

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270013

Stavba energetických strojů a zařízení

Studijní obor: N0715A270013S01

Stavba energetických strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Modelování úloh s prouděním a sdílením tepla určených pro testování
elektronických čidel

Autor:

Bc. Jakub Kazda

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Richard Matas, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

Ing. Jan Sedláček, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub KAZDA**
Osobní číslo: **S19N0150P**
Studijní program: **N0715A270013 Stavba energetických strojů a zařízení**
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**
Téma práce: **Modelování úloh s prouděním a sdílením tepla určených pro testování elektronických čidel**
Zadávající katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Zásady pro vypracování

1. Rešerše problematiky elektronických pohybových a kouřových čidel a jejich testování s ohledem na jejich obtékání.
2. Výběr vhodných modelových čidel a jejich geometrií.
3. Návrh a popis zjednodušení modelů pro simulace a okrajových podmínek.
4. Příprava CFD modelů vybraných čidel.
5. CFD simulace modelů čidel pro různé podmínky.
6. Analýza získaných výsledků.
7. Doporučení pro CFD modelování úloh s prouděním a sdílením tepla určených pro testování elektronických čidel.
8. Ideový návrh experimentu pro testování vybraného typu čidla.

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **geometrie modelů, grafické výstupy a grafy z CFD simulací**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Davidson, L. Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling, Chalmers University of Technology, 2020
- Firemní podklady JABLOTRON ALARMS a.s.
- Manuály a firemní literatura ANSYS, Inc.
- Kruell, W.; Schultze, T.; Tobera, R.; Willms, I. Analysis of Dust Properties to Solve the Complex Problem of Non-fire Sensitivity Testing of Optical Smoke Detectors, Procedia Engineering, Vol. 62, 2013, Pgs. 859-867
- EN 54-X, Fire detection and fire alarm systems
- ČSN EN 50131-X

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Richard Matas, Ph.D.**
Nové technologie – výzkumné centrum

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Sedláček, Ph.D.**
Nové technologie – výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Dr. Ing. Jaroslav Synáč
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Richardu Matasovi, Ph.D. a mému konzultantovi Ing. Janu Sedláčkovi, Ph.D. za cenné, užitečné a odborné rady, bez kterých by tato práce nevznikla. V neposlední řadě děkuji mé rodině, za všestrannou podporu při celém studiu.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kazda	Jméno Jakub	
STUDIJNÍ OBOR	N0715A270013S01 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Matas, Ph.D.	Jméno Richard	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Modelování úloh s prouděním a sdílením tepla určených pro testování elektronických čidel		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	104	TEXTOVÁ ČÁST	74	GRAFICKÁ ČÁST	30
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS	<p>Cílem této diplomové práce je popsat modelování úloh s prouděním a sdílením tepla určených pro testování elektronických čidel.</p> <p>Teoretická část se zabývá rešerší problematiky elektronických pohybových a kouřových čidel a jejich testováním.</p> <p>Praktická část této práce byla věnována numerickému modelování úloh pro kouřové a pohybové detektory. V této práci je zahrnuta tvorba geometrie, diskretizace, nastavení řešiče a následný výpočet. Pro simulaci a vyhodnocení výsledků byl využit software ANSYS 2020 R2.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	PIR detektor, Kouřový detektor, čidlo, alarm, CFD, ANSYS, Fluent, numerická simulace, metodika

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Kazda	Name Jakub	
FIELD OF STUDY	N0715A270013S01 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Matas, Ph.D.	Name Richard	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Modelling of fluid flow and heat transfer tasks for testing electronic detectors		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Design of Power Machines and Equipment	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	--	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	104	TEXT PART	74	GRAPHICAL PART	30
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	<p>The aim of this diploma thesis is to describe the modelling of fluid flow and heat transfer tasks for testing electronic detectors.</p> <p>The theoretical part deals with the research of electronic motion and smoke detectors and their testing.</p> <p>The practical part of this work was devoted to numerical simulations of smoke and PIR motion detectors. In this work is included design of geometry, discretization, solver setting and numerical calculation. The software ANSYS 2020 R2 was used for the whole simulation and results evaluation.</p>
KEY WORDS	PIR detector, Smoke detector, sensor, alarm, CFD, ANSYS, Fluent, numerical simulation, methodology

Seznam použitých veličin a symbolů

Veličina	Jednotka	Název
C_2	[1/m]	Inertní resistance
c_p	[J/(kg·K)]	Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
Δn	[m]	Tloušťka porézní složky
h	[J/kg]	Měrná entalpie
k	[m ² /s ²]	Turbulentní kinetická energie
K_{perm}	[m ²]	Permeabilita
T	[K], [°C]	Termodynamická teplota
λ	[W/(m·K)]	Koeficient tepelné vodivosti
m	[dB/m]	Absorpční koeficient pro optické detektory kouře
p	[Pa]	Tlak
q	[J/s·m ³]	Tepelný tok jednotkovou krychlí
R	[m/s ²]	Setrvačné zrychlení
ρ	[kg/m ³]	Hustota
t	[s]	Čas
τ	[Pa]	Vazké napětí
w	[m/s]	Rychlost
y	[-]	Bezrozměrný parametr pro ionizační detektory kouře
α	[W/(m ² ·K)]	Koeficient přestupu tepla
ε	[m ² /s ³]	Rychlost disipace kinetické energie
μ	[kg/(m·s)]	Dynamická viskozita
ν	[m ² /s]	Kinematická viskozita
ω	[1/s]	Specifická rychlost disipace

Další označení a zkratky

<i>AIR</i>	Aktivní infračervené čidlo
<i>BOI</i>	Těleso vlivu (z angl. <i>Body of influence</i>)
<i>CFD</i>	Výpočtová dynamika tekutin (z angl. <i>Computational Fluid Dynamics</i>)
D_{ek}	Ekvivalentní průměr
D_H	Hydraulický průměr
<i>DNS</i>	Přímá numerická simulace (z angl. <i>Direct Numerical Simulation</i>)
<i>EZS</i>	Elektronická zabezpečovací signalizace
<i>FET</i>	Tranzistor řízený elektrickým polem (z angl. <i>Field-Effect Transistor</i>)
<i>IR</i>	Infračervené záření

<i>LED</i>	Elektroluminiscenční dioda (z angl. <i>Light-Emitting Diode</i>)
<i>LES</i>	Metoda velkých vírů (z angl. <i>Large Eddy Simulation</i>)
<i>MIC</i>	Měřicí ionizační komora (z angl. <i>Measuring Ionization Chamber</i>)
<i>NS</i>	Navier-Stokesova rovnice
<i>PID</i>	Pasivní infračervený detektor
<i>PIR</i>	Pasivní infračervené čidlo
<i>PZTS</i>	Poplachový zabezpečovací a tísňový systém
<i>RANS</i>	Časové středované Navier-Stokesových rovnice (z angl. <i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>)
<i>Re</i>	Reynoldsovo číslo
<i>RTG</i>	Rentgenové záření
<i>UV</i>	Ultrafialové záření
<i>URANS</i>	Unsteady RANS
<i>VKV</i>	Velmi krátké vlny

Obsah

1. Úvod	13
1.1. Společnost Jablotron	13
2. Elektronická čidla	14
3. Pohybová čidla	15
3.1. Antimasking	15
3.2. PIR detektor	16
3.2.1. Pyroelement	17
3.2.2. Optika	17
3.2.2.1. Zrcadlová optika	18
3.2.2.2. Fresnelova čočka	18
3.3. Testování PIR čidel	19
3.3.1. Odolnost proti proudění vzduchu	20
3.3.2. Odolnost proti světlu blízkému infračervenému záření a viditelnému světlu	20
3.3.3. Detekční pokrytí na hranici detekovatelného prostoru	21
3.3.4. Detekční pokrytí v detekovatelném prostoru	21
3.3.5. Významné snížení rozsahu pokrytí	21
3.3.6. Detekční pokrytí při velké rychlosti	22
3.3.7. Detekční pokrytí při přerušovaném pohybu	22
3.3.8. Detekční pokrytí v těsné blízkosti	22
4. Kouřová čidla	23
4.1. Optický detektor	24
4.1.1. Princip absorpce světla	24
4.1.2. Princip rozptylu světla	25
4.2. Ionizační detektor	25
4.3. Testování kouřových čidel	26
4.3.1. Měření prahové hodnoty reakce	28
4.3.2. Zkušební aerosol pro měření prahové hodnoty reakce	28
4.3.3. Zkouška opakovatelnosti	28
4.3.4. Zkouška směrové závislosti	28
4.3.5. Zkouška reprodukovatelnosti	29
4.3.6. Zkouška proudícím vzduchem	29
5. Numerické simulace proudění	30
5.1. Metody v oblasti výpočetní dynamiky tekutin	30
5.1.1. Metoda konečných objemů	30
5.2. Modelování turbulence	31

5.2.1.	Přímá numerická metoda	31
5.2.2.	Metoda velkých vírů	31
5.2.3.	Metoda časového ustředění pohybových rovnic	31
6.	Provedení simulací	32
7.	Numerická simulace kouřového detektoru	33
7.1.	Výběr vhodné geometrie	33
7.2.	Návrh a popis zjednodušení modelů čidel	34
7.3.	Nastavení výpočtu	35
7.3.1.	Nastavení okrajových podmínek	36
7.3.2.	Porézní médium	37
7.4.	Příprava CFD modelů kouřových čidel	40
7.4.1.	Porovnání modelů turbulence	41
7.4.1.1.	Model $k-\omega$ SST	42
7.4.1.2.	Model $k-\varepsilon$ „Standard“	42
7.4.1.3.	Model $k-\varepsilon$ RNG	43
7.4.1.4.	Model $k-\varepsilon$ „Realizable“	43
7.4.1.5.	Model „Transition“ SST	44
7.4.2.	Zhodnocení turbulentních modelů	44
7.5.	Metodika vyhodnocení kouřových čidel	45
7.6.	Simulace modelů čidel pro různé podmínky	46
7.7.	Analýza získaných výsledků	47
7.7.1.	Návrh variant výpočtu	47
7.7.1.1.	Základní model – mod_1	47
7.7.1.2.	Modifikace I – mod_2	47
7.7.1.3.	Modifikace II – mod_3	47
7.7.1.4.	Modifikace III – mod_4	48
7.7.1.5.	Modifikace IV – mod_5	48
7.7.1.6.	Modifikace V – mod_1_porous	49
7.7.2.	Výsledky variant	50
7.7.2.1.	Základní model – mod_1	50
7.7.2.2.	Modifikace I – mod_2	53
7.7.2.3.	Modifikace II – mod_3	56
7.7.2.4.	Modifikace III – mod_4	59
7.7.2.5.	Modifikace IV – mod_5	61
7.7.2.6.	Modifikace V – mod_1_porous	65
8.	Numerická simulace pohybových detektorů	66

8.1.	Výběr vhodné geometrie.....	66
8.2.	Návrh a popis zjednodušení modelů čidel	67
8.3.	Nastavení výpočtu.....	69
8.3.1.	Nastavení okrajových podmínek	70
8.4.	Příprava CFD modelů pohybových čidel.....	71
8.4.1.	Studie nezávislosti hrubosti sítě	71
8.4.2.	Výběr optimální sítě	74
8.5.	Metodika vyhodnocení pohybových čidel	75
8.6.	Simulace modelů čidel pro různé podmínky	76
8.7.	Analýza získaných výsledků.....	77
8.7.1.	Stacionární výpočet pohybových čidel.....	77
8.7.2.	Nestacionární výpočet pohybových čidel.....	79
8.7.2.1.	Porovnání výsledků pomocí grafů.....	80
8.7.2.2.	Porovnání výsledků pomocí kontur teploty	83
8.7.2.3.	Porovnání výsledků pomocí kontur rychlosti.....	84
9.	Doporučení pro CFD modelování úloh s prouděním a sdílením tepla určených pro testování elektronických čidel	86
9.1.	Kouřové detektory	86
9.2.	Pohybové detektory	86
10.	Ideový návrh experimentu pro testování vybraného typu čidla	87
11.	Závěr.....	88
12.	Bibliografie.....	89
13.	Seznam obrázků.....	91
14.	Seznam tabulek a grafů.....	94
15.	Seznam příloh.....	96

1. Úvod

Cílem této diplomové práce je popsat metodiku modelování úloh s prouděním a sdílením tepla určených pro testování elektronických čidel. Součástí této práce je také rešerše problematiky elektronických pohybových a kouřových čidel a jejich testování s ohledem na jejich obtékání.

V dnešní době existuje mnoho způsobů jak chránit a zabezpečit majetek proti požáru a dalším škodám v důsledku poruch nebo proti vnějším vlivům a krádežím.

Na konci roku 2012 provedla společnost Jablotron unikátní průzkum, kdy oslovila české vězně odsouzené za vloupání do domů. Cílem bylo dozvědět se triky pachatelů a jejich praktiky, aby mohl Jablotron ještě více zdokonalit své produkty. Z průzkumu vyplynulo, že se do objektů nejnáze dostane zloděj oknem, dále pak sklepem nebo garáží. Největší překážkou pro zloděje jsou právě bezpečnostní alarmy a detektory pohybu [1]. Bohužel znalosti zlodějů se v této oblasti detektorů také prohlubují a je tedy nutné stále vyvíjet a zdokonalovat nové principy zabezpečení.

Rozvoj technologií přináší stále nové produkty a možnosti, jak vybraný objekt střežit. Mezi základní ochrany, mimo zamknuté dveře, patří například detekce pohybu, detekce rozbití oken, detekce kouře nebo jiných plynů a různé kamerové systémy, které zaznamenávají nebo zasílají aktuální přehled střeženého prostoru.

Mezi detektory řadíme přístroje, které slouží právě k detekci nepříznivých vlivů. Fungují na principu změny vstupní fyzikální veličiny, ta je následně přeměněna na jinou výstupní fyzikální veličinu, kterou je nutné dále zpracovat. Tato práce se především zabývá problematikou pohybových a kouřových detektorů. Detektory pohybu ke své funkci využívají různé fyzikální děje a rozdělují se především na čidla ultrazvuková, mikrovlnná a infračervená. Detektory kouře pracují na principu rozkladu nebo absorpce světla, těm říkáme optické, nebo na principu ionizace, těm říkáme ionizační.

Praktická část této práce bude věnována problematice numerického modelování úloh pro kouřové a pohybové detektory, které jsou produktem společnosti Jablotron Alarms a.s.

1.1. Společnost Jablotron

Společnost Jablotron Group a.s. byla založena v roce 1990 čtyřmi zaměstnanci vyvíjejícími elektroniku v Jablonci nad Nisou. Firma se rychle rozrůstala a po krátké době společnost začala vyrábět vlastní produkty v oblasti elektronické zabezpečovací signalizace. Jablotron dnes patří mezi významné poskytovatele bezpečnostních systémů, které disponují vysokou kvalitou zpracování a ověřenou technologií. Společnost díky svému potenciálu expandovala dokonce do zahraničí, například Jablotron Slovakia a Jac IBERIA sídlící ve Španělsku [2].

Skupinu Jablotron Group tvoří, mimo jiné firmy specializující se na určité produkty, také Jablotron Alarms a.s. Jablotron Alarms se specializuje na výrobu a vývoj zabezpečovací techniky. Aktuálně pracuje ve skupině Jablotron přes 600 zaměstnanců, kteří v roce 2019 pomohli firmě překonat obrat přes tři miliardy korun prodejem produktů do 73 zemí po celém světě [2]. Logo Jablotron Alarms je zobrazeno na Obr. 1.



Obr. 1 Logo Jablotron Alarms [2]

2. Elektronická čidla

Elektronická čidla se dělí na napájená a nenapájená. Protože se tato práce zabývá především PIR čidly a detektory kouře, budou následující odstavce věnovány čidlům napájeným, která jsou v EZS rozšířená nejvíce. Jelikož těchto detektorů se na trhu vyskytuje mnoho, dělí se dle různých kategorií [3].

Dělení dle vyzařování energie na detektory:

- aktivní – aktivně vysílají elektromagnetické nebo ultrazvukové vlnění, u těchto čidel lze relativně snadno lokalizovat mrtvé zóny,
- pasivní – jsou schopna neaktivně zaznamenat fyzikální změny ve své pracovní oblasti.

Dělení dle střežené oblasti na detektory:

- prostorové – zaznamenají změny v pracovním prostoru čidla,
- směrové – jsou schopna zaznamenat změny pouze v daném směru,
- bariérové – zaznamenají narušení bariéry, kterou vytvoří snímací nebo vyzařovací charakteristika čidla,
- polohové – zaznamenají změnu polohy daných předmětů.

Dělení dle dosahu na detektory:

- s krátkým dosahem – do 15 m pro vnitřní použití nebo do 50 m pro vnější použití,
- se středním dosahem – do 50 m pro vnitřní použití nebo do 150 m pro vnější použití,
- s dlouhým dosahem – nad 50 m pro vnitřní použití nebo nad 150 m pro vnější použití.

Dělení dle snímací nebo vyzařovací charakteristiky na detektory:

- se standardním rozsahem,
- se širokoúhlým rozsahem,
- s kruhovým rozsahem,
- se svislou bariérou,
- s vodorovnou bariérou,
- s dlouhým dosahem.

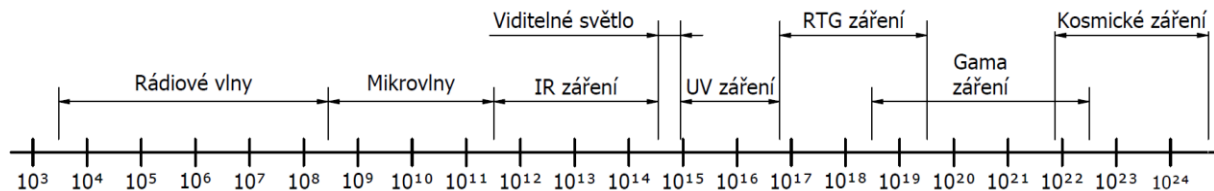
Čidla je nutné umístit tak, aby správně plnila svou funkci, výrobci udávají podrobné manuály k instalaci daných čidel. Je nutné brát v úvahu různá rizika použití a zohlednit všechny faktory, které mohou být úmyslné nebo nahodilé. Důležité je také splnění požadavku na stupeň zabezpečení daných prostor [3].

Tato práce se zaměřuje na detektory pohybu a snímače kouře. Jelikož se jedná o důležité komponenty v PZTS, je nutné brát speciální ohled na jejich konstrukční provedení tak, aby byly splněny všechny zkoušky funkčnosti. Tyto zkoušky budou popsány dále.

Mimo samotný detektor řadíme do PZTS i další prvky. Jedná se především o ústřednu pro zpracování informací z detektoru, přenosové prostředky pro přenos výstupních dat, signalizační prostředek zajišťující vyhlášení poplachu a další doplňková zařízení [3].

3. Pohybová čidla

Pohybová čidla patří k prvkům prostorové ochrany. Na trhu se objevují pohybová čidla v různých modifikacích, která využívají stejného fyzikálního principu, ale mohou být doplněna o další speciální funkce. V praxi se setkáváme s více druhy detektorů pohybu, které ke své funkci využívají různé části kmitočtového spektra elektromagnetického vlnění. Náhled na spektrum elektromagnetického vlnění je možný na Obr. 2 [3].



Obr. 2 Elektromagnetické spektrum [3]

Detektory pohybu je možné rozdělit do šesti kategorií: [3]

- mikrovlnná čidla – spolu s PIR čidly jsou vedlejším produktem rychlého rozvoje elektroniky, pracují v pásmu $2,5 \cdot 10^9 - 2,4 \cdot 10^{10}$ Hz,
- ultrazvuková čidla – pracují v pásmu $2 \cdot 10^4 - 4,5 \cdot 10^4$ Hz,
- pasivní infračervená čidla – PIR čidla pracují v pásmu přibližně $5 \cdot 10^{13}$ Hz,
- aktivní infračervená čidla – AIR čidla mají schopnost detekce objektu nevyzařující teplo. Vysílají a přijímají kódované paprsky v infračerveném pásmu,
- kombinovaná čidla – duální čidla vycházejí z myšlenky kombinace dvou detektorů využívajících rozdílný fyzikální princip za účelem snížit množství falešných poplachů,
- VKV čidla – pracují na frekvenci přibližně $4,2 \cdot 10^8$ Hz a rozdělují se na dělená a monolitní.

Pasivní čidla pouze zaznamenávají změny fyzikální veličiny a jsou obtížněji rozpoznatelné pro běžné prostředky. Aktivní čidla na rozdíl od pasivních vyzařují do okolí určitý druh energie, a proto mohou být lépe detekovány. Pro svou činnost ale zdroj energie potřebují aktivní i pasivní detektory [4].

V oblasti pohybových čidel se tato práce zabývá především PIR detektory, proto budou následující odstavce věnovány tomuto typu.

3.1. Antimasking

Některá pohybová čidla, určená pro střežení objektů s vyšším stupněm ochrany, mohou být vybavena tzv. antimaskingem. Antimasking je schopnost čidla detekovat pokus o zakrytí, nejčastěji sprejem ve snaze pachatele připravit si prostor na vloupání. Pokud je detektor s funkcí antimaskingu zastíněn, v režimu střežení i mimo něj, je na výstup zaslán varovný signál, přičemž v těsné blízkosti před detektorem probíhá neustálá kontrola prostoru. [5]

Dle fyzikálních principů rozlišujeme několik druhů antimaskingu. Za nejefektivnější formu je považován aktivní infračervený antimasking. Detektor s touto funkcí je schopen si neustále porovnávat aktuální údaje o prostoru s referenčními daty uloženými v paměti. V případě dispozičních změn v pracovním prostoru detektoru se musí aktualizovat referenční data, v době provozu je nutná určitá kalibrace [5].

3.2. PIR detektor

Neboli pasivní infračervené čidlo (v některých literaturách označováno jako PID), je zařízení, pracující na principu pyroelektrického jevu. Čidlo měří rozdílné hodnoty elektromagnetického záření v infračerveném pásmu vyzařující z různých objektů, které přes optiku vstoupí do pyroelementu. Objekty s teplotou vyšší než $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (absolutní nula) a nižší než přibližně $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyzařují své teplo ve formě infračerveného záření, které je pro lidské oko neviditelné, ale je detekovatelné pro elektromagnetická čidla. Velikost střeženého prostoru detektoru je dána zorným úhlem čidla [6].

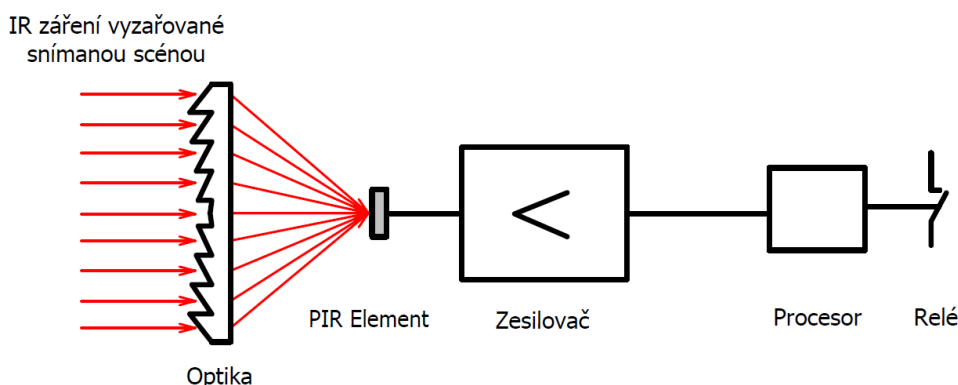
Konstrukční provedení těchto detektorů od společnosti Jablotron Alarms je možné zhlédnout na Obr. 3.



Obr. 3 Pohybové detektory Jablotron: JA-110P (vlevo) a JA-152P (vpravo) [2]

PIR detektory, z hlediska prostorového zaměření, plní funkci prostorové ochrany. Tato ochrana detekuje změny v pracovním prostoru čidla a signál předá dále. Mohou se tedy používat jako čidla detekce pohybu pro zjištění narušení prostoru nebo například jako čidla pro spínání osvětlení. Hlavní výhodou je snadná montáž, spolehlivost, odolnost proti planým poplachům a malá spotřeba. Jelikož nevyzařují žádnou energii, je možné instalovat více detektorů pro pokrytí prostoru z různých úhlů. Mezi možné nevýhody lze zařadit citlivost na rychlé teplotní změny, pohyb zvířat a nemožnost vystavení přímému slunečnímu světlu nebo jinému zdroji světla [3]. Blokové schéma detektoru je znázorněno na Obr. 4.

Zjednodušeně lze uvést, že PIR detektory jsou schopny zaznamenat objekty s jinou teplotou, než je teplota okolí (nejlépe reagují na teploty od $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$), které se pohybují [4]. Snímač vyhodnotí změnu infračerveného záření, která vede ke změně velikosti výstupního napětí. To je následně vyhodnoceno a případně je spuštěn poplach. PIR detektory neměří teplo a nevyžadují k detekci záření žádný zdroj energie, proto se řadí mezi čidla pasivní, jak již bylo uváděno.



Obr. 4 Blokové schéma PIR detektoru [7]

3.2.1. Pyroelement

Infračervené záření má pro teplotu lidského těla (přibližně 35 °C) charakteristickou vlnovou délku 9,3 – 9,4 μm. Toto záření se u PIR čidel detekuje pyroelementem (PIR elementem). Tento senzor je základním prvkem celého čidla, jedná se o polovodičovou součástku na bázi lithia a tantalu. IR záření po průchodu optikou dopadá na pyroelement. Pyroelement je zobrazen na Obr. 5 [3].

Pokud dojde ke změně hodnoty záření, PIR element začne produkovat jinou hodnotu elektrického náboje Q, tato hodnota je snímána FET tranzistorem [7].

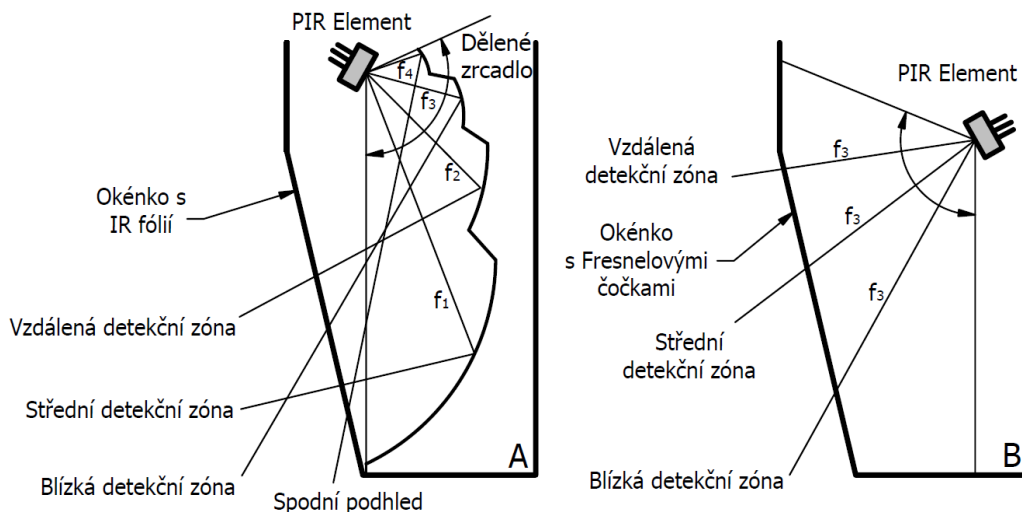


Obr. 5 PIR element [7]

3.2.2. Optika

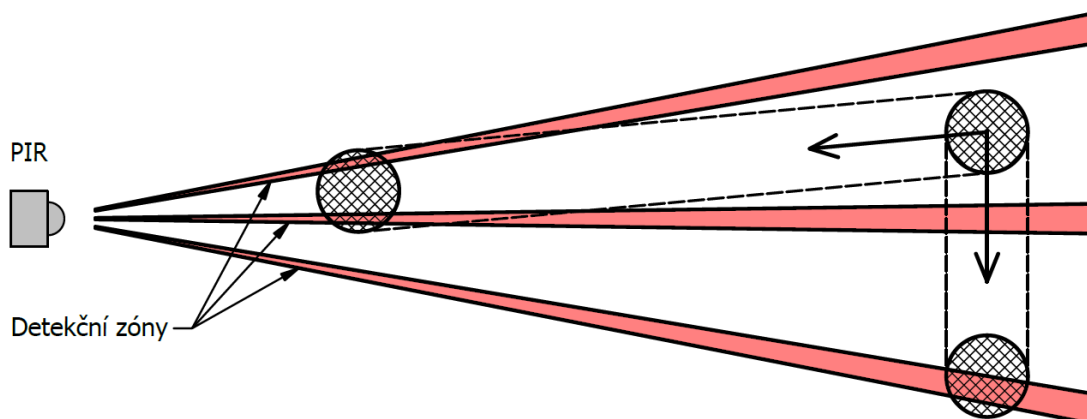
Konstrukční provedení a kvalita optiky ovlivňuje tvar zorného pole a jeho dosah. Volba optiky závisí na tvaru střeženého prostoru, do dlouhých chodeb se použije jiný tvar optiky než do rozlehlých prostor. U detektorů stropního provedení se standardně optika provádí s 360° rozsahem.

PIR detektory využívají dva druhy optik a to soustavu křivých zrcadel nebo soustavu Fresnelových čoček. Oba tyto druhy slouží k rozdělení snímaného prostoru na detekční zóny. Porovnání umístění pyroelementu pro různé druhy optik je zobrazeno na Obr. 6.



Obr. 6 Zrcadlová optika (A) a Fresnelova čočka (B) [3]

Detekční zóny slouží jako kontrolní místa; když se snímaný objekt pohybuje před čidlem, prochází jednotlivými zónami, to zapříčiňuje snímání různých impulzů PIR elementem. Z toho plyne, že nejvhodnější cesta pro pachatele je přímo k detektoru. Tato situace je zobrazena na následujícím Obr. 7 [4].



Obr. 7 Zobrazení pohybu objektu před detektorem [4]

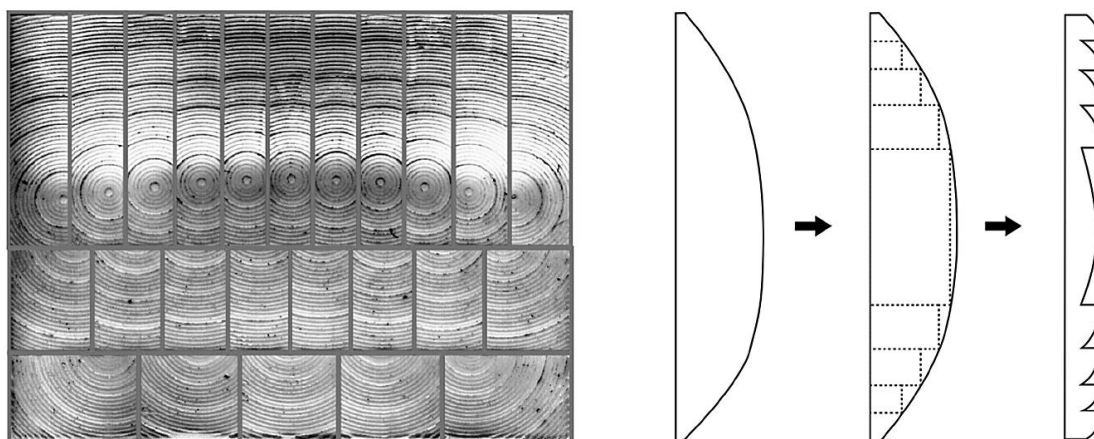
3.2.2.1. Zrcadlová optika

Na počátku rozvoje tohoto systému se u PIR detektorů využíval pouze odrazový systém s kovovými nedělenými destičkami. Vlivem rozvoje technologie se tento systém zdokonalil a začala se využívat plastová segmentová (dělená) zrcadla s nalepenou vrstvou z odrazového kovu. Tuto skladbu zrcadel je možné doplnit o černou vrstvu, ta je schopna filtrovat nežádoucí složky záření [8].

Pokrytí střeženého prostoru PIR detektorem je určeno zakřivením všech segmentů a jejich rozložením v těle detektoru.

3.2.2.2. Fresnelova čočka

Zde je využito systému refrakce, tedy lomu paprsků. Tento typ čočky je využíván nejvíce díky své nízké ceně, jednoduché výrobě a možnosti snadno změnit detekční charakteristiku čidla (výměna čočky). Nejčastější technologie výroby je lisování z plastu. Nevýhodou Fresnelovo čoček oproti zrcadlové optice je, že nejsou schopny zajistit rozdílné vzdálenosti ohniska čoček a tedy všechny detekční zóny nemůžou být přesně nasměrovány na PIR element. Tento problém může vést k falešným poplašným signálům, jelikož nastává pokles amplitudy signálu. Toto omezení se odstraňuje vertikálním rozdělením pracovního prostoru čidla do několika samostatných vrstev, vrstvy jsou pak tvořeny další horizontální řadou oblastí. Pro sepnutí čidla je optika navržena pro snímání předmětů o charakteristických rozměrech člověka, pak je nutné, aby došlo k aktivaci více oblastí, kdy malé pohybující se objekty naruší přibližně jednu nebo dvě oblasti ale člověk například 4 až 8. Takto detektor pozná, že se jedná o narušitele a ne o planý poplach [3].



Obr. 8 Fresnelova čočka (vlevo) a její konstrukce (vpravo) [9] [10]

Z předchozího odstavce plyne, že je nutné geometrii čočky připravit pro různé detekční charakteristiky, podle toho kde detektor pracuje. Detekční charakteristiky Fresnelovo čoček lze následně dělit na: [3]

- standardní – relativně dobré vykrytí celého prostoru ve svislém i vodorovném směru,
- širokouhlou (vějířovou) – závěsné varianty detektorů s pokrytím až 180°,
- kruhovou – největší prostorové vykrytí (stropní konstrukce detektorů),
- svislou bariéru (záclony) – šířka snímání přibližně 6° s prakticky celkovým pokrytím,
- vodorovnou bariéru – využívá se tam, kde hrozí plané poplachy od domácích zvířat,
- s dlouhým dosahem – až dvojnásobný dosah (cca 27 m) při malé šířce snímání.

3.3. Testování PIR čidel

Pro zaručení správné funkčnosti PIR detektorů je nutné řádně testovat dle příslušných pravidel. PIR detektory se testují dle normy ČSN EN 50131-2-2, tato evropská norma definuje požadavky pro PIR čidla používané jako prvky PZTS. Pasivní infračervené detektory se mohou kombinovat například s mikrovlnnými nebo ultrazvukovými detektory. Požadavky na PIR detektory v kombinaci s mikrovlnnými upravuje ČSN EN 50131-2-4, pro kombinaci s ultrazvukovými pak ČSN EN 50131-2-5.

Detektor musí detekovat spektrum infračerveného záření o určité šíři, emitované narušitelem. Pro zjištění reálných vlastností se detektory testují v certifikovaných institucích nebo ve vlastních společnostech s oprávněním tuto činnost vykonávat [11].

V normě se vyskytuje celkem 34 jednotlivých zkoušek, které dostatečně prověřují funkce PIR detektorů. Všechny tyto zkoušky lze dělit do celkem devíti kategorií: [8]

1. detekční pokrytí střeženého prostoru – do této kategorie řadíme zkoušky na hranici a uvnitř detekovatelného prostoru,
2. průchozí zkoušky – zde provádíme zkoušky pokrytí při velké rychlosti nebo při přerušovaném pohybu,
3. pokrytí v těsné blízkosti detektoru – mimo samotné pokrytí v těsné blízkosti detektoru se zde provádí také zkoušky na opožděné sepnutí signalizace,
4. signály nebo zprávy poruchového stavu,
5. odolnost proti chybné funkci – zkouší se odolnosti proti proudění vzduchu a proti světlu blízkému IR záření nebo světlu viditelnému,
6. zabezpečení proti sabotáži – mimo ostatní zkoušky sem spadá i ověření antimaskingu,
7. elektrické zkoušky,
8. provozní zkoušky vlivu prostředí,
9. odolnostní zkoušky vlivu prostředí.

Pro zkoušení je normou ČSN EN 50131-2-2 definováno zkušební prostředí, montážní výšky, teploty povrchů, zkušební postupy ale i výška a váha osob pro zkoušky detekce.

Testování PIR čidel, pokud není stanoveno jinak, probíhá za daných atmosférických podmínek. Okolní podmínky pro testování stanovuje norma ČSN EN 60068: [8]

- Teplota okolí 15 – 35 °C
- Tlak okolního vzduchu 25 – 75 %
- Relativní vlhkost 86 – 106 kPa

V následujících odstavcích je popsáno osm zkoušek, které lze považovat za důležitější.

3.3.1. Odolnost proti proudění vzduchu

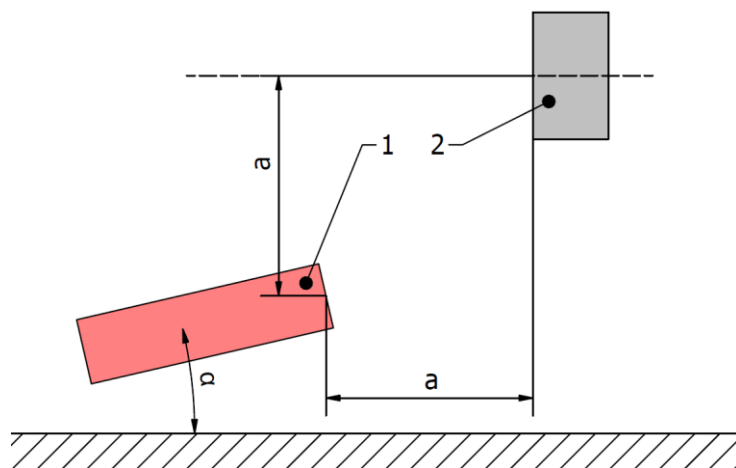
Mezi testy odolnosti proti chybné funkci spadá i test odolnosti proti proudění vzduchu.

Ohříváný proudící vzduch, vypouštěný z teplovzdušného topidla ve vzdálenosti $1,0 \pm 0,5$ m od detektoru, je směřován tak aby proudil přes čelo detektoru. Střední rychlost proudícího teplého vzduchu před průzorem detektoru by měla být v rozmezí $0,7 \pm 0,2$ m/s [11].

Teplota vzduchu se rovnoměrně zvyšuje z teploty okolí o 15 °C s přírůstkem 3 °C/min, kdy zorná část detektoru nesmí být nasměrována přímo na topná tělesa. Po stabilizačních čtyřech minutách se vypne zdroj tepla a teplota se nechá klesat po dobu jedné minuty nebo do dosažení teploty okolí, kde se stabilizuje další dvě minuty. Tento jeden celý cyklus se opakuje celkem pětkrát a čidlo nesmí zaznamenat pohyb. Pokud nedojde ke změně stavu detektoru, je zkouška úspěšná [11].

Norma přikládá schématický obrázek nastavení tohoto testu, který je níže přiložen na Obr. 9.

Splnění tohoto testu nebývá problém, ovšem někdy mohou být kladeny specifické požadavky pro další ověření funkčnosti detektoru při jeho vystavení proti proudění otepleného vzduchu. Jedním z příkladů těchto požadavků se tato práce zabývá v praktické části.



Obr. 9 Schéma nastavení testu proti proudění horkého vzduchu

Legenda:

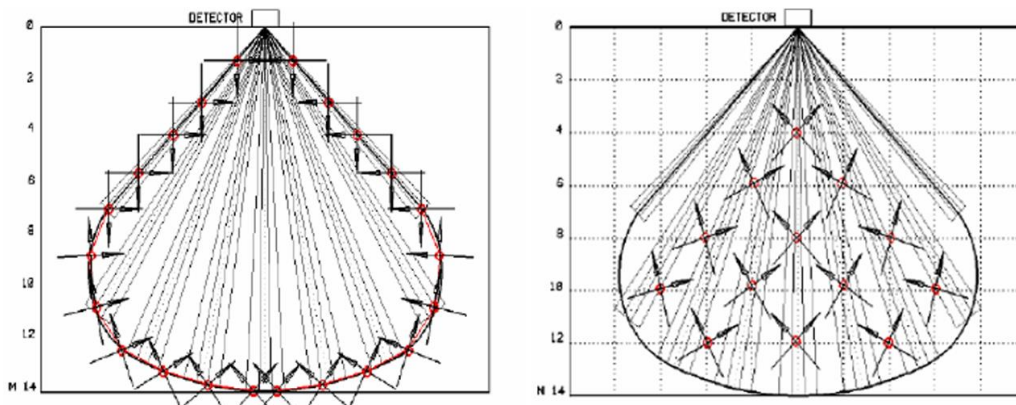
1	Horkovzdušné topidlo
2	Detektor
Vzdálenost a	Vodorovná a svislá vzdálenost mezi topidlem a detektorem
Úhel α	Úhel horkovzdušného topidla

3.3.2. Odolnost proti světlu blízkému infračervenému záření a viditelnému světlu

Osvětlení 2000 lux je generováno ve vzdálenosti 3 m od detektoru 12 V halogenovým reflektorem nebo jiným zdrojem, který dokáže vydat ekvivalentní osvětlení. Zdroj generuje světlo, které prochází dvěma čistými tabulemi skla, každá tabule je široká 4 mm a jsou od sebe odděleny 10 mm vzduchovou mezerou tak, aby nejbližší tabule byla umístěna ve vzdálenosti 0,5 m od čela detektoru. Zdrojem světla se otáčí kolem jeho svislé osy tak, že osvit se po čele detektoru pohybuje rychlostí 0,5 m/s. Odolnost je prokázána pokud čidlo nezaznamená pohyb [7].

3.3.3. Detekční pokrytí na hranici detekovatelného prostoru

Na hranici detekčního prostoru se rozmístí zkušební body s dvoumetrovými rozestupy, jak je znázorněno níže na Obr. 10. Z detektoru vycházejí radiální spojnice, které protínají zkušební body. Všemi zkušebními body musí být možné provést dva průchozí směry, které začínají 1,5 m před zkušebním místem a končí 1,5 m za ním. Průchozí zkouška je test, kdy se osoba pohybuje jedním směrem skrze zkušební bod. Postupně se tak prochází body v obou směrech. Pokud detektor generuje poplachový signál, je zkouška splněna [11].



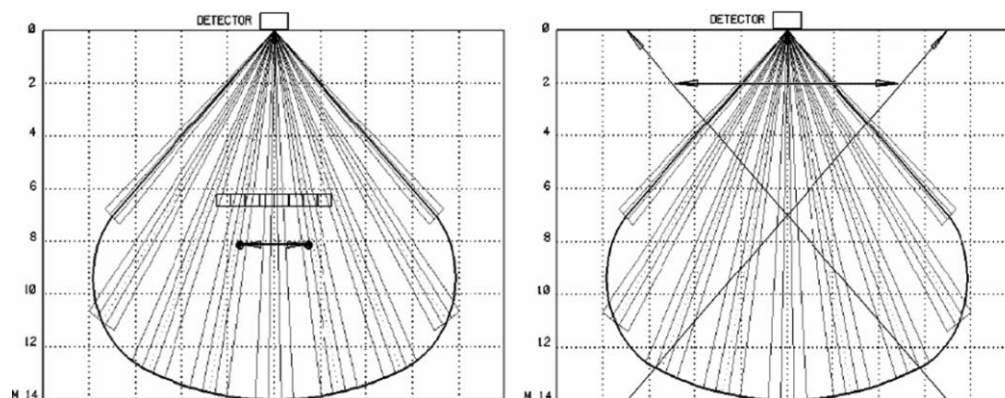
Obr. 10 Zkušební body na hranici (vlevo) a uvnitř pracovního prostoru (vpravo) [8]

3.3.4. Detekční pokrytí v detekovatelném prostoru

Pro rozmístění zkušebních bodů se využívá čtvercové mřížky, kdy se první bod umístí v ose detektoru, ve vzdálenosti 4 m směrem do pracovního prostoru. Další zkušební body se rozmístí do každého průsečíku mříže s měřítkem 2 m. Musí se brát v potaz hranice detekčního prostoru tak, aby zkušební body nebyly méně než metr od této hranice. Obdobně jako u zkoušky detekčního pokrytí na hranici, i zde z detektoru vycházejí radiální spojnice, které protínají zkušební body a všemi zkušebními body musí být možné provést dva průchozí směry, které začínají 1,5 m před zkušebním místem a končí 1,5 m za ním. Zkouška je splněna pokud se detekční cíl pohybuje v rozmezí $\pm 45^\circ$ k radiální spojnici. Pokud detektor generuje poplachový signál, je zkouška splněna [11].

3.3.5. Významné snížení rozsahu pokrytí

Zkušební bod je zvolen v ose detektoru ve vzdálenosti 55 % deklarovaného dosahu od výrobce. Dále se ve vzdálenosti 45 % deklarovaného dosahu od výrobce postaví stěna, nejčastěji z kartonových krabic, o výšce 3 m a celkové šířce 5 m (viz Obr. 11). Ve zkušebním bodě se následně provedou dvě zkoušky a to ve vzdálenosti 1,5 m před a za tímto bodem kolmo k ose. Zkouška je úspěšná tehdy, pakliže detektor zaznamená změnu ve svém pracovním prostoru a vyšle varovný signál [7].



