

Ministerstvo vnitra České republiky - GŘ HZS
Technický ústav požární ochrany



Vysoká škola chemicko – technologická v Praze



Výzkumná zpráva k projektu financovanému s podporou ministerstva vnitra
pod identifikačním číslem VI20172019077:

**Průběh a důsledky havarijního úniku CNG
z osobních automobilů**

Praha, 2020

Základní informace o projektu č. VI20172019077 „Průběh a důsledky havarijního úniku CNG z osobních automobilů“

Řešitelé projektu:

- MV-GŘ HZS ČR, Technický ústav PO (koordinátor projektu)
 - Ing. Ondřej Suchý, Ph. D.
 - Ing. Lucie Hasalová, Ph. D.
 - Ing. Jan Karl
 - Ing. Václav Vystrčil
- Vysoká škola chemicko-technologická v Praze
 - doc. Dr. Ing. Milan Jahoda
 - Ing. Jiří Ira, Ph. D.

Termín řešení projektu: od 1. 1. 2017 do 31. 12. 2019

Poskytovatel účelových finančních prostředků/administrátor projektu:

MV ČR, Odbor bezpečnostního výzkumu a policejního vzdělávání.

Hlavní cíle projektu:

Hlavním cílem projektu bylo experimentální studium dynamiky výtoku CNG z tlakového zásobníku v osobním automobilu a následná numerická predikce šíření (hoření) metanu v uzavřených prostorech po havarijním úniku z tlakového zásobníku na CNG. Pomocí metody počítačové dynamiky tekutin byly řešeny různé scénáře odpovídající reálným podmínkám, tak aby bylo možné předpovídat průběh havárie, případné ohrožení zasahujících jednotek, občanů a vliv na okolní prostředí.

Přínosy a dopady projektu v praxi:

Hlavním přínosem projektu je zvýšení bezpečnosti zasahujících hasičů, jednotek IZS, jakož i ochrana zdraví, životů a majetku občanů ČR při havarijním úniku CNG z tlakových zásobníků v osobních automobilech v uzavřených prostorech.

Výsledky projektu:

1. Hlavní výsledky
 - 1 ks výsledku typu N (certifikovaná metodika)
2. Vedlejší výsledky
 - 2 ks výsledku typu D (článek ve sborníku)

Motivace

Stlačený zemní plyn - CNG (Compressed Natural Gas) je jedním z alternativních paliv pro automobilovou dopravu. Počet vozidel na CNG každoročně narůstá, přičemž průměrný celosvětový roční růst je v poslední dekádě kolem 24%. Nejvíce zmiňovanou výhodou vozidel na CNG je ekologická stránka jejich provozu. Hlavní složkou zemního plynu je metan (obvykle přes 90 %), a proto se emise CO₂ pohybují na výrazně nižší úrovni než u benzínu a motorové nafty. Dále jsou u CNG nižší i emise dalších sledovaných škodlivin – pevných částic a karcinogenních látek – polyaromatických uhlovodíků, aldehydů a aromatů včetně benzenu. Díky nižší adiabatické teplotě plamene jsou koncentrace oxidů dusíku (NO_x) nižší o cca 50% ve srovnání s motorovou naftou. Hlavním důvodem obliby aut na CNG je výrazná úspora provozních nákladů. V současnosti je asi největší překážkou pro pořízení osobního vozidla na CNG v městských aglomeracích

značně omezená možnost provozovatelů vozidel parkovat ve společných garážích. Vozidlům na CNG je umožněn vjezd do podzemních garáží, které jsou naprojektovány v souladu s vyhláškou č. 23/2008 Sb. v platném znění, která v § 21 odst. 2 říká, že garáž sloužící pro parkování vozidel s pohonem na plynná paliva musí být vybavena detektory pro únik plynu a účinným větráním v souladu s normami ČSN, zejména se jedná o ČSN 73 0804 (Z2) „Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty“ čl. I.2.3.1 a ČSN 73 60 58 „Jednotlivé, řadové a hromadné garáže“ čl. 5.3 a 5.4. Většina majitelů existujících garáží se obává důsledků možného úniku metanu v případě netěsnosti nebo havárie, a proto raději vjezd vozidlům na plynový pohon zakazuje. Základním problémem při úniku je obtížně predikovatelný průběh šíření plynu v okolí vozidla. Náhlý požár nebo výbuch může zasáhnout rozsáhlou oblast včetně zasahujících jednotek. Výše citovaná vyhláška č. 23/2008 Sb. diskutující vjezd vozidel na CNG do podzemních garáží zavádí pojem účinné větrání, ale tento pojem nedefinuje ani přesně nespecifikuje rozmístění detektorů hořlavých plynů. Dynamika výtoku plynu ani časově-prostorové koncentrační profily metanu při úniku z tlakových zásobníků u vozidel nejsou dostatečně známy. Není přesně známé ani teplotní zatížení na okolní vozidla nebo stavební prvky při zahoření plynu. Provedení experimentu v reálných podzemních garážích je ale velmi obtížné z pohledu bezpečnosti. Prvotní odpovědi nám však může poskytnout metoda počítačové dynamiky tekutin (angl. CFD, Computational Fluid Dynamics). CFD sice zatím nemůže plně nahradit experimentální šetření, ale umožňuje vytvořit reálnou představu o tom, které jevy jsou ve zkoumaném systému dominantní. Vhodné programy pro řešení rychlých toků a hoření plynných složek jsou např. ANSYS Fluent/CFX (ANSYS Inc.), FLACS (Gexcon AS) nebo OpenFOAM (ESI Group).

Tuto studii nelze považovat za stanovisko dotčeného orgánu státní správy na úseku požární ochrany. Presentované výsledky vědecké práce je možné využít výhradně v kontextu provedených experimentů nebo jako podklad pro další výzkum nikoliv jako závazné hodnoty např. pro návrh stavebních objektů.

Zprávu lze volně šířit pro nekomerční účely. Je zakázáno text upravovat, pozměňovat či doplňovat. Citovat jako: Hasalová, L.; Jahoda, M.; Ira, J.; Vystrčil, V. *Průběh a důsledky havarijního úniku CNG z osobních automobilů*; Výzkumná zpráva, Technický ústav požární ochrany MV - GŘ HZS: Praha, 2020.

Obsah

Seznam obrázků	7
1 Úvod	1
1.1 Jak může dojít k havarijnímu úniku ze CNG systému?	1
1.2 Studovaný systém	2
1.3 Teorie - výtoku plynu	3
1.4 Legislativa	3
2 Experimentální část	4
2.1 Výtoku tavného kovu z těla tepelné pojistky	4
2.2 Výtoku plynu přes otevřenou (vytavenou) tepelnou pojistku	4
2.2.1 Vzduch	5
2.2.2 Metan	18
2.3 Výtoku plynu přes tepelnou pojistku otevřenou působením tepla	21
2.3.1 Vzduch	21
2.3.2 Metan	26
2.4 Lokální ohřev zásobníku	34
2.5 Rychlost výtoku plynu	37
2.5.1 Rychlost u výtokového otvoru	37
2.5.2 Vizualizace směru proudění, rychlost proudění plynu na hranici automobilu	40
2.6 Rešerše - hmotnostní průtok, velikost výtokového otvoru, výtoková rychlost . . .	43
3 Výpočtová část	48
3.1 Charakteristika proudění při výtoku otvorem	48
3.2 Isoentropické proudění ideálního plynu	49
3.2.1 Plocha výtokového otvoru	51
3.2.2 Výtokový koeficient	51
3.2.3 Teplota plynu v láhvi	54
3.2.4 Vzduch versus metan	55
3.2.5 Počet otvorů tepelné pojistky	56
3.2.6 Porovnání s experimentem	57
3.2.7 Tlaková ztráta při průtoku plynu tepelnou pojistkou	58
3.3 2D simulace průtoku plynu tryskou o průměru 3 mm	59
3.3.1 Fiktivní-ekvivalentní výtokový otvor	64
3.4 Porovnání předpovědi isoentropického modelu a 2D CFD	66
3.4.1 Výtoková rychlost	66
3.4.2 Hmotnostní tok plynu	66
3.5 3D CFD model	68
3.5.1 Proudění plynu v okolí zadní části automobilu	68
3.5.2 Rychlostní okrajová podmínka na hranici vozidla	72
3.5.3 Disperze plynu v garáži	75
3.6 Lokální ohřev	83
3.7 Zahoření plynu	88
4 Závěr	92
Literatura	95

Přílohy	97
A PO2017	97
B Experimentální data výtoku vzduchu	101
B.1 Tlak - jednotlivá měření	101
B.2 Tlak - porovnání průměrné hodnoty z 5 a 10 měření	104
B.3 Hmotnost - jednotlivá měření	106
C Měření AV	109

Seznam obrázků

1.1	Schéma možných míst a příčin úniku CNG z palivového systému ve vozidle.	1
1.2	Experimentálně a výpočtetně studovaný CNG palivový systém.	2
1.3	Princip funkce tepelné pojistky s nízko-teplotně tavitelnou slitinou.	3
2.1	Experimentální aparatura pro měření dynamiky výtoku tavného kovu z tepelné pojistky.	5
2.2	Experimentální aparatura pro měření dynamiky výtoku vzduchu z tlakové nádoby.	6
2.3	Bezrozměrný tlak v nádobě při jejím vypouštění přes vytavenou tepelnou pojistku.	8
2.4	Bezrozměrná hmotnost plynu v nádobě při jejím vypouštění přes vytavenou tepelnou pojistku.	9
2.5	Experimentální aparatura pro měření dynamiky výtoku vzduchu z upravené tlakové nádoby.	10
2.6	Bezrozměrný tlak v nádobě při jejím vypouštění přes vytavenou tepelnou pojistku - rozšířená datová sada.	12
2.7	Bezrozměrná hmotnost v nádobě při jejím vypouštění přes vytavenou tepelnou pojistku - rozšířená datová sada.	13
2.8	Teplota vzduchu v láhvi, ve výtokové cestě, na stěně nádoby a teplota okolí při vypouštění vzduchu z tlakové láhve při počátečním tlaku 200 a 50 bar.	14
2.9	Nástavec pro měření se vzdáleným otvíráním výtokové cesty plynu.	15
2.10	Porovnání tlaku a hmotnosti při výtoku vzduchu z nádoby přes vytavený TPRD pro neupravený a upravený solenoidový ventil a počáteční tlak 200 bar.	17
2.11	Experimentální aparatura pro měření dynamiky výtoku metanu přes vytavenou tepelnou pojistku.	19
2.12	Porovnání výtoku vzduchu a metanu	20
2.13	Rychlost úbytku hmotnosti metanu v tlakové láhvi v čase.	21
2.14	Experimentální aparatura pro měření dynamiky výtoku vzduchu přes nevytavenou tepelnou pojistku.	23
2.15	Bezrozměrný pokles tlaku a hmotnosti v čase při výtoku plynu z nádoby pro různé způsoby zahřívání solenoidového ventilu.	24
2.16	Povrchová teplota solenoidového ventilu a tepelné pojistky těsně před a po výtoku plynu	25
2.17	Scénář žhář - výtok metanu do volného prostoru.	27
2.18	Scénář žhář - výtok metanu do volného prostoru.	28
2.19	Teplota naměřená na PRDu při experimentu s výtokem a zahořením metanu scénář - žhář, volný výtok.	29
2.20	Vnitřek tepelné pojistky po experimentu.	30
2.21	Scénář žhář - výtok metanu v ohraničující konstrukci.	31
2.22	Teplota naměřená na tepelné pojistce (TPRD) při experimentu s výtokem a zahořením metanu scénář - žhář, výtok ohraničený konstrukcí.	32
2.23	Uspořádání zkoušky s výtokem a zahořením metanu scénář - požár rozlité kapaliny pod tlakovými zásobníky.	33
2.24	Teplota naměřená na tepelné pojistce (TPRD) při experimentu s výtokem a zahořením metanu scénář - požár rozlité kapaliny.	34
2.25	Lokální ohřev tlakové láhve - experiment A.	35
2.26	Povrchová teplota tepelné pojistky (TPRD) naměřená termočlánky a bezkontaktně, tlak v láhvi.	36

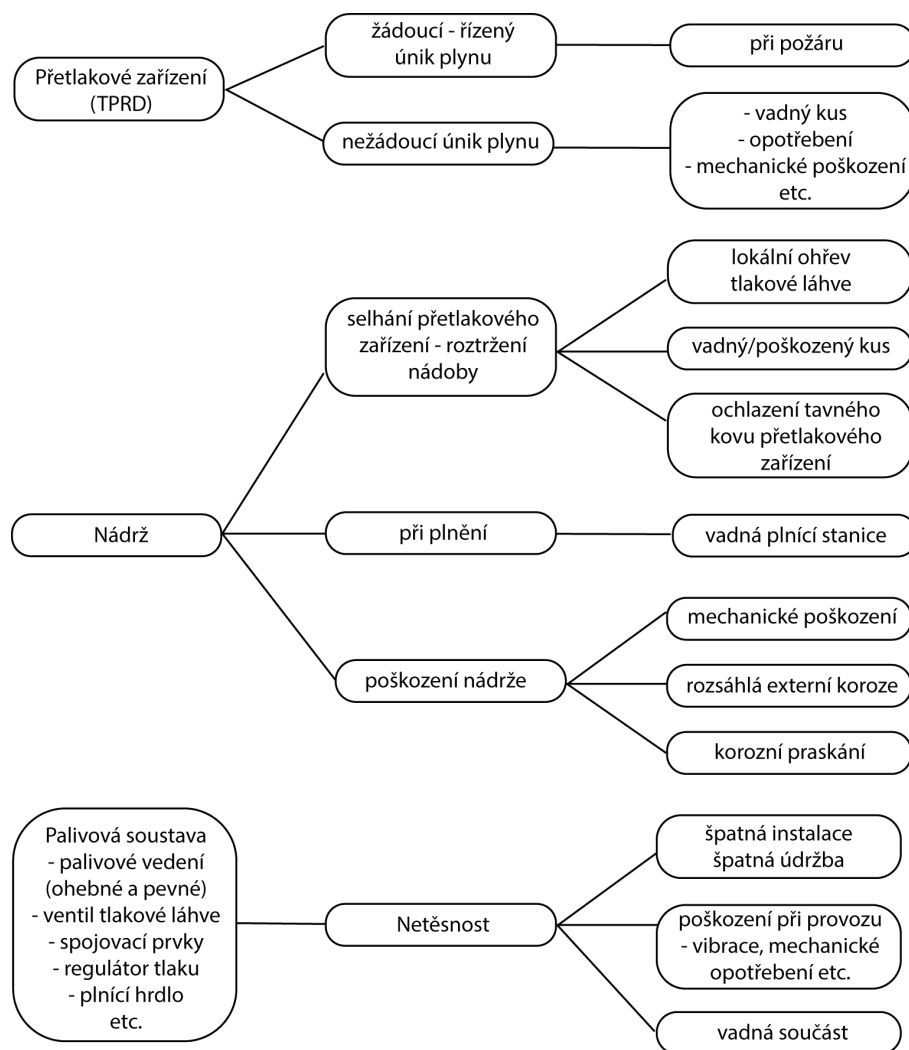
2.27	Experimentální uspořádání pro měření výtokové rychlosti vysokorychlostní kamerou.	38
2.28	Machův disk - počáteční tlak 200 bar.	39
2.29	Kouřová vizualizace proudění za autem a kolem tlakových nádrží.	40
2.30	Rychlostní pole kolem vozidla.	41
2.31	Snímek z požáru CNG vozidla po zahájení úniku metanu z palivové nádrže přes tepelnou pojistku.	42
2.32	Scénáře úniku a časově proměnný hmotnostní tok plynu z nádrže - převzato z [1].	44
2.33	Scénáře úniku a hmotnostní tok plynu z nádrže - převzato z [2].	46
3.1	Hmotnostní tok plynu a rychlosti proudění v podkritické a nadkritické oblasti v závislosti na poměru okolního tlaku p a tlaku v nádobě p_0 .	49
3.2	Vliv plochy výtokového otvoru na hmotnostní tok vzduchu a pokles tlaku vzduchu podle isoentropického modelu.	52
3.3	Vliv výtokového koeficientu na hmotnostní tok plynu a pokles tlaku podle isoentropického modelu.	53
3.4	Vliv počáteční teploty plynu v láhvi na hmotnostní tok plynu a pokles tlaku podle isoentropického modelu.	54
3.5	Vliv druhu plynu v láhvi na hmotnostní tok plynu a pokles tlaku podle isoentropického modelu.	55
3.6	Vliv počtu otvorů tepelné pojistky na tok plynu a pokles tlaku podle isoentropického modelu.	56
3.6	Vliv počtu otvorů tepelné pojistky na tok plynu a pokles tlaku podle isoentropického modelu. Počáteční tlak 200 bar, výtokový koeficient $\mu = 1$, 1 až 6 kruhových výtokových otvorů každý o průměru 3 mm, teplota plynu v láhvi 25 °C.	57
3.7	Porovnání bezrozměrného poklesu tlaku podle isoentropického modelu s experimentem.	58
3.8	Rozložení tlaku ve zjednodušené geometrii ventilu ve 3D CFD modelu a v rovině jednoho z výtokových otvorů.	59
3.9	Výpočetní doména a detail výtokového otvoru s umístěním vstupní okrajové podmínky.	60
3.10	Ukázka proudové struktury vytvořené za výtokovým otvorem do vzdálenosti cca 1 metr pro tlak 200 bar.	60
3.11	Rychlost proudění podél osy proudové struktury za výtokovým otvorem.	61
3.12	Tlakové a rychlostní pole pro okrajovou tlakovou podmínku 200 bar.	62
3.13	Hmotnostní zlomek metanu v proudové struktuře vytvořené za výtokovým otvorem.	63
3.14	Porovnání hmotnostního toku a výtokové rychlosti metanu vypočtené isoentropickým modelem a 2D CFD modelem v celém rozsahu pracovního tlaku zásobníku.	67
3.15	3D geometrie palivového systému.	68
3.16	Rychlost proudění metanu v bezprostřední blízkosti výtokových otvorů, stacionární simulace 200 bar.	69
3.17	Rychlostní pole v okolí nádrží a zadní části automobilu. Stacionární simulace, tlaková okrajová podmínka 200 bar na vstupu do tepelné pojistky.	70
3.18	Řez rychlostním polem a rychlost podél osy jetu pro 3D CFD simulaci v softwaru CFX s tlakem v nádrži 200 bar.	71
3.19	Geometrie zadní části vozidla. Převzato z [3].	72
3.20	Rychlostní profily jako okrajová podmínka do CFD modelu. Převzato z [3].	73
3.21	Kontura rychlosti na hranici automobilu.	74
3.22	Geometrie patra podzemní garáže s osmi vozidly na plynná paliva.	76

3.23	Objemový zlomek metanu v prvních 130 vteřinách simulace v programu Fluent ve dvou sekcích garáže a ve dvou vybraných bodech.	78
3.24	Kontura objemového zlomku metanu ve 130 sekundě simulace v programu Fluent, porovnání scénáře bez nucené ventilace a s nucenou ventilací.	79
3.25	Geometrie uzavřené garáže bez zakladačového systému v softwaru FLACS.	80
3.26	Objemový zlomek metanu ve dvou podélných řezech garáží v čase 400, 800 a 1200 sekund.	81
3.27	Objemový zlomek metanu v bodě odpovídajícímu půdorysnému středu garáže a v bodě odpovídajícímu půdorysnému středu místa úniku ve výškových úrovních 1, 2 a 3 metry.	82
3.28	Tlaková láhev a okolní doména s rozměry, umístění a velikost hořáku, výpočetní síť.	83
3.29	Teplotní pole pláště tlakového zásobníku v čase 10, 20, 30 a 40 minut.	84
3.30	Modelem předpovězený nárůst tlaku v nádobě při jejím zahřívání.	85
3.31	Simulace vývoje teplotního pole v otevřené doméně a na stěně nádoby při lokálním ohřevu zásobníku.	87
3.32	Postup plamene při explozi v řezu $Y = 8,88$ m v čase 400, 800 a 1200 sekund.	89
3.33	Maximální přetlak v řezu $Y = 8,88$ m při explozi v čase 400, 800 a 1200 sekund.	90
3.33	Maximální přetlak v řezu $Y = 8,88$ m při explozi v čase 400, 800 a 1200 sekund.	91

1. Úvod

1.1 Jak může dojít k havarijnímu úniku ze CNG systému?

Rozbor míst a způsobů havarijního úniku CNG z palivové soustavy byl podrobně diskutován a zpracován v příspěvku na konferenci PO2017 [4], příloha A této zprávy. V principu lze místa a typy úniku rozdělit do tří kategorií (Obr. 1.1): únik přes tepelnou pojistku (přetlakové zařízení spouštěné teplotou - TPRD), únik přímo z nádrže a únik kdekoliv jinde na palivové soustavě tedy v palivovém vedení, ventilech, spojovacích prvcích atd. Experimentální i výpočtová práce na projektu se týkala případu havarijního úniku CNG přes tepelnou pojistku - tedy případem, kdy k havarijnímu úniku dojde řízeným, žádoucím způsobem v případě požáru CNG vozidla nebo požáru v jeho okolí.



Obrázek 1.1: Schéma možných míst a příčin úniku CNG z palivového systému ve vozidle.

