – tlak hydrostatický

Rovnice zanedbává určité skutečnosti a provádí jistá zjednodušení. Rovnice předpokládá ideální zachování energie proudící tekutiny v každém místě proudu, tekutinu uvažuje jako nestlačitelnou, dále zanedbává ztráty třením (ztráty viskozitou) a neuvažuje žádné tepelné ztráty do okolí [3]. Celý Bernoulliho princip pro horní a dolní otvor v místnosti znovu na Obr. 5.



Obr. 5: Bernoulli princip [3]

Nyní použijeme Bernoulliho rovnici na horní otvor místnosti (Obr. 6). Budeme uvažovat tlak v bodě 1 uvnitř místnosti, tlak v bodu 2 ve vnějším prostředí a bod 3 v otvoru. Neutrální rovinu uvažujeme jako referenční hodnotu, kde jsou tyto tři body ve stejné výšce h_u nad touto neutrální rovinou. Výraz pro rozdíl hydrostatického tlaku v horním větracím otvoru je vyjádřen níže.

Nejprve nás při odvozování rovnice zajímá tlakový rozdíl mezi body 1 a 2 vztah (8, 9), kde je rychlost pro body 1 a 2 mimo otvor nulová, tedy dostáváme z Bernoulliho rovnice hydrostatický tlakový rozdíl pro horní otvor ΔP_u [3]:

$$\Delta P_1 - P_2 = h_2 \cdot \rho_2 \cdot g - h_1 \cdot \rho_1 \cdot g \quad (8)$$

$$\Delta P_u = h_u (\rho_a - \rho_g) g \quad (9)$$

Pokud uvažujeme Bernoulliho rovnici pro bod 1 a 3 dostaneme:

$$P_1 + \frac{v_1^2 \cdot \rho_1}{2} + h_1 \cdot \rho_1 \cdot g = P_3 + \frac{v_3^2 \cdot \rho_3}{2} + h_3 \cdot \rho_3 \cdot g \quad (10)$$

Kde rychlost v bodě 1 je opět nulová, tedy dostáváme hydrodynamický tlakový rozdíl pro horní otvor P_u :

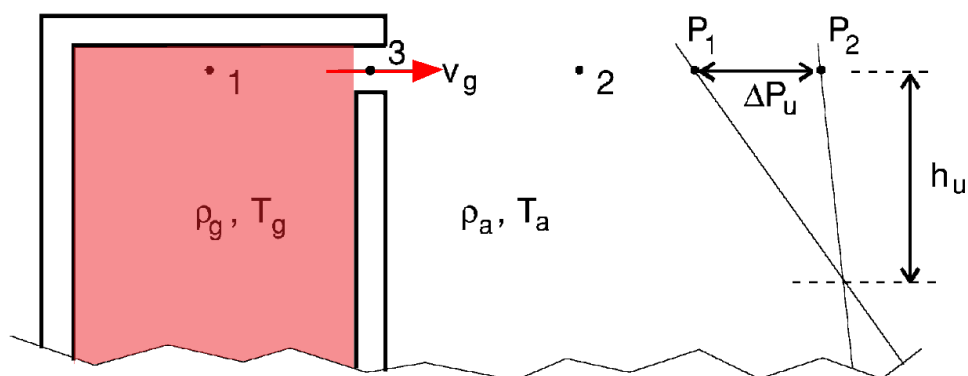
$$P_1 - P_3 = \frac{v_g^2 \cdot \rho_g}{2} \quad (11)$$

$$\Delta P_u = \frac{v_g^2 \cdot \rho_g}{2} \quad (12)$$

Když upravíme vzorec (12) dostaneme, resp. vyjádříme rychlost v bodě 3, tedy rychlost proudění skrz horní otvor:

$$v_g = \sqrt{\frac{2\Delta P_u}{\rho_g}} \quad (13)$$

Rychlost bude mírně vyšší v horní části otvoru a mírně nižší ve spodní části otvoru.



Obr. 6: Aplikace Bernoulliho vzorců pro horní otvor [3]

Vzorec pro rychlost proudění v dolním otvoru bude obdobný, pouze dojde ke změně dolních indexů. Tlakový rozdíl se po výšce takto malého větracího otvoru příliš nemění. Pokud bychom neměli dva otvory ale jeden velký otvor, princip a vzorce by byly podobné, v dolní části otvoru by se vzduch nasával, v horní odváděl horký plyn [3]. Vzorec (13) pro nás bude důležitý v dalších kapitolách zaměřených na rychlost proudění a obousměrnou rychlostní sondu, kde bude do vzorce tohoto vzorce přidána Reynoldsova číselná korekce, závislá na Reynoldsově čísle.

U vzorce (13) je pro měření rychlosti proudění v požární situaci praktičtější použití teploty plynu místo hustoty plynu, nejprve je nutné ovšem znát tzv. stavové rovnice, vztah mezi hustotou a teplotou (14):

$$PM = \rho RT \quad (14)$$

kde

P – tlak atmosférický = $101,3 \cdot 10^3$ [N/m²] nebo [Pa]

M – molekulová hmotnost dotyčného vzduchu $\approx 0,0289$ [kg/mol]

R – ideální plyn konstantní $\approx 8,144$ [J/(K.mol)] nebo [Nm/(K.mol)]

Atmosférický tlak se s výškou mění jen velmi málo, takže používáme hodnoty standardního atmosférického tlaku. Plyny hoření se nejvíce skládají ze vzduchu, proto lze pro plyn zjednodušeně uvažovat molekulovou hmotnost vzduchu 0,0289 kg/mol [3]. Po dosazení správných jednotek do vztahu (14) dostaneme:

$$T = \frac{353}{\rho} \text{ nebo } \rho = \frac{353}{T} \quad (15)$$

kde

T – teplota [K]

ρ – hustota [kg/m³]

Po úpravě dostáváme vzorec pro rychlost proudění, kde rychlost proudění je možné spočítat z teploty plynu a rozdílu tlaku:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P \cdot T}{353}} \quad (16)$$

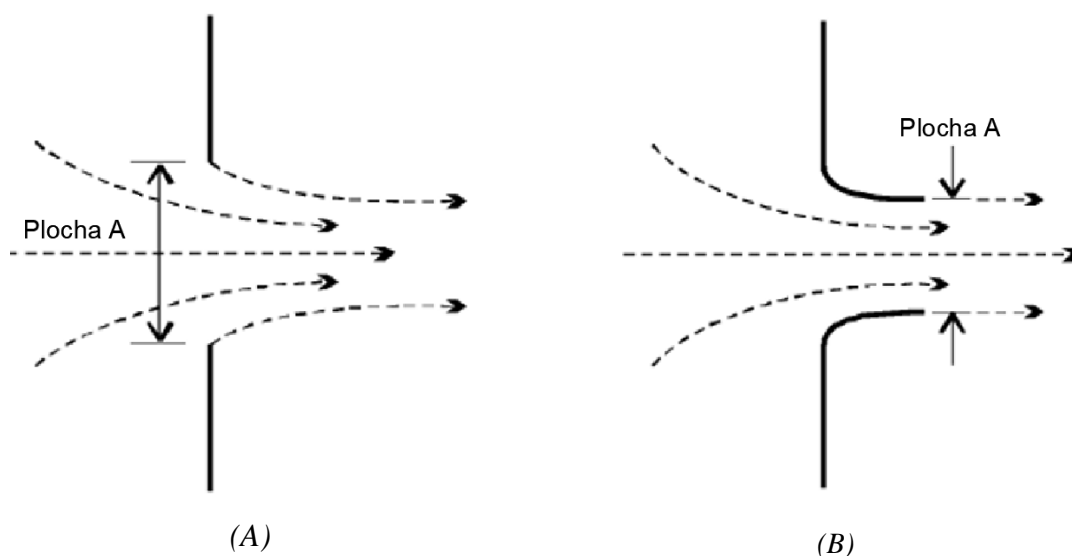
Jako alternativu vztahu (15) lze použít tabulku závislosti hustoty vzduchu na teplotě, (Tab1).

Tab. 1: Tabulka závislosti hustoty vzduchu na teplotě

T [°C]	T [K]	ρ [kg/m ³]
0	273,15	1,275
10	283,15	1,230
20	293,15	1,188

40	313,15	1,112
60	333,15	1,046
80	353,15	0,986
100	373,15	0,934
140	413,15	0,843
160	433,15	0,804
180	453,15	0,769
200	473,15	0,736
250	523,15	0,666
300	573,15	0,608
350	623,15	0,559
400	673,15	0,517
500	773,15	0,451
600	873,15	0,399
800	1073,15	0,325
1000	1273,15	0,274

Tyto vzorce vycházející z Bernoulliho rovnice jsou pouze přibližné a platí pouze pro idealizované okolnosti proudění, proto jsou pro tyto vzorce používány průtokové koeficienty. Tyto koeficienty jsou stanoveny experimentálními měřeními. V hydraulice se rozlišují dva hlavní typy otvorů [4]:



Obr. 7: Dva typy ventilačních otvorů: (A) otvor; (B) tryska (otvor se zkosením) [3, 4]

Obrázek ukazuje, že pouze část oblasti otvoru nese tok efektivně, většina reálných ventilací je klasifikována jako otvor.

V požární praxi je efektivní oblast obvykle kolem 60–70% skutečné plochy otvoru, to je vyjádřeno použitím zmíněného průtokového koeficientu. Průtokový koeficient je funkcí Reynoldsova čísla vyjádřeného ze vztahu (5) a vyjadřují viskozitu, dále také samozřejmě záleží na geometrii otvoru [3, 4].

Z výše uvedených Bernoulliho rovnic lze krom rychlost proudění podobně vyjádřit hmotnostní a objemový průtok skrz otvor:

$$V = C \cdot A \sqrt{\frac{2\Delta P_{u,l}}{\rho_g}} \quad (17)$$

$$m = C \cdot A \sqrt{2 \cdot \rho_g \cdot \Delta P_{u,l}} \quad (18)$$

$$m_g = C \cdot A_u \cdot \rho_g \sqrt{\frac{2 \cdot h_u \cdot (\rho_a - \rho_g) g}{\rho_g}} \quad (19)$$

$$m_a = C \cdot A_l \cdot \rho_a \sqrt{\frac{2 \cdot h_l \cdot (\rho_a - \rho_g) g}{\rho_a}} \quad (20)$$

kde

C – průtokový koeficient [-]

V – objemový průtok [m^3/s]

A – plocha otvoru [m^2]

A_u – plocha horního otvoru [m^2]

A_l – plocha dolního otvoru [m^2]

m – hmotnostní tok [kg/s]

m_u – hmotnostní tok v horním otvoru [kg/s]

m_l – hmotnostní tok v dolním otvoru [kg/s]

m_l – hmotnostní tok v dolním otvoru [kg/s]

ΔP_u – tlakový rozdíl horním otvoru [kg/s]

ΔP_l – tlakový rozdíl dolním otvoru [kg/s]

Koeficient průtoku pro rychlost proudění, je zván Reynoldsova číselná korekce, stejně jako u hmotnostního a objemového průtoku výše, představuje viskozitu, více se na něj zaměříme v kapitole 2.4.

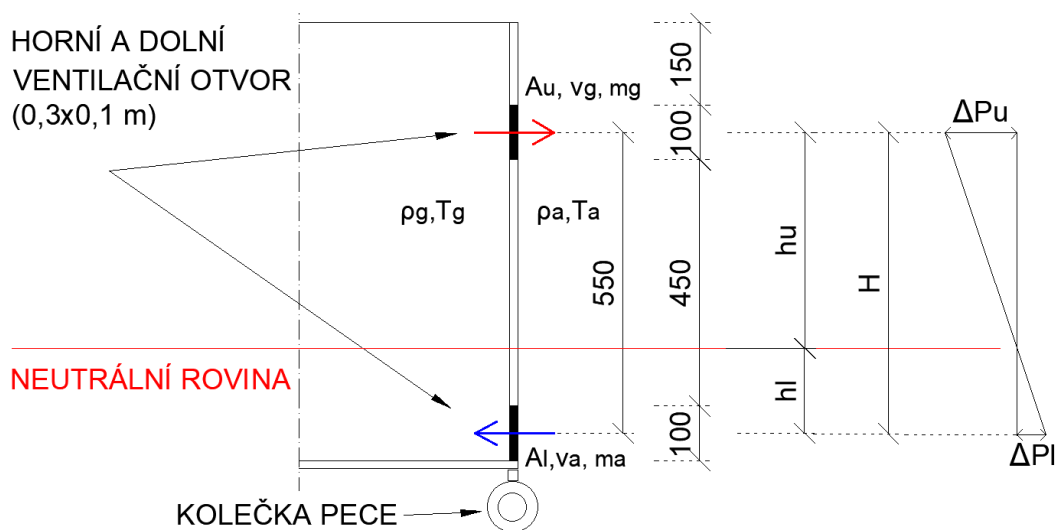
2.2.3 Řešený příklad 1 – tlakové poměry a rychlost proudění ve ventilačních otvorech středněrozměrové požární pece

V této podkapitole si představené vzorce z předchozí podkapitoly vyzkoušíme na názorném příklad s ventilačními otvory pece pro středněrozměrové zkoušky požární odolnosti (Obr. 8 (A)). Tyto výpočty budou pouze přibližné, přesto se nám budou hodit v navazující podkapitole 5.2

(Porovnání CFD modelu a řešeného příkladu 1), kde bude do jisté míry možné toto analytické řešení porovnat s daty nasimulovanými v programu FDS (numerickým řešením) a požárními experimenty.



(A)



(B)

Obr. 8: Středněrozměrová zkušební pec:(A) Pohled na zkušební pec; (B) Popis proudění plynu/vzduchu ve zkušební peci s ventilačními otvory způsobený tlakovým rozdílem, řez příčný

Pro požární pec vypočteme následující:

- výška neutrální roviny nad podlahou pece,
- tlakový rozdíl v horním a dolním ventilačním otvoru,
- rychlost proudění v horním a dolním ventilačním otvoru,
- hmotnostní průtoky v horním a dolním ventilačním otvoru.

Pokud spojíme vztah (19) a (20) získáme vztah (21). Víme, že se musí hmotnostní tok horního a dolního otvoru vzájemně rovnat dle zákona zachování energie, dále víme, že celková vzdálenost

mezi středy otvorů H je složena ze h_l , tedy vzdálenosti středu spodního otvoru k neutrální ose a vzdálenosti h_u , tedy vzdálenosti středu horního otvoru k neutrální ose [3] (Obr. 8 (B)).

$$\frac{h_l}{h_u} = \left(\frac{A_u}{A_l} \right)^2 \frac{\rho_g}{\rho_a} \quad (21)$$

$$H = h_l + h_u \quad (22)$$

Výška pece je 0,8 m, ve stěně pece jsou dva ventilační otvory s výškou 0,1 m a šířkou 0,3 m, výška mezi středy otvorů je 0,55 m. Uvažujeme okolní teplotu mimo pec 20 °C, průměrnou teplotu v peci budeme uvažovat od 100 °C do 800 °C vždy po 100 °C, prakticky si zde ukážeme pro teplotu 500 °C, ostatní teploty budou spočteny stejným způsobem v programu Microsoft Excel. Pro hustoty vzduchu v závislosti na teplotě bude použita (Tab. 1), pro teplotu 20 °C je hustota vzduchu rovna 1,188 kg/m³, pro teplotu 500 °C je hustota plynu 0,451 kg/m³. Tedy dle vztahu (21)

$$\frac{h_l}{h_u} = \left(\frac{0,3 \cdot 0,1}{0,3 \cdot 0,1} \right)^2 \frac{0,451}{1,188} = 0,3796, \text{ dále víme, že dle vztahu (22) } h_u + h_l = 0,55 \text{ m, takže } \frac{0,55 - h_u}{h_u}$$

$$\text{a proto } h_u = \frac{0,55}{1 + 0,3796} = 0,398 \text{ m, tedy výška od podlahy pece k neutrální rovině je}$$

$h_l = 0,151$ m. Vzdálenost podlahy pece ke středu spodního otvoru je 0,05 m. Tedy výška neutrální roviny od podlahy pece je 0,05 + 0,151 = 0,201 m, což je cca 1/4 výšky pece. Použití tohoto vztahu nám dá pouze přibližnou polohu neutrální roviny, pokud stejný postup aplikujeme na teploty od 100 do 800 °C dostaneme následující přibližné vzdálenost neutrální roviny od podlahy pece v závislosti na teplotě (Tab. 2). Po dosazení do vztahu (9) dostaneme tlak v horním otvoru

$$P_u = 0,398(1,188 - 0,451)9,81 = 2,877 \text{ Pa, tlak v dolním otvoru bude podobně}$$

$$P_l = 0,151(1,188 - 0,451)9,81 = 1,091 \text{ Pa, tlaky v závislosti na teplotě (Tab. 3). Po dosazení do}$$

vztahu (13) dostaneme rychlost ve středu horního ventilačního otvoru tedy

$$v_g = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,398(1,188 - 0,451)9,81}{0,451}} = 3,575 \text{ m/s, rychlost ve středu dolního ventilačního otvoru je pak}$$

$$v_a = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,151(1,188 - 0,451)9,81}{1,188}} = 1,355 \text{ m/s, rychlosti v závislosti na teplotě (Tab. 4).}$$

Po dosazení do vztahu (19, 20) při použití průtokového koeficientu 0,7 dostaneme hmotnostní tok

$$\text{skrze horní otvor a dolní otvor } m_g = 0,7 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 0,451 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,398(1,188 - 0,451)9,81}{0,451}} = 3,383 \text{ kg/s,}$$

$$m_a = 0,7 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 1,188 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,151(1,188 - 0,451)9,81}{1,188}} = 3,383 \text{ kg/s, hmotnostní tok v závislosti na teplotě}$$

(Tab. 5). Aby byl zachován princip zákona zachování hmotnosti, musí se nám hmotnostní tok v horním a dolním otvoru rovnat, což nám mimo jiné kontroluje naše výpočty.

Tab. 2: Tabulka vzdálenostmi neutrální roviny od podlahy pece pro určitou teplotu v peci

$T [^{\circ}\text{C}]$	Výška neutrální roviny [m]
100	0,292
200	0,260
300	0,236
400	0,217
500	0,201
600	0,188
700	0,178
800	0,168

Tab. 3: Tabulka tlaku v horním a spodním ventilačním otvoru pece pro určitou teplotu v peci

$T [^{\circ}\text{C}]$	$P_u [\text{Pa}]$	$P_l [\text{Pa}]$
100	0,767	0,603
200	1,506	0,933
300	2,070	1,059
400	2,523	1,098
500	2,877	1,091
600	3,187	1,070
700	3,416	1,041
800	3,656	1,000

Tab. 4: Tabulka rychlosti proudění plynů v horním a dolním ventilačním otvoru pece pro určitou teplotu v peci

$T [^{\circ}\text{C}]$	$v_g [\text{m/s}]$	$v_a [\text{m/s}]$
100	1,282	1,008
200	2,023	1,253
300	2,609	1,335
400	3,124	1,359
500	3,575	1,357
600	3,997	1,342
700	4,344	1,324
800	4,743	1,298

Tab. 5: Tabulka hmotnostního toku v horním a dolním ventilačním otvoru pece pro určitou teplotu v peci

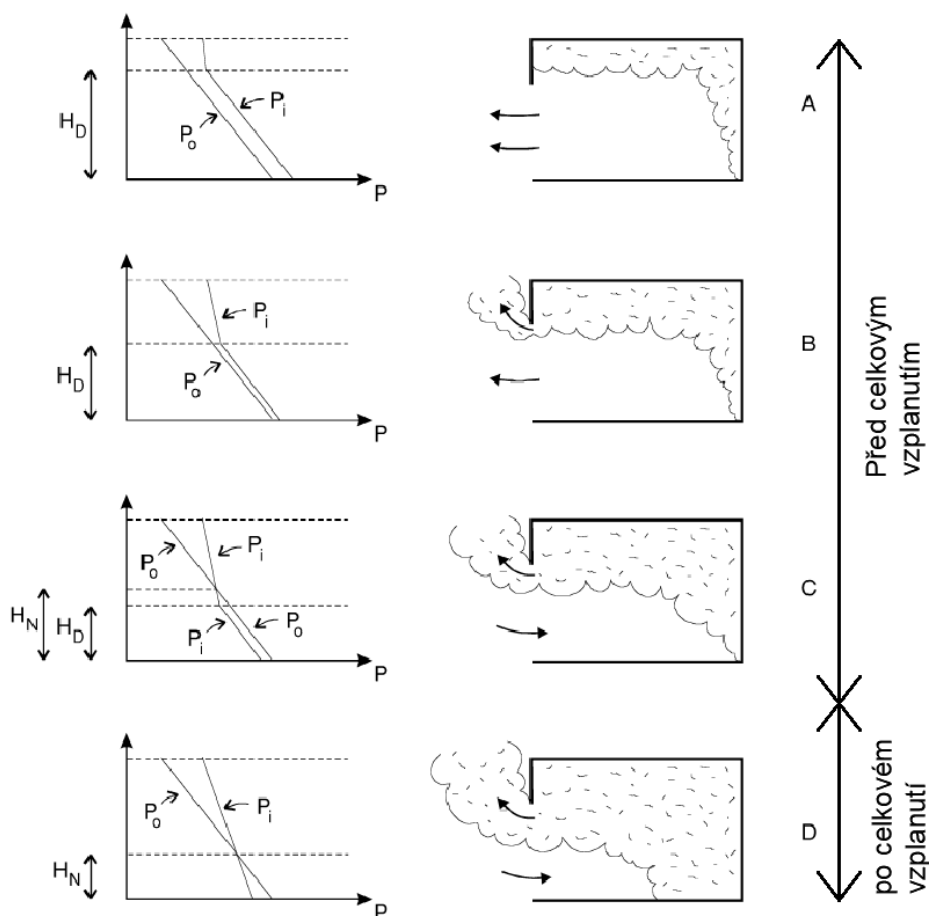
$T [^{\circ}\text{C}]$	$m_g [\text{m/s}]$	$m_a [\text{m/s}]$
100	2,514	2,514
200	3,127	3,127
300	3,332	3,332
400	3,392	3,392
500	3,386	3,386
600	3,349	3,349
700	3,302	3,302
800	3,237	3,237

Teploty, které byly u tohoto výpočtu použity, se blíží teplotám, které ve zkušební peci v reálných podmínkách panují, resp. jde o teploty z průběhu podle normové teplotní křivky (ISO 834).

Výsledky z této podkapitoly budou v pozdější části diplomové práce využity a porovnány s výsledky z CFD modelu a experimentu.

2.2.4 Tlakové poměry a jejich vývoj v prostoru s velkým ventilačním otvorem

V předchozí kapitole jsme řešili tlakové poměry pro specifický případ proudění ve spodním a horním otvoru. Častější situace při požární situaci ovšem představuje proudění většími otvory (okny dveřmi). V předchozím příkladu jsme uvažovali úzké otvory a konstantní rozdíl tlaku přes výšku těchto otvorů, ovšem pro větší otvory se bude tlak od kladného po záporný po výšce otvoru značně lišit. Další aspekt, na kterém záleží, je fáze požáru (Obr. 9).



Obr. 9: Tlakové poměry v místnosti s velkým otvorem [3]

První dva případy A a B (Obr. 9) jsou pro tlakové rozdíly způsobené expanzí horkých plynů, tyto fáze trvají většinou kratší dobu a nastávají před fází flashoveru. Flashover se dá krátce popsat jako celkové prostorové vzplanutí prostoru. Prostor (místnost) se během požáru dělí na dvě zóny, horní zónu s horkými plyny ležící v horní oblasti a zónu chladného vzduchu, jen částečně kontaminovanou horkými plyny ve spodní oblasti prostoru. Tyto dvě zóny jsou odděleny ve výšce H_D (výška kouřové vrstvy) od podlahy. Výška H_N značí výšku neutrální roviny [3].

Fáze A: horká zóna, resp. kouřová vrstva nedosáhla horní části otvoru, roztažností plynů je vzduch vytlačován ven. Celá místnost má vyšší tlak, než je ve venkovním prostoru.

Fáze B: Ve druhé fázi kouřová vrstva právě dosáhla horní části otvoru a horké plyny začaly odtékat. Proudění studeného vzduchu ven z místnosti roztažností plynů pokračuje. Stále přetrvává kladný tlak ve většině prostoru.

Fáze C: Ve třetí fázi se průtok změnil tak, že horké plyny vytékají horní částí otvoru a čerstvý vzduch vstupuje spodní částí otvoru dovnitř do prostoru. Tlakový rozdíl se mění z pozitivního na negativní. V místnosti pod neutrální rovinou je podtlak (ve srovnání s vnějším tlakem), takže vzduch teče pod neutrální rovinou do místnosti.

Fáze D: požár v místnosti je plně rozvinutý a vrstva horkého plynu víceméně dosáhly podlahy, je to fáze po flashoveru, kdy se zóny slily do jedné zóny.

Fáze, které zde jsou popsány samozřejmě neplatí pro všechny případy požáru. Může dojít k jinému pořadí nebo některé fáze nemusí vůbec nastat, např. pro případ slabého požáru, u kterého nedojde k celkovému vzplanutí flashoveru [3].

2.2.5 Tlakové poměry v uzavřeném prostoru

Dalším případem z hlediska tlakových poměrů jsou tlakové poměry v uzavřeném prostoru jen s malými úniky vzduchu, kde by tento stav způsobil dynamický nárůst tlaků, resp. přetlaků v případě nárůstu teploty. V prostoru s většími otvory dojde k malému nebo žádnému nárůstu dynamického tlaku mimo tyto otvory.

V uzavřeném prostoru nebo v prostoru s malými úniky skrze např. spáry, způsobí uvolnění tepla objemovou expanzi plynů a zvýšení tlaku v prostoru. V předchozí kapitole jsme tuto fázi požáru popsali jako fázi A.

Když dochází k rychlému hromadění hmoty nebo energie, nebo když je odtok jen malý, tak je tento nárůst tlaků v takto uzavřeném prostoru velmi rychlý, např. přírůstek 100 kW do malé místnosti o objemu 60 m³ s malým ventilačním otvorem o ploše 0,01 m², způsobí do několik sekund zvýšení tlaku na cca 1 000 Pa.

Při reálném požáru v budově bude výsledný tlak a rychlost jeho nárůstu ale velmi pomalý, kvůli úniku plynu netěsnostmi ve stěnách budovy, spárami kolem oken a dveří atd. Tento příklad s malou místností ukazuje, že za velmi krátkou dobu vzroste tlak na poměrně velké hodnoty, což pravděpodobně bude stačit na zničení okna a tím i k zastavení nárůstu tlaku [3, 5].

V praxi by takovýto tlak měl jistě podstatný vliv na požární výrobky a konstrukce jako jsou např. požární nátěry, požární ucpávky atd.

2.3 Měření rychlosti proudění a tlaku za vysoké teploty

Měření lze rozdělit co se týče měření proudění na tři metody – **objemové, rychlostní a hmotnostní** metody. Měření může být dále **přímé a nepřímé**, kde přímé je např. měření

rychlosti proudění rovnou v součásti měřidla, nepřímé pak např. u obousměrné rychlostní sondy, kde se neměří přímo rychlost proudění ale tlak, za pomoci známé teploty v místě sondy a průtokového koeficientu (Reynoldsovy číselné konstanty) se dále vypočte hledaná rychlost proudění (viz kapitola 2.4).

Důležité veličiny u měření proudění plynů jsou tedy objemové a hmotnostní množství plynů, teplota, tlak a další. Zařízení měřících tlak nebo rychlost proudění je celá řada, ať už ve výrobním průmyslu nebo u laboratorních či jiných oborů, ovšem pro požární podmínky lze z těchto zařízení využít jen několik. V této kapitole si některá pro požár použitelná nebo z části použitelná měřící zařízení představíme.

2.3.1 Anemometr

Jsou nejčastěji využívána pro potrubní a ventilační měření (Obr. 10). Anemometru se také někdy říká větroměr pro jeho časté využívání v metrologii, je to přístroj pro měření rychlosti proudění nebo směru proudění, často se používá k měření proudění v budovách.

Většina přístrojů pracuje na tom principu, že proudící látka rozpožbuje vrtuli přístroje, digitální část pak měří počet otočení vrtule a přístroj dále dopočítá hledanou hodnotu. Anemometr pro měření proudění vzduchu a jiných látek má různé druhy zařízení, např. přístroje měřící rychlost proudění vzduchu, diferenciální tlakoměry, objemové průtokoměry, termické anemometry, vrtulkové anemometry, digitální a jiné. Anemometr není příliš vhodný do vysokých teplot.



Obr. 10: Anemometr: (A) lopatkový; (B) digitální

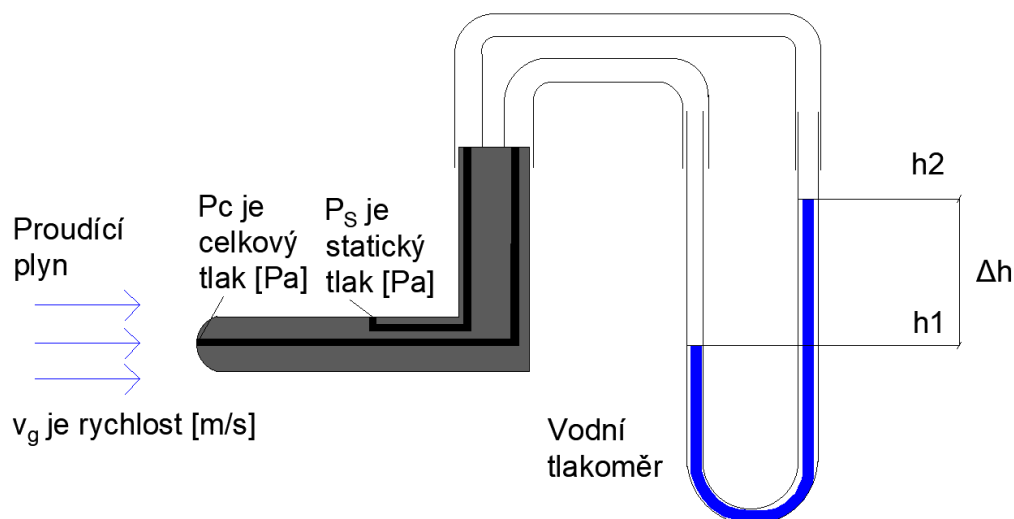
2.3.2 Částicová obrazová velocimetrie

Další zařízení, které je více použitelné v podmínkách požáru, je SPIV (Stereoscopic Particle Image Velocimetry) po překladu částicová obrazová stereometrie. Jedná se o zařízení složené ze dvou či více kamer, které monitorují proudící látku ve dvou různých rovinách. Pomocí speciálního počítačového softwaru jsou pohledy z těchto dvou kamer kombinovány a vytvářejí nový pohled.