Obr. 11 Zkouška pokrytí (vlevo) a zkouška při velké rychlosti (vpravo) [8]

3.3.6. Detekční pokrytí při velké rychlosti

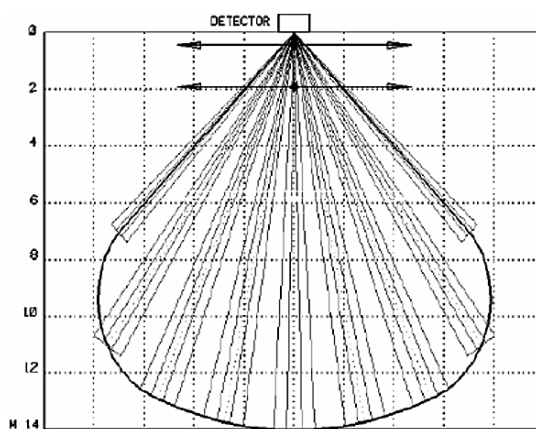
Zde se provádí takzvané průchozí zkoušení skrze celý pracovní prostor detektoru. Rozvrhují se celkem tři trajektorie, kdy dva zkušební průchody jsou vedeny pod úhlem 45° tak, aby protuly osu detektoru v 50 % maximálního deklarovaného dosahu; začínají mimo pracovní prostor detektoru. Další dva testovací průchody se vedou z opačných směrů kolmo k ose detektoru ve vzdálenosti 2 m od čela detektoru. Trajektorie průchozí zkoušky jsou znázorněny na Obr. 11. Detekční cíl na konci všech tras zastaví na 20 s, pak postupuje k dalšímu bodu. Pro splnění testu musí být ve všech čtyřech testovacích průchodech generován signál narušení [11].

3.3.7. Detekční pokrytí při přerušovaném pohybu

Obdobně jako u zkoušky pokrytí při velké rychlosti se i zde provádí dvě průchozí zkoušky pod úhlem 45° tak, aby protuly osu detektoru v 50 % maximálního deklarovaného dosahu; začínají opět mimo pracovní prostor detektoru. Detekční cíl zde jde ovšem přerušovaným pohybem. Přerušovaný pohyb započne ze stoje snožmo, pokračuje se dvěma kroky rychlostí 0,1 – 0,2 m/s po 0,5 m tak, aby se končilo stojem snožmo. Tímto postupem se jde skrze celou vytyčenou trajektorii průchozí zkoušky. I zde detekční cíl na konci všech tras stojí 20 s, pak postupuje k dalšímu bodu. Test je splněn, pokud detektor generuje signály narušení [7].

3.3.8. Detekční pokrytí v těsné blízkosti

Detekční cíl se pohybuje po trajektoriích, jejichž vzdálenost je dána stupněm zabezpečení. U stupně zabezpečení 1 a 2 se požaduje vzdálenost 2 m od detektoru, pro stupeň zabezpečení 3 a 4 se požaduje 0,5 m nebo nejbližší deklarovaná vzdálenost detekční hranice. Trajektorie pro tuto zkoušku jsou znázorněny na Obr. 12 [11].



Obr. 12 Zkouška pokrytí v těsné blízkosti detektoru [8]

4. Kouřová čidla

Kouřové čidlo je takové zařízení, které je schopno detekovat kouř nebo jeho složky. Nejčastěji jsou vybaveny zvukovou či vizuální signalizací. V některých případech jsou detektory vybaveny záložní baterií, aby byly schopny pracovat i při výpadku sítě.

Detektory kouře řadíme k prvkům elektronické požární signalizace (EPS). Ta musí zajistit rychlou detekci vznikajícího požáru, musí také aktivovat ostatní prvky EPS. Do tohoto systému řadíme vyhodnocovací ústřednu pro zpracování výstupních informací z hlásičů a další příslušenství, například pro aktivaci protipožárního větracího zařízení nebo hasícího systému [12].

Prostředky detekce ohně lze dělit následujícím způsobem: [13]

- manuální aktivace pomocí:
 - rozbití sklíčka,
 - stisknutí tlačítka,
 - stlačení páčky,
- automatická aktivace:
 - počítačový algoritmus s využitím kamerového systému,
 - detektor oxidu uhelnatého,
 - teplotní detektor,
 - detektor plamene,
 - detektor kouře,
 - optický,
 - ionizační,
 - kombinovaný detektor.

Kouřová čidla jsou považována za nejefektivnější typ detektoru ohně díky tomu, že jsou schopna detekovat nebezpečnou situaci v čase, kdy materiál pouze dýmá, ale nehoří. Tato výhoda je neocenitelná v případě ochrany životů nebo důležitých dokumentů před potenciálním ohněm [13].

Prach, mlha, pára nebo jiné aerosoly mohou znečistit monitorovaný vzduch a způsobit falešný poplach, pokud je detektor nedokáže odlišit od kouře. Falešné poplachu mohou být velmi nákladné, protože mohou například způsobit přerušování výrobní linky nebo přinutit pilota k nouzovému přistání na dalším letišti. Z tohoto důvodu je nutné tato čidla řádně otestovat [14].

Všechny typy kouřových čidel jsou vybaveny senzorem, zvukovým poplašným systémem a zdrojem energie (například bateriemi). Zvukový poplašný systém nemusí být přímo součástí čidla.

Na trhu se vyskytují dva typy detektorů kouře, a to optický (fotoelektrický) a ionizační. V dnešní době někteří výrobci vyrábí i detektory kouře, které kombinují technologii optického a ionizačního detektoru. Tato čidla využívají výhod obou typů v jednom detektoru, který je schopen detekovat kouř ze širšího spektra požárů (od doutnajících až po rozvinuté).

Společnost Jablotron Alarms ve svých produktech využívá především detekci kouře pomocí optického rozptylu světla. Pro zvýšení bezpečnosti, Jablotron tyto čidla kombinuje například s detektory zvýšené teploty. Jeden z těchto detektorů je zobrazen na Obr. 13.



Obr. 13 Kombinovaný optický detektor kouře a teploty JA-150ST [2]

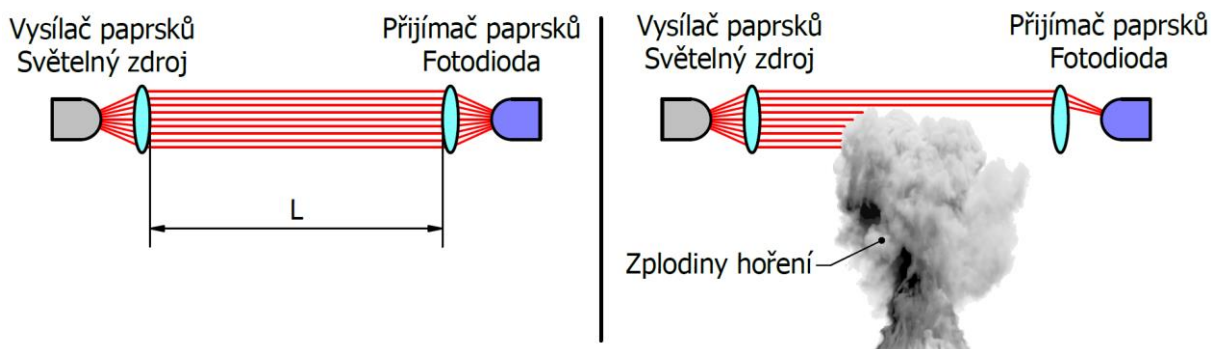
4.1. Optický detektor

Tento typ detektoru lze dále dělit na hlásiče pracující na principu absorpce nebo rozptylu světla. První druh čidla pracuje na základě zeslabení vysílaného světelného paprsku mezi senzorem a emitorem. Druhý druh využívá rozptýlení proudu světla kouřem [15].

4.1.1. Princip absorpce světla

Lineární hlásiče kouře se skládají z emitoru paprsku světla a přijímače (fotoelektrický element) tohoto paprsku. Jako zdroj paprsku lze použít laserové nebo IR diody, které mohou být vzdáleny od přijímače několik metrů. Pokud zplodiny hoření naruší trajektorii paprsku, zapříčiní to redukci proudu, poté přijímač vydá informace o přítomnosti kouře [16].

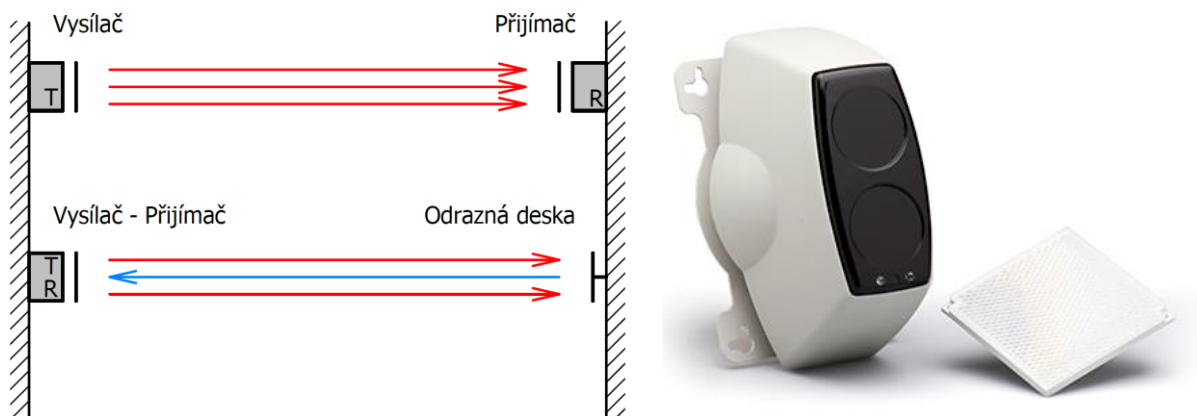
Tato čidla jsou vhodná k detekci aerosolových částic o průměru přibližně 0,1 – 10 μm , vzhledem k vlnovým délkám IR. Princip detektorů kouře využívající absorpce proudu paprsků je přiblížen na Obr. 14 [15].



Obr. 14 Princip absorpce světla [15]

Existují dva druhy lineárních hlásičů kouře. První, klasický, dostatečně vystihuje Obr. 14, jedná se o řešení s umístěním vysílače a přijímače na dvě různé stěny. Druhému typu se říká reflexní a to díky tomu, že využívá tzv. odrazné desky [17].

Pracovní schéma obou typů detektorů a reflexní detektor s odrazovou deskou je na Obr. 15.



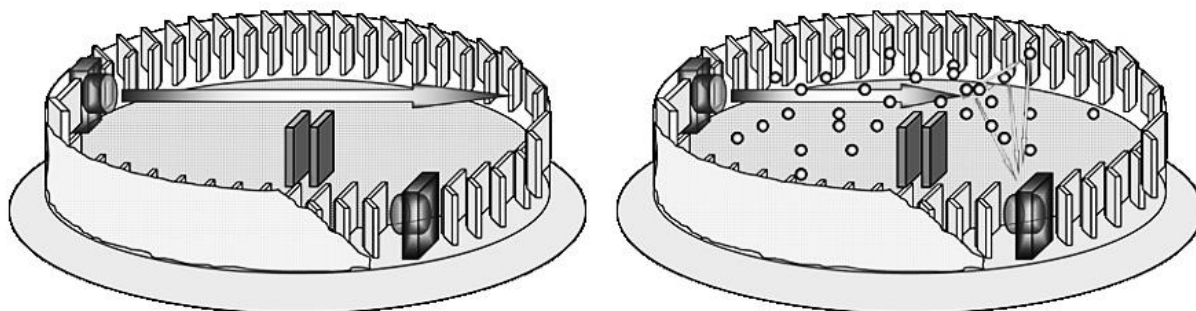
Obr. 15 Princip lineárních detektorů (vlevo) a reflexní detektor (vpravo) [17]

Lineární hlásiče kouře dnes již, díky jejich nevýhodám, nejsou tolik využívány. To je dáno především nízkou odolností proti vnějším a rušivým elektrickým vlivům. Mezi nevýhody lze řadit také pořizovací cenu v porovnání s jinými druhy kouřových čidel. Nicméně jsou stále využívány v rozlehlých halách díky svému dosahu několik desítek metrů [15].

4.1.2. Princip rozptylu světla

Bodové hlásiče kouře také využívají paprsku IR záření a fotodiody. Prostor vyhodnocení přítomnosti kouře je omezen na detekční (optickou) komoru. Prostor detekční komory u tohoto druhu detektoru je typicky ohraničen soustavou zakřivených lamel. Lamely svým tvarem a uspořádáním zabraňují průniku okolního světla do prostoru komory. Zdroj světla (modrá LED dioda nebo IR emitor) a fotoelektrický prvek (přijímač) je umístěn uvnitř detekční komory. Přijímač je vždy umístěn tak aby nebyl v ose paprsku [16]. Když částice kouře vstoupí do trajektorie paprsku světla, rozptýlí ho do prostoru komory a tím i na snímací fotodiodu a spustí se alarm. Tento typ je zobrazen na Obr. 16.

Tyto detektory dobře detekují větší částice aerosolu ($4 - 10 \mu\text{m}$), které jsou obsaženy v hustých dýmech (např. hoření asfaltové izolace). Na malé částice (například částice z dokonalého hoření) tyto čidla tak citlivá nejsou [16].

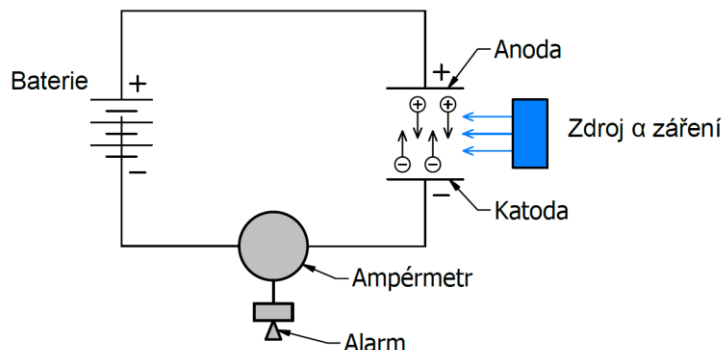


Obr. 16 Princip rozptylu světla [16]

4.2. Ionizační detektor

Ionizační čidla kouře využívají ionizace vzduchu mezi elektricky napájenými deskami. Když kouř vstoupí do prostoru detektoru, naruší proud iontů a spustí alarm. Tyto detektory jsou vhodné pro detekci rychle se šířících požárů, které produkují malé částice ($0,01 - 0,4 \mu\text{m}$). Nicméně jejich konstrukce a princip může zapříčinit falešné poplachy od páry nebo prachu, proto je důležité řádně zhodnotit, kdy a kde bude tento detektor s výhodou použit [15].

Ionizační kouřový senzor je založen na radioaktivním zdroji emitujícím alfa záření (typicky Americium²⁴¹). Radioaktivní částice ionizují vzduch a velmi nízký proud pak protéká mezi kladnou a zápornou elektrodou. Když kouřové částice vstoupí do tohoto místa, způsobí to redukci průtoku proudu. Poté elektrické zařízení rozpozná tuto změnu proudu a vydá povel ke spuštění alarmu. Pracovní princip ionizačních čidel je zobrazen na Obr. 17 [13].



Obr. 17 Pracovní princip ionizačních čidel [13] [18]

4.3. Testování kouřových čidel

Kouřová čidla, jakožto prvky EPS, musí být instalována dle zákonných požadavků pro zařízení autonomní detekce a signalizace. Technické podmínky požární ochrany staveb a vybavení různých typů staveb danými hlásiči požární ochrany upravuje vyhláška č. 23/2008 Sb. Pojmem „zařízení autonomní detekce a signalizace“ se rozumí požární hlásič podle české technické normy řady ČSN EN 54 nebo autonomní kouřový hlásič dle ČSN EN 14604 [19].

Princip optické nebo ionizační detekce je velice účinný způsob ochrany, oba tyto principy jsou využívány v bodových hlásičích kouře dle ČSN EN 54-7 i v autonomních hlásičích kouře dle ČSN EN 14604 [19].

ČSN EN 54-7 pojednává o detektorech kouře bodových, které jsou konstruovány jako ionizační, optické s principem absorpce světla nebo optické s principem rozptylu světla [19].

Podle normy ČSN EN 14604 je autonomní kouřový hlásič takové zařízení, které obsahuje v jednom krytu prvky, kromě zdroje energie, nutné pro detekci kouře a zvukové signalizace poplachu. Tyto zařízení pak využívají k detekci požáru také principu ionizace, absorpce světla nebo rozptylu světla [16].

Evropská norma EN 54 definuje řadu testů pro prokázání funkčnosti detektorů kouře, bohužel se jedná o velice složitý úkol a problém vyhnout se falešným poplachům není zcela vyřešen. I přes velký pokrok ve snižování citlivosti detektorů kouře na obtěžující aerosoly zde, na rozdíl od standardizovaných metod pro hodnocení detekční schopnosti těchto čidel, chybí kvalitní reprodukovatelná zkušební metoda pro ověření náchylnosti k falešným poplachům s ohledem na různé aerosoly. Důsledky falešných poplachů jsou zdrojem mnoha problémů, proto je nutné se tímto úkolem dále zabývat [14].

Mnoho falešných poplachů je způsobeno stavebními pracemi v okolí detektoru kouře. Jak již bylo řečeno, vývojář bohužel nemá žádné reprezentativní testovací metody, které by kvantifikovaly vylepšení a poukázaly na odolnost proti falešným poplachům. Důležitá je znalost vlastností prachu a páry, jako je distribuce velikosti částic ve srovnání s distribucí velikosti částic kouře z ohně [14].

Pouze několik článků se zabývá distribucí velikostí částic ze stavebních prací a koncentrací prachu jako funkcí času. Cílem většiny studií je maximální přípustná koncentrace aerosolu pro popis dopadu na aspekty bezpečnosti a ochrany zdraví na pracovišti, nikoli dopad na

falešné poplachy optických detektorů kouře. Jedním z klíčových faktorů pro navrhnutí použitelné a realistické metody testu prachu je právě typ prachu, který se má použít. Proto je nutná odborná znalost parametrů prachu [14].

Dále budou popsány postupy zkoušení kouřových čidel podle ČSN EN 54-7. Hodnocení citlivosti detektorů probíhá v obou zmiňovaných normách shodně [16].

Testování kouřových čidel, pokud není stanoveno jinak, probíhá za daných atmosférických podmínek. Okolní podmínky pro testování stanovuje norma ČSN EN 60068: [8]

- Teplota okolí 15 – 35 °C
- Tlak okolního vzduchu 25 – 75 %
- Relativní vlhkost 86 – 106 kPa

Mimo klimatických podmínek, které norma definuje, je nutné dodržet také správné pracovní podmínky pro zkoušky a montážní uspořádání. Detektor musí být namontován dle pokynů výrobce. Pokud návod k montáži popisuje více způsobů uchycení, je použit ten, který je nejméně vhodný pro každý test [20].

Norma požaduje celkem 20 vzorků pro 17 druhů zkoušek, viz Příloha A. Podle tohoto plánu se také vzorky zkouší. Pro účely této normy je dána limitní hodnota koncentrace aerosolu v blízkosti detektoru (prahová hodnota reakce), měřená v testovacím kouřovém tunelu v čase vyslání poplachového signálu [20].

Po zkoušce reprodukovatelnosti budou čtyři nejméně citlivé vzorky, tedy vzorky s nejvyššími prahovými hodnotami odezvy, očíslovány od 17 do 20 a budou použity pro zkoušku požární citlivosti. Ostatních 16 vzorků se nahodile označí čísly 1 až 16 [20].

Cílem této diplomové práce je návrh simulací pro podporu vývoje čidel s ohledem na jejich obtékání, proto bude v následujících textech popsán pouze způsob měření prahové hodnoty reakce a vybrané zkoušky. Informace v kapitolách 4.3.1 až 4.3.6 byly převzaty ze zdroje [20], tedy z normy ČSN EN 54-7.



Obr. 18 Kouřový tunel [14]

4.3.1. Měření prahové hodnoty reakce

Detektor je uchycen v dostatečně vyvětraném kouřovém aerosolovém tunelu (Obr. 18), který je popsán v příloze (viz Příloha B a Příloha C). Čidlo je vzhledem k směru proudění natočeno tak, kdy má nejnižší citlivost určenou při zkoušce směrové závislosti. Rychlost přívodu aerosolu musí být podobná pro jednotlivá měření u všech zkoušených vzorků.

Pokud není stanoveno jinak, platí následující podmínky: [20]

- V blízkosti detektoru je střední rychlost proudění $0,2 \pm 0,04$ m/s,
- V kouřovém tunelu je teplota proudícího vzduchu 23 ± 5 °C,
- Zkoušený detektor je připojen k vlastnímu monitorovacímu a napájecímu zařízení a je stabilizován minimálně 15 min,
- Aerosol je do tunelu přiváděn s následujícím nárůstem koncentrace pro detektory pracující na principu absorpce nebo rozptylu světla:

$$0,015 \leq \frac{\Delta m}{\Delta t} \leq 0,1 \left[\frac{\text{dB}}{\text{m} \cdot \text{min}} \right] \quad (1)$$

- Aerosol je do tunelu přiváděn s následujícím nárůstem koncentrace pro detektory pracující na principu ionizace:

$$0,005 \leq \frac{\Delta y}{\Delta t} \leq 0,3 \left[\frac{1}{\text{min}} \right] \quad (2)$$

Uvedené nárůsty koncentrace, resp. rozsahy, zaručují, že zkoušené čidlo zareaguje v přijatelném čase. Rovnice pro m a y jsou možné k nahlédnutí v příloze (viz Příloha D).

V momentě kdy detektor generuje poplach, musí být zaznamenána koncentrace aerosolu jako m v [dB/m] pro hlásiče využívající absorpce nebo rozptylu světla, nebo jako y [-] pro ionizační hlásiče.

4.3.2. Zkušební aerosol pro měření prahové hodnoty reakce

Norma požaduje použití polydispersního aerosolu s rozměry částic v rozmezí 0,5 až 1 μm . Index lomu aerosolových částic by se neměl výrazně lišit od hodnoty 1,4. Norma doporučuje použít mlhu z parafinového oleje. Parametry zkušební aerosolu musí být stabilní, aby byla zaručena opakovatelnost pro další testy. Pro zjištění, zda je aerosol stabilní, je možné monitorovat poměr $m:y$ [20].

Mezi nejdůležitější parametry aerosolu řadíme rozložení velikosti částic a jejich optické konstanty, tvary a struktury [20].

4.3.3. Zkouška opakovatelnosti

Při této zkoušce se prokazuje, že detektor nezmění svojí citlivost po více poplachových stavech. Prahová hodnota reakce se měří celkem šestkrát, zvolí se libovolné natočení detektoru, které je neměnné pro všechny měření. Výstupem je naměřená maximální hodnota prahové reakce m_{MAX} nebo y_{MAX} a minimální m_{MIN} a y_{MIN} . Poměr maximálních a minimálních hodnot pro m nebo y nesmí být větší než 1,6 společně s podmínkou že m_{MIN} není menší než 0,05 dB/m a y_{MIN} není menší než 0,2.

Tato zkouška se provádí pouze pro jeden libovolně vybraný zkoušený detektor.

4.3.4. Zkouška směrové závislosti

Tento test prokazuje, že natočení hlásiče výrazně neovlivňuje jeho citlivost. Zde se prahová hodnota reakce měří pro každé otočení detektoru o 45° kolem jeho svislé osy, tedy proběhne osm měření. Výstupem je naměřená maximální hodnota prahové reakce pro osm natočení

detektoru m_{MAX} nebo y_{MAX} a minimální m_{MIN} a y_{MIN} . Natočení, pro které byla zjištěna nejvyšší hodnota prahové reakce, je označeno jako natočení s nejnižší citlivostí. Obdobně je označeno natočení, pro které byla zjištěna nejnižší hodnota prahové reakce, jako natočení s nejvyšší citlivostí. Poměr maximálních a minimálních hodnot pro m nebo y nesmí být větší než 1,6 společně s podmínkou že m_{MIN} není menší než 0,05 dB/m a y_{MIN} není menší než 0,2.

Tato zkouška se provádí pouze pro jeden libovolně vybraný zkoušený detektor.

4.3.5. Zkouška reprodukovatelnosti

Účelem tohoto testu je dokázat, že naměřené citlivosti hlásičů není příliš odlišná. Naměřené prahové hodnoty reakce po zkouškách vlivu prostředí se porovnávají se zjištěnou prahovou hodnotou reakce při této zkoušce.

Po naměření všech prahových hodnot reakce se vypočte jejich střední hodnota \bar{m} nebo \bar{y} . Maximální hodnota prahové reakce m_{MAX} nebo y_{MAX} a minimální m_{MIN} a y_{MIN} . Poměr $m_{MAX} : \bar{m}$ nebo $y_{MAX} : \bar{y}$ nesmí být větší než 1,33. Poměr $\bar{m} : m_{MIN}$ nebo $\bar{y} : y_{MIN}$ nesmí být větší než 1,5. Dále musí platit že m_{MIN} není menší než 0,05 dB/m a y_{MIN} není menší než 0,2.

Jak již bylo uvedeno, tato zkouška se provádí pro všechny vzorky a po zakončení budou čtyři nejméně citlivé vzorky, tedy vzorky s nejvyššími prahovými hodnotami odezvy, očíslovány od 17 do 20 a budou použity pro zkoušku požární citlivosti. Ostatních 16 vzorků se nahodile označí čísly 1 až 16.

4.3.6. Zkouška proudícím vzduchem

Zkouška proudícím vzduchem má za cíl prokázat, že zkoušený detektor není významně náchylný ke generování falešných poplachů při vystavení určité rychlosti vzduchu a že rychlost proudu nemá přílišný vliv na citlivost čidla.

Vzorek se natočí proti proudu stranou s nejnižší citlivostí a následně se změří jeho prahová hodnota reakce $m_{(0,2)MAX}$ nebo $y_{(0,2)MAX}$ při rychlosti $0,2 \pm 0,04$ m/s. Poté se vzorek natočí proti proudu stranou s nejvyšší citlivostí a stejným způsobem se změří hodnota $m_{(0,2)MIN}$ nebo $y_{(0,2)MIN}$.

Následně se provede stejná metoda měření pro rychlost $1,0 \pm 0,2$ m/s, výstupem pak je $m_{(1,0)MAX}$ a $m_{(1,0)MIN}$ nebo $y_{(1,0)MAX}$ a $y_{(1,0)MIN}$.

Ionizační detektory se při natočení stranou s nejnižší a nejvyšší citlivostí vystaví proudícímu vzduchu bez aerosolu o rychlosti $5,0 \pm 0,5$ m/s po dobu 5 – 7 min, po desetiminutové přestávce se stejné měření provede pro rychlost proudu 10 ± 1 m/s po dobu 2 – 4 s. V průběhu tohoto testu se vzorek pečlivě monitoruje, zda negeneruje jakýkoliv signál.

Pro ionizační detektory platí, že nesmí v průběhu testu generovat poruchový nebo poplachový signál, dále musí platit následující požadavek:

$$0,625 \leq \frac{y_{(0,2)MAX} + y_{(0,2)MIN}}{y_{(1,0)MAX} + y_{(1,0)MIN}} \leq 1,6 \quad (3)$$

Pro detektory pracující na principu absorpce nebo rozptylu světla platí požadavek:

$$0,625 \leq \frac{m_{(0,2)MAX} + m_{(0,2)MIN}}{m_{(1,0)MAX} + m_{(1,0)MIN}} \leq 1,6 \quad (4)$$

5. Numerické simulace proudění

Praktická část této práce se zabývá CFD výpočty kouřových a pohybových čidel, proto bude v této kapitole stručně popsán přístup základních metod numerických výpočtů v oblasti dynamiky tekutin včetně modelování turbulence.

5.1. Metody v oblasti výpočetní dynamiky tekutin

Laminární proudění lze popsat analyticky, problémem je ovšem přechodové a turbulentní proudění, to je nutné řešit numericky diskretizací integrálních a diferenciálních rovnic. Na trhu je mnoho softwarů s implementovanými CFD přístupy, které lze pro tento účel použít. CFD numerický výpočet je mocný nástroj, který umožňuje popsat proudové oblasti, rozložení tlaku, rychlosti, teploty ale i například vírů, gradientů daných veličin apod. V ideálním případě se výsledek CFD simulace dostatečně přiblíží výsledku experimentu a výpočet je tak validován, bohužel experiment je často drahá a náročná položka, nicméně vždy je vhodné provést alespoň verifikaci diskretizované oblasti nebo validaci testovacích výpočtů.

Pohyb tekutiny popisují tři základní diferenciální rovnice, a sice rovnice zachování energie, rovnice zachování hmotnosti a pohybová rovnice popisující hybnost (viz rovnice níže). Cílem CFD výpočtů je určení všech proměnných v diskretizované oblasti (výpočetní síti) řešením řídicích rovnic. Do specifikace problému je nutné přidání turbulentního modelu pro popis zjednodušeného chování proudu při turbulentním proudění.

Zákon zachování energie (energetická rovnice) [21]:

$$\frac{dh}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = \frac{\tau_{kl}}{\rho} \frac{\partial w_k}{\partial l} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial q_k}{\partial k} + \frac{q_v}{\rho} \quad (5)$$

Zákon zachování hmotnosti (rovnice kontinuity) [21]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w_k)}{\partial k} = 0 \quad (6)$$

Pohybová rovnice (N-S rovnice) [21]:

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + w_k \frac{\partial w_i}{\partial k} = R_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial i} + \nu \frac{\partial^2 w_i}{\partial k^2} + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial i} \left(\frac{\partial w_k}{\partial k} \right) \quad (7)$$

Numerické simulace pro řešení těchto parciálních diferenciálních rovnic využívají nejčastěji tři základní metody, a to metodu konečných diferencí, metodu konečných prvků a metodu konečných objemů. Jelikož je cílem této kapitoly přiblížit princip výpočetní dynamiky tekutin, bude popsána pouze metoda konečných objemů, která v této kategorii zcela převažuje.

5.1.1. Metoda konečných objemů

Tato metoda spočívá v rozdělení předem upravené geometrie na konečný počet objemů (elementů, u této metody nazývaných nejčastěji buňky) diskretizací. Výsledkem tohoto rozdělení je výpočetní síť. Výše popsané rovnice jsou diskretizovány do souboru algebraických rovnic, k nimž se připojí okrajové podmínky a rovnice pro modelování turbulence. Každý element sítě ve svém středu (řídčeji v uzlech, např. v sw ANSYS CFX) nese informace o charakteru proudu v místě tohoto elementu, tyto informace předává sousednímu prvku skrze stěnu buňky interpolací. Tato metoda se používá jak pro strukturovaně, tak pro nestrukturovaně rozdělenou výpočetní síť. Právě možnost použití

nestrukturované sítě představuje značnou výhodu v tom, že lze výpočet provést na značně složitých geometrických modelech.

5.2. Modelování turbulence

Významný problém představuje při reálných CFD simulacích zachycení vířivosti proudového pole, tj. turbulence. Turbulenci lze postihnout pomocí tří základních přístupů, ty se mezi sebou liší především dosahovanou přesností, která je přímo úměrná výpočetní náročnosti. Pro popis níže sepsaných metod byly využity informace ze zdroje [22] a [23].

5.2.1. Přímá numerická metoda

Metoda přímého numerického řešení (DNS) dosahuje při správném nastavení nejpřesnějších výsledků, jelikož řeší soustavy rovnic bez zjednodušení. Výpočetní síť pro tuto metodu musí být velice jemná, jelikož je nutné podchytit nejmenší víry. Takto jemná síť klade vysoké požadavky na parametry stroje, tyto požadavky se dále navyšují s rostoucím Reynoldsovým číslem. V inženýrské praxi se téměř nepoužívá.

5.2.2. Metoda velkých vírů

Metoda velkých vírů (LES) podobně jako metoda DNS řeší přímou simulaci velkých vírů, a to z důvodu, že právě hodnoty veličin rovnic zákonů zachování a rovnice pohybové jsou transportovány hlavně velkými víry. Tento přístup není výpočtově náročný jako metoda DNS, jelikož pro velké víry je dostačující hrubší síť, stále ale vyžaduje relativně vysoký výpočetní výkon, protože řeší nestacionární rovnice jako DNS. V praxi je využívána u speciálních úloh, kde metoda časového ustředění nedává dostatečně přesné výsledky.

5.2.3. Metoda časového ustředění pohybových rovnic

Jinak také Reynoldsovo ustředění NS rovnic (RANS) je nejméně výpočtově náročný přístup ze všech zmíněných, bohužel také dosahuje nejméně přesných výsledků. I přes nižší přesnost modelování turbulence je tato statistická metoda dostatečná pro mnoho inženýrských aplikací, už jen z důvodu, že ji lze použít na takové problematiku, které by pomocí DNS nebo LES nebylo možné efektivně řešit. Úlohy lze velmi často požadovat za stacionární bez výrazného omezení přesnosti výsledků.

Časovým ustředěním se myslí rozdělení dané hodnoty veličiny α na ustředěnou složku $\bar{\alpha}$ a na vířivou (flukтуаční) složku α' . Pro provedení těchto ustředění je nutné dodržovat pravidla středování. Zavedením rozkladu časového ustředění do NS rovnic zapříčiní vzniku nových členů pro popis turbulentního přenosu, tyto členy se nazývají Reynoldsova napětí [24].

Klasickým přístupem k řešení Reynoldsových napětí je Boussinesquova hypotéza. Tato hypotéza je použita v turbulentních modelech Spalart-Allmaras, $k-\omega$ a $k-\varepsilon$. Použití těchto modelů umožňuje využití sw ANSYS Fluent. Modely $k-\omega$ a $k-\varepsilon$ řeší, oproti jednorovnicovému Spalart-Allmaras, dvě dodatečné transportní rovnice a to jednu pro turbulentní kinetickou energii k a druhou pro specifickou rychlost disipace ω nebo rychlost disipace kinetické energie ε [24].

Pro účely této práce byl zvolen model SST $k-\omega$, který využívá výhod modelů $k-\omega$, které jsou vhodné pro proudění blízko stěn a $k-\varepsilon$, které lépe popisují proudění dále od stěn. Zmíněné modely jsou možné k detailnímu prostudování v publikacích [22], [23] a [25].

6. Provedení simulací

Vzhledem k tomu, že modely použité pro simulace jsou produktem společnosti Jablotron Alarms a.s. (dále jen Jablotron), je nutné respektovat obchodní tajemství. Proto je v této diplomové práci omezené zobrazení detailů produktů, kde je vidět jejich skladba a vnitřní zástavba. Další simulace byly provedeny mimo rozsah této práce v rámci smluvních projektů a některé poznatky z těchto simulací slouží pro zdokonalení zde zmíněných metodik a naopak.

Zjednodušení modelů čidel proběhlo v aplikaci SpaceClaim 2020 R2. Tato aplikace je výhodná na finální úpravy před tvorbou sítě, protože jsou zde nástroje pro zjištění možných chyb, se kterými by se velmi obtížně pracovalo při síťování. Některé úpravy geometrie a tvorby výkresů bylo výhodné provést v sw Autodesk Inventor Professional 2020.

Nastavení hlavních parametrů výpočtu proběhlo v prostředí sw ANSYS Fluent 2020 R2. Tato aplikace slouží pro vytvoření výpočtového modelu ze všech částí sítě, byla zde nastavena charakteristika použitých materiálů, rovnic, okrajových podmínek apod.

Generování výpočetní sítě proběhlo v sw ANSYS Fluent Meshing 2020 R2. Pro dosažení kritérií kvality, požadovaného vyhlazení a „proximity“ bylo nutné nastavit různé specifikace buněk prakticky na každé ploše modelů, což tato aplikace umožňuje a pro simulace v této práci naprosto dostačuje.

Pokud není k dispozici experiment a tedy reálná data vyšetřovaných veličin pro validaci výpočtů, je účelné provést studium nezávislosti sítě a verifikovat tak modely v závislosti na hrubosti sítě. Prakticky to představuje realizaci několika kontrolních výpočtů s různě hrubou sítí a zjištění optimálního nastavení sítě vzhledem k době výpočtu a spolehlivosti sledovaných veličin.

Pro správný průběh výpočtu je nutné dodržet určitá kritéria kvality sítě. Nekvalitní výpočetní síť obtížněji konverguje, tedy nedosahuje dostatečné hodnoty residuí a mnohdy neposkytuje ani fyzikálně platné výsledky. Síť pro kouřové a pohybové detektory byly hodnoceny dle parametrů „skewness“, „aspect ratio“ a „orthogonal quality“, jelikož tato tři kritéria kvality mají významný vliv na distribuci veličin mezi objemy elementů sítě.

- „Skewness“ – Tento parametr charakterizuje zkosení (nesouměrnost) elementů sítě a je v rozmezí 0 (nejlepší) až 1 (nejhorší). Výsledná síť by neměla dosahovat hodnoty větší než 0,9,
- „Aspect ratio“ – Hodnocení dle tohoto kritéria znamená hodnocení maximálního poměru stran (protažení) buněk. Tato hodnota by neměla být větší než 100,
- „Orthogonal quality“ – Toto měřítko kvality hodnotí kolmost buněk a dosahuje hodnot 0 (nejhorší) až 1 (nejlepší). Výpočetní síť lze považovat za kvalitní, pokud minimální hodnota kolmosti dosahuje hodnot větších než 0,1.

Sítě byly nastaveny jako konformní a mají tedy sdílenou topologii mezi všemi prvky sestavy. Objemy všech sítí jsou tvořeny polyhedrálními elementy (mnohostěny). Síť tvořená polyhedrálními buňkami je méně náchylná k protažení a disponuje vyšším počtem sousedních buněk, proto dosahuje vyšší přesnosti a stability, než kdyby byla tvořena čtyřstěny (tetrahedry). Dosahované přesnosti jsou srovnatelné dokonce s šestistěny (hexahedry).

Polyhedry lépe zaplní výpočetní doménu o složitých komplexních tvarech a to při zachování relativně dobré kvality sítě. Polyhedrální síť bude mít vždy méně elementů než hexahedrální nebo tetrahedrální, což má příznivý dopad na čas výpočtu, paměťové nároky jsou však srovnatelné.

7. Numerická simulace kouřového detektoru

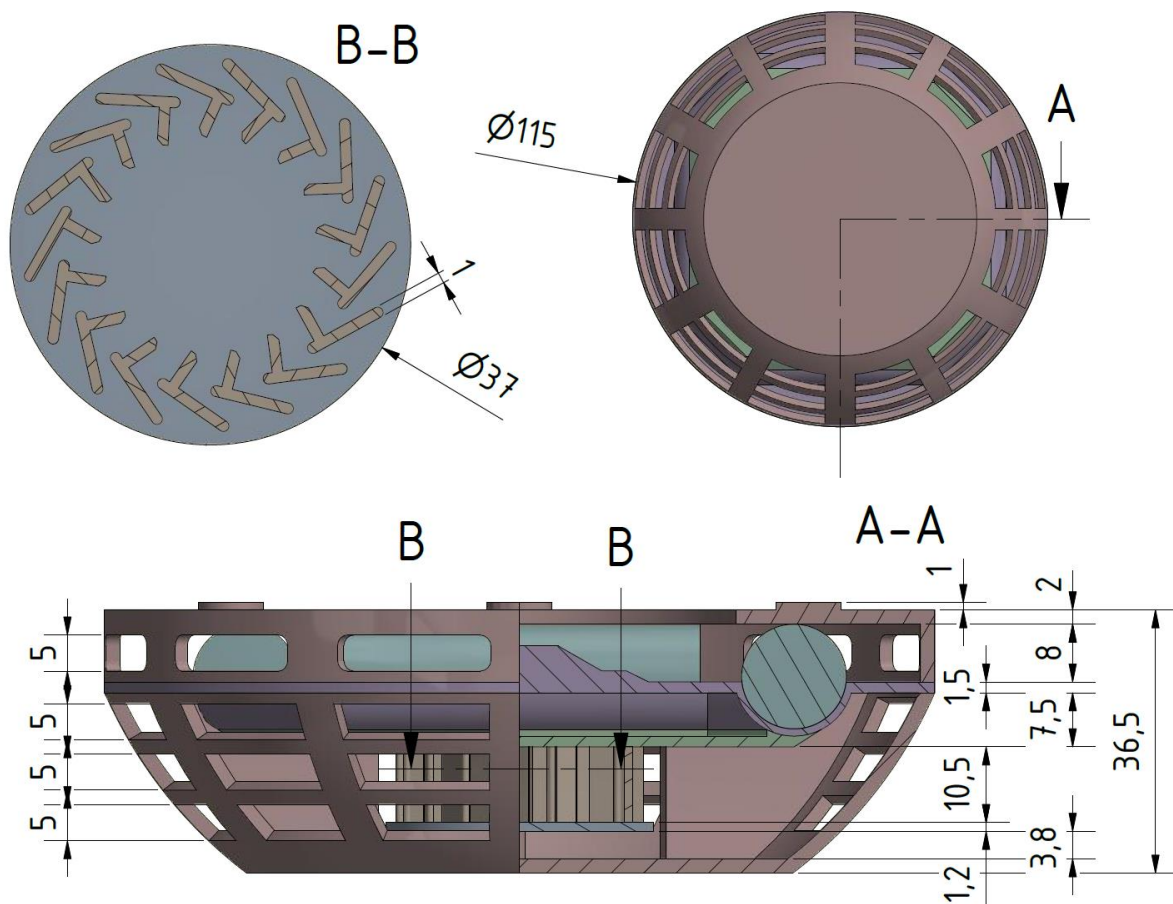
Z hlediska podmínek testování i provozu čidel je problematika jejich praktického modelování specifická. Cílem této diplomové práce je popsat metodiku modelování úloh s prouděním a sdílením tepla pro kouřové a pohybové detektory pro efektivní podporu vývoje těchto typů čidel.

Funkce těchto detektorů je do jisté míry ovlivněna konstrukcí a umístěním v prostoru. Pro kouřové detektory je hlavním cílem takový návrh konstrukce, který disponuje dostatečně rychlým plněním optické komory proudícím médiem.

Kouřový detektor svou konstrukcí ovlivňuje jak vnější, tak vnitřní proudění a je vždy nutné provést taková zjednodušení, která nezmění charakter úlohy. Vzhledem k ochraně interních dat společnosti Jablotron nebyly použity modely stávajících ani vyvíjených kouřových čidel, ale byl vytvořen obecný model, který respektuje patřičné náležitosti optického kouřového detektoru včetně vnitřní zástavby.

7.1. Výběr vhodné geometrie

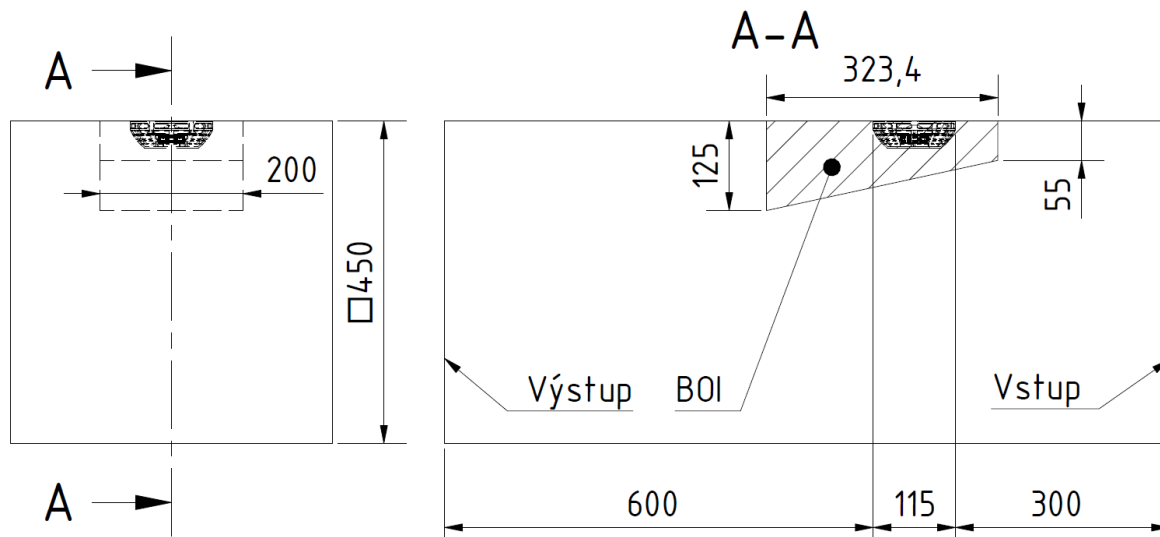
Geometrický model kouřového čidla vychází z reálných geometrií kouřových optických čidel. Vlastní návrh geometrie respektuje jak funkční požadavky, tak požadavky technické a technologické, tj. byl brán ohled na výrobu, rozebíratelnost, odolnost apod. Tento model čidla je ve formě zjednodušeného výkresu znázorněn na Obr. 19.



Obr. 19 Zvolený model kouřového čidla

Jelikož se tato práce zabývá metodikou modelování těchto čidel, byl model vytvořen s variabilní geometrií, která umožňuje uzavírání otvorů v čidle, náklon vstupních otvorů, umístění mřížky proti hmyzu (dále jen hmyzolap) a vyplnění prostoru mezi optickou komorou a horním dílem. Tato variabilita umožňuje srovnání vlivu zkoumaných změn geometrie na funkci detektoru.

Výpočetní prostor byl modelován dle parametrů zkušebního tunelu, kde je čidlo umístěno na svislé středové ose zadní stěny. Tento prostor je zobrazen na Obr. 20. Význam tělesa BOI bude popsán v kapitole 7.2.