1.2 Studovaný systém

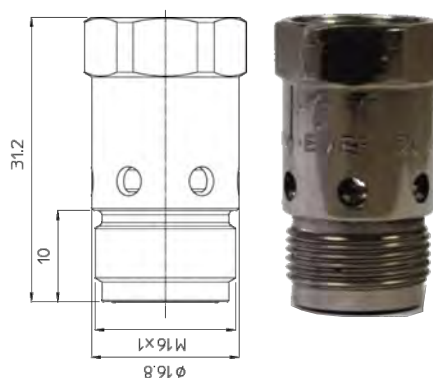
Experimentální i výpočetní část se zabývá studiem chování výtoku plynu z CNG systému, který je v osobním automobilu součástí originální vestavby. Všechny součásti CNG systému splňují legislativní požadavky dle předpisu EHK OSN č. 110 [5]. Jádrem vysokotlaké části CNG systému jsou dvě tlakové nádoby, každá o objemu 48,5 litru. Obě nádoby jsou umístěny za zadní nápravou (Obr. 1.2a). Jedná se o nádoby typu I, tedy nádoby celokovové (ocelové), jejichž pracovní tlak je 200 bar, maximálním tlak plnění je 260 bar. Na každé nádobě je umístěn multifunkční solenoidový ventil (Obr. 1.2b) opatřený přetlakovým zařízením spouštěným teplotu (TPRD), tzv. tepelná pojistka (Obr. 1.2c). Tepelná pojistka chrání tlakovou láhev před destrukcí vlivem nárůstu tlaku. Podle legislativního předpisu EHK OSN č. 110 musí být pojistka navržena tak, aby se otevřela při teplotě 110 ± 10 °C. Citlivým spouštěcím prvkem je v případě studované tepelné pojistky nízko-teplotně tavitelná slitina India a Bismutu v poměru 3:7. Po otevření pojistky se nádoba začne regulovaně vyprazdňovat šesti kruhovými otvory, každý o průměru 3 mm.



(a) Umístění nádrží ve vozidle (převzato z [6]) a detail nádrží v držáku.

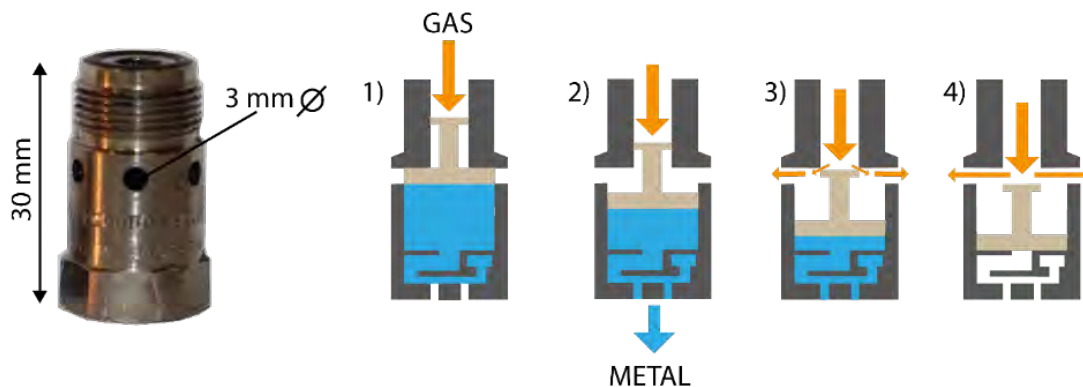


(b) Solenoidový ventil



(c) Tepelná pojistka - nákres převzat z www.emer.it

Obrázek 1.2: Experimentálně a výpočetně studovaný CNG palivový systém.



Obrázek 1.3: Princip funkce tepelné pojistky s nízko-teplotně tavitelnou slitinou.

1.3 Teorie - výtok plynu

Z hlediska charakteristiky proudění lze studovaný systém popsat jako proces výtoku plynu z oblasti s vysokým tlakem do prostředí s atmosférickým tlakem malým otvorem. Podrobný popis příslušné teorie byl popsán v diplomové práci N. Kubečkové [7] a v kapitole 3. Výtok plynu je vzhledem k vysokým rozdílům tlaku uvnitř a vně nádoby velmi rychlý, překračuje hranici kritického proudění s Machovým číslem výrazně vyšším než 1. Výtoková rychlost plynu z nádrže se mění s časem právě v závislosti na rozdílu tlaků uvnitř a vně uzavřené nádoby. V nadkritické oblasti se s klesajícím rozdílem tlaků rychlost proudění (v místě aerodynamického ucpání nemění, dochází ale k poklesu hmotnostního toku plynu vlivem změny hustoty plynu. V podkritické oblasti klesá jak výtoková rychlost, tak hmotnostní tok plynu. Při průchodu plynu otvorem dochází k expanzi plynu. V nadkritické oblasti proudění se za výtokovým otvorem tvoří charakteristické proudové struktury a dochází ke vzniku rázových vln.

Z hlediska matematického popisu tohoto procesu je třeba si uvědomit, že se jedná o nadkritický neustálený výtok stlačitelné tekutiny.

1.4 Legislativa

Oblast legislativy CNG vozidel se týká především dvou oblastí - schvalování součástí CNG motorových vozidel pro jejich výrobu jak s originální zástavbou od výrobce, tak pro dodatečné zástavby a dále problematiky provozu CNG motorových vozidel, tedy parkování v hromadných garážích, jejich servisu a doplňování pohonných hmot.

2. Experimentální část

Kapitola shrnuje všechny provedené experimenty, experimentální uspořádání a měřené veličiny. Experimentální práci lze rozdělit do čtyř částí - chování tavného kovu v těle pojistky při jeho zahřívání a dynamika výtoku tavného kovu, dynamika výtoku plynu z pojistky, rychlost výtoku plynu z pojistky a problematika lokálního ohřevu tlakových lahví.

2.1 Výtok tavného kovu z těla tepelné pojistky

Pojistka musí být navržena tak, aby nízko-teplotně tavitelná slitina vytekla a uvolnila tak prostor pro výtok plynu při teplotě 110 ± 10 °C. Hlavním cílem experimentů bylo studovat dynamiku výtoku tavného kovu z pojistky, tedy zda po dosažení teploty tání dojde k uvolnění celého objemu tavného kovu najednou, nebo zda dochází k pozvolnému odkapávání tavného kovu a vliv rychlosti ohřevu pojistky na tento proces.

Originální tepelná pojistka byla uchycena do speciálního držáku (Obr. 2.1a) a zatížena závažím tak, aby na pohyblivé sedlo pojistky, které svým posunem v těle pojistky uvolní cestu pro výtok plynu (Obr. 1.3), byl simulován tlak plynu v nádrži 200 bar.

Tepelná pojistka byla zahřívána horkovzdušnou pistolí. IČ teploměrem byla měřena povrchová teplota těla pojistky (Obr. 2.1b). Teplotu samotného tavného kovu uvnitř pojistky nelze měřit. Vzhledem k tomu, že tělo pojistky je celokovové, dochází k intenzivnímu vedení tepla materiálem a předpokládáme, že teplota tavného kovu bude blízká naměřené povrchové teplotě. Experiment byl zopakován třikrát.

V tabulce 2.1 je uvedena povrchová teplota těla pojistky při pozorovaném odkapávání tavného kovu a délka výtoku tavného kovu. Při druhém experimentu tavný kov z pojistky vytékal několikanásobně delší dobu než při zbylých dvou experimentech. Experiment byl ukončen při dosažení teploty 150 °C. Závaží působící na píst v tavné pojistce po celou dobu výtoku tavného kovu nekleslo jako ve dvou zbylých experimentech. Píst v pojistce nebyl správně zatlačen. Výtoková cesta pro tavný kov nebyla plně průchozí a tavný kov začal vytékat i otvory v pojistce určenými pro výtok plynu.

Z hlediska teploty aktivace tepelné pojistky lze říci, že naměřené hodnoty odpovídají údajům uvedeným výrobcem a požadovaných předpisem EHK OSN č. 110. Čas do dosažení aktivací teploty závisí na intenzitě zdroje tepla, který na pojistku působí. Ten také silně ovlivňuje dobu výtoku tavného kovu z pojistky. Při experimentech dynamiky výtoku plynu bylo zjištěno, že v reálném uspořádání, tedy při výtoku plynu z nádrže pojistkou, je doba výtoku a kvalita otevření pojistky ovlivněna nejen intenzitou zdroje tepla, který na ni působí, ale také ochlazováním těla pojistky díky expanzi plynu za výtakovým otvorem.

2.2 Výtok plynu přes otevřenou (vytavenou) tepelnou pojistku

Hlavním cílem měření bylo popsat dynamiku výtoku plynu z nádrže přes tepelnou pojistku a získat tak představu v jakém množství a jak rychle plyn uniká. Získaná data mají sloužit pro

Tabulka 2.1: Teplota těla pojistky při prvním pozorovaném odkapávání kovu a délka výtoku tavného kovu.

		pokus A	pokus B	pokus C
Odkapávání tavného kovu	°C	106	107	114
Délka výtoku kovu	s	38	210	10



(a) Celkový pohled

(b) Detail

Obrázek 2.1: Experimentální aparatura pro měření dynamiky výtoku tavného kovu z tepelné pojistky.

validaci okrajových podmínek do výpočetních modelů. Měření byla provedeno jak se vzduchem, tak s metanem.

2.2.1 Vzduch

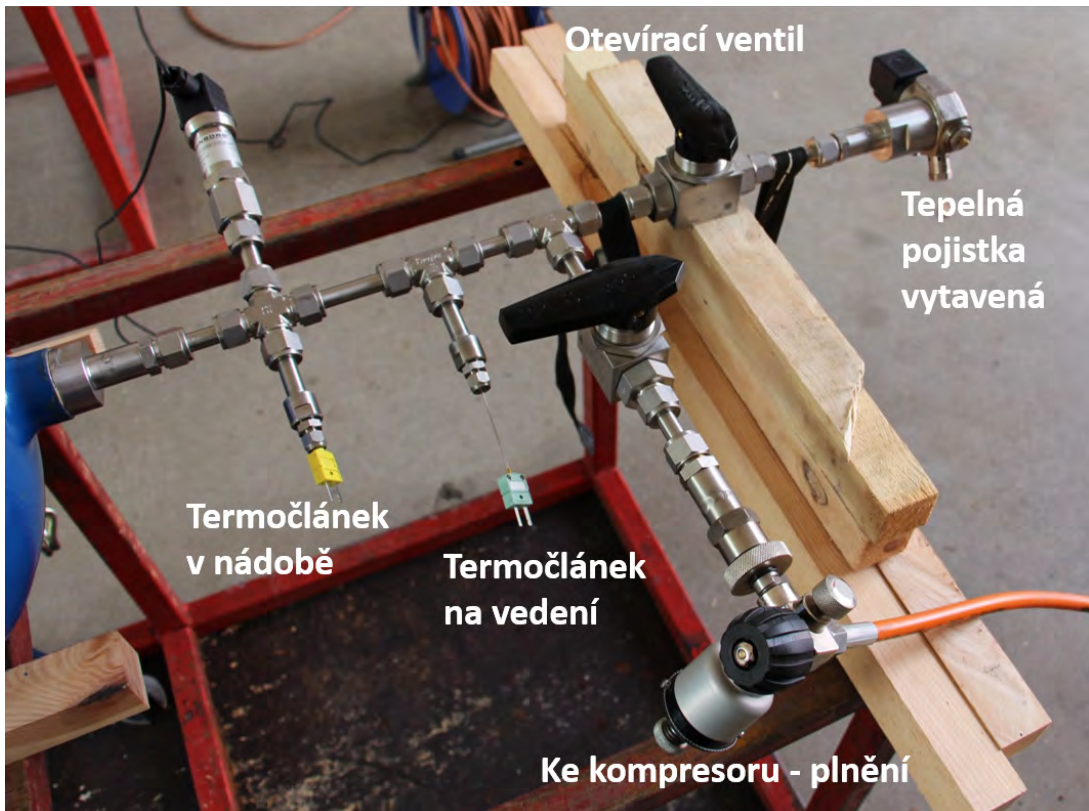
Z hlediska bezpečnosti a za předpokladu, že výtokové charakteristiky metanu a vzduchu jsou podobné [8], byla dynamika výtoku z tlakové láhve nejprve detailně studována s láhvemi naplněnými vzduchem.

Aby bylo možno experimenty opakovat za stejných podmínek, aby bylo možno láhve opakovaně plnit a bylo možno měřit pokles tlaku při úniku plynu z nádoby přes tepelnou pojistku, byl vyroben speciální prodlužovací nástavec (Obr. 2.2a), který nepřímo propojil výtokové hrdlo nádoby s originálním solenoidovým ventilem, který na sobě měl namontovanou otevřenou (vytavenou) tepelnou pojistku. Průměr ocelové trubky, která prodlužovala výtokovou cestu před vstupem plynu do solenoidového ventilu odpovídal průměru vnitřního závitů solenoidového ventilu a trubka byla rovná, umístěná v ose závitů láhve, aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění dynamiky výtoku modifikací výtokové cesty plynu. V prodlužovací cestě bylo umístěno čidlo tlaku a dále termočlánek uvnitř láhve kousek za hrdlem a termočlánek ve výtokové cestě. Na nástavci před solenoidovým ventilem byl umístěn mechanický uzavírací ventil (Obr. 2.2b). Po jeho otevření byla výtoková cesta plynu plně průchozí a plyn z nádoby utíkal přes otvory vytavené bezpečnostní pojistky. Výtok plynu tak nebyl ovlivněn způsobem, jakým došlo k aktivaci tepelné pojistky a experimenty byly snadno opakovatelné. Láhev s nástavcem byla uchycena do držáku a umístěna na váhy.

Byla provedena sada měření pro tlaky uvnitř nádoby 30, 50, 100, 150 a 200 bar. Pro každý tlak bylo měření opakováno celkem pětkrát. Zkoušky byly prováděny na hale TÚPO. Byl měřen hmotnostní úbytek plynu a pokles tlaku, dále teplota uvnitř láhve (termočlánekem prostrčeným hrdlem) a teplota ve výtokové cestě. Počáteční teplota vzduchu v tlakové láhvi se pohybovala



(a) Celý systém



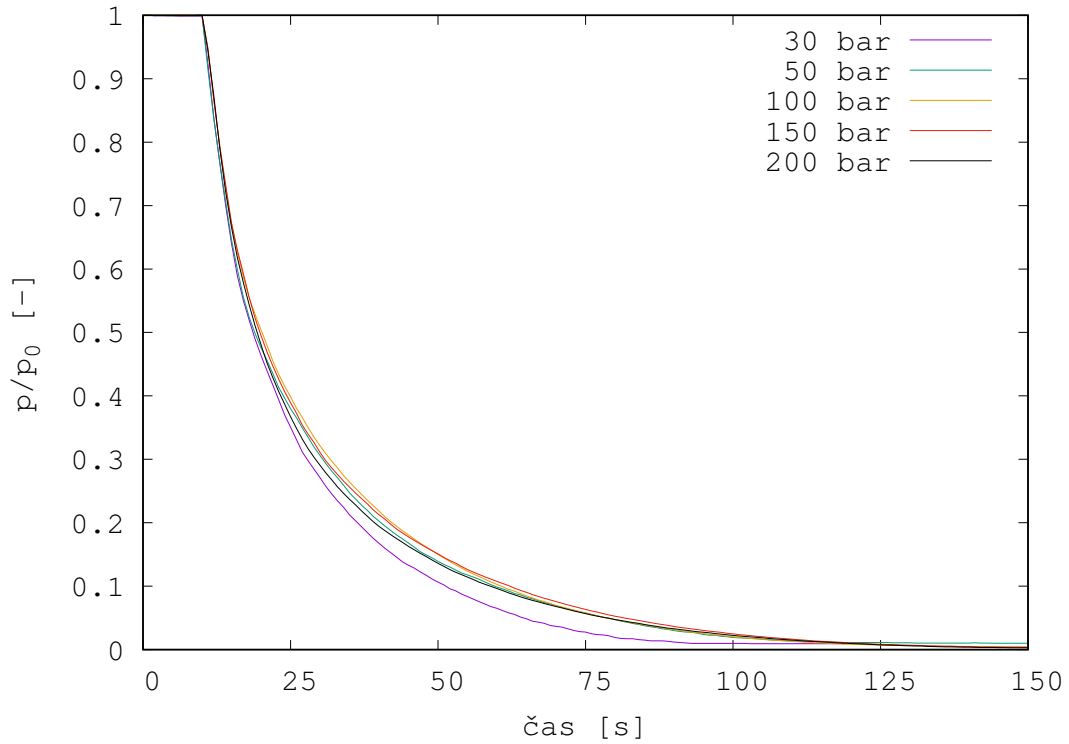
(b) Detail nástavce

Obrázek 2.2: Experimentální aparatura pro měření dynamiky výtoku vzduchu z tlakové nádoby.

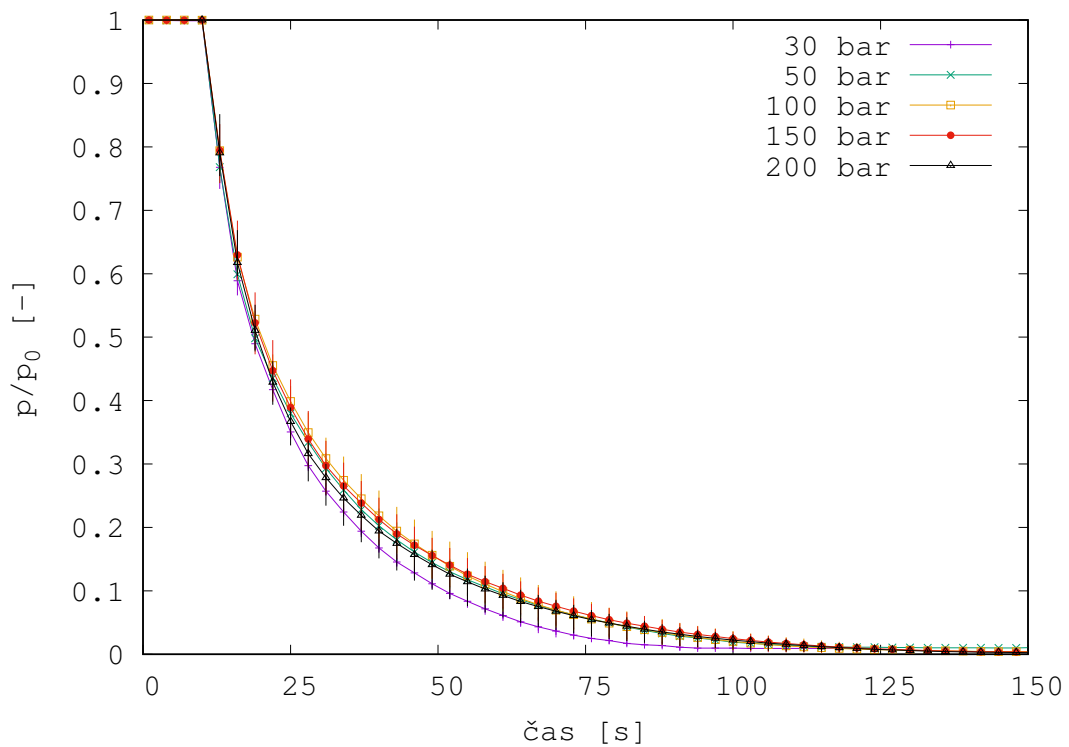
mezi 24 a 30 °C, počáteční teplota plynu naměřená v prodlužovací cestě se pohybovala mezi 30 a 40 °C.

Výsledky měření tlaku a hmotnosti jsou uvedeny na Obr. 2.3 a 2.4. Tlak i hmotnost byly normalizovány počáteční hodnotou. Bezrozměrný pokles tlaku a hmotnosti umožňuje porovnávat mezi sebou měření s různým počátečním tlakem v nádobě. Na Obr. 2.3a je porovnán pokles tlaku pro různý počáteční tlak v nádobě. Jedná se o průměrnou hodnotu z pěti měření. Nižší hodnota bezrozměrného tlaku byla naměřena pro tlak 30 bar. Pro ostatní tlaky jsou si naměřené hodnoty tlaku velmi podobné. Podíváme-li se na výsledky s uvedenou maximální a minimální naměřenou hodnotu z pěti měření (Obr. 2.4b), vidíme, že odchylky, které lze vidět na průměrných hodnotách spadají do rozmezí naměřených hodnot a nelze z nich tak vyvodit žádný trend s ohledem na počáteční tlak plynu v nádobě. Celková doba výtoku plynu byla stanovena pouze orientačně podle zvuku, který vypouštějící se nádoba vydává a podle již neměnicího se tlaku na tlakovém čidle. Doba výtoku se pro tlak 200 a 150 bar pohybovala kolem 138 sekund. S klesajícím tlakem klesala i doba výtoku až na přibližně 86 sekund při počátečním tlaku 30 bar.

Průměrná hmotnost plynu v nádobě při tlaku 200 bar byla přibližně 10,9 kg, pro 150 bar 9,2 kg, pro 100 bar 5,5 kg, pro 50 bar 2,8 kg a pro 30 bar 1,7 kg. Z hlediska poklesu hmotnosti plynu (Obr. 2.4) lze vidět, že pro nižší tlak, a tedy menší množství plynu v nádobě, je pokles hmotnosti v čase vyšší. Nádoba se vyprazdňuje rychleji. Tento trend už není pozorovatelný pro vyšší tlak než 100 bar. Přibližně polovina láhve se vyprázdní v prvních 20 sekundách, po 40 až 50 sekundách (dle počátečního tlaku a množství vzduchu) z láhve vyteče přibližně 80 % jejího obsahu. Na všech křivkách naměřené hmotnosti je vidět nárůst hmotnosti bezprostředně po otevření nádoby. To je pravděpodobně způsobeno nárazem proudu plynu do vah. Frekvence měření jedna sekunda je příliš vysoká na to, abychom mohli blíže dobu bezprostředně po otevření ventilu experimentálně popsat.