Kromě dvou kamer je do místa měření promítán laser. Paprskem laseru pomocí vhodných zrcadel a optiky je vytvořen světelný kužel. Kamery dále snímají částice procházející tímto kuželem a měří jejich rychlost. Tato měřicí metoda není vždy vzhledem k pohodlnosti při použití vhodná, budeme jí však zmiňovat v kapitole 2.4, kde byla tato měřicí metoda srovnána s obousměrnou rychlostní sondou, o které budeme dále mluvit.

2.3.3 Prandtlova trubice

Prandtlova trubice (Obr. 11) se v dnešní době již tolik nepoužívá. Její používání bylo často nahrazeno manometrem, z důvodu pohodlnosti při použití. Jedná se o zařízení s měřicí trubicí a vodním neboli hydrostatickým tlakoměrem, který stejně jako ORS pracuje na principu měření rozdílů tlaků. I zde se rychlost proudění vypočte z Bernoulliho rovnice, a to pomocí vodních sloupců ve vodním tlakoměru a jejich výškového rozdílu dle vztahu (23), se kterým už jsme se setkali v předchozích kapitolách. S tímto zařízením je možné měřit při teplotách do více než 550 °C a je proto do jisté míry možné je použít u požárních experimentů.



Obr. 11: Prandtlova trubice v řezu

$$v_g = \sqrt{\frac{2(P_c - P_s)}{\rho_g}} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_g}} = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (23)$$

kde

v_g – rychlost proudění [m/s]

P – celkový tlak [Pa]

P_c – statický tlak [Pa]

ΔP – rozdíl tlaků [Pa]

ρ_g – hustota plynu při dané teplotě plynu [kg/m^3]

$h_{1,2}$ – výška vodního sloupce [m]

Δh – rozdíl výšek hladiny v tlakoměru [m]

g – tíhové zrychlení [m/s^2]

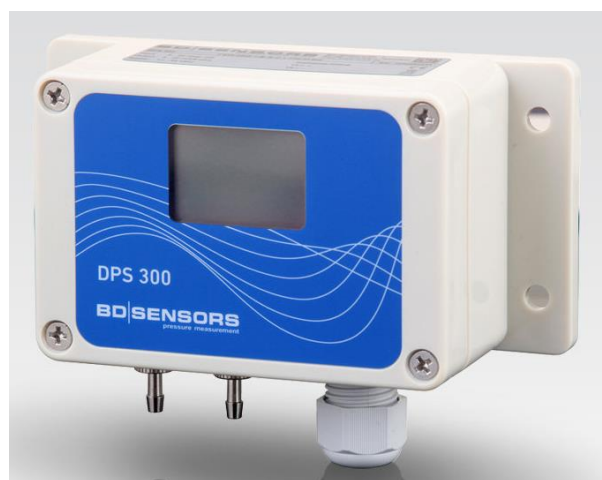
2.3.4 Tlakoměry

Jedním z hlavních kritérií, která se musejí při požárních zkouškách hlídat a u požárních experimentů pozorovat a měřit, je tlak. Tlakoměry používané u těchto požárních zkoušek či experimentů musejí být velmi přesné, odolné a spolehlivé. Tlakoměr nebo také tlakový převaděč budeme dále zmiňovat v souvislosti s obousměrnou rychlostní sondou, kde je tato sonda na tlakový převaděč napojena a převádí tlaky právě do tohoto tlakového převaděče. Ten je pak dále napojen na počítač, kam převádí a ukládá naměřená data.

Princip, jak většina tlakoměrů pracuje, je založen na tom, že do tohoto zařízení vstupuje tlak, který deformuje membránu vyrobenou z materiálu schopného pružné deformace. Tato deformace je měřena a na základě změny elektrického napětí vycházející z Hookova zákona a je dále převedena na výstupní signál, resp. data, která jsou ukládána v počítači. Oproti hydrostatickým tlakoměrům (Prandltova trubice) mají mnoho výhod, nejsou závislé na pracovní poloze, je možné je použít v těžkých podmínkách a pro velké a mále rozsahy tlaků, dále je možné data dostat v digitální podobě. Ukázka tlakových převaděčů jsou na Obr. 12.



(A)



(B)

Obr. 12: Snímač tlaku dvou výrobců: (A) SV – snímač tlaku s automatickým nulováním offsetu, výrobce: CRESSTO; (B) DPS 300 - Vícerozsahový snímač tlakové difference pro plyny a vzduch, výrobce: BD SENSORS

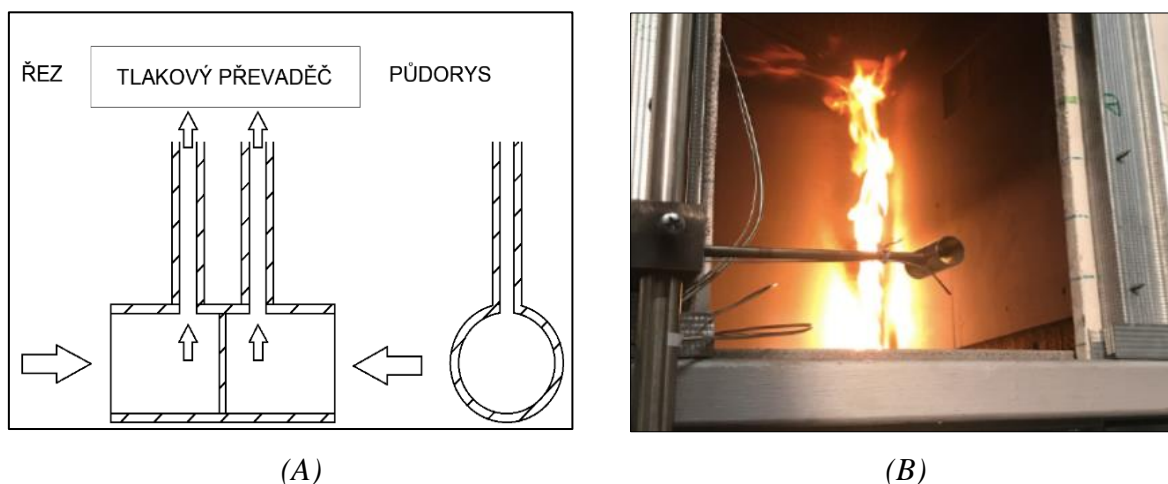
2.4 Obousměrná rychlostní sonda

ORS představili v roce 1976 McCaffrey a Heskestad. Obousměrná rychlostní sonda nebo také Pitotova trubice (Obr. 13) je dnes co se týče požárních experimentů a požárních zkoušek nejpoužívanějším nástrojem pro měření tlaků. Z tlaků a dalších údajů (např. teploty v blízkosti ORS) se dále dopočítává rychlost proudění, objemový a hmotnostní průtok a další. Jde tedy o nepřímou měřicí metodu, co se týče měření rychlost proudění.

Konstrukce sondy umožňuje měřit tlak ze dvou opačných stran těla sondy, a není tak nutné předem znát směr proudění. Tělo sondy je tvořeno dutým kovovým válcem s rozdělovací uzavřenou stěnou v půli válce, která tvoří dvě samostatné komory. Z obou komor vedou v kolmém směru k ose válce duté trubice spojující tělo sondy s tlakovým převaděčem.

Proudící plyn vstupuje do sondy z jedné či druhé strany a vyvolá skrz trubici změnu tlaku v převaděči, ten pak poskytuje výstupní signál, jako změnu elektrického napětí (viz podkapitola 2.3.4). Převaděč je dále napojen na měřicí ústřednu pro záznam naměřených dat [6, 7].

Rychlost proudění lze vypočítat ze vztahu (24), který jsme již viděli v předchozích podkapitolách. Vzorec vychází z Bernoulliho rovnice, oproti podkapitole 2.2.2 zde přibyla Reynoldsova číselná korekce k_p , tato konstanta reprezentuje viskozitu, resp. průtokový koeficient, také by se tento koeficient dal popsat jako odchýlení od ideálního plynu. Tato konstanta vychází z Reynoldsova čísla dle vztahů (25 až 27), někdy je však uvažována jako hodnota 1,75, resp. 1/1,75 což dává hodnotu před odmocninou 0,93 viz vztah (24).



Obr. 13: Obousměrná rychlostní sonda: (A) schéma; (B) příklad instalace při požárním experimentu [8]

$$u = \frac{1}{k_p} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P \cdot T}{353}} \text{ nebo } u = \frac{1}{k_p} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \text{ nebo } 0,93 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (24)$$

kde

u – rychlost proudění [m/s]

ΔP – rozdíl tlaků naměřený ORS [Pa]

T – teplota naměřená v blízkosti rychlostní sondy [K]

k_p – Reynoldsova číselná korekce pro obousměrnou rychlostní sondu (průtokový koeficient) [-]

ρ – hustota plynu při dané teplotě v blízkosti sondy [kg/m^3]

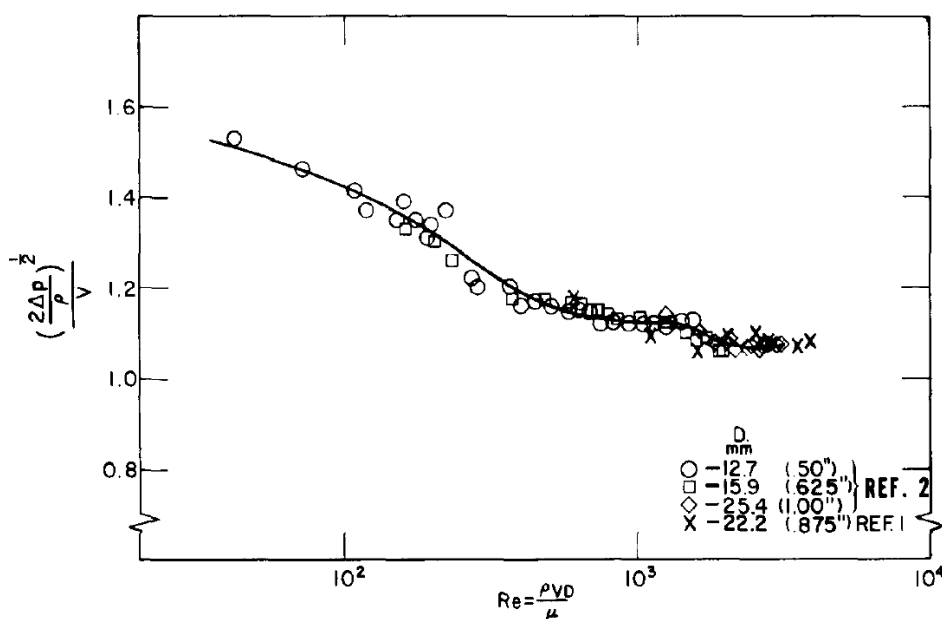
$$\text{pro } Re \leq 40 \text{ je } k_p = 0 \quad (25)$$

$$\text{pro } Re \geq 3\,800 \text{ je } k_p = 1,08 \quad (26)$$

$$\text{pro } 40 \leq Re \leq 3\,800 \text{ je } k_p = \quad (27)$$

$$-2,484 \cdot 10^{-17} \cdot Re^5 + 2,5552 \cdot 10^{-13} \cdot Re^4 - 9,706 \cdot 10^{-10} \cdot Re^2 - 1,366 \cdot 10^{-3} \cdot Re + 1,533$$

Jak již bylo řečeno hodnota Reynoldsovy číselné korekce se určuje na základě Reynoldsova čísla (28) a dle této hodnoty se přiřadí nebo vypočte po dosazení do vztahů (25 až 27). Tyto hodnoty byly stanoveny experimentálně. Jedná se o Experiment, kde se porovnávala tato hodnota naměřená ORS s Reynoldsovým číslem (Obr. 14). Tento experiment byl proveden pro několik vnitřních ORS, což ukázalo i citlivost měření dle průměru sondy. Sondy s menším průměrem naměří i nižší hodnoty, je tedy citlivější. Tato křivka je prokázána s nejistotou 5 % [6–8].



Obr. 14: Hodnoty získané obousměrnou sondou versus Reynoldsovo číslo [6]

Vzorec pro výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{353 \cdot u \cdot D}{T \cdot \mu} \quad (28)$$

kde

u – rychlost proudění [m/s]

T – teplota naměřená v blízkosti rychlostní sondy [K]

Re – Reynoldsovo číslo [-]

D – vnitřní průměr rychlostní sondy [mm]

μ – dynamická viskozita vzduchu při dané teplotě vzduchu [centipoint]

$$\mu = \mu_0 \frac{0,555 \cdot T_0 + C_s}{0,555 \cdot T + C_s} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (29)$$

kde

μ – dynamická viskozita vzduchu při dané teplotě vzduchu [centipoint]

1 centipoint = 0,001 kg/(m.s)

μ_0 – referenční viskozita vzduchu při referenční teplotě T_0 , tedy 0,01827 centipoint

T_0 – referenční teplota, je rovna 524,07 pro standartní vzduch [$^{\circ}R$ – stupeň Rankina]

T – teplota naměřená v blízkosti rychlostní sondy [$^{\circ}R$]

C_s – Sutherlandova konstanta [-], rovna hodnotě 120

Pro výpočet Reynoldsovy číselné korekce je nutné odhadnout rychlost proudění, kterou se ovšem snažíme vypočítat. V tomto případě je nutné využít iteračního postupu, kdy se do vzorce pro Reynoldsovo číslo dosazuje odhadovaná rychlost proudění, dokud se spolu s vzorcem pro rychlost proudění oba vzorce ve výsledku neblíží nulovému rozdílu. Reynoldsovo číslo dále závisí na průměru rychlostní sondy, dynamické viskozitě vzduchu při dané teplotě vzduchu teplotě v blízkosti ORS. Ukázka výpočtu viz další podkapitola.

Další nevýhoda ORS kromě faktu, že jde o nepřímou měřící metodu, je odchylka od přesného měření v případě přílišného odklonu sondy od proudícího plynu. Tento sklon by neměl překročit 50 ° dle [7], pro vysoké Reynoldsovo číslo nad 3400 by tento sklon měl být ještě menší, cca do 25 ° [9]. Další nepřesnosti v měření můžou vzniknout kolísáním teploty. Výhodou ORS je především odolnost proti vysokým teplotám, pohodlnost použití a do jisté míry určitá odolnost proti zplodinám hoření jako jsou saze [6–8]. OBR je samozřejmě závislá i na tlakovém převaděči. Výrobci tlakových převaděčů uvádějí různé citlivosti, nicméně ne vždy jsou tlakové převaděče pro malé rozdíly tlaků dostatečně citlivé.

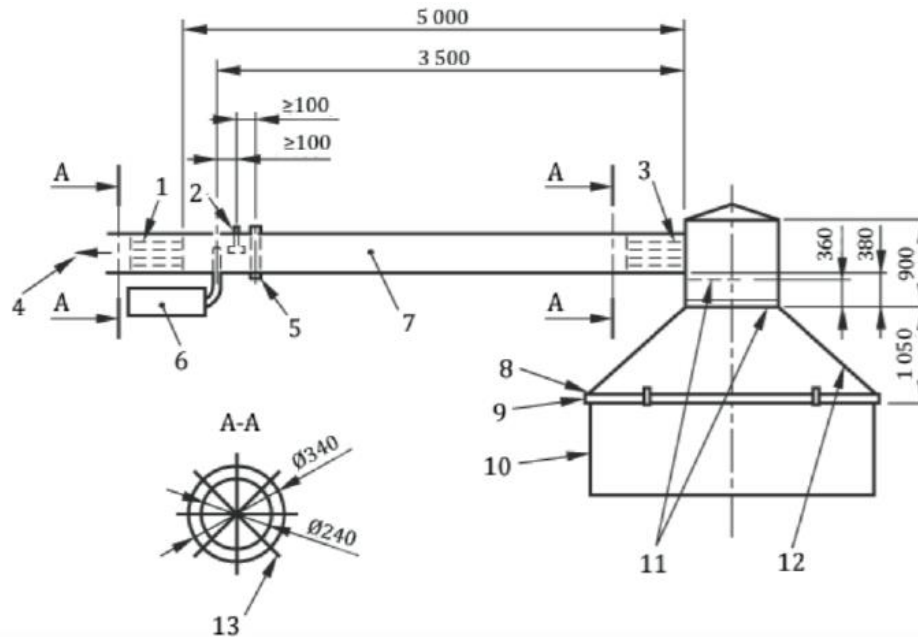
2.4.1 Řešený příklad 2 – výpočet rychlost proudění v horním ventilačním otvoru středněrozměrové požární pece

Vztahy (24 až 29) budeme využívat v pozdější části této diplomové práce pro výpočet rychlosti proudění z tlaku a teploty naměřené při požárním experimentu ORS viz podkapitola 4.1 (Experiment 1). Z tohoto důvodu zde výpočet pro jeden časový interval ukážeme. Při požárním experimentu se středněrozměrovou požární pecí byl ve ventilačním otvoru v čase 700 s, naměřen

tlak přibližně 2,1 Pa (tlak naměřila ORS), ve stejném místě byla naměřil teplotu 650 °C, tedy 923,16 K (Kelvina), což je 1661,67 °R (Rankina). Nejprve vypočteme dynamickou viskozitu vzduchu vztah pro naši teplotu (29) $\mu = 0,01827 \frac{0,555.524,07+120}{0,555.1661,67+120} \cdot \left(\frac{1661,67}{524,07}\right)^{\frac{3}{2}} = 0,04066$ centipoint. Dále vypočteme Reynoldsovo číslo (28), začneme s odhadem rychlosti proudění 2 m/s, vnitřní průměr sondy je 18 mm, teplotu dosazujeme v kelvinech, $Re = \frac{353.2.18}{923,16.0,04066} = 338,53$ po dosazení do vztahu (27) $-2,484.10^{-17}.338,53^5 + 2,5552.10^{-13}.338,53^4 - 9,706.10^{-10}.338,53^2 - 1,366.10^{-3}.338,53 + 1,533$ dostaneme Reynoldsovu číselnou korekci $kp = 1,229$, po dosazení do vztahu (24) dostaneme rychlost proudění $u = \frac{1}{1,229} \sqrt{\frac{2.2.1.923,16}{353}} = 2,69$ m/s. Tuto novou rychlost nahradíme původním odhadem rychlosti, tedy 2 m/s a dosadíme do vztahu (28), tento proces opakujeme dokud se odhadovaná rychlost a vypočtená rychlost nezačnou shodovat, respektive dokud není jejich rozdíl přibližně roven nule ($\pm 0,00001$). Tato operace byla provedeny v programu Microsoft Excel, výsledná rychlost je 2,82 m/s.

2.4.2 Aplikace obousměrné rychlostní sondy

Jak již bylo řečeno, ORS prostřednictvím tlaku, příslušného vzorce a se znalostí teploty ve stejném místě jako je umístěná ORS, měří rychlosti proudění, objemový a hmotnostní průtok. Pro tato měření je hojně využívána u velkorozměrové zkoušky RCT (Obr. 15), nebo u málo rozměrových zkoušek SBI. ORS je u RCT umístěná v odtahovém potrubí tohoto zařízení, přímo u ní je umístěn TC měřící teplotu v daném místě. V normě [10] je uveden vztah pro výpočet objemového a hmotnostního průtoku v potrubí, který není obecný a platí pouze pro obousměrnou rychlostní sondu v odtahovém potrubí RCT viz vztah (30-33). Měření hmotnostního průtoku odtahovaných plynů hraje klíčovou roli při určování rychlosti uvolňování tepla, resp. odhořívání u požárních zkoušek.



- | | | | |
|---|---|----|--|
| 1 | <i>vodící lopatky</i> | 8 | <i>otvory (3 000 mm × 3 000 mm)</i> |
| 2 | Pitotova trubice | 9 | <i>rám z ocelového profilu
(50 mm × 100 mm × 3,2 mm)</i> |
| 3 | <i>vodící lopatky</i> | 10 | <i>ocelové plechy (1 000 mm × 3 000 mm)</i> |
| 4 | <i>čištění výfukových plynů</i> | 11 | <i>ocelové desky (2 mm × 500 mm × 900 mm)</i> |
| 5 | <i>lampa, fotobuňka</i> | 12 | <i>zvon – ocelové desky tl. 2 mm</i> |
| 6 | <i>analýza plynů</i> | 13 | <i>čtyři ocelové desky (395 mm × 400 mm)</i> |
| 7 | <i>odtahové potrubí (průměr 400 mm)</i> | | |

Obr. 15: Room corner test: řez [10]

Vzorce pro objemový a hmotnostní průtok u RCT:

$$V_{298} = \left(\frac{A \cdot k_t}{k_p} \right) \cdot \frac{1}{\rho_{298}} \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta P \cdot T_0 \cdot \rho_0}{T_s} \right)^{1/2} \text{ nebo} \quad (30)$$

$$V_{298} = 22,4 \left(\frac{A \cdot k_t}{k_p} \right) \cdot \left(\frac{\Delta P}{T_s} \right)^{1/2} \quad (31)$$

$$m = \rho_s \cdot v = \frac{\rho_s}{k_p \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_s} \right)}} \text{ nebo} \quad (32)$$

$$m = \frac{1}{k_p \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \Delta P \cdot \rho_0 \cdot T_0}{T_s} \right)}} \quad (33)$$

kde

V_{298} – objemový průtok v obousměrném potrubí [m^3/s]

m – hmotnostní průtok v obousměrném potrubí [kg/s]

ρ_{298} – hustota vzduchu při teplotě 25 °C a atmosférickém tlaku v [kg/m^3]

ρ_0 – hustota vzduchu při teplotě 0 °C a 0,1 MPa v [kg/m^3]

ρ_s – hustota plynu v bodě měření [kg/m^3]

T_s – teplota plynu v odtahovém potrubí [K]

T_0 – teplota 273,15 [K]

A – plocha průřezu odtahového potrubí [m^2]

ΔP – rozdíl tlaků měřený rychlostní sondou [Pa]

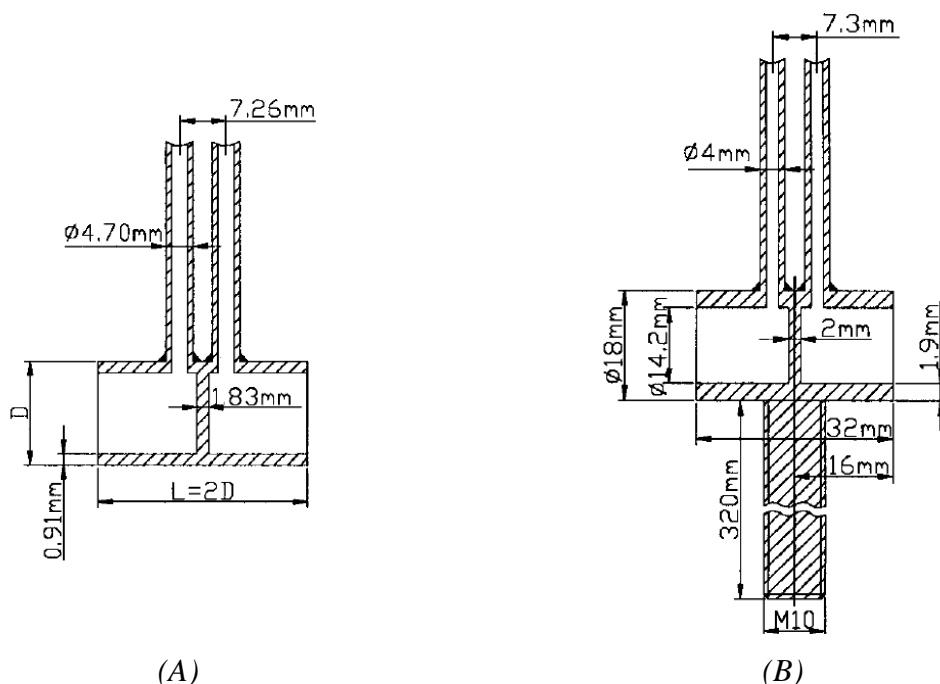
k_t – kalibrační konstanta [-]

k_p – Reynoldsova číselná korekce pro obousměrnou rychlostní sondu [-]

Kalibrační konstanta k_t je poměr průměrného hmotnostního průtoku na jednotku plochy k hmotnostnímu průtoku na jednotku plochy ve středu odtahového potrubí, lze uvažovat hodnotu 0,9, T_s je teplota plynu v odtahovém potrubí naměřená v místě ORS, k_p je opět Reynoldsova číselná korekce představená výše.

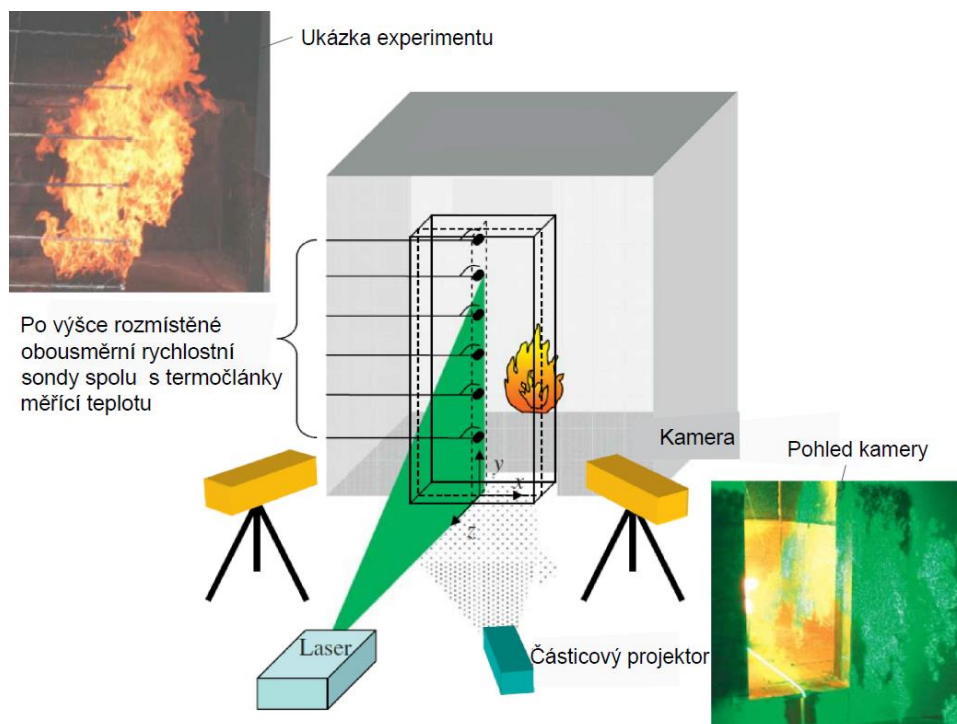
ORS má mnoho konstrukcí, tu standartní používanou u RCT jsme si ukázali na Obr. 13. Novější konstrukce sondy používaná v SBI má oproti sondě v RCT o něco jinou konstrukci, novější konstrukce používaná u SBI (Obr. 16 (B)), má upravené rozměry válce, kromě toho je také opatřena tyčí, která je přidělena k válci ORS. Tato tyč zabraňuje nežádoucím pohybům a posunům sondy, navíc drží ORS přesně v ose odtahového potrubí, přesně ve stanovením úhlu. Tento prvek by tedy měl snižovat citlivost sondy na nepřesnosti měření způsobené odklonem sondy od požadovaného úhlu [11], [12].

Kromě těchto výše uvedených konstrukcí sondy existuje více dalších druhů, např. konstrukce s kulatou hlavou, která má velmi malý vnitřní průměr této hlavy, je citlivější, nicméně zde hrozí riziko nepřesnosti měření v případě zachycení zplodin hoření v této hlavě, také měří proudění pouze z jedné strany sondy.



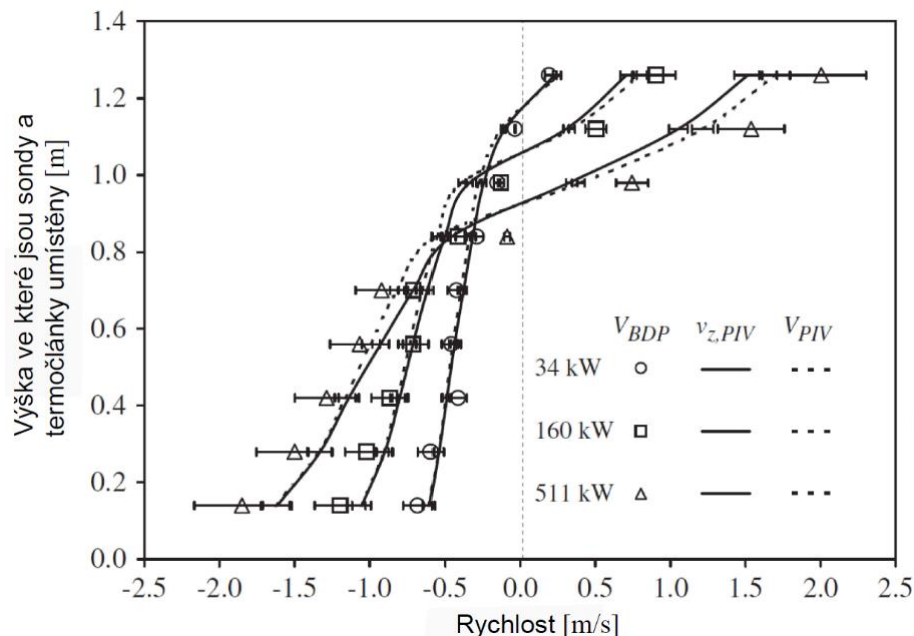
Obr. 16: ORS: (A) konstrukce RCT; (B) novější konstrukce pro SBI [12]

Další zajímavou prací z oblasti zkoumání měření obousměrnou rychlostní sondou je článek o požárním experimentu [13], kdy byla sonda srovnána s jiným rychlost měřícím zařízením, a to zařízením částicové obrazové stereometrie (viz kapitoly 2.3.2). Toto zařízení měřilo spolu s ORS proudění ve ventilačním otvoru (ve dveřích) u zkušební místnosti RCT (Obr. 17).