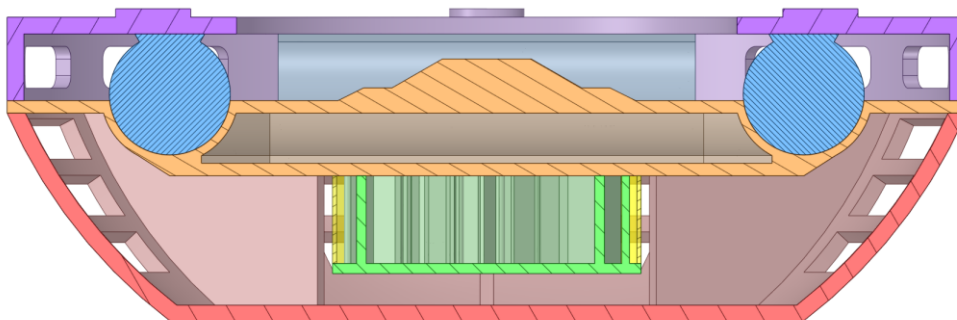


Obr. 20 Výpočetní prostor pro kouřové detektory

7.2. Návrh a popis zjednodušení modelů čidel

Zvolený model kouřového čidla bylo nutné před tvorbou sítě upravit tak, aby nebyl narušen charakter úlohy. Pozornost byla věnována především tečným povrchům, rozděleným hranám apod. Tyto geometrické záležitosti je nutné zjednodušit, jinak by v síti nastávalo lokální zhuštění či deformace buněk a s největší pravděpodobností by nebyla splněna kritéria kvality sítě, což by mohlo ovlivnit přesnost získaných výsledků a dobu výpočtu.

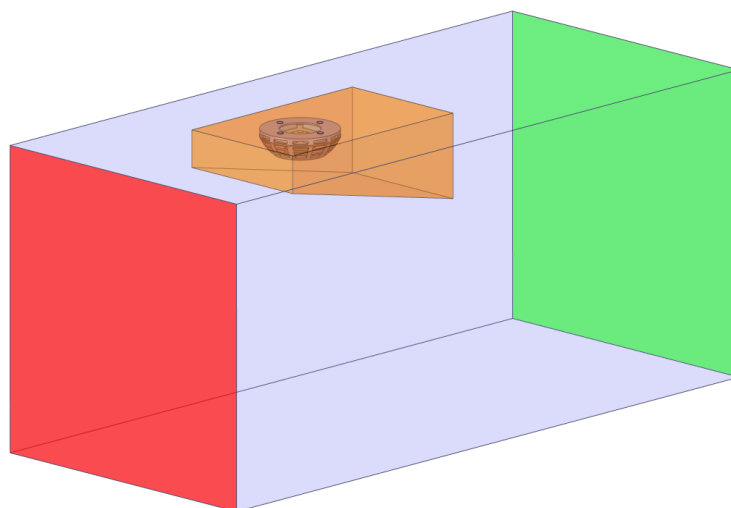
Zjednodušený model kouřového čidla je znázorněn na Obr. 21, kde je fialovou barvou označen dolní díl, modrou barvou baterie, oranžovou barvou montážní deska, zelenou barvou optická komora a červenou barvou horní díl. Horní díl obsahuje šest rovnoměrně rozmístěných žeber. Okolo optické komory je žlutě znázorněno možné umístění hmyzolapu (bude popsáno v sekci 7.3.2).



Obr. 21 Zjednodušený model kouřového čidla

Model kouřového tunelu vychází z požadavků normy, rozměry kouřového tunelu byly zadány společností Jablotron.

Cílem této úlohy není sledovat přestup tepla skrze stěny tunelu, proto byly do simulací převzaty pouze vnitřní plochy tunelu, které spolu s plochami výstupu a vstupu tvoří výpočtový prostor. Výpočtový prostor pro kouřový detektor je zobrazen na Obr. 22, kde je zelenou barvou označena plocha výstupu a červenou barvou plocha vstupu. Jelikož bylo očekáváno určité ovlivnění proudu v oblasti detektoru, bylo použito těleso BOI, které slouží jako hranice pro lokální nastavení síťování určité části objemu a používá se především pro zahuštění v oblastech, kde je předpokládána složitější struktura proudění.



Obr. 22 Zjednodušený model kouřového tunelu

7.3. Nastavení výpočtu

V souladu s rozborem v kapitole 7.4.2 byl jako turbulentní model zvolen model SST $k-\omega$. Úloha byla řešena jako nestlačitelné vícefázové proudění. Vícefázové proudění bylo nastaveno jako mísení (mixture), tedy byl použit homogenní model a to pro dvě fáze. Obě fáze jsou nastaveny jako proudící médium o stejném složení (viz Tab. 1). Pseudonestacionární výpočet, tedy výpočet řádově kratší stacionární úlohy pomocí ustalování nestacionární soustavy rovnic, byl spuštěn pouze s jednou fází, poté byla data z tohoto výpočtu vložena do nestacionárního řešení, kde byla vypuštěna druhá fáze. Následně byl sledován čas a rychlost plnění optické komory druhou fází. Tento postup je časově a výpočtově velice náročný, a to z důvodu nutnosti nestacionárního výpočtu s relativně malým časovým krokem.

Cílem této úlohy je zkoumání plnění optické komory proudícím médiem, především druhou fází. Proto byla snaha získat poznatky o plnění již ze stacionárního výpočtu pomocí zpětných proudnic (bude popsáno dále).

Součástí výpočtu není řešení přestupu tepla, proto byl výpočet proveden pouze na modelu proudové oblasti, energetická rovnice nebyla zahrnuta a gravitační zrychlení nebylo uvažováno.

Tab. 1 Specifikace proudícího média pro kouřový detektor

Použití	Proudící médium	Parametr	Hodnota	Jednotky
1. a 2. fáze	Vzduch	Hustota	1,1905	kg/m ³
		Viskozita	1,5309E-05	kg/(m*s)

7.3.1. Nastavení okrajových podmínek

Pro všechny simulace kouřového detektoru byly nastaveny shodné okrajové podmínky. Poloha vstupu a výstupu je znázorněna na Obr. 22.

Byl nastaven atmosférický tlak 101,325 kPa, dále byla nastavena intenzita turbulence 5 % a viskózní poměr 10.

Pro plochu vstupu byla nastavena rychlost proudění 0,2 m/s. Na plochu výstupu byl určen tlak 101,325 kPa (resp. aplikace ANSYS Fluent vyžaduje hodnotu přetlaku, ta byla nastavena na 0 Pa, protože operační tlak je nastaven na 101 325 Pa, v nestlačitelném proudění ($\rho = \text{konst.}$) je ovšem absolutní hodnota tlaku nedůležitá).

Pro povrchy byla definována podmínka nulové rychlosti na stěně.

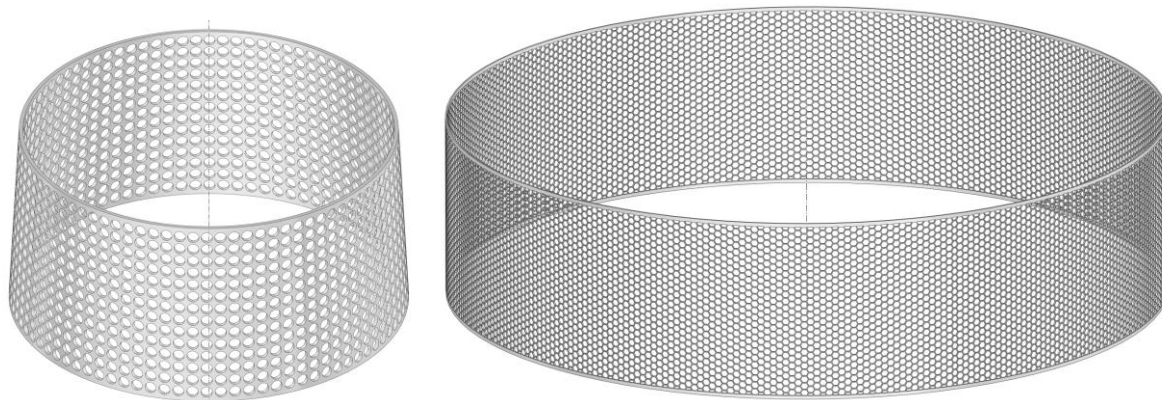
Okrajové podmínky nastavené pro kouřový detektor jsou shrnuty v Tab. 2.

Tab. 2 Okrajové podmínky pro simulaci kouřového detektoru

Popis	Parametr	Hodnota	Jednotky
Počáteční parametry	Atmosférický tlak	101,325	kPa
	Intenzita turbulence	5	%
	Viskózní poměr	10	[-]
Popis	Parametr	Hodnota	Jednotky
Vstupní hodnoty	Rychlost proudění	0,2	m/s
Popis	Parametr	Hodnota	Jednotky
Výstupní hodnoty	Tlak	101,325	kPa

7.3.2. Porézní médium

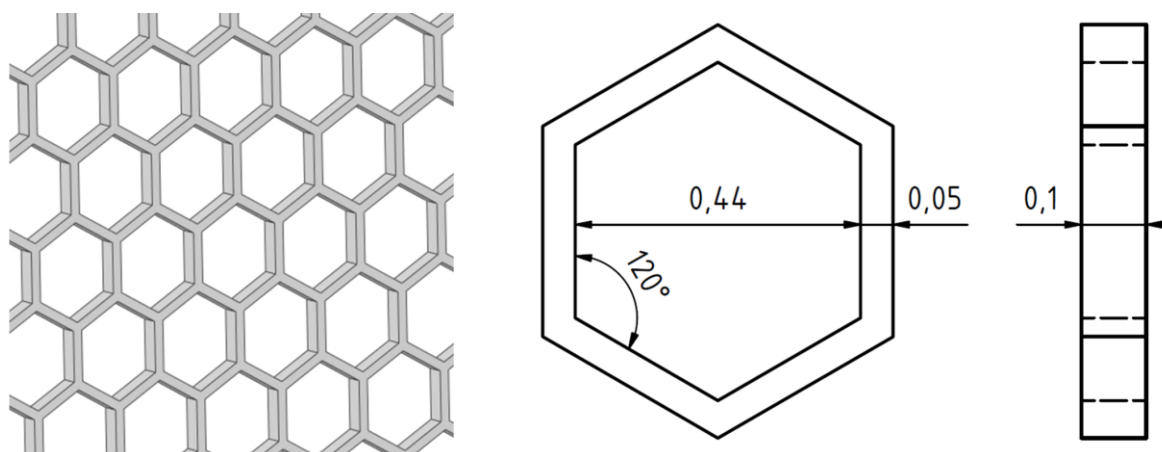
V kouřových čidlech je nutné zabránit hmyzu, aby vstoupil do optické komory, kde by mohl způsobit například planý poplach. Jedním z možných způsobů, jak zabezpečit optickou komoru proti hmyzu, je vložení mřížky s danými parametry, která propustí kouřové částice ale ne hmyz. Náhled na hmyzolapy, používané v kouřových detektorech je na Obr. 23.



Obr. 23 Hmyzolapy pro kouřové detektory

Používané mřížky disponují malými otvory a tenkou stěnou, tyto modely nelze více zjednodušit. Protože při generování testovací sítě bylo potvrzeno očekávané vysoké zahuštění elementů v oblasti hmyzolapu, bylo pro jeho zohlednění využito náhradní porézní médium, které svými vlastnostmi hmyzolap dostatečně nahrazuje a nedochází přitom k výraznému lokálnímu zahuštění v síti.

Pro účely této práce byl zvolen hmyzolap se stejným vzorem mřížky jako se používá v produkčních detektorech, tato mřížka je zobrazena na Obr. 23 vpravo, detailněji na Obr. 24.

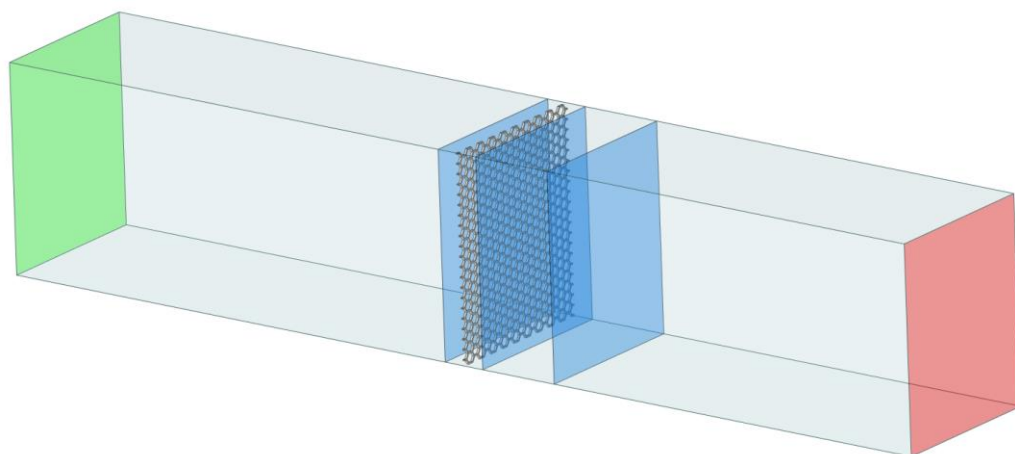


Obr. 24 Zvolená geometrie hmyzolapu

Pro správné nastavení porézní domény je nutná znalost tloušťky porézní složky (Δn), hodnoty porozity, setrvačného odporu (C_2) a viskózní resistance ($1/K_{\text{perm}}$). Porosita je definována jako poměr objemu otvorů a objemu celkového, její hodnota je tedy v rozmezí 0 až 1 a lze ji snadno zjistit z dostupné geometrie. Stanovení hodnoty inertní resistance a permeability je složitější a vyžaduje znalost závislosti tlakové ztráty na rychlosti v dané doméně. Dle [26] lze tuto závislost extrapolovat pro zjištění hodnoty hledaných koeficientů inertní resistance a permeability.

Bylo provedeno pět stacionárních výpočtů pro pět různých rychlostí. Výpočty byly provedeny v testovacím modelu. Vzor z mřížky (viz Obr. 24) válcového tvaru byl aplikován

do rovinné desky o stejné tloušťce, která byla vložena doprostřed hranolu o rozměrech 8,33x10,01x50,1 mm, před i za deskou je tedy 25 mm ($\Delta n = 0,1$ mm). Testovací konfiguraci je možné zhlédnout na Obr. 25, kde je červenou barvou označen vstup, zelenou barvou výstup a modrou barvou kontrolní plochy měření, které budou součástí sítě.



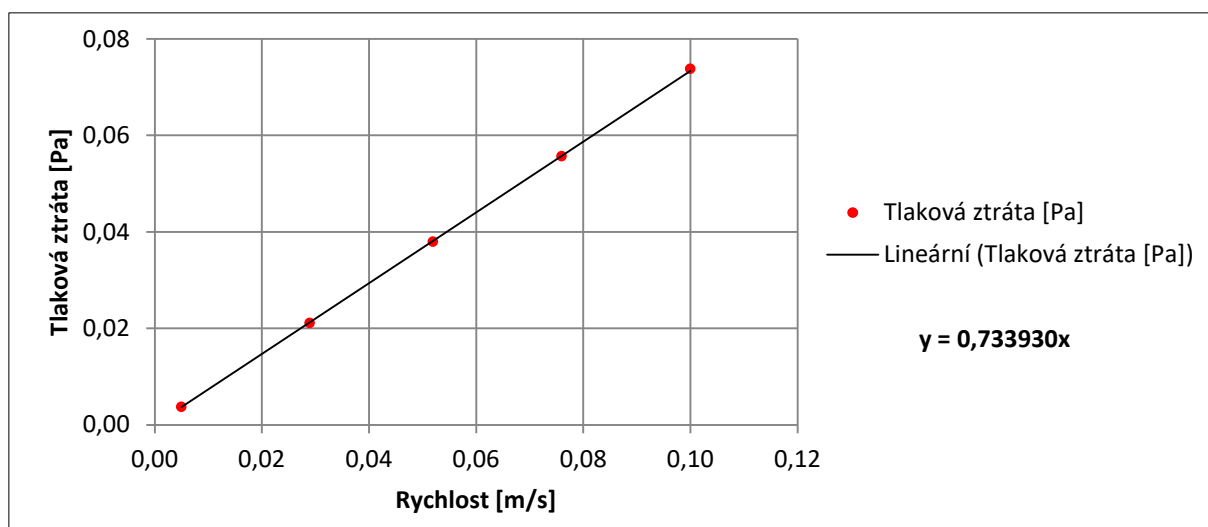
Obr. 25 Testovací model pro porézní médium

Nastavení řešiče je shodné s nastavením pro kouřový detektor, viz kapitola 7.3. Zjištěné hodnoty tlakové ztráty jsou zobrazeny v Tab. 3.

Rychlosti byly odhadnuty z výpočtů na obdobných modelech.

Tab. 3 Přehled získaných hodnot tlakové ztráty

Rychlost [m/s]	Tlaková ztráta [Pa]
0,005	0,004
0,029	0,021
0,052	0,038
0,076	0,056
0,100	0,074



Graf 1 Závislost tlakové ztráty na rychlosti v porézním médiu

Všech pět bodů (viz Graf 1), velice dobře propojuje lineární regrese. Pokud je ve sledované oblasti pokles tlaku úměrný především rychlosti, nejedná se tedy v oblasti mřížky o

turbulentní proudění a lze považovat hodnotu koeficientu C_2 rovnou nule. Tímto zjednodušením se popis porézního média zredukuje na Darcyho zákon:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K_{perm}} \vec{w} \quad (8)$$

Z grafu proloženým lineární spojnici trendu plyne závislost:

$$\Delta p = 0,73393 w \quad (9)$$

Hybnost v homogenním porézním médiu je dle [26] popsána vztahem:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{K_{perm}} w_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |w| w_i\right) \quad (10)$$

Jak již bylo zmíněno, hodnota koeficientu C_2 je díky lineární závislosti uvažována jako nula. Poté lze psát $\Delta p = -S_i \cdot \Delta n$ nebo $\nabla p = S_i$. Porovnáním rovnic (9) a (10) dostáváme:

$$\frac{1}{K_{perm}} = \frac{0,73393}{\mu \Delta n} = \frac{0,73393}{0,000015309 \cdot 0,0005} \doteq 95\,882\,112,48 \quad (11)$$

Vstupní koeficienty do nastavení porézní zóny jsou přehledně zobrazeny v Tab. 4.

Tab. 4 Vlastnosti porézní domény

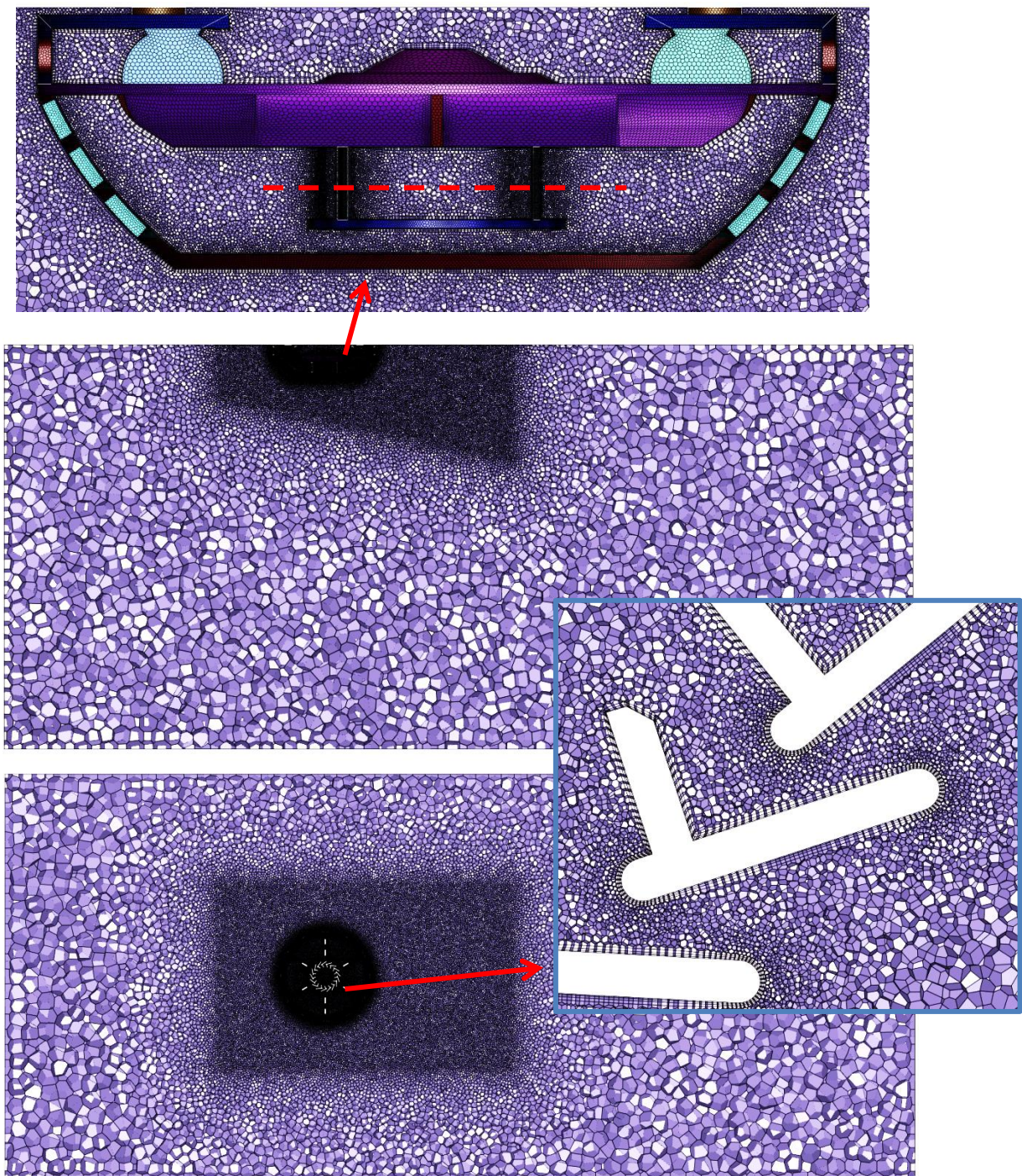
Veličina	Popis	Hodnota	Jednotky
Porosita		0,808	[-]
Permeabilita	směr x	95 882 112,48	[1/m ²]
	směr y	95 882 112,48	[1/m ²]
	směr z	95 882 112,48	[1/m ²]
Inertní resistence	směr x	0	[1/m]
	směr y	0	[1/m]
	směr z	0	[1/m]

Ze zjištěných hodnot tlakové ztráty lze snadno vypočítat, že geometrie hmyzolapu klade jistý odpor (tj. hmyzolap je relativně propustný), který nejspíše nebude velkou překážkou pro proud. Toto zjištění ovšem neopravňuje k obecnému zanedbání těchto mřížek, jelikož jiná geometrie může vykazovat jiné vlastnosti.

7.4. Příprava CFD modelů kouřových čidel

Nastavení sítě pro kouřové detektory bylo odladěno na obdobných modelech, které byly řešeny mimo rozsah této práce. Všechny sítě, vytvořené pro různé modifikace, dosahují dobré kvality.

Náhled na síť základní varianty (pracovně označen mod_1), na které bude zkoumán vliv různých turbulentních modelů, je na Obr. 26.



Obr. 26 Náhled sítě základní varianty / mod_1

Síť základní varianty obsahuje 6 769 953 polyhedrálních elementů a její kvalita respektuje obecné požadavky. Vlastnosti sítě jsou shrnuty v Tab. 5.

Tab. 5 Vlastnosti sítě základní varianty

Popis	Označení	Hodnota	Jednotky
Parametry sítě mod_1	Skewness max	0,79	[-]
	Skewness avg	0,07	[-]
	Orthogonal min	0,21	[-]
	Aspect ratio max	33,81	[-]
	Aspect ratio avg	3,14	[-]
	Počet elementů	6 769 953	[ks]

7.4.1. Porovnání modelů turbulence

V této kapitole je popsán výběr modelu turbulence, který bude dostatečně robustní při výpočtu a zároveň bude poskytovat důvěryhodné výsledky sledovaných veličin.

Přechod z laminárního do turbulentního proudění je definován pomocí Reynoldsova bezrozměrného čísla, viz rovnice (12). Na základě Reynoldsova experimentu zkoumání stability proudění v kruhovém potrubí byla definována hranice přechodu laminárního proudění do turbulence při kritickém Reynoldsovo čísle $Re_{KR} \approx 2320$. Platí-li $Re_{KR} < Re < 10^5$, nelze jistě rozhodnout o typu proudění a jedná se o tzv. přechodovou oblast. Je nutné si uvědomit, že turbulence může existovat i v nižších hodnotách, než je uvedená hranice, záleží totiž na různých faktorech a to zejména drsnosti stěn, ořesech apod. [21]. Na základě zkušeností a obdobných CFD výpočtů je často uvažována hranice přechodu do turbulence při $Re > 10^4$.

$$Re = \frac{w \cdot D_{ek}}{\nu} = \frac{\rho \cdot w \cdot D_{ek}}{\mu} \quad (12)$$

Jako ekvivalentní náhrada průměru (D_{ek}) pro nekrhové průřezy byl uvažován hydraulický průměr. Hydraulický průměr pro obdélníkový průřez je definován vztahem níže a pro čtvercový průřez výpočtového prostoru se redukuje na délku strany průřezu.

$$D_{ek} = D_H = \frac{2ab}{a+b} \quad (13)$$

Jelikož jsou známy všechny parametry pro výpočet Re na vstupu do výpočetního prostoru, bylo Re stanoveno dle rovnice (14). Z výsledné hodnoty Re nelze zcela rozhodnout, o jaké proudění se jedná, proto byly provedeny výpočty s různými turbulentními modely. U výpočtů byla sledována jejich konvergence, hodnoty bilance hmoty a vliv na charakter proudění média skrze detektor.

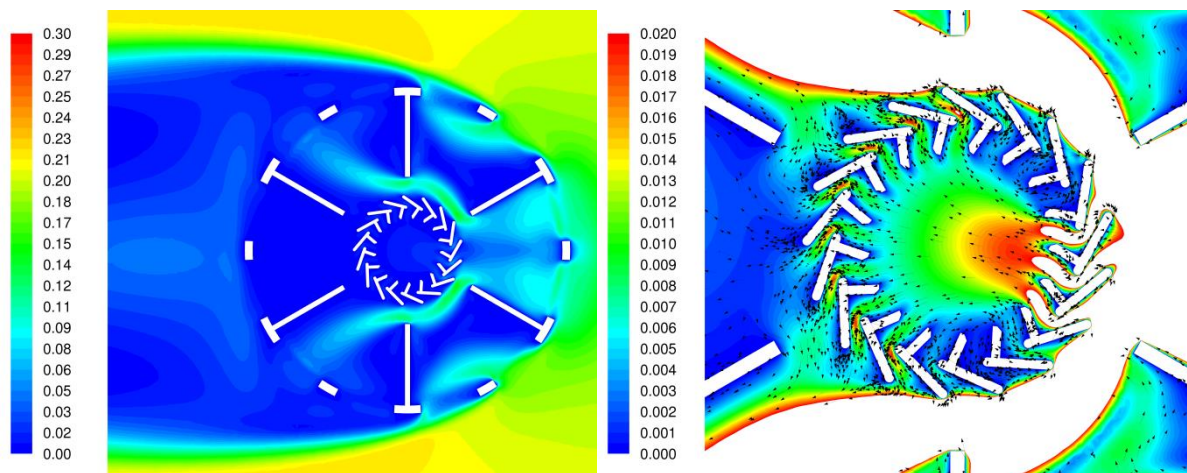
$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot D_{ek}}{\mu} = \frac{1,1905 \cdot 0,2 \cdot 0,45}{1,5309 \cdot 10^{-5}} = 6998,8 < 10^4 \quad (14)$$

Bylo porováno celkem pět turbulentních modelů, které sw ANSYS Fluent nabízí. Jedná se o dvourovnicové modely $k-\omega$ SST, $k-\varepsilon$ „Standard“, $k-\varepsilon$ „RNG“ a $k-\varepsilon$ „Realizable“, pro porovnání byl také proveden výpočet čtyřrovnicového modelu „Transition“ SST. Podrobný popis turbulentních modelů užitých v této práci je možný nastudovat v [26] a [25].

Pro srovnání testovaných modelů turbulence byly využity vybrané kontury rychlostí uvedené v dalších kapitolách. Kontury jsou zobrazeny na rovinách popsanych v kapitole 7.5. Směr proudění je zprava doleva.

7.4.1.1. Model $k-\omega$ SST

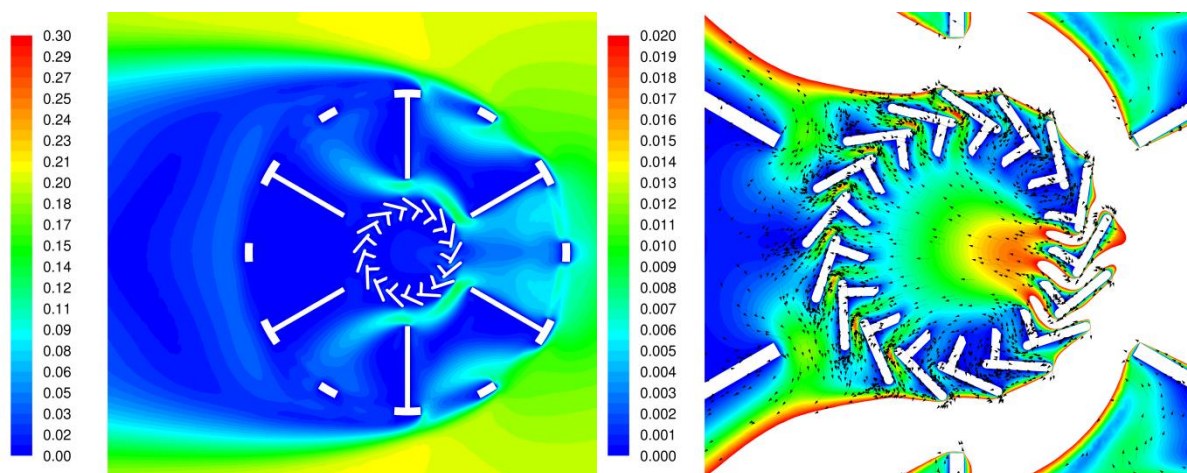
Jak již bylo řečeno, model SST $k-\omega$, využívá výhod modelu $k-\omega$, pro proudění blízko stěn a $k-\epsilon$, který lépe popisuje proudění ve volném prostoru. ANSYS Fluent umožňuje pro tento model využití korekce „Low-Re“, která upravuje řešení transportních rovnic pro nižší Re. Provedená simulace s touto korekcí se prakticky nelišila od úlohy bez ní a v této práci tedy není prezentována. Vybrané kontury rychlosti lze zhlédnout na Obr. 27.



Obr. 27 Kontury rychlosti modelu $k-\omega$ SST

7.4.1.2. Model $k-\epsilon$ „Standard“

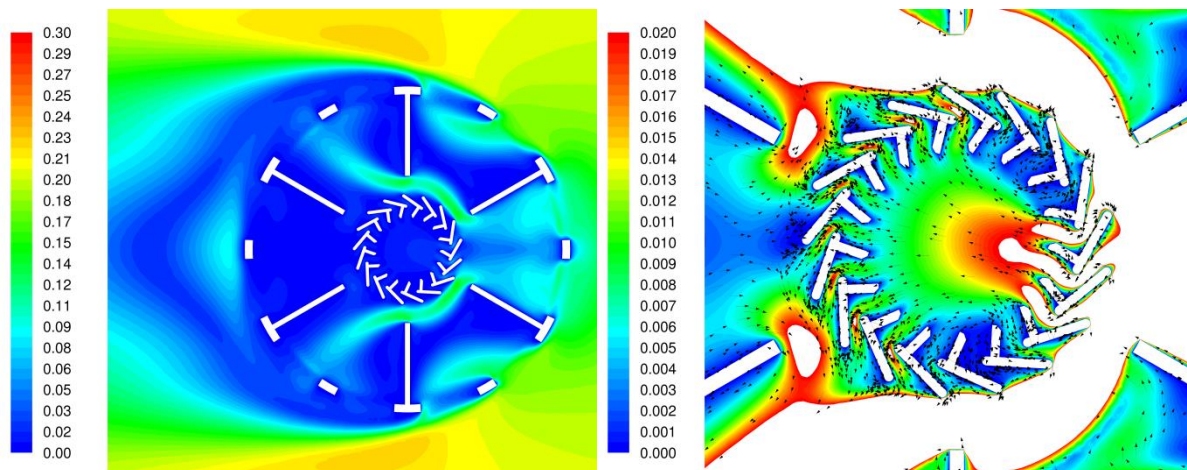
Velice známý model, využívaný dříve díky své robustnosti, rychlosti výpočtu a přesnosti pro širokou škálu simulací. Tento model je doporučeno využívat při vyšších Re, kdy je proudění turbulentní a lze zanedbat vliv molekulární vazkosti. Jak již bylo řečeno, v této úloze se nejspíše nevyskytuje plně vyvinuté turbulentní proudění, a proto je zde tento model zobrazen jen pro porovnání, viz Obr. 28. V praxi se tento model využívá již jen zřídka.



Obr. 28 Kontury rychlosti modelu $k-\epsilon$ „Standard“

7.4.1.3. Model k - ϵ RNG

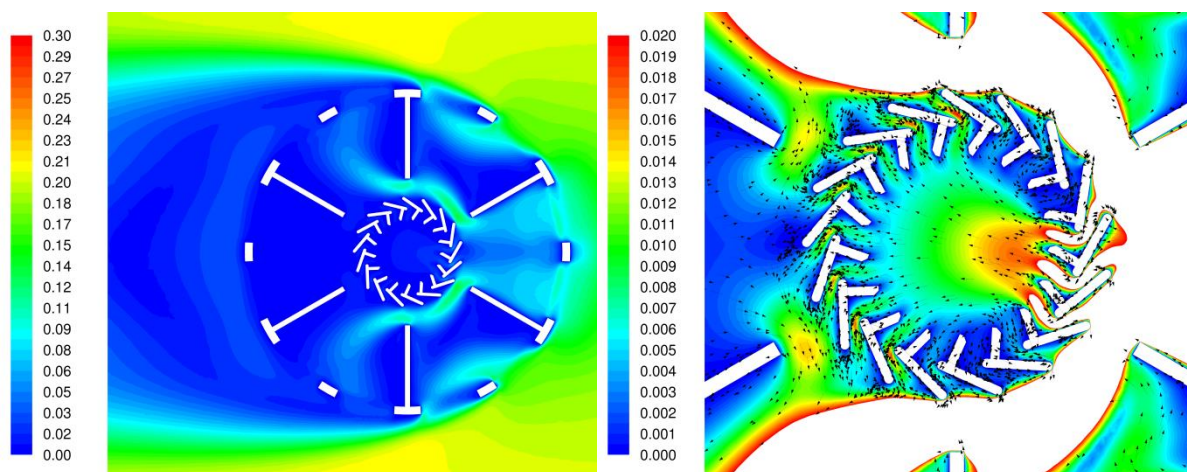
Tento model je model k - ϵ „Standard“ upravený pomocí statistické metody renormalizačních skupin. Oproti modelu standard využívá několik vylepšení, které dělají model RNG přesnější a spolehlivější pro širší rozsah typů proudění. Pro případy nižších Re umožňuje tento model využití diferenciální rovnice pro výpočet turbulentní vazkosti, která by se jinak počítala stejným způsobem jako u modelu „Standard“. Protože se v této úloze vyskytuje nižší Re , byla tato korekce využita. Vybrané kontury rychlosti lze zhlédnout na Obr. 29.



Obr. 29 Kontury rychlosti modelu k - ϵ RNG

7.4.1.4. Model k - ϵ „Realizable“

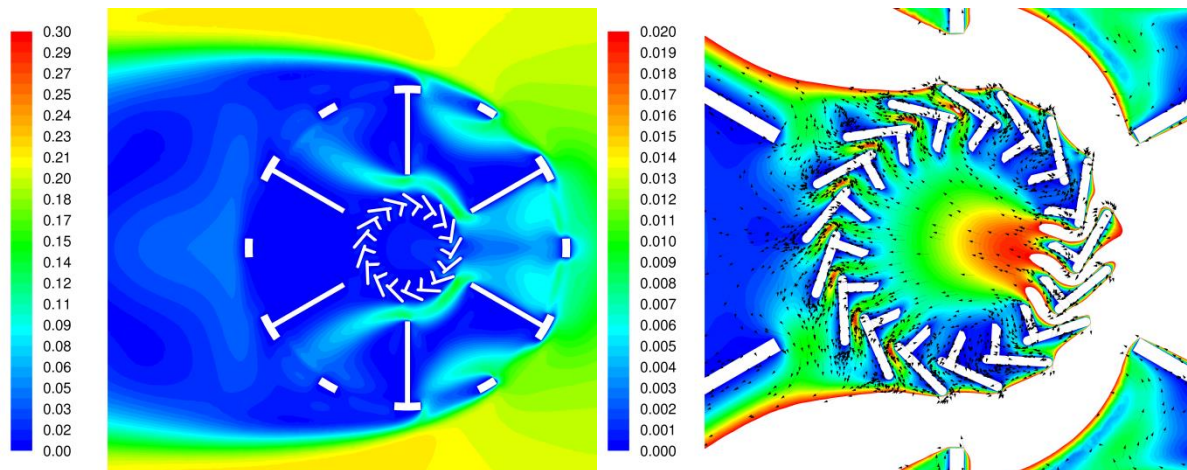
Model „Realizable“ je nejnovější z k - ϵ modelů. Výpočet transportní rovnice pro ϵ a turbulentní vazkosti využívá jiné formulace než model „standard“, díky těmto odlišnostem by tento model měl poskytovat fyzikálně přesnější řešení Reynoldsových napětí. Studie prokazují, že oproti výše zmíněným k - ϵ modelům disponuje vysokým výkonem, což je hlavní důvod častých doporučení pro jeho užití. Náhled na výsledky simulace je možný na Obr. 30.



Obr. 30 Kontury rychlosti modelu k - ϵ „Realizable“

7.4.1.5. Model „Transition“ SST

Oproti ostatním výše zmíněným modelům je tento model čtyřrovnicový, tedy k řešení transportních rovnic využívá obdobné principy jako model SST $k-\omega$ spolu s dalšími dvěma rovnicemi. Toto vylepšení vzniklo ve snaze modelování přechodových stavů proudění a to hlavně v blízkosti stěny. Náhled na výsledek simulace je možný na Obr. 31.



Obr. 31 Kontury rychlosti modelu „Transition“ SST

7.4.2. Zhodnocení turbulentních modelů

Všechny modely dosahovaly velice dobré konvergence residuí, sledovaná nerovnováha protékající hmoty byla pro všechny modely velice nízká.

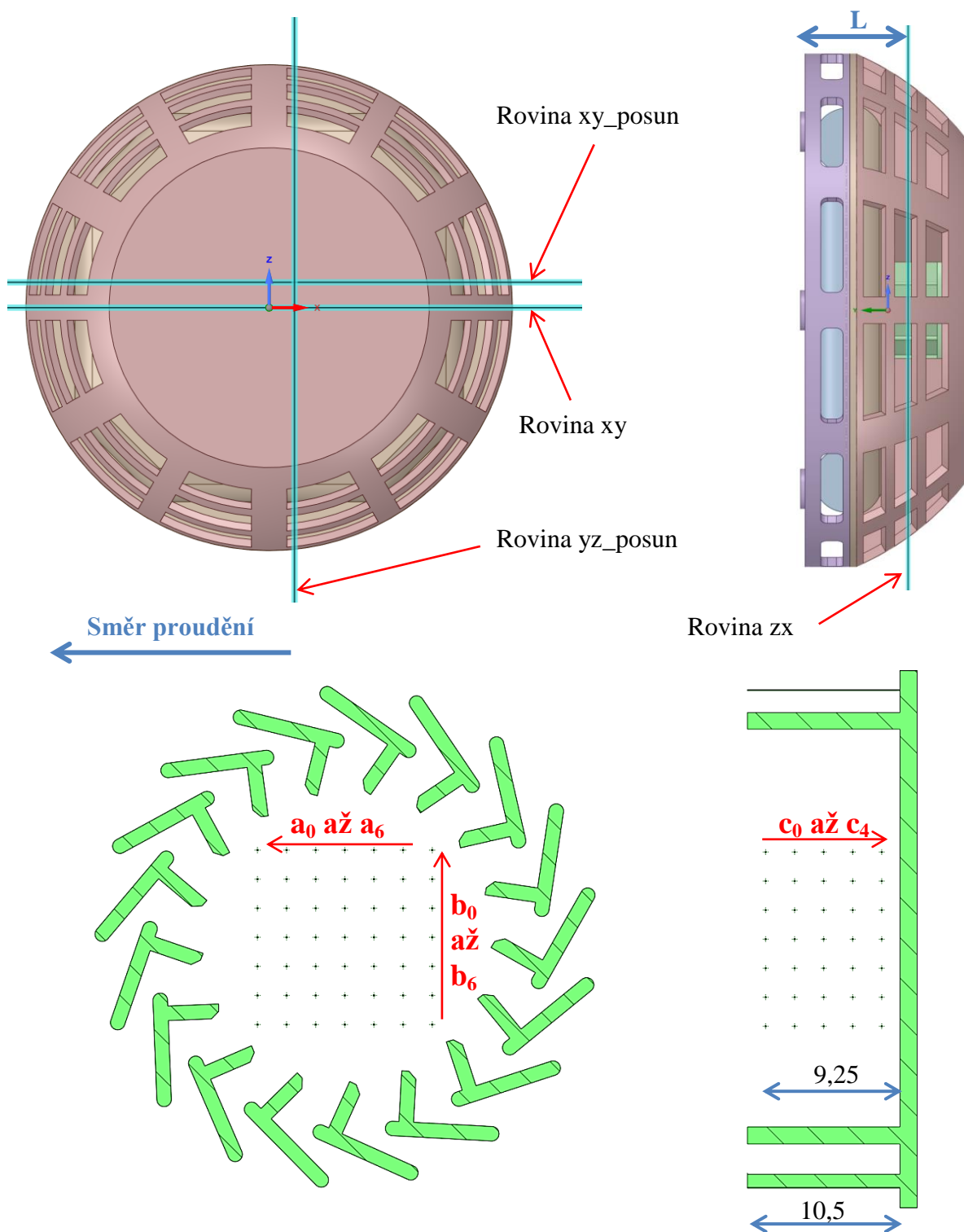
Z výše uvedeného srovnání lze vyzorovat značnou podobnost mezi modely $k-\omega$ a mezi modely $k-\varepsilon$. U modelu $k-\varepsilon$ RNG bylo v optické komoře dosaženo mírně vyšších hodnot rychlosti.

Vzhledem k předchozím výsledkům, době výpočtu a jeho stabilitě byl jako výchozí model turbulence pro kouřové detektory zvolen model SST $k-\omega$, jenž představuje klasický inženýrský přístup pro velké množství CFD výpočtů. Sledované hodnoty residuí byly pro tento výpočet nejnižší ze všech testovaných úloh a navíc bylo efektivní použití tohoto modelu ověřeno také na jiných geometriích kouřových čidel, které byly řešeny mimo rozsah této práce.

7.5. Metodika vyhodnocení kouřových čidel

V této kapitole je popsána metodika vyhodnocování kouřových čidel.

Na náhledu níže (Obr. 32) jsou znázorněny roviny a body, které slouží pro vyhodnocení výsledků. Rozložení rovin je shodné pro všechny modifikace. Rovina zx je ve vzdálenosti $L = 24$ mm. Body v optické komoře slouží pro vyhodnocení pomocí proudnic. Body jsou od sebe vzdálené 2 mm a tvoří 3D matici.



Obr. 32 Metodika vyhodnocení kouřových čidel

7.6. Simulace modelů čidel pro různé podmínky

Jak již bylo řečeno, zvolený základní postup pro získání času plnění optické komory nebo kouřového detektoru vede k nestacionárnímu řešení, kdy je nutné vypustit druhou fázi o stejném složení jako fáze první a následně sledovat její šíření v prostoru. Toto řešení je velice časově náročné a to hlavně z důvodu nutnosti výpočtu, který slouží jako inicializace pro nestacionární výpočet, nestacionárního předpočtu před vypuštěním druhé fáze (doporučuje se provádět) a vlastního nestacionárního výpočtu s relativně malým časovým krokem. V neposlední řadě je potřeba uvažovat s možností ukládání jednotlivých datových souborů, které mohou sloužit pro kontrolu nebo vyhodnocení výsledků. Tyto soubory mohou vyžadovat až stovky GB úložného prostoru.

Pro efektivní podporu vývoje těchto typů čidel byla snaha získat představu o plnění již ze stacionárního výpočtu. Dobře provedený výpočet povede k úspoře výpočetního času, což je výhodné z mnoha důvodů, především pak z ekonomického hlediska pro zadavatele.

Výsledky z nestacionární úlohy byly porovnány se stacionárním řešením. Pro co největší názornost jsou výsledky v této práci zobrazeny především na rovině zx .

Čas plnění z nestacionární úlohy byl sledován, na základě šíření druhé fáze, z vytvořené sekvence kontur pro jednotlivé časové kroky. Dále byl také sledován podíl vypuštěné fáze v 3D matici bodů uvnitř optické komory v závislosti na čase. Pro zjištění času plnění ze stacionárního výpočtu slouží zpětné proudnice, které byly vypuštěny ze stejných bodů uvnitř optické komory. ANSYS Fluent umožňuje zobrazení času pro zpětné proudnice mezi vypuštěným bodem a vstupem.

Nastavení nestacionárního výpočtu je uvedeno v Tab. 6. Je možné si povšimnout, že bylo počítáno celkem 14 s, přičemž druhá fáze byla vypuštěna v páté sekundě. Velikost časového kroku byla zvolena s ohledem na velikost výpočetního prostoru, velikost buněk v síti a očekávané rychlosti.