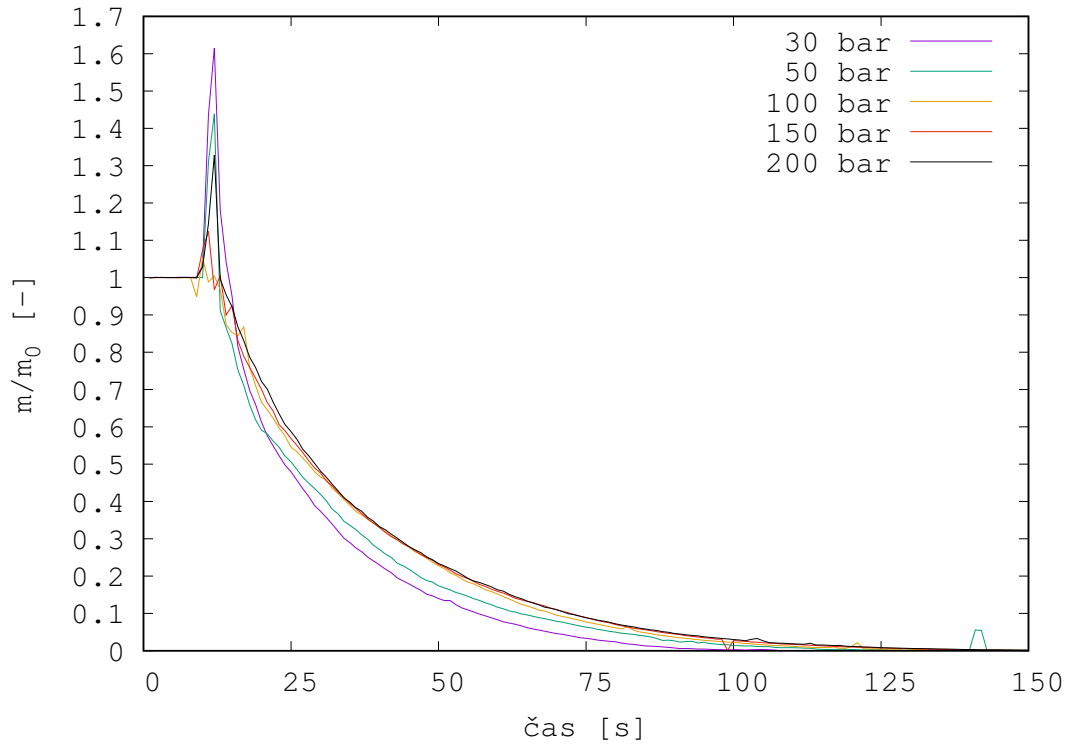


(a) Bezrozměrný tlak, průměrná hodnota z 5 měření.

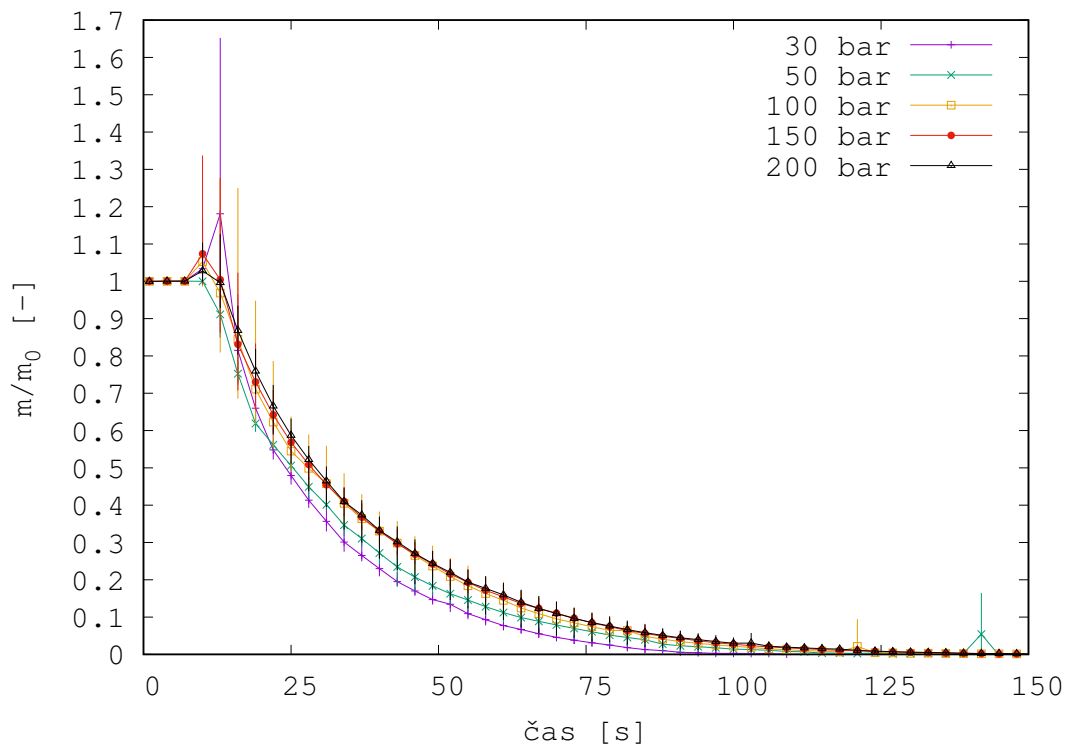


(b) Bezrozměrný tlak, průměrná hodnota z 5 měření s chybovými úsečkami s minimální a maximální naměřenou hodnotou.

Obrázek 2.3: Bezrozměrný tlak v nádobě při jejím vypouštění přes vytavenou tepelnou pojistku, počáteční tlak 30, 50, 100, 150 a 200 bar. Počátek výtoku je v čase 10 sekund.



(a) Bezrozměrná hmotnost, průměrná hodnota z 5 měření.



(b) Bezrozměrná hmotnost, průměrná hodnota z 5 měření s chybovými úsečkami s minimální a maximální naměřenou hodnotou.

Obrázek 2.4: Bezrozměrná hmotnost plynu v nádobě při jejím vypouštění přes vytavenou tepelnou pojistku pro počáteční tlak 30, 50, 100, 150 a 200 bar. Počátek výtoku je v čase 10 sekund.

Měření tlaku uvnitř nádoby

Data poklesu tlaku uvedené v předchozím textu byla naměřena tlakovým čidlem umístěným v prodlužovací nástavci, tedy v uměle přidané výtokové cestě. Byla provedena sada měření s upravenou tlakovou nádobou tak, aby čidlo tlaku i teploty bylo umístěno přímo v nádobě. V nádobě byla umístěna celkem tři tlaková čidla, dvě na boku nádoby a jedno na dně nádoby. V nádobě byl také z boku umístěn jeden termočlánek. Na stěně nádoby byly nalepeny tři termočlánky pro měření povrchové teploty láhve. Umístění termočlánků a tlakových čidel je vidět na Obr. 2.5. Současně byl měřen tlak a teplota (stejně jako v předchozí sadě experimentů) ve výtokové cestě, aby bylo možno tlak a teplotu v nádobě a v nástavci porovnat. Dále byl měřen hmotnostní úbytek při vypouštění tlakové láhve. Byla provedena sada pěti měření při počátečním tlaku 200, 150, 100 a 50 bar.



Obrázek 2.5: Experimentální aparatura pro měření dynamiky výtoku vzduchu z upravené tlakové nádoby.

Hodnoty tlaku naměřené čidly umístěnými v tlakové nádobě se při vypouštění nádoby nelišily od hodnoty tlaku naměřené tlakovým čidlem umístěným ve výtokové cestě. Drobné odchylky spadají do přesnosti měření tlakového čidla. Je proto možné naměřené tlakové úbytky přidat do datového souboru předchozích měření. Kvůli zachování jednotnosti byla pro rozšíření datového souboru použity hodnoty z tlakového čidla umístěného ve výtokové cestě. Při měření druhé sady experimentů byla pro výpočet průměrné hodnoty vyloučena dvě měření z důvodu chyby záznamu časového kroku ústředny a to pro 100 bar měření 2 a pro 50 bar měření 1.

Způsob měření úbytku hmotnosti se s modifikovanou nádobou nijak nezměnil, normalizované hmotnosti byly proto přidány do datového souboru z předchozích měření. Ze zpracování dat bylo z důvodu chyby záznamu časového kroku ústředny vyloučeno první měření pro počáteční tlak 200 bar.

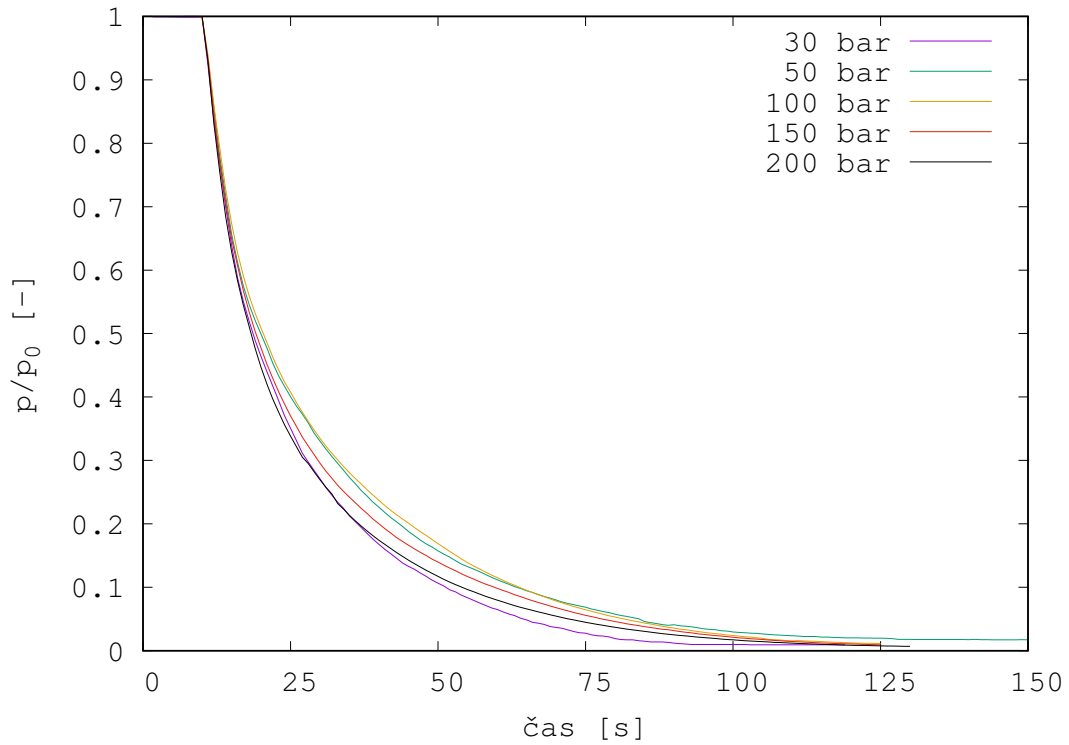
Tabulka 2.2: Průměrná hodnota počáteční teploty plynu v láhvi, průměrná minimální naměřená hodnota teploty plynu v láhvi a průměrný maximální pokles teploty z pěti experimentů pro čtyři hodnoty počátečního tlaku.

	T_0 (°C)	T_{min} (°C)	ΔT (°C)
200 bar	$44,6 \pm 1,8$	$-56,6 \pm 4,7$	$101,2 \pm 3,6$
150 bar	$42,3 \pm 1,6$	$-46,9 \pm 4,2$	$89,2 \pm 3,2$
100 bar	$39,2 \pm 1,1$	$-37,2 \pm 1,7$	$76,4 \pm 1,6$
50 bar	$29,3 \pm 1,9$	$-31,9 \pm 2,9$	$61,1 \pm 1,2$

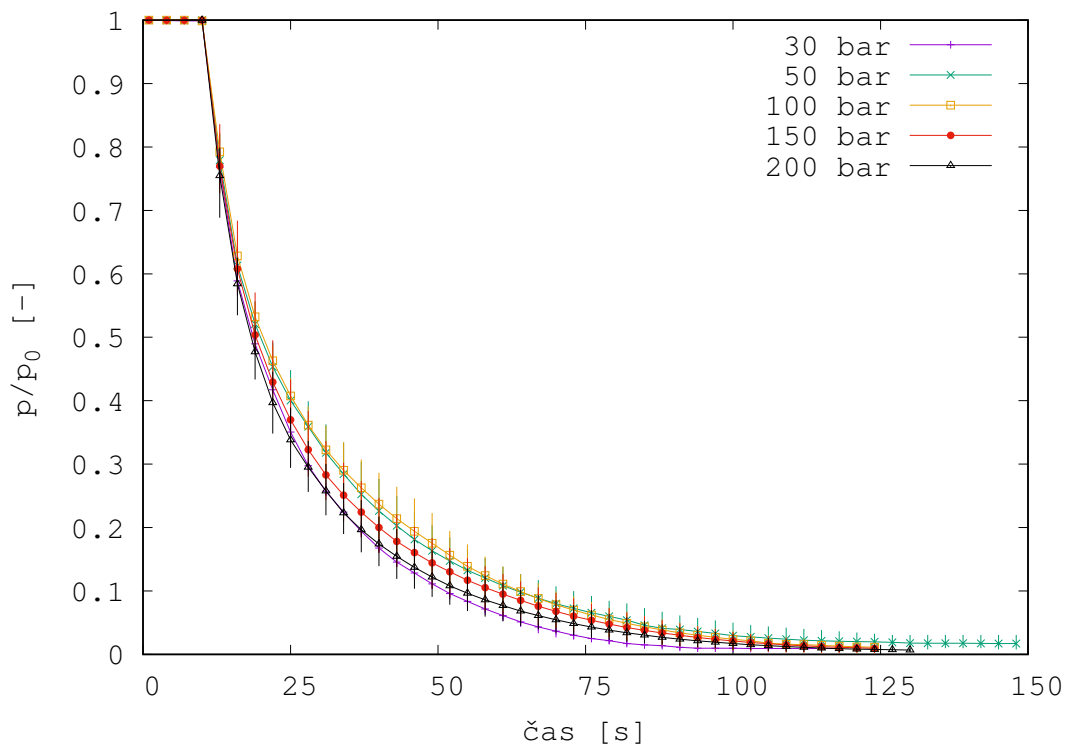
V příloze jsou uvedeny grafy poklesu tlaku a hmotnostního úbytku se všemi deseti měřeními pro všechny počáteční tlaky vzduchu v nádobě. Průměrná hodnota poklesu tlaku a hmotnosti z celého setu měření je na Obr. 2.6 a 2.7. Rozšířením datového setu jak tlaku, tak hmotnosti se ukázalo, že pět měření nebylo dostačujících pro zajištění reprezentativní průměrné hodnoty z hlediska opakovatelnosti měření. Při rozšíření datového setu se změnila průměrná hodnota, která ale spadla do tolerance udané chybovými úsečkami z pěti měření. Grafy porovnání průměrné hodnoty poklesu tlaku z pěti a deseti měření jsou uvedeny v příloze. 10 měření lze tedy doporučit jako minimální počet tak, aby průměrná hodnota měla vypovídající charakter jako okrajová podmínka do matematických modelů.

V porovnání jednotlivých tlaků nelze ani po rozšíření datového souboru říci, že by se s rostoucím počátečním tlakem v nádobě úměrně měnila i bezrozměrná rychlost poklesu tlaku. Z naměřených dat nelze odečíst žádný jasný trend ve vztahu k počátečnímu tlaku vzduchu v nádobě. V porovnání bezrozměrných hmotnostních úbytků v závislosti na počátečním tlaku vzduchu v nádobě také není vidět žádný jasný trend.

Počáteční teplota plynu v láhvi se lišila mezi jednotlivými experimenty přibližně v rozmezí 5 °C a byla vyšší pro vyšší tlak díky zahřívání kompresoru při delší době plnění nádoby. Okolní teplota se pohybovala mezi 21 a 30 °C. Průměrná hodnota počáteční teploty plynu, průměrná minimální naměřená hodnota teploty plynu a průměrný maximální pokles teploty z pěti experimentů pro čtyři hodnoty počátečního tlaku jsou uvedeny v tabulce 2.2. Ukázka poklesu teploty vzduchu v láhvi, v cestě, teplota stěny na třech pozicích a teplota okolí jsou ukázány na Obr. 2.8 pro jedno vybrané měření pro počáteční tlak 200 a 50 bar. Trend byl ve všech měřeních totožný. V grafu je také vynesena průměrná hodnota bezrozměrného poklesu tlaku. Počáteční teplota stěny láhve byla blízká teplotě plynu v láhvi. Při vypouštění plynu z láhve docházelo jen k mírnému ochlazení stěny tlakové láhve. V 18 z 20 měření neklesla pod okolní teplotu, ve dvou případech klesla o méně než 1 °C pod okolní teplotu. Teplota stěny láhve je stejná bez ohledu na umístění termočlánku na boku láhve. Teplota plynu ve výtokové cestě a v láhvi se liší. Teplota plynu ve výtokové cestě je před počátkem výtoku blízká okolní teplotě, po otevření tepelné pojistky skokově vyskočí na teplotu bližší teplotě plynu v láhvi a ihned začne klesat vlivem expanze plynu. Pokles teploty plynu ve výtokové cestě je až do dosažení maximálního ochlazení větší než pokles teploty plynu v láhvi. Jakmile se láhev přibližně z 95 % vyprázdní, unikající plyn se začíná ohřívat. Teplota plynu v cestě roste rychleji než teplota plynu v láhvi až do doby, kdy plyn v nástavci dosáhne teploty nástavce, teplota plynu v láhvi stoupá dál. Jak už bylo řečeno, teplota stěny láhve neklesne pod okolní teplotu, nástavec se ale podchladí natolik, že při výtoku plynu dojde k jeho omrznutí.

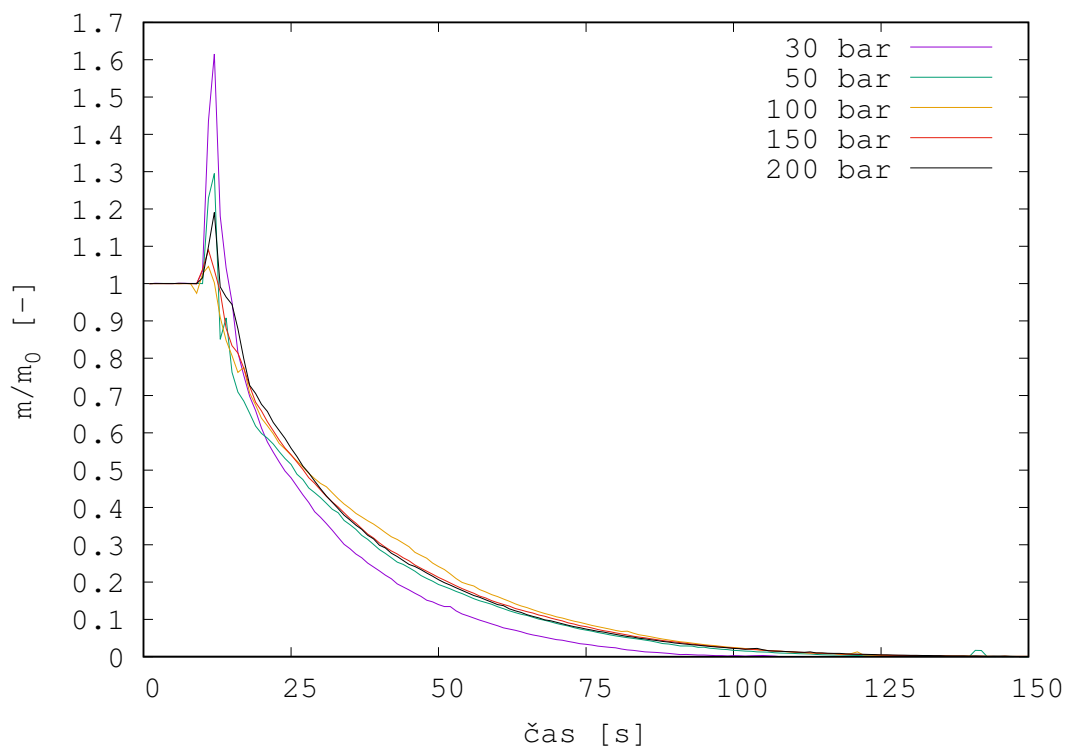


(a) Průměrná hodnota bezrozměrného tlaku.

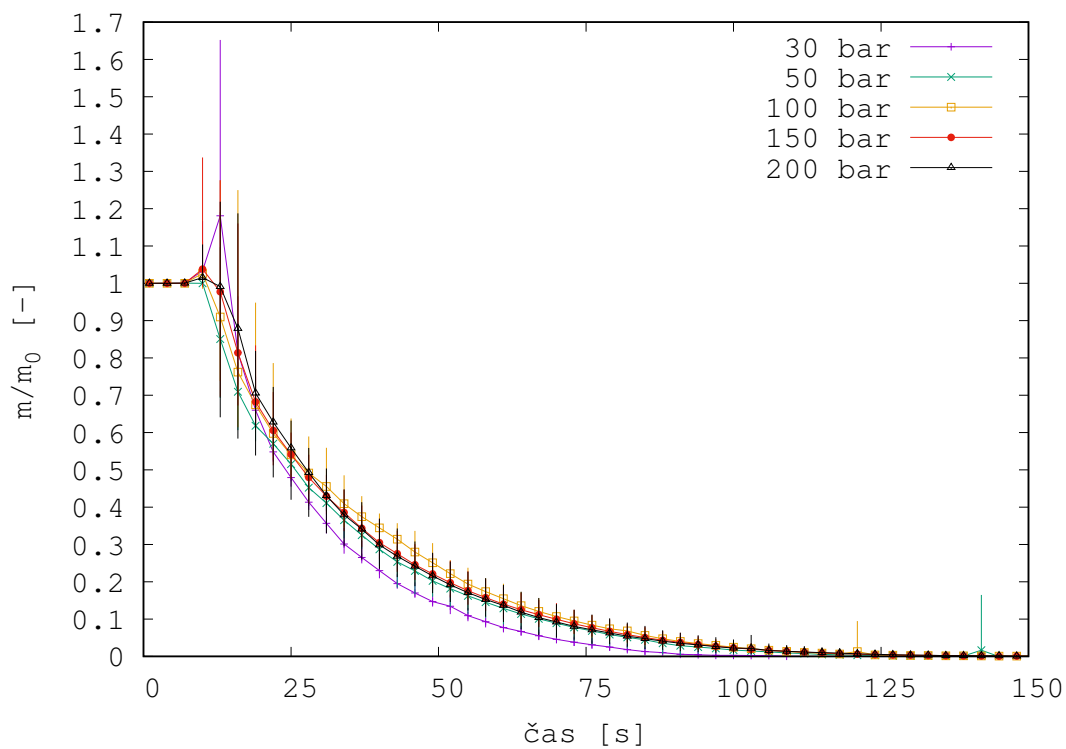


(b) Bezrozměrný tlak, průměrná hodnota s chybovými úsečkami s minimální a maximální naměřenou hodnotou.