Obr. 17: Schéma experimentu s rozložením měřících zařízení částicové obrazové stereometrie a obousměrné rychlostní sondy měřících rychlost proudění ve ventilačním otvoru RCT [13]

Výsledné porovnání naměřených rychlostí z experimentu je na Obr. 18. Můžeme si všimnout větších nepřesností u výsledků srovnání obou měřicích zařízení v horní části dveří, kde je odváděn horký plyn, a to pro vyšší výkon hořáku. Ve spodní části, kde je přiváděn studený vzduch, je shoda výrazně lepší.



Obr. 18: Porovnání rychlosti proudění mezi obousměrnou rychlostní sondou a částicovou obrazovou stereometrií vzhledem k výkonu hořáku a výšce od podlahy ventilačního otvoru RCT [13]

ORS a její přesnost měření spočívá na mnoha faktorech jako již zmiňovaný náklon sondy, závislost na Reynoldsově čísle, druhu a intenzitě proudění, na citlivosti tlakového převaděče atd. Přes tyto nedostatky se od roku 1976, kdy byla představena, nenašlo krom určitých úprav konstrukce jiné lepší zařízení pro měření tlaků a rychlosti proudění pro požární situaci.

2.5 Zkoušky požární odolnosti stavebních konstrukcí a výrobků

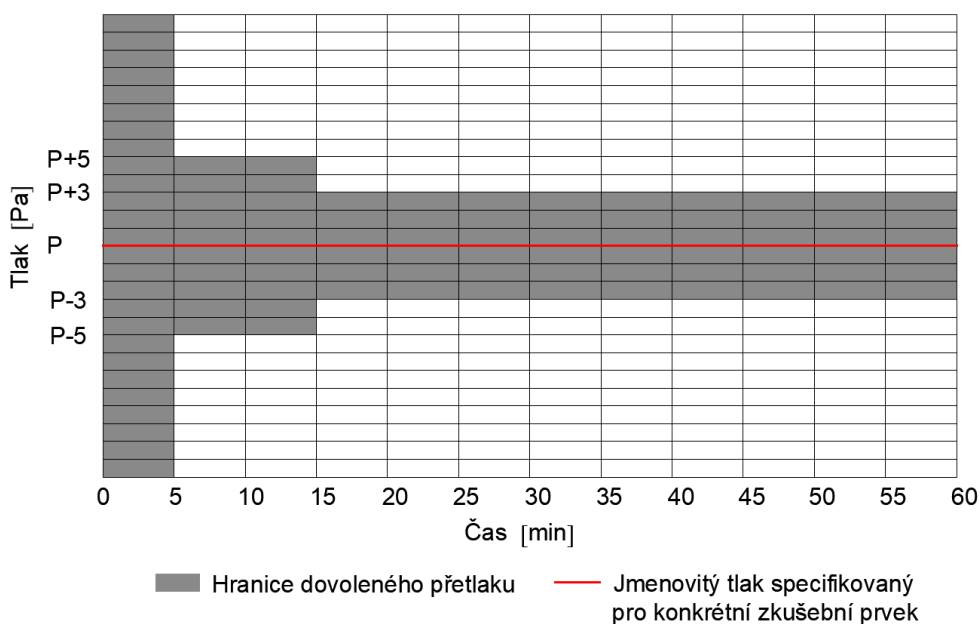
Dle stavebního zákona 183/2006, odstavce § 156, mohou být pro stavby navrženy a použity jen takové výrobky, materiály a konstrukce, jejichž vlastnosti z hlediska způsobilosti stavby pro navržený účel zaručují, že stavba při správném provedení a běžné údržbě po dobu předpokládané existence splní základní požadavky na stavby. Jedním ze základních požadavků na stavbu je, aby v případě požáru byla zachována po určitou dobu nosnost, celistvost a izolační schopnosti konstrukce. Stavební výrobek musí mít určité deklarované vlastnosti, jedna z vlastností, která se musí pro stavební výrobek zkoušet je požární odolnost. Toto zkoušení stavebního výrobku probíhá v akreditovaných zkušebnách¹ [14].

¹ Požární laboratoř na UCEEBU ČVUT v Praze není akreditovanou zkušebnou.

Cílem stanovení požární odolnosti dle [15] je posoudit chovní vzorku stavební konstrukce nebo výrobku, který je vystavený přesně definovaným podmínkám tlaku a ohřívání. V této části práce si představíme ty základní.

2.5.1 Požadavky na tlak v požárním zkušebním zařízení

Kromě teploty je jedním z hlavních kritérii, které se u požárních zkoušek v peci hlídají, tlak. Norma ČSN EN 1363-1 stanovuje následující požadavky na tlak, které sepíšeme v této kapitole. Zařízení na měření tlaku musejí být schopna měřit tlak v rozmezí ± 2 Pa. Sensory tlaku se musejí umístit tak, aby se nevyskytovaly na místě přímého proudění tepla od plamenů ani kde budou v trase odcházejících plynů. Sensor musí být dále umístěný vodorovně tak, aby byl naměřený tlak vnější a vnitřní vztažen ke stejné výšce od podlahy pece. Pro řízení tlaku v peci se osazuje jeden senzor tlaku, druhý může sloužit pro kontrolu prvního. Norma předpokládá rozložení tlaku v peci, kdy na jeden m výšky pece připadat nárůst tlaku 8,5 Pa. Nesmí docházet k rychlým změnám tlaku, a tlakové rozdíly musí být stanoven k tlaku vně pece ve stejné výšce jako bude tlak v peci. Tlak v peci se trvale sleduje a řídí, po prvních 5 minutách od počátku zkoušky je tolerance tlaku ± 5 Pa, o 10 minut později je tolerance tlaku ± 3 Pa (Obr. 19), nicméně jsou tu určité tolerance přesahu těchto limitů pro rychle hořící vzorky. Neutrální tlaková rovina má být ve výšce 0,5 m nad úrovní podlahy pece. Tam, kde se očekává tlak vyšší než 20 Pa, nesmí v nejvyšším bodě zkušebního vzoru být tento tlak přesážen, u tohoto případu může být výška neutrální tlakové roviny upravena. Dále norma uvádí další požadavky na tlak v závislosti na zkoušeném prvku, nicméně požadavek je víceméně stejný, a to maximální jmenovitý tlak 20 Pa. Naměřená data se musí zohlednit v analýze vlastností zkušebního vzorku, pokud jsou data nějakým způsobem upravována např. zaokrouhlováním, musí být vysvětleno, jak se při zpracování údajů přesně postupovalo. Nejmenší interval pro měření tlaku v peci je 1 minuta [15]. Ve velkých požárních zkušebnách je regulování tlaku většinou zajištěno otvorem s nuceným větráním, které reguluje tlak v peci skrze hodnoty naměřené tlakoměry [16].



Obr. 19: Limity přetlaku pro zkušební zařízení dle ČSN EN 1363-1

2.5.2 Požadavky na atmosféru v požárním zkušebním zařízení

Dle [15] musí být poměr dodávky palivo/vzduch k hořákům a přívod sekundárního vzduchu nastaven tak, aby při zkoušení vzorků bez hořlavých součástí byl obsah kyslíku v atmosféře pece nejméně 4 %. Toto nastavení poměru palivo/vzduch hořáků, včetně přívodu sekundárního vzduchu, se nesmí po posledním ověření charakteristiky pece měnit.

2.5.3 Požadavky na teplotu v požárním zkušebním zařízení

Průměrná teplota v peci se sleduje a řídí termoelektrickými články, tak aby odpovídala vztahu (34) tedy normové teplotní křivce (ISO 834) (Obr. 20). Na obrázku jsou červeně zobrazeny také limity teploty v peci, které jsou dány limitem ± 100 °C od 10. minuty zkoušky.

Další limit je poté dán procentní odchylkou plochy pod křivkou průměrné teploty v peci při zkoušce v závislosti na čase vůči ploše normové teplotní křivky viz vztah (36). Jinak řečeno se musí porovnat plocha z teplotní křivky v peci ze zkoušky s plochou pod normovou teplotní křivkou a odchylky těchto ploch musí být v rozmezí (35) [15].

$$T = 345 \cdot \log_{10} \cdot (8t + 1) + 20 \quad (34)$$

$$15d_e \% \text{ pro } 5. \text{ až } 10. \text{ minutu zkoušky} \quad (35)$$

$$(15 - 0,5(t - 10))d_e \% \text{ pro } 10. \text{ až } 30. \text{ minutu zkoušky}$$

$$(5 - 0,083(t - 30))d_e \% \text{ pro } 30. \text{ až } 60. \text{ minutu zkoušky}$$

$$2,5 \% \text{ pro více než } 60. \text{ minut zkoušky}$$

$$d_e = \frac{A - A_S}{A_S} \cdot 100 \quad (36)$$

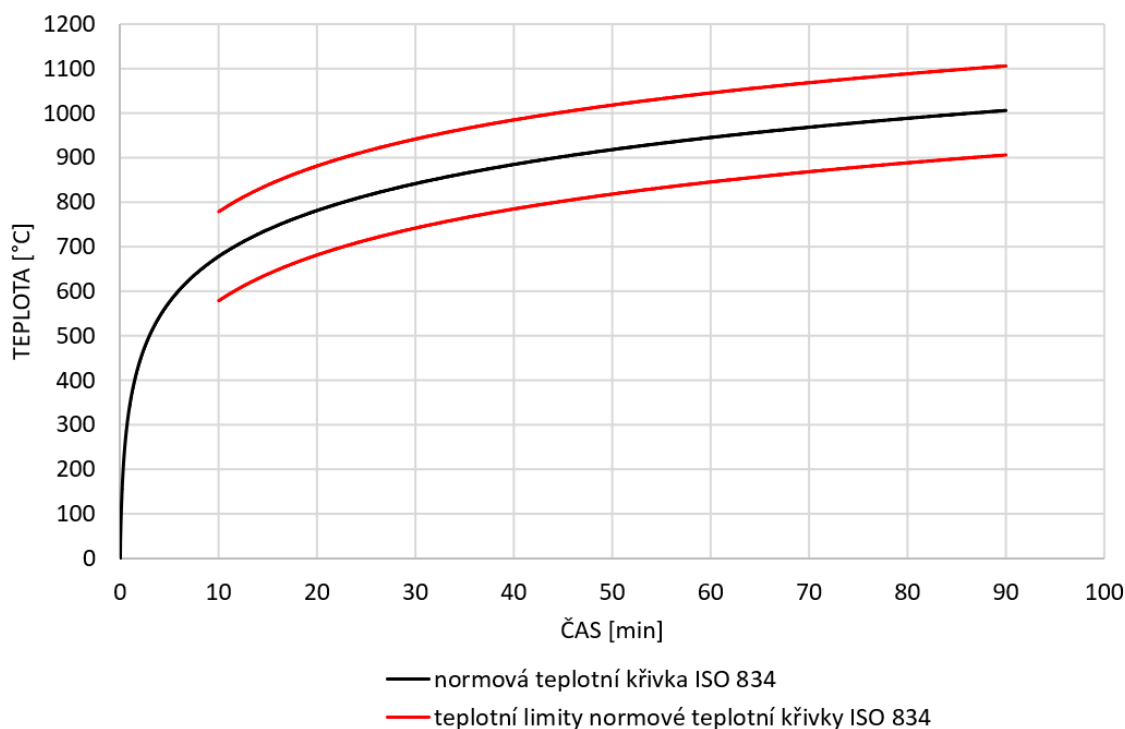
kde

d_e – procentní odchylka v [%]

A – plocha pod skutečnou teplotní křivkou v peci [m^2]

A_S – plocha pod normovou teplotní křivkou [m^2]

t – čas v [min]



Obr. 20: Normová teplotní křivka a její teplotní limity

V prvních 5 minutách zkoušky nejsou kladeny žádné požadavky na shodu teplotní křivky pece ze zkoušky s tou normovou, norma přesto předpokládá snahu držet se co nejvíc normové teplotní křivky i v těchto prvních 5 minutách, tak aby rozdíl mezi plochami předepsané a dosažené křivky byl v každé době během zkoušky udržen na minimu.

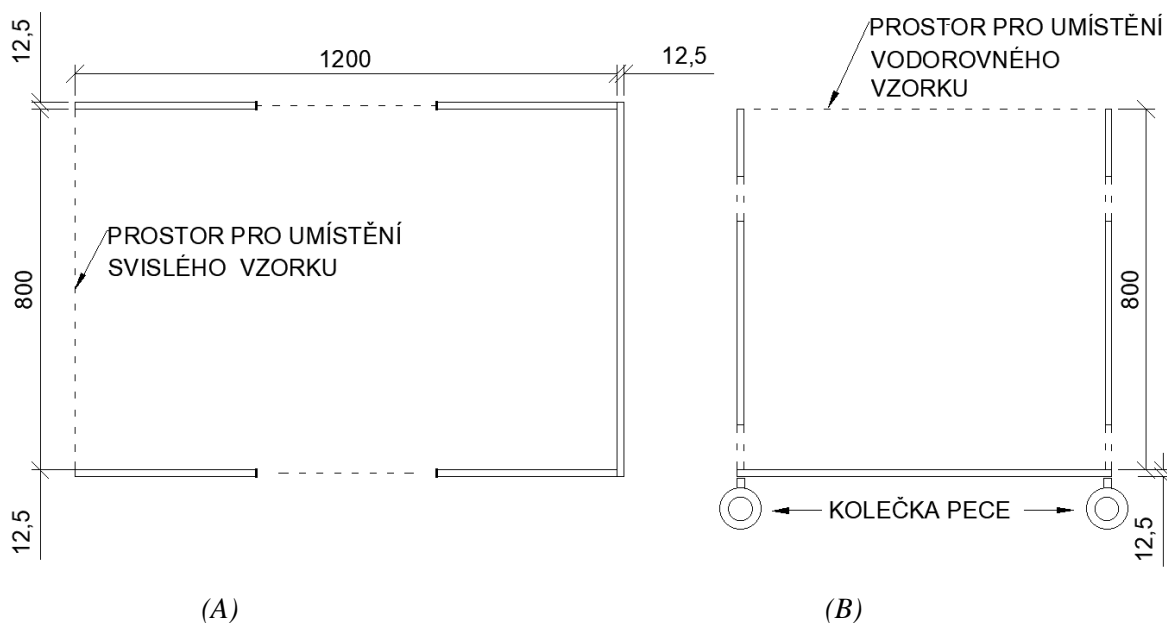
2.5.4 Požadavky na neutrální rovinu v požárním zkušebním zařízení

Dle [15] by měla neutrální rovina být ve výšce 500 mm nad úrovní podlahy zkušebního zařízení, pokud bychom chtěli tento požadavek aplikovat na naši zkušební pec na UCEEB ČVUT v Praze, neuspěli bychom. Pro tak malou zkušebnici, kde je výška 800 mm, není možné tento požadavek splnit a přitom udržet teplotu podle normové teplotní křivky (ISO 834). Tento limit byl pravděpodobně stanoven pro větší měřítko standardních zkušebních zařízení jako jsou SBI, RCT a dalších, kde např. výška zkušebny RCT je cca 2,4 m, tedy neutrální rovina by byla v cca 1/5 výšky pece od podlahy. Pokud bychom uvažovali tuto analogii pro naši pec, tak by byl požadavek na výšku neutrální roviny ve výšce 160 mm nad podlahou pece při výšce pece 800 mm.

2.5.5 Středněrozměrová požární pec na UCEEB ČVUT v Praze

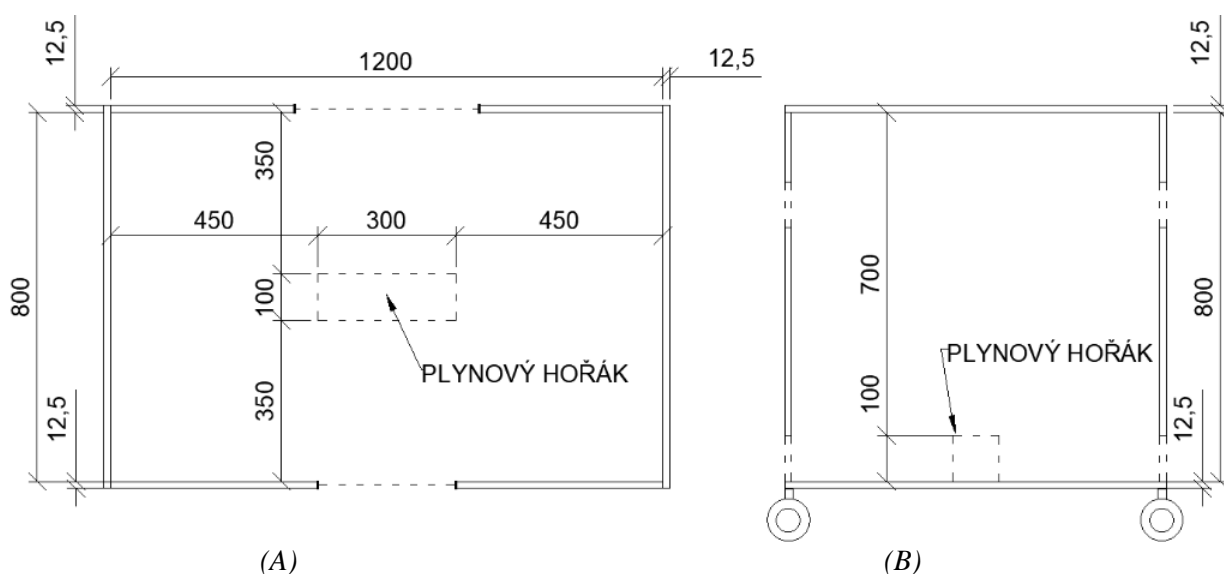
Jedním ze zařízení na indikativní zkoušení požární odolnosti stavebních konstrukcí a výrobků je středněrozměrová požární pec nacházející se v požární laboratoři na UCEEB ČVUT v Praze. Tato pec byla postavena v rámci diplomové práce [1]. Pec poskytuje informace o chování stavební konstrukce nebo výrobků v podmínkách požáru a umožňuje tak výrobcům si předběžně vyzkoušet, jak se bude prvek chovat v navazující akreditovaném zkušebním zařízení. Pec rovněž slouží studentům v rámci vzdělávání v oboru požární bezpečnosti staveb.

Výše zmíněná zkušební pec slouží pro středněrozměrové indikativní zkoušky požární odolnosti stavebních konstrukcí a výrobků, jako jsou stěny, stropy, dveře apod. Je tvořena z rozebíratelných částí, které je možné nahradit zkušebními vzorky v případě stropu a čelní stěny, případně lze testované předměty umístit do vnitřku pece. Pec má vnitřní půdorysné rozměry 1,2 × 0,8 m, výška je pak 0,8 m, (Obr. 21).



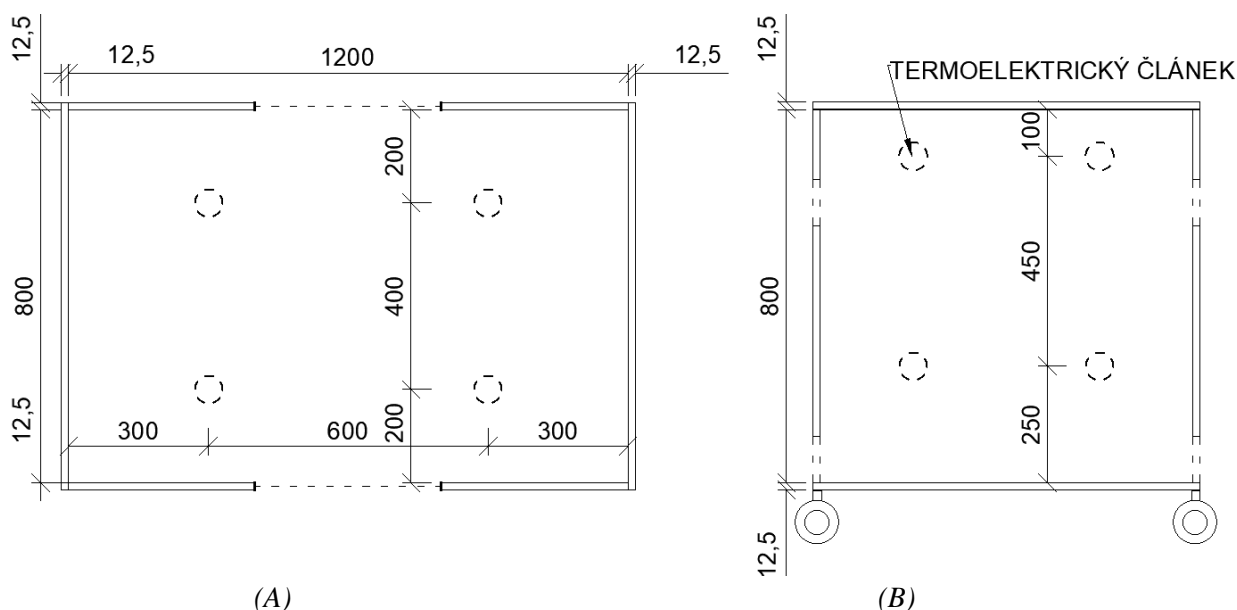
Obr. 21 Rozměry středněrozměrové požární pece a prostor pro umístění zkušebních vzorků: (A) Půdorys; (B) Řez příčný

Účinek požáru zajišťuje plynový hořák na propan o sálavé ploše, která má na délku 0,3 m a šířku 0,1 m, výkon se nastavuje dle potřeby, hořák je umístěn do středu pece (Obr. 22). V peci je možné zejména v horní polovině pece docílit tzv. normového požáru, tedy průběhu teplot dle normové teplotní křivky (ISO 834).



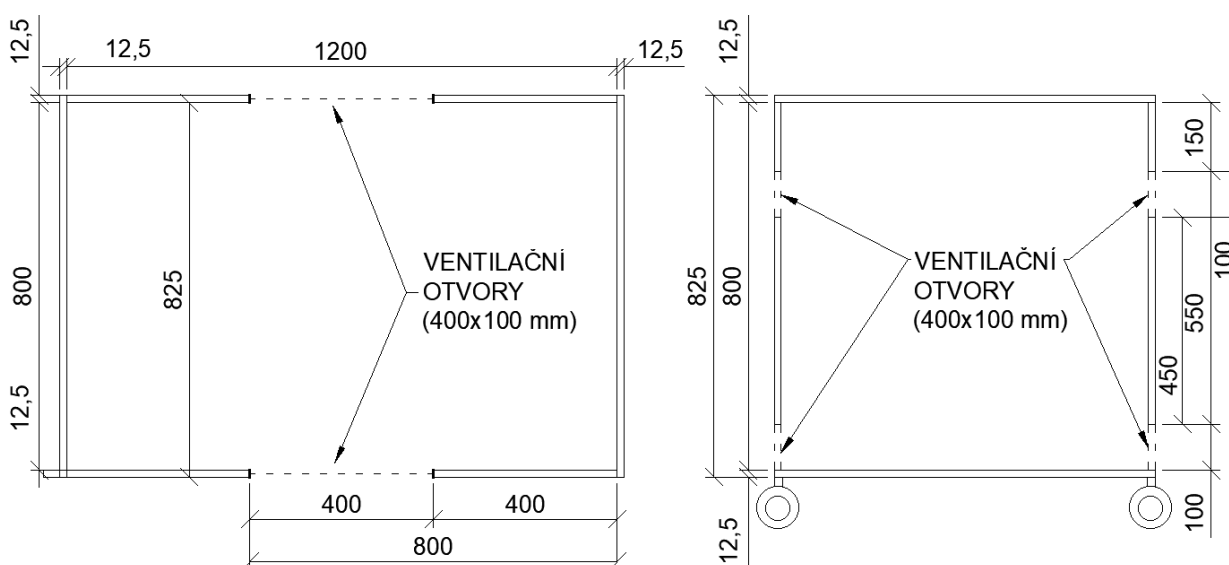
Obr. 22 Umístění termočlánků ve středněrozměrové požární peci: (A) Půdorys; (B) Řez příčný

K měření teploty uvnitř pece slouží 8 termoelektrických článků typu K o průměru 3 mm, čtyři termoelektrické články v horní polovině pece a čtyři v dolní polovině. Do pece je dále možné přidat deskové snímače teploty, poloha umístěných termočlánků (Obr. 23).



Obr. 23 Umístění hořáku ve středněrozměrové požární peci: (A) Půdorys; (B) Řez příčný

Pec je větrána otvory v bočních stěnách umožňujícími přirozený přívod vzduchu pro spalování a odvodu tepla a kouře, otvory mají rozměry 0,4 m x 0,1 m (Obr. 24). Ve zkušební peci není tlak nijak regulován. Přetlak je zde řešen přirozeně za pomoci ventilačních otvorů, nedochází zde k velkým nárůstům přetlaku, a proto zde není nutné přebytečný tlak odvádět, např. za pomoci nucené ventilace jako tomu bývá u velkých požárních zkušeben.



Obr. 24 Ventilační otvory středněrozměrové požární pece: (A) Půdorys; (B) Řez příčný

Pec tvoří stavební desky Farmacell Powerpanel s tloušťkou těchto desek 12,5 mm, desky jsou třídy reakce na oheň A1. Tepelně technické vlastnosti desky viz (Tab. 6), podlaha požární laboratoře je betonová materiálové vlastnosti viz (Tab. 6) [1]. Materiálové vlastnosti okolních konstrukcí

hrají u požáru důležitou roly, zejména v malém uzavřeném prostoru, jakou je zkušební pec. Tyto hodnoty budou v další kapitole použity u CFD modelu pece.

Tab. 6: Tepelně technické vlastnosti

<i>Farmacell Powerpanel</i>	
<i>Objemová hmotnost</i>	<i>1000 kg/m³</i>
<i>Měrná tepelná kapacita</i>	<i>1,0 kJ/(kg.K)</i>
<i>Součinitel tepelné vodivosti</i>	<i>0,17 W/(m.K) při 20 °C</i>
<i>Betonová podlaha požární laboratoře</i>	
<i>Objemová hmotnost</i>	<i>2300 kg/m³</i>
<i>Měrná tepelná kapacita</i>	<i>1,02 kJ/(kg.K)</i>
<i>Součinitel tepelné vodivosti</i>	<i>1,3 W/(m.K) při 20 °C</i>

3 CFD model tlakových a rychlostních poměrů ve středněrozměrové požární peci

V této části diplomové práce bude představen upravený CFD model středněrozměrové požární pece pro zkoušení požární odolnosti, navazující na diplomovou práci [1]. Tento model byl upraven za účelem splnění cílů této diplomové práce, tedy naměření a popsání tlakových poměrů a rychlostí proudění v modelu pece a následné porovnání některých těchto výsledků se skutečnou středněrozměrovou požární pecí (dále jen zkušební pecí). Další cíl úpravy modelu bylo původní model optimalizovat. Nejprve bude krátce představen původní CFD model, dále budou popsány úpravy, které byly na modelu nově provedeny. Budou popsány proběhlé simulace a jejich výsledky. První simulace bude referenční simulace k ověření, zda úpravy původního modelu neovlivnily původní požadavky, které jsou se zkušební pecí spojeny a které jsou kladeny na podmínky v takovémto zkušebním zařízení. Další simulace bude zkoumat rychlosti proudění a tlakové poměry v peci. Model pece bude pro všechny simulace prázdný, tedy bez namodelovaného zkušebního vzorku. Výsledné simulace budou v další části diplomové práce porovnány s požárními experimenty, částečně také s analytickým řešením z podkapitoly 2.2.3 (Řešený příklad 1). Model pece byl modelován tak, aby co nejvíce odpovídal středněrozměrové požární peci pro zkoušení požární odolnosti stavebních konstrukcí a výrobků nacházející se v požární laboratoři na UCEEB ČVUT v Praze.

3.1 Software

Model pece byl vytvořen zápisem zdrojového kódu viz (Příloha 1). Výsledný výpočet byl proveden v programu Fire Dynamics Simulator verze 6.7.10 (FDS), FDS simulace byla zobrazena vizualizačním programem Smokeview verze 6.7.10 (SMV). Původní model [1] a jeho výsledky byly zpracovány starší verzí programu FDS a Smokeview, a to verzí 6.6.6 u obou těchto programů.

3.2 Nastavení simulace turbulencí

V našem CFD modelu a jeho simulacích hrají velkou roli víry a turbulence v blízkosti ventilačních otvorů a v samotném prostoru pece. Toto je v CFD modelu řešeno pomocí nastavení LES (Large Eddy Simulation), v překladu simulace velkých vírů. LES je matematické modelování turbulence používané v dynamice tekutin a vychází ze simulace turbulentních vírů numerického řešení podle Navier-Stokesových rovnic. Jde o výchozí nastavení programu FDS a jedná se o jakousi střední cestu časové náročnosti simulace vzhledem k velikosti výpočetní sítě. Toto nastavení simulace do jisté míry zanedbává nejmenších částí turbulentních víru, resp. malé víry pouze modeluje, nevypočítává je.