Důvod rozdělení výpočtu po předpočtu do dvou skupin je ten, že pro 40 časových kroků byl ukládán každý desátý datový soubor s výsledky a pro dalších 140 časových kroků každý druhý, jelikož není důležité monitorovat distribuci vypuštěné fáze před detektorem ale především uvnitř.

Tab. 6 Přehled nastavení nestacionárního výpočtu kouřového detektoru

	Časový krok [s]	Počet kroků	Simulovaný čas [s]
Předpočet	0,05	100	5
Vypuštění 2. fáze	0,05	40	2
Dodatek	0,05	140	7

Nestacionární výpočet byl nejprve proveden na základní variantě (mod_1) a dalších dvou modifikacích modelu základní varianty (mod_2 a mod_3). Veškeré modifikace jsou postupně přiblíženy v následujících kapitolách. Tři nestacionární výpočty slouží, mimo jiné, pro ověření metodiky vyhodnocení času plnění pomocí zpětných proudnic. Tato metodika byla dále ověřena na jedné další modifikaci (mod_5).

7.7. Analýza získaných výsledků

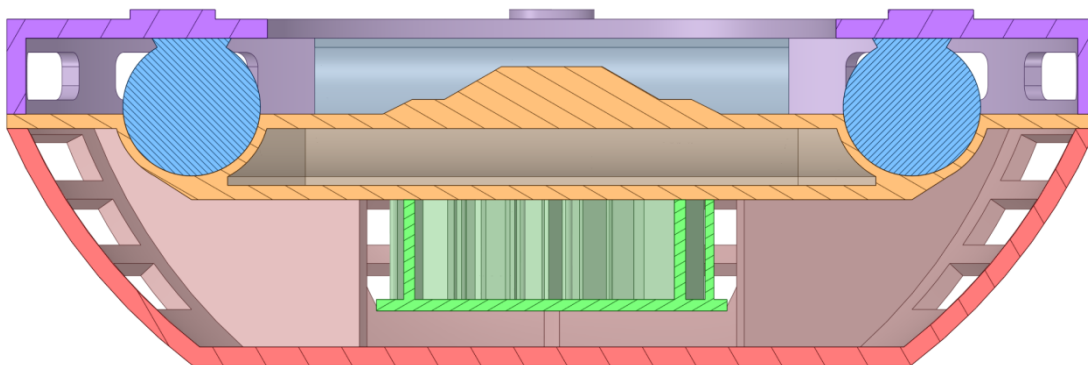
V této kapitole jsou postupně představeny vytvořené modely kouřových detektorů a výstupy z jejich simulací.

7.7.1. Návrh variant výpočtu

Bylo navrženo celkem šest variant. Na těchto variantách byl zkoumán vliv jejich geometrických úprav vzhledem k plnění optické komory.

7.7.1.1. Základní model – mod_1

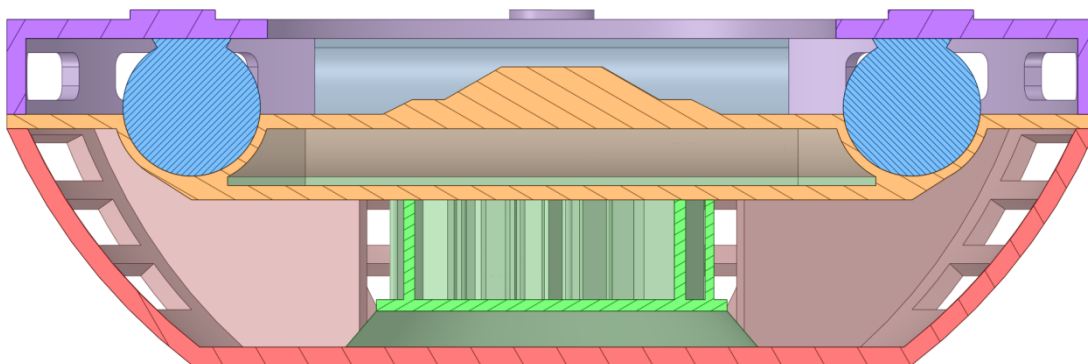
Tento model již byl dostatečně popsán v kapitole 7.1 a slouží jako referenční základní varianta, ze které vychází ostatní modifikace. Náhled na řez geometrickým modelem je na Obr. 33.



Obr. 33 Základní model kouřového detektoru – mod_1

7.7.1.2. Modifikace I – mod_2

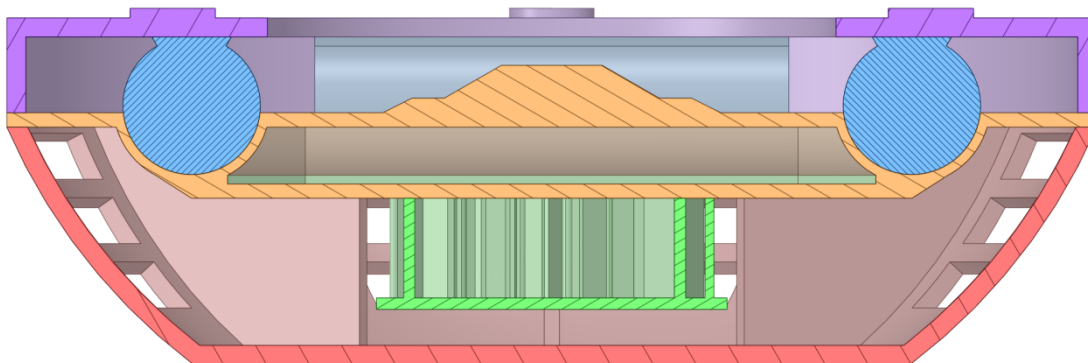
První modifikace obsahuje vloženou plochu pro uzavření prostoru nad optickou komorou (viz Obr. 34). Uzavření tohoto prostoru má mít vliv na proudění uvnitř detektoru, v dalších kapitolách je tento vliv posouzen.



Obr. 34 Uzavření prostoru nad optickou komorou – mod_2

7.7.1.3. Modifikace II – mod_3

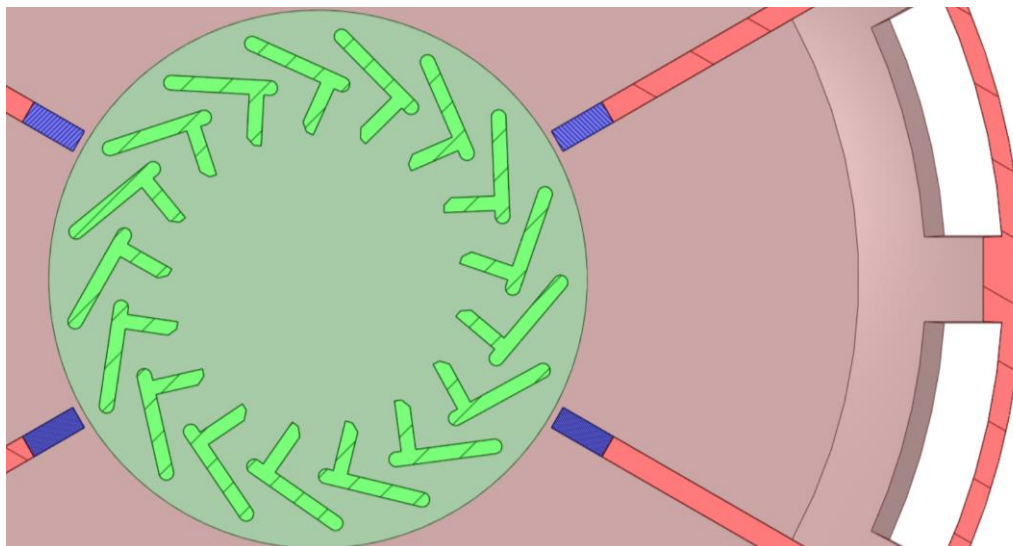
Třetí varianta má uzavřené otvory v dolním díle, které ovlivňují vstup proudu do detektoru u stěny stropu. Tato varianta je v řezu k nahlédnutí na Obr. 35.



Obr. 35 Uzavření otvorů v dolním díle – mod_3

7.7.1.4. Modifikace III – mod_4

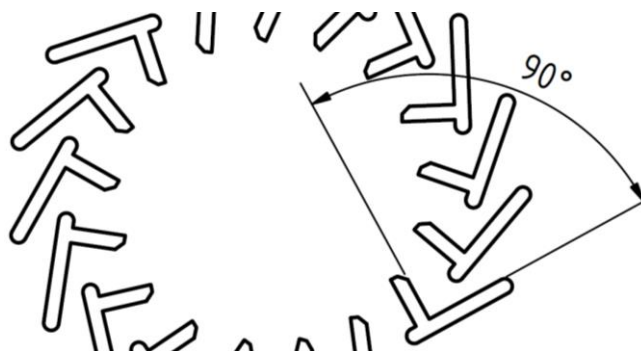
U výpočtu základního modelu byla pozorována místa mezi optickou komorou a žebry, kde může médium relativně snadno proudit. Zúžením tohoto prostoru (prodloužením žebry), bude proud intenzivněji nucen vstoupit do optické komory. Tato varianta je znázorněna na Obr. 36, kde je modrou barvou zvýrazněno popisované prodloužení.



Obr. 36 Prodloužení žebry horního dílu – mod_4

7.7.1.5. Modifikace IV – mod_5

Varianta IV obsahuje modifikovanou optickou komoru. Lamely v optické komoře základní varianty svírají úhel 90° (viz Obr. 37), v modifikované geometrii byl úhel upraven na 100° a lamely jsou tak více otevřeny. Otevření lamel výrazně ovlivní plnění optické komory.

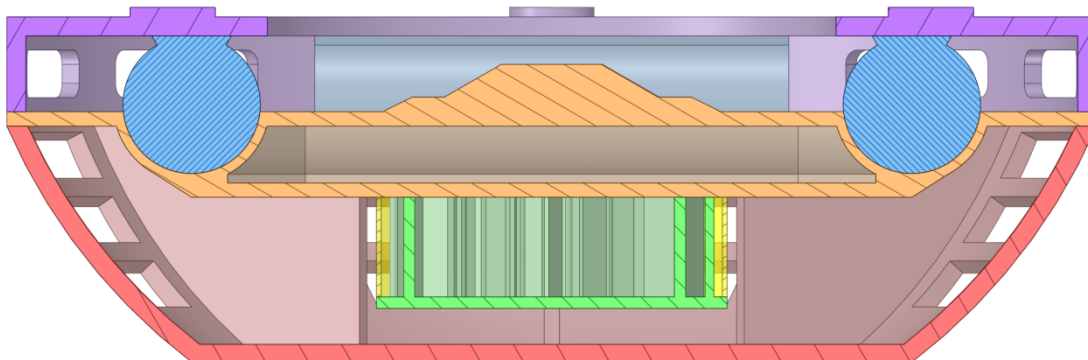


Obr. 37 Změna úhlu lamel optické komory – mod_5

7.7.1.6. Modifikace V – mod_1_porous

Poslední varianta slouží pro posouzení vlivu hmyzolapu modelovaným pomocí porézního média. Porézní médium bylo nastaveno dle kapitoly 7.3.2.

Konfigurace je zobrazena na Obr. 38.



Obr. 38 Základní model s porézním médiem – mod_1_porous

7.7.2. Výsledky variant

Pro vzájemné srovnání variant byla provedena analýza plnění detektoru a optické komory kouřem resp. druhou fází z vytvořené sekvence vybraných kontur získaných z nestacionárních výpočtů. Zároveň byl sledován vývoj koncentrace resp. objemového podílu druhé fáze v kontrolních bodech v optické komoře. Důležité je podotknout, že šíření druhé fáze nemá pevné rozhraní s první fází. Tento postup byl použit jako výchozí metoda. Pro posouzení možnosti hodnotit plnění i na základě časově výrazně úspornějších stacionárních výpočtů bylo dále také zhodnoceno použití zpětných proudnic vypuštěných z celkem 245 bodů uvnitř optické komory detektoru. Cílem bylo posoudit obě metody vyhodnocení a ověřit korelaci mezi výsledky.

Výsledky získané v 3D matici definovaných bodů uvnitř optické komory byly statisticky vyhodnoceny pomocí mediánu, který dobře zohledňuje postupné plnění komory. Takto získaná hodnota času je, pro větší přehlednost, dále označována jako „hlavní“ čas.

7.7.2.1. Základní model – mod_1

Ze stacionárního výpočtu byly získány hodnoty času zpětných proudnic pro všechny body matice, z těchto hodnot byl vyhodnocen medián, průměr, maximum a minimum. Hodnoty zmíněných veličin jsou seřazeny v Tab. 7.

Tab. 7 Časy ze stacionárního výpočtu – mod_1

	Hodnota	Jednotky
Minimum	2,776	s
Maximum	7,649	s
Průměr	4,096	s
Medián	3,912	s

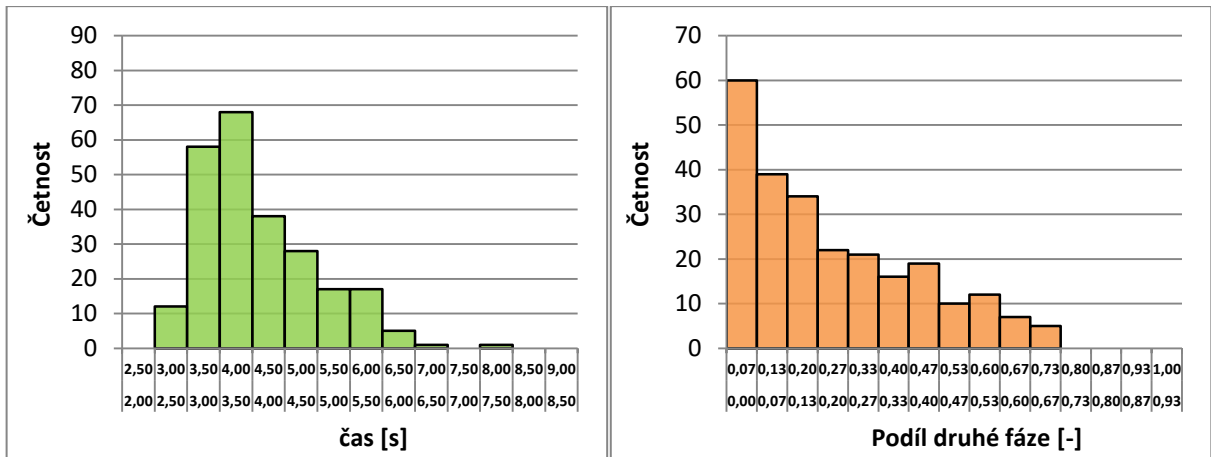
Z nestacionárního výpočtu byly ve všech časových krocích získány kontury vybraných veličin v definovaných řezech a hodnoty objemového podílu druhé fáze pro všechny body matice. Pro srovnání se stacionárním výpočtem byly analyzovány hodnoty objemového podílu pro medián času zpětných proudnic z Tab. 8. Pro daný čas 3,9 s je medián objemových podílů druhé fáze 0,181, tedy 18,1 %. Pro získání lepší představy o časovém vývoji plnění komory jsou uvedeny také hodnoty podílů po půl vteřinách před a po hlavním čase 3,9 s.

Tab. 8 Koncentrace z nestacionárního výpočtu – mod_1

Čas	Hodnota v čase					Jednotky
	2,9	3,4	3,9	4,4	4,9	
Minimum	0,000	0,000	0,005	0,026	0,086	[-]
Maximum	0,131	0,421	0,721	0,890	0,955	[-]
Průměr	0,015	0,081	0,230	0,427	0,611	[-]
Medián	0,005	0,044	0,181	0,412	0,653	[-]

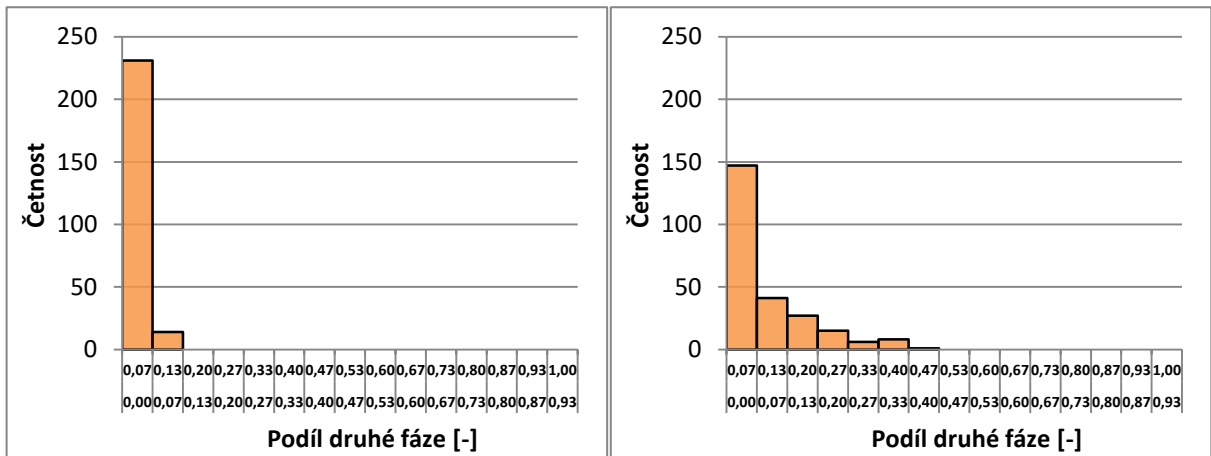
Zastoupení koncentrací všech bodů pro všech pět časů dostatečně vystihují vytvořené histogramy. Histogram byl také vytvořen pro stacionární výpočet pro znázornění četnosti bodů v daných časových intervalech (viz Graf 2 vlevo). Graf 2 vpravo popisuje četnost v čase 3,9 s.

Kontury podílu druhé fáze na rovině zx v minimálních zjištěných časech jsou k nahlédnutí pro všechny modely v příloze (viz Příloha H),

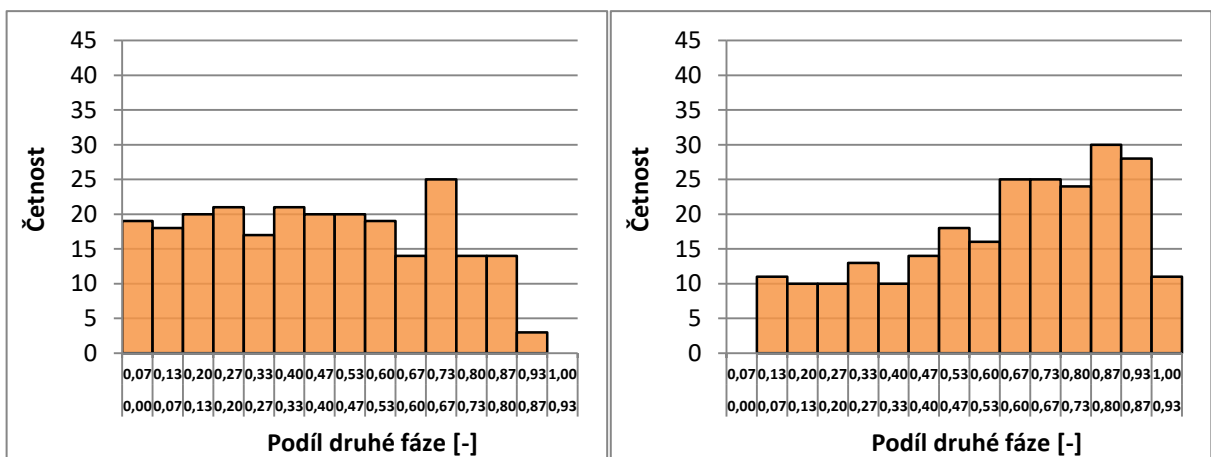


Graf 2 Četnost časů proudnic a koncentrace v 3,9 s – mod_1

Z histogramu objemových podílů je dobře patrné, že stále mnoho bodů nedosáhlo vyšších hodnot a optická komora je tedy na začátku plnění. Body přímo u vstupních kanálů již ale dosáhly hodnot přes 70 %. Dále jsou zobrazeny histogramy pro hodnoty objemových podílů dvě půl vteřiny před (Graf 3) a po (Graf 4) hlavním čase.



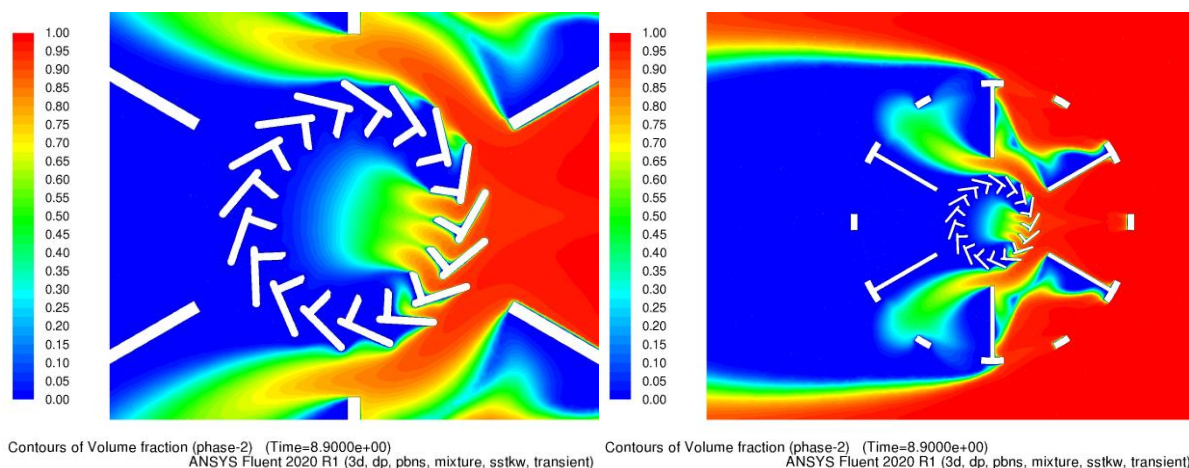
Graf 3 Koncentrace v 2,9 s (vlevo) a 3,4 s (vpravo) – mod_1



Graf 4 Koncentrace v 4,4 s (vlevo) a 4,9 s (vpravo) – mod_1

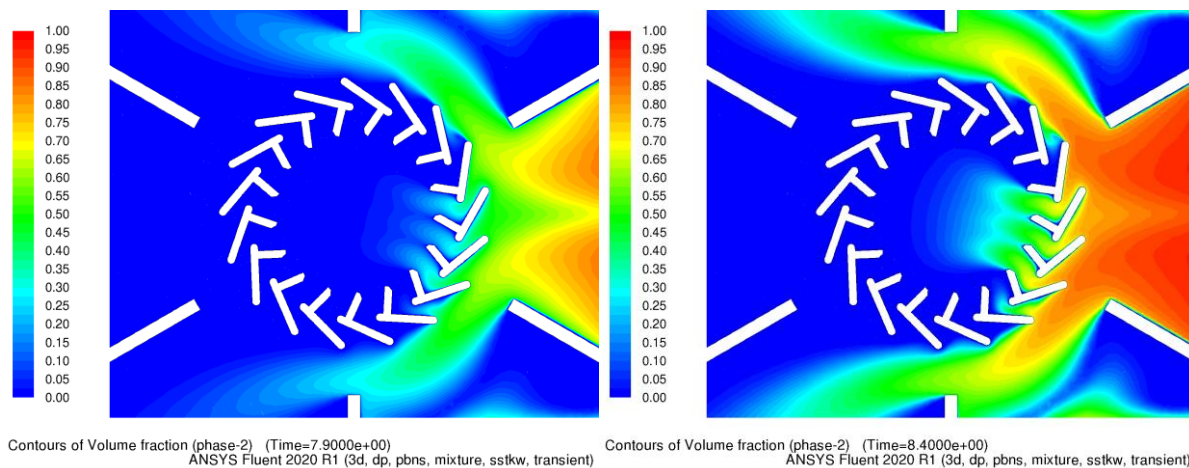
Z histogramů je patrné rychlé zvyšování koncentrace všech bodů v závislosti na čase. Plnění optické komory bylo také sledováno pomocí sekvence kontur. Nižší uvedené obrázky kontur znázorňují distribuci ve stejných časech jako vytvořené histogramy výše. Kontury na rovině

zx již dobře znázorňují plnění komory (Obr. 39). Zobrazovaný čas na konturách je vždy o 5 s posunutý, důvodem je vypuštění druhé fáze po pětivteřinovém předpočtu.

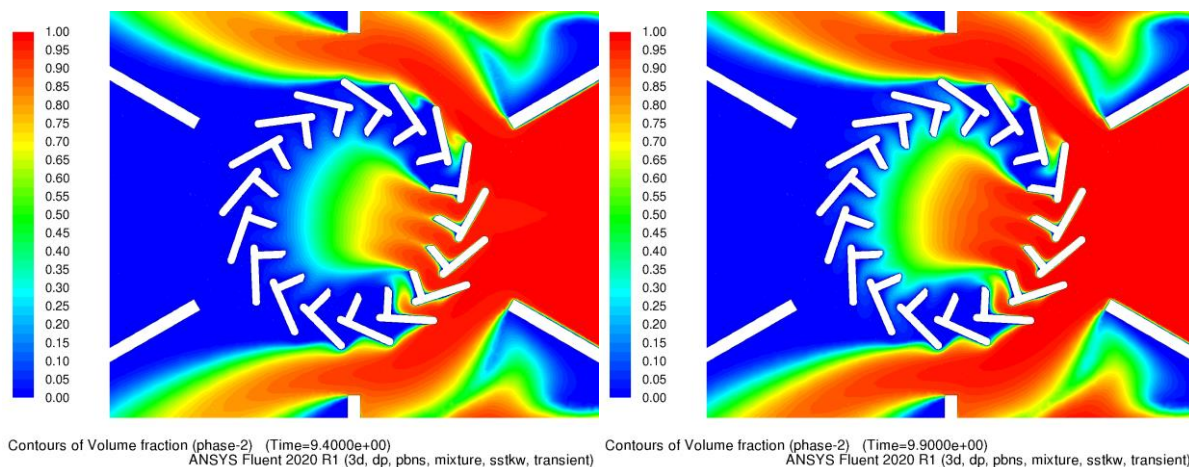


Obr. 39 Kontury podílu druhé fáze v 3,9 s na rovině zx – mod_1

Dále jsou zobrazeny kontury po půl vteřinách před (Obr. 40) a po (Obr. 41) hlavním čase.



Obr. 40 Kontury podílu druhé fáze v 2,9 s a 3,4 s na rovině zx – mod_1



Obr. 41 Kontury podílu druhé fáze v 4,4 s a 4,9 s na rovině zx – mod_1

Výsledky ostatních variant již nebudou popisovány detailně jako základní varianta, jelikož není třeba metodiku vyhodnocení opakovat.

7.7.2.2. Modifikace I – mod_2

Ze stacionárního výpočtu byly získány hodnoty času ze zpětných proudnic pro všechny body matice. Vyhodnocené hodnoty jsou seřazeny v Tab. 9. Oproti základnímu návrhu je zde dosahováno mírně vyšší hodnoty mediánu, a to o přibližně 0,25 s.

Tab. 9 Časy ze stacionárního výpočtu – mod_2

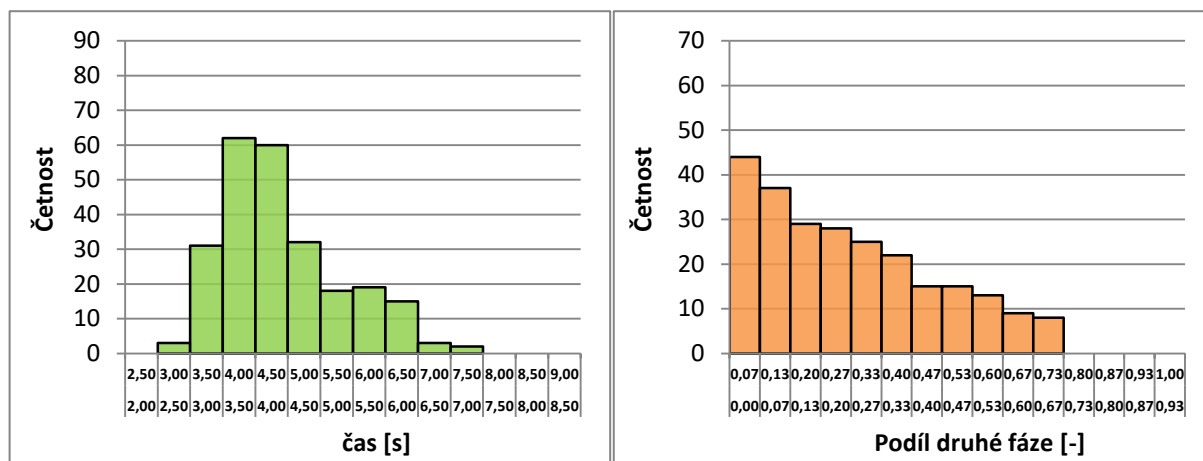
	Hodnota	Jednotky
Minimum	2,947	s
Maximum	7,333	s
Průměr	4,401	s
Medián	4,178	s

Hodnoty podílu druhé fáze pro všechny body matice znázorňuje tabulka níže (Tab. 10). Pro čas 4,2 s je medián podílů 0,235. Tato hodnota je vyšší o přibližně 0,05, tedy ne o mnoho.

Tab. 10 Koncentrace z nestacionárního výpočtu – mod_2

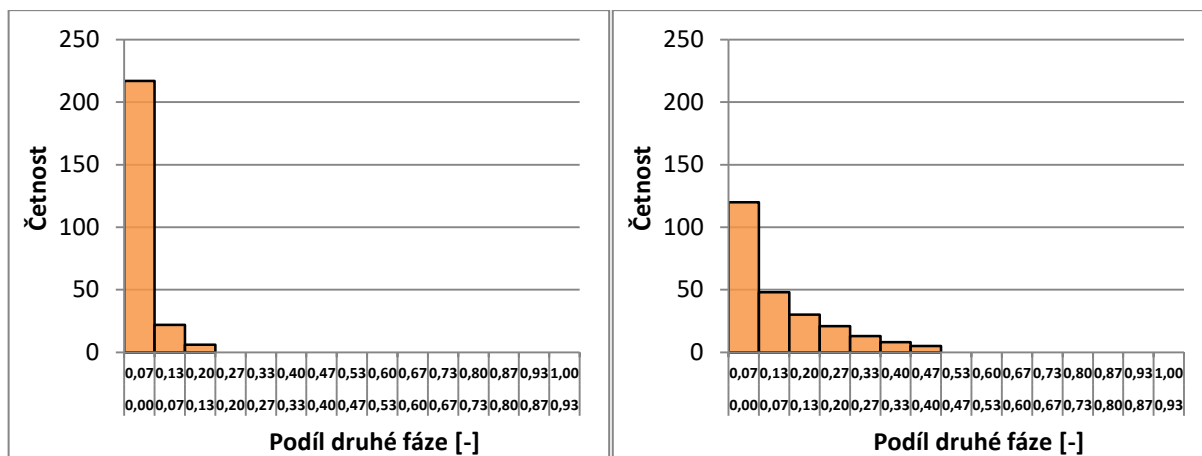
	Hodnota v čase					Jednotky
Čas	3,2	3,7	4,2	4,7	5,2	s
Minimum	0,000	0,001	0,008	0,056	0,144	[-]
Maximum	0,179	0,464	0,730	0,937	0,972	[-]
Průměr	0,025	0,108	0,265	0,542	0,699	[-]
Medián	0,011	0,072	0,235	0,564	0,763	[-]

Byl vytvořen histogram pro stacionární výpočet pro znázornění četnosti bodů v daných časových intervalech (viz Graf 5 vlevo). Graf 5 vpravo popisuje četnost v čase 4,2 s.

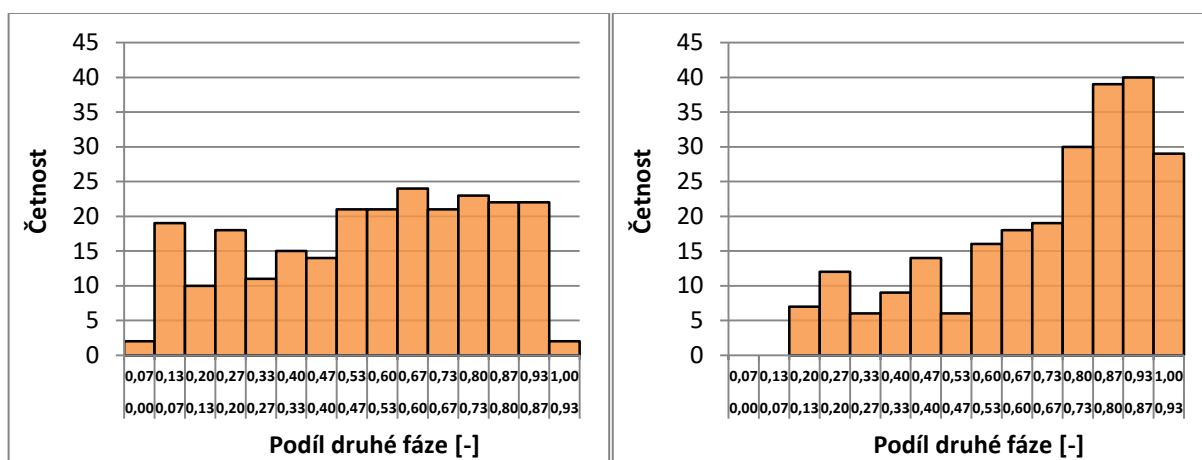


Graf 5 Četnost časů proudnic a koncentrace v 4,2 s – mod_2

I zde platí, že většina bodů dosahuje nižší koncentrace a optická komora se začíná plnit. Distribuci v optické komoře dále popisují histogramy pro hodnoty podílů po půl vteřinách před (Graf 6) a po (Graf 7) hlavním čase.

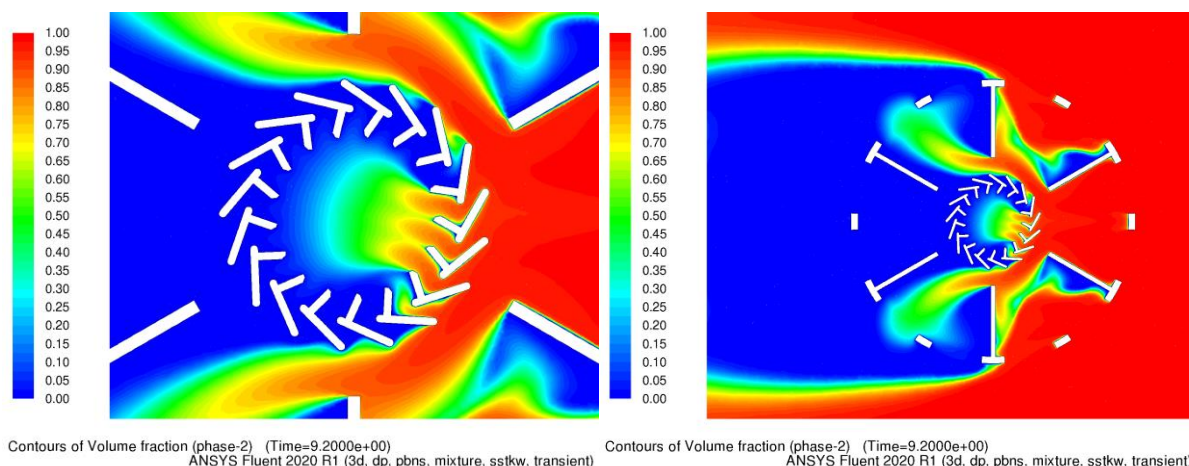


Graf 6 Koncentrace v 3,2 s (vlevo) a 3,7 s (vpravo) – mod_2



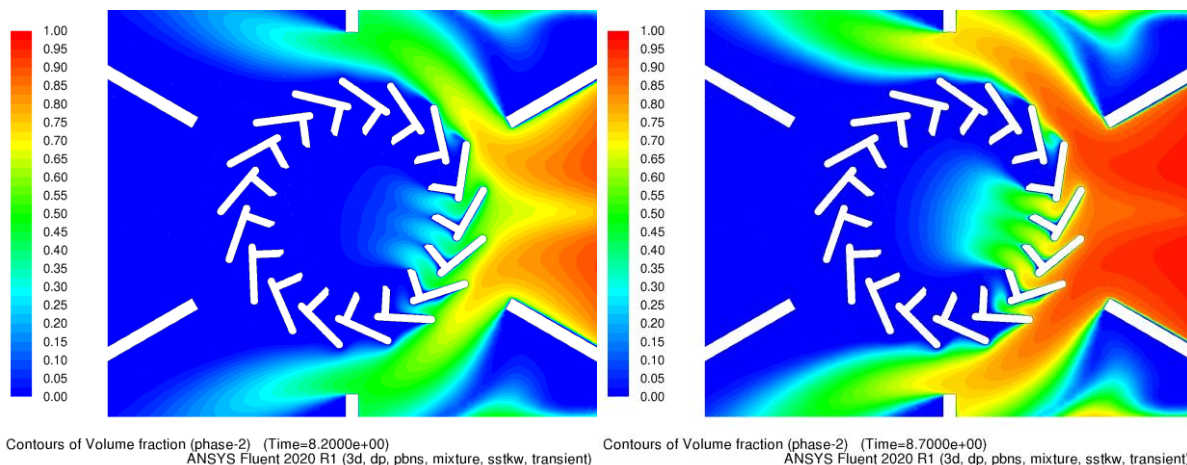
Graf 7 Koncentrace v 4,7 s (vlevo) a 5,2 s (vpravo) – mod_2

Obdobně jako u základní varianty je z grafů názorné zvyšování koncentrace všech bodů v závislosti na čase. Plnění optické komory bylo také sledováno pomocí sekvence kontur. Distribuci ve stejných časech jako vytvořené histogramy výše znázorňují přiložené kontury.

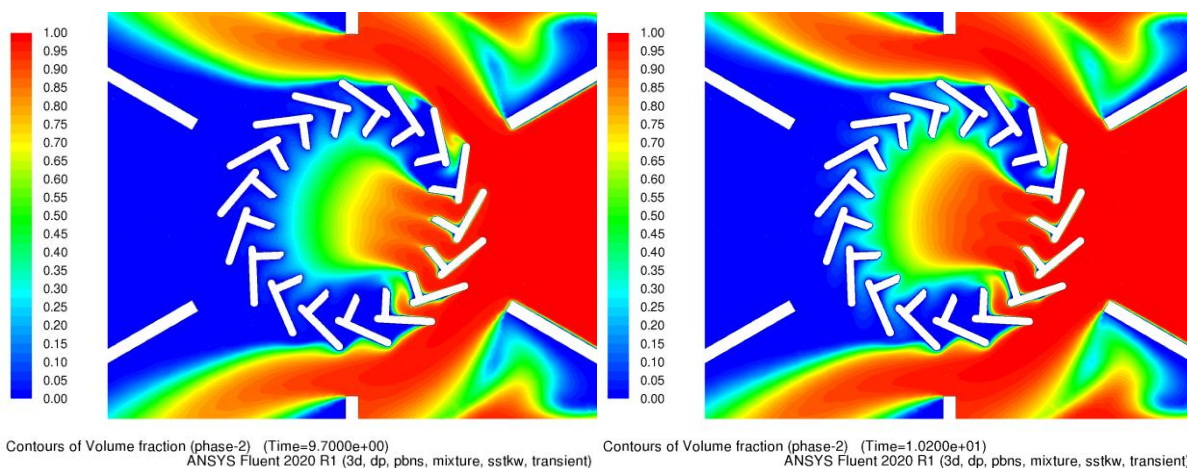


Obr. 42 Kontury podílu druhé fáze v 4,2 s na rovině zx – mod_2

Dále jsou zobrazeny kontury po půl vteřinách před (Obr. 40) a po (Obr. 41) hlavním čase. Kontury koncentrací v daných časech jsou podobné jako u základní varianty.



Obr. 43 Kontury podílu druhé fáze v 3,2 s a 3,7 s na rovině zx – mod_2



Obr. 44 Kontury podílu druhé fáze v 4,7 s a 5,2 s na rovině zx – mod_2

Tato geometrická modifikace nezapomohla plnění, naopak mírně čas plnění komory oddálila. Důvodem je nejspíše zvýšení celkového odporu čidla vůči proudícímu médiu.

7.7.2.3. Modifikace II – mod_3

Ze stacionárního výpočtu byly získány hodnoty času zpětných proudnic pro všechny body matice. Vyhodnocené hodnoty jsou seřazeny v Tab. 11. Hodnota mediánu časů je velice podobná hodnotě základního návrhu.

Tab. 11 Časy ze stacionárního výpočtu – mod_3

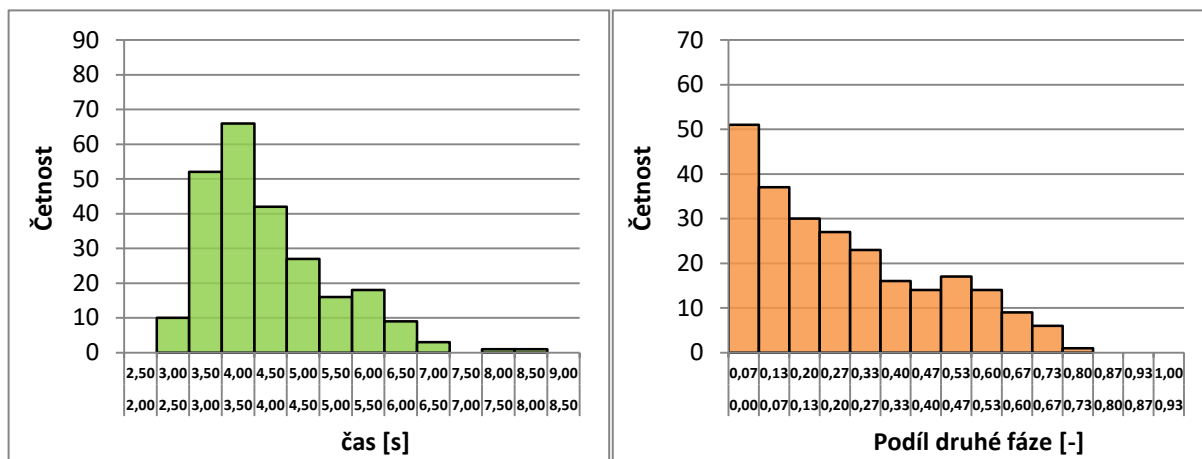
	Hodnota	Jednotky
Minimum	2,812	s
Maximum	8,060	s
Průměr	4,209	s
Medián	3,978	s

Hodnoty podílu druhé fáze pro všechny body matice znázorňuje tabulka níže (Tab. 10). Pro čas 4 s je medián podílů 0,212. Na rozdíl od modifikace I je u modifikace II medián podílů jen o 0,03 vyšší oproti základní variantě.

Tab. 12 Koncentrace z nestacionárního výpočtu – mod_3

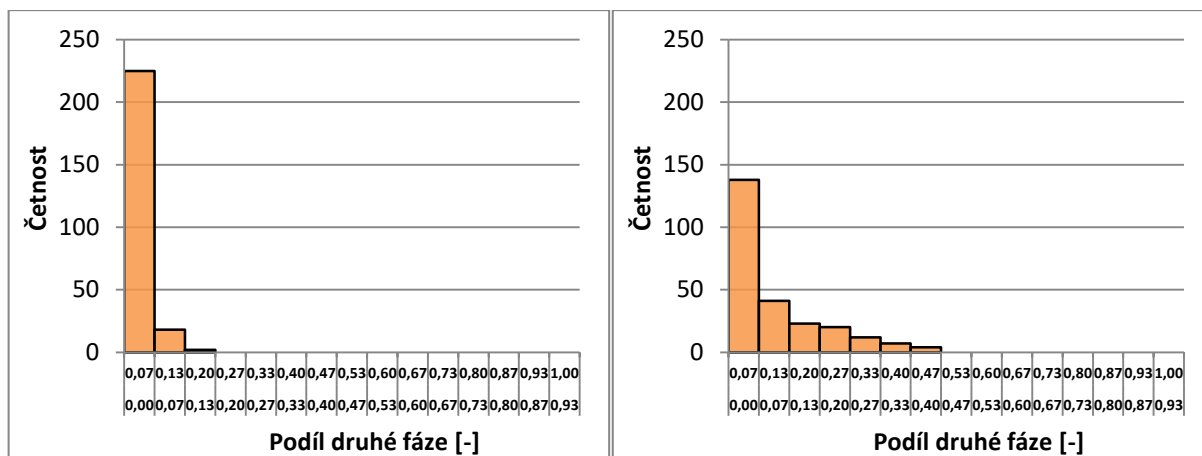
Čas	Hodnota v čase					Jednotky
	3	3,5	4	4,5	5	
Minimum	0,000	0,000	0,003	0,020	0,072	[-]
Maximum	0,151	0,447	0,736	0,895	0,957	[-]
Průměr	0,020	0,096	0,253	0,450	0,628	[-]
Medián	0,006	0,053	0,212	0,457	0,679	[-]

Byl vytvořen histogram pro stacionární výpočet pro znázornění četnosti bodů v daných časových intervalech (viz Graf 8 vlevo). Graf 5 vpravo popisuje četnost v čase 4 s.