Obrázek 2.6: Bezrozměrný tlak v nádobě při jejím vypouštění přes vytavenou tepelnou pojistku, počáteční tlak 30 50, 100, 150 a 200 bar. Počátek výtoku je v čase 10 sekund. Průměr pro tlak 150 a 200 bar je z 10 měření, pro počáteční tlak 100 a 50 bar z 9 měření, pro 30 bar z 5 měření.

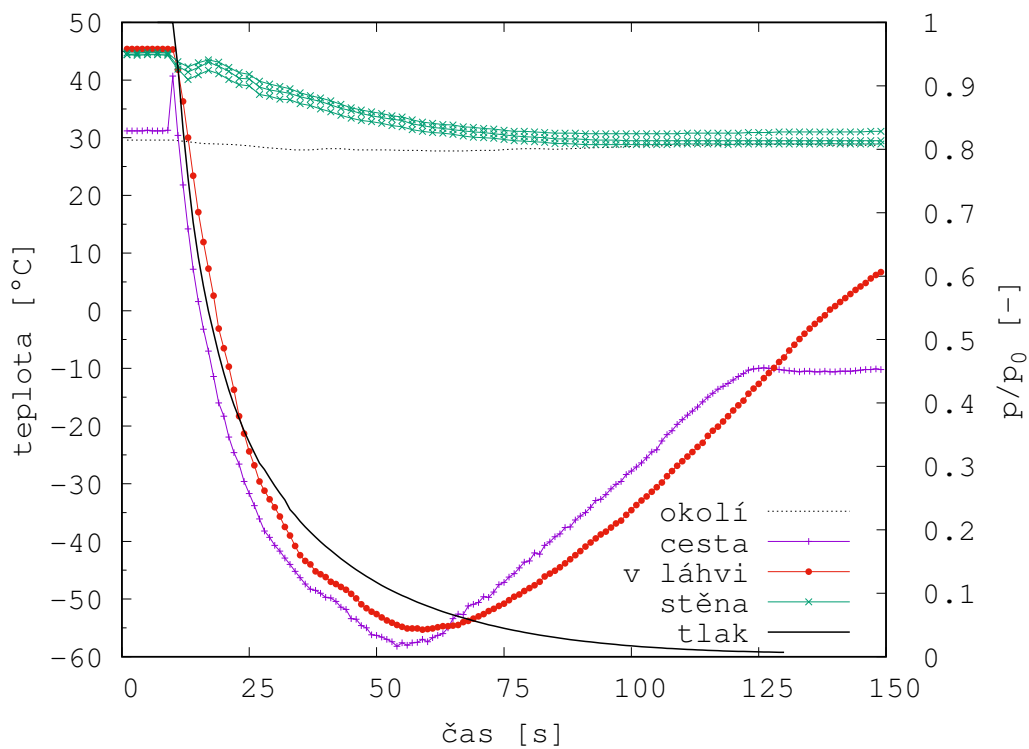


(a) Bezrozměrná hmotnost.

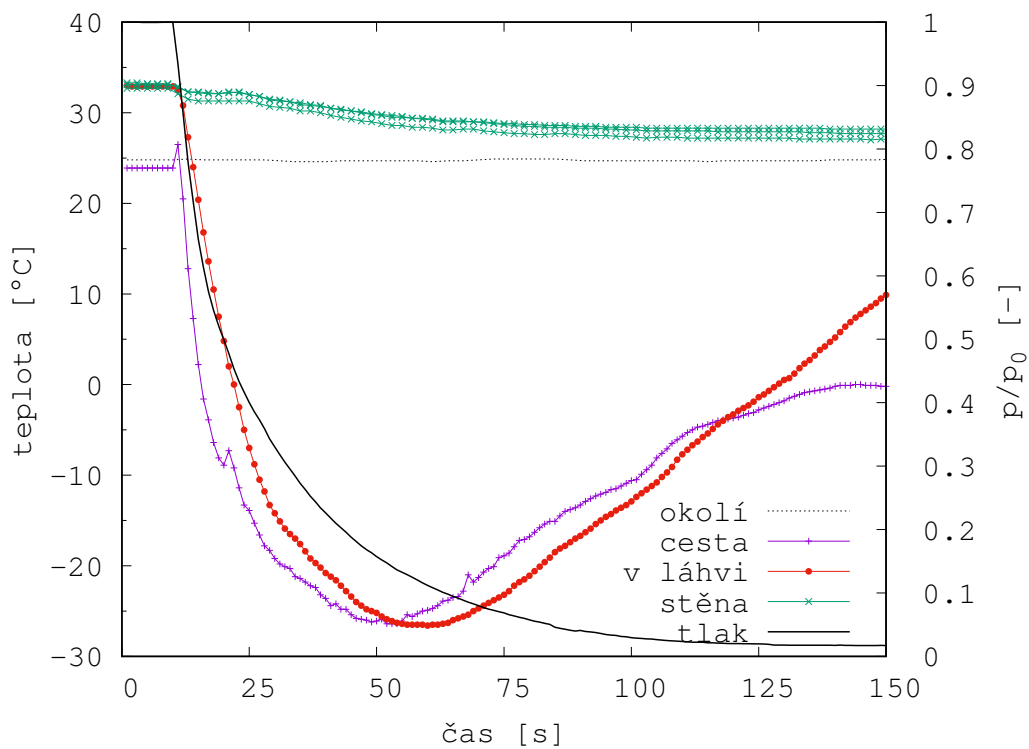


(b) Bezrozměrná hmotnost s chybovými úsečkami s minimální a maximální naměřenou hodnotou.

Obrázek 2.7: Bezrozměrná hmotnost plynu v nádobě při jejím vypouštění přes vytavenou tepelnou pojistku pro počáteční tlak 30, 50, 100, 150 a 200 bar. Počátek výtoku je v čase 10 sekund, průměrná hodnota z 10 měření pro tlak 100, 150 bar, z 9 měření pro tlak 200 bar a 5 měření pro tlak 30 bar.



(a) 200 bar



(b) 50 bar

Obrázek 2.8: Teplota vzduchu v láhvi, ve výtokové cestě, na stěně nádoby a teplota okolí při vypouštění vzduchu z tlakové láhve při počátečním tlaku 200 a 50 bar pro jedno vybrané měření, průměrná hodnota bezrozměrného poklesu tlaku pro 10 měření. Počátek výtoku je v čase 10 sekund.

Upravený solenoidový ventil a nástavec

Dále bylo třeba ověřit, zda je opravdu možno výtokové charakteristiky metanu a vzduchu za daných podmínek, tedy pro neustálený výtok z prostředí s vysokým tlakem do prostředí s atmosferickým tlakem a přes otvor v tepelné pojistce, považovat za podobné. Pro porovnání nešlo použít data z předchozího experimentu, protože zkouška s výtokem metanu (sekce 2.2.2) měla jiné experimentální uspořádání (Obr. 2.9). Solenoidový ventil byl upraven tak, aby otevření výtokové cesty plynu bylo možné provést vzdáleně a experimentální nástavec nemusel obsahovat mechanicky uzavíratelný ventil. Se stejným uspořádáním tedy musel být proměřen i výtok vzduchu.



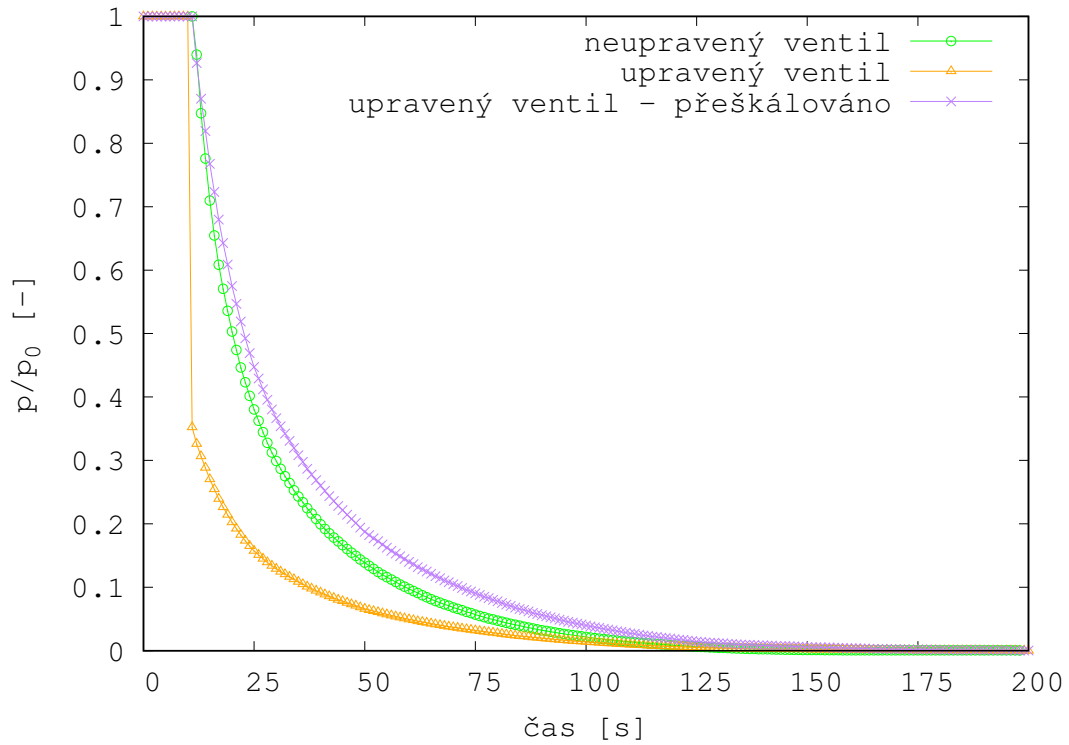
Obrázek 2.9: Nástavec pro měření se vzdáleným otvíráním výtokové cesty plynu.

S upraveným nástavcem a solenoidovým ventilem bylo se vzduchem provedeno měření pro tlak v láhvi 200 bar s 11 opakováními. Opět byl měřen hmotnostní úbytek a pokles tlaku plynu při úniku vzduchu z tlakové láhve, termočlánek byla měřena teplota ve výtokové cestě a povrchová teplota tepelné pojistky. Při prvním měření selhal záznam hmotnosti. Zkoušky byly prováděny na hale TÚPO.

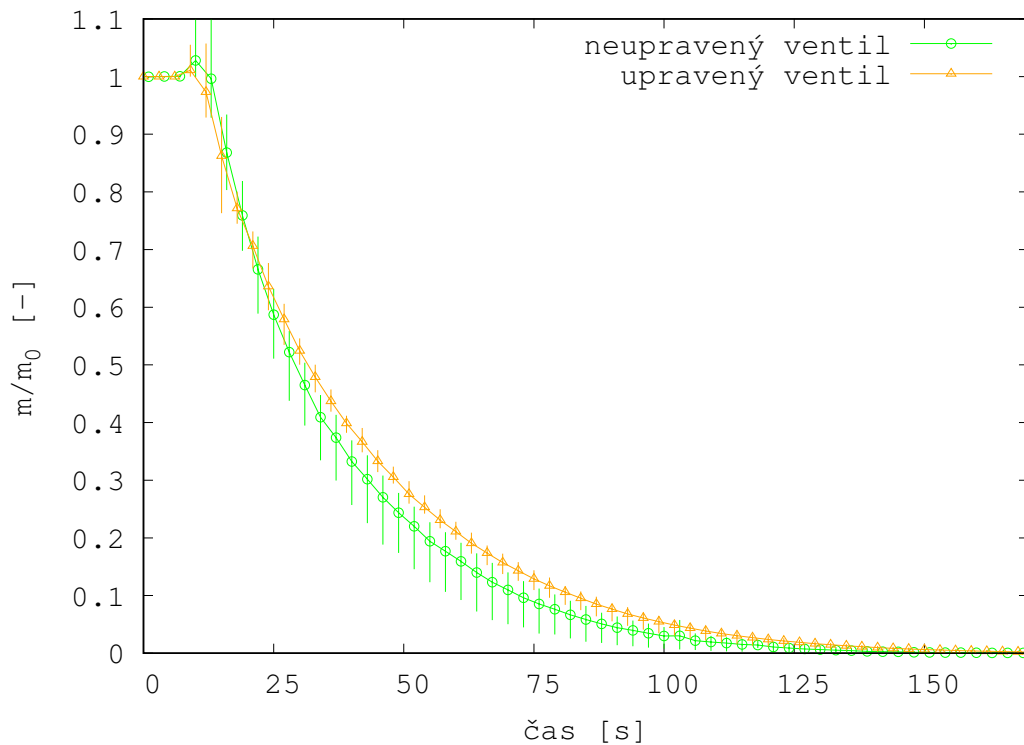
Naměřený pokles tlaku normalizovaný počátečním tlakem je uveden na Obr. 2.10a žlutou čarou se symboly trojúhelníku. Na křivce je vidět, že ihned po otevření, tedy v čase jedna sekunda od zahájení experimentu, klesla hodnota tlaku naměřená tlakovým čidlem na zhruba 35 % původní hodnoty a dál pak hodnota tlaku postupně klesala k nule. Stejné chování bylo naměřeno i u experimentů s výtokem metanu přes upravený solenoidový ventil. Tento pokles neodpovídá předchozím naměřeným datům (zelená křivka s kruhovými body) a jedná se o chybu měření způsobenou pravděpodobně změnou vnitřní stavby solenoidového ventilu v kombinaci s nevhodným umístěním tlakového čidla. Pakliže zanedbáme skokový pokles tlaku a hodnotu odpovídající 35 % uvažujeme jako hodnotu v čase jedna vteřina získáme přeškálovanou křivku

(fialová křivka s křížky). Ta vykazuje dobrou shodu s poklesem tlaku vzduchu v láhvi naměřeném při výtoku z neupraveného solenoidového ventilu.

Hmotnostní úbytek vzduchu při výtoku z tlakové láhve přes upravený solenoidový ventil a porovnání s neupraveným solenoidovým ventilem je na Obr. 2.10b. Shoda mezi měřeními je uspokojivá, trend je stejný jako u křivky tlaku, uvažujeme-li křivku přeškálovanou. Upravený nástavec byl vyhodnocen jako použitelný pro experimenty s výtokem metanu a data z něj lze použít pro porovnání výtokových charakteristik vzduchu a metanu (Obr. 2.12).



(a) Bezrozměrný pokles tlaku. Neupravený solenoidový ventil - průměr z pěti měření, pro upravený solenoidový ventil - průměr z jedenácti měření), přeškálovaná křivka pro data z upraveného solenoidového ventilu.



(b) Bezrozměrný pokles hmotnosti s chybovými úsečkami jako minimální a maximální naměřená hodnota ze série měření, neupravený solenoidový ventil - průměr z pěti měření, upravený solenoidový ventil - průměr z jedenácti měření.

Obrázek 2.10: Porovnání tlaku a hmotnosti při výtoku vzduchu z nádoby přes vytavený TPRD pro neupravený a upravený solenoidový ventil a počáteční tlak 200 bar. Počátek výtoku je v čase 10 sekund.

2.2.2 Metan

Z bezpečnostních důvodů byly zkoušky prováděny ve venkovním prostředí v pyrotechnickém areálu PČR v Ralsku. Byly zaznamenány okolní podmínky - teplota, rychlost a směr proudění větru. Solenoidový ventil, který byl přímo namontován na hrdlo tlakové láhve, byl ve svém vnitřním uspořádání upraven tak, aby bylo výtokovou cestu možno vzdáleně otevřít a zavřít. Na upraveném solenoidovém ventilu byla namontovaná originální nevytavená, tedy uzavřená, tepelná pojistka a dále prodlužovací vedení v místě, kde je přípojka vysokotlakového vedení zemního plynu. V prodlužovacím vedení bylo umístěno čidlo tlaku a na jeho konci byla namontovaná otevřená tepelná pojistka, kterou metan z láhve řízeně uniká (Obr. 2.11a). Je třeba zdůraznit, že výtoková cesta byla změněna oproti skutečnému uspořádání v reálném provozu, protože plyn protékal přes ventil uvnitř modifikovaný a dále do prodlužovacího vedení přes výtokového místo ve ventilu, které neodpovídá umístění bezpečnostní pojistky na originálním solenoidovém ventilu.

Tlaková láhev byla upevněna do držáku a umístěna na váhu (Obr. 2.11b). Byl měřen hmotnostní úbytek, pokles tlaku a dále byla bezdotykově a nalepovacím termočlánkem měřena teplota na zadní části láhve. S metanem bylo provedeno 6 měření pro tlak v láhvi 200 bar. Měření tři bylo prohlášeno za neplatné, protože naměřené hodnoty tlaku a hmotnosti se řádově lišily od zbylých měření a nezachovávaly ani trend ostatních měření.

Průměrná doba výtoku metanu z tlakové láhve byla 166 ± 12 sekund. Výsledky měření jsou zpracovány na Obr. 2.12, kde jsou zároveň porovnány s výsledky měření výtoku vzduchu (sekce 2.2.1). Shoda úbytku hmotnosti metanu a vzduchu při stejném experimentálním uspořádání a za stejného počátečního tlaku 200 bar je velmi dobrá a rozdíly spadají do rozptylu naměřených hodnot v sérii pěti měření. Pokles tlaku je shodný přibližně prvních 15 sekund výtoku, poté tlak při výtoku metanu stoupá a lehce osciluje a následně klesá k nule. Zdálo by se, že tento rozdíl nemusí být uvažován jako významný, protože tlak v nádobě v té době klesl již pod 20 % počáteční hodnoty tedy z 200 bar pod 40 bar. Záznam tlakového čidla nicméně není správný v absolutních hodnotách a je třeba uvažovat pouze trend poklesu tlaku, jak bylo diskutováno v sekci 2.2.1. Data z tlakového čidla při měřeních s upraveným solenoidovým ventilem mají vysokou nejistotu měření. Pro porovnání výtokových charakteristik vzduchu a metanu byla použita jen data hmotnosti. Ta ukazují, že vzduch lze využít jako bezpečnou alternativu pro studium dynamiky výtoku plynu z tlakové nádoby přes bezpečnostní pojistku.

Z dat úbytku hmotnosti byla dále vypočítána rychlost hmotnostního úbytku (Mass Loss Rate - MLR) jako rozdíl dvou po sobě naměřených hodnot (časový interval mezi dvěma naměřenými hodnotami byl 1 vteřina). Rychlost úbytku hmotnosti je veličina, která se zadává do výpočetních modelů jako okrajová podmínka pro vstup plynu do výpočetní domény. Výsledky na Obr. 2.13 ukazují vysoký rozptyl hodnot hned po otevření ventilu a s postupujícím časem výtoku klesá. Naměřená data byla aproximována tak, že průměrná hodnota bezrozměrné hmotnosti z pěti měření byla proložena polynomickou regresí. Ze získané funkce pak byla zpětně dopočtena rychlost úbytku hmotnosti. Rychlost úbytku hmotnosti je velmi vysoká na začátku výtoku. Maximální hodnota vypočtená z aproximované modelové křivky je 360 g/s.