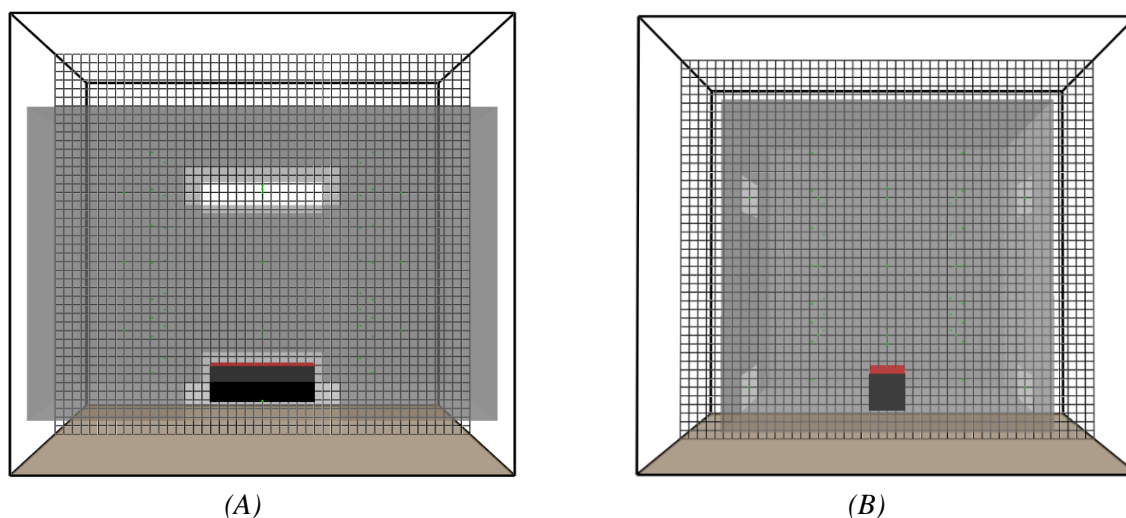
V programu FDS je dále možné použít DNS (Direct Numerical Simulation), v překladu přímá numerická simulace, což je pokročilejší modelování turbulence, které je přesnější než LES a vypočítává i ty nejmenší vírové struktury. Je zde nutná velmi jemná síť k zachycení všech

měřítka, které jsou přítomny v daném toku víru, od nejmenších po největší. Krom extrémně malé sítě (buňky musí být velké jen několik málo milimetrů), je zde také velká časová výpočetní náročnost. Pro naše účely postačí základní nastavení modelování turbulencí, tedy nastavení LES [17, 18].

3.3 Výpočetní oblast modelu

U přesnosti CFD modelu hraje velkou roli počet a velikost buněk. Původně byla vzhledem k výpočetnímu času zvolena stejná velikost výpočetní buňky jako u původního CFD modelu, tedy síť s velikostí buněk 50x50x50 mm, nově byla zvolena jemnější síť, a to 25x25x25 mm. Jemnější síť byla zvolena z důvodu odchýlení od výsledků původního modelu vlivem změn, které na upraveném modelu proběhly (viz dále). Oproti původnímu modelu byla výpočetní oblast rozšířena o 200 mm ve všech směrech, kromě osy Z, kde byl prostor rozšířen jen směrem dolů o 100 mm, což je ve shodě se zkušební pecí, tedy výpočetní oblast modelu pece na ose Z, končí v místě podlahy zkušební pece. Toto rozšíření umožní lépe sledovat rychlosti proudění a tlaky kolem ventilačních otvorů pece a další procesy v blízkosti pece.

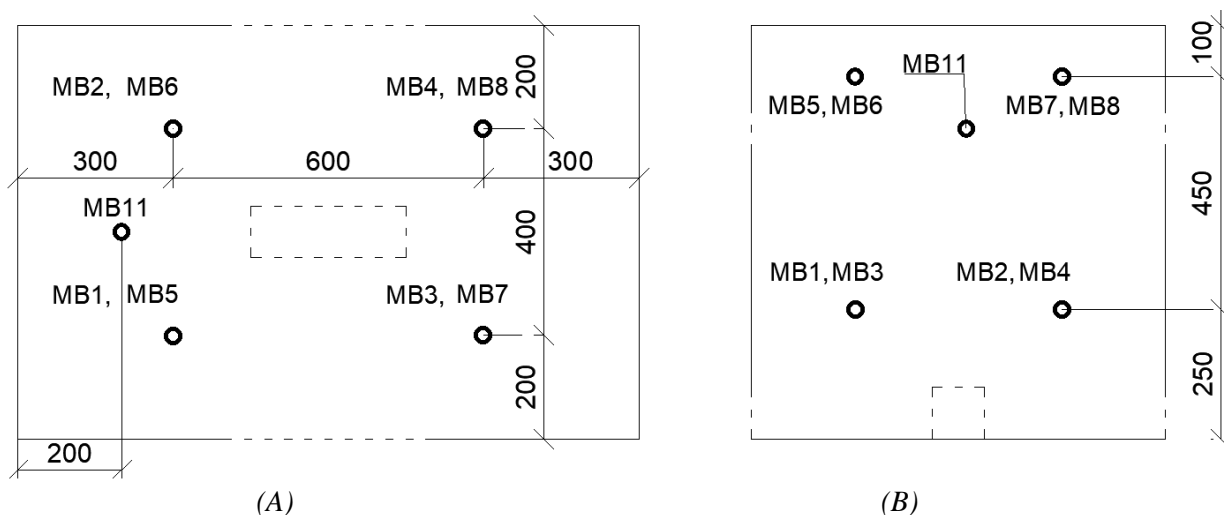
Původní výpočetní oblast končila na hranici pece samotné. Další výhodou této úpravy, tedy rozšířením výpočetního prostoru mimo pec, je možnost pro budoucí použití modelu pece snadno rozšiřovat hranici výpočetní oblasti modelu požadovaným směrem, tedy i možnost do prostoru pece přidávat různé nové předměty a podpůrné konstrukce výrobků atd. Počet buněk je celkem 101 376. Síť buněk je zobrazena na Obr. 25. Pro pec byla dále nastavena průhlednost ohraničující konstrukci cca 50 %, z důvodu lepší viditelnosti v peci přes stěnu. Další změnou je nahrazení ventilačních otvorů ve stěnách pece, které byly původně vyvařeny příkazem VENT (otvor), nahrazením, resp. novým vytvořením tohoto otvory pouze namodelováním okolními OBST (předměty), resp. bylo namodelováno několik kusů, z nichž je tvořena stěna pece a vzniklé mezery mezi těmito kusy tvoří otvor pece. Důvod této změny byl, že příkaz VENT musí být na hranici výpočetní oblasti, což rozšíření našeho výpočetního prostoru mimo prostor pece vylučuje. Do modelu pece byla navíc přidána betonová podlaha požární laboratoře.



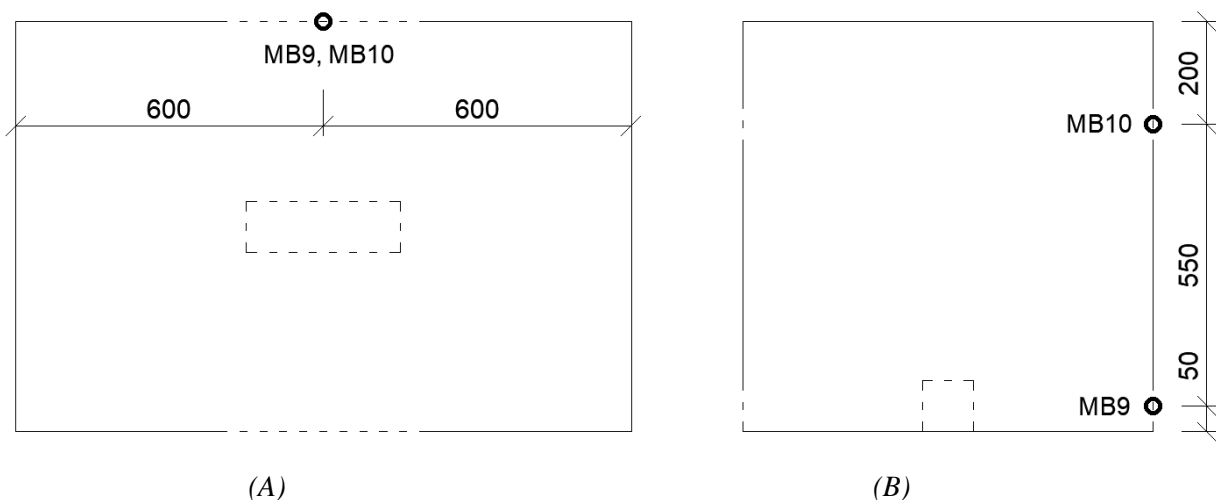
Obr. 25: Výpočetní oblast upraveného modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview:
(A) Pohled s podélnou stranu pece; (B) Pohled s příčnou stranu pece

3.4 Nastavení výkonu hořáku pece, referenční zkouška

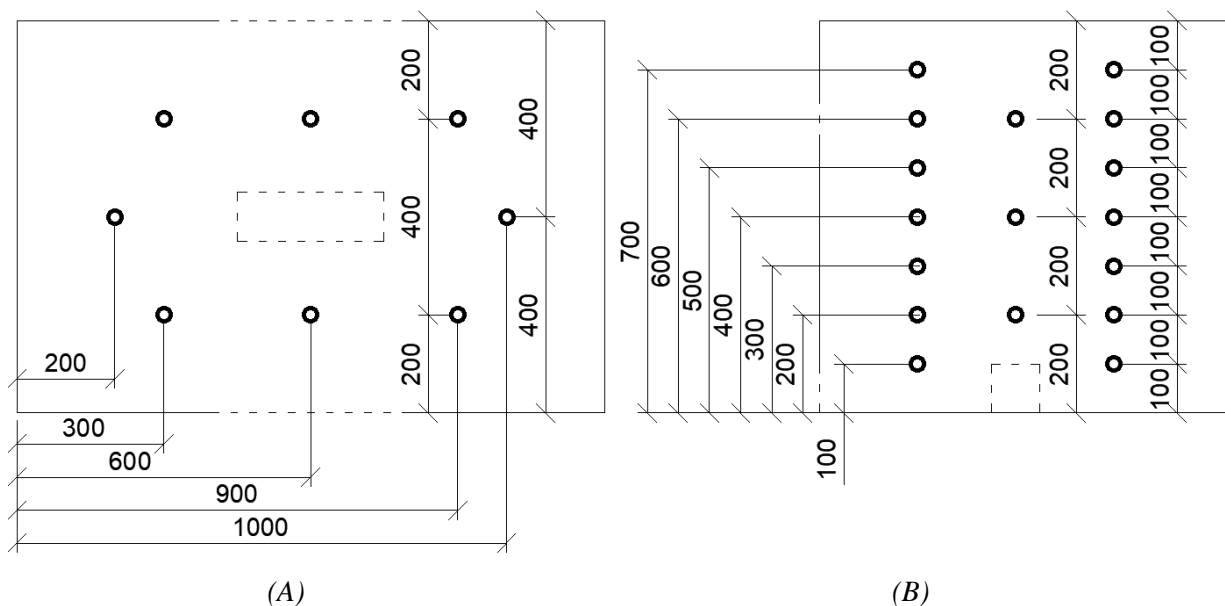
Výkon hořáku se řídil podle výsledků z měřících bodů (dále jen MB) MB1 až MB8, kde MB1 až MB4 měří teplotu v dolní polovině pece, MB5 až MB8 v horní polovině pece (Obr. 26). Body MB1 až MB8 také měří rychlost a tlak v modelu pece. Body MB1 a MB5 navíc ještě měří koncentraci kyslíku. Na Obr. 26 vidíme dále zvýrazněný MB11, tento bod měří tlak, a bude jedním z bodů které budou v další části diplomové práce použity pro srovnání s požárním experimentem, stejně jako MB10. Měřící body byly také umístěny do středu ventilačních otvorů levé strany pece, jde o MB9 a MB10, tyto body měří teplotu, tlak a rychlost proudění (Obr. 27). Oproti původnímu modelu bylo dále rozmístěno dalších 40 měřících bodů, tyto body slouží zejména pro měření tlaku po výšce v peci (Obr. 28). Krom nových měřících bodů bylo přidáno více iso-ploch a to po 100 mm ve všech směrech pece, a to pro lepší možnost sledovat rychlost proudění plynů teplotu a tlak v modelu pece.



Obr. 26: Umístění MB modelu pece:(A) Půdorys; (B) Řez příčný



Obr. 27: Umístění MB v horním a dolním ventilačním otvoru modelu pece:
(A) Půdorys; (B) Řez příčný



Obr. 28: Umístění ostatních MB modelu pece:(A) Půdorys; (B) Řez příčný

Materiál konstrukce modelu pece a materiálové vlastnosti tohoto materiálu byly v modelu nastaveny pro požární desky Farmacell Powerpanel tloušťky 12,5 mm, tedy jde o stejný materiál jako má zkušební pec dle podkapitoly 2.5.1. Oproti původním nastavení konstrukce modelu pece má materiál stejné materiálové vlastnosti, ale jinou tloušťku, tedy 12,5 mm, původně byla 15 mm. V modelu je dále namodelována betonová podlaha požární laboratoře (Tab. 6). Nastavení hořáku mělo vést, stejně jako u původního modelu, k co nejpřesnějšímu průběhu teploty v horní polovině pece podle normové teplotní křivky. Hořák v peci dle [1] je namodelovaný pomocí kombinace příkazu VENT a SURF o rozměrech 300 x 100 x 100 mm. Zdroj hoření je definován v CFD modelu pomocí rychlosti uvolňování tepla HRR. Maximální výkon hořáku je přepočítán na výkon požáru na metr čtvereční plochy hořáku tzv. HRRPUA (Heat Release Rate per Unit Area). Výsledná hodnota HRRPUA hořáku je 6666,67 kW.

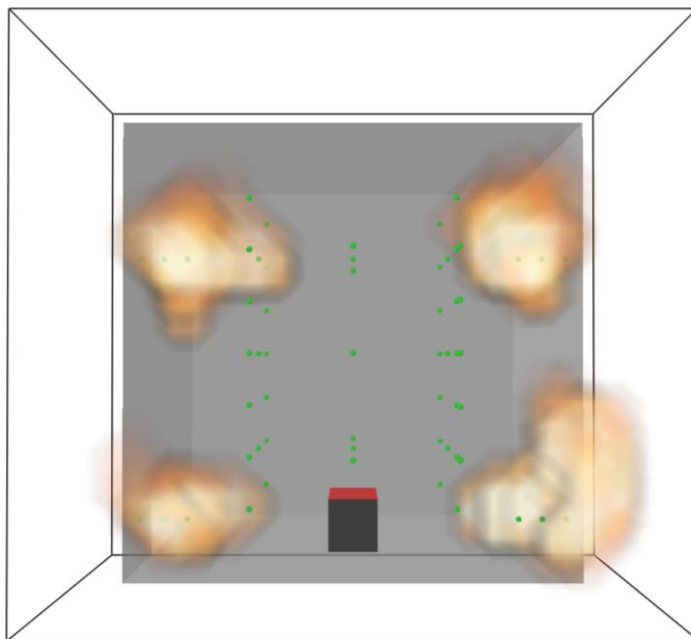
$$HRRPUA = \frac{HRR}{S} \text{ (kW/m}^2\text{)} \quad (35)$$

$$HRRPUA = \frac{200}{0,03} = 6666,6 \text{ (kW/m}^2\text{)} \quad (36)$$

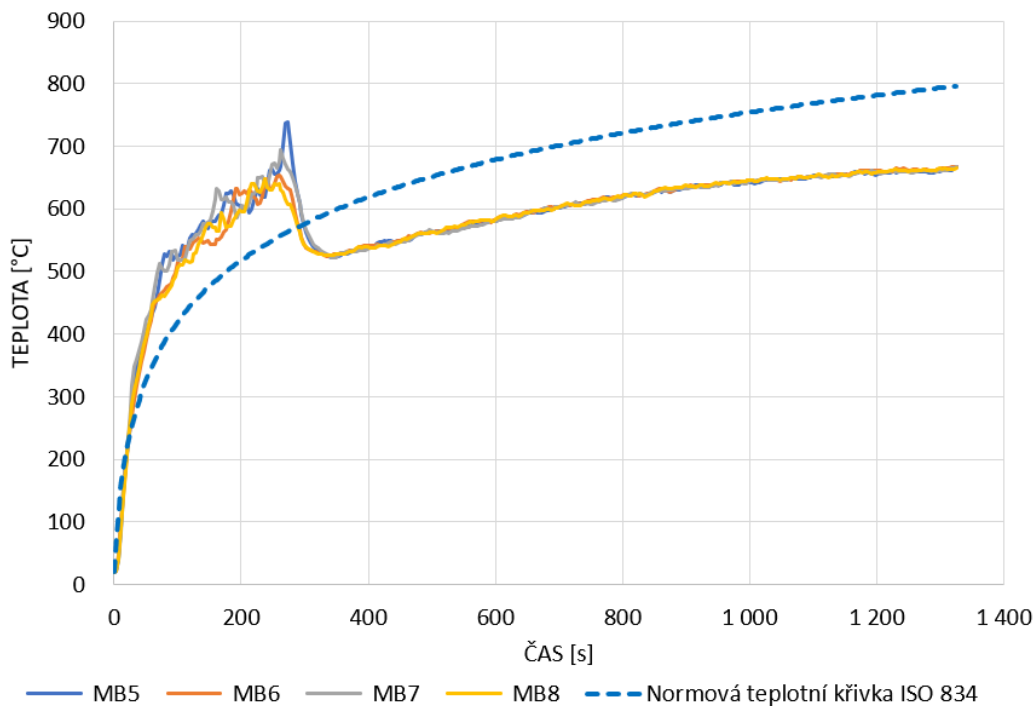
Výchozí zvolená hodnota Tepelného výkonu hořáku je HRR=200 kW. Plocha hořáku je $S=0,3 \times 0,1=0,03 \text{ m}^2$. Zahřívání pece je definované příkazem RAMP_Q, kde výkon a čas jsou závislé veličiny. V čase T (s), ve kterém je stanovena konkrétní hodnota mezi poměrem maximálního výkonu F (-) a výkonem v daném čase [1].

Výkon hořáku se od původní modelu neliší viz (Tab. 7), přesto měl model jiné výsledky a chování, co se týče plamene a teploty než původní model. V peci docházelo k jevu, kdy plamen v určitém okamžiku přeskočil od hořáku směrem k ventilačním otvorům pece pro kyslík, jehož měl

dle hodnot z MB1 a MB5 nedostatek, kyslík se pohyboval okolo 4 %. Tento skok je vidět na normové teplotní křivce z Obr. 30 v čase 300 s. Jiné chování plamene a průběhu teploty v peci, včetně nedostatku kyslíku, mohl být způsoben změnou, resp. rozšířením výpočetní oblasti a jiným nadefinováním ventilačních otvorů, to mohlo vést ke změně okrajových podmínek modelu pece. Tento problém byl vyřešen zjemněním sítě, po kterém došlo k přibližnému návratu k normové teplotní křivce.



Obr. 29: Přeskok plamene k ventilačním otvorům modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview: (Pohled s příčnou stranu pece)



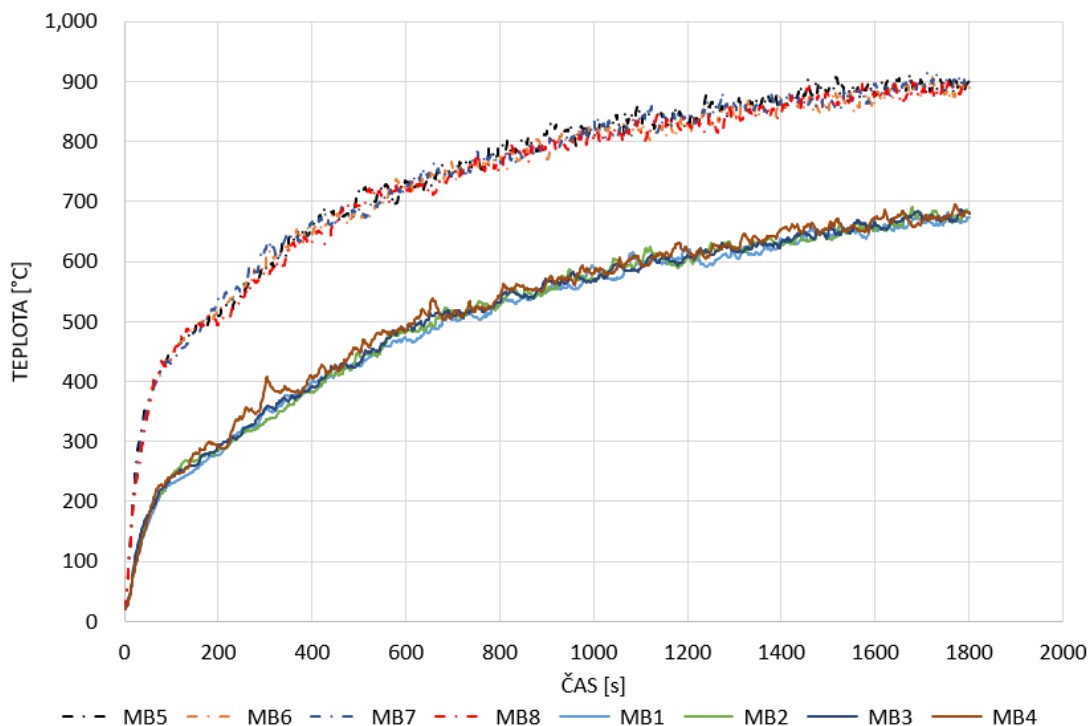
Obr. 30: Teploty jednotlivých měřících bodů (MB5 až MB8) z horní poloviny pece a její srovnání s normovou teplotní křivkou – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 50x50x50 mm

Tab. 7: Upravený tepelný výkon hořáku

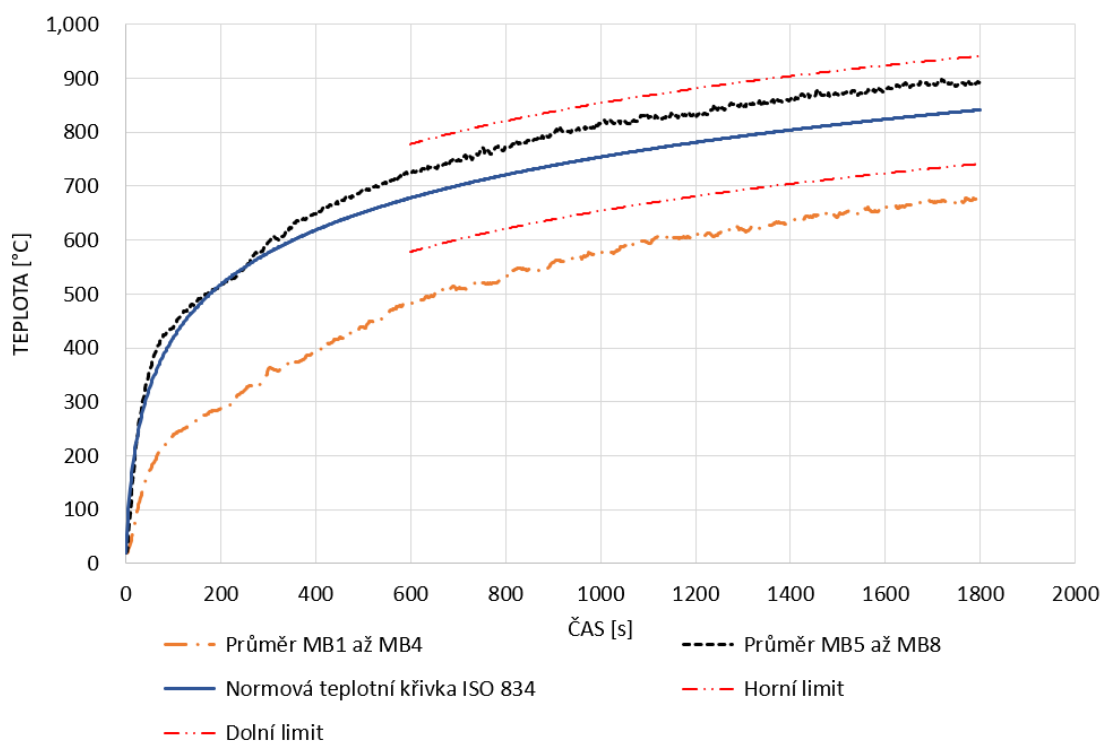
Čas	Výkon	Čas	Výkon	Čas	Výkon	Čas	Výkon	Čas	Výkon
[s]	[kW]	[s]	[kW]	[s]	[kW]	[s]	[kW]	[s]	[kW]
0	0,0	150	88,0	570	117,0	990	127,6	1410	136,0
10	60,0	180	90,0	600	117,4	1020	128,0	1440	137,0
15	61,0	210	92,0	630	118,0	1050	128,4	1470	137,2
20	62,0	240	96,0	660	119,0	1080	128,6	1500	137,4
25	63,0	270	100,0	690	119,6	1110	128,8	1530	137,6
30	64,0	300	104,0	720	120,0	1140	128,84	1560	138,0
35	66,0	330	106,0	750	121,0	1170	128,90	1590	140,0
40	70,0	360	110,0	780	122,0	1200	129,0	1620	140,2
45	72,0	390	112,0	810	123,0	1230	130,0	1650	140,4
50	74,0	420	112,0	840	124,0	1260	132,4	1680	140,6
55	76,0	450	113,0	870	125,0	1290	133,0	1710	140,8
60	78,0	480	114,0	900	126,0	1320	133,1	1740	141,0
90	80,0	510	115,0	930	126,6	1350	133,4	1770	142,2
120	86,0	540	116,0	960	127,0	1380	134,0	1800	142,4

Zjemnění sítě z velikosti buňky 50x50x50 mm na 25x25x25 mm vyřešilo nezvyklé chování plamene v peci z Obr. 29 a odklon teploty v peci od normové teplotní křivky z Obr. 30. Další již odpovídající výsledky CFD modelu pece jsou tedy pro jemnou síť 25x25x25 mm.

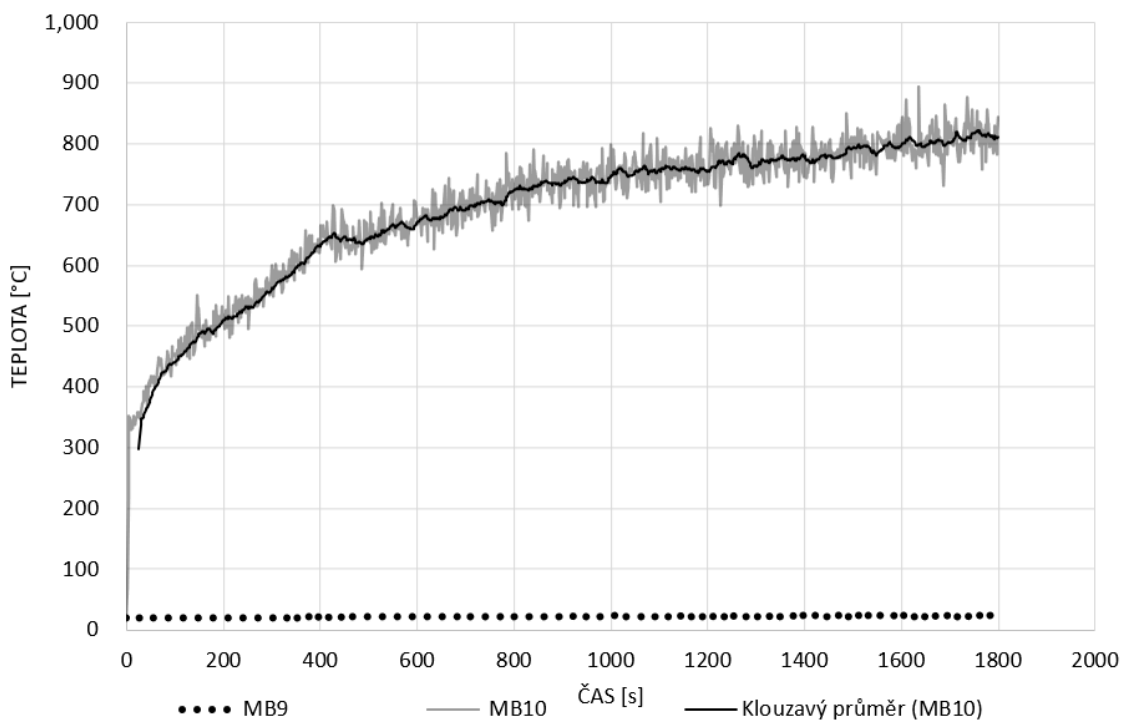
Následující graf (Obr. 31) ukazuje teplotu naměřenou MB1 až MB8 jak v horní, tak v dolní polovině pece, Graf na Obr. 32 ukazuje průměry MB pro horní a dolní polovinu pece a srovnává je s normovou teplotní křivkou a jejími teplotními limity. Graf ukazuje velmi dobrou shodu v horní polovině pece s normovou teplotní křivkou, nicméně zde vychází o něco málo nad ní, cca o 50 °C. Vyšší teplota oproti normové teplotní křivce splňuje pro horní polovinu pece teplotní limity. Vzhledem k cílům této diplomové práce je shoda dostatečná a přibližně odpovídá výsledkům z původního modelu a z experimentu, kterému se věnuje následující kapitola diplomové práce. Teplota naměřená v horním a dolním ventilačním otvoru modelu pece (Obr. 33), tato hodnota bude důležitá v další části diplomové práce. Na posledním obrázku z této podkapitoly je zachycena isoplocha teploty zobrazená v programu Smokeviews (Obr. 34). isoplocha teplot v příčném řezu přes ventilační otvory v modelu pece je zobrazena na Obr. 35, obrázek poskytuje představu o teplotě v peci vzhledem k výšce v peci.