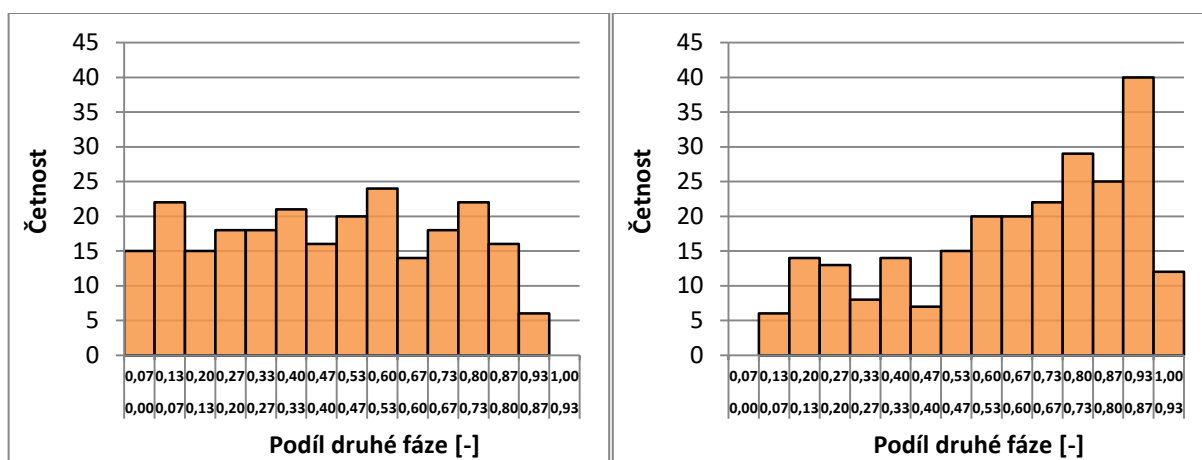


Graf 8 Četnost časů proudnic a koncentrace v 4 s – mod_3

Stejně jako u výše zmíněných variant, většina bodů dosahuje nižší koncentrace a optická komora je tedy na začátku plnění. Distribuci v optické komoře dále popisují histogramy pro hodnoty podílů po půl vteřinách před (Graf 9) a po (Graf 10) hlavním čase.

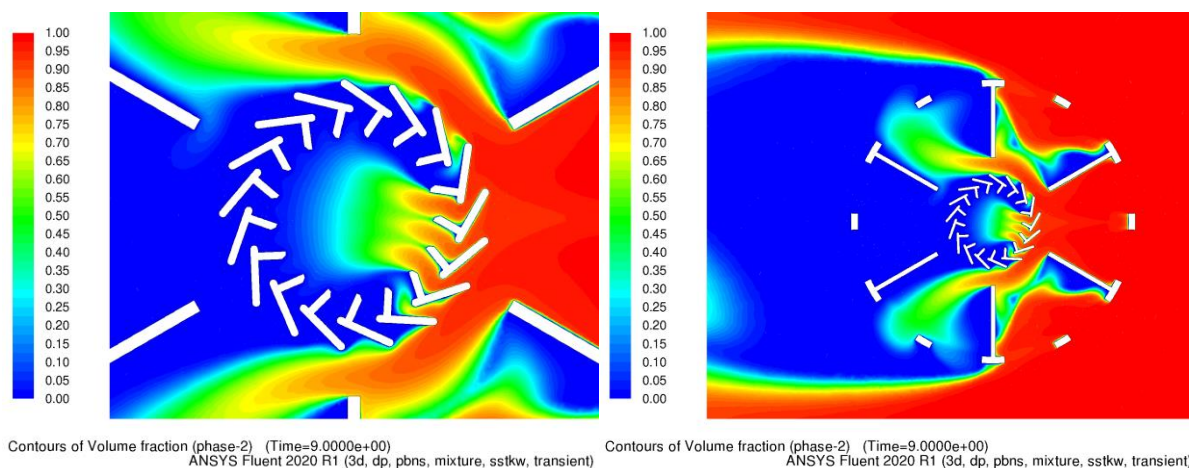


Graf 9 Koncentrace v 3 s (vlevo) a 3,4 s (vpravo) – mod_3



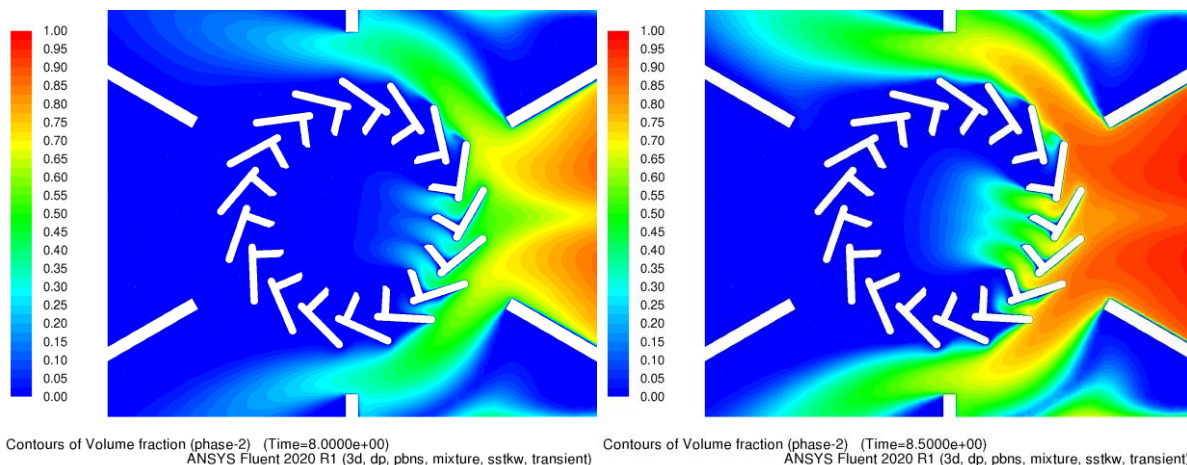
Graf 10 Koncentrace v 4,5 s (vlevo) a 5 s (vpravo) – mod_3

Z uvedených histogramů je patrná korelace mezi základním modelem a modifikací I a II. Níže přiložené obrázky kontur znázorňují distribuci ve stejných časech jako vytvořené histogramy výše. I zde jsou kontury podobné výše zmíněným.

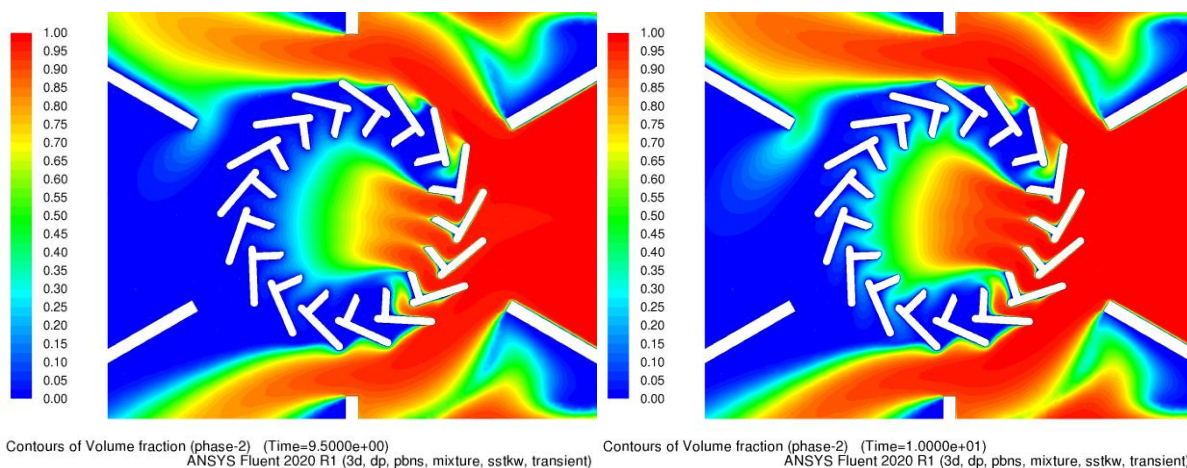


Obr. 45 Kontury podílu druhé fáze v 4 s na rovině zx – mod_3

Dále jsou zobrazeny kontury po půl vteřinách před (Obr. 46) a po (Obr. 47) hlavním čase. Kontury koncentrací v daných časech jsou podobné jako u základní varianty.



Obr. 46 Kontury podílu druhé fáze v 3 s a 3,5 s na rovině zx – mod_3



Obr. 47 Kontury podílu druhé fáze v 4,5 s a 5 s na rovině zx – mod_3

Je patrné, že uzavření otvorů v dolním díle nemá výrazný vliv na plnění komory. Toto tvrzení ale nemusí obecně platit pro jiné konstrukční návrhy, které mohou svým tvarem proudění jinak ovlivňovat.

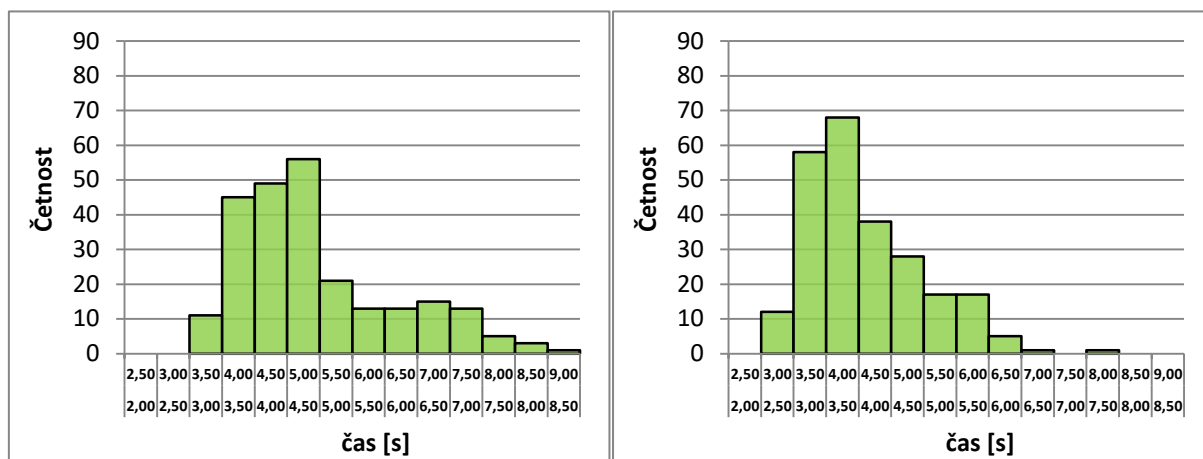
7.7.2.4. Modifikace III – mod_4

Ze stacionárního výpočtu byly získány hodnoty času zpětných proudnic pro všechny body matice. Vyhodnocené hodnoty jsou seřazeny v Tab. 13. Hodnota mediánu časů je vyšší než u základní varianty.

Tab. 13 Časy ze stacionárního výpočtu – mod_4

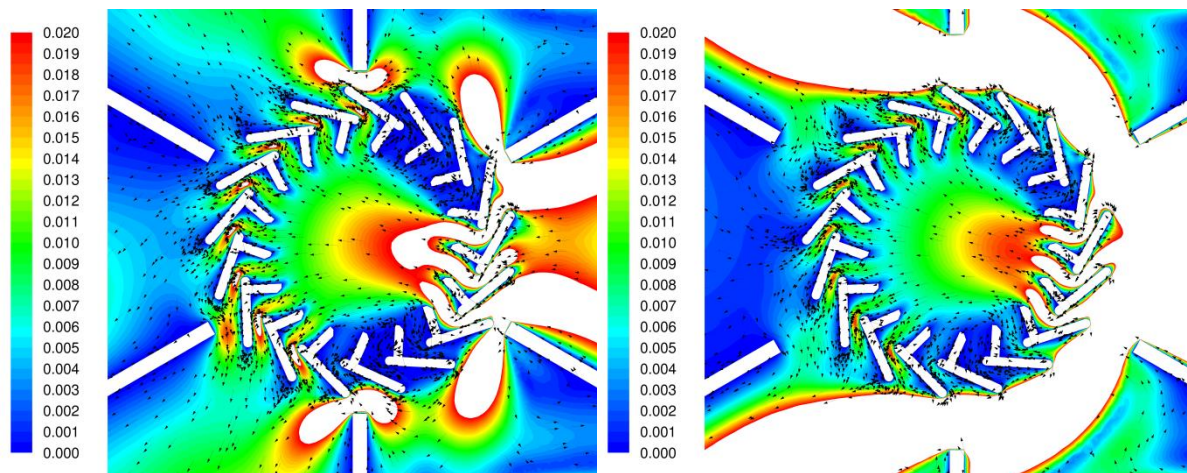
	Hodnota	Jednotky
Minimum	3,271	s
Maximum	8,872	s
Průměr	4,946	s
Medián	4,633	s

I zde platí, že většina bodů dosahuje nižší koncentrace a optická komora se začíná plnit, avšak oproti základní variantě je dosahováno vyšších hodnot časů. Toto zjištění indikuje pomalejší zaplnění optické komory druhou fází. Porovnání histogramů pro mod_4 a mod_1 je přiloženo níže (Graf 11).



Graf 11 Četnost časů proudnic pro mod_4 (vlevo) a mod_1 (vpravo)

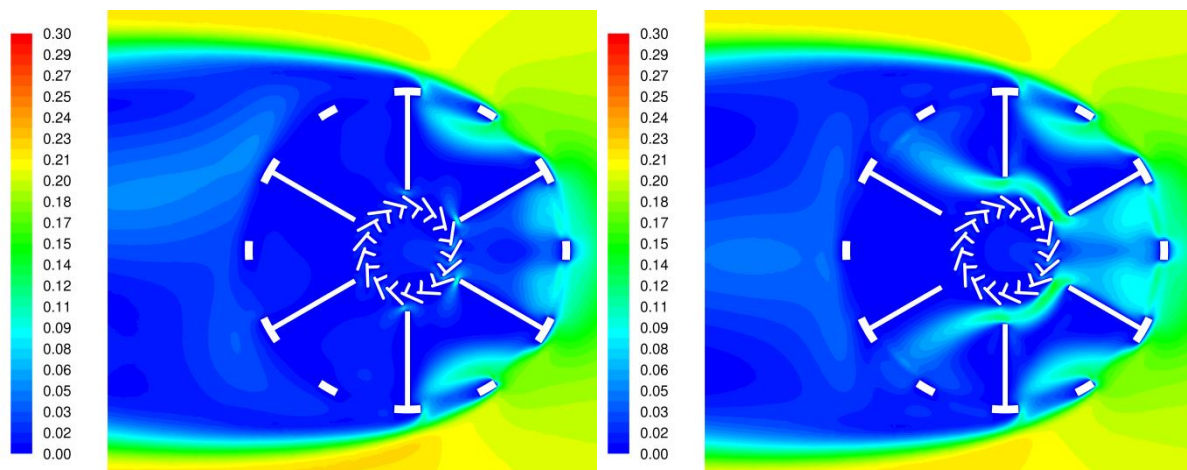
Pro znázornění vlivu geometrické úpravy u třetí modifikace je níže přiloženo porovnání kontur rychlosti se základní variantou (viz Obr. 48).



Obr. 48 Kontury rychlosti pro mod_4 (vlevo) a mod_1 (vpravo)

I přes dosažení vyšší rychlosti uvnitř komory je medián časů proudnic vyšší o přibližně 0,7 s. Důvodem je, že úprava prodloužením žebër sice způsobí navýšení rychlosti uvnitř komory,

ale uvnitř celého detektoru vzniká odpor v důsledku zúžení mezer, to způsobuje zpomalení proudu před vstupem do komory (viz Obr. 49).



Obr. 49 Kontury rychlosti pro mod_4 (vlevo) a mod_1 (vpravo) – porovnání

Vzhledem k využití nestacionárních výpočtů pro ověření metodiky zpětných proudnic lze u této modifikace očekávat pozdější plnění optické komory, než je tomu u základní varianty.

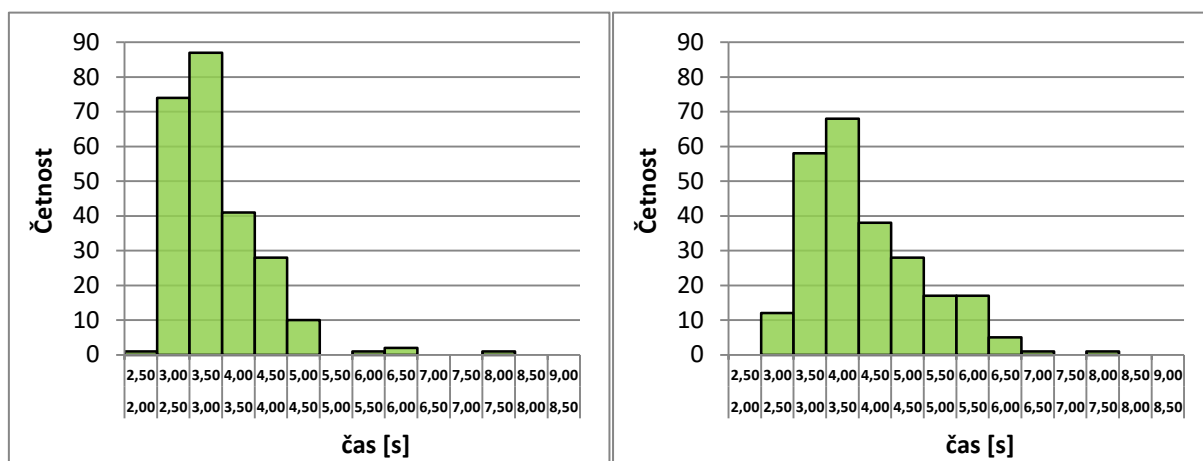
7.7.2.5. Modifikace IV – mod_5

Tato modifikace obsahuje úpravu geometrie lamel optické komory, přičemž je zbytek geometrie shodný se základní variantou. Oproti modifikaci III a I zde nevzniká zpomalení proudu před optickou komorou. Vyhodnocené hodnoty jsou seřazeny v Tab. 14.

Tab. 14 Časy ze stacionárního výpočtu – mod_5

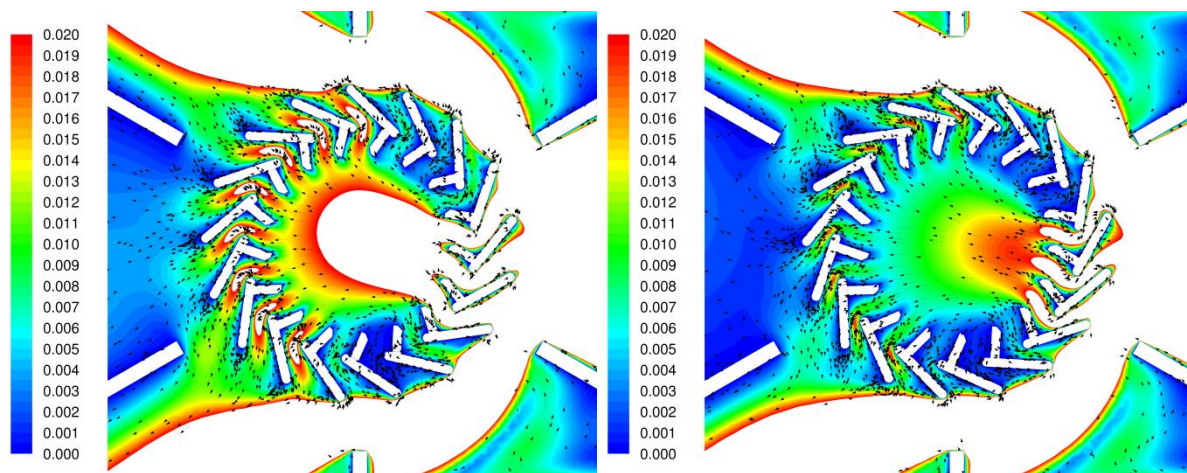
	Hodnota	Jednotky
Minimum	2,475	s
Maximum	7,564	s
Průměr	3,400	s
Medián	3,212	s

Tato varianta disponuje nejnižšími hodnotami časů, porovnání se základní variantou je přiloženo níže (Graf 12). Hodnota mediánu časů je nižší než u základního návrhu, proto bude pravděpodobně optická komora rychleji zaplněna.



Graf 12 Četnost časů proudnic pro mod_5 (vlevo) a mod_1 (vpravo)

Pro znázornění vlivu geometrické úpravy lamel u čtvrté modifikace je níže přiloženo porovnání kontur rychlosti se základní variantou (viz Obr. 50).



Obr. 50 Kontury rychlosti pro mod_5 (vlevo) a mod_1 (vpravo)

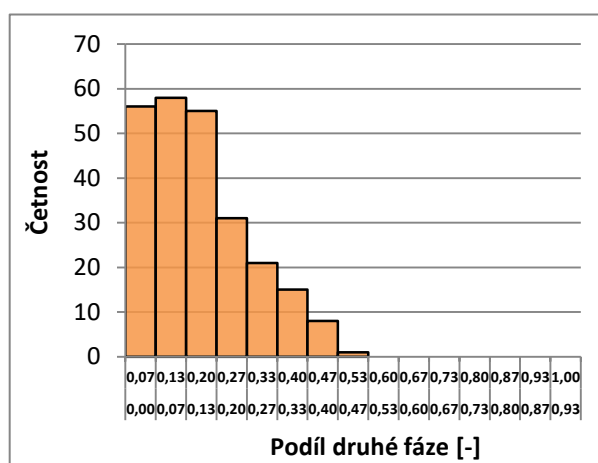
Uvnitř komory je dosahováno vyšších hodnot rychlostí a medián časů proudnic je přibližně o 0,7 s nižší. Toto zjištění vede k závěru, že bude vyšší rychlosti plnění.

Pro ověření času plnění bylo nutné provést nestacionární výpočet. Hodnoty podílu druhé fáze pro všechny body matice znázorňuje tabulka níže (Tab. 10). Pro čas 3,2 s je medián podílů 0,14. Na rozdíl od základní varianty je medián podílů přibližně o 0,04 nižší.

Tab. 15 Koncentrace z nestacionárního výpočtu – mod_5

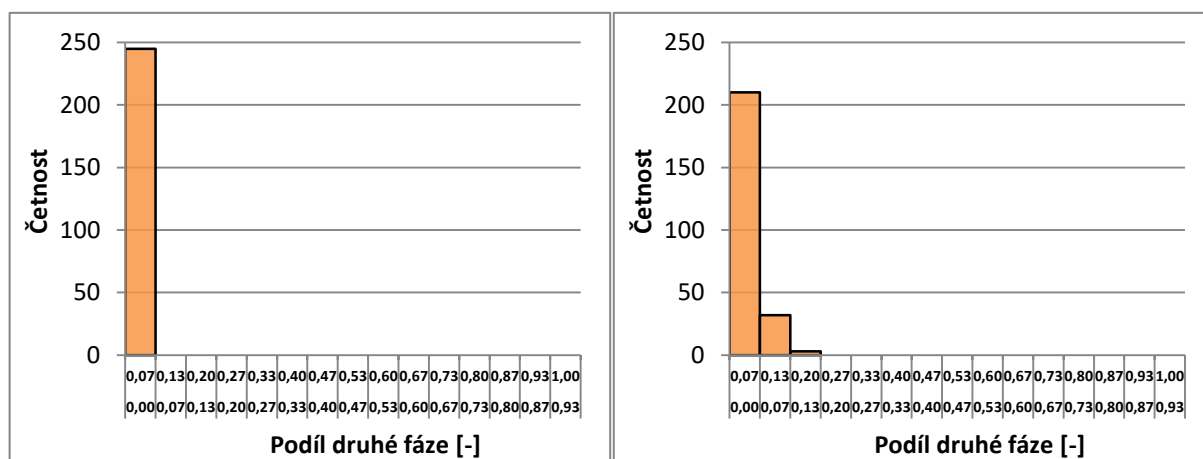
	Hodnota v čase					Jednotky
Čas	2,2	2,7	3,2	3,7	4,2	s
Minimum	0,000	0,001	0,010	0,055	0,144	[-]
Maximum	0,017	0,148	0,470	0,772	0,920	[-]
Průměr	0,002	0,032	0,162	0,402	0,643	[-]
Medián	0,001	0,021	0,140	0,400	0,678	[-]

Znázornění četnosti bodů pro dané podíly druhé fáze v čase 3,2 s popisuje Graf 13.

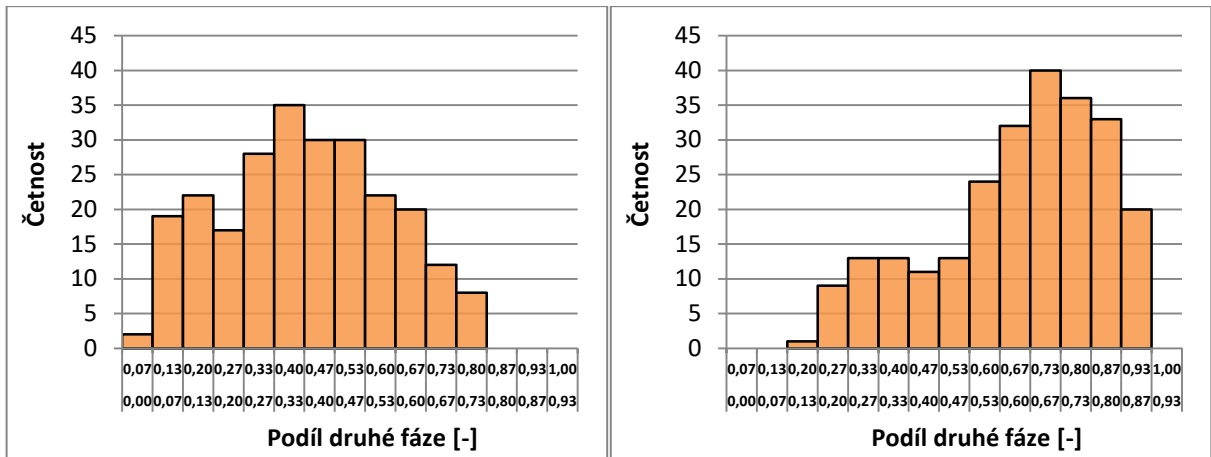


Graf 13 Četnost časů proudnic a koncentrace v 3,2 s – mod_5

Velká část bodů obsahuje v čase 3,2 s nižších koncentrací a optická komora se začíná plnit druhou fází. Distribuce v optické komoře je dále popsána histogramy pro hodnoty podílů po půl vteřinách před (Graf 14) a po (Graf 15) hlavním čase.

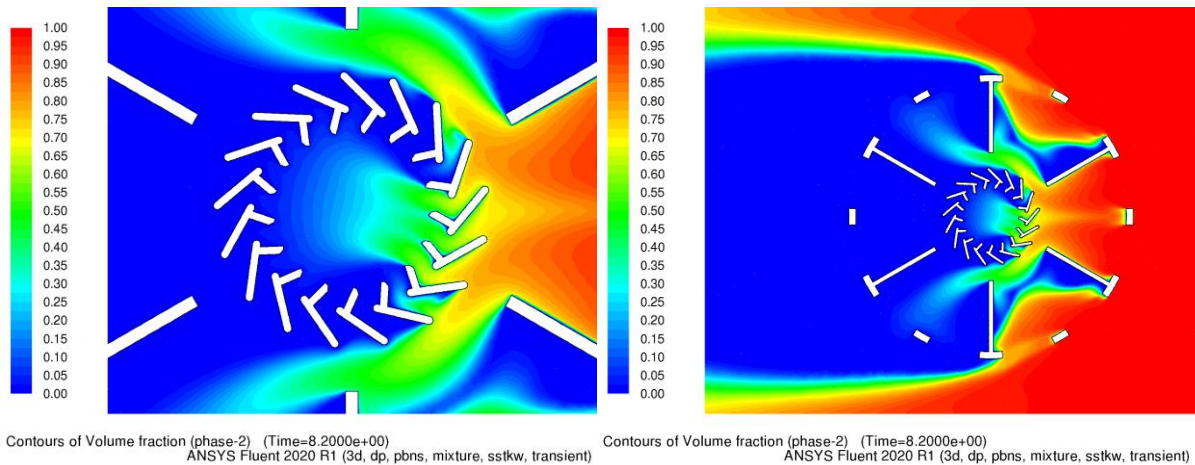


Graf 14 Koncentrace v 2,2 s (vlevo) a 2,7 s (vpravo) – mod_5



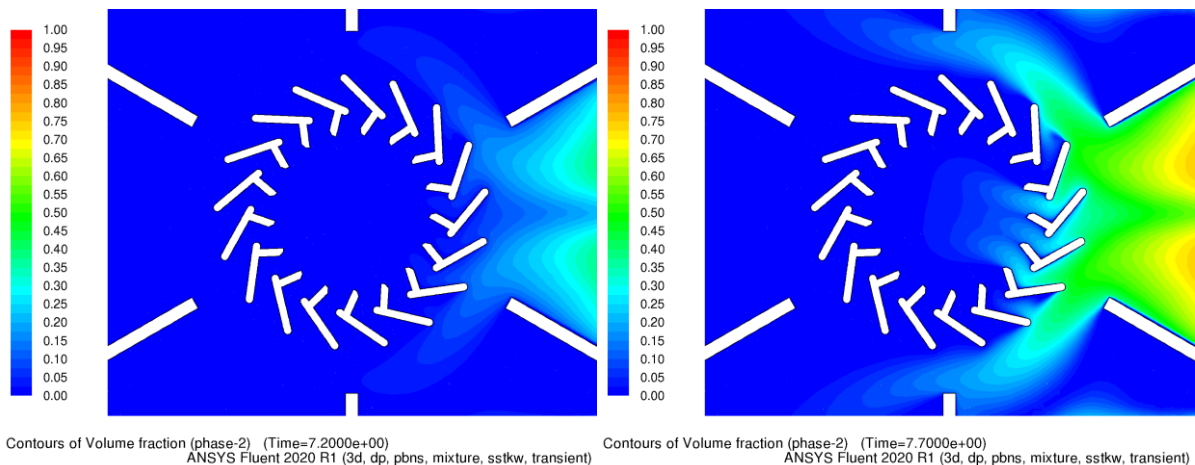
Graf 15 Koncentrace v 3,7 s (vlevo) a 4,2 s (vpravo) – mod_5

Z výše přiložených histogramů pro modifikaci IV je patrné rychlé zaplnění komory, což je důsledek dosažení vyšších hodnot rychlostí. Obdobně jako u základní varianty a prvních dvou modifikací jsou níže zobrazeny kontury distribuce ve stejných časech jako vytvořené histogramy.

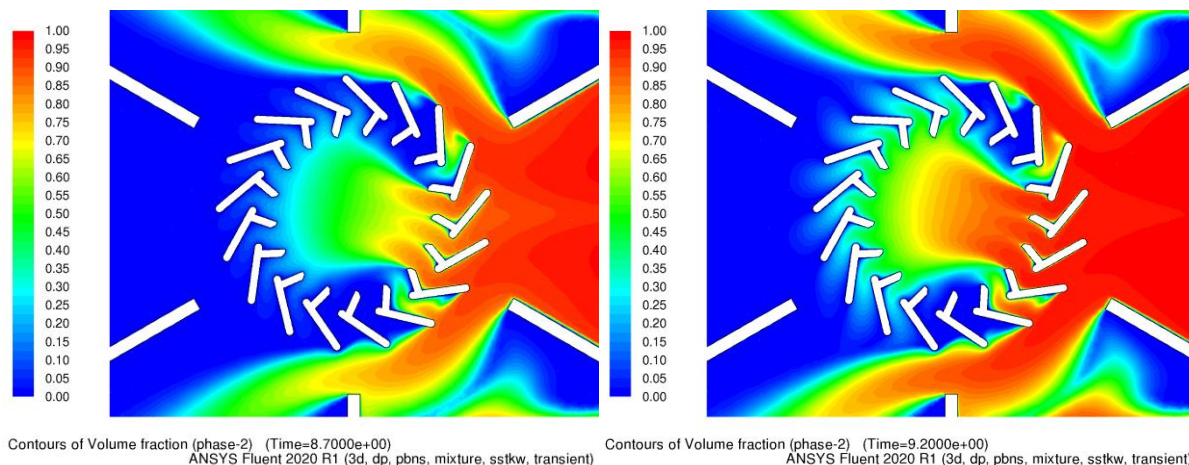


Obr. 51 Kontury podílu druhé fáze v 3,2 s na rovině zx – mod_5

Dále jsou zobrazeny kontury dvě půl vteřiny před (Obr. 52) a po (Obr. 53) hlavním času.



Obr. 52 Kontury podílu druhé fáze v 2,2 s a 2,7 s na rovině zx – mod_5



Obr. 53 Kontury podílu druhé fáze v 3,7 s a 4,2 s na rovině zx – mod_5

Změna úhlu lamel v optické komoře urychlila čas plnění. Obr. 51 zobrazuje zaplnění komory v čase mediánu ze stacionárního výpočtu a z dalších kontur je pak patrné rychlé šíření druhé fáze. Vyhodnocení času dle mediánu ze stacionárního výpočtu odpovídá očekávanému zaplnění komory z nestacionárního výpočtu.

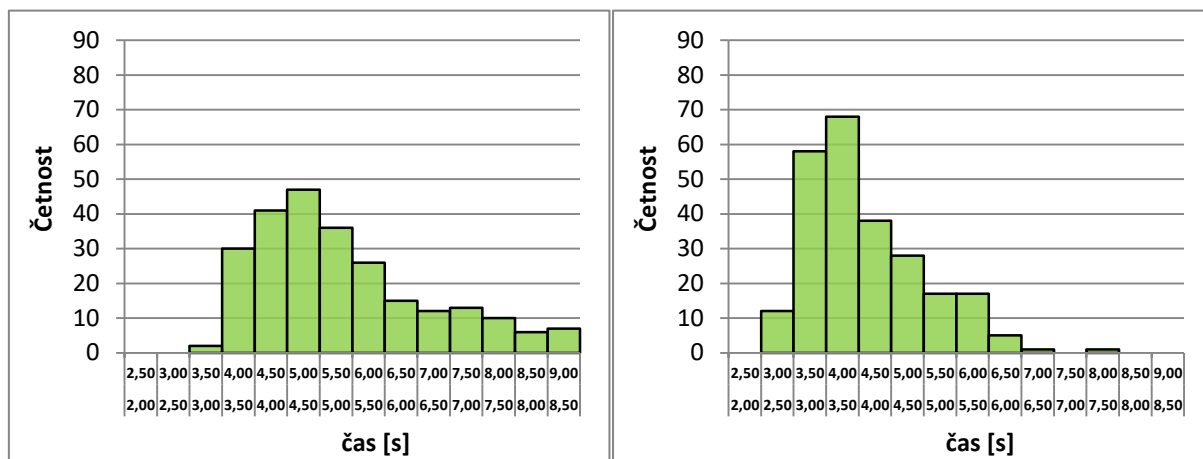
7.7.2.6. Modifikace V – mod_1_porous

Tato modifikace obsahuje porézní doménu jako nahrazení hmyzolapu, přičemž je zbytek geometrie shodný se základní variantou. Oproti základní variantě je očekáváno zpomalení proudu před optickou komorou. Vyhodnocené hodnoty jsou seřazeny v Tab. 16.

Tab. 16 Časy ze stacionárního výpočtu – mod_1_porous

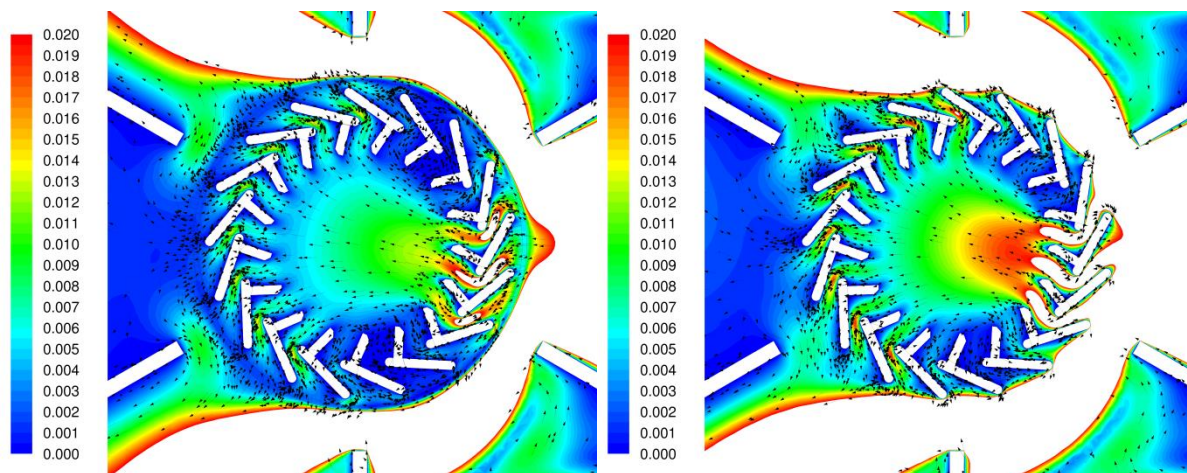
	Hodnota	Jednotky
Minimum	3,438	s
Maximum	8,952	s
Průměr	5,356	s
Medián	5,027	s

Je zřejmé, že vliv hmyzolapu nelze obecně zanedbat, porovnání se základní variantou je přiloženo níže (Graf 16). Hodnota mediánu časů je vyšší než u základního návrhu a to přibližně o 1,1 s, proto bude plnění jistě pomalejší.



Graf 16 Četnost časů proudnic pro mod_1_porous (vlevo) a mod_1 (vpravo)

Pro znázornění vlivu porézní složky u páte modifikace je níže přiloženo porovnání kontur rychlosti se základní variantou (viz Obr. 50).



Obr. 54 Kontury rychlosti pro mod_1_porous (vlevo) a mod_1 (vpravo)

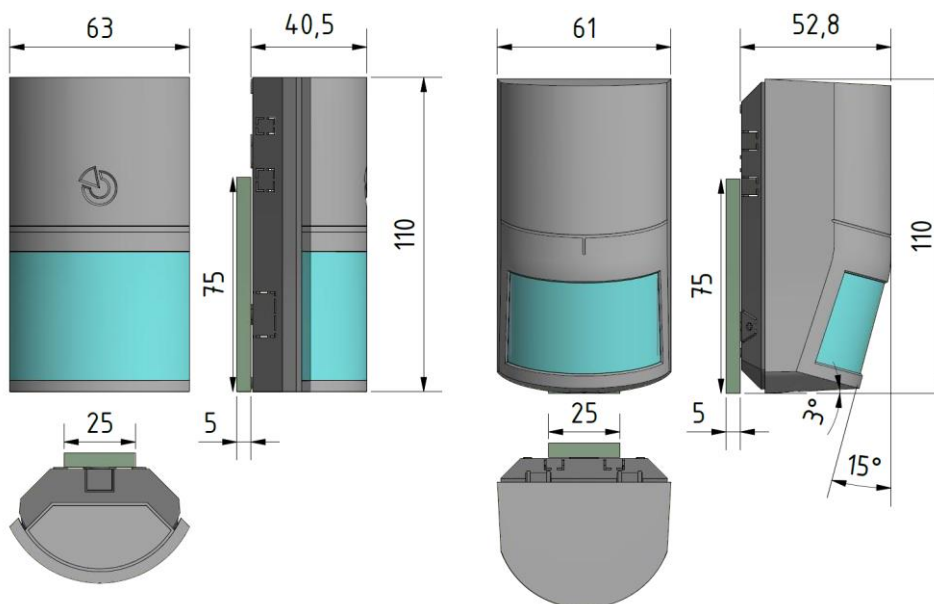
Uvnitř komory je dosahováno nižších hodnot rychlostí a porézní složka klade jistý odpor proti proudu. Toto zjištění vede k závěru nižší rychlosti plnění.

8. Numerická simulace pohybových detektorů

Pohybové detektory by měly být zkonstruovány a umístěny tak, aby oteplení čočky okolním vzduchem bylo co nejnižší. Případná vyšší teplota čočky může vést k snížení citlivosti detektoru nebo chybovým detekcím. Pro účely této práce, tj. zhodnocení vlivu teplého proudícího vzduchu na oteplení čočky, nebylo nutné simulovat děje uvnitř pohybových PIR čidel. Pozornost byla věnována především vnějšmu obtékání čidla, vnitřní zástavba byla velice zjednodušena (základní rozměry tlouštěk stěn byly zachovány).

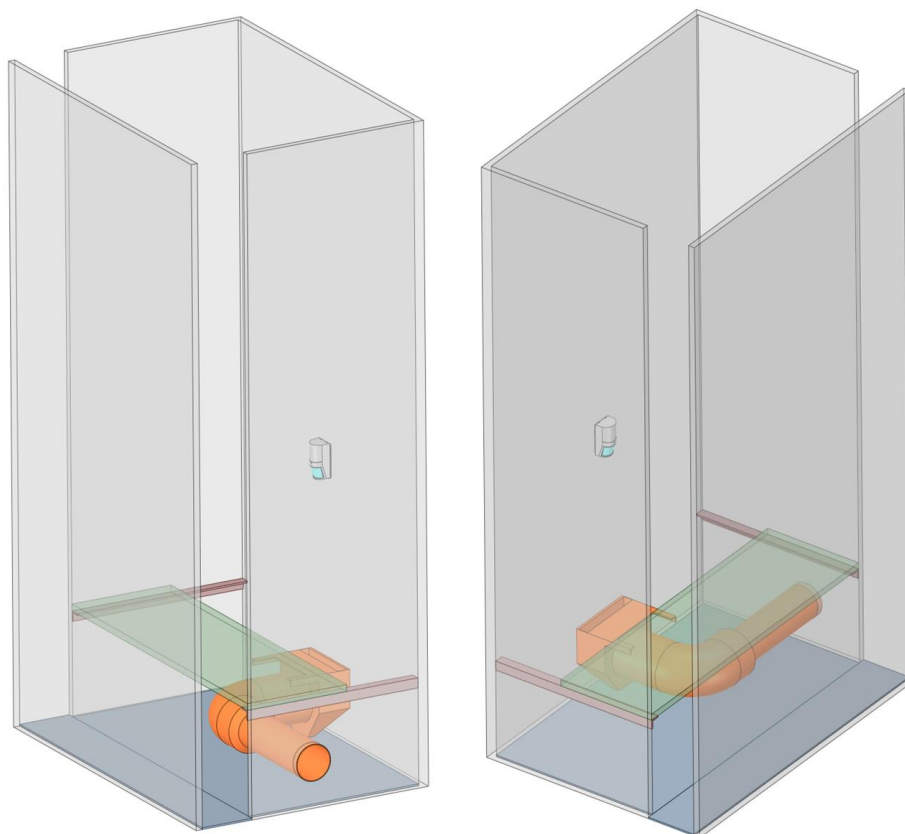
8.1. Výběr vhodné geometrie

Pro simulace pohybových detektorů byla zvolena čidla společnosti Jablotron JA-80 a JA-100. Modely jsou zobrazeny níže na Obr. 55. Výpočetní prostor kolem detektoru je dán rozměry testovací skříně, jejíž konfigurace je inspirována měřeními v laboratoři Incert. Skříň svým uspořádáním neodpovídá přímo normě EN, nicméně poskytuje přísnější podmínky pro testy, které mohou být vyžadovány pro splnění některých doplňkových norem (viz kapitola 3.3.1). Splnění těchto podmínek znamená například vydání certifikátu T031 (INCERT), který je nutný pro uvedení produktů na belgickém trhu, ale podobně koncipovaný experiment může být využit například i pro simulace vlivu topných těles či vzduchotechniky na chování pohybových detektorů v reálných umístěních.



Obr. 55 Čidlo JA-100 (vlevo) a JA-80 (vpravo)

Nezjednodušená geometrie testovací skříně je zobrazena na Obr. 56. Zjednodušený výkres testovací skříně pro pohybové detektory s popisem hlavních prvků je možný k nahlédnutí v příloze (viz Příloha E). Detektor je umístěn na svislé středové ose zadní stěny svým spodním okrajem 540 mm nad vyústkou a je připevněn na podložce 25x75 mm o tloušťce 5 mm.

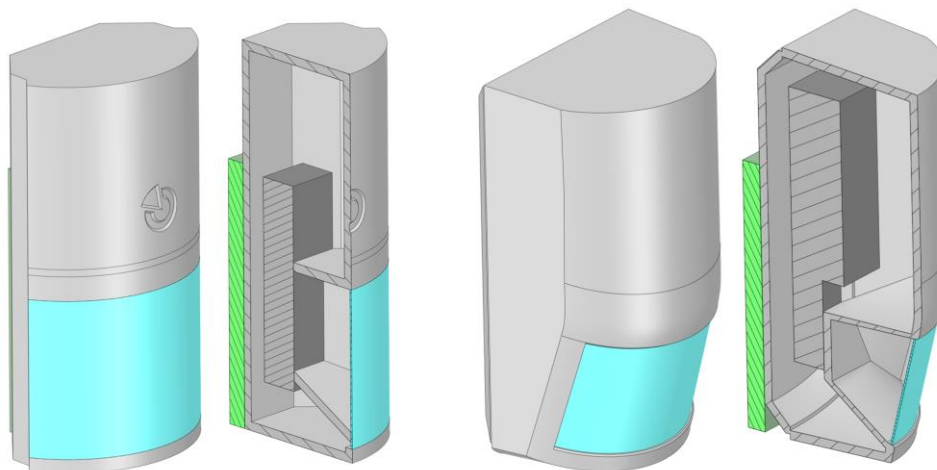


Obr. 56 Výpočetní prostor pro pohybové detektory

8.2. Návrh a popis zjednodušení modelů čidel

Zadané modely detektorů nejsou vhodné jako přímý import pro tvorbu sítě, a to především z důvodu, že vnitřní zástavba obsahuje řadu prvků a různých geometrických elementů, které žádným způsobem neovlivní vnější obtékání čočky. Tloušťka stěn obou typů detektorů je 2,5 mm a tloušťka čočky je 0,5 mm, tmavě šedý prvek uvnitř čidla svým tvarem a umístěním reprezentuje nahrazení původní zástavby. Celkový objem obou zjednodušených modelů je podobný modelům původním (viz Obr. 57).