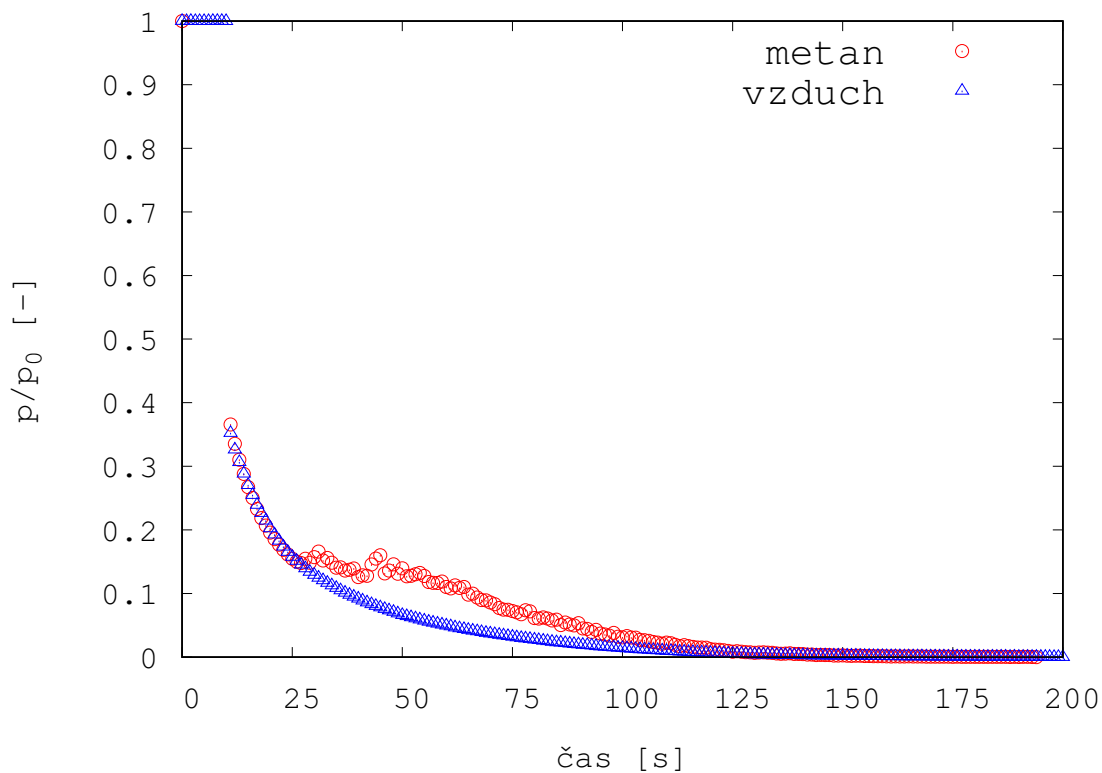


(a) Výtoková část

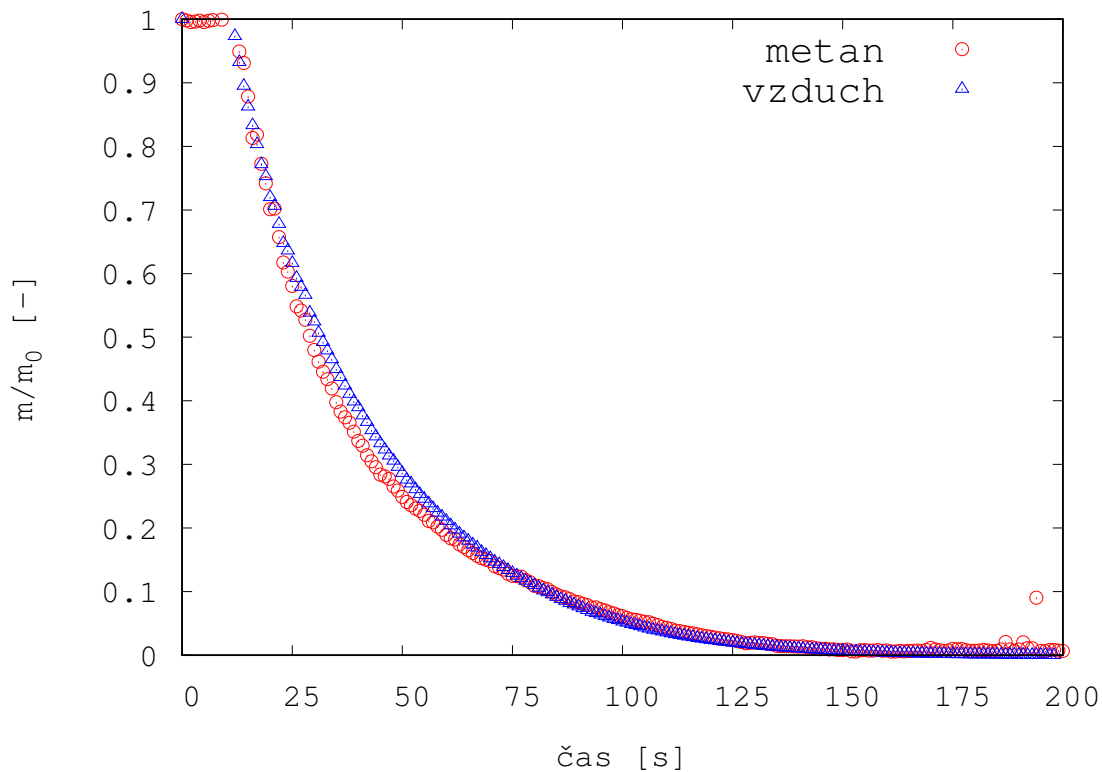


(b) Celkový pohled, umístění IČ teploměru

Obrázek 2.11: Experimentální aparatura pro měření dynamiky výtoku metanu přes vytavenou tepelnou pojistku.

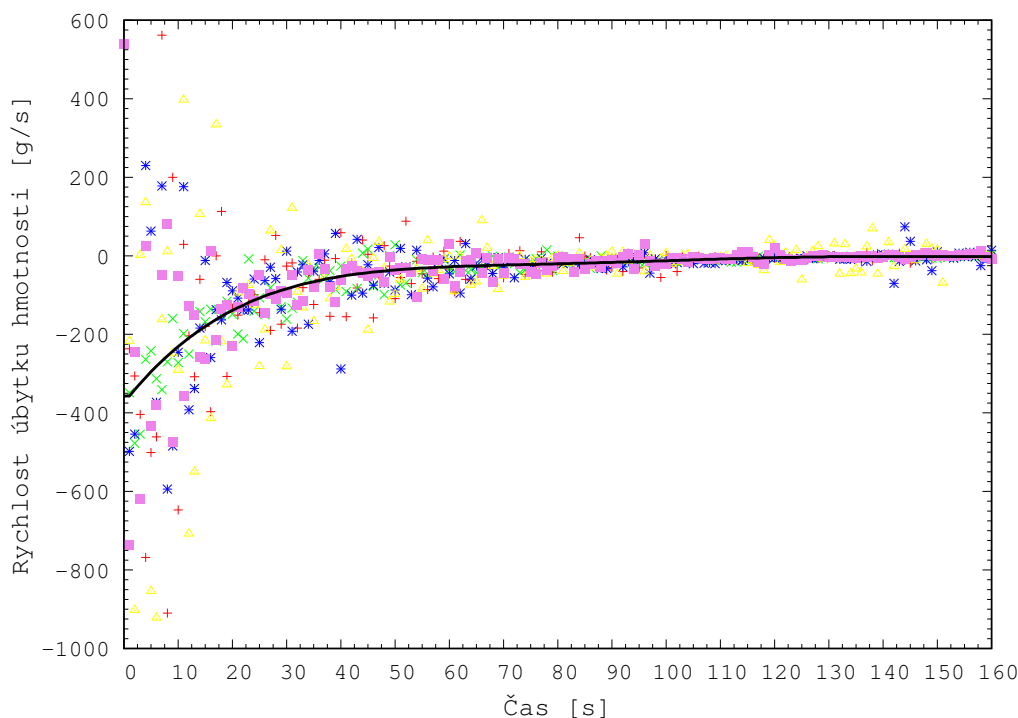


(a) Bezrozměrný tlak v čase.



(b) Bezrozměrná hmotnost v čase.

Obrázek 2.12: Porovnání výtoku vzduchu a metanu. Počátečním tlaku v nádobě 200 bar, výtok probíhal přes upravený solenoidový ventil. Křivky jsou průměrné hodnoty z jedenácti měření pro vzduch a pěti měření pro metan. Počátek výtoku je v čase 10 sekund.



Obrázek 2.13: Rychlost úbytku hmotnosti metanu v tlakové láhvi v čase. Body jsou experimentální data. Plná čára je aproximovaná křivka rychlosti hmotnostního úbytku. Křivka byla získána proložením hodnoty průměru hmotnosti plynu v čase poděleného počáteční hmotností z pěti měření polynomickou regresí. Ze získané funkce pak byla vypočtena rychlost úbytku hmotnosti.

2.3 Výtoku plynu přes tepelnou pojistku otevřenou působením tepla

Výše popsané experimenty studující dynamiku výtoku plynu z tlakového zásobníku přes tepelnou pojistku vycházely z předpokladu, že při aktivaci tepelné pojistky dojde k úplnému vytavení slitiny v těle pojistky a k dokonalému otevření výtokové cesty pro řízený únik plynu. Pro všechny experimenty tak byla použita tepelná pojistka již vytavená. Bylo tedy nutno ověřit, zda je dynamika výtoku plynu totožná v případě, že bude tepelná pojistka aktivovaná tak, jak je navržena, tedy působením zvýšené teploty. Dále bylo třeba ověřit případný vliv experimentálního nastavení použitého pro měření dynamiky výtoku plynu na naměřené tlakové a hmotnostní úbytky (2.2.1).

V dalším kroku tedy byla provedena sada měření v originálním uspořádání, kdy je solenoidový ventil s nevytavenou pojistkou namontován přímo na hrdlo láhve a výtok plynu je aktivován překročením teploty tání nízko-teplotně tavitelné slitiny. Odpadá tím případný vliv nastavení - změny výtokové cesty - na dynamiku výtoku plynu.

2.3.1 Vzduch

Na hale TÚPO bylo provedeno celkem 5 měření s tlakovou lahví naplněnou na 200 bar a různými způsoby ohřevu tepelné pojistky:

1. Horkovzdušná pistole pouze do otevření pojistky,
2. Horkovzdušná pistole, pistole puštěná přibližně 3/4 doby výtoku,
3. Laboratorní plynový kahan, odstraněn 20 sekund po otevření pojistky,
4. Plynový hořák na PB pouze do otevření pojistky,

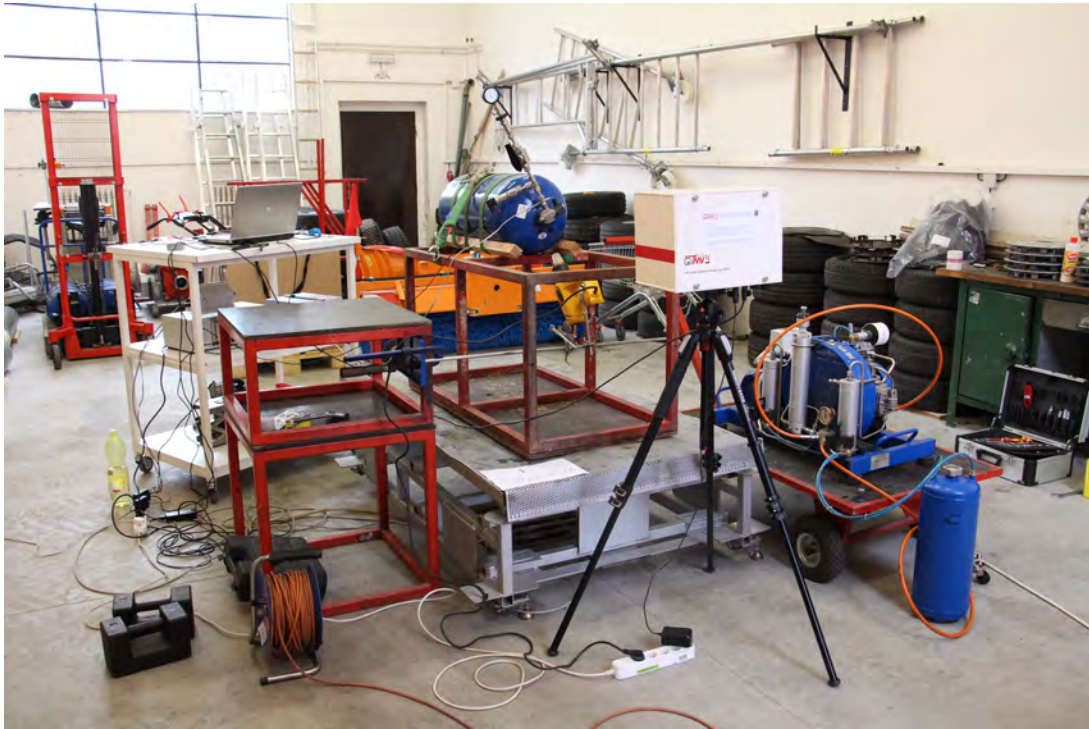
5. Plynový hořák na PB po celou dobu výtoku plynu.

Tlaková láhev byla upevněna na držák a spolu s držákem umístěna na váhy. Byl měřen hmotnostní úbytek a pokles tlaku v uspořádání, jak je znázorněno na Obr. 2.14. Z přední strany byla nádoba snímána termokamerou, aby bylo možno odečíst teplotu a sledovat prohřívání a chlazení solenoidového ventilu, bezpečnostní pojistky a přední části láhve. Dále byla IČ teploměrem bezdotykově měřena teplota na zadní části láhve.

Na Obr. 2.15 je vyneseno bezrozměrný pokles tlaku a hmotnosti pro všech pět experimentů a porovnán s výtokem plynu přes vytavený TPRD. Je vidět, že výtok přes nevytavený TPRD byl bez ohledu na použitý zdroj tepla několikanásobně delší než v případě výtoku přes již vytavený, tedy plně otevřený TPRD. Při výtoku plynu z nádoby dochází k jeho expanzi a výraznému poklesu teploty. Tělo solenoidového ventilu a bezpečnostní pojistky se velmi rychle ochlazuje. Na Obr. 2.16 je vidět povrchová teplota pojistky při experimentu jedna. Před zahájením výtoku byla teplota kolem 100 °C. 60 sekund po zahájení výtoku plynu byla povrchová teplota těla pojistky kolem -15 °C. Během experimentu 2 se pojistka během 60 sekund ochladila ze zhruba 107 °C na -5 °C.

Během experimentu jedna klesla povrchová teplota těla tepelné pojistky během první sekundy po otevření o přibližně 20 °C, během experimentu dva dokonce o 40 °C. Prudké ochlazení celého těla tepelné pojistky způsobí to, že tavný kov uvnitř bezpečnostní pojistky se ochladí zpět pod teplotu tání dřív, než všechen vyteče. Z konstrukce pojistky tak dojde k tomu, že výtoková cesta plynu není plně otevřena, plyn utíká menší průtočnou plochou a tedy výrazně delší dobu. V případě, že byla horkovzdušná pistole odebrána hned po začátku výtoku plynu, nádoba se vyprazdňovala 1400 sekund. Při ponechání působení horkovzdušné pistole na solenoidový ventil a TPRD i po zahájení výtoku, doba výtoku se zkrátila na přibližně 900 sekund. Ačkoliv při použití laboratorního kahanu byla povrchová teplota před otevřením pojistky kolem 160 °C, došlo k postupnému podchlazení pojistky až na -15 °C a doba výtoku byla také kolem 900 sekund. Nejkratší doby výtoku, přibližně 500 sekund, bylo dosaženo s plynovým hořákem, který byl zapnutý po celou dobu výtoku plynu. Na křivce tlaku i hmotnosti je vidět skokový pokles těsně před koncem výtoku, který značí, že došlo k dalšímu povolení pojistky díky odtoku tavného kovu a zvětšení výtokové plochy. Data povrchové teploty ze záznamu termokamery ukazují silné oscilace díky přímému působení plamene a nelze z nich odečíst pokles teploty těla pojistky.

Pakliže je TPRD plně otevřený, experimentálně naměřená doba výtoku při stejném počátečním tlaku byla přibližně 140 sekund. Je třeba říci, že mnohonásobně delší naměřené časy při této sadě experimentů neznamenají, že se jedná o selhání tepelné pojistky, protože plyn se z nádoby řízeně vypustil. Legislativně není kladen požadavek na dobu výtoku plynu. Z naměřených dat je vidět, že teplotní pole v okolí pojistky nemá vliv pouze na čas do otevření pojistky, tedy do výtoku tavného kovu, ale má i zásadní vliv na kvalitu otevření pojistky a na dobu výtoku.



(a) Celkový pohled

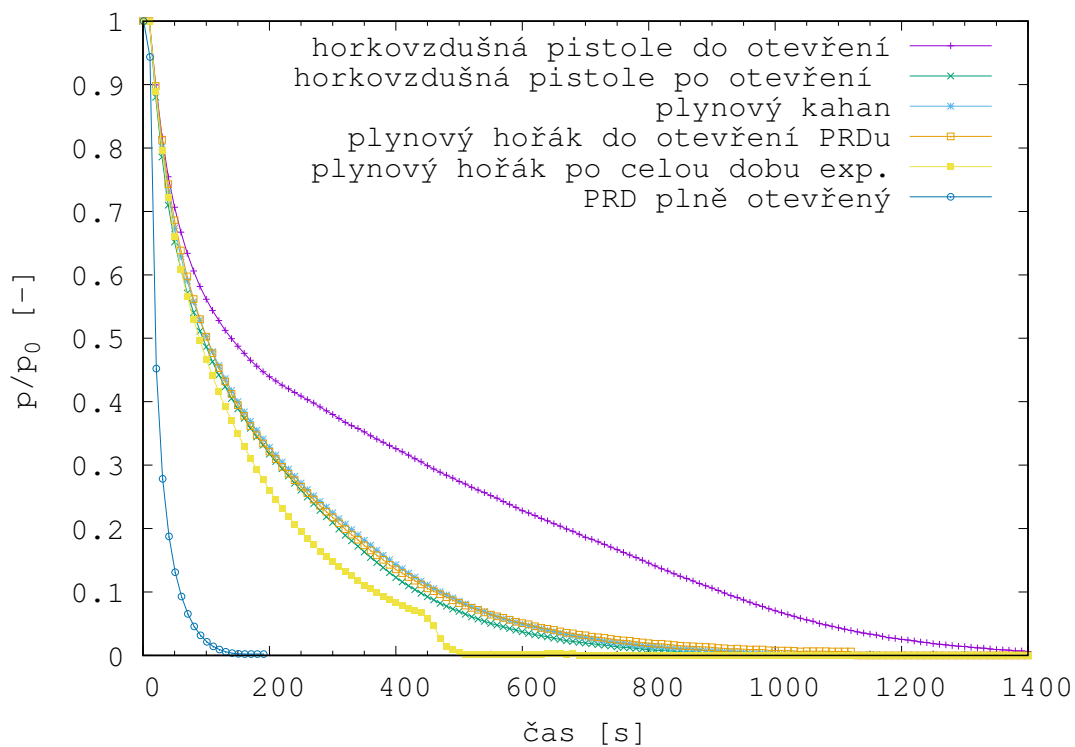


(b) Detail nástavce a solenoidového ventilu

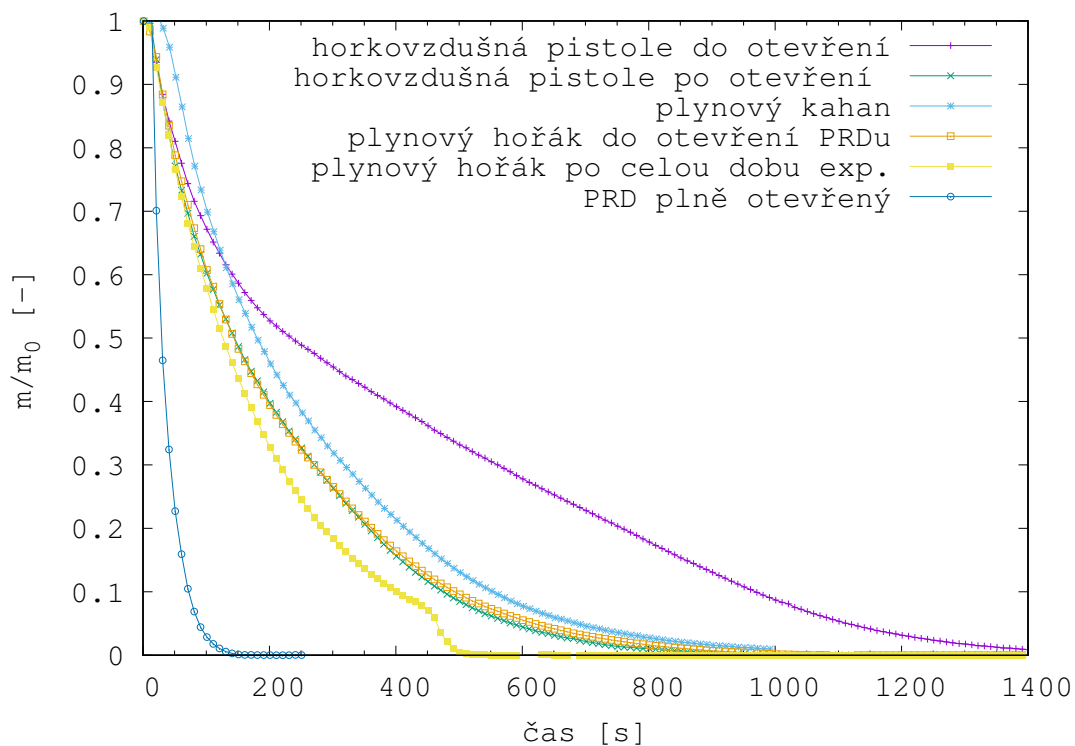


(c) Měření teploty povrchu IČ teploměrem

Obrázek 2.14: Experimentální aparatura pro měření dynamiky výtoku vzduchu přes nevytavenou tepelnou pojistku.

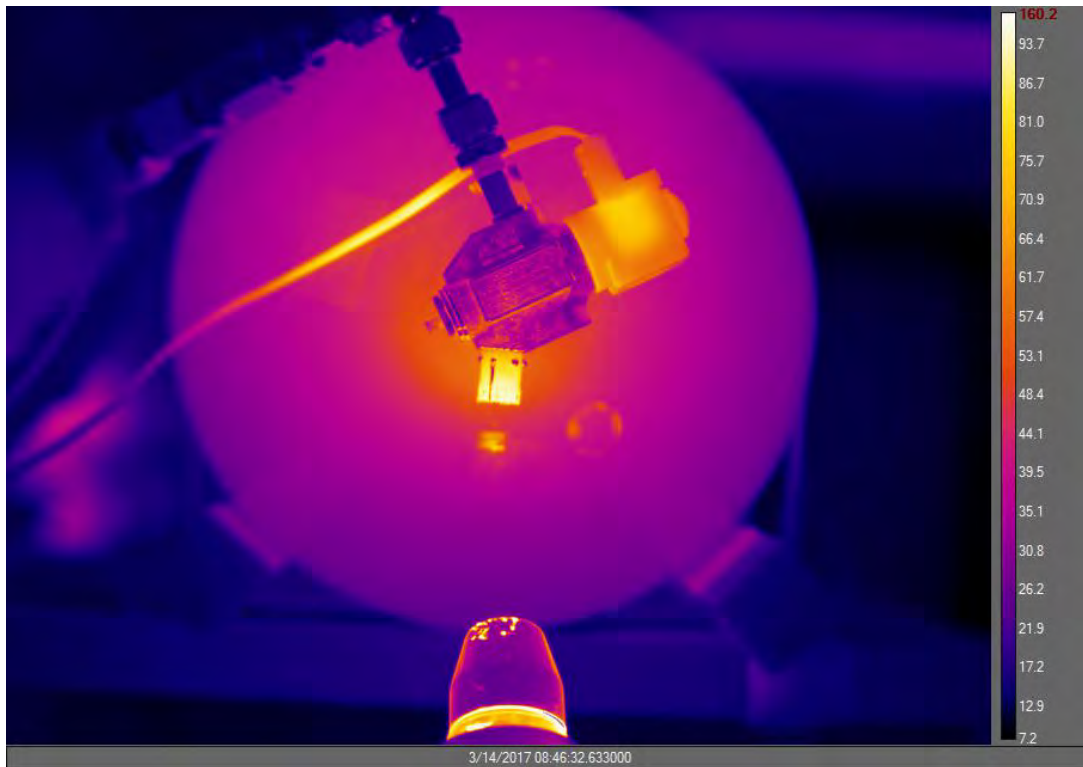


(a) Bezrozměrný pokles tlaku.