Obr. 31: Teploty naměřené jednotlivými měřicími body (MB; Čerchovaně jsou zobrazeny z horní poloviny, plnou čarou z dolní poloviny) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25mm

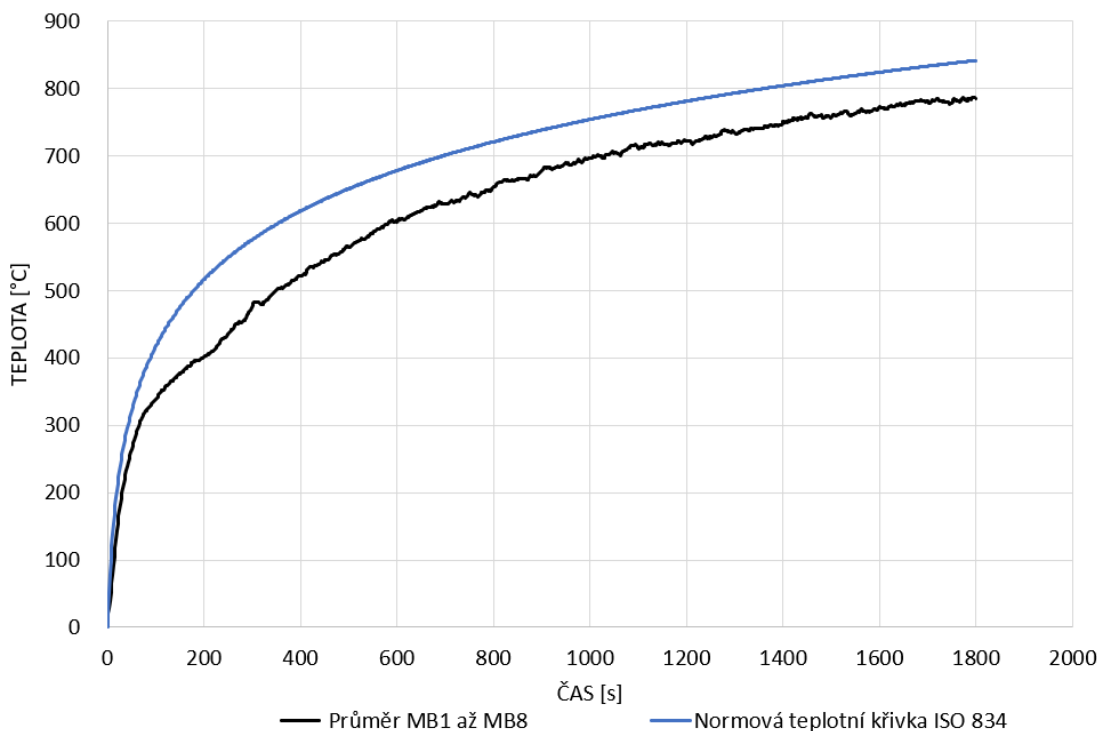


Obr. 32: Průměrná teplota naměřená měřicími body (MB) a srovnání s normovou teplotní křivkou včetně teplotních limitů normové teplotní křivky – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25 mm

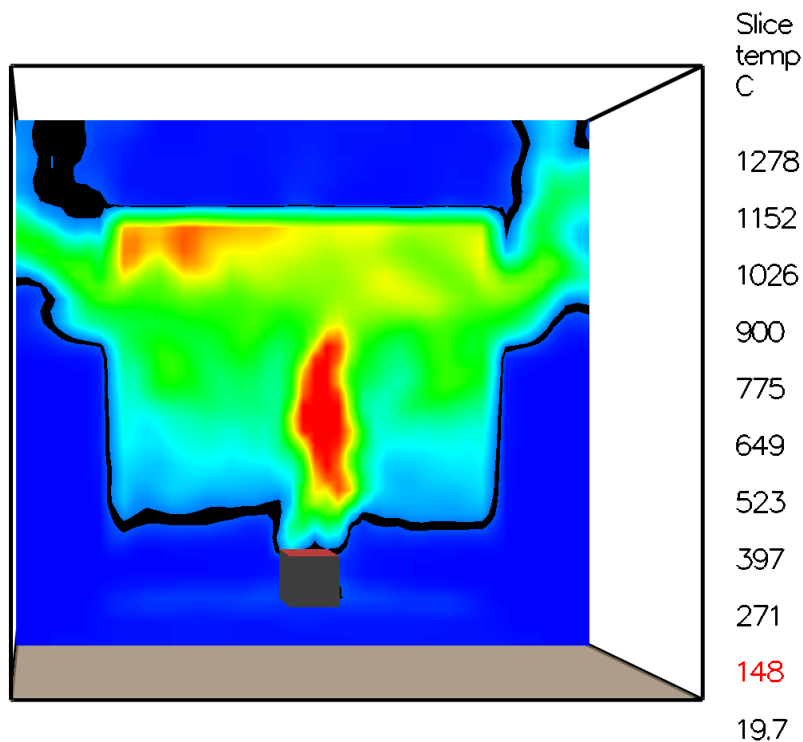


Obr. 33: Teplota naměřená měřicími body (MB) ve ventilačních otvorech modelu pece (horní otvor MB10, dolní otvor MB9) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25mm

Průměrné teploty v celé peci je na Obr. 34, tato hodnota je zde opět porovnána s normovou teplotní křivkou, právě s touto průměrnou teplotou v modelu pece bude dále uvažováno pro určení neutrální roviny v modelu pece (viz následující kapitola 3.5).

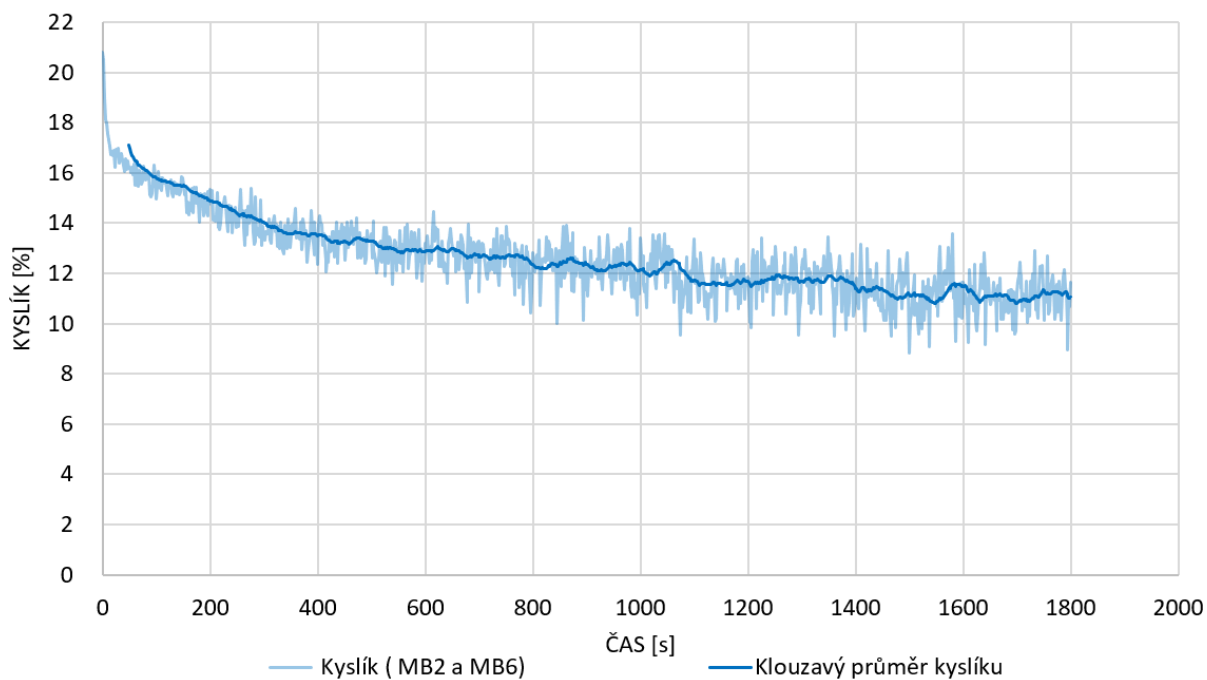


Obr. 34: Celková průměrná teplota z měřících bodů (MB1 až MB8) modelu pece a srovnání s normovou teplotní křivkou – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25mm



Obr. 35: Isoplocha teplot v příčném řezu přes ventilační otvory v modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview

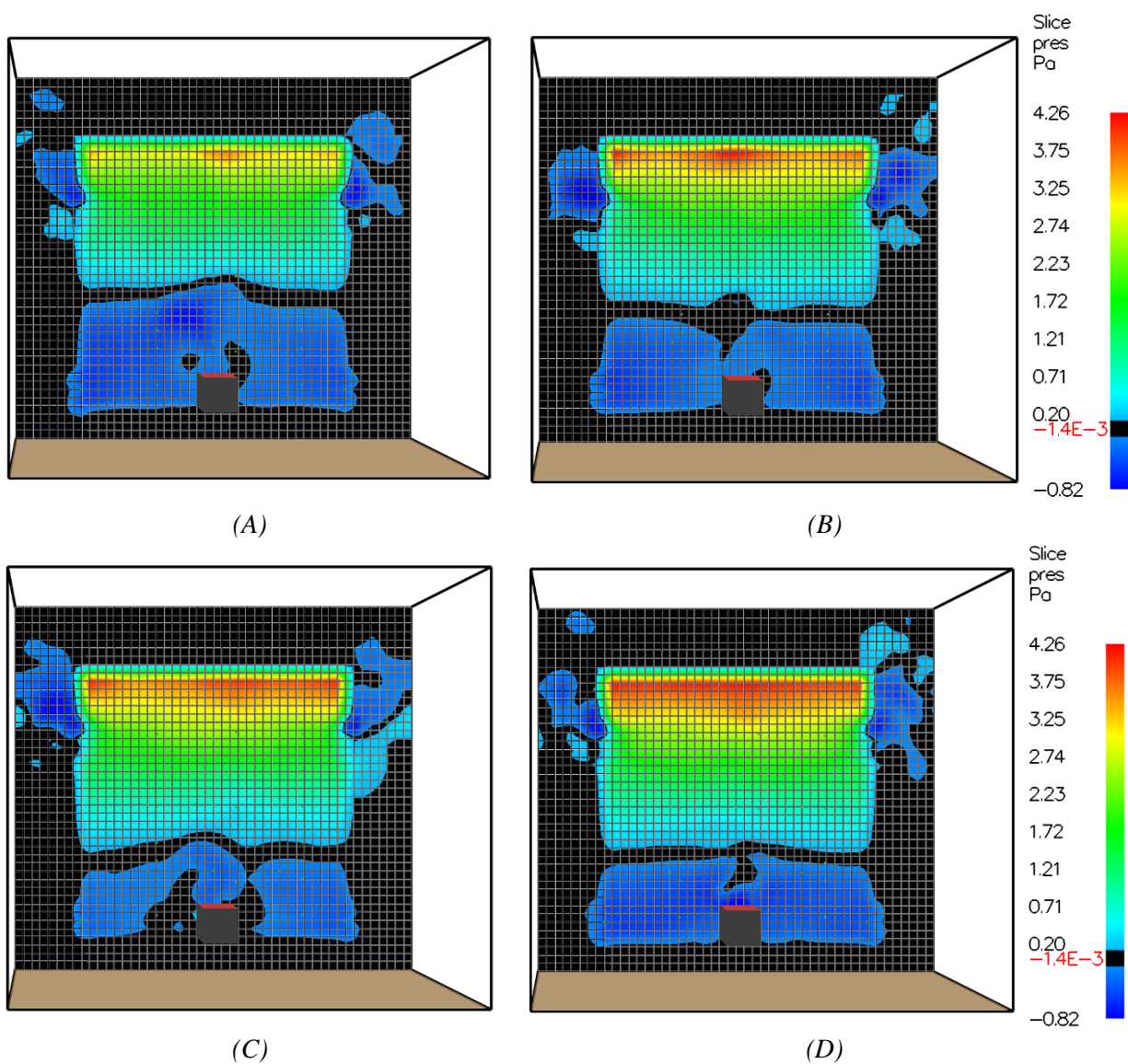
Kyslík v peci nikdy neklesl pod 4 % (Obr. 36), tedy nebyl překročen limit z kapitoly 2.5.4 dle požadavků [15].

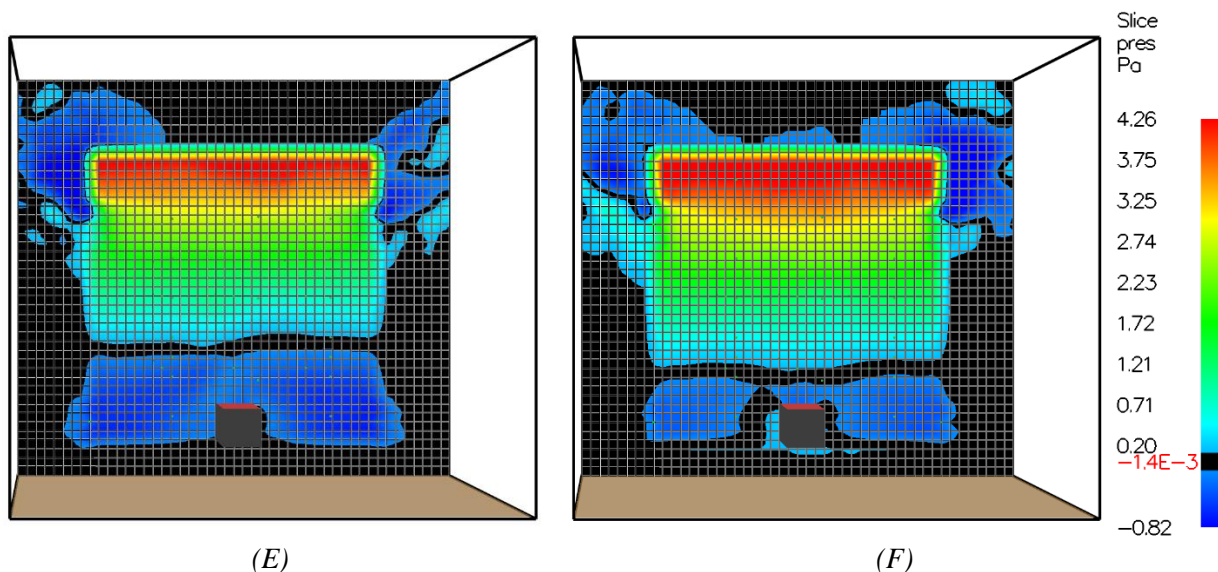


Obr. 36: Procentuální množství kyslíku naměřené (MB2 a MB6) v modelu pece – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25 mm

3.5 Neutrální rovina v CFD modelu pece

V této části podkapitoly si zmapujeme výšku neutrální roviny v CFD modelu pece. Průměrné teploty v celé peci byly uvažovány z grafu (Obr. 34). K určení výšky neutrální roviny bylo užito isoplochy vůči ose X v polovině pece, tedy isoplocha v řezu přes ventilační otvory pece, kde tato isoplocha představuje tlak v modelu pece. Na Obr. 37 vidíme výšku neutrální roviny v programu Smokeview pro teploty 300, 400, 500, 600, 700 a 800 °C, tedy snímek byl vytvořen vždy v čase, kdy bylo dosaženo těchto teplot. V Tab. 8 jsou uvedeny výšky neutrální roviny vzhledem k času a teplotě kdy byly změřeny. Neutrální rovinu zachycuje černá barva, která je nastavena pro tlak blízký nule. Pokud bychom použili analogii s podkapitolou 2.5.6, tedy odhadovali bychom povolenou výšku neutrální roviny, tak dle odhadu z této kapitoly by byla min výška neutrální roviny cca 200 mm nad podlahou adekvátní.





Obr. 37: Zobrazení neutrální roviny v modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview pro teplotu:
 (A) 300 °C v čase 70 s; (B) 400 °C v čase 200 s; (C) 500 °C v čase 334 s;
 (D) 600 °C v čase 595 s; (E) 700 °C v čase 999 s; (F) 785 °C v čase 1782 s

Tab. 8: Vzdálenosti neutrální roviny od podlahy pece pro určitou teplotu

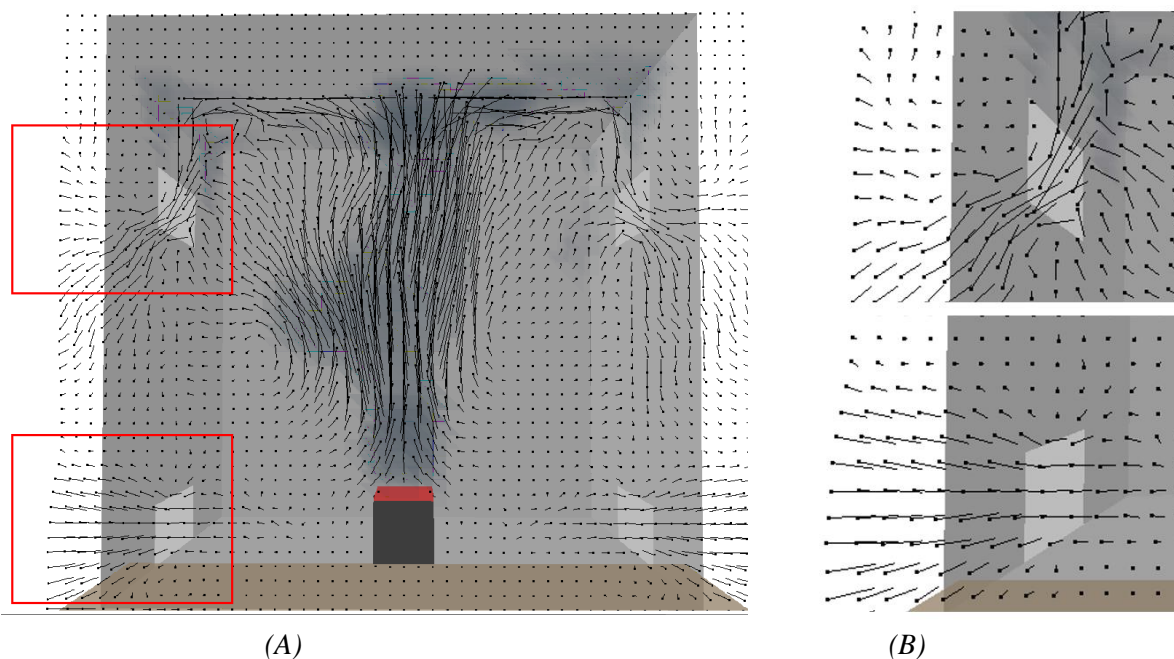
T [°C]	Čas [s]	$h_{n.r.}$ [m]
100	-	-
200	-	-
300	70	0,350
400	198	0,300
500	334	0,275
600	595	0,260
700	999	0,250
785	1782	0,200

Kromě výšky neutrální roviny je z Obr. 37 dobře vidět průběh a hodnoty tlaku v peci při simulaci, např. vidíme, že tlaky s výškou rostly, maximální hodnoty tlaku, resp. přetlaku jsou kolem 4,26 Pa. Výška neutrální roviny simulace pro prvních 200 s nebyla zaznamenána, neboť ji nelze jednoznačně do tohoto času ze zobrazení v programu Smokeview určit.

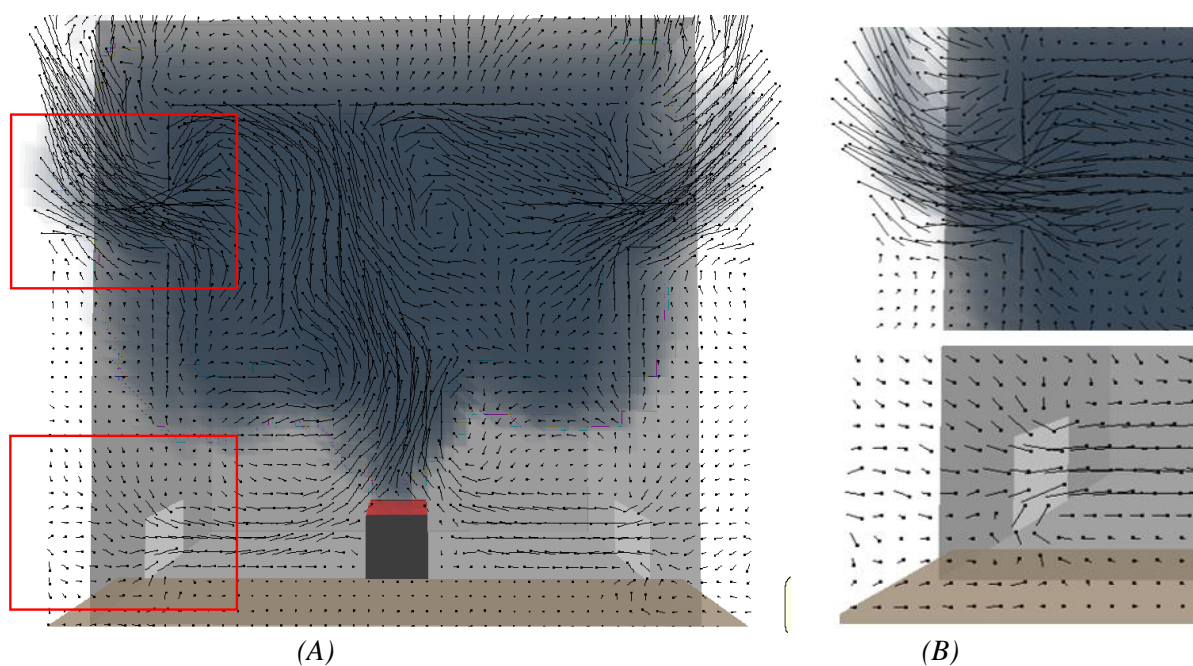
3.6 Fáze tlakových poměrů v CFD modelu pece

V kapitole 2.2.4 byly popsány tlakové poměry v místnosti s velkým ventilačním otvorem a fáze, které při požáru obecně mohou nastat, tedy fáze A až D. Průběh těchto fází si popíšeme i pro náš model pece. Fáze A a fáze B proběhnou v prvních pár sekundách simulace, kouřová vrstva se nejprve utvoří u stropu, dále pomalu klesá, dokud nedosáhne horního ventilačního otvoru, vzduch a plyn jsou vytlačovány jak horním, tak dolním otvorem. Tato fáze je krátká, vzhledem k malé velikosti pece vůči velikosti hořáku (Obr. 38). Zbytek simulace zastává fáze C, kde se kouřová vrstva drží víceméně v horních 2/3 výšky modelu pece. Horním otvorem odtékají horké

plyny a spodním otvorem do pece přitéká studený vzduch (Obr. 39). K poslední fázi D v peci nikdy úplně nedojde, horké plyny nikdy nedosáhnou podlahy a drží se spíše výše, nedojde k promíchání horní a dolní vrstvy ani flashoveru. Na Obr. 37 z minulé podkapitoly vidíme, že pod neutrální rovinou máme podtlak, zatímco nad neutrální rovinou přetlak podle principů z podkapitoly 2.2.1.



Obr. 38: Pohyb plynů/vzduchu a pohyb kouře v prvních pár vteřinách simulace modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview: (A) Pohled s příčnou stranou pece; (B) Přibližný horní a dolní ventilační otvor pece

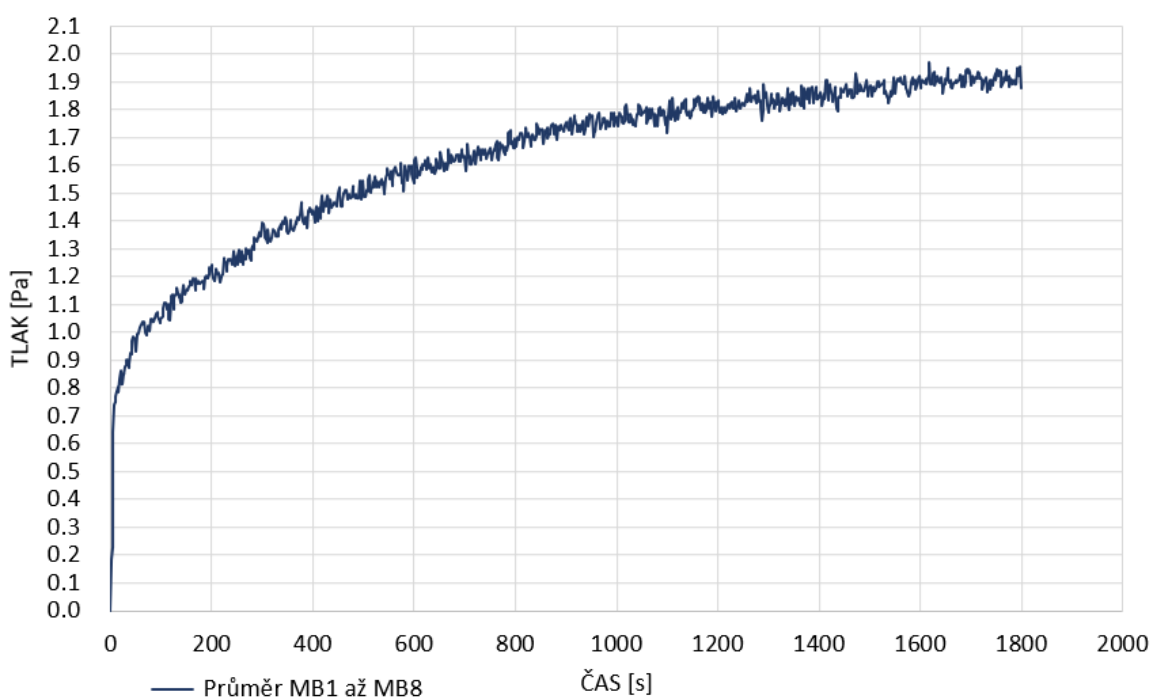


Obr. 39: Pohyb plynů/vzduchu a pohyb kouře po většinu času simulace v modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview: (A) Pohled s příčnou stranou pece; (B) Přibližný horní a dolní ventilační otvor

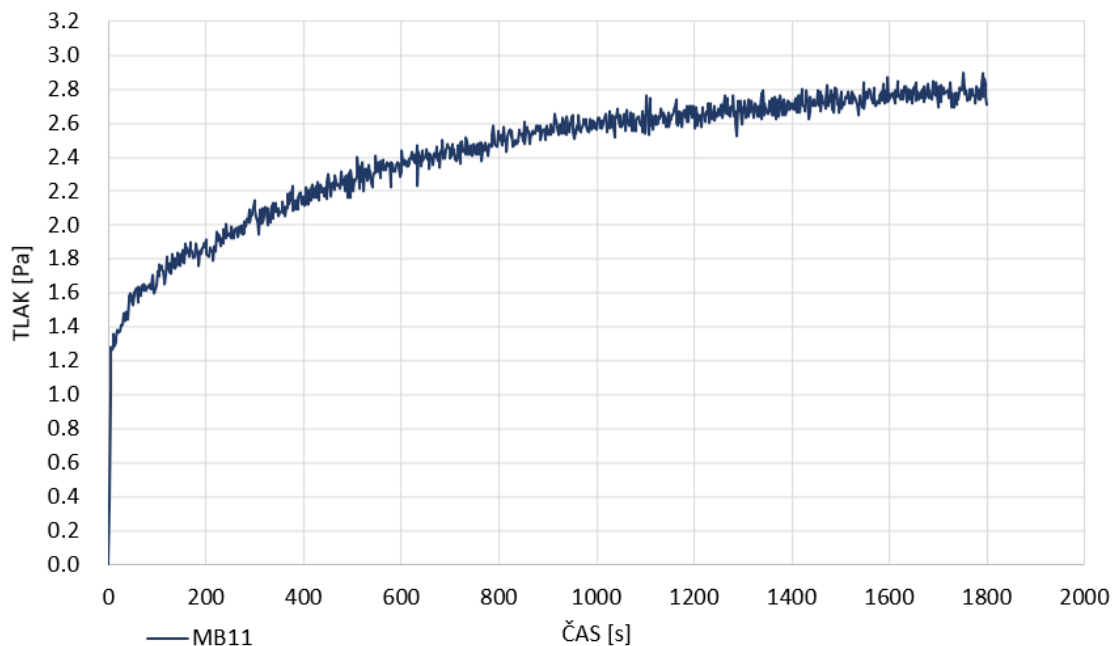
3.7 Tlaky v CFD modelu pece

V předchozí podkapitole je z Obr. 37 patrné rozložení tlaků v modelu pece. Maximální tlaky v modelu pece se pohybují do maximálního tlaku kolem 4,26 Pa, kde se tento maximální drží v horní části pece. Ke kolísání tlaků a překročení tlaku 20 Pa dle limitu z podkapitoly 2.5.3, resp. požadavkům z [15] nedochází.