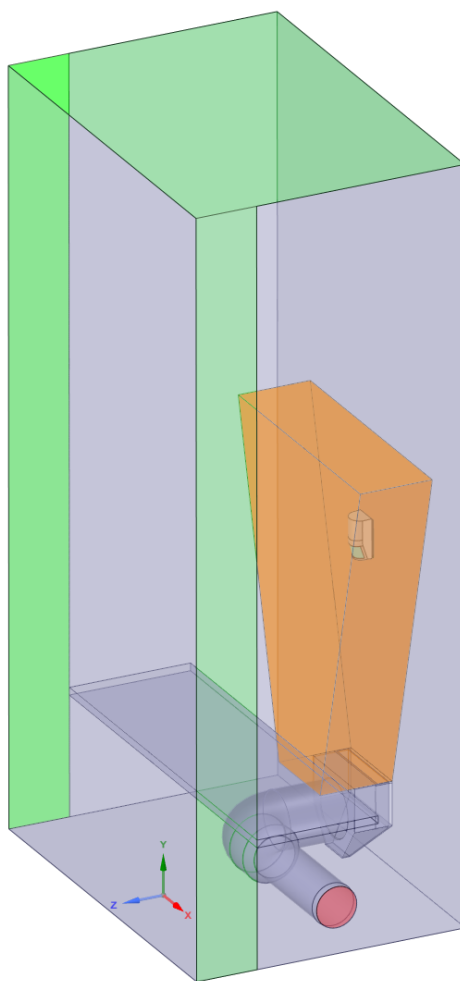
Sestava každého detektoru obsahuje oddělené objemy čočky (modrá barva), tělo detektoru (světle šedá barva) a vnitřní objem zástavby (tmavě šedá barva). Tělo detektoru je přichyceno k podložce (zelená barva), která je umístěna na zadní straně skříně.



Obr. 57 Zjednodušený model JA-100 (vlevo) a JA-80 (vpravo)

Model testovací skříně obsahuje vloženou příčnou desku na dvou L-profilech, vyústku, do které vstupuje proud vzduchu skrze 90° koleno a podložku pro uchycení zkoušených detektorů. Cílem této úlohy není sledovat přestup tepla skrze stěny skříně, proto byly do simulací převzaty pouze vnitřní plochy skříně, které tak spolu s plochami výstupu a vstupu tvoří výpočtový prostor.

Tento model je zobrazen na Obr. 58, kde jsou zelenou barvou označeny plochy výstupu a červenou barvou plocha vstupu (oranžová barva označuje umístění tělesa BOI, které je popsáno v kapitole 8.4.1).



Obr. 58 Zjednodušený model testovací skříně

Je patrné, že by mohlo dojít ještě k dalšímu zjednodušení odstraněním příčné desky, nicméně tento tvar je jednoduchý a správným lokálním nastavením sítě nedojde k zbytečnému zjemnění prvků.

Okrajové podmínky a materiály použité pro stěny a objekty jsou popsány dále.

8.3. Nastavení výpočtu

Dle dostupných údajů na vstupu bylo vypočteno Re , viz (15). K ujištění, že se skutečně jedná o turbulentní proudění, napomáhá také tvar geometrie vstupujícího potrubí, které obsahuje devadesátistupňové koleno a je zakončeno vyústkou. Tyto prvky jistě nepříspívají k laminarizaci proudu, ale spíše naopak.

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot D_{ek}}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 0,7 \cdot 0,212}{1,7894 \cdot 10^{-5}} = 10160 > 10^4 \quad (15)$$

Jako matematický turbulentní model byl opět zvolen SST $k-\omega$, byla zahrnuta rovnice energie. Pro studii nezávislosti sítě byl zvolen stacionární typ výpočtu s průměrováním hodnot. Ve finální části simulace byl zvolen nestacionární (transientní) přístup, jelikož je snaha podchytit vzniklé víry a fluktuace v okolí čidel, byť omezeně s ohledem na použitou metodu modelování turbulence (URANS).

Nastavené vlastnosti materiálů jsou zobrazeny přehledně v Tab. 17. Vzduch uvnitř detektoru fakticky neproudí, a proto byl nastaven jako pevná fáze s vlastnostmi vzduchu. Na vnější stěny byl nastaven koeficient přestupu tepla $\alpha = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, který byl odhadnut na základě zkušeností a odborných rad. Gravitační zrychlení bylo nastaveno na hodnotu $9,81 \text{ m/s}^2$ proti směru ose Y .

Tab. 17 Materiály pro simulaci PIR detektorů

Použití	Proudící médium	Parametr	Hodnota	Jednotky
Vnější okolí detektoru	Vzduch	Hustota	Nestlačitelný ideální plyn	
		Cp	1006,43	J/(kg*K)
		Tepelná vodivost	0,0242	W/(m*K)
		Viskozita	1,7894E-05	kg/(m*s)
Použití	Materiál stěny	Parametr	Hodnota	Jednotky
Tělo detektoru a vnitřní vestavby	ABS	Hustota	900	kg/m ³
		Cp	1470	J/(kg*K)
		Tepelná vodivost	0,1	W/(m*K)
Vyústka/Potrubí	Hliník	Hustota	2719	kg/m ³
		Cp	910	J/(kg*K)
		Tepelná vodivost	205	W/(m*K)
Čočka	HDPE	Hustota	950	kg/m ³
		Cp	1900	J/(kg*K)
		Tepelná vodivost	0,5	W/(m*K)
Stěny skříňe a podložka	PC	Hustota	1200	kg/m ³
		Cp	1200	J/(kg*K)
		Tepelná vodivost	0,2	W/(m*K)
Vnitřní neproudící vzduch detektoru	Vzduch v pevné fázi	Hustota	1,225	kg/m ³
		Cp	1006,43	J/(kg*K)
		Tepelná vodivost	0,0242	W/(m*K)

8.3.1. Nastavení okrajových podmínek

Pro všechny simulace pohybových čidel byly nastaveny shodné okrajové podmínky. Poloha vstupu a výstupu je znázorněna na Obr. 58.

Byla nastavena počáteční teplota vzduchu a pevných látek 20 °C, tlak 101,325 kPa, dále byla nastavena intenzita turbulence 2 % a měřítko turbulence 0,00048 m.

Teplota vzduchu na vstupu byla nastavena na 35 °C s rychlostí proudění 0,7 m/s. Na výstupní plochy byla nastavena teplota 20 °C a tlak 101,325 kPa (resp. aplikace ANSYS Fluent vyžaduje hodnotu přetlaku, ta byla nastavena na 0 Pa, protože operační tlak je nastaven na 101 325 Pa. Zde je tento přístup nutný s ohledem na způsob výpočtu hustoty pro ideální plyn).

Pro povrchy byla definována podmínka nulové rychlosti na stěně.

Okrajové podmínky užití v simulacích pohybových detektorů jsou shrnuty v Tab. 18.

Tab. 18 Okrajové podmínky pro simulaci PIR detektorů

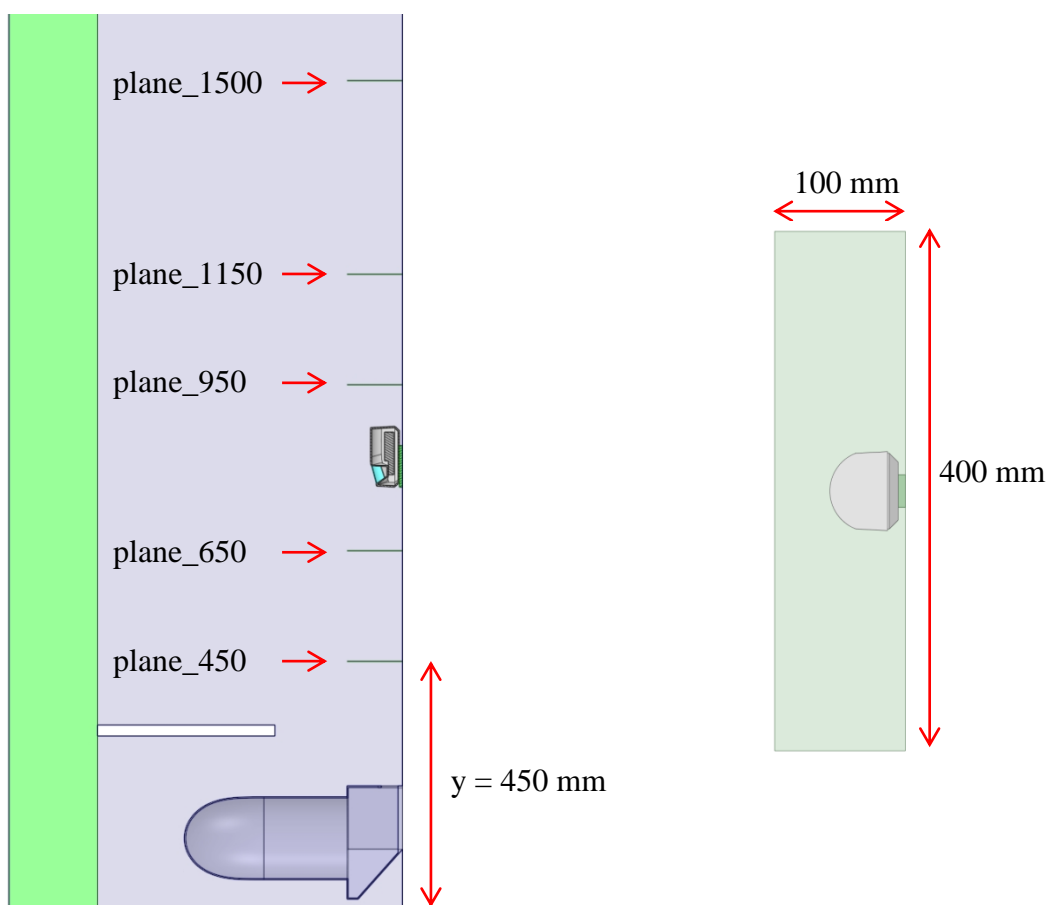
Popis	Parametr	Hodnota	Jednotky
Počáteční parametry	Teplota vzduchu	20	°C
	Teplota pevných látek	20	°C
	Atmosférický tlak	101,325	kPa
	Intenzita turbulence	2	%
	Měřítko turbulence	0,00048	m
Popis			
Vstupní hodnoty	Teplota	35	°C
	Rychlost proudění	0,7	m/s
Popis			
Výstupní hodnoty	Teplota	20	°C
	Tlak	101,325	kPa

8.4. Příprava CFD modelů pohybových čidel

V této kapitole je popsán vliv hrubosti sítě vůči flukтуаčním a středním hodnotám rychlosti a teploty. Bylo očekáváno a prvotními testovacími výpočty potvrzeno, že po nárazu proudu do spodní hrany detektoru se proud rozdělí. Aby bylo možné podchytit tuto skutečnost na nestacionárním výpočtu dostatečně přesně, byla za tímto účelem provedena studie vlivu hustoty sítě.

8.4.1. Studie nezávislosti hrubosti sítě

Vliv sítě byl zkoumán na modelu čidla JA-80, jenž se svou konstrukcí jeví jako vhodný pro tento účel. Nastavení výpočtu a okrajových podmínek je popsáno v kapitole 8.3. Výpočtový model je zobrazen na Obr. 58, sledované veličiny byly získány z pěti rovin, tyto roviny jsou znázorněny na Obr. 59.

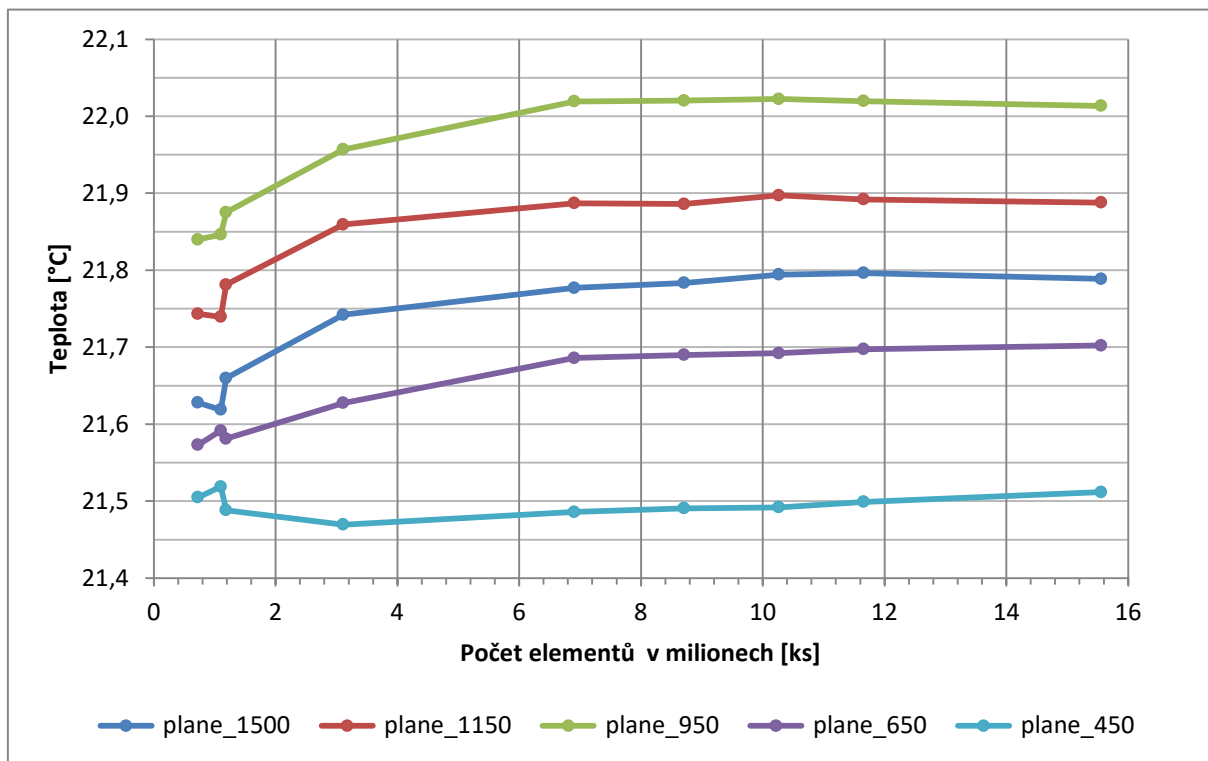


Obr. 59 Vyhodnocovací roviny pro studii hrubosti

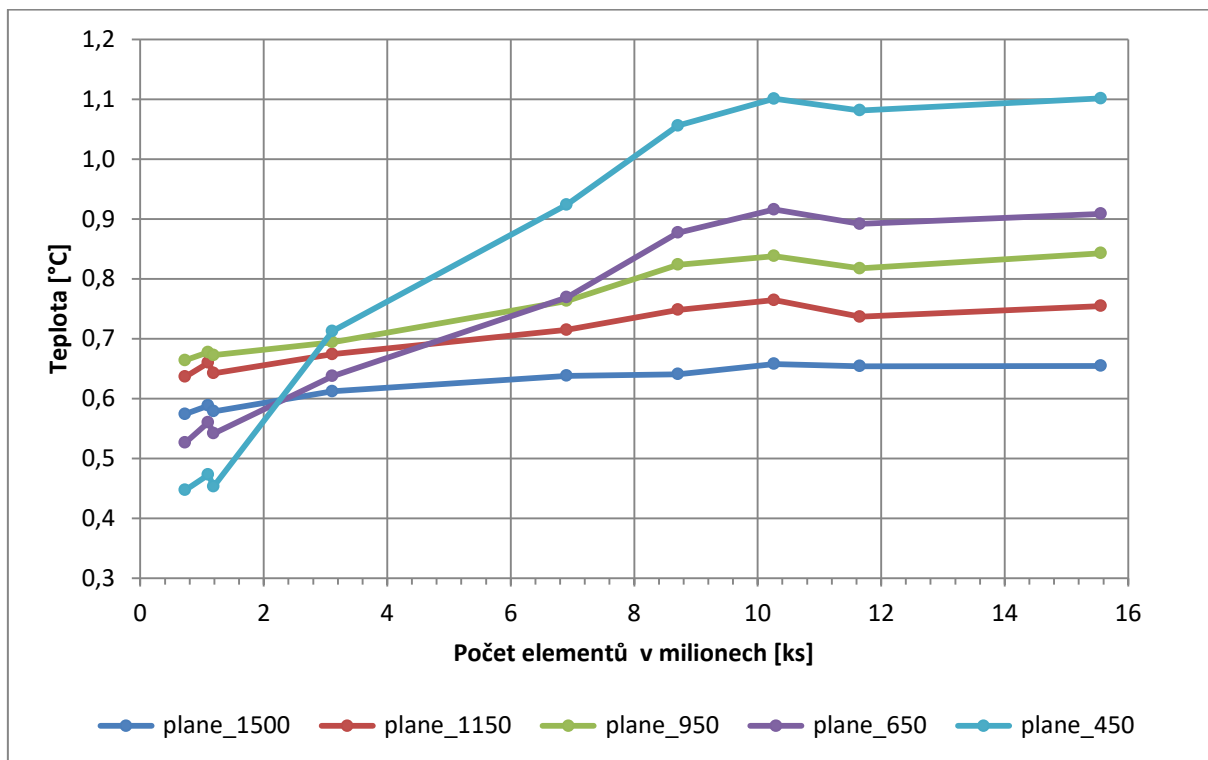
Vzhledem k očekávané charakteristice proudu mezi vyústkou a detektorem a malým rychlostem na vstupu bylo nutné tuto část objemu zjemnit. Za tímto účelem bylo použito těleso (BOI), které slouží jako hranice pro lokální nastavení síťování určité části objemu. Největší pozornost byla věnována vnějším plochám detektoru a to zejména čočce, spodní hraně těla detektoru a vyústce. Po vyhodnocení optimální hrubosti sítě bylo toto nastavení implementováno i na druhý model JA-100.

Pro tuto studii bylo vytvořeno celkem 9 sítí. Všechny sítě byly zhotoveny tak, aby byly splněny zmíněná kritéria kvality. Vlastnosti všech sítí spolu se zjištěnými hodnotami flukтуаčních a středních veličin jsou sepsány v příloze (viz Příloha F). Názorněji jsou výsledky studie zobrazeny v grafech 2 až 5.

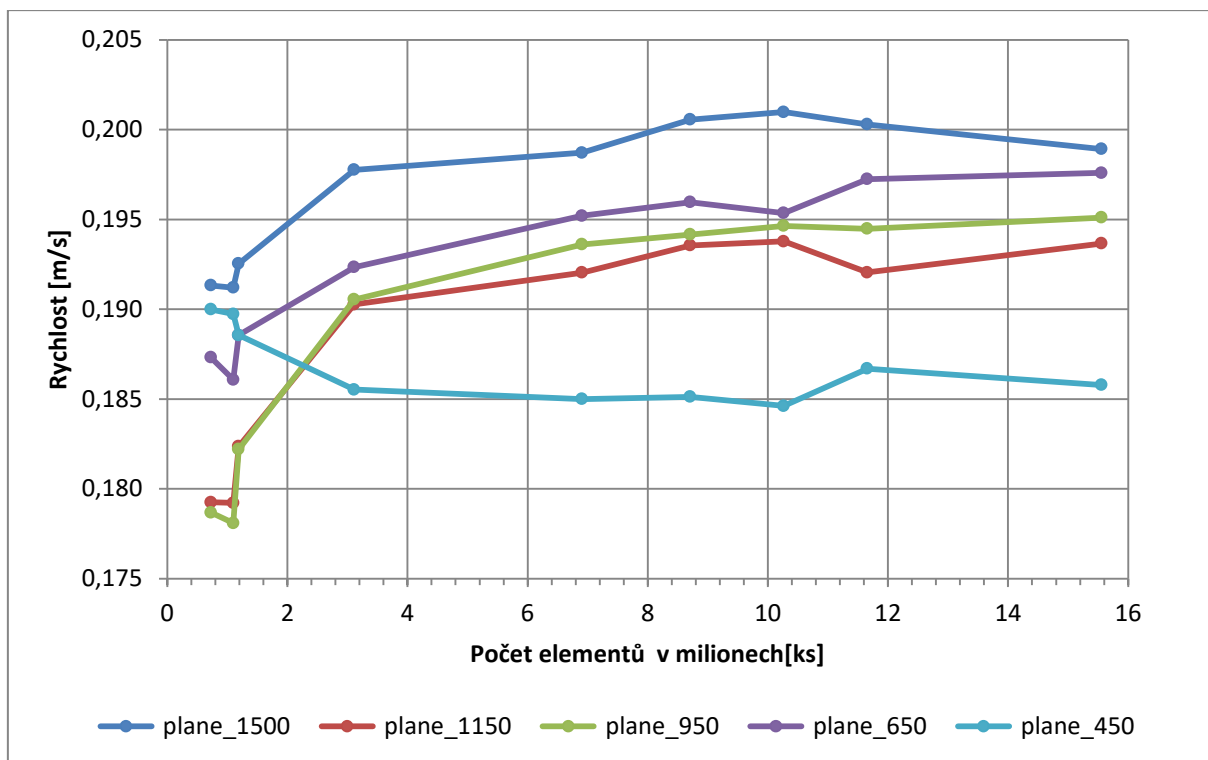
Limity residuí byly nastaveny na velice malou hodnotu, díky čemuž bylo zaručeno manuální sledování výpočtu a jeho následné ukončení. Mimo residua byla sledována také nerovnováha protékající hmoty.



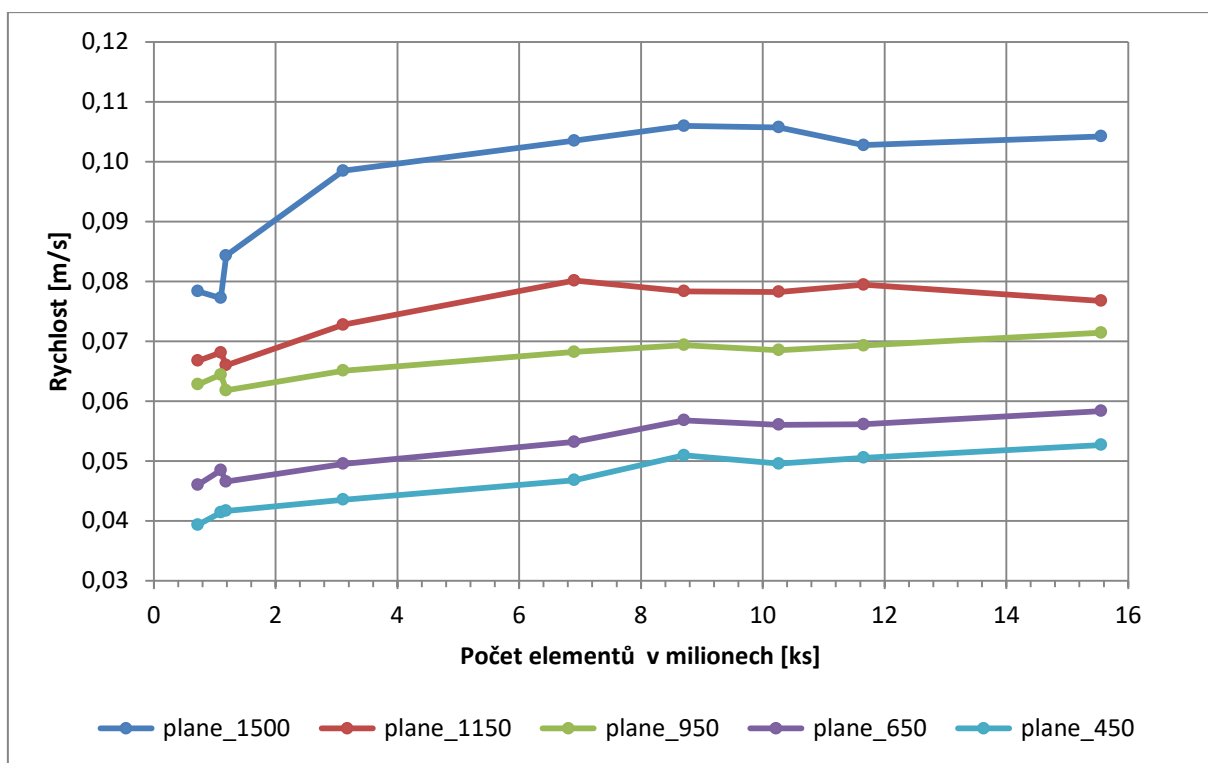
Graf 17 Střední teploty pro studii vlivu sítě modelů pohybových detektorů



Graf 18 Fluktuace teplot pro studii vlivu sítě modelů pohybových detektorů



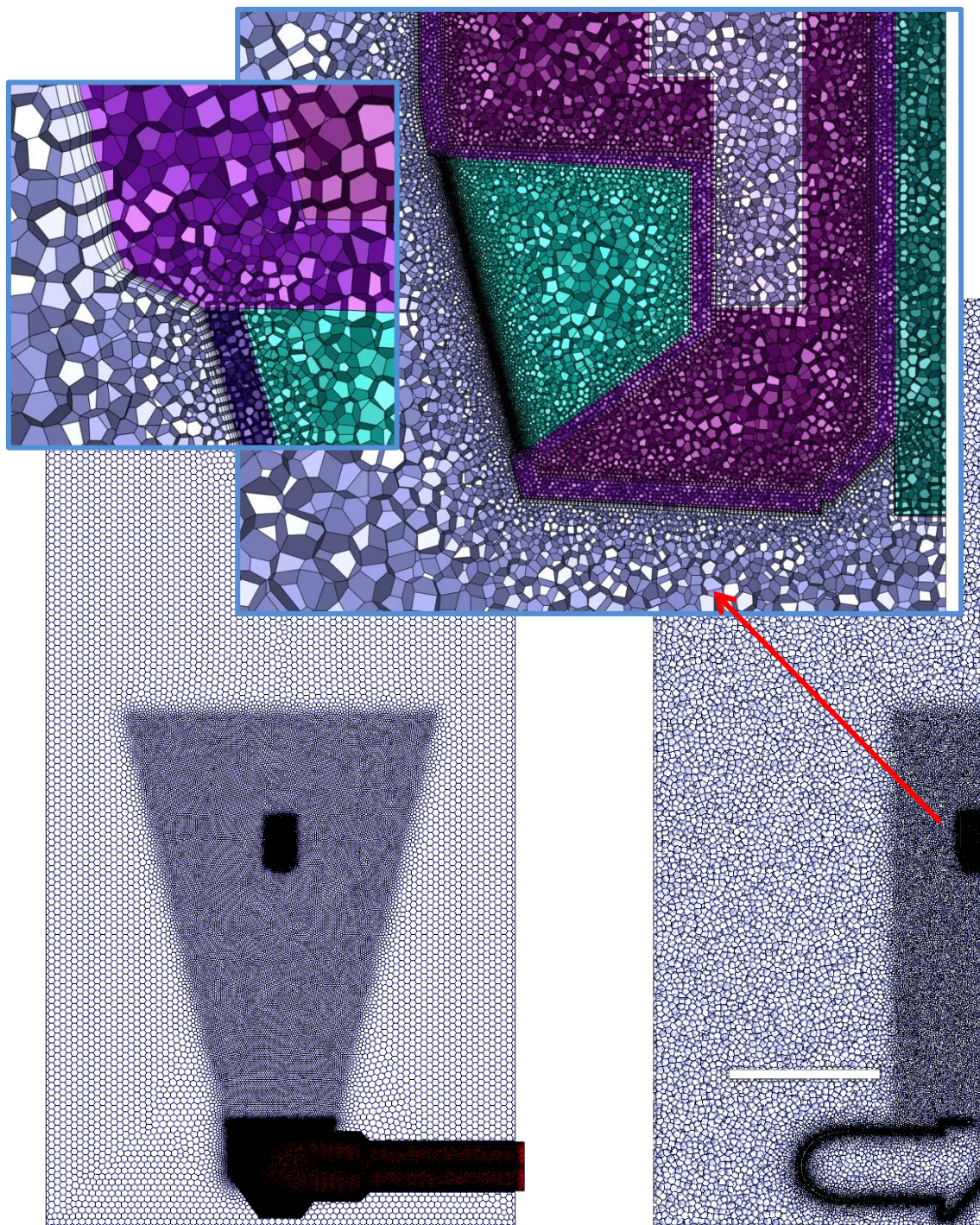
Graf 19 Střední rychlosti pro studii vlivu sítě modelů pohybových detektorů



Graf 20 Fluktuace rychlosti pro studii vlivu sítě modelů pohybových detektorů

8.4.2. Výběr optimální sítě

Jako výchozí způsob diskretizace byla pro účely této práce zvolena síť s pracovním názvem ms_pir_6. Tato síť se skládá z 8 708 110 polyhedrálních buněk, z toho 6 280 884 buněk připadá vnější proudové oblasti (skříní) a zbytek tvoří objem čidla JA-80. Z přiloženého obrázku je patrný vznik očekávaného zahuštění v oblasti čočky (tloušťka pouze 0,5 mm), toto zahuštění bylo vytvořeno pro pozdější možné sledování oteplení objemu nebo povrchu čočky. V neposlední řadě je si možné povšimnout vlivu tělesa BOI na generovanou síť.

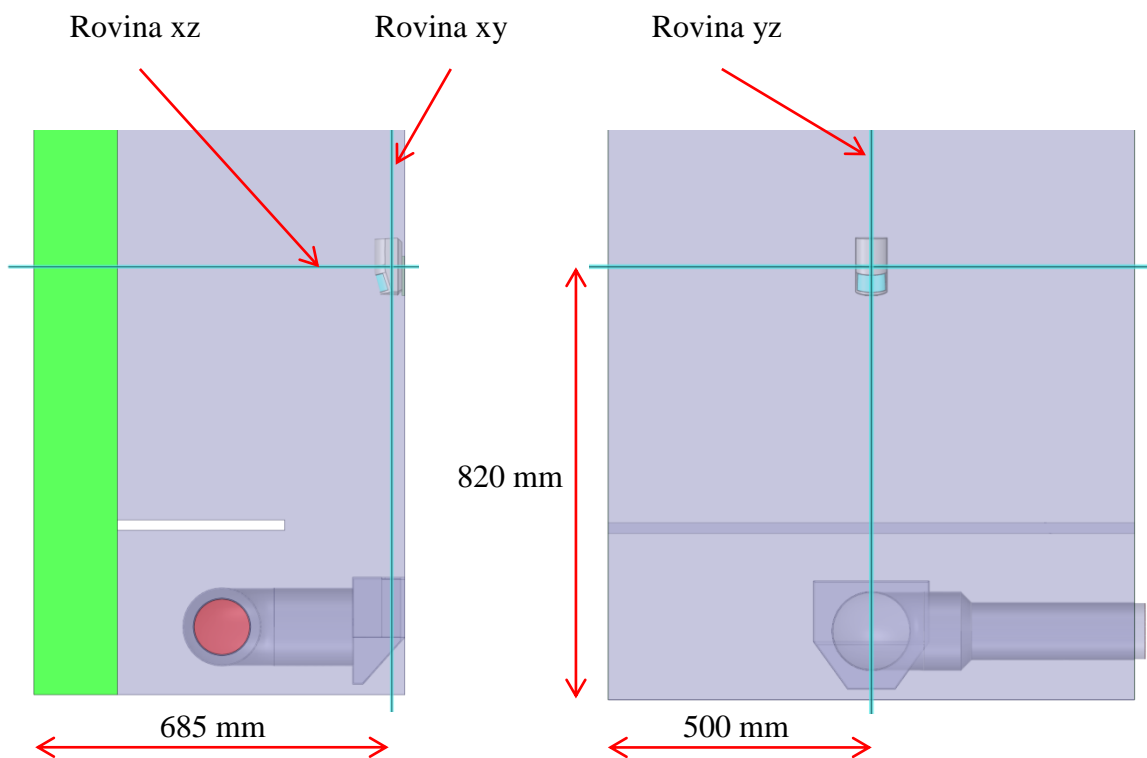


Obr. 60 Náhled vybrané sítě ze studie hrubosti pro pohybové detektory

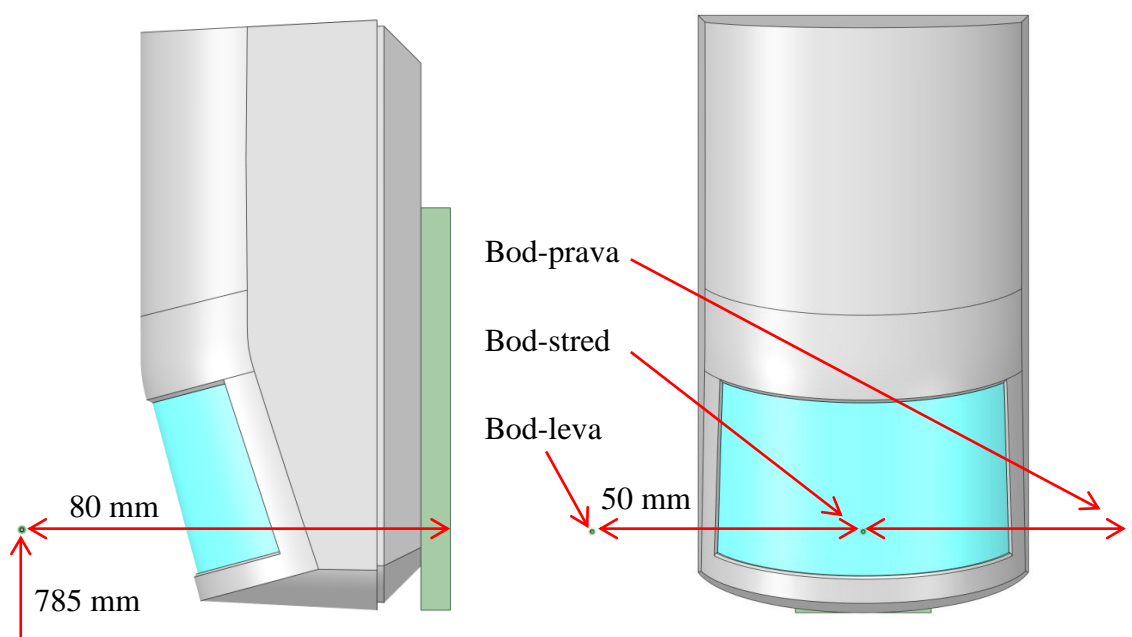
8.5. Metodika vyhodnocení pohybových čidel

Příložený Obr. 61 znázorňuje roviny a jejich umístění, na kterých byly vyhodnoceny všechny důležité veličiny. Rozložení rovin je shodné pro oba modely čidel. Rovina xy je ve vzdálenosti 685 mm od přední stěny a je tedy přesně v polovině otvoru vyústky. Rovina yz je v polovině testovací skříně a tedy i umístěného čidla.

Vyhodnocované veličiny byly také sledovány na rovinách popsaných v kapitole 8.4.1 a v bodech znázorněných na Obr. 62 níže.



Obr. 61 Metodika vyhodnocení pohybových čidel pomocí rovin



Obr. 62 Metodika vyhodnocení pohybových čidel pomocí bodů

8.6. Simulace modelů čidel pro různé podmínky

Cílem praktické části zabývající se pohybovými detektory je sledování vývoje proudu po opuštění vyústky a podchycení fluktuací, které mohou mít vliv na oteplení čočky nebo celého čidla. Oteplení čočky snižuje efektivitu detekce pohybu.

Mimo rozsah této práce byl pro tyto čidla proveden nestacionární výpočet jednoho celého cyklu změny teploty na vstupu, popisovaný v kapitole 3.3.1. Výsledky z tohoto výpočtu jsou neveřejné a nejsou v této práci zobrazeny. Tento výpočet je velmi časově a výpočtově náročný a pro účely této práce nadbytečný. Z těchto důvodů byl proveden nestacionární výpočet bez teplotního profilu na vstupu, tedy pro konstantní teplotu 35 °C.

Jelikož není možné v této práci zobrazit detailní kontury rychlostí a teplot s příslušnou škálou hodnot, byly všechny výsledky normovány. Veškeré kontury rychlostí a teplot byly poděleny jejich maximální hodnotou zjištěnou ze stacionárního výpočtu. Aby byly modely alespoň porovnatelné, byly užity jen maximální hodnoty zjištěné pro model čidla JA-80.

Nastavení nestacionárního výpočtu je možné k nahlédnutí v Tab. 19. Bylo simulováno celkem 16,5 s, přičemž prvních 30 časových kroků slouží jako předpočet pro ustálení výpočtu. Velikost časového kroku byla zvolena s ohledem na velikost výpočetního prostoru, velikost buněk v síti a očekávané rychlosti.

Tab. 19 Přehled nastavení nestacionárního výpočtu pohybového detektoru

	Časový krok [s]	Počet kroků	Simulovaný čas [s]
Předpočet	0,05	30	1,5
Výpočet	0,05	300	15

8.7. Analýza získaných výsledků

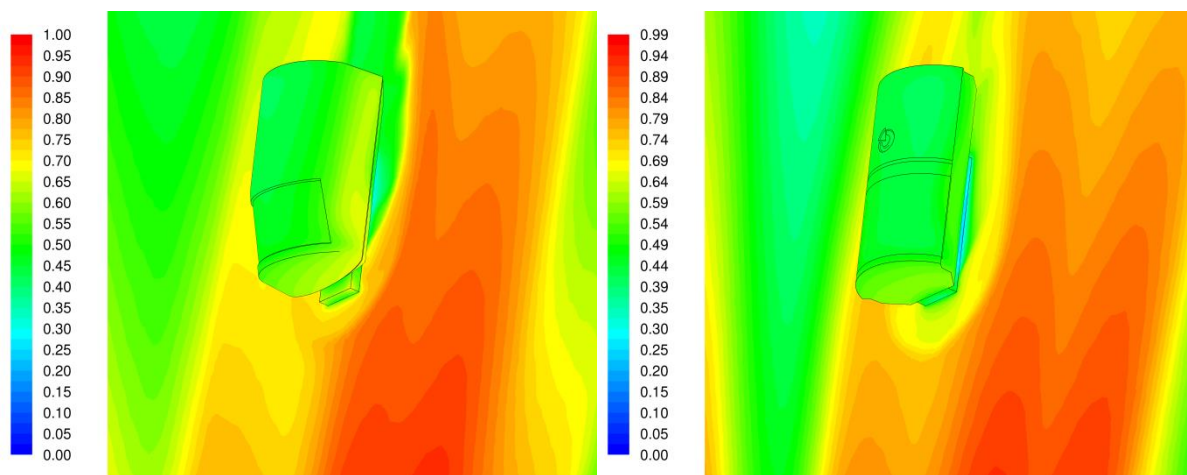
V této části jsou nejdříve prezentovány výsledky ze stacionárních výpočtů, které slouží jako inicializační data, a poté z nestacionárního výpočtu v různých časech.

8.7.1. Stacionární výpočet pohybových čidel

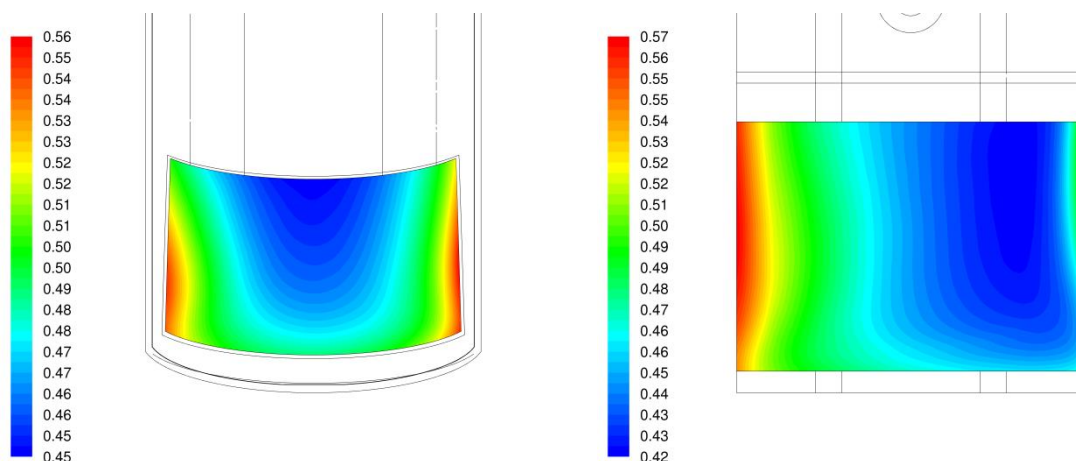
Protože stacionární výpočet je pouze průběžným výstupem simulací, jsou výsledky stacionárního výpočtu zobrazeny jen na vybraných obrázcích, viz Obr. 63 až Obr. 69. Z přiložených kontur je patrná korelace mezi normovanou škálou teploty a rychlosti pro oba typy čidel, kdy bylo čidlo JA-80 vybráno jako referenční.

Všechny veličiny zobrazované pomocí kontur a grafů byly průměrovány.

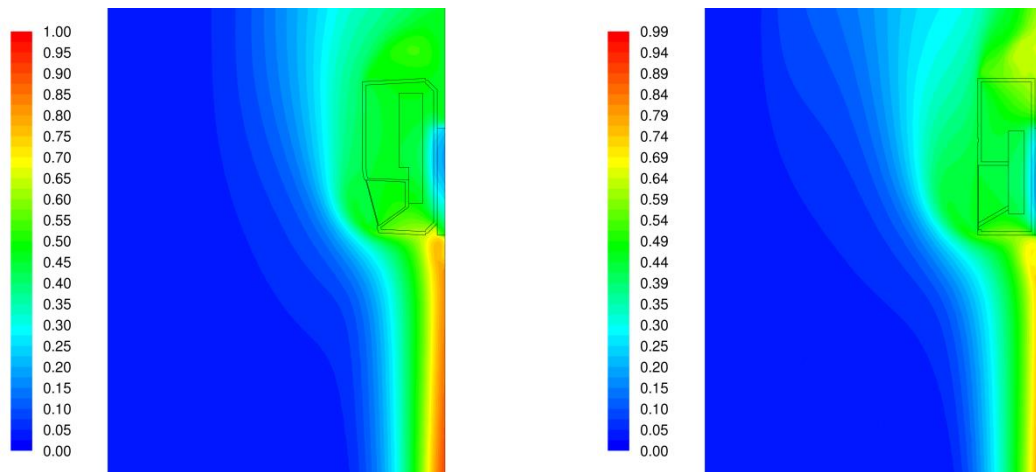
Na níže přiložených konturách je vždy detektor JA-80 vlevo a JA-100 vpravo.