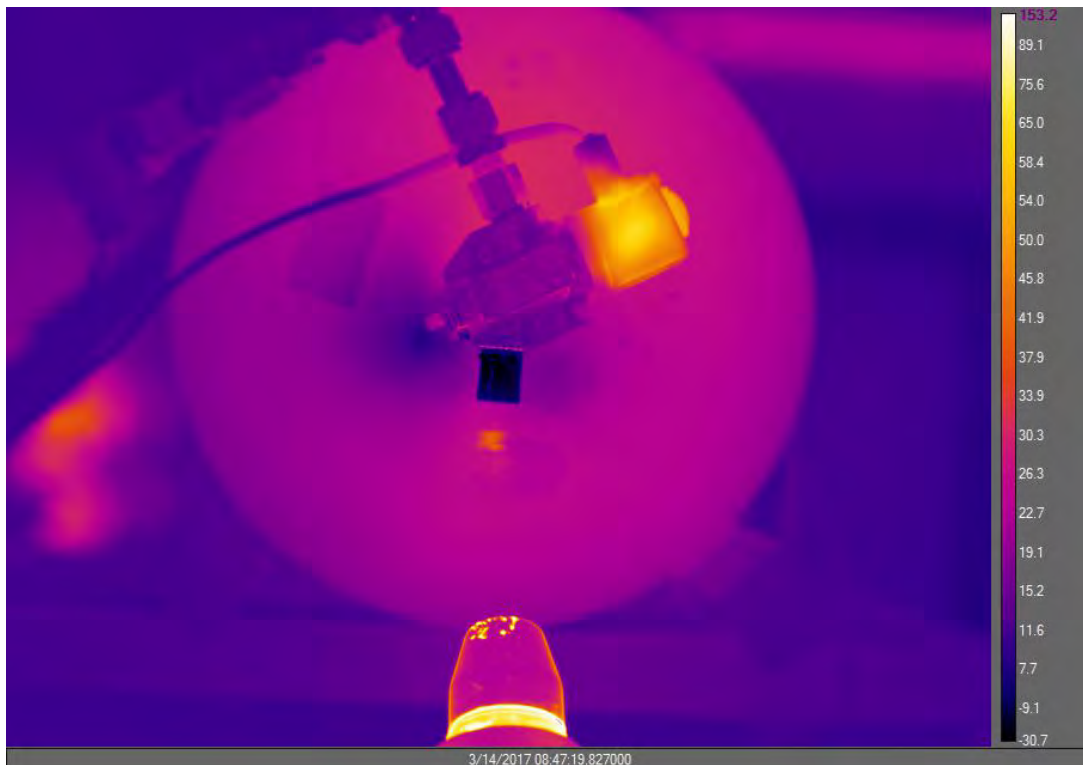


(b) Bezrozměrný pokles hmotnosti.

Obrázek 2.15: Bezrozměrný pokles tlaku a hmotnosti v čase při výtoku plynu z nádoby při počátečním tlaku 200 bar přes nevytavenou tepelnou pojistku pro různé způsoby zahřívání solenoidového ventilu a porovnání výtoku přes plně otevřený TPRD.



(a) Před zahájením výtoku plynu - na tepelné pojistce je vidět kov vytékající z jednoho otvoru pro výtok plynu.



(b) Po zahájení výtoku plynu.

Obrázek 2.16: Povrchová teplota solenoidového ventilu a tepelné pojistky těsně před a po výtoku plynu. Snímky od sebe dělí přibližně 60 sekund.

2.3.2 Metan

Experimenty s metanem byly provedeny ze dvou důvodů. Prvním důvodem bylo zjistit, zda bude obdobně jako u vzduchu docházet k zatuhnutí tavného kovu v těle pojistky před tím, než všechny vyteče i v případě, že unikající plyn je metan, který ihned po úniku zahoří a přispívá tak k udržení vyšší teploty okolí. Druhým důvodem bylo zjistit, zda dochází k vytvoření viditelného proudu hořícího plynu - tzv. jet fires - a to jak v případě výtoku metanu do volného prostranství, tak v případě, že je láhev obklopena pevnými překážkami, jako je tomu ve skutečném vozidle. Výsledky experimentů byly zpracovány do příspěvku na zahraniční konferenci FIVE 2018 [9].

Byly vytvořeny dva scénáře: žhář a požár rozlité kapaliny. Scénář žhář má napodobit situaci, kdy by ke spuštění tepelné pojistky měl vést pouze malý lokální zdroj (v tomto případě plechovka s heptanem), umístěný přímo pod solenoidový ventil tlakové láhve. Scénář požár rozlité kapaliny napodobuje situaci, kdy dojde k požáru vozidla a pod vozidlem dochází k hoření ukapávajících plastů a benzínu vytékajícího z nádrže.

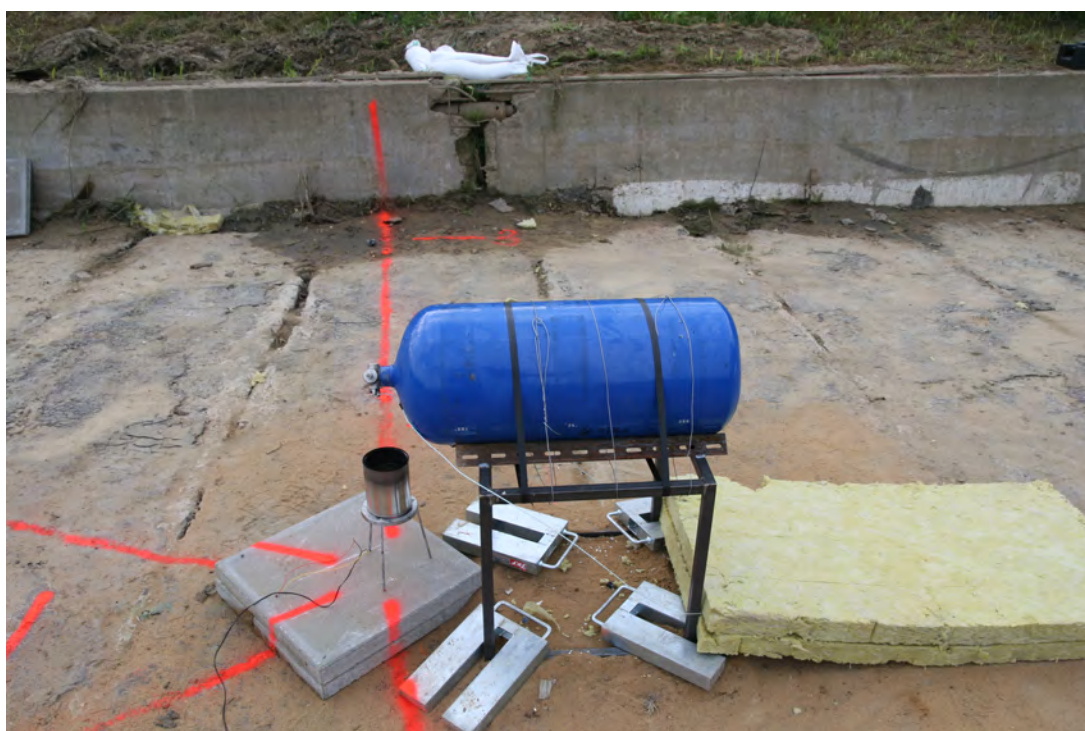
Žhář - výtok metanu do volného prostoru

Jedna plná láhev byla uchycena na kovový stojan a natočena tak, aby tepelná pojistka směřovala přímo dolů. Plechovka o průměru 12 cm se 138 g heptanu byla umístěna přímo pod solenoidový ventil. Do plechovky byla nalitá voda v takovém množství, aby po dolití heptanem byla hladina těsně pod okrajem plechovky. Horní okraj plechovky byl 20 cm pod spodním okrajem tepelné pojistky (Obr. 2.17). 20 cm je vzdálenost plechovky postavené na zem od solenoidového ventilu v originální zástavbě lahví ve vozidle (po odejmutí ochranného plastového krytu).

Na bezpečnostní pojistku byly nalepené dva termočlánky typu K a měřena povrchová teplota těla bezpečnostní pojistky. Dále byl pořízen video záznam, záznam termovizní kamerou snímající láhev z boku, a záznam dronem.

V tomto experimentálním uspořádání nebylo dosaženo dostatečně vysokých teplot v okolí solenoidového ventilu, aby došlo k aktivaci tepelné pojistky a metan z tlakové nádoby neušel. Heptan v plechovce vyhořel za 12 minut a 15 sekund. Tlaková láhev se nechala vychladnout a experiment byl ještě jednou zopakován. Plechovka se 150 g heptanu (a vodou stejně jako v předchozím případě) byla umístěna 8 cm pod tepelnou pojistku a láhev byla ze dvou stran obložena minerální vatou (Obr. 2.18). Opět byla měřena teplota těla tepelné pojistky a byl pořízen záznam video kamerou, termovizní kamerou a dronem. V tomto uspořádání došlo k aktivaci tepelné pojistky a plyn z nádoby kontrolovaně unikl.

Výtok plynu nastal 194 sekund od zapálení heptanu. Doba výtoku plynu do vyprázdnění celého zásobníku byla 275 sekund. Metan hořel okem neviditelným plamenem, ale ze snímků pořízených termokamerou lze jasně vidět vytvořené tryskové proudy - jety. Dva z otvorů pojistky směřovaly do nádoby, proud plynu se o nádobu rozbíjel a vytvářel hořící mrak. Jeden z otvorů mířil přímo před nádobu a z něho bylo vidět v maximu přibližně dvoumetrový jet. K hoření docházelo přibližně 30 cm od výtokového otvoru, kde již byl vytékající metan naředěn okolním vzduchem pod horní mez hořlavosti. Jet nebyl pozorován po celou dobu výtoku, objevoval se a mizel bez zjevné vnější příčiny. Je možné, že výtok plynu nebyl rovnoměrný ze všech otvorů, a/nebo byla koncentrace metanu příliš vysoká, aby došlo k jeho zahoření. Hoření z ostatních otvorů pojistky bylo pozorováno po celou dobu výtoku ale s proměnnou intenzitou. Při rozbití proudu plynu dochází k intenzivnímu míchání a je větší pravděpodobnost, že koncentrace metanu blíž k PRDu bude v mezích hořlavosti. Teplota naměřená dvěma termočlánky nalepenými přímo na tepelné pojistce je na Obr. 2.19. Obě křivky kopírují obdobný trend. Teploty naměřené termočlánkem číslo 2 (modrá křivka s trojúhelníkovými body) více oscilují. Termočlánek pravděpodobně nebyl v dokonalém kontaktu s povrchem a měřil spíše teplotu okolního plynu. Na této křivce je vidět výrazný pokles teploty po zahájení výtoku díky probíhající expanzi plynu.

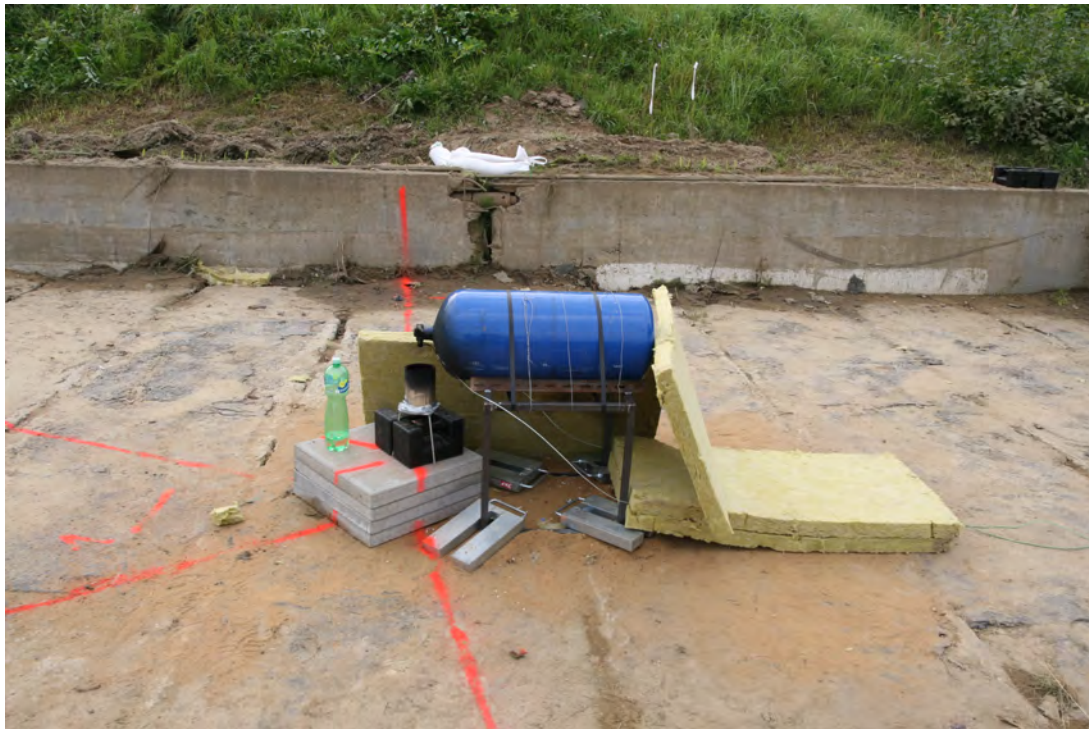


(a) Celkový pohled



(b) Detail uchycení dvou termočlánků na pojistce tepelně vodivým tmelem

Obrázek 2.17: Scénář zhář - výtok metanu do volného prostoru, iniciace plechovka se 138 g heptanu, horní okraj plechovky je 20 cm od spodní hrany tepelné pojistky.



(a) Celkový pohled

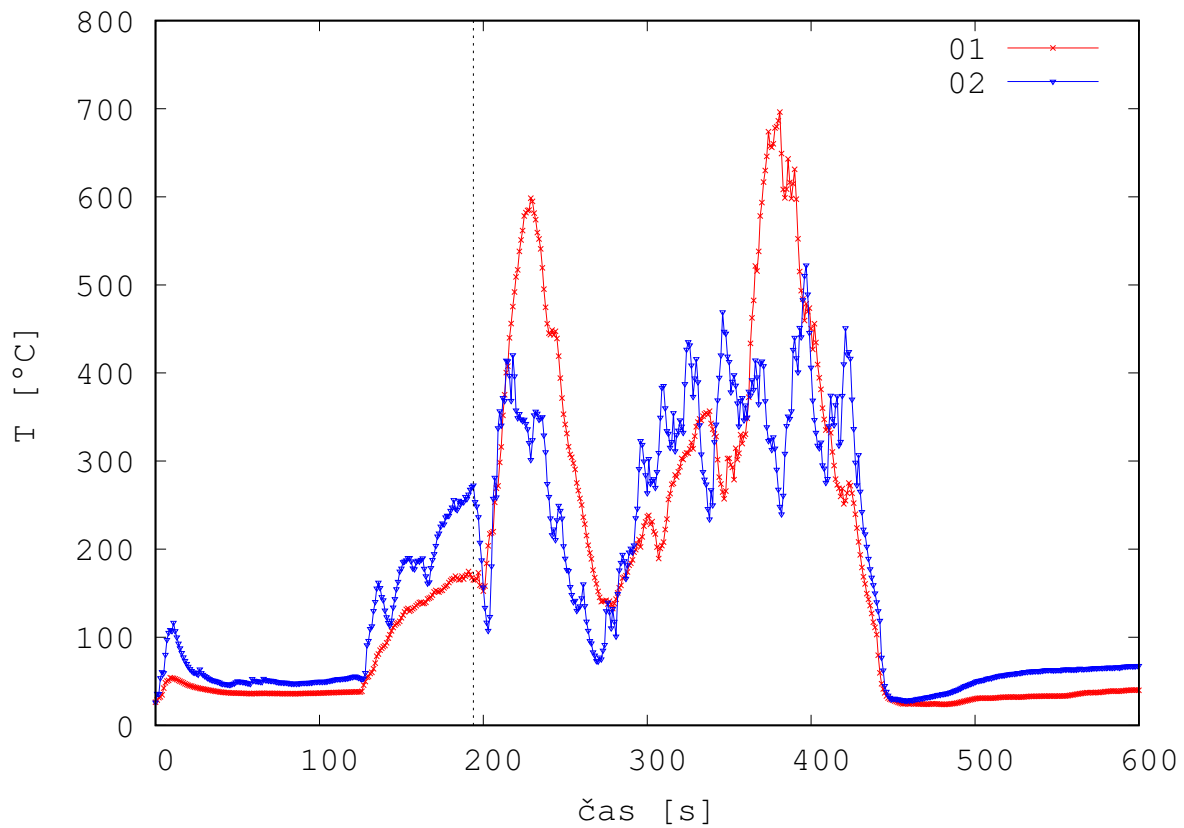


(b) Pohled z přední strany

Obrázek 2.18: Scénář žhář - výtok metanu do volného prostoru, iniciace plechovka se 150 g heptanu. Horní okraj plechovky je 8 cm od spodní hrany tepelné pojistky.

Tento pokles není zaznamenán na křivce z termočlánku číslo 1 (červená křivka s křížky). Ihned po zahájení výtoku došlo k zahoření plynu a uvolnění velkého množství tepla, které vyrovnalo odběr tepla z okolí při expanzi plynu a naměřená teplota začíná narůstat. Na křivce teploty jsou dále dva výrazné píky, které jsou pravděpodobně dány pozorovanou změnou intenzity výtoku plynu a tedy i hoření.

Po zkoušce byla tepelná pojistka rozebrána a bylo v ní objeveno relativně velké množství nevyteklého tavného kovu. To ukazuje, že tepelná pojistka nebyla plně otevřena a nebylo tedy dosaženo maximálního hmotnostního toku plynu.



Obrázek 2.19: Teplota naměřená na PRDu při experimentu s výtokem a zahořením metanu scénář - žhář, volný výtok. Vodorovná čára značí počátek výtoku plynu.



(a) Scénář zhář - výtok metanu do volného prostoru.



(b) Scénář - požár rozlité kapaliny.

Obrázek 2.20: Vnitřek tepelné pojistky po experimentu.

Žhář - výtok metanu ohraničený konstrukcí

Dvě láhve byly umístěny do kovového držáku, ve kterém jsou uchyceny v originální vestavbě. Tzv. přední láhev, tedy láhev, která je v originální vestavbě blíže k nápravě, byla prázdná, zadní láhev, tedy ta blíže zadku vozidla, byla plná a měla na sobě namontovaný originální solenoidový ventil s tepelnou pojistkou. Láhve v držáku byly ze shora zakrytovány, aby bylo co nejlépe napodobeno jejich uložení v podvozkové části s důrazem na napodobení ohraničujících konstrukčních částí vozidla (Obr. 2.21b). Na straně konstrukce, kde jsou umístěny hlavy lahví s ventily a dále podél delší hrany lahví, byl umístěn boční a zadní kryt, který napodoboval boční a zadní část karosérie vozidla. Jeho spodní hrana byla přibližně 22 cm nad zemí.

Pod solenoidový ventil plně láhve byla umístěna plechovka se 180 g heptanu, což odpovídá tepelnému výkonu přibližně 450 kW (Při výpočtu uvažujeme efektivitu spalování rovnu jedné, výhřevnost metanu 48 MJ/kg. Hmotnostní úbytek heptanu při hoření z plechovky byl změřen.). Hoření heptanu tedy nijak výrazně nepřispívá k intenzitě hoření plynu. Vzdálenost horního okraje plechovky od spodní hrany tepelné pojistky byla přibližně 8 cm. Tepelná pojistka stejně jako v originální vestavbě směřovala šikmo dolů (Obr. 2.21c). Na tepelné pojistce byly tepelně vodivým tmelem připevněny dva termočlánky typu K. Kolem konstrukce byly ve dvou směrech, které odpovídaly směru výtoku plynu z otvorů v pojistce přímo dozadu a šikmo dozadu za automobil, ve vzdálenosti 1 metr od ventilu a dále v pravidelných rozestupech 20 cm, umístěny tyčky, aby bylo možno určit, jak daleko dosahovaly plameny (Obr. 2.21a). Byl pořízen záznam termokamerou, videokamerou a dronem.