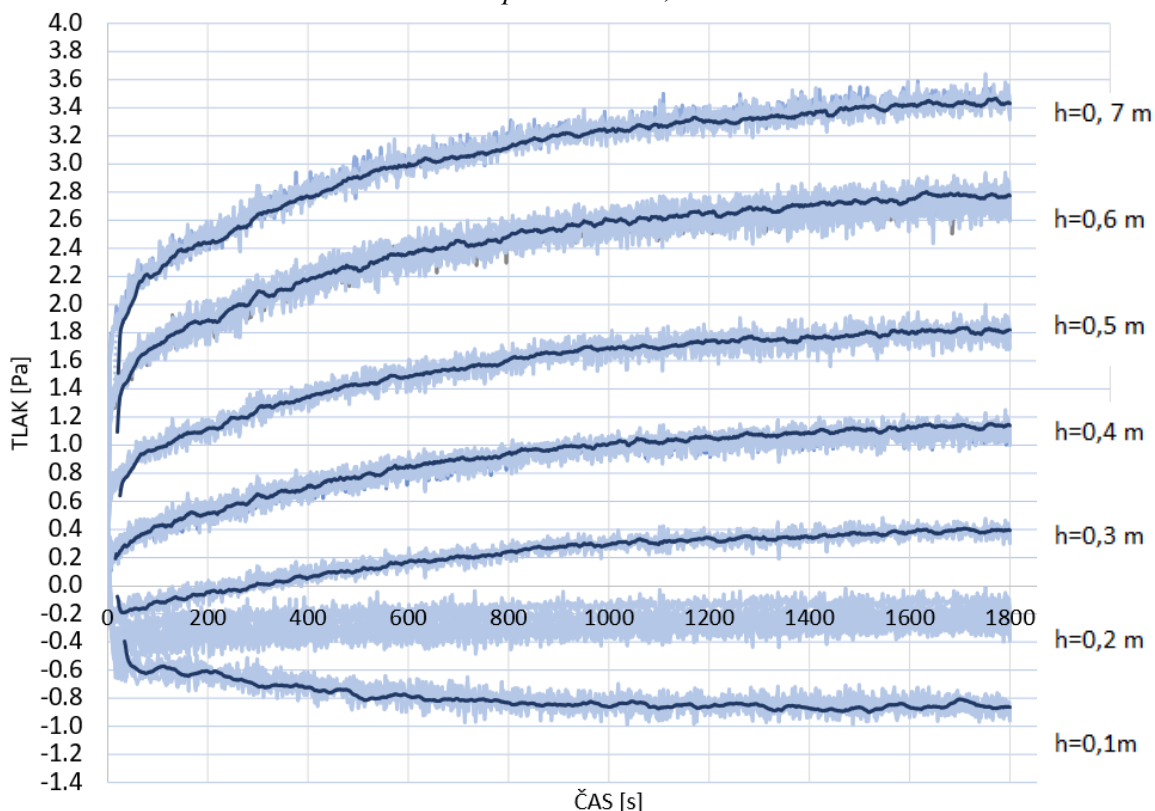
Na Obr. 40 vidíme průměrnou hodnotu tlaku v peci, je to průměr z měřících bodů MB1 až MB8, který nám dává odhad velikosti tlaků v modelu pece, stejně tomu je na Obr. 41, kde MB 11 budeme v další části práce srovnávat s experimentem, resp. s tlakem ve stejném místě zkušební pece. Na Obr. 42 jsou zachyceny průměrné tlaky měřících bodů vzhledem k výšce v peci, resp. podtlaku pod neutrální rovinou a přetlaku nad neutrální rovinou modelu pece.



Obr. 40: Průměrný tlak v modelu pece naměřený měřícími body (MB1 až MB8) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25mm

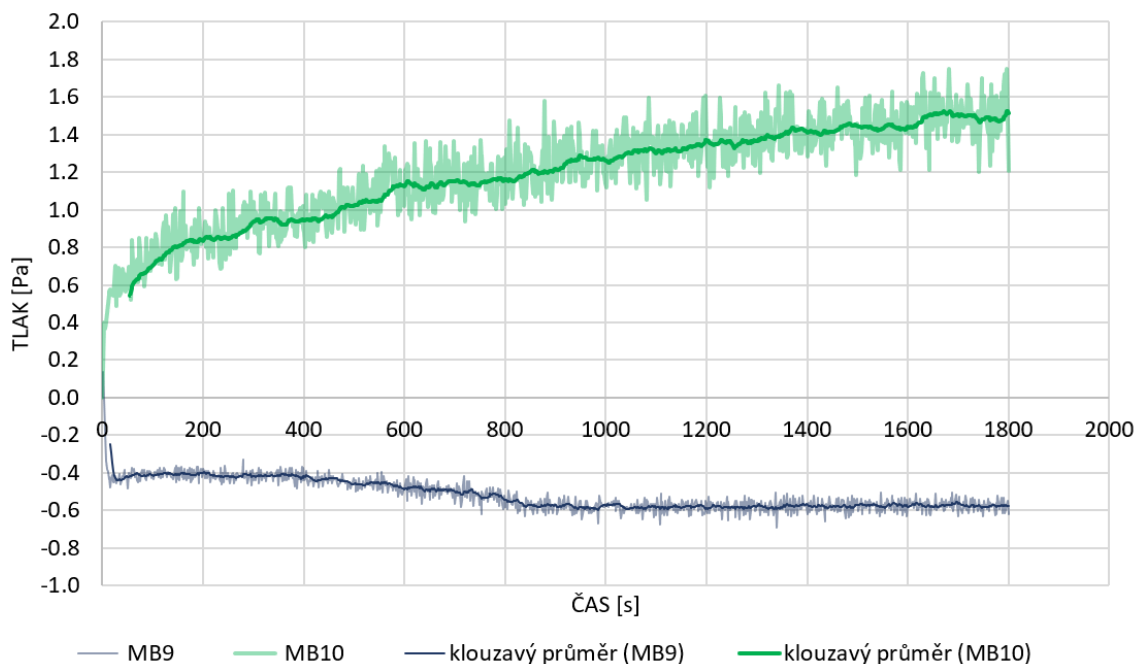


Obr. 41: Tlak v modelu pece naměřený měřicím bodem (MB11) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25



Obr. 42: Průměrné tlaky v modelu pece podle výšky měřicích bodů v peci (MB; všechny MB mimo MB9 a MB10) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25 mm (poznámka: Klouzavý průměr tlaku z výškové úrovně h=0,2 m byl vynechán z důvodu viditelnosti číselné osy X)

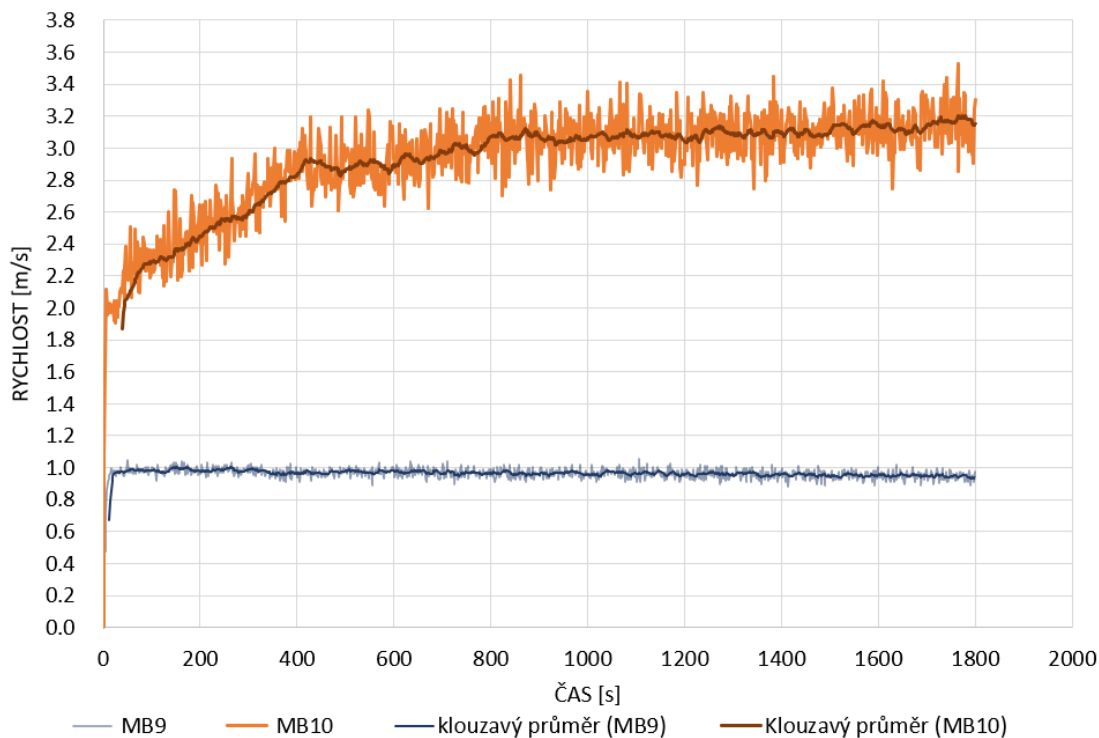
Grafu (Obr. 43) zachycuje tlaky v horním (MB10) a dolním (MB9) ventilačním otvoru modelu pece. Hladina tlaku zde více kolísá, zejména v horním otvoru, nicméně se drží mezi hodnotami -0,6 Pa (podtlak) v dolním otvoru a 1,4 Pa (přetlak) v horním otvoru modelu pece.



Obr. 43: Tlaky v horním a dolním ventilačním otvoru modelu pece neměřené měřicími body (MB; horní otvor MB10, dolní otvor MB9) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25 mm

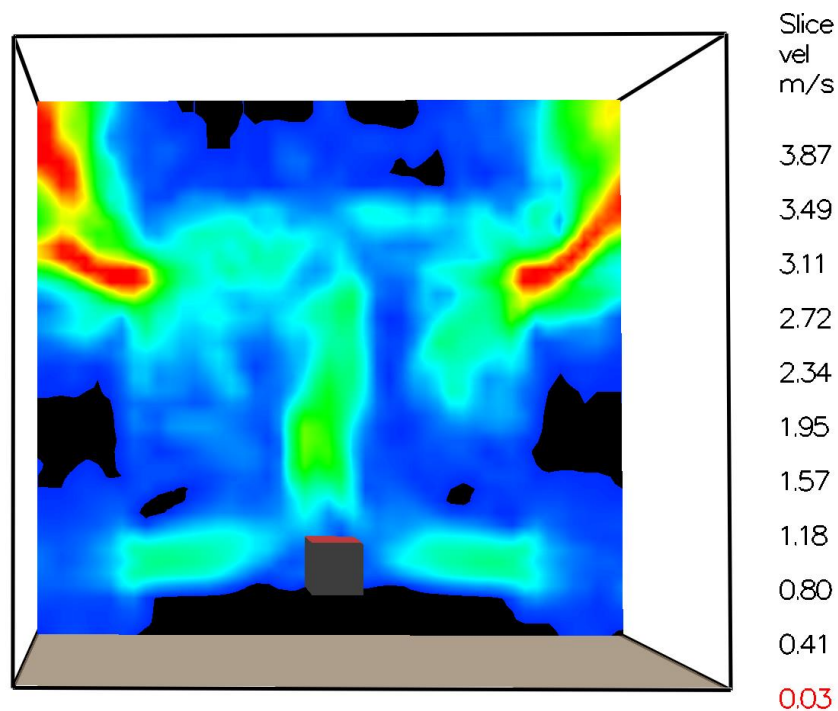
3.8 Rychlost proudění v CFD modelu pece

Rychlosti proudění je zachycena na Obr. 44, jedná se o rychlost proudění modelu pece z horního (MB10) a dolního (MB9) ventilačního otvoru modelu pece.



Obr. 44: Rychlosti v horním a dolním ventilačním otvoru modelu pece naměřené měřicími body (MB; horní otvor MB10, dolní otvor MB9) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25 mm

Hodnoty rychlostí proudění se drží většinu času kolem cca 3 m/s (horní otvor). Hodnoty v dolním otvoru se pohybují většinu času kolem 1 m/s.



Obr. 45: Isoplocha rychlosti proudění v příčném řezu přes ventilační otvory v modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview

Největší rychlost v peci jsou samozřejmě kolem ventilačních otvorů kudy je přiváděn a odváděn plyn/vzduch, v peci samotné se rychlosti pohybují kolem cca 0,7 m/s (hodnoty z MB1 až MB8). Znázornění proudění plynů a jeho rychlostí je zobrazena na Obr. 45.

4 Experimenty pro ověření tlakových a rychlostních poměrů ve středněrozměrové požární peci

Dne 30.11.2020 byly provedeny požární experimenty, resp. dva požární experimenty v požární laboratoři na UCEEB ČVUT v Praze. Experimenty proběhly ve zkušebním zařízení požární pece pro středněrozměrové zkoušky požární odolnosti, tedy na peci z kapitoly 2.5.1. Experiment měl za cíl potvrdit (validovat) některé výsledky z CFD modelu pece a zjistit tak, zda se blíží reálným podmínkám ve zkušební peci. Pro každý ze dvou požárních experimentů byly vytvořeny podmínky jako u CFD modelu z minulé kapitoly, tedy stejná pec, stejná poloha měřících bodů, výkon hořáku atd. Každý ze dvou požárních experimentů trval 15 minut tedy 1800 sekund.

U obou experimentů bylo použito obousměrné rychlostní sondy, která měřila tlak a dále bylo použito termoelektrických článků měřících teplotu (dále jen TC), TC typ K, plášťový s tl. 1,5 mm v blízkosti ORS (Obr. 46 (A)). Dalších TC stejného typu ale s tl. 3 mm bylo použito pro měření teploty v peci (Obr. 46 (B)), tyto TC mají stejné umístění jako mají měřící body (MB1 až MB8) u CFD modelu pece z předchozí kapitoly 3, přesněji z podkapitoly 3.4 (Nastavení výkonu hořáku pece, referenční zkouška), na stejném obrázku je vidět plynový hořák pece. Pro experimenty bylo použito plynového hořáku s přednastaveným tepelným výkonem, který se od práce [1] neměnil.

Sonda byla napojena na tlakový převaděč z kapitoly 2.3.4, tedy převaděč od výrobce CRESSTO typu: SV – snímač tlaku s automatickým nulováním offsetu s měřícím rozsahem na desetinu pascalu (Obr. 47 (A)). Tento tlakový převaděč byl dále napojen na pult/počítač laboratoře (Obr. 47 (B)). Průběh prvního a druhého experimentu je zachycen na Obr. 47 (C) a na Obr. 47 (D).



(A)



(B)

Obr. 46: Vybavení požární laboratoře: (A) ORS s přidělaným termočlánkem; (B) vnitřek zkušební pece se zapojením termočlánků a plynovým hořákem



(A)



(B)



(C)



(D)

Obr. 47: Vybavení požární laboratoře: (A) ústředna/počítač požární laboratoře; (B) tlakový převaděč zkušební pece; (C) ORS při experimentu 1; (D) ORS při experimentu 2

4.1 Experiment 1 – ověření rychlosti proudění ve středněrozměrové požární peci

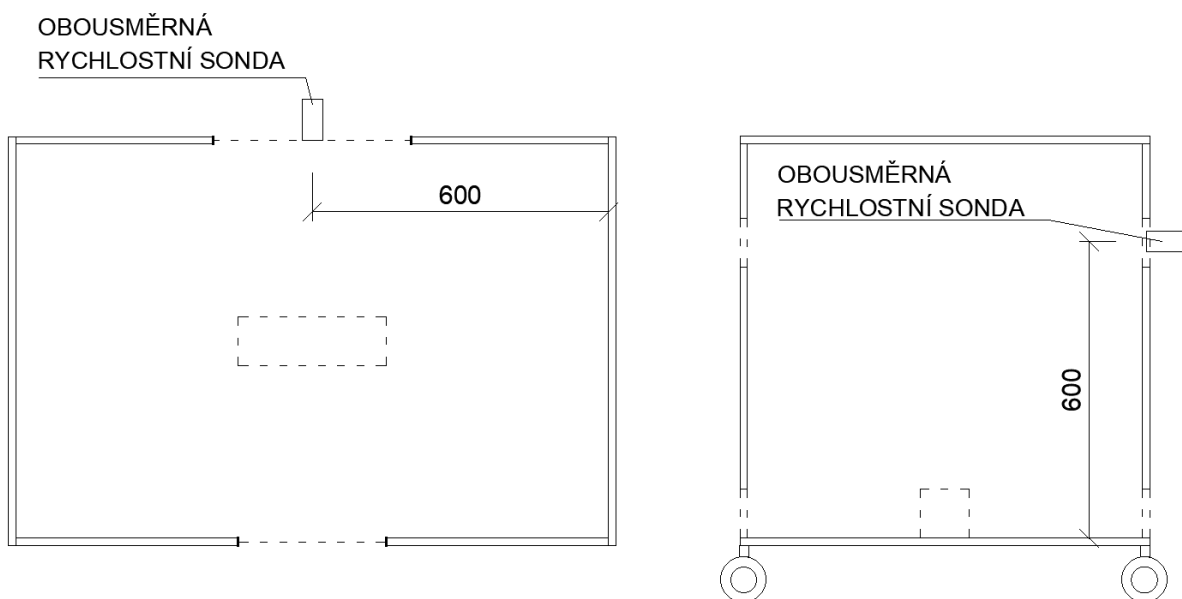
V prvním experimentu byla ORS s vnitřním průměrem 18 mm umístěna do horního ventilačního otvoru pece (Obr. 48). V blízkosti sondy byl dále umístěn TC typ K, plášťový s tl. 1,5 mm. První experiment měl za cíl změřit tlak v horním ventilačním otvoru pece a teplotu v téže místě, a dále ze vztahu (24 až 29) resp. dle podkapitoly 2.4.1 (Řešený příklad 2) vypočítat rychlost proudění. Poloha obousměrné sondy je na Obr. 49. Toto umístění odpovídá poloze MB10 CFD modelu pece z předchozí kapitoly 3.



(A)

(B)

Obr. 48: Zkušební pec – experiment 1: (A) pohled na pec; (B) rychlostní sonda umístěná v horním ventilačním otvoru zkušební pece

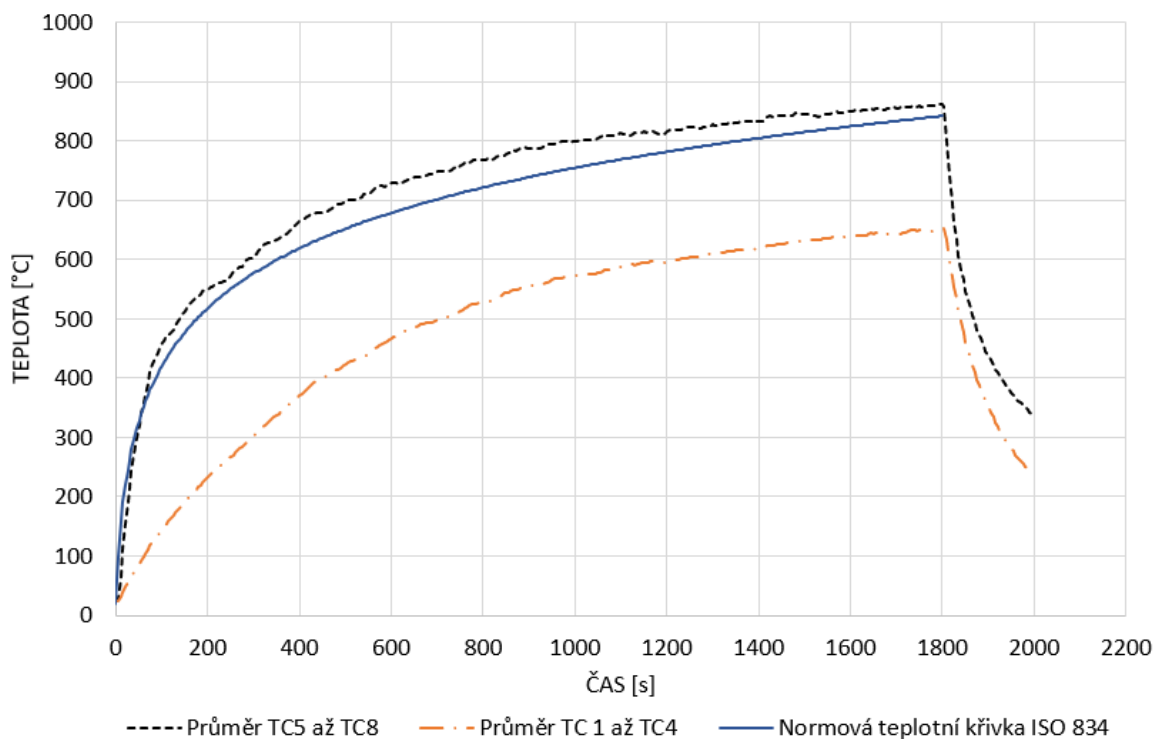


Obr. 49: Umístění obousměrné rychlostní sondy v horním ventilačním otvoru zkušební pece – experiment 1: (A) Půdorys; (B) Řez příčný

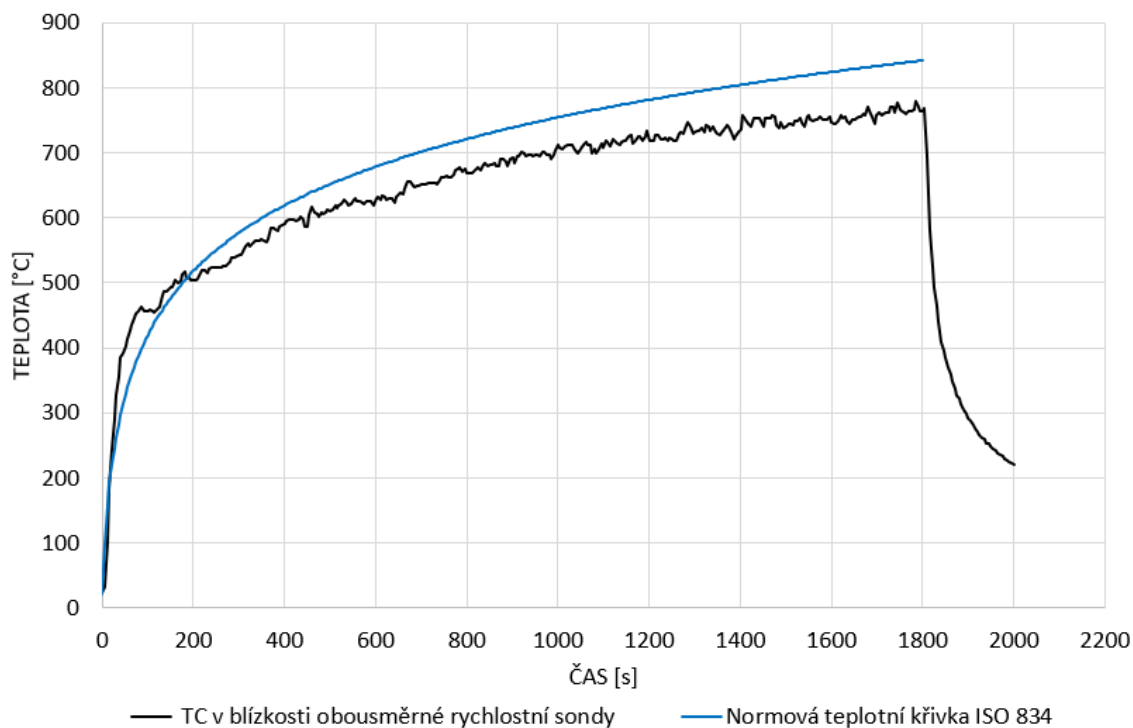
4.2 Výsledky experimentu 1

Výsledná naměřená teplota přibližně odpovídá normové teplotní křivce, Obr. 50 ukazuje průměrnou teplotu ze spodních TC (TC1 až TC4) a průměr z horních TC (TC5 až TC8). Výsledky z těchto TC jsou dále srovnány s normovou teplotní křivkou. Teploty v horní polovině pece oproti normové teplotní křivce je cca o 30 °C vyšší, podobně jako u CFD modelu pece, kde šlo o rozdíl cca 50 °C. Na dalším Obr. 51 je graf znázorňující teplotu naměřenou v blízkosti ORS, která byla stejně jako tlak (Obr. 52), použita pro výpočet rychlosti proudění v horním ventilačním otvoru pece. Výsledná vypočtená rychlost proudění (viz graf na

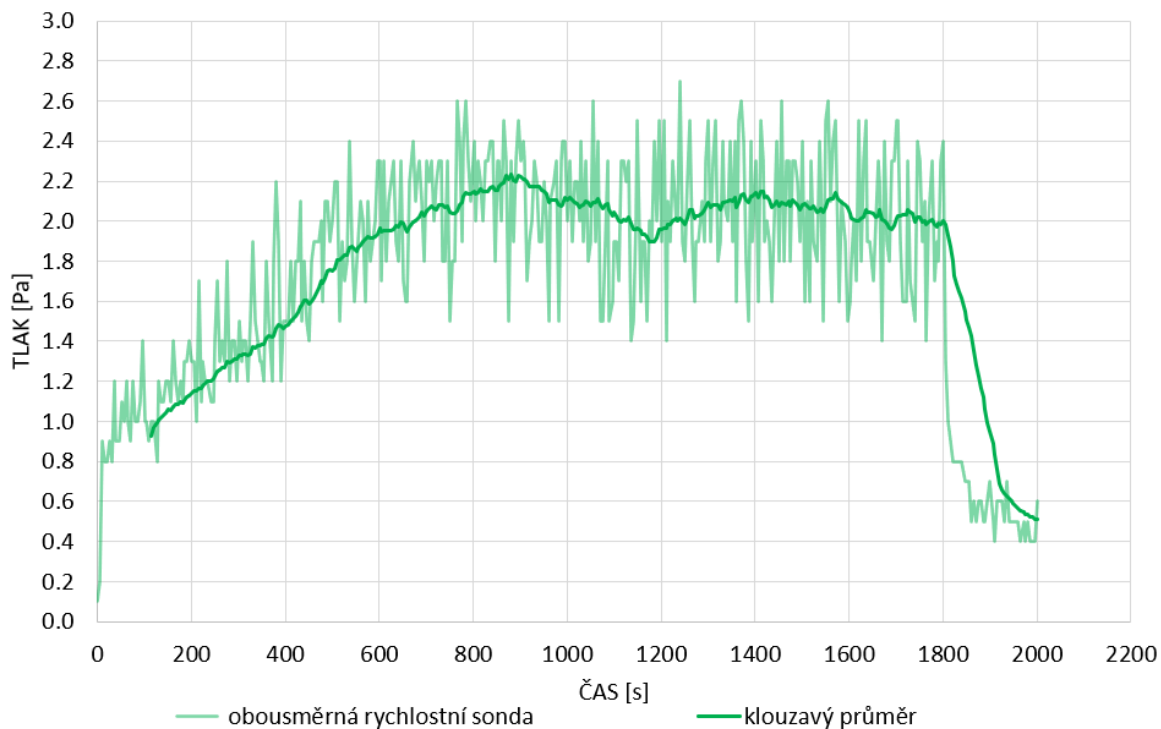
Obr. 53), byla vypočtena s využitím programu Microsoft Excel, ukázkou výpočtu najdeme v podkapitole 2.4.1 (Řešený příklad 2), kde byl tento výpočet proveden pro rychlost proudění v horním ventilačním otvoru v čase 700 s.



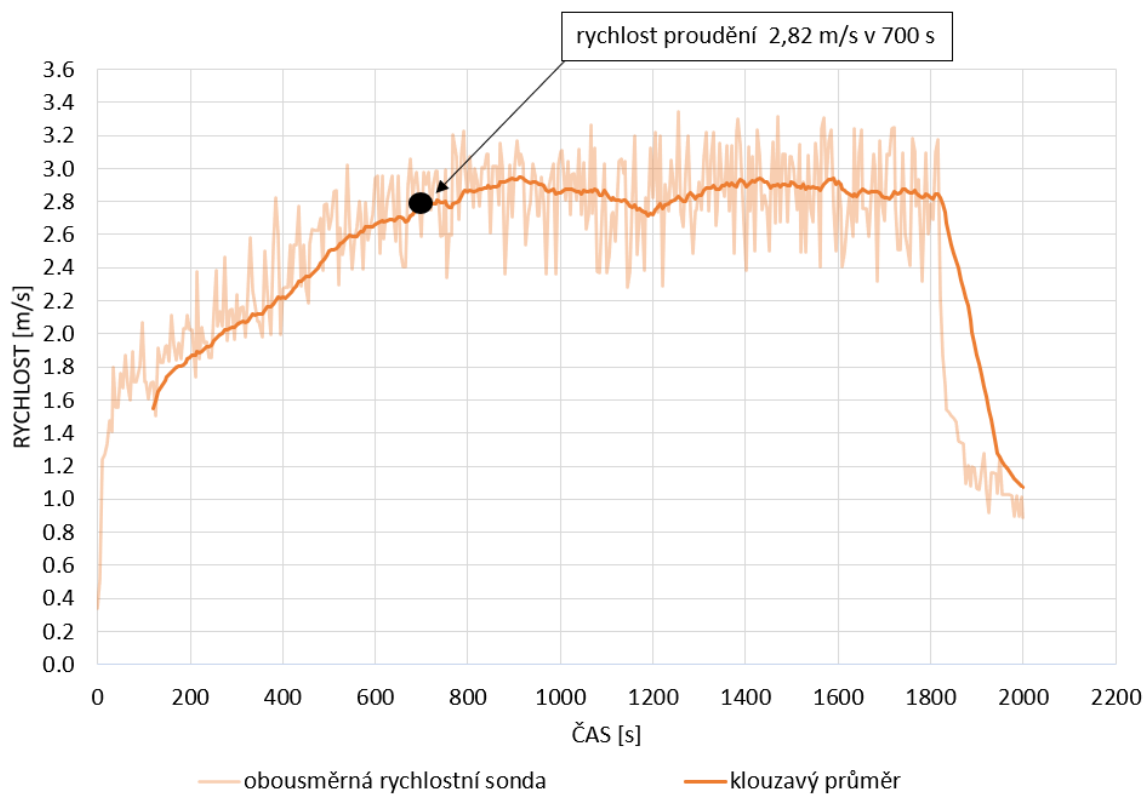
Obr. 50: Průměrná teplota naměřená termočlánky (TC1 až TC8) a srovnání s normovou teplotní křivkou – experiment 1



Obr. 51: Teplota naměřená termočlánky (TC 1 až TC8) v blízkosti obousměrné rychlostní sondy ve zkušební peci – experiment 1



Obr. 52: Tlak v horním ventilačním otvoru zkušební pece naměřený obousměrnou rychlostní sondou – experiment 1



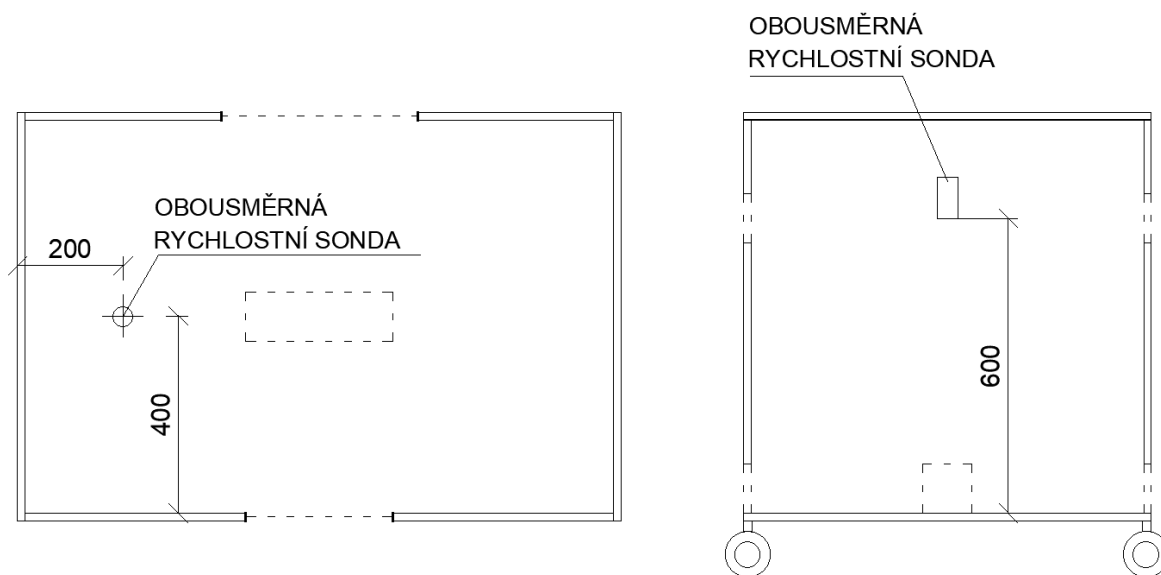
Obr. 53: Rychlost proudění v horním otvoru zkušební pece vypočtená z naměřeného tlaku a teploty ve stejném místě – experiment 1

4.3 Experiment 2 – ověření tlakových poměrů ve středněrozměrové požární peci

Při druhém experimentu byla ORS umístěna do vnitřku pece (Obr. 54, 55). ORS byla stejná jako u experimentu 1, tedy s vnitřním průměrem 18 mm. Druhé měření mělo za cíl změřit tlak v určitém místě uvnitř zkušební pece. Umístění ORS odpovídá poloze MB11 z CFD modelu pece.