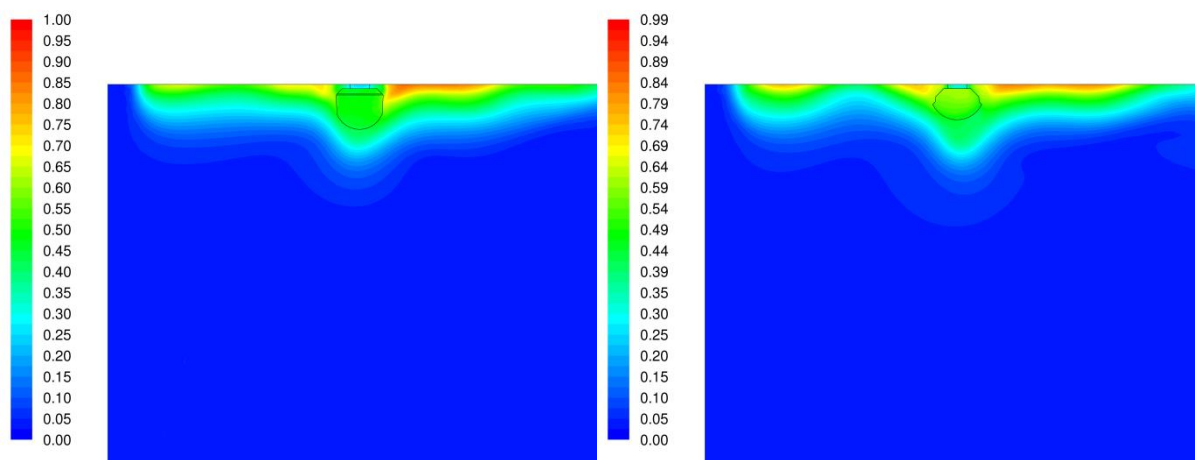
Obr. 63 Kontury celkové teploty na povrchu



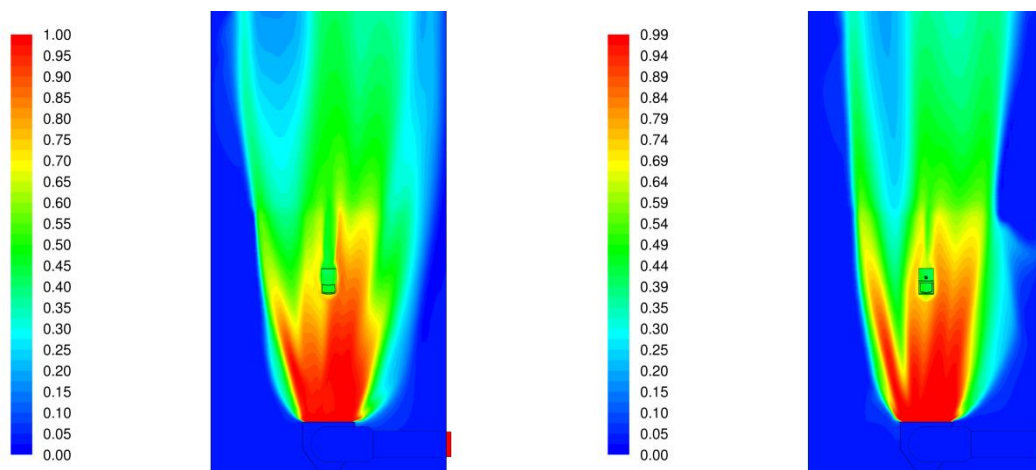
Obr. 64 Kontury celkové teploty na čošce (lokálně vztážená škála)



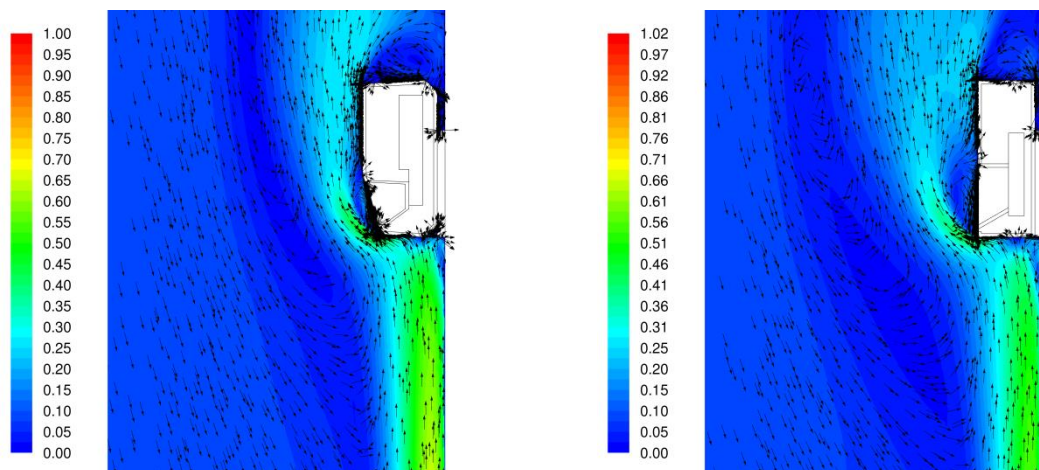
Obr. 65 Kontury celkové teploty na rovině yz



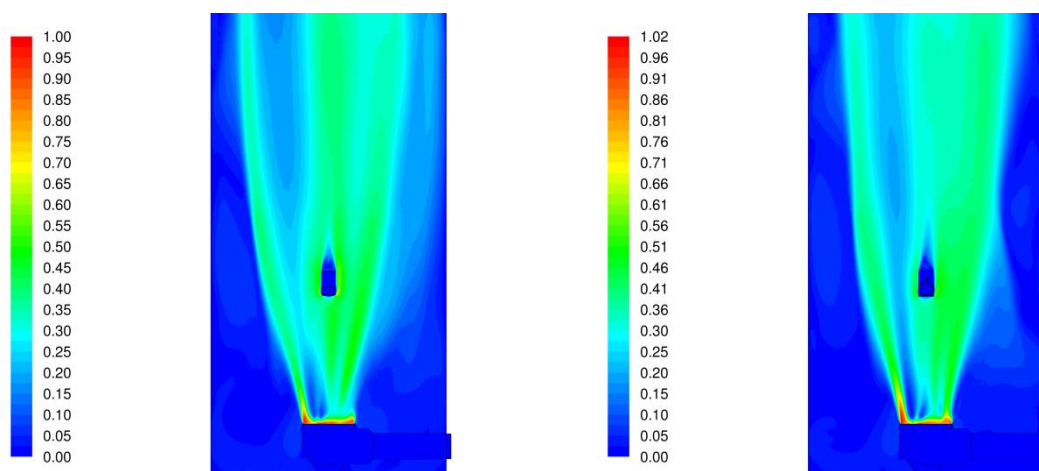
Obr. 66 Kontury celkové teploty na rovině xz



Obr. 67 Kontury celkové teploty na zadní straně skříně



Obr. 68 Kontury rychlosti na rovině yz



Obr. 69 Kontury celkové teploty na rovině xy

8.7.2. Nestacionární výpočet pohybových čidel

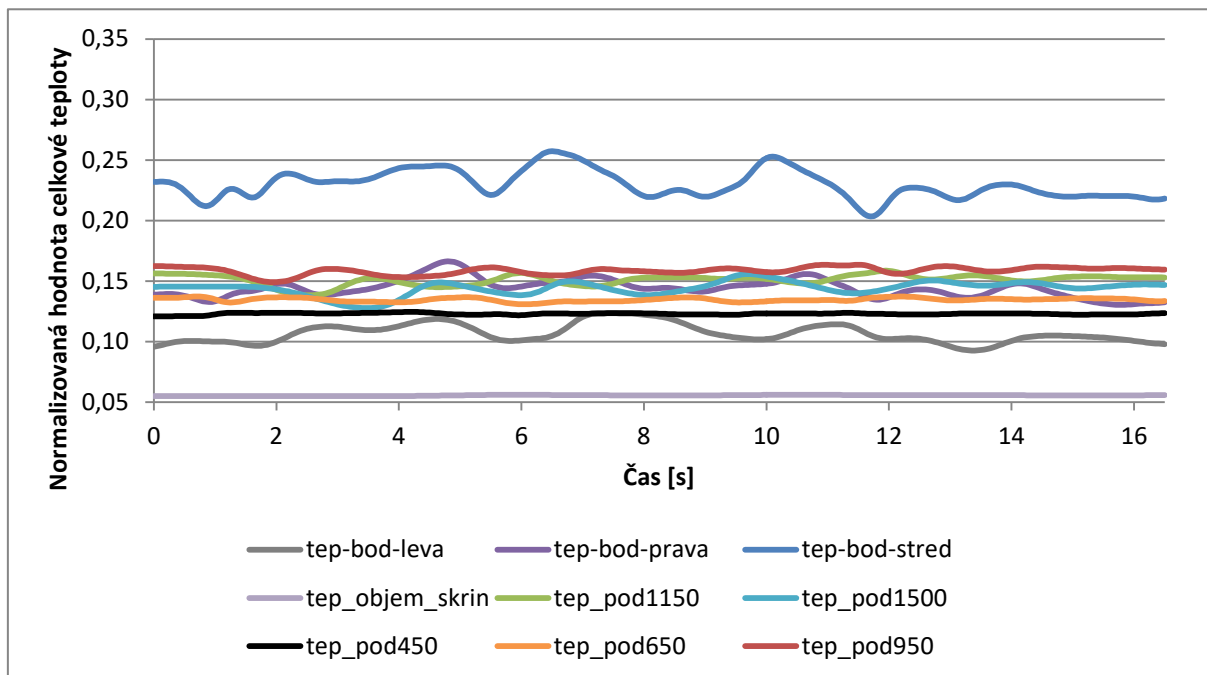
Jak již bylo řečeno, bylo simulováno celkem 16,5 s pro oba typy detektorů. Během výpočtu byly monitorovány hodnoty rychlostí a celkové teploty. Tyto veličiny byly vyhodnoceny ve všech časových krocích a jejich kontury jsou zobrazeny na rovinách dle kapitoly 8.5. Pro detailnější porovnání obou typů čidel byl sledován vývoj daných veličin na dalších, dříve zmíněných, rovinách a bodech. Tyto výsledky jsou přehledně seskupeny v příložených grafech.

Dále zobrazené výsledky obsahují normované škály hodnot. Pro porovnatelnost mezi čidly jsou svislé osy příložených grafů omezeny mezi stejnými hodnotami.

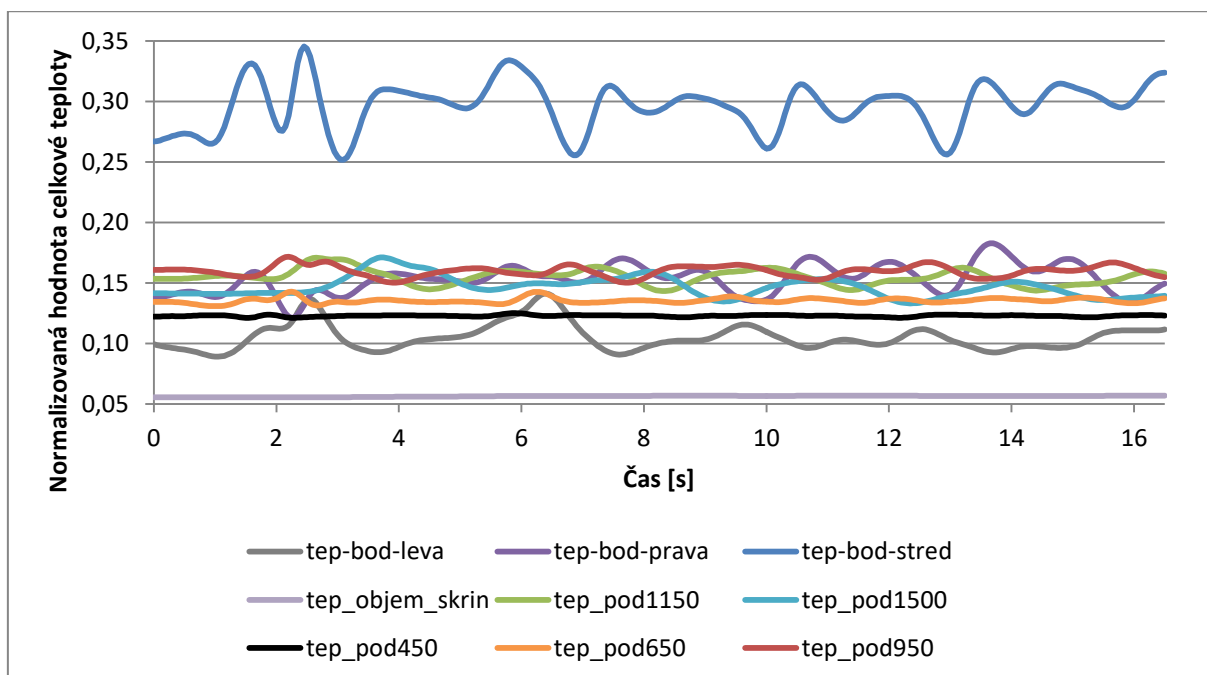
8.7.2.1. Porovnání výsledků pomocí grafů

Příložené grafy (Graf 21 a Graf 22) zobrazují neustálenost hodnot celkové teploty na třech kontrolních bodech před detektorem a v pěti rovinách, které sloužily pro studii hrubosti. Dále je pro kontrolu zobrazen vývoj teploty objemu skříně.

Je názorné, že teplota objemu skříně a teplota na rovinách pod_450 až pod_1500 je pro oba typy čidel dosti podobná. Hodnoty teploty v bodech jsou ale rozdílné, kdy byla nejvyšší hodnota sledována v bodě bod-stred a nejnižší v bodě bod-leva. Značná rozdílnost výsledků v bodě bod_leva a bod_prava je s největší pravděpodobností způsobena nedokonalým tvarem přívodního potrubí. Tvar čidla JA-100 způsobuje vyšší fluktuování hodnot oproti čidlu JA-80. U čidla JA-100 byly také naměřeny vyšší hodnoty teploty v bodě bod-stred a to téměř o 8 %.

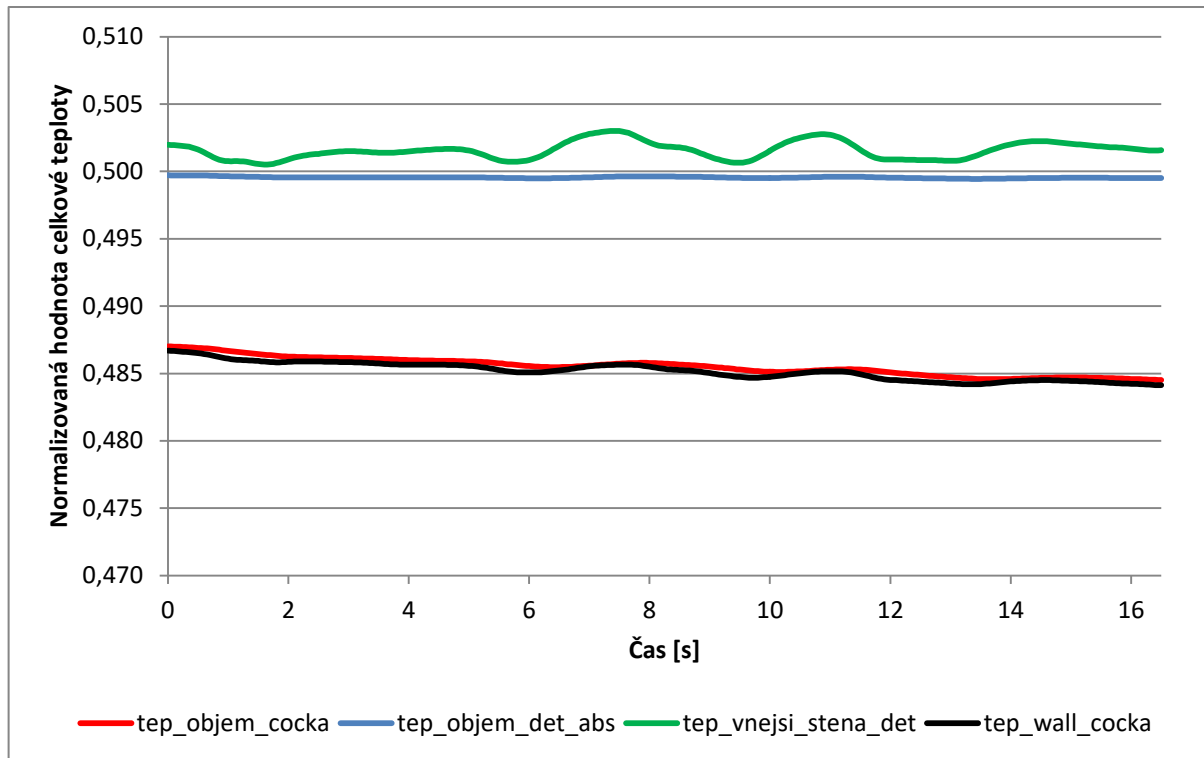


Graf 21 Hodnoty celkové teploty čidla JA-80

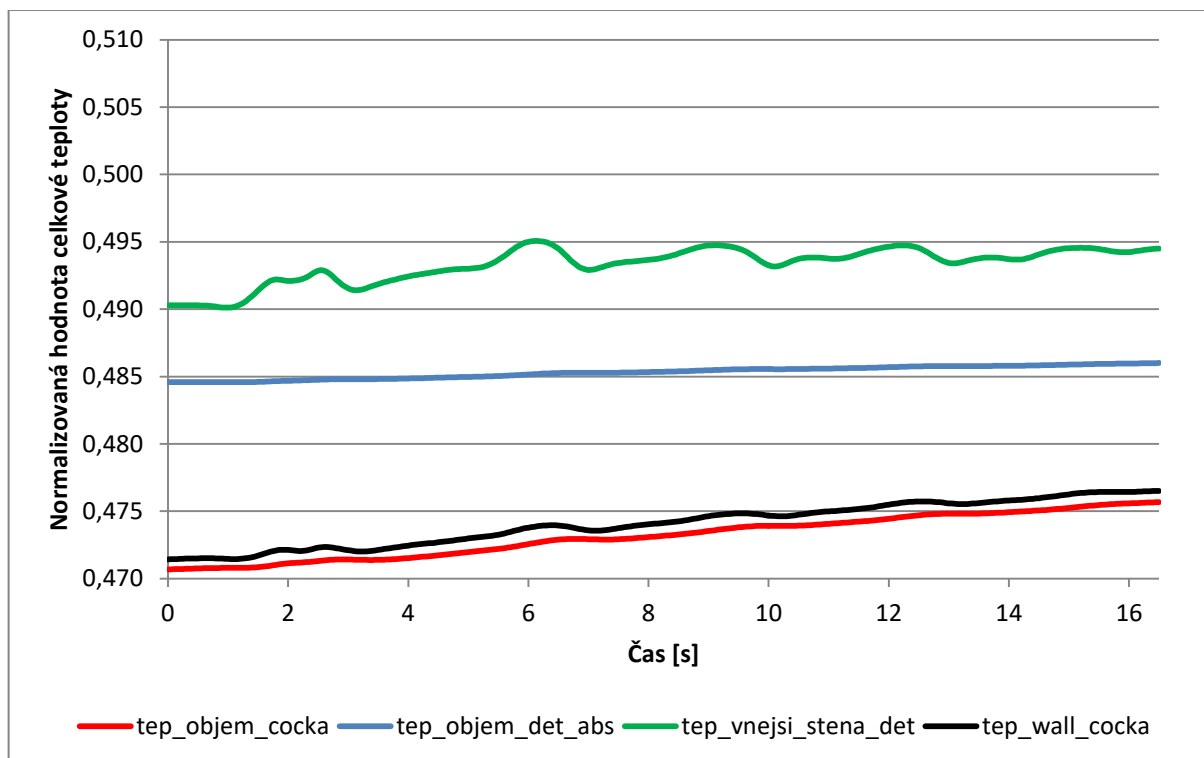


Graf 22 Hodnoty celkové teploty čidla JA-100

Hodnoty celkové teploty byly také sledovány na povrchu čočky a vnější stěně detektoru, dále byla teplota vyhodnocena na objemu čočky a objemu tělesa detektoru. Je patrné, že na daných lokacích bylo dosaženo mírně vyšších hodnot u čidla JA-80, avšak rozdíly jsou menší než 2 %. Lze si povšimnout podobného trendu pro hodnoty teploty získané na povrchu a v objemu čočky, tento jev je způsoben právě malou tloušťkou čočky (0,5 mm). Tyto výsledky jsou zobrazeny níže (viz Graf 23 a Graf 24).

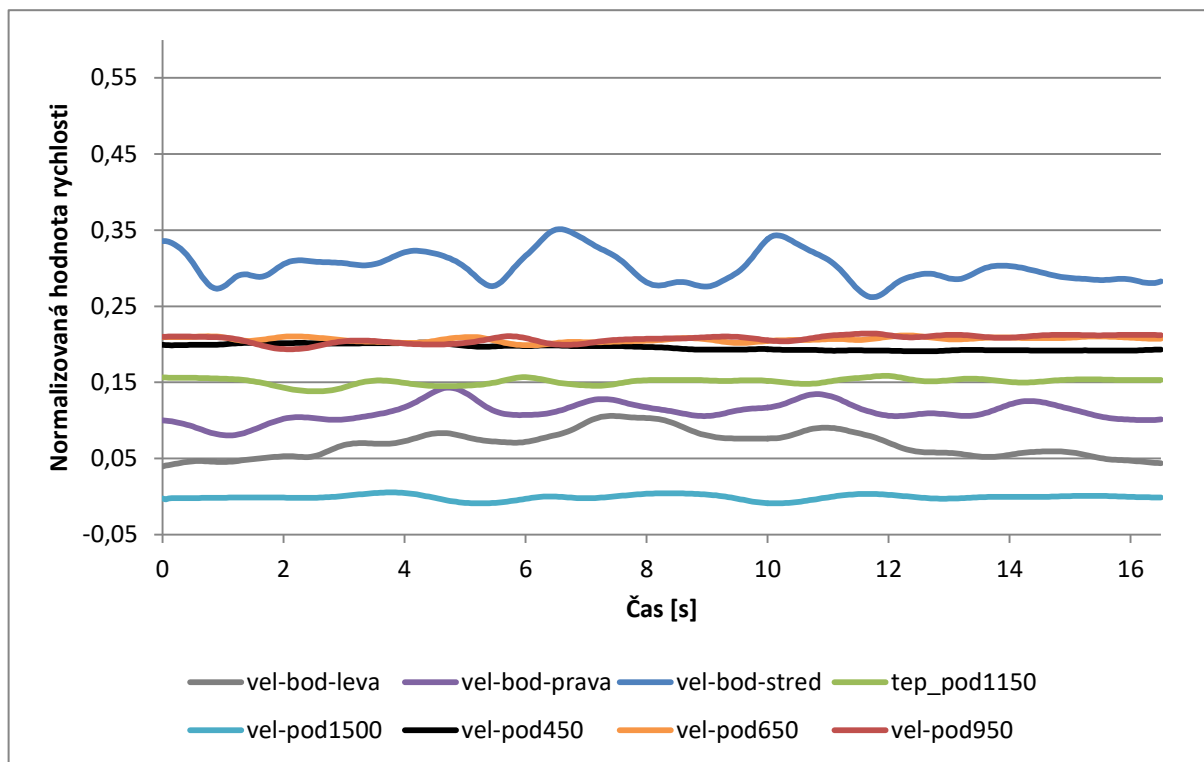


Graf 23 Hodnoty celkové teploty čidla JA-80 na dalších lokacích

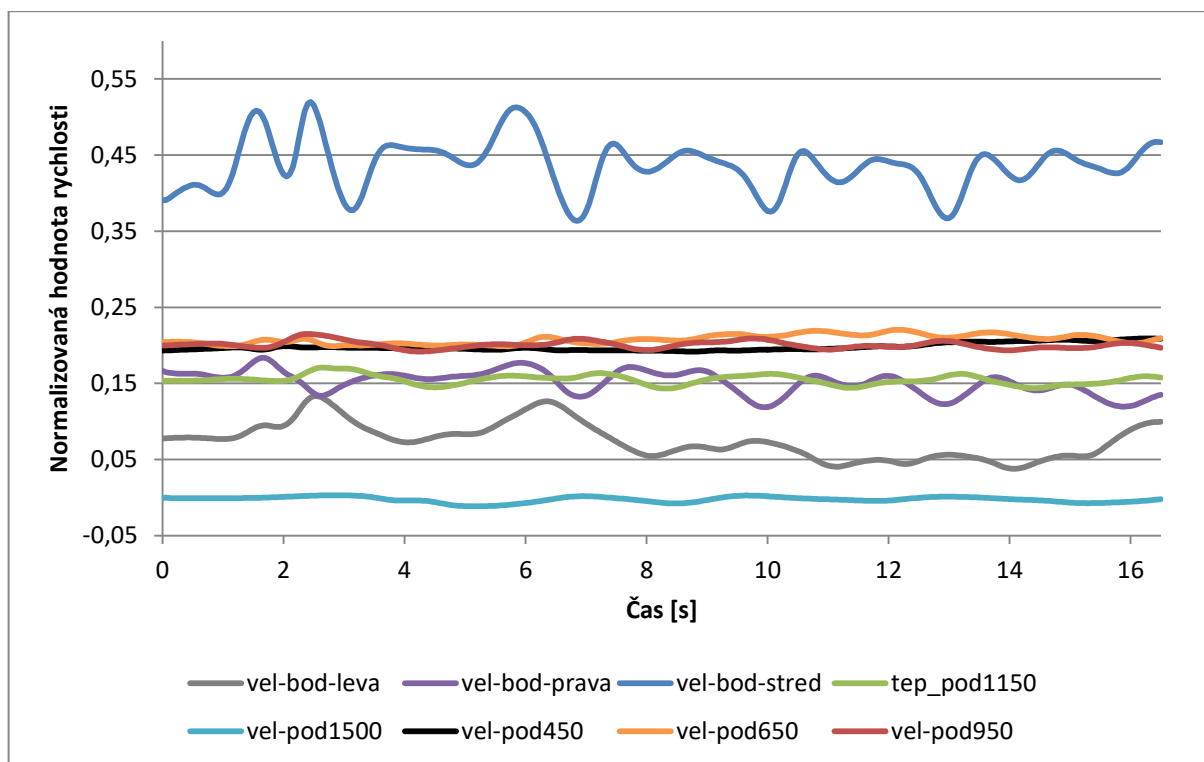


Graf 24 Hodnoty celkové teploty čidla JA-100 na dalších lokacích

Z vložených pěti rovin a tří kontrolních bodů byly získány také hodnoty rychlosti, viz výsledky Graf 25 a Graf 26. Získané rychlosti na všech níže popsaných rovinách jsou pro oba typy detektorů prakticky shodné, ovšem rychlosti sledované v bodě bod-střed je u detektoru JA-100 až o 13% vyšší a v bodě bod-prava o 4% vyšší. Rychlosti v bodě bod-leva jsou podobné.



Graf 25 Hodnoty rychlosti čidla JA-80



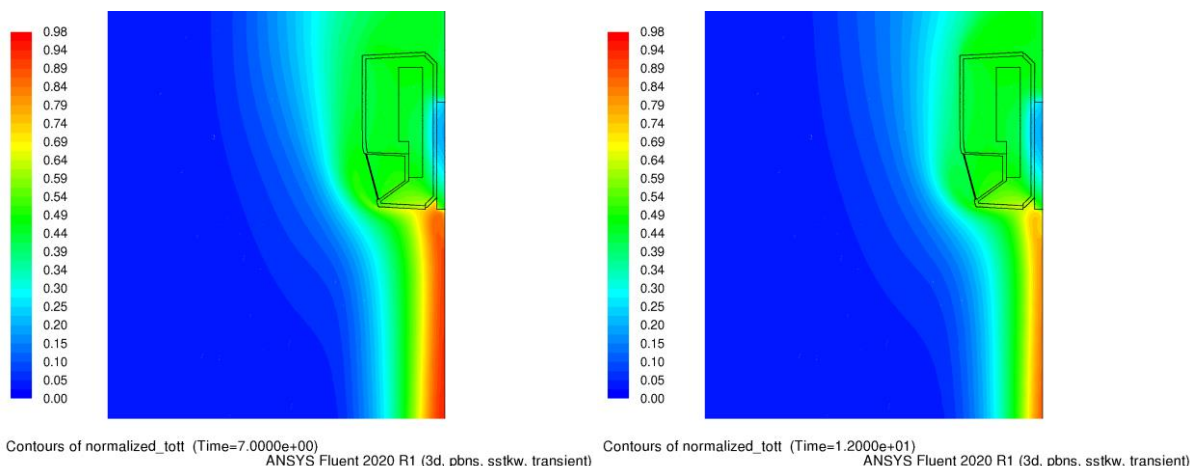
Graf 26 Hodnoty rychlosti čidla JA-100

8.7.2.2. Porovnání výsledků pomocí kontur teploty

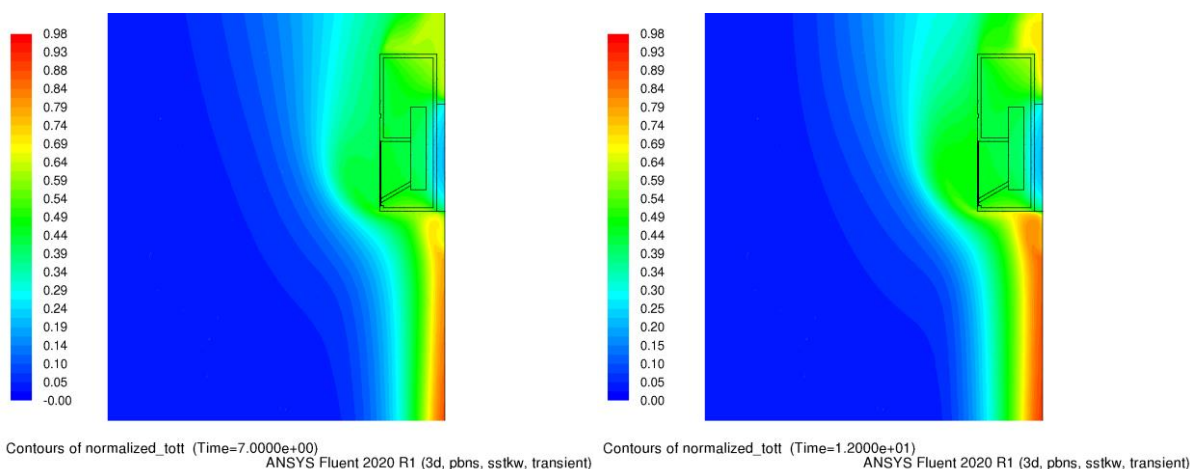
Kontury teploty zobrazené na Obr. 70 a Obr. 71 ukazují mírnou nahodilost proudu otepleného vzduchu. Toto šíření proudu podél stěny poukazuje také na důležitost správného umístění detektoru v prostoru, protože ohřátí čochy může mít negativní vliv na funkci čidel.

Při porovnání vytvořených časových sekvencí kontur v čase byl vypořizován pulzující charakter proudu vypouštěného otepleného vzduchu.

Mezi normovanými hodnotami celkové teploty nejsou velké rozdíly, škály kontur jsou vztaženy ke globálnímu maximu.

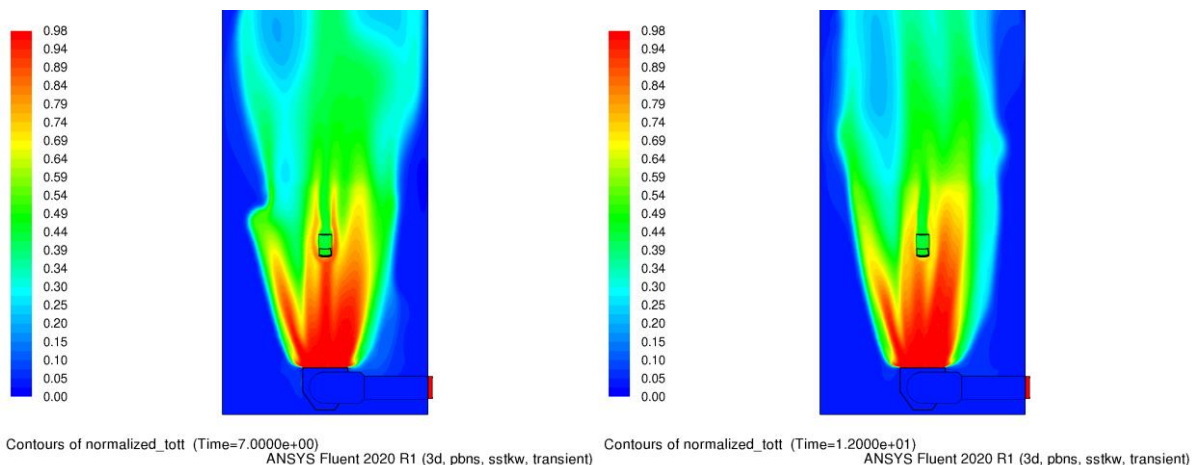


Obr. 70 Kontury teploty čidla JA-80 v čase 7 a 12 s – plocha yz

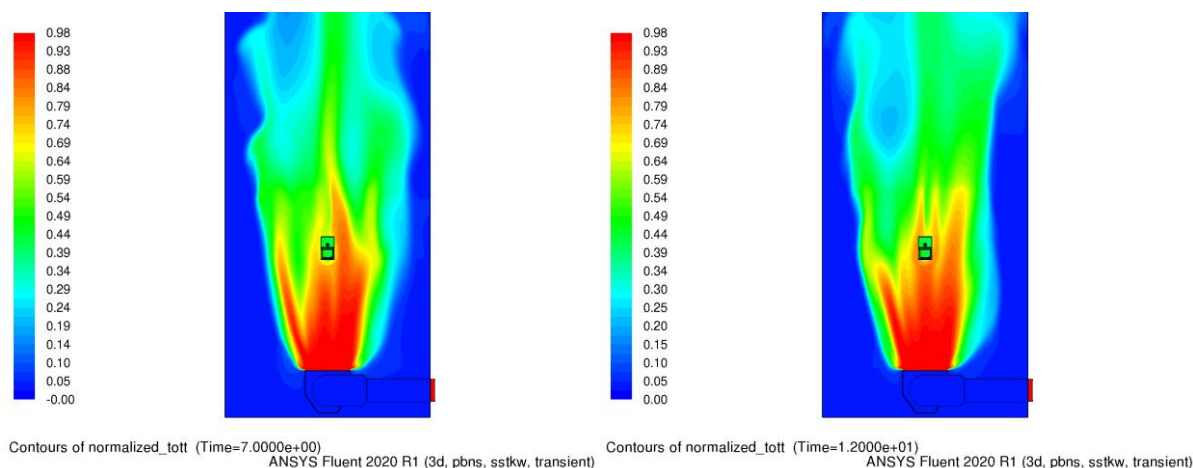


Obr. 71 Kontury teploty čidla JA-100 v čase 7 a 12 s – plocha yz

Pro další porovnání jsou přiloženy kontury teploty na zadní stěně testovací skříně, stěnách detektoru a přívodního potrubí (viz Obr. 72 a Obr. 73).



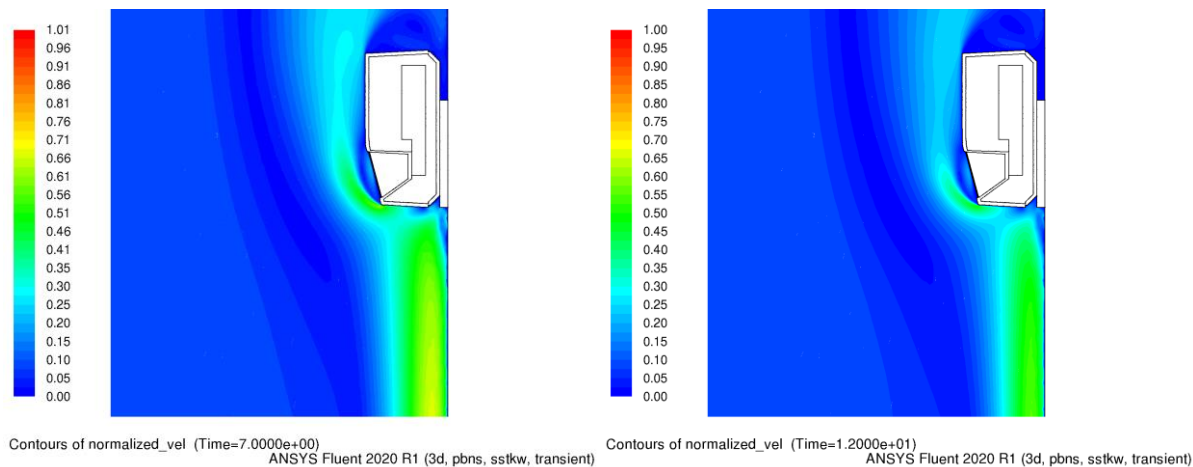
Obr. 72 Kontury teploty čidla JA-80 v čase 7 a 12 s – zadní stěna



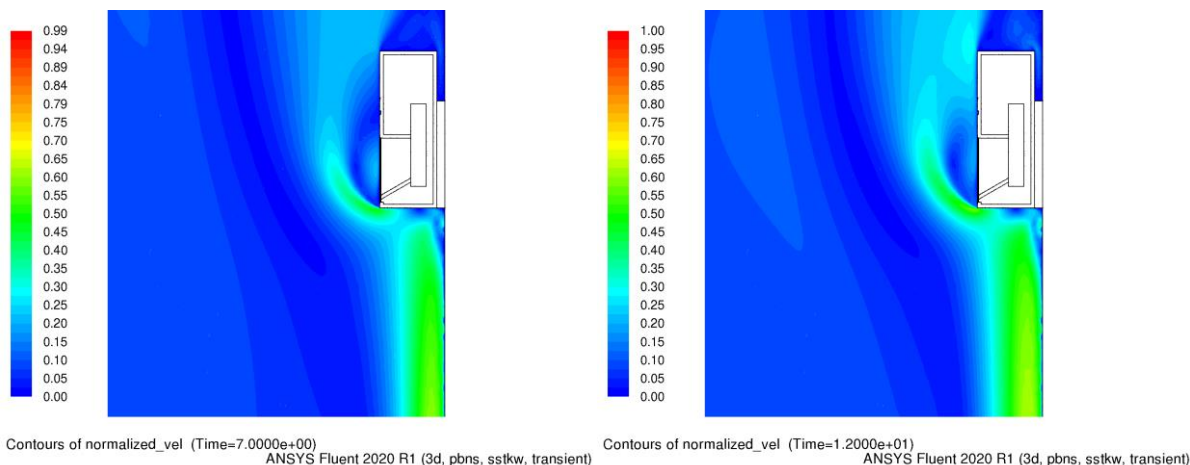
Obr. 73 Kontury teploty čidla JA-100 v čase 7 a 12 s – zadní stěna

8.7.2.3. Porovnání výsledků pomocí kontur rychlosti

Z kontur rychlosti (Obr. 74 a Obr. 75) pro oba detektory je dobře patrné místo odtržení proudu před čočkou. Tyto kontury mohou napomoci při výběru místa pro měření rychlosti nebo teploty při experimentálním měření.

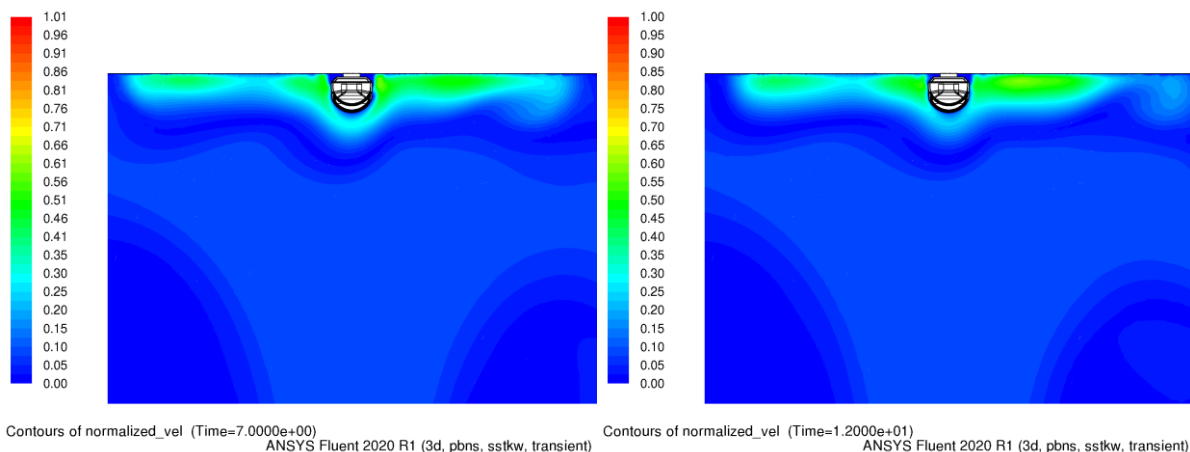


Obr. 74 Kontury rychlosti čidla JA-80 v čase 7 a 12 s – plocha yz

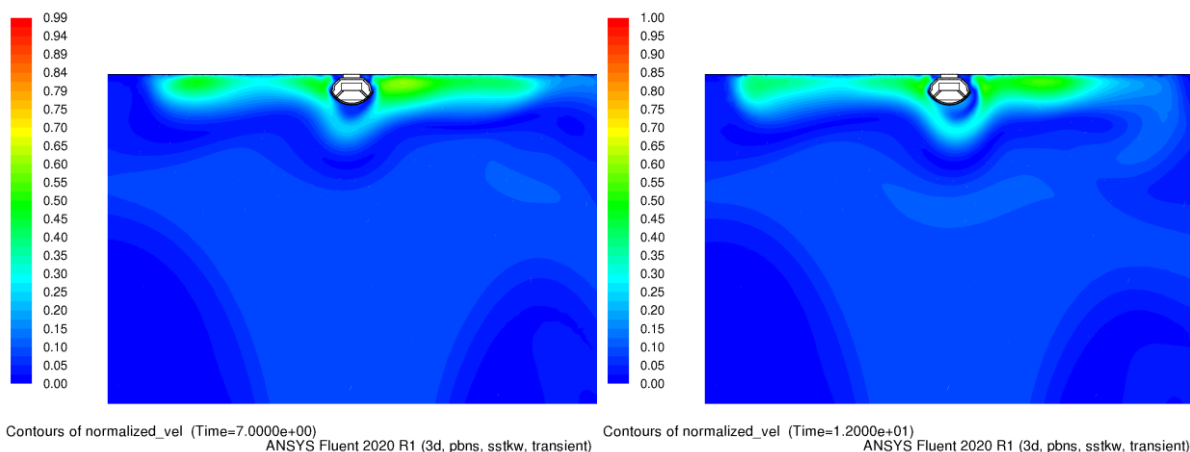


Obr. 75 Kontury rychlosti čidla JA-100 v čase 7 a 12 s – plocha yz

Náhled na distribuci proudu na rovině xz je možný níže (Obr. 76 a Obr. 77). Jelikož součástí požadavku společnosti Jablotron je nezobrazovat detailní náhledy, nebude dále v této práci zobrazeno podrobnější porovnání těchto modelů čidel.



Obr. 76 Kontury rychlosti čidla JA-80 v čase 7 a 12 s – plocha xz



Obr. 77 Kontury rychlosti čidla JA-100 v čase 7 a 12 s – plocha xz

9. Doporučení pro CFD modelování úloh s prouděním a sdílením tepla určených pro testování elektronických čidel

9.1. Kouřové detektory

Z hlediska podmínek testování a provozu těchto čidel je problematika jejich praktického modelování specifická a klade různé požadavky na výpočet. U kouřových čidel se jeví využití metodiky zpětných proudnic jako vhodné řešení, které tak představuje inženýrský přístup k těmto typům výpočtů. **Použitím této metody dojde k výrazné redukci výpočetní náročnosti a odpadá, v některých případech nutné, ukládání objemných datových souborů pro kontrolu nebo vyhodnocení výsledků. Pro jednu simulaci je jistě příhodné použít nestacionární výpočet, ovšem jedná-li se o větší počet výpočtů, například pro různé geometrické modifikace, nabývá výše zmíněná metodika na významu.**

Pro další provedení numerických simulací je možné doporučit umístění více bodů do prostoru optické komory nebo celého čidla. Stejně tak jako všechna vyhodnocení, tak i umístění bodů proběhlo pomocí vytvořeného skriptu a není tedy problém s vytvořením více bodů. Vyhodnocení získaných časů ze všech těchto bodů pak bude přesnější.

9.2. Pohybové detektory

U pohybových detektorů bylo v této práci nutné simulovat pouze děje spojené s vnějším obtékáním čidla proudícím médiem. **Pro výpočet oteplení povrchu tělesa je vhodné do nestacionární simulace zahrnout i objem tohoto tělesa, jelikož tepelně akumulací vlastnosti objemu jsou důležité pro teplotu na povrchu. Z tohoto důvodu byl pro zjištění oteplení povrchu čočky modelován i objem čočky a celého detektoru.**

Jak již bylo popsáno v kapitole 6, pro diskretizaci výpočetní oblasti byly použity polyhedrální buňky. Tyto buňky se s výhodou využívají pro obklopení složitých tvarů, ale výpočtově nejefektivnější jsou buňky hexahedrální. Hexahedrální buňky, z jejich podstaty, velice špatně obklopují složité plochy a v blízkosti těchto povrchů pak vzniká značné zahuštění s nízkou kvalitou buněk. Řešením tohoto problému je relativně nová mozaiková technologie, která využívá polyhedrální buňky k obklopení komplexních povrchů a hexahedrální buňky k vyplnění zbylé výpočetní oblasti. Pro další simulace tohoto typu, by stálo za úvahu využití těchto hybridních sítí. Využití této metody může napomoci k další redukci výpočetního času.

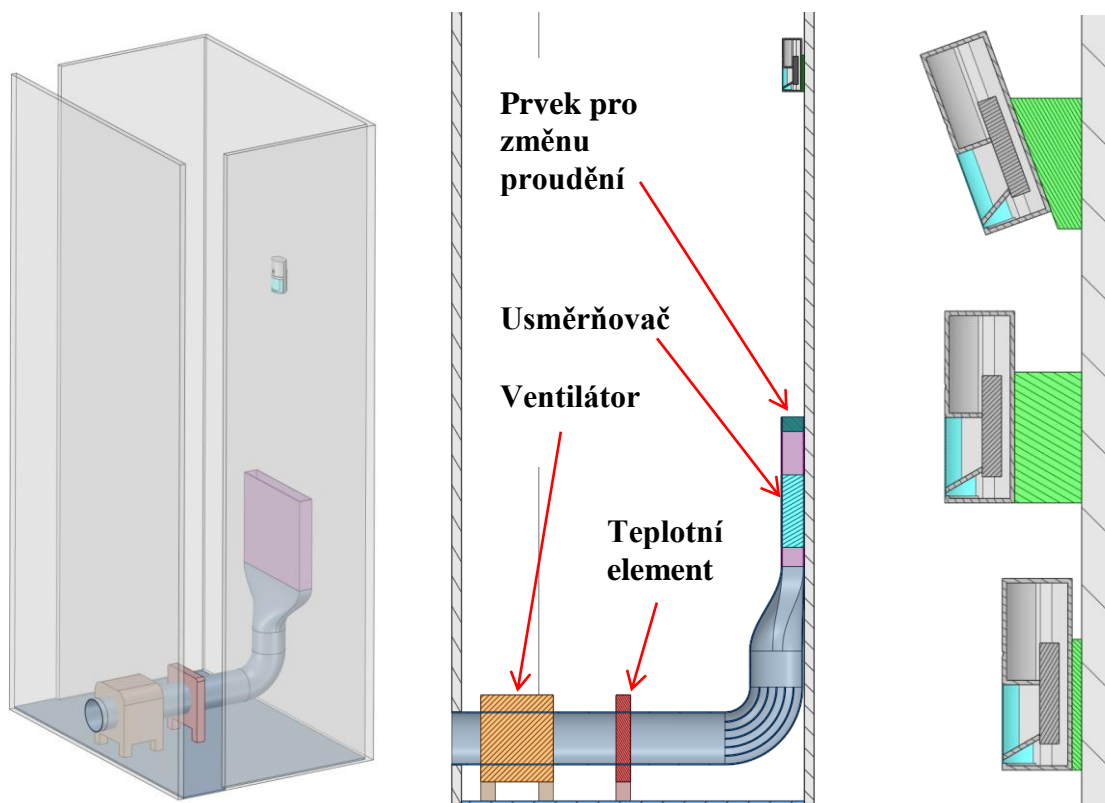
V textech věnujících se numerické simulaci těchto typů detektorů, bylo popsáno nevyhovující přírodní potrubí, které svým tvarem proud dostatečně neusměrní. Doporučená konfigurace testovací skříně disponuje vhodnějším tvarem přírodního potrubí, které zaručí definované proudění na výstupu potrubí. Tento návrh experimentu je popsán v kapitole 10.