Po otevření pojistky došlo k okamžitému zahoření unikajícího plynu. Nebyl ale pozorován žádný jet. Unikající plyn se rozbíjel o konstrukci obklopující láhve a díky intenzivnímu míchání ztrácel velkou část své hybnosti. Plyn hořící z pod konstrukce na straně, kde byly umístěny pojistky měl ale viditelně stále vysokou rychlost a byl směrově ohraničený. Na odvrácené straně od tepelných pojistek se vytvořil hořlavý mrak. Plameny nesahaly dál než jeden metr do okolí konstrukce. S narůstajícím časem viditelně klesala intenzita výtoku plynu a hoření. V čase 290 sekund po zapálení heptanu došlo k výraznému nárůstu intenzity hoření. To mohlo být způsobeno pouze zvětšením výtokové plochy v důsledku povolení zbytků tavného kovu. Do této doby tedy nebylo dosaženo maximální možné intenzity hmotnostního toku plynu přes tepelnou pojistku. Zároveň byl v tuto dobu tlak v nádobě již výrazně nižší než na počátku. Pokud by výtoková cesta pro plyn byla plně otevřena již od počátku, intenzita hoření by byla výrazně větší a plameny by pokrývaly větší plochu. Zároveň ale postupně během experimentu vytekl z pojistky všechn tavný kov. Po experimentu bylo v pojistce nalezeno jen zanedbatelné množství tavného kovu. Povrchová



(a)

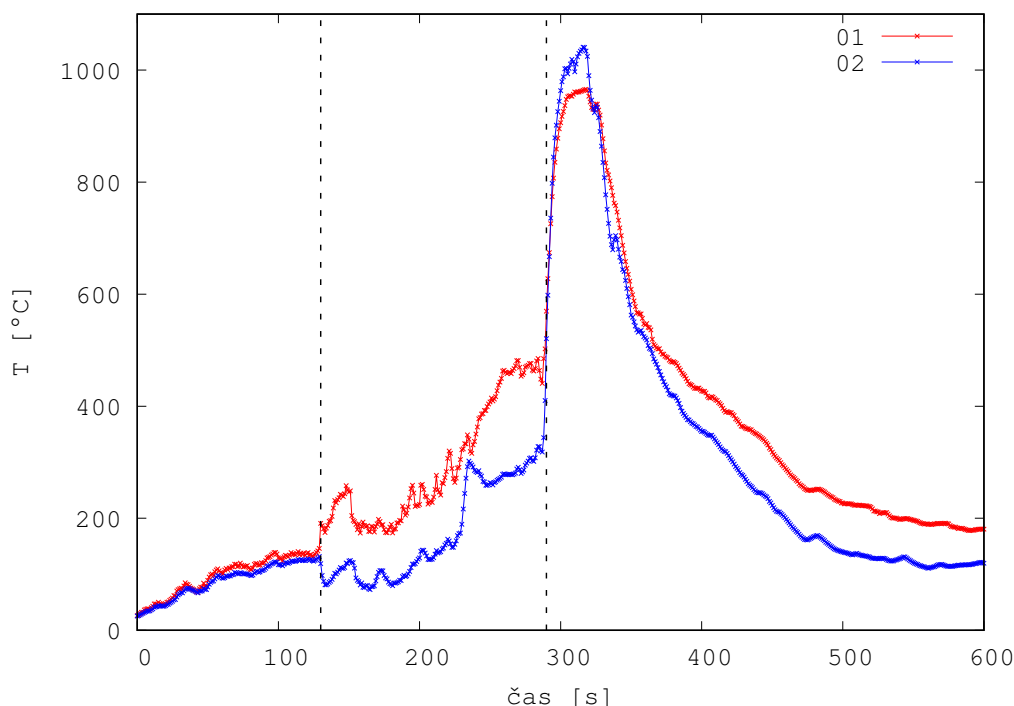


(b)



(c)

Obrázek 2.21: Scénář žhář - výtok metanu v ohraničující konstrukci, iniciace plechovka se 180 g heptanu. Horní okraj plechovky je 8 cm od spodní hrany tepelné pojistky.



Obrázek 2.22: Teplota naměřená na tepelné pojistce (TPRD) při experimentu s výtokem a zahořením metanu scénář - žhář, výtok ohraničený konstrukcí.

teplota naměřená na tepelné pojistce je na Obr. 2.22. Po zapálení heptanu teplota postupně rostla až do času 130 sekund, kdy došlo k otevření pojistky. Jeden z termočlánků následně ukazuje pokles teploty, druhý nárůst teploty. To je zřejmě stejně jako v předchozím případě způsobeno nedokonalým kontaktem termočlánku s tělem pojistky. Nárůst teploty odpovídá zahoření plynu a tedy nárůstu teploty prostředí. Téměř skokový nárůst teploty o víc jak 300 °C byl naměřen po náhlém zvýšení intenzity výtoku plynu. V porovnání s volným výtokem byly naměřeny celkově nižší teploty.

Požár rozlité kapaliny pod tlakovými láhvemi

Stejná konstrukce a stejného způsobu uchycení lahví jako pro scénář žhář - výtok metanu ohraničený konstrukcí bylo využito i v tomto experimentu. Iniciačním zdrojem bylo 7 litrů heptanu rozlitého ve vaně o rozměrech 90×60 cm. Celkový tepelný výkon heptanu byl vypočten na přibližně 750 kW. Hoření heptanu přispívalo k celkové intenzitě hoření. Heptan viditelně hořel i po konci úniku plynu. Vana byla umístěna do středu pod tlakové láhve (Obr. 2.23). Ve dvou směrech byly stejně jako v předchozím případě zapíchány bambusové tyčky, které sloužili jako prostorové měřítko. Opět byla měřena teplota těla tepelné pojistky a byl pořízen video záznam, záznam termokamerou a dronem.

Pozorovaný průběh hoření byl obdobný jako v předchozím experimentu, ale intenzita hoření byla celkově výrazně větší, ačkoliv bylo použito stejné množství plynu. Unikající hořící plyn bylo možné od hořícího heptanu rozeznat, protože plameny měly větší rychlost. Plameny dosahovaly až k hranici tří metrů kolem konstrukce. Opět nebyl pozorován žádný jet. V čase 153 sekund od zapálení heptanu bylo pozorováno náhlé zvýšení intenzity výtoku. Nárůst je vidět i na naměřené teplotě na tepelné pojistce (Obr. 2.24). Po ukončení zkoušky byla pojistka rozebrána. Nebyly v ní nalezeny žádné zbytky tavného kovu, ale bylo zjištěno, že píst pojistky, který zapadne do těla

pojistky a uvolí tak otvory pro výtok plynu, byl v těle pojistky lehce vzpříčený (Obr.2.20). Nedo-
konalé dosednutí pístu do těla pojistky mohlo způsobit nerovnoměrnou distribuci výtoku plynu
z šesti otvorů. Otvory pojistky ale nebyly během experimentu vidět, protože byly obklopeny
konstrukcí.

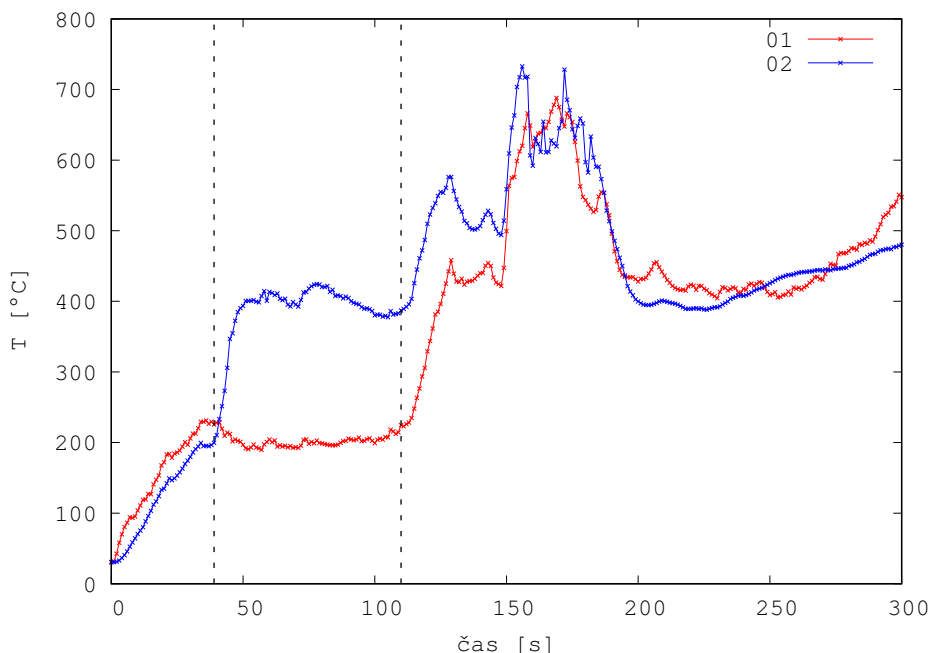


(a) Celkový pohled



(b) Pohled na vana a tlakové láhve v držáku

Obrázek 2.23: Uspořádání zkoušky s výtokem a zahořením metanu scénář - požár rozlité kapaliny
pod tlakovými zásobníky.



Obrázek 2.24: Teplota naměřená na tepelné pojistce (TPRD) při experimentu s výtokem a zahříváním metanu scénář - požár rozlité kapaliny.

2.4 Lokální ohřev zásobníku

Cílem experimentu bylo sledovat prohřívání tlakové nádoby při působení lokálního tepelného zdroje na opačném konci tlakové láhve, než je umístěna tepelná pojistka a zda je možné, aby tak došlo k lokálnímu přehřátí tlakové nádoby bez spuštění tepelné pojistky. Lokální přehřátí je potenciálně velmi nebezpečná situace, protože vede k roztržení tlakové nádoby. Roztržení tlakové nádoby vlivem lokálního přehřátí bylo popsáno v literatuře u autobusů [10].

Tlaková nádoba byla uložena do kovového držáku a zespodu odizolovaná minerální vatou, aby nedocházelo ke ztrátám tepla do konstrukce. Tlaková láhev byla naplněna vzduchem a natlačována na 100 bar. Aby bylo možno experiment ukončit a tlakovou láhev bezpečně vzdáleně otevřít, pokud by došlo k nebezpečnému nárůstu tlaku nad 200 bar, byl použit stejný nástavec jako u experimentů studujících dynamiku výtoku metanu (sekce 2.2.2), kde je nevytavená tepelná pojistka namontovaná na originální pozici solenoidového ventilu, ale také vytavená tepelná pojistka s dálkovým otevíráním.

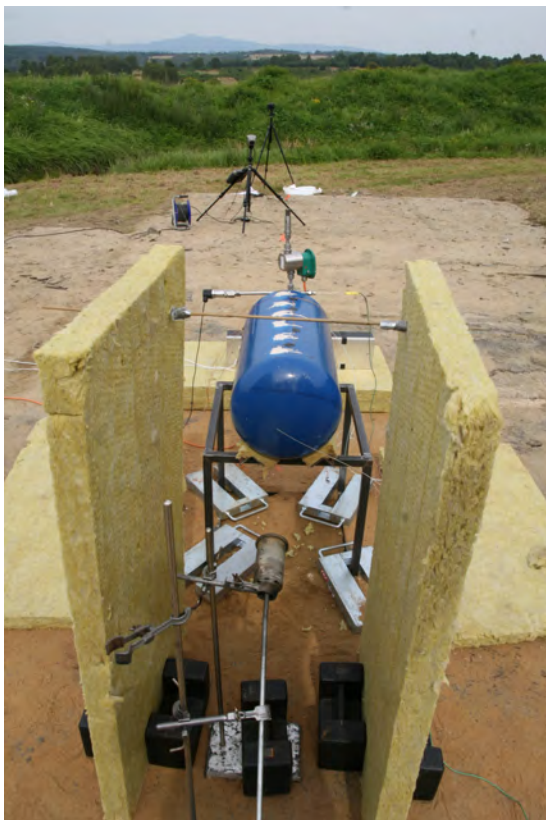
Ze zadu láhve byl uchycen plynový hořák na propanbutan tak, aby plamen směřoval kolmo na střed dna láhve. Průměr hořáku byl 5,5 cm. Experiment byl opakován dvakrát. Při prvním experimentu byl hořák 65 cm od země a ve vzdálenosti 42 cm od láhve. Hořák byl ze stran obložen minerální vatou, aby směr plamene nebyl ovlivňován povětrnostními podmínkami. Průtok propanbutanu hořákem byl 20 l/min, což při výhřevnosti propanbutanu 105 MJ/m^3 odpovídá tepelnému výkonu hořáku 35 kW.

Tlak a teplota plynu v láhvi byly měřeny v nástavci namontovaném na plnicím hrdle. Teplota vzduchu tak nutně nemusí reprezentovat průměrnou hodnotu teploty vzduchu v láhvi. Na nevytavené tepelné pojistce byly nalepené dva termočlánky typu K tepelně vodivým tmelem. Při prvním měření byla teplota těla tepelné pojistky měřena také bezdotykově IČ teploměrem.

Na tělo tlakové láhve bylo nalepeno v pravidelných rozestupech celkem 30 fóliových termočlánků ve čtyřech řadách po šesti (Obr. 2.25a), jedna řada na každý bok.



(a) Láhev na stojanu s nalepenými termočlánky.



(b) Uložení hořáku a jeho obložení sklokeramic-kou vatou.



(c) Stopa po hořáku.

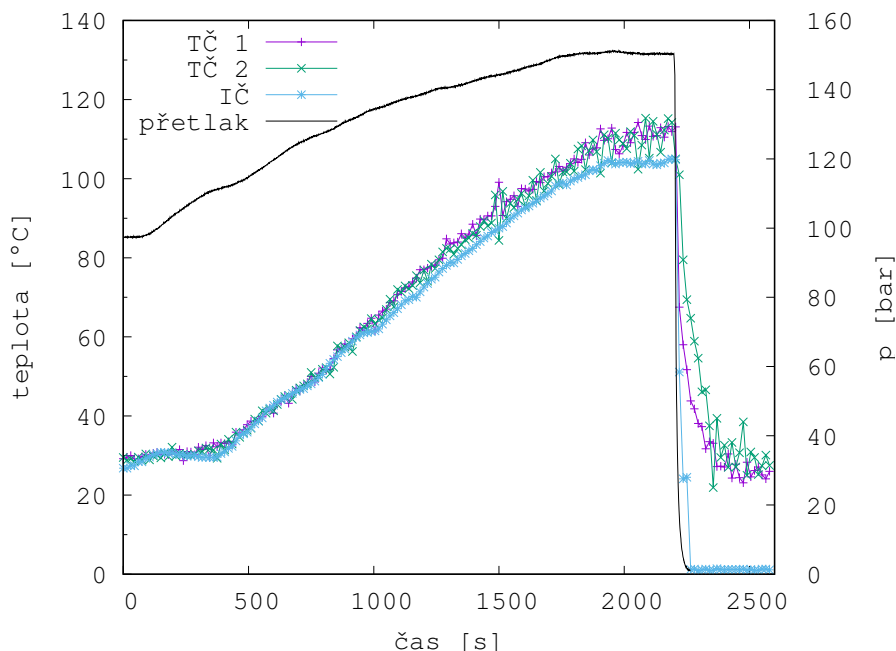
Obrázek 2.25: Lokální ohřev tlakové láhve - experiment A.

Po přilepení byly termočlánky ještě uchyceny tepelně vodivým tmelem. Z boku byl pořízen záznam termokamerou, aby bylo možno sledovat prohřívání nádoby od zadu směrem k tepelné pojistce. Dále byl pořízen videozáznam a záznam dronem. Vzhledem k dlouhému času zkoušky není otevření ventilu na záznamu ani jedné z kamer zachyceno.

Experimentální data a výpočetní model (sekce 3.6) byly zpracovány v rámci diplomové práce Anny Čížinské [11]. První zkouška proběhla úspěšně. Naměřená teplota těla pojistky a tlak v láhvi jsou znázorněny na Obr. 2.26. Z grafu je patrné, že tepelná pojistka se otevře, jak deklaruje výrobce, při teplotě 110 ± 10 °C. Okamžitě po otevření pojistky došlo vlivem adiabatické expanze plynu k prudkému ochlazení ventilu. K otevření tepelné pojistky došlo přibližně po 35 minutách. Za tuto dobu při působení lokálního tepelného zdroje tlak v nádobě narostl ze 100 bar na 150 bar, nepřekročil tedy maximální pracovní tlak 200 bar. Tepelná vodivost vzduchu je o tři řády menší než tepelná vodivost oceli. Teplo se tedy od paty zásobníku směrem k pojistce šíří zejména stěnou tlakové láhve. Naměřená teplota vzduchu v nástavci namontovaném na plnicím hrdle nepřekročila v maximum 50 °C.

Teplota stěny naměřená termočlánky na plášti nádoby neodpovídala realitě. Při hledání příčiny bylo zjištěno, že termočlánky nebyly tmelem od povrchu vodivého pláště nádoby dostatečně izolovány a vzájemně se tak ovlivňovaly. Pro zhodnocení časového a prostorového vývoje teploty pláště byly využity teploty naměřené termokamerou na boku nádoby.

Druhá zkouška byla neúspěšná. Již v průběhu zkoušky bylo vidět, že teplota na tepelné pojistce po přibližně 28 minutách zkoušky už dále nenarůstá a nedosahuje teplot nutných pro její otevření. Experiment byl proto po přibližně 39 minutách ukončen a tepelná pojistka byla otevřena vzdáleně a plyn vypuštěn. Při druhé zkoušce byl výkon hořáku zvýšen o čtvrt otáčky regulačního ventilu hořáku oproti první zkoušce s cílem zvýšit tepelný výkon. Po zkoušce ale bylo zjištěno, že výkon hořáku byl naopak nižší než při první zkoušce, protože v PB láhvi klesl tlak z 2,2 bar na 1,3 bar. Z vytvořené stopy po plameni na zadní části tlakové láhve bylo také vidět, že hořák se posunul a nemířil přímo na střed zadní části tlakové láhve, ale mířil více do horní poloviny láhve a na horní hranu.



Obrázek 2.26: Povrchová teplota tepelné pojistky (TPRD) naměřená termočlánky a bezkontaktně, tlak v láhvi. Začátek experimentu v čase 120 sekund. Upraveno z [11].

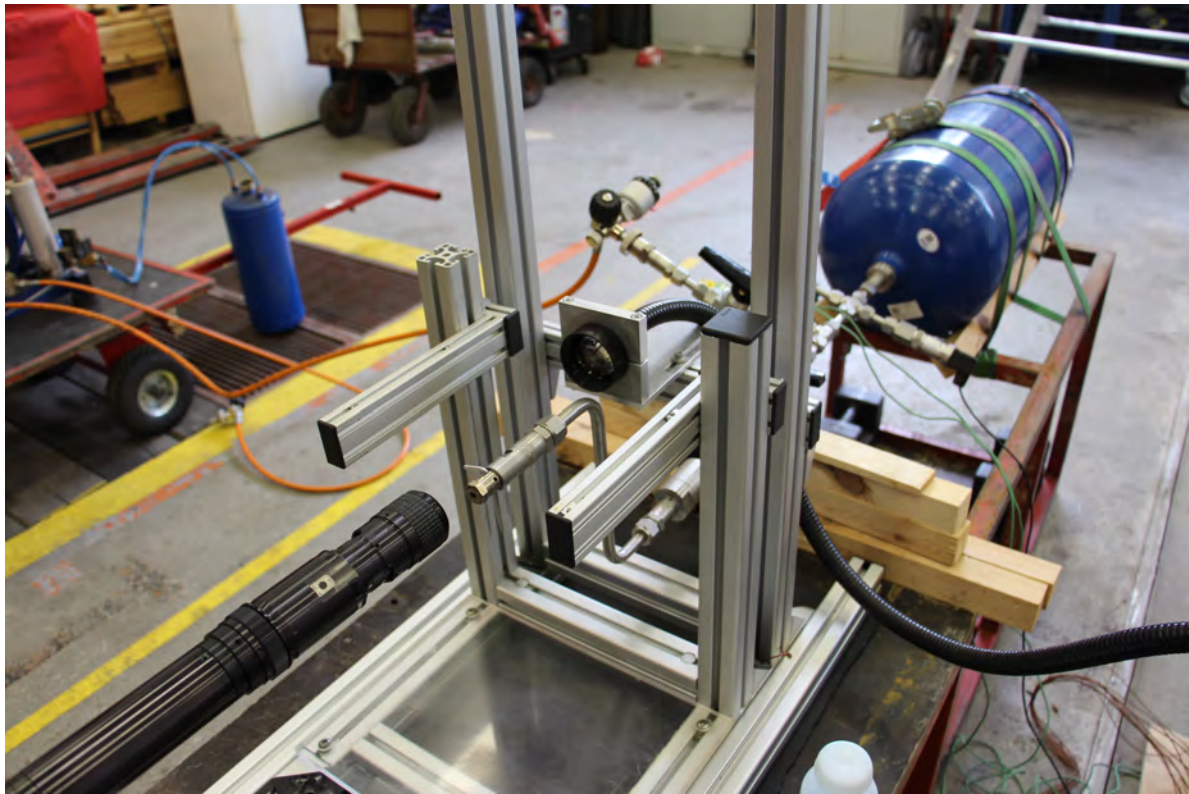
2.5 Rychlost výtoku plynu

2.5.1 Rychlost u výtokového otvoru

Bylo provedeno několik experimentů s cílem orientačně změřit rychlost výtoku plynu z tlakové láhve při maximálním tlaku 200 bar pomocí vysokorychlostní kamery Phototron FASTCAM SA1.1. Na láhev byl namontován nástavec, viz sekce 2.2.1. Na konec nebyl namontován solenoidový ventil, ale prodlužovací kus ve tvaru S, na jehož konec byla přímo namontovaná vytavená tepelná pojistka (Obr. 2.27a). Do těla vytavené pojistky byl umístěn hasební prášek. Tepelná pojistka byla umístěna přímo proti objektivu vysokorychlostní kamery, který byl chráněn kusem plexiskla (Obr. 2.27b). Při mechanickém otevření uzavíracího ventil dojde k výtoku plynu, který s sebou unáší částice hasebního prášku. Při znalosti měřítka a rychlosti snímkování lze z posunu částice mezi dvěma snímky určit její rychlost. Po počátečních testech pro správné nastavení osvětlení, rychlosti snímkování a závěrky byl proveden záznam čtyř experimentů - třikrát s počátečním tlakem 200 bar a jedenkrát s počátečním tlakem 170 bar. Rychlost snímkování byla 20000 fps a závěrka 1/95000 s.