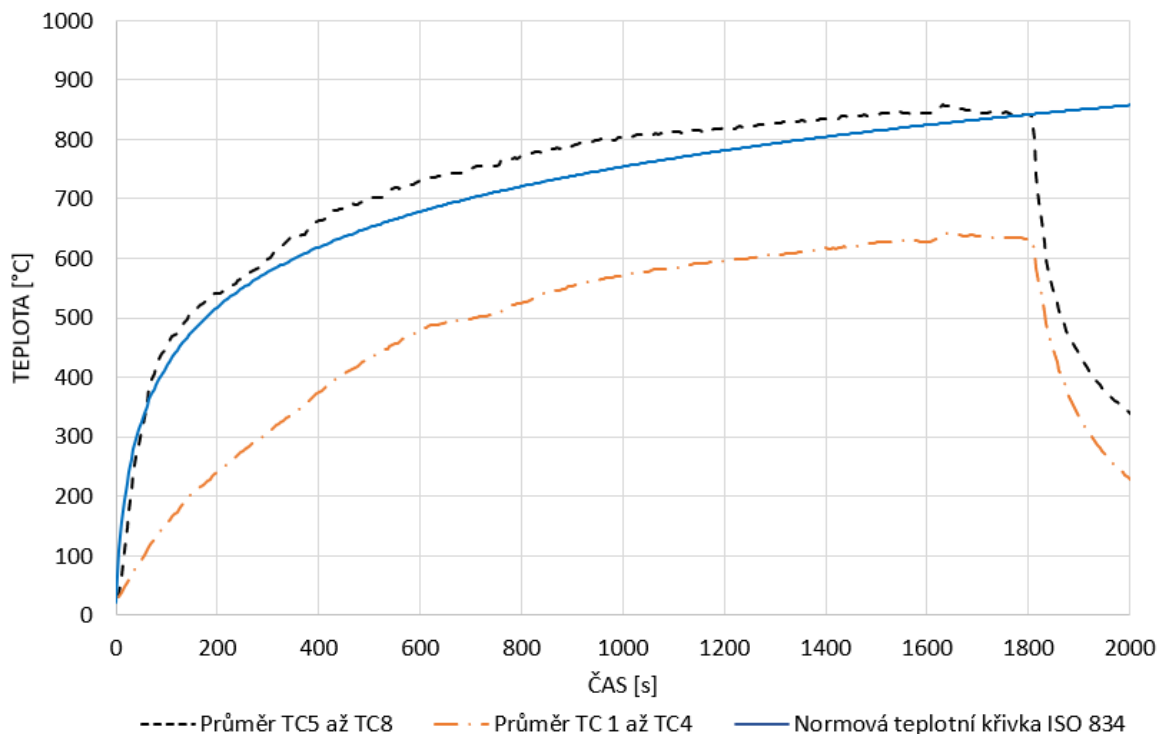
Obr. 54: Zkušební pec – experiment 2: (A) pohled na vnitřek pece; (B) rychlostní sonda umístěná ve vnitřku zkušební pece



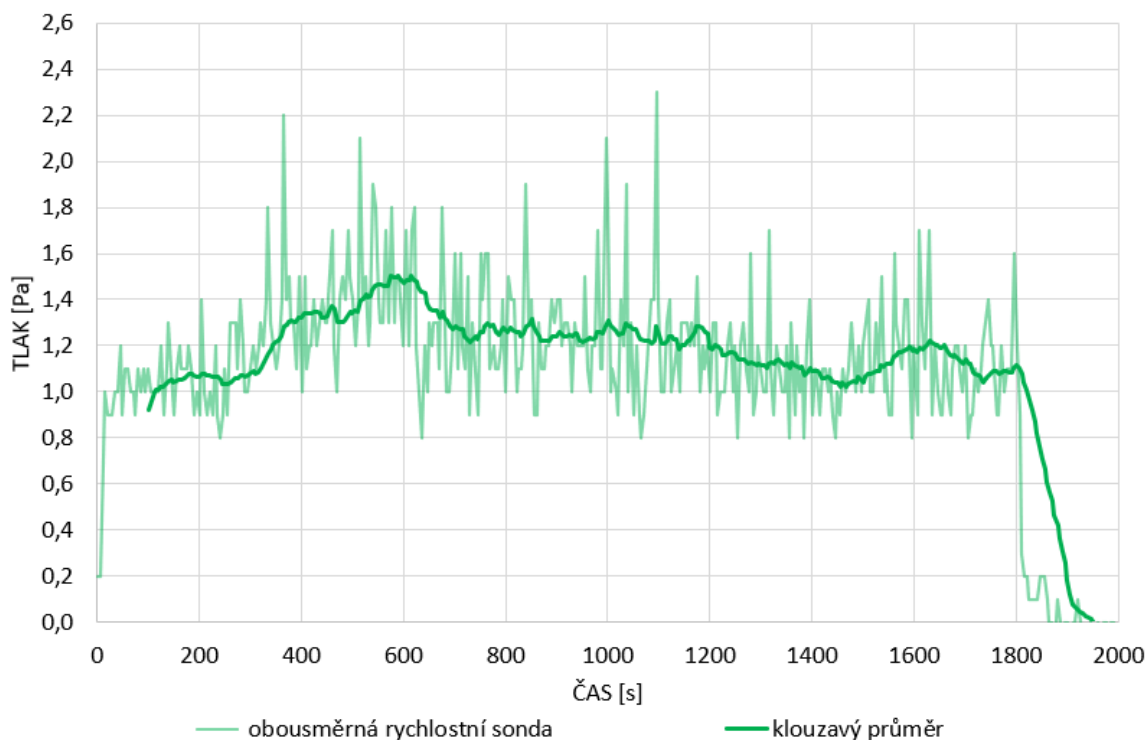
Obr. 55: Umístění obousměrné rychlostní sondy ve zkušební peci – experiment 2: (A) Půdorys; (B) Řez příčný

4.4 Výsledky experimentu 2

Teplota v peci byla velmi podobná jak u experimentu 1 (Obr. 56). Hodnota tlaku v místě měření ve zkušební peci se pohybuje kolem hodnoty cca 1,2 Pa (Obr. 57).



Obr. 56: Průměrná teplota naměřená termočlánky (TC1 až TC8) a srovnání s normovou teplotní křivkou – experiment 2



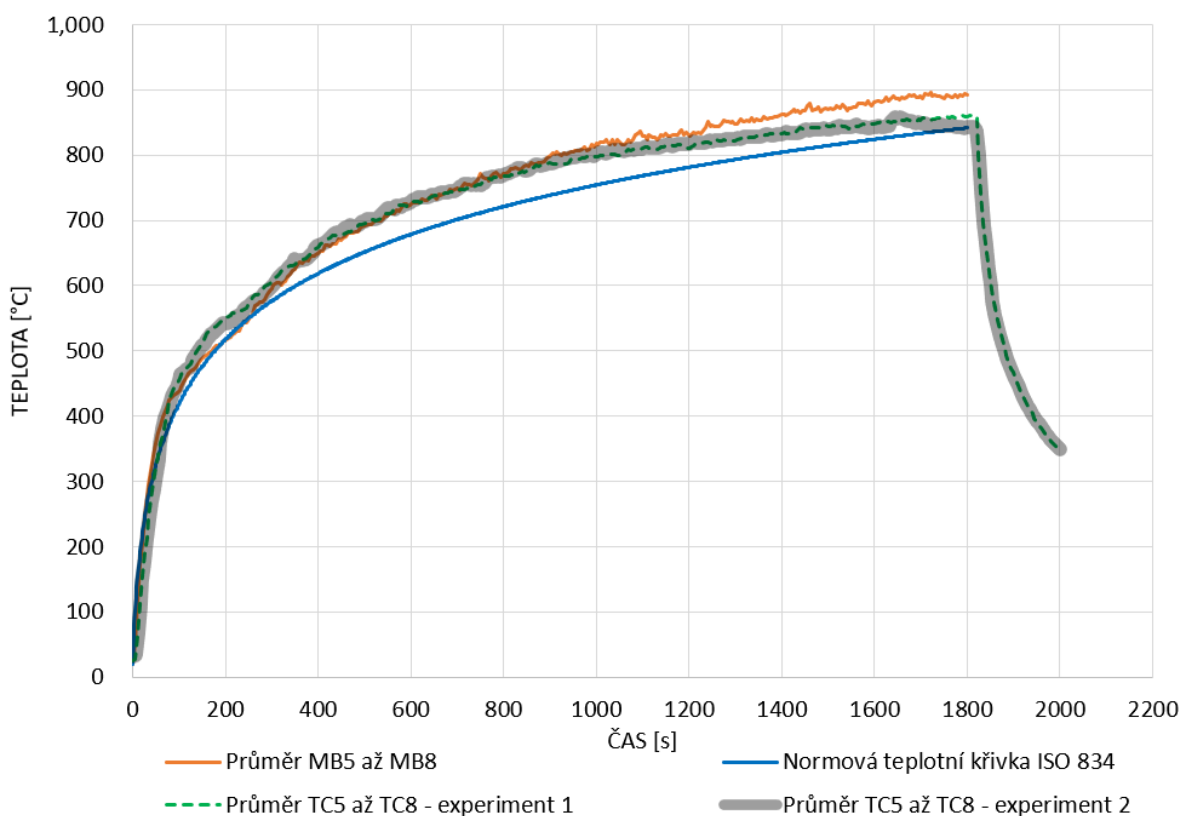
Obr. 57: Tlak ve vnitřku zkušební pece naměřený obousměrnou rychlostní sondou – experiment 2

5 Diskuze získaných výsledků

V této kapitole bude provedeno shrnutí a porovnání výsledků, které jsem získali z CFD modelu pece, experimentů, resp. měření na zkušební peci, a částečně z podkapitoly 2.2.3 (Řešený příklad 1), kde byly provedeny zjednodušené výpočty rychlosti proudění, tlaků, výšky neutrální roviny a hmotnostního průtoku přes ventilační otvory zkušební pece.

5.1 Porovnání CFD modelu a experimentu 1 a 2

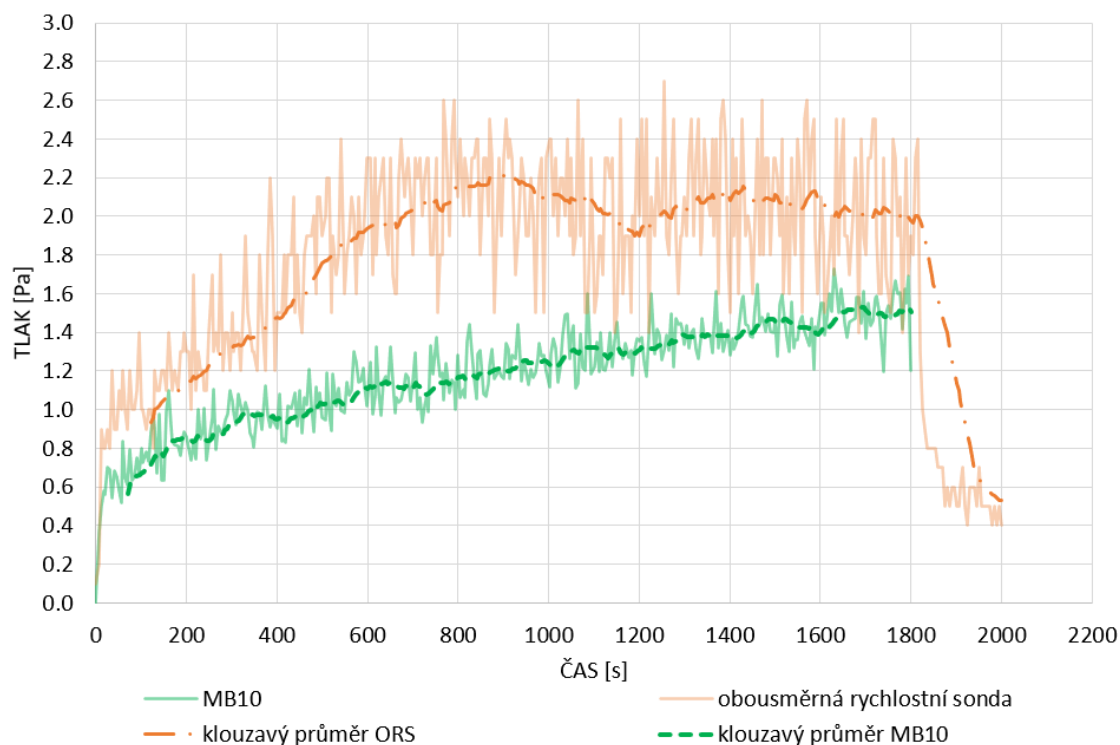
Nejprve provedeme porovnání experimentů ze zkušební pece s CFD modelem pece, Na Obr. 58 je graf, který znázorňuje porovnání teploty ze skutečné pece a modelu pece. Na grafu vidíme velmi dobrou shodu teplot.



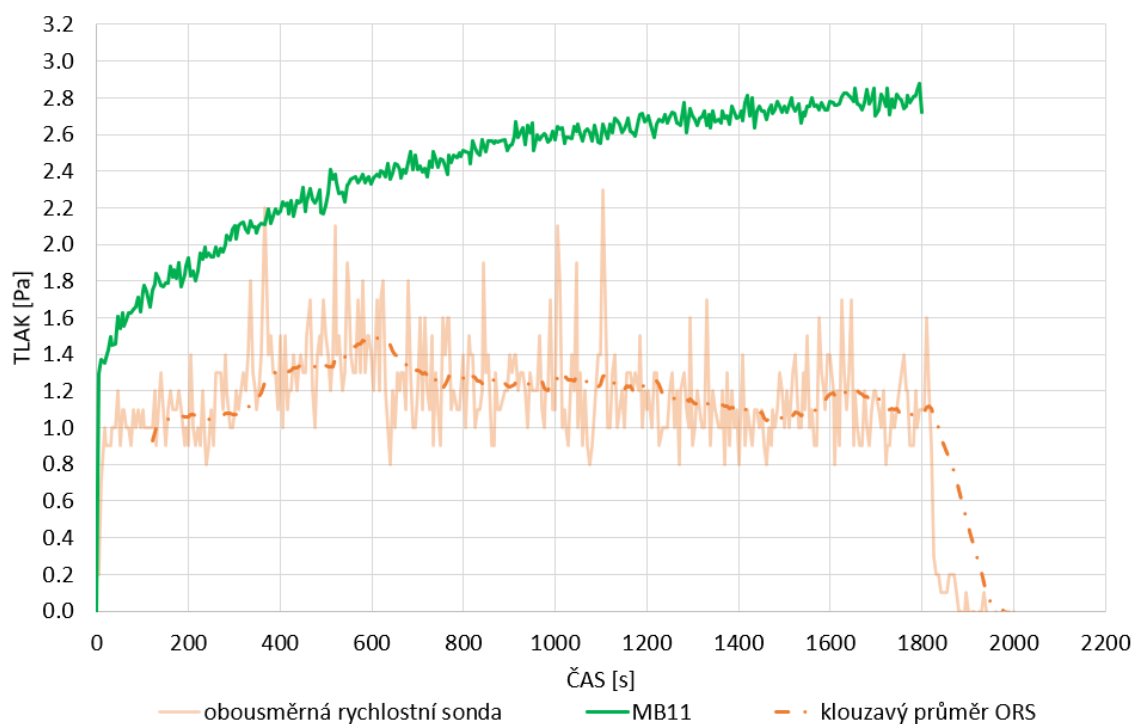
Obr. 58: Porovnání teploty v horní části zkušební pece z prvního a druhého experimentu (TC) s CFD modelem pece (MB)

Na Obr. 59 je graf, který znázorňuje porovnání tlaků z CFD modelu pece a experimentu 1 (ORS je umístěná ve ventilačním otvoru), tlaky, resp. přetlaky se zde o něco liší, rozdíl se pohybuje kolem 1 Pa, podobně tomu je i u porovnání CFD modelu a experimentu 2, rozdíl zde je ještě o něco větší (Obr. 60), zejména v druhé polovině času zkoušky. Rozdíly v naměřeném tlaku mohou být způsobeny více faktory, CFD model pece a skutečná zkušební pec mají určité rozdílnosti, např., zde mohla mít vliv VZT v požární laboratoři, nebo dále netěsnosti zkušební pece oproti modelu pece. Netěsnosti v CFD modelu pece nebylo možné pro naši výpočetní síť

namodelovat, skutečná zkušební pec je tvořena z pospojovaných desek, kde spoje těchto desek mají spáry, v peci se tedy tlak nedrží tolik jako v CFD modelu pece.

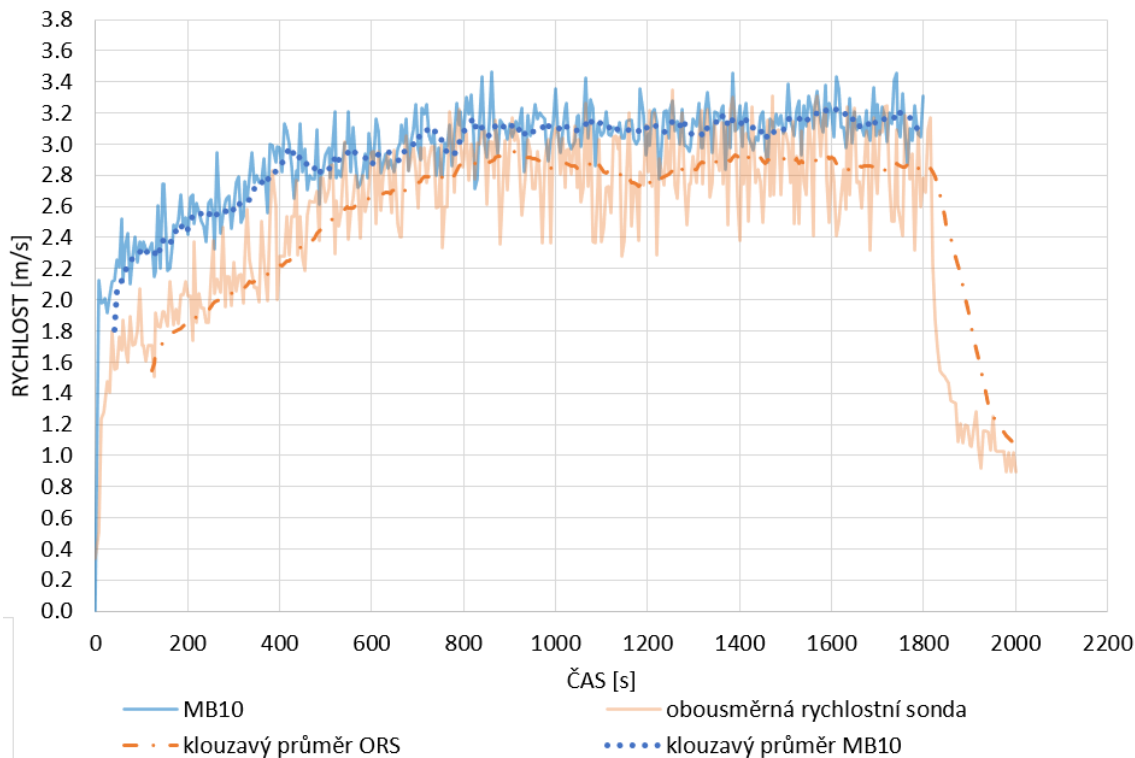


Obr. 59: Porovnání tlaku z prvního experimentu v horní ventilační otvor zkušební pece (ORS) a (MB10) ve stejném místě CFD modelu pece



Obr. 60: Porovnání tlaku z druhého experimentu ve vnitřku zkušební pece (ORS) a (MB11) ve stejném místě CFD modelu pece

Na grafu z Obr. 61 vidíme porovnání rychlostí v horním ventilačním otvoru experimentu 1 a CFD modelu, shoda je zde výrazná, rychlost se pohybuje kolem 2,9 m/s po většinu času experimentu a simulace.



Obr. 61: Porovnání rychlosti proudění z prvního experimentu ve vnitřku zkušební pece (ORS) a (MB10) ve stejném místě CFD modelu pece

5.2 Porovnání CFD modelu a řešeného příkladu 1

V této podkapitole provedeme srovnání některých zajímavých výsledků CFD modelu a analytického řešení z podkapitoly 2.2.3 (Řešený příklad 1).

Nejprve je třeba konstatovat, že porovnání výsledků z této podkapitoly není úplně rovnocenné, neboť FDS simulace, resp. CFD modely pro svoje simulace využívají pokročilejší a složitější rovnice, zatímco výpočty z podkapitoly 2.2.3 (Řešený příklad 1 dále jen ŘP1) jsou pouze přibližné a je zde užito určitého zjednodušení. Hlavní zjednodušení u ŘP1 spočívá v tom, že se v celém prostoru uvažuje jedna konstantní teplota, zatímco v CFD modelu se teplota v peci po výšce mění. Další omezení podkapitoly ŘP1, resp. vyjádřená z Bernoulli rovnice jsou popsány v této podkapitole teoretické části této diplomové práce. V Tab. 9 vidíme porovnání výšky neutrální roviny od podlahy pece. Výšky neutrální roviny zde vycházejí o cca 70 mm výše u CFD modelu pece, resp. simulace oproti výpočtům z ŘP1. Tab. 10 porovnává rychlost proudění v horním ventilačním otvoru zkušební pece a rychlost v téže místě CFD modelu pece, hodnoty vycházejí o něco vyšší u CFD modelu.

Tab. 9: Vzdálenosti neutrální roviny od podlahy pece pro určitou teplotu

$T [^{\circ}\text{C}]$	$h_{n.r.} [m]$ - (CFD simulace)	$h_{n.r.} [m]$ - (ŘP1)
100	-	0,292
200	-	0,260
300	0,350	0,236
400	0,300	0,217
500	0,275	0,201
600	0,260	0,188
700	0,250	0,178

Tab. 10: Rychlosti proudění v horním ventilačním otvoru pece pro určitou teplotu

$T [^{\circ}\text{C}]$	$v_g [m/s]$ - (CFD model)	$v_a [m/s]$ - (CFD model)	$v_g [m/s]$ - (ŘP1)	$v_a [m/s]$ - (ŘP1)
100	1,282	1,008	2,03	0,97
200	2,023	1,253	2,03	0,99
300	2,609	1,335	2,35	1,00
400	3,124	1,359	2,66	0,99
500	3,575	1,357	2,80	1,00
600	3,997	1,342	3,03	1,00
700	4,344	1,324	3,10	0,95

6 Závěr

6.1 Závěrečné shrnutí práce

V kapitole 2 (Současný stav poznání), byla shrnuta rychlost proudění a tlakové poměry z fyzikálního hlediska. Dále bylo shrnuto měření těchto veličin, spolu s měřicími zařízeními pro tato měření, a to se zaměřením na obousměrnou rychlostní sondu. Součástí této teoretické části práce byly i řešené příklady zaměřené na pro tuto diplomovou práci důležité fyzikální veličiny (tlak, rychlost proudění, výška neutrální roviny), které panují ve ventilačních otvorech zkušební pece. Dále byly shrnuty požadavky související s tématem této diplomové práce na velkorozměrové požární zkoušky dle ČSN EN 1363–1, jako je obsah kyslíku, tlak, výška neutrální roviny a teplota.

V další části práce byl upraven CFD model pece pro středněrozměrové zkoušky požární odolnosti. Byly změřeny a popsány jak tlakové poměry včetně výšky neutrální roviny a fáze, resp. průběh požáru na této peci, tak rychlosti proudění plynů ve ventilačních otvorech modelu pece. Výsledky odpovídali požadavkům, které jsou kladeny na takovéto zkušební zařízení z hlediska zkoušení požární odolnosti stavebních výrobků, tedy požadavky na teplotu, tlak, obsah kyslíku a do jisté míry i na výšku neutrální roviny v peci.

Dále byly provedeny experimenty, kde u prvního experimentu (Experimentu 1) byl změřen tlak a teplota a následně byla spočtena rychlost proudění v horním ventilačním otvoru zkušební pece. U druhého experimentu (Experiment 2) byl změřen tlak v určitém místě vnitřku zkušební pece. Hodnoty byly následně porovnány se CFD modelem a FDS simulací pece. Výsledky se sice řádově shodovali, přesto nelze u některých z těchto výsledků říct že je shoda dostatečná.

V diplomové práci bylo dále provedeno i porovnání analytických výpočtů z podkapitoly 2.2.3 (Řešený příklad 1) s CFD modelem, v podobě výšky neutrální roviny a rychlosti proudění v horním ventilačním otvoru pece. Ukázalo se, že analytické výpočty se blíží výsledkům z CFD modelu.

Měření obousměrnou rychlostní sondou u experimentu, a studium prací kde bylo toto měřicí zařízení použito ukázala, že jde o zařízení snadno a dobře použitelné při požárních zkouškách a u požárních experimentů, a relativně přesné při měření tlaku. Je zde ale ovšem celá řada proměnných, které přesnost takového měření mohou narušit, stejně tomu tak je i u využití tohoto měřicího zřízení k měření rychlosti proudění.

6.2 Doporučení pro navazující činnost

6.2.1 Tlakové poměry v uzavřeném prostoru

V teoretické části jsme krátce nastínili tlakové poměry v uzavřeném prostoru. Velké požární zkušební zařízení bývají právě takto uzavřeny na rozdíl od naší středněrozměrové zkušební požární pece. Bylo by zajímavé požární pec uzavřít a do prostoru pece pomocí hořáku vhánět palivo smíchané se vzduchem a dále zkoumat vliv vzniklého silného přetlaku na chování požáru

a stavebního výrobku, který by se do pece umístil. Současná zkušební pec smíchává palivo se vzduchem v samotném prostoru pece. Hořák, který by rovnou smíchával palivo se vzduchem by tedy vyřešil problém s obsahem kyslíku pro proces hoření v peci po uzavření ventilačních otvorů pece. Pro takovýto experiment by bylo nutné tedy ventilační otvory pece utěsnit, neboť tyto otvory neumožňují dosažení takových přetlaků jako tomu je u velkých požárních zkušeben, kde je přetlak standartně. Takovéto úpravy by mohli vést k potřebě uvolňování přetlaku v peci podobně jako tomu je u velkých požárních zkušeben (přetlak je uvolňován nuceným odvětráním).

V této diplomové práci byly zanedbány spáry v peci, resp. spáry ve CFD modelu pece. Tyto spáry se dají v programu FDS nicméně namodelovat. K tomu by byla zapotřebí, ale velmi jemná síť, dále by bylo třeba stěny pece naprogramovat s určitou tloušťkou, neboť spáry se dají v CFD modelu namodelovat pouze přes plochu spojených konstrukcí s určitou tloušťkou. V této diplomové práci byly stěny pece namodelovány s nulovou tloušťkou, vzhledem k jemnosti zvolené sítě. Tedy pro upravenou uzavřenou požární pec by bylo možné adekvátně namodelovat CFD model se spárami, a docílit tak mimořádně věrných podmínek u obou pecí, resp. u zkušební pece a CFD modelu pece.

6.2.2 Přeskok plamene k ventilačním otvorům

Změna hranic výpočetního prostoru vedla k odchýlení výsledků oproti modelu [1], tedy k přeskokům plamene k ventilačním otvorům. Tento jev u požárních experimentů nikdy nenastal. Tento nesoulad mezi modelem a skutečností by stál za další prozkoumání. Dále stejně jako pro uzavřené prostory má na tento efekt velký vliv pokles kyslíku v peci, kvůli kterému k přeskokům došlo, pro tento jev stejně jako pro možné uzavření pece z předchozího návrhu pro navazující činnost se nabízí jak v programu FDS, tak při požárním experimentu, využít zdroj požáru se samostatným zdrojem kyslíku. Zdroj požáru, který nebude závislý na kyslíku ze vnitřku pece.