10. Ideový návrh experimentu pro testování vybraného typu čidla

Pohybové PIR čidlo měří rozdílné hodnoty elektromagnetického záření v infračerveném pásmu a musí detekovat spektrum o určité šíři vyzařované detekovanou osobou. PIR detektory se standardně testují dle normy ČSN EN 50131-X, tato evropská norma definuje požadavky pro PIR čidla používané jako prvky PZTS. V běžných provozech nebo i v rodinných domech může být čidlo vystaveno odlišným podmínkám, než norma stanovuje, příkladem může být umístění v blízkosti oken, které mohou být zdrojem sálavého tepla, ventilátorů, klimatizací nebo nad otopnými tělesy.

Praktická část byla věnována testování vlivu otepleným vzduchem vůči detektoru. Konfigurace výpočtového prostoru (testovací skříně) byla inspirována laboratorním měřením a to včetně umístění čidla a tvaru přívodního potrubí. Právě geometrie potrubí (především vyústky) neumožňuje u stávajícího experimentu vytvoření homogenního proudění a šíření teplého vzduchu je pak nerovnoměrné a špatně definované.

Navržená konfigurace testovací skříně disponuje vhodnějším tvarem přívodního potrubí, které zaručí homogenní proudění na výstupu potrubí. Za vstupem je umístěn ventilátor, který zpravidla vytváří silně turbulentní proudění s nerovnoměrným profilem, proto je potřeba použít usměrňovač proudu (filtr, plástve, trubičky) a vložit vestavby do devadesátistupňového kolena. Oteplení vzduchu zaručí teplotní element v kombinaci s teplotním senzorem, umístěným v blízkosti čidla. Pro změnu typu proudění může být umístěn prvek na vyústění přívodního potrubí. Čidlo je možné umístit na různé tvary podložek pro potřebu simulovat jiné podmínky. Tato variabilita umožňuje realističtější nastavení testu pro různé podmínky, které norma nespécifikuje. Pro vytvoření laminárního proudění či turbulentního proudění s danými vlastnostmi na výstupu z potrubí je vhodné provést testovací výpočty, které ověří velikost a umístění usměrňovacích elementů a ostatních prvků. Na přiloženém obrázku (Obr. 78) lze zhlédnout náhled konfigurace, podrobněji viz Příloha G.



Obr. 78 Ideový návrh experimentu pohybových čidel

11. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo popsat metodiku modelování úloh s prouděním a sdílením tepla určených pro testování elektronických čidel. Teoretická část se zabývá rešerší problematiky elektronických pohybových a kouřových čidel a jejich testováním s ohledem na jejich obtékání.

Praktická část této práce byla věnována numerickému modelování úloh pro kouřové a pohybové detektory v softwaru ANSYS 2020 R2. Praktická část je rozdělena do dvou hlavních kapitol a to na simulaci kouřového detektoru a na simulaci pohybových detektorů. Pro oba typy simulací byl popsán způsob výběru a zjednodušení geometrie, tvorba výpočetních sítí, nastavení výpočtu, okrajových podmínek a materiálových vlastností, metodika vyhodnocení získaných výsledků a v neposlední řadě analýza výsledků simulací.

V kapitole věnující se simulaci kouřových detektorů bylo navíc představeno porovnání turbulentních modelů a metodika nastavení porézního média jako náhrada mřížky proti hmyzu. Oproti tomu byla v kapitole věnující se pohybovým detektorům řešena studie nezávislosti sítě a modely tak byly verifikovány v závislosti na hrubosti sítě.

Pro kouřové detektory je hlavním cílem takový návrh konstrukce, který disponuje dostatečně rychlým plněním optické komory proudícím médiem. Vlivy geometrických úprav kouřového detektoru jsou popsány v kapitole 7.7. Pro efektivní podporu vývoje těchto typů čidel bylo také cílem získat představu o plnění optické komory kouřem již ze stacionárního výpočtu. Čas plnění z nestacionární úlohy byl sledován, na základě šíření druhé fáze, z vytvořené sekvence kontur pro jednotlivé časové kroky. Dále byl také sledován podíl vypuštěné fáze v 3D matici bodů uvnitř optické komory v závislosti na čase. Pro zjištění času plnění ze stacionárního výpočtu slouží zpětné proudnice, které byly vypuštěny ze stejných bodů uvnitř optické komory. ANSYS Fluent umožňuje zobrazení času pro zpětné proudnice mezi vypuštěným bodem a vstupem.

Bylo zjištěno, že využití metodiky zpětných proudnic se jeví jako vhodné řešení, které tak představuje inženýrský přístup k těmto typům výpočtů. Použitím této metody dojde k výrazné redukci výpočetní náročnosti a odpadá, v některých případech nutné, ukládání objemných datových souborů pro kontrolu nebo vyhodnocení výsledků. Bohužel není znám přesný moment, kdy je optická komora již dostatečně zaplněna druhou fází, aby došlo k sepnutí alarmu, nicméně vyhodnocení času dle mediánu ze stacionárního výpočtu odpovídá očekávanému „střednímu“ zaplnění komory z nestacionárního výpočtu. Také minimální časy získané z matice bodů ze stacionárního výpočtu odpovídají okamžiku, kdy druhá fáze prostupuje lamelami optické komory, která je tak na úplném počátku plnění. Tyto kontury jsou zobrazené v příloze (viz Příloha H).

Pohybové detektory by měly být zkonstruovány a umístěny tak, aby oteplení čočky okolním vzduchem bylo co nejnižší. Výsledky simulací jsou pomocí grafů a kontur popsány v kapitole 8.7.2. Tyto výsledky mohou napomoci při výběru vhodného místa pro měření rychlosti nebo teploty při experimentálním měření, dále z výsledků také plyne důležitost celkového tvaru čidla vzhledem k interakci s proudícím otepleným vzduchem.

Validace získaných výsledků metodou CFD numerické simulace pro oba typy detektorů bohužel nebylo možné provést, navíc výpočty kouřových detektorů se zabývají metodikou zpětných proudnic a vlivem specifických úprav geometrie na distribuci proudícího média, takže provedení experimentu by nebylo jednoduché. Provedené výpočty a navržené postupy přesto mohou velmi dobře sloužit pro efektivní vývoj a návrh nových konstrukcí těchto čidel minimálně z pohledu porovnání chování navržených geometrických provedení s cílem vybrat pro výrobu a zkoušky prototypů čidel nejvhodnější řešení.

12. Bibliografie

1. **FABIK, Alan a VYSLOUŽILOVÁ, Kristýna.** Jablotron provedl unikátní průzkum mezi vězni. *AXL electronics s.r.o.* [Online] 28. 1 2013. https://www.axlelectronics.cz/images/stories/Tiskova_zprava_Jablotron_24012013.pdf.
2. Jablotron.com. [Online] 2020. [Citace: 13. 11 2020.] <https://www.jablotron.com/cz/>.
3. **UHLÁŘ, Jan.** *Technická ochrana objektů II.díl.* Praha : Policajní akademie České republiky, 2005. 80-7251-189-0.
4. **RŮČKA, Ondřej.** *PIR detektory a jejich spolehlivost.* Zlín : Bakalářská práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011.
5. **LAŠTOVKA, Štefan.** Antimasking a jeho využitie v praxi. *Security news.* [Online] [Citace: 22. 9 2020.] http://www.securitynews.sk/clanok/23_antimasking-a-jeho-vyuzitie-v-praxi.
6. Pasivní infračervené čidlo. *cswiki.cz.* [Online] 12. 11 2016. [Citace: 19. 1 2021.] https://www.cswiki.cz/wiki/Pasivn%C3%AD_infra%C4%8Derven%C3%A9_%C4%8Didlo.
7. **MICHALEC, Libor.** PIR detektor: skvělý sluha, ale zlý pán. *Vyvoj.hw.cz.* [Online] 19. 3 2013. [Citace: 3. 12 2020.] <https://vyvoj.hw.cz/automatizace/pir-cidlo-skvely-sluha-ale-zly-pan.html>.
8. **BOR, Michal.** *Možnosti ověření vlastností PIR detektorů.* Zlín : Bakalářská práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010.
9. **CIRINO Giuseppe, NETO Luiz Gonçalves.** *Design of cubic-phase distribution lenses for passive infrared motion sensors.* Sao Paulo : The International Society for Optical Engineering, 2013. 10.1117/12.487786.
10. **YOUNG Hoon Ohn, JUNG Woo Han a spol.** *Clinical Usefulness of Fresnel Ganzfeld Stimulator.* Korea : Soonchunhyang University College of Medicine, Bucheon, 2015. 2092-9374.
11. **ČSN EN 50131-2-2.** *Poplachové systémy - Poplachové zabezpečovací a tísňové systémy - Část 2-2: Detektory narušení - Pasivní infračervené detektory.* Praha : Český normalizační institut, 2009.
12. Elektrická požární signalizace – EPS, Evakuační rozhlas – ER. *ALCAM PROFI s.r.o. Slaboproudé technologie.* [Online] [Citace: 23. 10 2020.] <http://www.alcamprofi.cz/elektricka-pozarni-signalizace-eps-evakuacni-rozhlas-er.html>.
13. **KLIM, Petrov.** *Determining the best location of smoke sensor in office room.* Mikkelin : Bachelor thesis, Mikkelin University of Applied Sciences, 2012.
14. **KRUELL Wolfgang, SCHULTZE Thorsten, TOBERA Robert, WILLMS Ingolf.** *Analysis of dust properties to solve the complex problem of non-fire sensitivity testing of optical smoke detectors.* University of Duisburg-Essen, Germany : Procedia Engineering, 2013. stránky 859 - 867.
15. **HUDEČEK, Jaroslav.** *Analýza vhodnosti použití automatických hlásičů.* Ostrava : Diplomová práce, Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, 2007.
16. **HOŠKOVÁ, Jitka.** *Ověření reakce autonomních hlásičů kouře.* Ostrava : Diplomová práce, Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, 2014.

17. Optical Beam Detectors - Product Guide. *AMPAC.net*. [Online] 1. 1 2017. [Citace: 13. 1 2021.] <https://ampac.net/wp-content/uploads/2017/01/PDS220-FIRERAY-PRODUCT-GUIDE.pdf>.
18. **BEKER, David a ADAMS, Paul.** *Residential Fire Detection*. Missouri : University of Missouri-Columbia, 1993.
19. **HOŠEK, Zdeněk.** Autonomní hlásiče kouře. *tzbinfo*. [Online] 13. 8 2008. [Citace: 20. 11 2020.] <https://www.tzb-info.cz/elektricka-pozarni-signalizace/5011-autonomni-hlasice-koure>.
20. **ČSN EN 54-7.** *Elektrická požární signalizace - Část 7: Hlásiče kouře - Bodové hlásiče využívající rozptýlené světlo, vysílané světlo nebo ionizaci*. Praha : Český normalizační institut, 2018.
21. **LINHART, Jiří.** *Mechanika tekutin I*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2009. 978-80-7043-766-7.
22. **DAVIDSON, Lars.** *Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence*. Goteborg : Chalmers University of Technology, Department of Mechanics and Maritime Sciences, 2020.
23. **ŠAMŠA, PETR.** *Numerické modelování proudového pole s odtržením*. Brno : Diplomová práce, České Vysoké Učení Technické v Brně, 2018.
24. **KOVAŘÍK, Petr.** *Modelování proudění a tepelného chování ventilovaného brzdového kotouče*. Plzeň : Disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2006.
25. **VLČEK, Petr.** *Modelování turbulentního proudění*. Praha : České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní, 2013.
26. **ANSYS, inc.** *ANSYS Fluent User's Guide 2020 R2*. 2020.

13. Seznam obrázků

Obr. 1	Logo Jablotron Alarms [2].....	13
Obr. 2	Elektromagnetické spektrum [3].....	15
Obr. 3	Pohybové detektory Jablotron: JA-110P (vlevo) a JA-152P (vpravo) [2].....	16
Obr. 4	Blokové schéma PIR detektoru [7].....	16
Obr. 5	PIR element [7].....	17
Obr. 6	Zrcadlová optika (A) a Fresnelova čočka (B) [3].....	17
Obr. 7	Zobrazení pohybu objektu před detektorem [4].....	18
Obr. 8	Fresnelova čočka (vlevo) a její konstrukce (vpravo) [9] [10]	18
Obr. 9	Schéma nastavení testu proti proudění horkého vzduchu.....	20
Obr. 10	Zkušební body na hranici (vlevo) a uvnitř pracovního prostoru (vpravo) [8]	21
Obr. 11	Zkouška pokrytí (vlevo) a zkouška při velké rychlosti (vpravo) [8].....	21
Obr. 12	Zkouška pokrytí v těsné blízkosti detektoru [8].....	22
Obr. 13	Kombinovaný optický detektor kouře a teploty JA-150ST [2].....	24
Obr. 14	Princip absorpce světla [15].....	24
Obr. 15	Princip lineárních detektorů (vlevo) a reflexní detektor (vpravo) [17].....	25
Obr. 16	Princip rozptylu světla [16].....	25
Obr. 17	Pracovní princip ionizačních čidel [13] [18].....	26
Obr. 18	Kouřový tunel [14].....	27
Obr. 19	Zvolený model kouřového čidla.....	33
Obr. 20	Výpočetní prostor pro kouřové detektory	34
Obr. 21	Zjednodušený model kouřového čidla	34
Obr. 22	Zjednodušený model kouřového tunelu	35
Obr. 23	Hmyzolapy pro kouřové detektory.....	37
Obr. 24	Zvolená geometrie hmyzolapu.....	37
Obr. 25	Testovací model pro porézní médium.....	38
Obr. 26	Náhled sítě základní varianty / mod_1	40
Obr. 27	Kontury rychlosti modelu k- ω SST.....	42
Obr. 28	Kontury rychlosti modelu k- ϵ „Standard“	42
Obr. 29	Kontury rychlosti modelu k- ϵ RNG	43
Obr. 30	Kontury rychlosti modelu k- ϵ „Realizable“	43
Obr. 31	Kontury rychlosti modelu „Transition“ SST.....	44
Obr. 32	Metodika vyhodnocení kouřových čidel	45
Obr. 33	Základní model kouřového detektoru – mod_1	47
Obr. 34	Uzavření prostoru nad optickou komorou – mod_2.....	47

Obr. 35	Uzavření otvorů v dolním díle – mod_3	48
Obr. 36	Prodloužení žeber horního dílu – mod_4	48
Obr. 37	Změna úhlu lamel optické komory – mod_5	48
Obr. 38	Základní model s porézním médiem – mod_1_porous	49
Obr. 39	Kontury podílu druhé fáze v 3,9 s na rovině zx – mod_1	52
Obr. 40	Kontury podílu druhé fáze v 2,9 s a 3,4 s na rovině zx – mod_1	52
Obr. 41	Kontury podílu druhé fáze v 4,4 s a 4,9 s na rovině zx – mod_1	52
Obr. 42	Kontury podílu druhé fáze v 4,2 s na rovině zx – mod_2	54
Obr. 43	Kontury podílu druhé fáze v 3,2 s a 3,7 s na rovině zx – mod_2	55
Obr. 44	Kontury podílu druhé fáze v 4,7 s a 5,2 s na rovině zx – mod_2	55
Obr. 45	Kontury podílu druhé fáze v 4 s na rovině zx – mod_3	57
Obr. 46	Kontury podílu druhé fáze v 3 s a 3,5 s na rovině zx – mod_3	58
Obr. 47	Kontury podílu druhé fáze v 4,5 s a 5 s na rovině zx – mod_3	58
Obr. 48	Kontury rychlosti pro mod_4 (vlevo) a mod_1 (vpravo)	59
Obr. 49	Kontury rychlosti pro mod_4 (vlevo) a mod_1 (vpravo) – porovnání	60
Obr. 50	Kontury rychlosti pro mod_5 (vlevo) a mod_1 (vpravo)	61
Obr. 51	Kontury podílu druhé fáze v 3,2 s na rovině zx – mod_5	63
Obr. 52	Kontury podílu druhé fáze v 2,2 s a 2,7 s na rovině zx – mod_5	63
Obr. 53	Kontury podílu druhé fáze v 3,7 s a 4,2 s na rovině zx – mod_5	64
Obr. 54	Kontury rychlosti pro mod_1_porous (vlevo) a mod_1 (vpravo)	65
Obr. 55	Čidlo JA-100 (vlevo) a JA-80 (vpravo)	66
Obr. 56	Výpočetní prostor pro pohybové detektory	67
Obr. 57	Zjednodušený model JA-100 (vlevo) a JA-80 (vpravo)	67
Obr. 58	Zjednodušený model testovací skříně	68
Obr. 59	Vyhodnocovací roviny pro studii hrubosti	71
Obr. 60	Náhled vybrané sítě ze studie hrubosti pro pohybové detektory	74
Obr. 61	Metodika vyhodnocení pohybových čidel pomocí rovin	75
Obr. 62	Metodika vyhodnocení pohybových čidel pomocí bodů	75
Obr. 63	Kontury celkové teploty na povrchu	77
Obr. 64	Kontury celkové teploty na čočce (lokálně vztažená škála)	77
Obr. 65	Kontury celkové teploty na rovině yz	78
Obr. 66	Kontury celkové teploty na rovině xz	78
Obr. 67	Kontury celkové teploty na zadní straně skříně	78
Obr. 68	Kontury rychlosti na rovině yz	79
Obr. 69	Kontury celkové teploty na rovině xy	79
Obr. 70	Kontury teploty čidla JA-80 v čase 7 a 12 s – plocha yz	83

Obr. 71	Kontury teploty čidla JA-100 v čase 7 a 12 s – plocha yz	83
Obr. 72	Kontury teploty čidla JA-80 v čase 7 a 12 s – zadní stěna.....	84
Obr. 73	Kontury teploty čidla JA-100 v čase 7 a 12 s – zadní stěna.....	84
Obr. 74	Kontury rychlosti čidla JA-80 v čase 7 a 12 s – plocha yz	84
Obr. 75	Kontury rychlosti čidla JA-100 v čase 7 a 12 s – plocha yz	85
Obr. 76	Kontury rychlosti čidla JA-80 v čase 7 a 12 s – plocha xz	85
Obr. 77	Kontury rychlosti čidla JA-100 v čase 7 a 12 s – plocha xz	85
Obr. 78	Ideový návrh experimentu pohybových čidel	87
Obr. 79	Schéma uspořádání kouřového tunelu.....	98
Obr. 80	Testovací skříň pro pohybové detektory	101
Obr. 81	Testovací skříň pro návrh experimentů pohybových čidel	103
Obr. 82	Kontury podílu druhé fáze v 2,8 s (mod_1 vlevo) a 2,9 s (mod_2 vpravo)	104
Obr. 83	Kontury podílu druhé fáze v 2,8 s (mod_3 vlevo) a 2,5 s (mod_5 vpravo)	104

14. Seznam tabulek a grafů

Tab. 1	Specifikace proudícího média pro kouřový detektor	35
Tab. 2	Okrajové podmínky pro simulaci kouřového detektoru	36
Tab. 3	Přehled získaných hodnot tlakové ztráty	38
Tab. 4	Vlastnosti porézní domény	39
Tab. 5	Vlastnosti sítě základní varianty	41
Tab. 6	Přehled nastavení nestacionárního výpočtu kouřového detektoru.....	46
Tab. 7	Časy ze stacionárního výpočtu – mod_1	50
Tab. 8	Koncentrace z nestacionárního výpočtu – mod_1	50
Tab. 9	Časy ze stacionárního výpočtu – mod_2	53
Tab. 10	Koncentrace z nestacionárního výpočtu – mod_2.....	53
Tab. 11	Časy ze stacionárního výpočtu – mod_3.....	56
Tab. 12	Koncentrace z nestacionárního výpočtu – mod_3.....	56
Tab. 13	Časy ze stacionárního výpočtu – mod_4.....	59
Tab. 14	Časy ze stacionárního výpočtu – mod_5.....	61
Tab. 15	Koncentrace z nestacionárního výpočtu – mod_5.....	62
Tab. 16	Časy ze stacionárního výpočtu – mod_1_porous.....	65
Tab. 17	Materiály pro simulaci PIR detektorů	69
Tab. 18	Okrajové podmínky pro simulaci PIR detektorů.....	70
Tab. 19	Přehled nastavení nestacionárního výpočtu pohybového detektoru	76
Tab. 20	Program zkoušek pro kouřové detektory [20].....	97
Tab. 21	Naměřené veličiny a parametry sítě pro studii vlivu sítě modelů	102
Graf 1	Závislost tlakové ztráty na rychlosti v porézním médiu	38
Graf 2	Četnost časů proudnic a koncentrace v 3,9 s – mod_1	51
Graf 3	Koncentrace v 2,9 s (vlevo) a 3,4 s (vpravo) – mod_1	51
Graf 4	Koncentrace v 4,4 s (vlevo) a 4,9 s (vpravo) – mod_1	51
Graf 5	Četnost časů proudnic a koncentrace v 4,2 s – mod_2	53
Graf 6	Koncentrace v 3,2 s (vlevo) a 3,7 s (vpravo) – mod_2.....	54
Graf 7	Koncentrace v 4,7 s (vlevo) a 5,2 s (vpravo) – mod_2.....	54
Graf 8	Četnost časů proudnic a koncentrace v 4 s – mod_3	56
Graf 9	Koncentrace v 3 s (vlevo) a 3,4 s (vpravo) – mod_3.....	57
Graf 10	Koncentrace v 4,5 s (vlevo) a 5 s (vpravo) – mod_3	57
Graf 11	Četnost časů proudnic pro mod_4 (vlevo) a mod_1 (vpravo).....	59
Graf 12	Četnost časů proudnic pro mod_5 (vlevo) a mod_1 (vpravo).....	61

Graf 13	Četnost časů proudnic a koncentrace v 3,2 s – mod_5.....	62
Graf 14	Koncentrace v 2,2 s (vlevo) a 2,7 s (vpravo) – mod_5	62
Graf 15	Koncentrace v 3,7 s (vlevo) a 4,2 s (vpravo) – mod_5	63
Graf 16	Četnost časů proudnic pro mod_1_porous (vlevo) a mod_1 (vpravo).....	65
Graf 17	Střední teploty pro studii vlivu sítě modelů pohybových detektorů	72
Graf 18	Fluktuace teplot pro studii vlivu sítě modelů pohybových detektorů	72
Graf 19	Střední rychlosti pro studii vlivu sítě modelů pohybových detektorů	73
Graf 20	Fluktuace rychlostí pro studii vlivu sítě modelů pohybových detektorů	73
Graf 21	Hodnoty celkové teploty čidla JA-80.....	80
Graf 22	Hodnoty celkové teploty čidla JA-100.....	80
Graf 23	Hodnoty celkové teploty čidla JA-80 na dalších lokacích	81
Graf 24	Hodnoty celkové teploty čidla JA-100 na dalších lokacích	81
Graf 25	Hodnoty rychlosti čidla JA-80	82
Graf 26	Hodnoty rychlosti čidla JA-100	82

15. Seznam příloh

Příloha A.....	97
Příloha B.....	98
Příloha C.....	99
Příloha D.....	100
Příloha E.....	101
Příloha F.....	102
Příloha G.....	103
Příloha H.....	104

Příloha A

Níže je přiložen program zkoušek pro kouřové detektory.

Tab. 20 Program zkoušek pro kouřové detektory [20]

Název zkoušky	Číslo vzorku
Zkouška opakovatelnosti	1 libovolně zvolený
Zkouška směrové závislosti	1 libovolně zvolený
Zkouška reprodukovatelnosti	Všechny vzorky
Zkouška kolísajícími parametry napájení	1
Zkouška proudícím vzduchem	2
Zkouška oslněním	3
Provozní zkouška suchým teplem	4
Provozní zkouška chladem	5
Provozní zkouška vlhkým teplem	6
Zkouška odolnosti proti vlhkému teplu	7
Zkouška odolnosti proti korozi oxidem siřičitým	8
Provozní zkouška rázem	9
Provozní zkouška úderem	10
Provozní zkouška sinusovými vibracemi	11
Zkouška odolnosti proti sinusovým vibracím	11
Provozní zkouška elektrostatickým výbojem	12
Provozní zkouška vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem	13
Zkouška rušením indukovaným vysokofrekvenčním polem	14
Provozní zkouška rychlými přechodovými ději	15
Provozní zkouška rázovým impulsem	16
Zkouška požární citlivosti	17, 18, 19 a 20

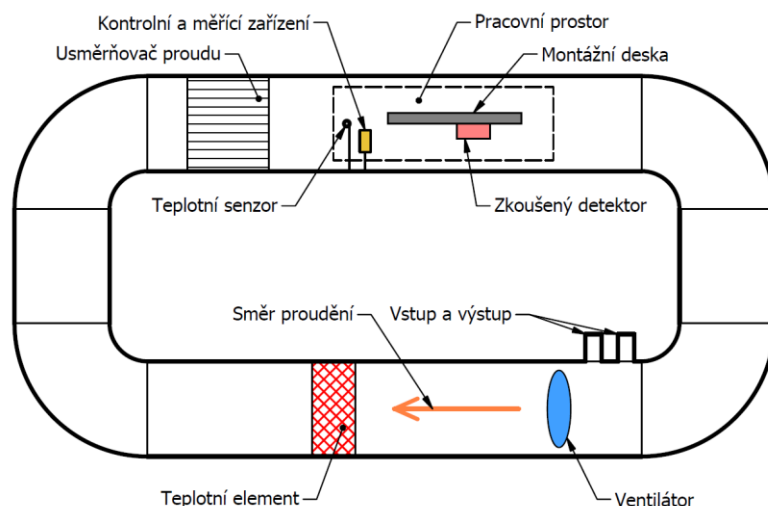
Příloha B

Konstrukce kouřového tunelu:

Koncentrace kouře v okolí detektoru je závislá na natočení, způsobu montáže, turbulenci, rychlosti vzduchu a nárůstu koncentrace kouře. Hlavním parametrem měření je relativní změna hodnoty prahové reakce.

Pro zkoušky v normě EN 54-7 existuje mnoho návrhů konstrukce kouřového tunelu, ovšem pokaždé musí být uvažovány následující body:

- musí být zaručena požadovaná rychlost zvyšování koncentrace aerosolu a to až do té chvíle než čidlo začne generovat varovný signál. Pro splnění téhle podmínky se s výhodou využívá tunel s uzavřeným okruhem,
- v pracovním prostoru musí být téměř stálé laminární proudění. Ventilátor z pravidla vytváří proudění turbulentní a je proto nutné použít usměřovač. Jako usměrňovač se používá filtr, plástve nebo kombinace obojího. Při rozhodování, jaký usměrňovač zvolit a kde ho instalovat, je nutné brát v potaz snadný průchod aerosolu a jeho dostatečné promísení, aby byla koncentrace a teplota co nejvíce homogenní ještě před tím než vstoupí do oblasti pracovního prostoru,
- vzduch před jeho vstupem do pracovní sekce musí být dostatečně ohřátý. Tunel by měl být schopen dosáhnout stanovených teplot a teplotních profilů v pracovním prostoru. Zahřívání musí být provedeno tak, aby se zabránilo tvorbě cizích aerosolů nebo změnám zkušební aerosolu,
- speciální pozornost by měla být věnována rozmístění všech částí, aby nedošlo k narušení zkušebních podmínek například turbulencí,
- tunel by měl být navržen pro vystavení proudu vzduchu bez aerosolu o rychlosti 5 m/s a 10 m/s.



Obr. 79 Schéma uspořádání kouřového tunelu

Kouřový tunel může obsahovat další měřicí zařízení (např. měřicí ionizační komoru), která nejsou ve schématu výše znázorněna (viz Obr. 79).

Příloha C

Dodatky ke kouřovému tunelu pro měření prahové hodnoty reakce:

- tunel musí obsahovat vodorovnou pracovní sekci, kde je pracovní prostor. V pracovním prostoru musí být proudění vzduchu a jeho teplota v daném rozmezí. Velikost tohoto prostoru musí být taková, aby bylo zkoušené čidlo a měřící zařízení dostatečně pokryto. Do pracovní oblasti by mělo být možné vložit zařízení pro zkoušku oslněním,
- zkoušený detektor je upevněn na spodní straně montážní desky, kde je dále vystaven proudu vzduchu. V pracovním prostoru se standardně měří jeden detektor. Rozměry montážní desky musí být voleny tak, aby její hrany přesahovaly detektor v každém místě o 20 mm,
- v pracovním prostoru musí být laminární proudění vzduchu při daných rychlostech: $0,2 \pm 0,04$ m/s nebo $1,0 \pm 0,2$ m/s,
- musí být zaručena kontrola žádané teploty a tuto teplotu zvyšovat maximální rychlostí 1 °C až do 55 °C,
- koncentrace aerosolu, pro stanovení hodnoty m a y , se musí měřit v blízkosti detektoru. Je zajištěno dosažení homogenní koncentrace.

Příloha D

Čidla pracující na principu absorpce nebo rozptylu světla:

Prahová hodnota reakce kouřových čidel, pracujících na principu absorpce nebo rozptylu světla, je popisována absorpčním koeficientem, neboli extinkčním modulem, zkušební aerosolu. Tento absorpční koeficient je nutné měřit v těsné blízkosti detektoru v momentě vysílání poplachového nebo jiného signálu. Standardně se tento koeficient označuje m a je charakterizován následujícím vztahem:

$$m = \frac{10}{d} \log \left(\frac{P_0}{P} \right) \left[\frac{dB}{m} \right] \quad (16)$$

kde:

m	Absorpční koeficient
d	Délka paprsku
P_0	Přijatý vyzářený výkon bez kouře nebo aerosolu
P	Přijatý vyzářený výkon s kouřem nebo aerosolem

Norma dále definuje požadavek na dispoziční řešení optického systému, a sice že světlo, které se po průchodu zkušebním aerosolem nebo kouřem rozptýlí o více než 3° , není zaznamenáno optickým čidlem. Dále je normou stanovená maximální chyba měření útlumu světelného toku.

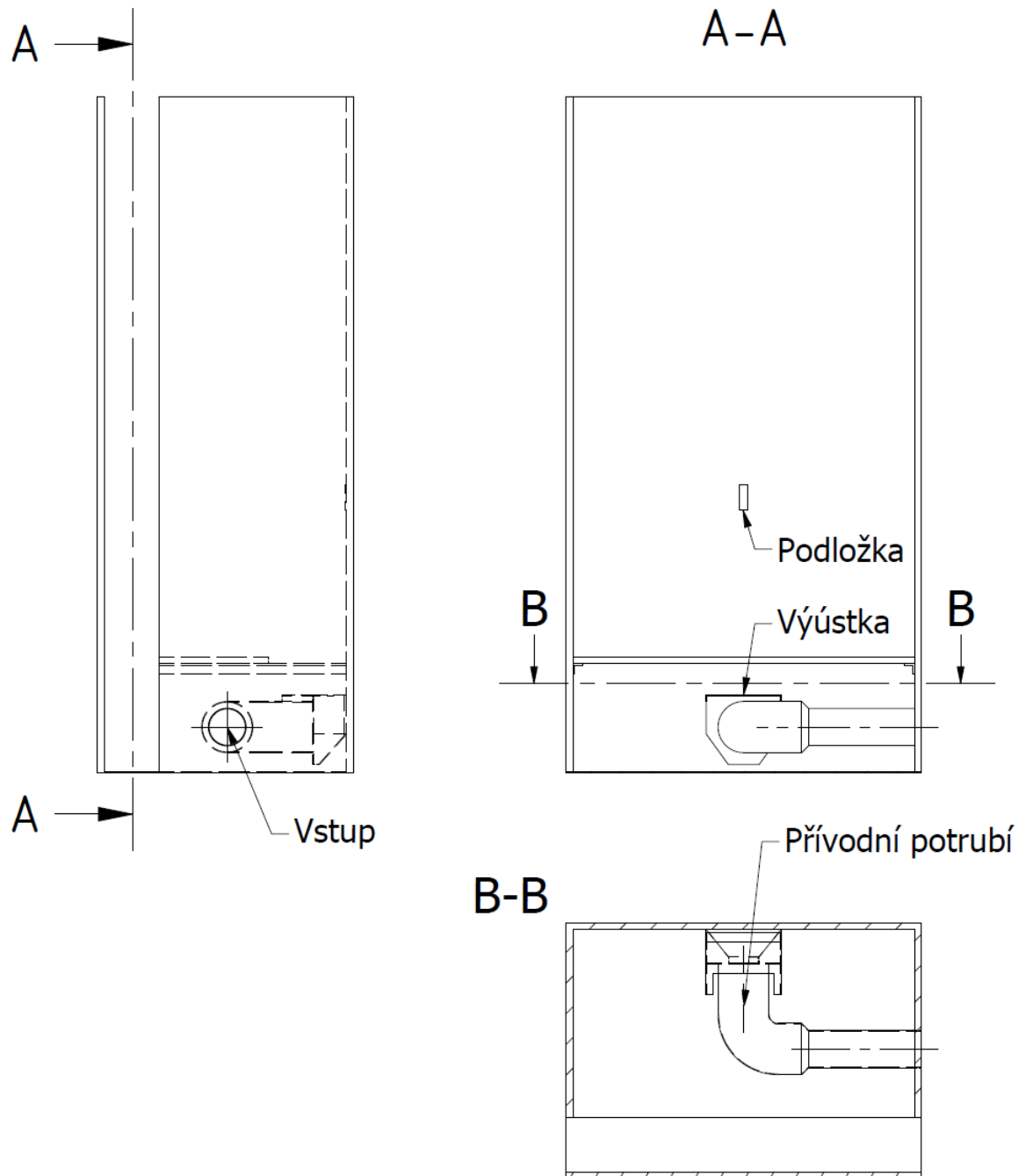
Čidla pracující na principu ionizace:

Zde je prahová hodnota reakce popisována bezrozměrnou veličinou y . Tato veličina je získána pomocí měřící ionizační komory (MIC), resp. z relativní difference proudu. Veličina y udává hodnotu koncentrace částic aerosolu v momentě vysílání poplachového nebo jiného signálu.

Popis principu činnosti a zásad pro konstrukci měřící ionizační komory by přesáhl účel této práce a nebude zde uveden.

Příloha E

Zjednodušený výkres testovací skříně pro pohybové detektory s popisem hlavních prvků. Jak již bylo řečeno v kapitole 6, v této práci bohužel není možné zobrazit řádně okótovaný výkres.



Obr. 80 Testovací skříň pro pohybové detektory

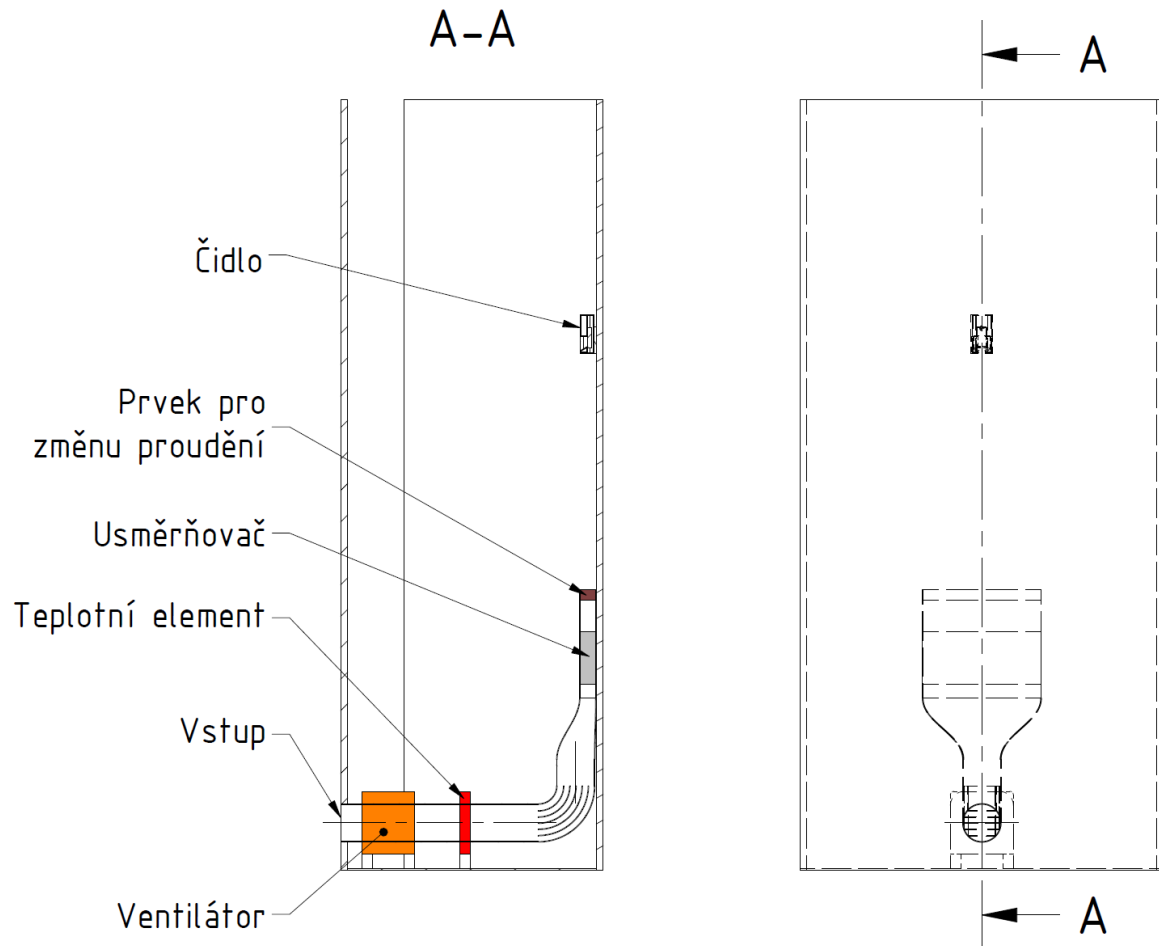
Příloha F

Tab. 21 Naměřené veličiny a parametry sítě pro studii vlivu sítě modelů

Popis	Označení	ms_pir_1	ms_pir_2	ms_pir_3	ms_pir_4	ms_pir_5	ms_pir_6	ms_pir_7	ms_pir_8	ms_pir_9	Jednotky
Střední hodnota teploty	plane_1500	21,628	21,619	21,660	21,742	21,777	21,783	21,794	21,796	21,789	°C
	plane_1150	21,743	21,739	21,781	21,859	21,887	21,886	21,897	21,892	21,888	°C
	plane_950	21,840	21,846	21,875	21,957	22,019	22,020	22,022	22,020	22,013	°C
	plane_650	21,573	21,592	21,581	21,628	21,686	21,690	21,692	21,697	21,702	°C
	plane_450	21,505	21,519	21,488	21,470	21,486	21,491	21,492	21,499	21,512	°C
Fluktuace teploty	plane_1500	0,574	0,588	0,579	0,612	0,638	0,641	0,658	0,654	0,654	°C
	plane_1150	0,636	0,660	0,642	0,674	0,715	0,748	0,764	0,737	0,755	°C
	plane_950	0,664	0,677	0,672	0,694	0,763	0,824	0,838	0,817	0,873	°C
	plane_650	0,526	0,560	0,542	0,637	0,769	0,877	0,916	0,892	0,909	°C
	plane_450	0,447	0,473	0,453	0,712	0,924	1,056	1,101	1,081	1,101	°C
Střední hodnota rychlosti	plane_1500	0,191	0,191	0,193	0,198	0,199	0,201	0,201	0,200	0,199	m/s
	plane_1150	0,179	0,179	0,182	0,190	0,192	0,194	0,194	0,192	0,194	m/s
	plane_950	0,179	0,178	0,182	0,191	0,194	0,194	0,195	0,194	0,195	m/s
	plane_650	0,187	0,186	0,189	0,192	0,195	0,196	0,195	0,197	0,198	m/s
	plane_450	0,190	0,190	0,189	0,186	0,185	0,185	0,185	0,187	0,186	m/s
Fluktuace rychlosti	plane_1500	0,078	0,077	0,084	0,098	0,103	0,106	0,106	0,103	0,104	m/s
	plane_1150	0,067	0,068	0,066	0,073	0,080	0,078	0,078	0,079	0,077	m/s
	plane_950	0,063	0,064	0,062	0,065	0,068	0,069	0,069	0,069	0,071	m/s
	plane_650	0,046	0,048	0,047	0,050	0,053	0,057	0,056	0,056	0,058	m/s
	plane_450	0,039	0,041	0,042	0,044	0,047	0,051	0,050	0,051	0,053	m/s
Parametry sítě	Skewness (max)	0,84	0,83	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,86	0,85	[-]
	Skewness (průměr)	0,73	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	[-]
	Orthogonal q. (min)	0,16	0,17	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15	[-]
	AR (max)	92,26	79,52	76,58	98,70	99,73	91,86	94,32	98,76	94,57	[-]
	AR (průměr)	5,32	5,00	4,76	4,55	3,97	4,16	3,87	3,65	3,76	[-]
	Počet elementů	726 186	1 100 084	1 187 590	3 111 346	6 907 350	8 708 110	10 266 236	11 656 186	15 557 761	[ks]
	Výpočetní čas	11	14	16	37	79	98	112	124	171	[min]

Příloha G

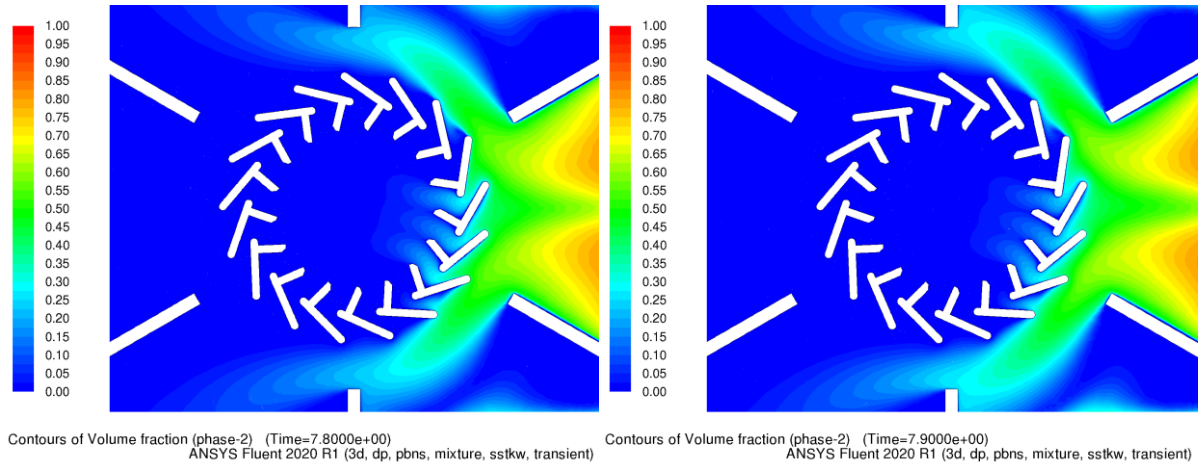
Zjednodušený výkres testovací skříně pro návrh experimentů pohybových čidel s popisem hlavních prvků. Jak již bylo řečeno v kapitole 6, v této práci bohužel není možné zobrazit řádně okótovaný výkres.



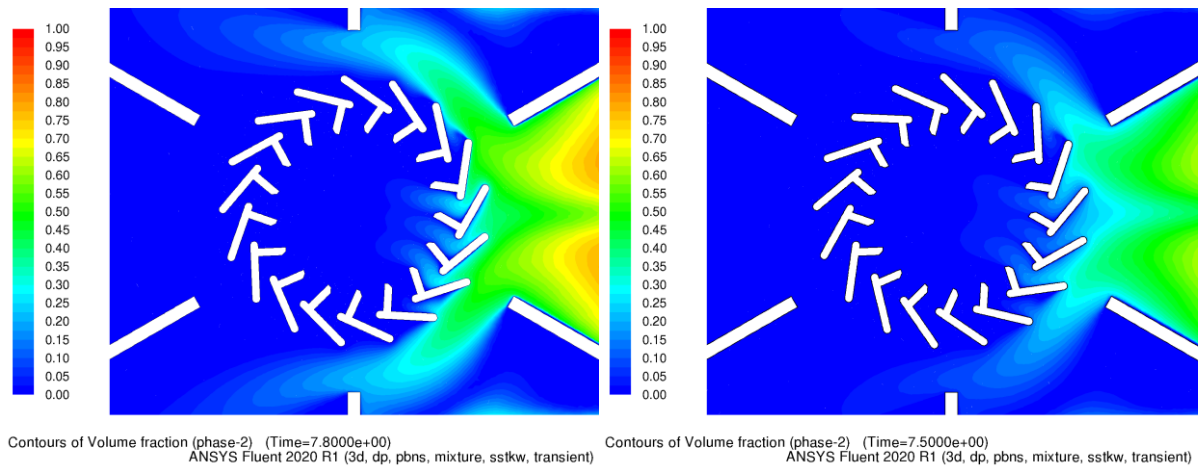
Obr. 81 Testovací skříň pro návrh experimentů pohybových čidel

Příloha H

Kontury podílu druhé fáze v minimálních zjištěných časech na rovině zx.



Obr. 82 Kontury podílu druhé fáze v 2,8 s (mod_1 vlevo) a 2,9 s (mod_2 vpravo)



Obr. 83 Kontury podílu druhé fáze v 2,8 s (mod_3 vlevo) a 2,5 s (mod_5 vpravo)