Seznam obrázků

Obr. 1: Laminární rychlostní profil [2].....	6
Obr. 2: Turbulentní rychlostní profil [2]	6
Obr. 3: Rozdíl hydrostatického tlaku působící kapalinou na povrch [3].....	8
Obr. 4: Popis proudění plynu/vzduchu v uzavřeném prostoru s ventilačními otvory způsobený tlakovým rozdílem [3].....	9
Obr. 5: Bernoulli princip [3]	10
Obr. 6: Aplikace Bernoulliho vzorců pro horní otvor [3].....	11
Obr. 7: Dva typy ventilačních otvorů: (A) otvor; (B) tryska (otvor se zkosením) [3, 4]	13
Obr. 8: Středněrozměrová zkušební pec:(A) Pohled na zkušební pec; (B) Popis proudění plynu/vzduchu ve zkušební peci s ventilačními otvory způsobený tlakovým rozdílem, řez příčný	15
Obr. 9: Tlakové poměry v místnosti s velkým otvorem [3]	18
Obr. 10: Anemometr: (A) lopatkový; (B) digitální.....	20
Obr. 11: Prandtlova trubice v řezu	21
Obr. 12: Snímač tlaku dvou výrobců: (A) SV – snímač tlaku s automatickým nulováním offsetu, výrobce CRESSTO; (B) DPS 300 - Vícerozsahový snímač tlakové diference pro plyny a vzduch, výrobce BD SENSORS	22
Obr. 13: Obousměrná rychlostní sonda: (A) schéma; (B) příklad instalace při požárním experimentu [8].....	23
Obr. 14: Hodnoty získané obousměrnou sondou versus Reynoldsovo číslo [6]	24
Obr. 15: Room corner test: řez [10]	27
Obr. 16: ORS: (A) konstrukce RCT; (B) novější konstrukce pro SBI [12]	29
Obr. 17: Schéma experimentu s rozložením měřících zařízení částicové obrazové stereometrie a obousměrné rychlostní sondy měřících rychlost proudění ve ventilačním otvoru RCT [13]	29
Obr. 18: Porovnání rychlosti proudění mezi obousměrnou rychlostní sondou a částicovou obrazovou stereometrií vzhledem k výkonu hořáku a výšce od podlahy ventilačního otvoru RCT [13]	30
Obr. 19: Limity přetlaku pro zkušební zařízení dle ČSN EN 1363-1	31
Obr. 20: Normová teplotní křivka a její teplotní limity	33
Obr. 21 Rozměry středněrozměrové požární pece a prostor pro umístění zkušebních vzorků: (A) Půdorys; (B) Řez příčný	34
Obr. 22 Umístění termočlánků ve středněrozměrové požární peci: (A) Půdorys; (B) Řez příčný.....	34
Obr. 23 Umístění hořáku ve středněrozměrové požární peci: (A) Půdorys; (B) Řez příčný	35
Obr. 24 Ventilační otvory středněrozměrové požární pece: (A) Půdorys; (B) Řez příčný	35

Obr. 25: Výpočetní oblast upraveného modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview: (A) Pohled s podélnou stranu pece; (B) Pohled s příčnou stranu pece.....	38
Obr. 26: Umístění MB modelu pece:(A) Půdorys; (B) Řez příčný.....	39
Obr. 27: Umístění MB v horním a dolním ventilačním otvoru modelu pece: (A) Půdorys; (B) Řez příčný.....	39
Obr. 28: Umístění ostatních MB modelu pece:(A) Půdorys; (B) Řez příčný.....	40
Obr. 29: Přeskok plamene k ventilačním otvorům modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview: (Pohled s příčnou stranu pece).....	41
Obr. 30: Teploty jednotlivých měřících bodů (MB5 až MB8) z horní poloviny pece a její srovnání s normovou teplotní křivkou – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 50x50x50 mm.....	41
Obr. 31: Teploty naměřené jednotlivými měřícími body (MB; Čerchovaně jsou zobrazeny z horní poloviny, plnou čarou z dolní poloviny) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25mm	43
Obr. 32: Průměrná teplota naměřená měřícími body (MB) a srovnání s normovou teplotní křivkou včetně teplotních limitů normové teplotní křivky – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25 mm.....	43
Obr. 33: Teplota naměřená měřícími body (MB) ve ventilačních otvorech modelu pece (horní otvor MB10, dolní otvor MB9) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25mm	44
Obr. 34: Celková průměrná teplota z měřících bodů (MB1 až MB8) modelu pece a srovnání s normovou teplotní křivkou – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25mm	44
Obr. 35: Isoplocha teplot v příčném řezu přes ventilační otvory v modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview.....	45
Obr. 36: Procentuální množství kyslíku naměřené (MB2 a MB6) v modelu pece – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25 mm	45
Obr. 37: Zobrazení neutrální roviny v modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview pro teplotu: (A) 300 °C v čase 70 s; (B) 400 °C v čase 200 s; (C) 500 °C v čase 334 s; (D) 600 °C v čase 595 s; (E) 700 °C v čase 999 s; (F) 785 °C v čase 1782 s	47
Obr. 38: Pohyb plynů/vzduchu a pohyb kouře v prvních pár vteřinách simulace modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview: (A) Pohled s příčnou stranou pece; (B) Přiblížený horní a dolní ventilační otvor pece	48
Obr. 39: Pohyb plynů/vzduchu a pohyb kouře po většinu času simulace v modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview:(A) Pohled s příčnou stranou pece; (B) Přiblížený horní a dolní ventilační otvor.....	48
Obr. 40: Průměrný tlak v modelu pece naměřený měřícími body (MB1 až MB8) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25mm	49
Obr. 41: Tlak v modelu pece naměřený měřícím bodem (MB11) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25	50

Obr. 42: Průměrné tlaky v modelu pece podle výšky měřících bodů v peci (MB; všechny MB mimo MB9 a MB10) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25 mm (poznámka: Klouzavý průměr tlaku z výškové úrovně $h=0,2$ m byl vynechán z důvodu viditelnosti číselné osy X.....	50
Obr. 43: Tlaky v horním a dolním ventilačním otvoru modelu pece neměřené měřícími body (MB; horní otvor MB10, dolní otvor MB9) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25 mm	51
Obr. 44: Rychlosti v horním a dolním ventilačním otvoru modelu pece naměřené měřícími body (MB; horní otvor MB10, dolní otvor MB9) – FDS simulace, referenční zkouška po úpravě modelu, síť 25x25x25	51
Obr. 45: Isoplocha rychlosti proudění v příčném řezu přes ventilační otvory v modelu pece – zobrazeno v programu Smokeview	52
Obr. 46: Vybavení požární laboratoře: (A) ORS s přidělaným termočlánkem; (B) vnitřek zkušební pece se zapojením termočlánků a plynovým hořákem.....	53
Obr. 47: Vybavení požární laboratoře: (A) ústředna/počítač požární laboratoře; (B) tlakový převaděč zkušební pece; (C) ORS při experimentu 1; (D) ORS při experimentu 2	54
Obr. 48: Zkušební pec – experiment 1: (A) pohled na pec; (B) rychlostní sonda umístěná v horním ventilačním otvoru zkušební pece.....	55
Obr. 49: Umístění obousměrné rychlostní sondy v horním ventilačním otvoru zkušební pece – experiment 1: (A) Půdorys; (B) Řez příčný.....	55
Obr. 50: Průměrná teplota naměřená termočlánky (TC1 až TC8) a srovnání s normovou teplotní křivku – experiment 1.....	56
Obr. 51: Teplota naměřená termočlánky (TC 1 až TC8) v blízkosti obousměrné rychlostní sondy ve zkušební peci – experiment 1	56
Obr. 52: Tlak v horním ventilačním otvoru zkušební pece naměřený obousměrnou rychlostní sondou – experiment 1.....	57
Obr. 53: Rychlost proudění v horním otvoru zkušební pece vypočtená z naměřeného tlaku a teploty ve stejném místě – experiment 1	57
Obr. 54: Zkušební pec – experiment 2: (A) pohled na vnitřek pece; (B) rychlostní sonda umístěná ve vnitřku zkušební pece	58
Obr. 55: Umístění obousměrné rychlostní sondy ve zkušební peci – experiment 2: (A) Půdorys; (B) Řez příčný.....	58
Obr. 56: Průměrná teplota naměřená termočlánky (TC1 až TC8) a srovnání s normovou teplotní křivku – experiment 2.....	59
Obr. 57: Tlak ve vnitřku zkušební pece naměřený obousměrnou rychlostní sondou – experiment 2	59
Obr. 58: Porovnání teploty v horní části zkušební pece z prvního a druhého experimentu (TC) s CFD modelem pece (MB)	60
Obr. 59: Porovnání tlaku z prvního experimentu v horní ventilační otvor zkušební pece (ORS) a (MB10) ve stejném místě CFD modelu pece.....	61

Obr. 60: Porovnání tlaku z druhého experimentu ve vnitřku zkušební pece (ORS) a (MB11) ve stejném místě CFD modelu pece	61
Obr. 61: Porovnání rychlosti proudění z prvního experimentu ve vnitřku zkušební pece (ORS) a (MB10) ve stejném místě CFD modelu pece.....	62

Seznam tabulek

Tab. 1: Tabulka závislosti hustoty vzduchu na teplotě	12
Tab. 2: Tabulka vzdáleností neutrální roviny od podlahy pece pro určitou teplotu v peci	17
Tab. 3: Tabulka tlaku v horním a spodním ventilačním otvoru pece pro určitou teplotu v peci..	17
Tab. 4: Tabulka rychlosti proudění plynů v horním a dolním ventilačním otvoru pece pro určitou teplotu v peci.....	17
Tab. 5: Tabulka hmotnostního toku v horním a dolním ventilačním otvoru pece pro určitou teplotu v peci	17
Tab. 6: Tepelně technické vlastnosti	36
Tab. 7: Upravený tepelný výkon hořáku	42
Tab. 8: Vzdálenosti neutrální roviny od podlahy pece pro určitou teplotu	47
Tab. 9: Vzdálenosti neutrální roviny od podlahy pece pro určitou teplotu	63
Tab. 10: Rychlosti proudění v horním ventilačním otvoru pece pro určitou teplotu.....	63

Literatura

- [1] CHLÁDEK, Jiří. *Malorozměrové zkoušky požární odolnosti*. Praha, 2019. Diplomová práce k získání akademického titulu Ing. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Konstrukce pozemních staveb.
- [2] ŠIMÁK, Jakub. *Měření průtoku vzduchu pomocí víceotvorových rychlostních sond*. Brno, 2011. Diplomová práce k získání akademického titulu Ing. Brno UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky.
- [3] KARLSSON, Björn a James G. QUINTIERE. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000. Environmental and energy engineering series. ISBN 978-0-8493-1300-4.
- [4] Emmons, H.W., “*Vent Flows*,” *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed.*, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995.
- [5] Zukoski, E.E., “*Development of a Stratified Ceiling Layer in the Early Stages of a Closed Room Fire*,” *Fire and Materials*, Vol. 2, No. 2, 1978.
- [6] POKORNÝ, Marek. *Instalační šachty z požárního hlediska*. Praha, 2012. Disertační práce k získání akademického titulu Ph.D. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Konstrukce pozemních staveb.
- [7] MCCAFFREY, BJ. a G. HESKESTAD. *A Robust Bidirectional Flow-Velocity Probe for Flame and Fire Application*. 1976.
- [8] SPOUROVÁ, Lucie. *Měření teploty a rychlosti proudění plynu v podmínkách zkoušky room corner test*. Praha, 2019. Diplomová práce k získání akademického titulu Ing. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Konstrukce pozemních staveb.
- [9] KIM, Sung Chan a Jung Yong KIM. *The Effect of Flow Approaching Angle on the Velocity Measurement Using Bi-directional Velocity Probe*. *Procedia Engineering* [online]. 2013, 62, 797–803. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2013.08.128
- [10] ISO 9705-1:2016 *Reaction to fire tests. Room corner test for wall and ceiling lining products. Test method for a small room configuration*
- [11] SETTE, Bart J. G. *Development of a velocity pressure probe*. *Fire and Materials* [online]. 2006, 30(6), 397–414. ISSN 03080501, 10991018. Dostupné z: doi:10.1002/fam.919
- [12] SETTE, Bart J. G. *Critical considerations on the use of a bi-directional probe in heat release measurements*. *Fire and Materials* [online]. 2005, 29(5), 335–349. ISSN 0308-0501, 1099-1018. Dostupné z: doi:10.1002/fam.886
- [13] BRYANT, Rodney A. *A comparison of gas velocity measurements in a full-scale enclosure fire*. *Fire Safety Journal* [online]. 2009, 44(5), 793–800. ISSN 03797112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2009.03.010
- [14] Zákon č. 183/2006 Sb. *Zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon)*
- [15] ČSN EN 1363-1:2020 *Zkoušky požární odolnosti – Část 1: Obecné požadavky*

-
- [16] ZEMAN, Filip. *Virtuální pec pro zkoušení požární odolnosti konstrukcí*. Praha, 2018. Diplomová práce k získání akademického titulu Ing. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Konstrukce pozemních staveb.
- [17] MCGRATTAN, Kevin B a Glenn P FORNEY. *Fire dynamics simulator (version 4): user's guide* [online]. 0 vyd. NIST SP 1019. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 2004 [vid. 2020-12-06]. Dostupné z: doi:10.6028/NIST.SP.1019
- [18] ZHIYIN, Yang. *Large-eddy simulation: Past, present and the future*. *Chinese Journal of Aeronautics* [online]. 2015, 28(1), 11–24. ISSN 10009361. Dostupné z: doi:10.1016/j.cja.2014.12.007

Příloha 1 – Zdrojový kód pro CFD model – referenční zkouška

Zdrojový kód CFD modelu pro referenční zkoušku

*** Obecné informace o modelu ***

&HEAD

CHID='FDS refmodel',

TITLE='simulace referenční zkoušky/'

*** Čas simulace a výpočetní oblast ***

&TIME T_END=1800.0/ čas simulace

&DUMP DT_RESTART=30.0/ ukládání simulace po 30 sekundách

pro restartování výpočtu nutno přidat příkaz pro MISC RESTART=.TRUE.

&MESH

ID='sít'

IJK=48,48,44,

XB=0.0,1.2,-0.2,1.0,-0.1,1.0/ vnitřní výpočetní síť,

velikost jedné buňky 25x25x25 mm

*** Počáteční okrajové podmínky ***

&MISC

SURF_DEFAULT='STENA'

TMPA=20.0/ defaultní povrch a okolní teplota

*** Povrch a materiál požárně odolné desky Farmacell Powerpanel ***

&SURF

ID='STENA'

MATL_ID='FARMACELL'

COLOR='GRAY'

TRANSPARENCY = 0.5

THICKNESS=0.0125/ SURF=surface, tloušťka 12,5 mm (0,0125 m)

&SURF

ID='PODLAHA'

MATL_ID='BETON'

COLOR='BRICK'

TRANSPARENCY = 0.5

THICKNESS=0.2/ SURF=surface,

tloušťka 200 mm (0,2 m)

&MATL

ID='FARMACELL'

DENSITY=1000.0,

SPECIFIC_HEAT=1.0

CONDUCTIVITY=0.17/ MATL=materiál, hustota (kg/m3),

```
specifické teplo (J/(kg.K)), souč. tepelné vodivosti "lambda" (W/(m.K))
&MATL
ID='BETON',
DENSITY=2300.0
SPECIFIC_HEAT=1.02,
CONDUCTIVITY=1.3,/
*** Otvory (OPEN = otevřená plocha) ***
&VENT SURF_ID='OPEN',
XB=0.0,1.2,1.0,1.0,-0.2,1.0/
&VENT SURF_ID='OPEN',
XB=0.0,1.2,-0.2,-0.2,-0.2,1.0/
&VENT SURF_ID='OPEN',
XB=0.0, 0.0,-0.2,1.0,-0.2,1.0/
&VENT SURF_ID='OPEN',
XB=1.2,1.2,-0.2,1.0,-0.2,1.0/
&VENT SURF_ID='OPEN',
XB=0.0,1.2,-0.2,1.0,-0.2,-0.2/
&VENT SURF_ID='OPEN',
XB=0.0,1.2,-0.2,1.0,1.0,1.0/
*** konstrukce pece ***
&OBST
XB=0.0,0.0,0.0,0.8,0.0,0.8,
SURF_ID='STENA'/ stěna levá
&OBST
XB=1.2,1.2,0.0,0.8,0.0,0.8,
SURF_ID='STENA'/ stěna pravá
&OBST
XB=0.0,1.2,0.0,0.8,0.0,0.0,
SURF_ID='STENA'/ podlaha pece
&OBST
XB=0.0,1.2,0.0,0.8,0.8,0.8,
SURF_ID='STENA'/ strop pece
&OBST
XB=0.0,0.4,0.0,0.0,0.0,0.8,
SURF_ID='STENA'/ stěna přední 1, přední a zadní stěna pece je složena
ze čtyř částí, tak aby vzniklá prázdná místa vytvořila ventilační otvory pece
&OBST
XB=0.8,1.2,0.0,0.0,0.0,0.8,
SURF_ID='STENA'/ stěna přední 2
&OBST
XB=0.4,0.8,0.0,0.0,0.1,0.55,
```

```

SURF_ID='STENA'/ stěna přední 3
&OBST
XB=0.4,0.8,0.0,0.0,0.65,0.8,
SURF_ID='STENA'/ stěna přední 4
&OBST
XB=0.0,0.4,0.8,0.8,0.0,0.8,
SURF_ID='STENA'/ stěna zadní 1
&OBST
XB=0.8,1.2,0.8,0.8,0.0,0.8,
SURF_ID='STENA'/ stěna zadní 2
&OBST
XB=0.4,0.8,0.8,0.8,0.1,0.55,
SURF_ID='STENA'/ stěna zadní 3
&OBST
XB=0.4,0.8,0.8,0.8,0.65,0.8,
SURF_ID='STENA'/ stěna zadní 4
&OBST
XB=0.0,1.2,-0.2,1.0,-0.1,-0.1,
SURF_ID='PODLAHA'/ podlaha místnosti
*** Hořák (OBST=obstruction) ***
&REAC
ID='PROPANE'
FUEL='PROPANE'
SOOT_YIELD=0.024/
&SURF
ID='HORAK'
HRRPUA=6666.666667
RAMP_Q='fireramp'/ maximální výkon hořáku = 200 kW,
HRRPUA=200/(0,3,0,1)=6666.666667 kW/m2
&VENT
XB=0.45,0.75,0.35,0.45,0.1,0.1
SURF_ID='HORAK'
COLOR='RED'/ hořící plocha hořáku
&OBST
XB=0.45,0.75,0.35,0.45,0.0,0.1
SURF_ID='INERT'
COLOR='BLACK'/ těleso hořáku
&RAMP ID = 'fireramp', T = 3.0, F = 0.3 / časově proměnlivý výkon,
T = čas (s), F = % podíl v příslušném čase
&RAMP ID = 'fireramp', T = 5.0, F = 0.3 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 10.0, F = 0.3 /

```

&RAMP ID = 'fireramp', T = 15.0, F = 0.305 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 20.0, F = 0.310 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 25.0, F = 0.315 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 30.0, F = 0.320 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 35.0, F = 0.330 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 40.0, F = 0.350 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 45.0, F = 0.360 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 50.0, F = 0.370 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 55.0, F = 0.380 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 60.0, F = 0.390 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 90.0, F = 0.400 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 120.0, F = 0.43 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 150.0, F = 0.44 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 180.0, F = 0.45 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 210.0, F = 0.46 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 240.0, F = 0.48 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 270.0, F = 0.50 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 300.0, F = 0.52 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 330.0, F = 0.53 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 360.0, F = 0.55 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 390.0, F = 0.56 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 420.0, F = 0.56 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 450.0, F = 0.565 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 480.0, F = 0.570 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 510.0, F = 0.575 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 540.0, F = 0.580 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 570.0, F = 0.585 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 600.0, F = 0.587 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 630.0, F = 0.590 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 660.0, F = 0.595 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 690.0, F = 0.598 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 720.0, F = 0.600 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 750.0, F = 0.605 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 780.0, F = 0.610 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 810.0, F = 0.615 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 840.0, F = 0.620 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 870.0, F = 0.625 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 900.0, F = 0.630 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 930.0, F = 0.633 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 960.0, F = 0.635 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 990.0, F = 0.638 /


```
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1020.0, F = 0.64 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1050.0, F = 0.642 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1080.0, F = 0.643 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1110.0, F = 0.644 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1140.0, F = 0.6442 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1170.0, F = 0.6445 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1200.0, F = 0.645 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1230.0, F = 0.65 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1260.0, F = 0.662 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1290.0, F = 0.665 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1320.0, F = 0.6655 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1350.0, F = 0.667/
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1380.0, F = 0.67 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1410.0, F = 0.68 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1440.0, F = 0.685 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1470.0, F = 0.686/
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1500.0, F = 0.687 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1530.0, F = 0.688 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1560.0, F = 0.689 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1590.0, F = 0.690/
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1620.0, F = 0.701 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1650.0, F = 0.702 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1680.0, F = 0.703 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1710.0, F = 0.704 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1740.0, F = 0.705 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1770.0, F = 0.706 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1800.0, F = 0.707 /
*** Termočlánky (°C) ***
&DEVC
XYZ = 0.3,0.2,0.7
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC 1'
PROP_ID='TC_1 props'/ Nad hořákem – horní TC
&DEVC
XYZ = 0.3,0.6,0.7
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_2'
PROP_ID='TC_2 props'/ Nad hořákem – horní TC
&DEVC
XYZ = 0.9, 0.2,0.7
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
```

```
ID = 'TC_3'
PROP_ID='TC_3 props'/ Nad hořákem – horní TC
&DEVC
XYZ = 0.9,0.6,0.7
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_4'
PROP_ID='TC_4 props'/ Nad hořákem – horní TC
&DEVC
XYZ = 0.3,0.2,0.25
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_5'
PROP_ID='TC_5 props'/ Nad hořákem – dolní TC
&DEVC
XYZ = 0.3,0.6,0.25
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_6'
PROP_ID='TC_6 props'/ Nad hořákem – dolní TC
&DEVC
XYZ = 0.9, 0.2, 0.25
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_7'
PROP_ID='TC_7 props'/ Nad hořákem – dolní TC
&DEVC
XYZ = 0.9,0.6,0.25
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_8'
PROP_ID='TC_8 props'/ Nad hořákem – dolní TC
&PROP ID='TC_1 props', BEAD_DIAMETER=0.003/ průměr termočlánku 3,0 mm
&PROP ID='TC_2 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_3 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_4 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_5 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_6 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_7 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_8 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
*** měření tlaku ***
&DEVC ID = 'PRE X1', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.2,0.1/
&DEVC ID = 'PRE X2', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.6,0.1/
&DEVC ID = 'PRE X3', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.2,0.1/
&DEVC ID = 'PRE X4', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.6,0.1/
&DEVC ID = 'PRE X5', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.2,0.2/
```

&DEVC ID = 'PRE X6', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.6,0.2/
&DEVC ID = 'PRE X7', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.2,0.2/
&DEVC ID = 'PRE X8', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.6,0.2/
&DEVC ID = 'PRE X9', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.2,0.3/
&DEVC ID = 'PRE X10', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.6,0.3/
&DEVC ID = 'PRE X11', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.2,0.3/
&DEVC ID = 'PRE X12', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.6,0.3/
&DEVC ID = 'PRE X13', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.2,0.4/
&DEVC ID = 'PRE X14', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.6,0.4/
&DEVC ID = 'PRE X15', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.2,0.4/
&DEVC ID = 'PRE X16', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.6,0.4/
&DEVC ID = 'PRE X17', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.2,0.5/
&DEVC ID = 'PRE X18', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.6,0.5/
&DEVC ID = 'PRE X19', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.2,0.5/
&DEVC ID = 'PRE X20', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.6,0.5/
&DEVC ID = 'PRE X21', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.2,0.6/
&DEVC ID = 'PRE X22', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.6,0.6/
&DEVC ID = 'PRE X23', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.2,0.6/
&DEVC ID = 'PRE X24', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.6,0.6/
&DEVC ID = 'PRE X25', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.2,0.7/
&DEVC ID = 'PRE X26', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.3,0.6,0.7/
&DEVC ID = 'PRE X27', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.2,0.7/
&DEVC ID = 'PRE X28', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.9,0.6,0.7/
&DEVC ID = 'PRE X29', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.2,0.4,0.4/
&DEVC ID = 'PRE X30', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 1.0,0.4,0.4/
&DEVC ID = 'PRE X31', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6,0.2,0.4/
&DEVC ID = 'PRE X32', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6,0.6,0.4/
&DEVC ID = 'PRE X33', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6,0.4,0.4/
&DEVC ID = 'PRE X34', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.2,0.4,0.6/
&DEVC ID = 'PRE X35', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 1.0,0.4,0.6/
&DEVC ID = 'PRE X36', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6,0.2,0.6/
&DEVC ID = 'PRE X37', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6,0.6,0.6/
&DEVC ID = 'PRE X38', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6,0.4,0.6/
&DEVC ID = 'PRE X39', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.2,0.4,0.2/
&DEVC ID = 'PRE X40', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 1.0,0.4,0.2/
&DEVC ID = 'PRE X41', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6,0.2,0.2/
&DEVC ID = 'PRE X42', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6,0.6,0.2/
&DEVC ID = 'PRE X43', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6,0.4,0.2/
*** měření rychlosti proudění ***
&DEVC ID = 'VEL X1', QUANTITY = 'VELOCITY', XYZ = 0.3,0.2,0.7/
&DEVC ID = 'VEL X2', QUANTITY = 'VELOCITY', XYZ = 0.3,0.6,0.7/

```
&DEVC ID = 'VEL X3', QUANTITY = 'VELOCITY', XYZ = 0.9,0.2,0.7/
&DEVC ID = 'VEL X4', QUANTITY = 'VELOCITY', XYZ = 0.9,0.6,0.7/
&DEVC ID = 'VEL X5', QUANTITY = 'VELOCITY', XYZ = 0.3,0.2,0.3/
&DEVC ID = 'VEL X6', QUANTITY = 'VELOCITY', XYZ = 0.3,0.6,0.3/
&DEVC ID = 'VEL X7', QUANTITY = 'VELOCITY', XYZ = 0.9,0.2, 0.3/
&DEVC ID = 'VEL X8', QUANTITY = 'VELOCITY', XYZ = 0.9,0.6,0.3/
*** měření kyslíku ***
&DEVC ID='ox1', XYZ=0.3,0.2,0.7, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='OXYGEN'/
&DEVC ID='ox1', XYZ=0.3,0.2,0.3, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='OXYGEN'/
*** měření ve ventilačních otvorech) ***
&DEVC ID = 'PRE OT - D', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6, 0.0, 0.05/ v otvorech dolních
&DEVC ID = 'PRE OT - D', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6, 0.8, 0.05/ v otvorech dolních
&DEVC ID = 'VEL OT - D', QUANTITY = 'VELOCITY', XYZ = 0.6, 0.0, 0.05/ v otvorech dolních
&DEVC ID = 'VEL OT - D', QUANTITY = 'VELOCITY', XYZ = 0.6, 0.8, 0.05/ v otvorech dolních
&DEVC ID = 'TEP OT - D', QUANTITY = 'TEMPERATURE', XYZ = 0.6, 0.0, 0.05/ v otvorech dolních
&DEVC ID = 'TEP OT - D', QUANTITY = 'TEMPERATURE', XYZ = 0.6, 0.8, 0.05/ v otvorech dolních
&DEVC ID = 'VEL OT - H', QUANTITY = 'VELOCITY', XYZ = 0.6, 0.0, 0.6/ v otvorech horních
&DEVC ID = 'VEL OT - H', QUANTITY = 'VELOCITY', XYZ = 0.6, 0.8, 0.6/ v otvorech horních
&DEVC ID = 'PRE OT - H', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6, 0.0, 0.6/ v otvorech horních
&DEVC ID = 'PRE OT - H', QUANTITY = 'PRESSURE', XYZ = 0.6, 0.8, 0.6/ v otvorech horních
&DEVC ID = 'TEP OT - H', QUANTITY = 'TEMPERATURE', XYZ = 0.6, 0.0, 0.6/ v otvorech horních
&DEVC ID = 'TEP OT - H', QUANTITY = 'TEMPERATURE', XYZ = 0.6, 0.8, 0.6/ v otvorech horních
*** Barevné iso-plochy (SLICEFile) teplota, tlak, rychlost proudění***
&SLCF PBX = 0.1, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.2, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.3, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.4, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.5, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.6, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.7, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.8, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.9, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 1.0, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 1.1, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.1, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.2, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.3, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.4, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.5, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.6, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.7, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
```

```
&SLCF PBX = 0.8, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.9, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 1.0, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 1.1, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.1, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.2, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.3, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.4, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.5, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.6, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.7, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.8, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.9, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 1.0, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 1.1, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.1, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.2, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.3, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.4, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.5, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.6, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.7, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.1, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.2, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.3, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.4, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.5, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.6, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.7, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.1, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.2, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.3, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.4, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.5, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.6, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.7, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.1, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.2, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.3, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.4, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.5, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
```

```
&SLCF PBZ = 0.6, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.7, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.1, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.2, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.3, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.4, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.5, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.6, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.7, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.1, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.2, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.3, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.4, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.5, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.6, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.7, QUANTITY = 'PRESSURE', VECTOR = .TRUE./
*** Hodnoty na hranici výpočetní oblasti ***
&BNDF QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX'/ BNDF = boundary file – dopadající tepelný tok
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/ teplota povrchů
&BNDF QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE'/
*** Konec simulace ***
&TAIL/ konec simulace
```