Na záznamu vysokorychlostní kamery byl jasně viditelný výtok částic jedním z výtokových otvorů v těle pojistky. Vyhodnocení rychlosti pohybu částic bylo provedeno v softwaru pro počítačovou analýzu obrazu NIS-Elements. Ačkoliv se jedná pouze o orientační hodnotu, maximální naměřená rychlost nepřekročila 40 m/s oproti očekávaným rychlostem v řádech stovek metrů za sekundu. Celková doba záznamu vysokorychlostní kamery nepřekročila jednu sekundu. Doba, po kterou bylo pozorováno uvolňování prášku z těla pojistky, je v řádu setin sekundy. Vysokorychlostní kamerou byl ale také v pozdější sekci záznamu viditelně zachycen Machův disk, který potvrzuje, že se výtoková rychlost pohybuje v oblasti nadkritického proudění. Prášek byl umístěn velmi blízko výtokovému otvoru a z těla pojistky byl pravděpodobně vyfouknout spolu s plynem před tím, než bylo dosaženo výtokové rychlosti v oblasti nadkritického proudění. Přesnou dobu vytvoření Machova disku od otevření výtokové cesty plynu není možné určit, protože záznam nebyl uložen vcelku, ale pouze vybrané části, ale jedná se řádově o setiny sekundy. Pro naměření rychlosti v oblasti nadkritického proudění by bylo prášek třeba dávkovat do proudu plynu až po otevření pojistky, což ale není z technických důvodů možné. Při zpětném přepočtu vzdálenosti, kterou by mezi dvěma snímky musela částice urazit, aby bylo dosaženo výtokové rychlosti 1 Mach s příslušným nastavením vysokorychlostní kamery bylo zjištěno, že by částice uletěla větší vzdálenost, než je zorné pole. Tímto způsobem tedy nejsme schopni ani orientačně výtokovou rychlost plynu změřit.

Na Obr. 2.28 je ukázka vytvořeného Machova disku a jeho přibližná velikost v různých časech záznamu, který trval celkem přibližně 0,025 sekundy. Machův disk v čase záznamu měnil svou velikost i vzdálenost od výtokového otvoru - prodlužoval se a rozšiřoval. Při experimentu nebyl pokles tlaku zaznamenáván. Z předchozích experimentů (viz sekce 2.2.1) ale víme, že pokles tlaku z 200 bar v první sekundě se pohybuje velmi přibližně kolem 10 % tedy 20 bar. V době záznamu Machova disku vysokorychlostní kamerou tak mohlo dojít k poklesu tlaku v řádu desetin baru tedy v desítkách kiloPascalů.

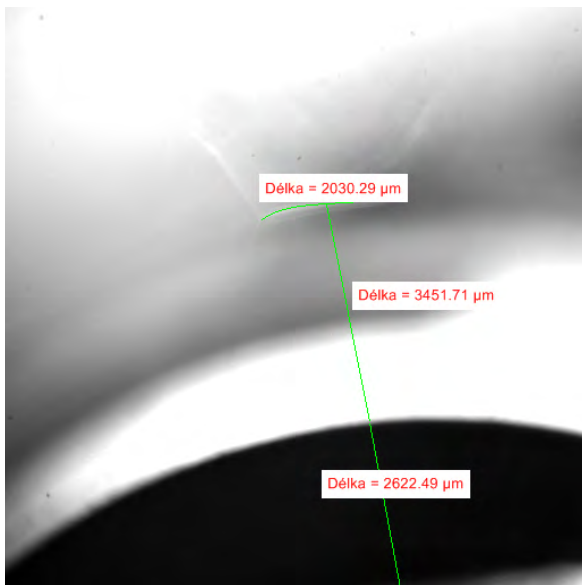


(a) Celkový pohled

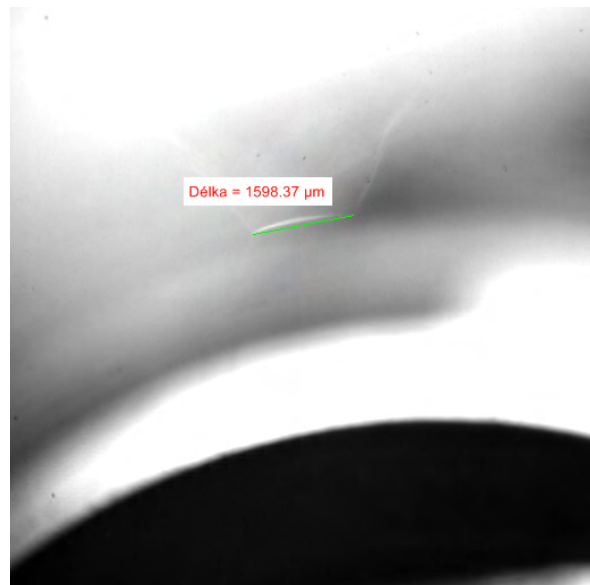


(b) Detail - tepelná pojistka a objektiv vysokorychlostní kamery

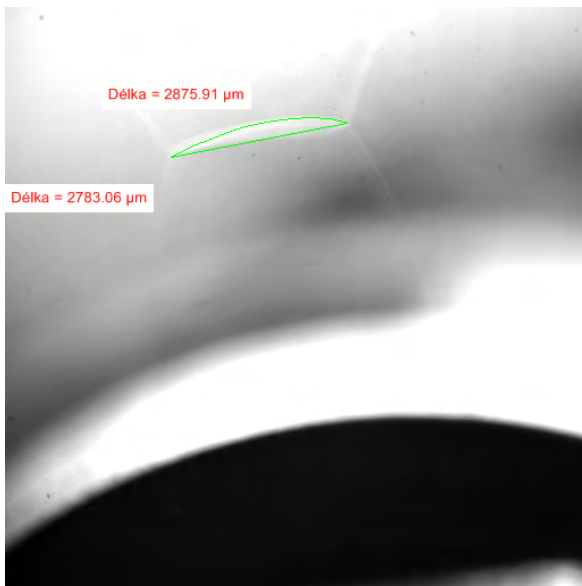
Obrázek 2.27: Experimentální uspořádání pro měření výtokové rychlosti vysokorychlostní kamerou Phototron - FASTCAM SA1.1



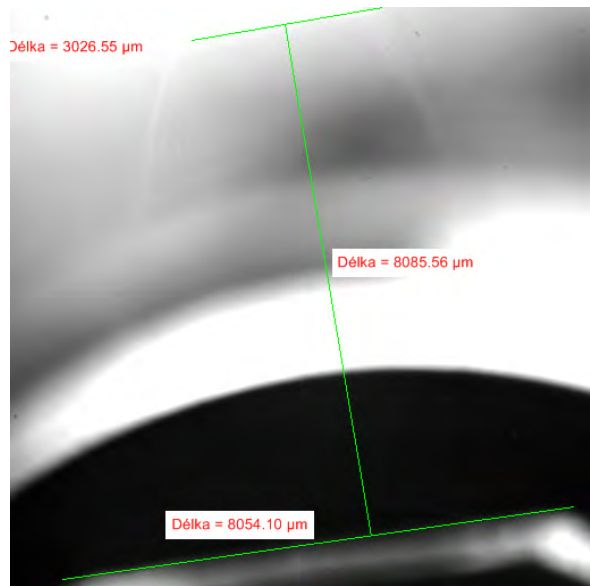
(a) Snímek 160 - přibližně 8 setin sekundy od začátku záznamu Machova disku.



(b) Snímek 181- přibližně 9 setin sekundy od začátku záznamu Machova disku.



(c) Snímek 320 - přibližně 16 setin sekundy od začátku záznamu Machova disku.



(d) Snímek 470 - přibližně 23 setin sekundy od začátku záznamu Machova disku.

Obrázek 2.28: Machův disk - počáteční tlak 200 bar. Délka záznamu přibližně 0,025 s. 20000 fps, závěrka 1/95000 s.

2.5.2 Vizualizace směru proudění, rychlost proudění plynu na hranici automobilu

Experimenty byly provedeny na pracovišti Ústavu hydrodynamiky Akademie věd ČR, detailní popis měření a výsledky jsou uvedeny ve zprávě v příloze C.

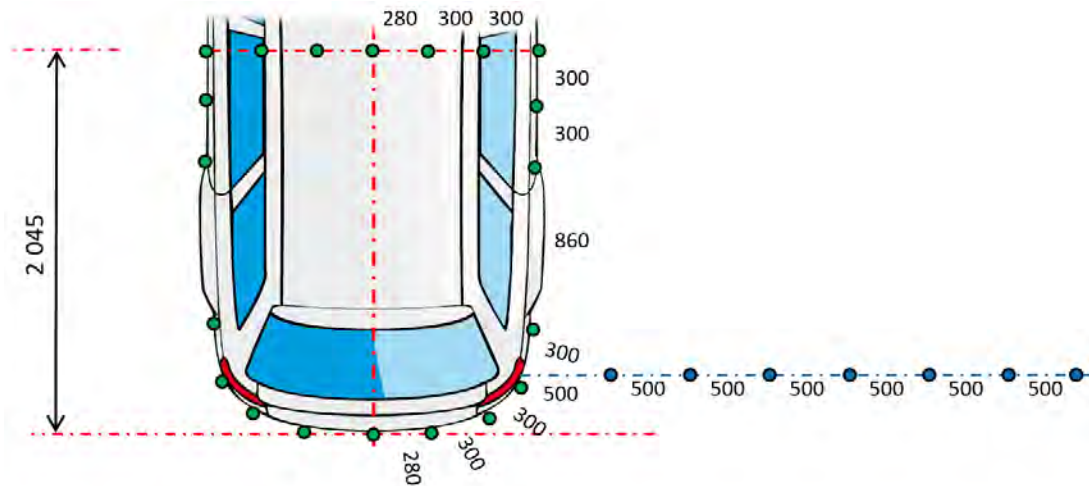
Všechna měření probíhala v následujícím uspořádání. Vozidlo bylo vyzdviženo do výšky 90 cm, pod vozidlo byla umístěna polykarbonátová deska, která napodobovala vozovku. Tlakové láhve pod vozidlem byly prázdné, tlakový vzduch byl do multifunkčního ventilu a tepelné pojistky na obou lahvích přiváděn ze dvou zásobních lahví vedle vozidla na boku. Zásobní láhve byly napojeny na kompresor. Tlakové vedení mezi zásobními lahvemi a lahvemi pod vozidlem vedlo ve dvou samostatných větvích, jedno pro každou láhev a bylo osazeno kulovým otevíracím ventilem, jehlovými regulačními armaturami a absolutními tlakoměry, aby bylo možno větev manuálně otevřít a tím ovládat výtok plynu přes tepelnou pojistku a byl znám skutečný tlak ve větvi.

Nejprve byla provedena studie na zmapování směrů proudění vzduchu pod vozidlem a v jeho okolí. Pro získání prvotní představy byl proveden bavlnkový test ve všech místech po obvodu vozidla. Byla odhalena místa, kde dochází ke změně směru proudění, zejména v oblasti levého zadního kola. Na základě informací z bavlnkového testu, pak bylo navrženo experimentální uspořádání pro kouřovou vizualizaci proudění v okolí zadní části vozu a pod vozidlem. Kouř byl do proudového pole přiváděn ohebnou trubicou pro vzduchotechniku. Bavlnkový test i kouřová vizualizace byly zaznamenány na kameru. Bylo zjištěno, že plyn po otevření ventilů neuniká směrem od automobilu v celém obvodu, jak bylo původně očekáváno. Po otevření ventilů se kolem lahví vytvoří vír, který nasává okolní vzduch ze zadní části automobilu a vytlačuje jej do stran a do přední části pod vozidlem, jak je ukázáno na Obr.2.29.

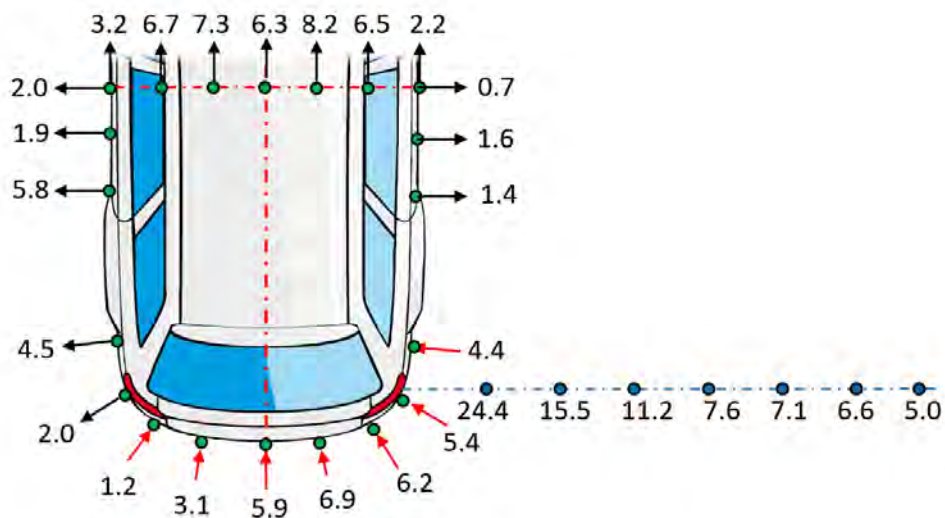
Na Obrázku 2.30a jsou ukázána místa, kde byla bodově měřena rychlost proudění kolem vozidla a v oblasti jetu, který se tvoří za pravým zadním kolem. Na obrázku 2.30b je pak ve stejných bodech uvedena rychlost proudění v m/s. Pro měření bodové rychlosti byly testovány dvě metody - pěti otvorová tlaková sonda a anemometrická metoda HWA (Hot wire anemometry,



Obrázek 2.29: Kouřová vizualizace proudění za autem a kolem tlakových nádrží.



(a) Body, ve kterých byla měřena rychlost. Čísla uvádějí vzdálenost mezi jednotlivými body v milimetrech. Výška měřících bodů nad zemí je 80 mm.



(b) Směry proudění a rychlost proudění po obvodu zadní části vozidla a rychlost proudění jetu za pravým zadním kolem v m/s.

Obrázek 2.30: Rychlostní pole kolem vozidla.

CTA - Constant Temperature Anemometry) žhaveného drátku. Metoda CTA byla vyhodnocena jako vhodnější.

Měření rychlosti probíhalo za současného snímání průběhu tlaku v potrubí. Výsledná hodnota tlaku a rychlosti byla získána jako průměr hodnot za měřené časové období. Při měření bylo třeba vždy vyčkat, až bude senzor teplotně stabilizovaný. Po otevření ventilu totiž dojde k ochlazení sondy a měření je tímto zkreslené, protože sonda kompenzuje signál tak, aby obtékání senzoru probíhalo za konstantní teploty. Doba na měření se volila tak, aby se při snímání rychlosti dosáhlo ustáleného stavu záznamu pod dobu dvou až tří sekund.

Při interpretaci rychlostního pole je třeba si uvědomit, že rychlost nebyla měřena ve všech bodech vždy za stejného tlaku. Kapacita dvou zásobních nádrží je při plném otevření systému vyčerpána za přibližně 60 sekund, během nichž dojde k poklesu tlaku v zásobnících z 200 na 20 bar. Naplnění zásobníků trvá 6 až 8 hodin. Rychlost byla proto měřena postupně při vypouštění zásobníků v rozmezí 200 až 140 bar. I přesto, že nelze přímo porovnávat rychlosti v jednotlivých

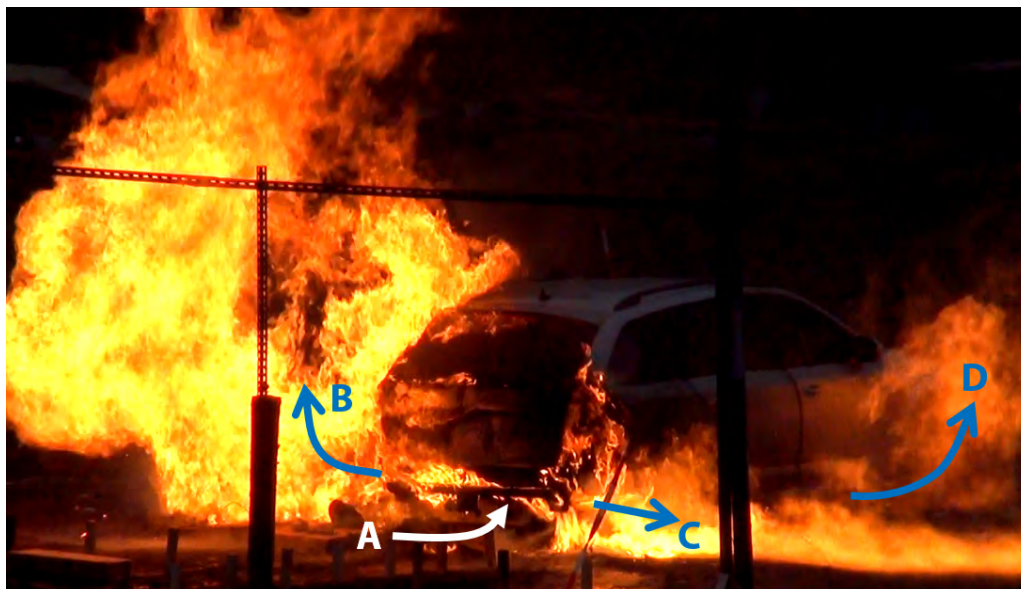
měřených bodech kolem vozidla, ukazují naměřené hodnoty jasně, že rychlost proudění plynu je v řádech jednotek metrů za sekundu a jasně identifikuje směr proudění. Na základě naměřených dat lze určit okrajovou rychlostní podmínku na hranici vozidla pro matematické modelování.

Za pravým zadním kolem jedna z trysek pojistného ventilu směřovala přímo do boku vozidla. Výtok plynu tak nebyl ničím omezen a za pravým kolem vzniká tryskové proudění - jet. Rychlost proudění v různé vzdálenosti od boku vozidla byla měřena v ose jetu až do vzdálenosti 3,5 metru. Stejně jako v bodech kolem vozidla, byla rychlost měřena za různého tlaku, který klesal od přibližně 230 barů do 125 barů. Rychlost proudění podél osy jetu uvedená na Obr. 2.30b je extrapolovaná hodnota pro konstantní tlak v multifunkčním ventilu 150 bar.

Spálení dvou CNG vozidel

V roce 2014 v rámci činnosti oddělení Požárně technické expertízy Technického ústavu požární ochrany ve spolupráci se Škoda Auto Mladá Boleslav byly realizovány modelové zkoušky hoření aut za účelem dokumentace vzniku stop šíření požáru. V rámci těchto zkoušek byly spáleny i dvě osobní vozidla na CNG o totožném konstrukčním řešení CNG palivového systému, které bylo studováno v této práci. Z videozáznamu zkoušky víme, že v okolí automobilu jet vznikl až v době, kdy odhořel boční nárazník nebo když došlo k deformaci karoserie vlivem požáru. Aby se jet vůbec vyvinul a mohla být změřena rychlost proudění plynu v oblasti jetu, byl při pokusech vizualizace a měření rychlosti proudění v oblasti jetu nárazník odstraněn.

Videozáznam ze zkoušek dále sloužil pro validaci zjištěných směrů proudění hořícího plynu a pro validaci výpočetních modelů v sekci 3.5.1. Na Obr. 2.31 lze jasně vidět čtyři směry proudění plynu, respektive hořící plyn. V zadní části vozu dochází k nasávání okolního vzduchu (proud A). Díky intenzivnímu promíchávání metanu a vzduchu již velmi blízko nádrží, dochází k zahoření již pod automobilem. V levé zadní části vozu, tedy na straně odvrácené od pojistných ventilů vzniká hořlavý mrak (proud B). Na straně pojistných ventilů se objevuje jet (proud C). Hořící plyn se pak pohybuje směrem pod automobilem a vystupuje v oblasti předního kola (proud D). Toto chování velmi dobře odpovídá chování proudění v oblasti nádrží a v bezprostřední blízkosti automobilu, které bylo zjištěno zkouškami vizualizace směru proudění.



Obrázek 2.31: Snímek z požáru CNG vozidla po zahájení úniku metanu z palivové nádrže přes tepelnou pojistku.

2.6 Rešerše - hmotnostní průtok, velikost výtokového otvoru, výtoková rychlost

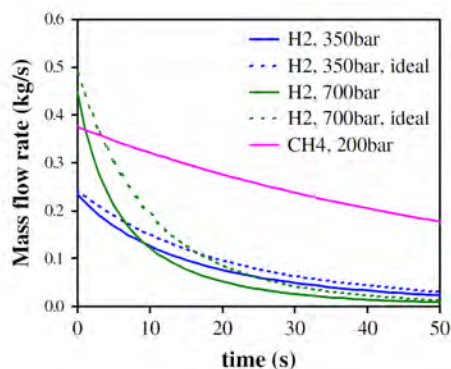
Hmotnostní tok plynu, velikost výtokového otvoru a rychlost výtoku plynu z vozidla do domény jsou základními vstupy do modelu disperze plynu do okolí vozidla. V této sekci jsou shrnuty různé přístupy pro stanovení těchto veličin a skutečně použité hodnoty nalezené v literatuře týkající se problému disperze zemního plynu a vodíku při jeho úniku z vozidla. Vodíkové tlakové láhve pracují při více než třikrát vyšším pracovním tlaku, ale možná místa úniku a principy stanovení okrajových podmínek modelu toku plynu do domény jsou pro oba stlačené plyny stejné.

Midha a Hansen - *CFD simulation study to investigate the risk from hydrogen vehicles in tunnels* [1]

- Únik H_2 a CNG v tunelu z autobusu a osobního automobilu přes TPRD.
- Model úniku a disperze byl vytvořen v programu FLACS.
- Výtoková rychlost - autoři předpokládají, že výtoková rychlost je kritická ($Ma = 1$).
- Časově závislá rychlost hmotnostního úbytku byla spočítána pro tyto údaje: 4 mm výtokový otvor při výtoku H_2 a 6 mm výtokový otvor pro výtok CNG. Výtokový koeficient byl zvolen 0,8. Autoři neuvádějí výpočetní vztahy, podle kterých profily spočítaly, pouze upozorňují, že stavová rovnice ideálního plynu není vhodná a použili stavovou rovnici Noble-Abel.
- Vypočtené profily byly použity jako okrajová podmínka na výtokový otvor, jehož ekvivalentní průměr byl vypočten s využitím vestavěné funkce softwaru FLACS, který počítá ekvivalentní průměr výtokového otvoru za předpokladu isentropického toku otvorem, při kterém dochází k tvorbě kolmé (přímé) rázové vlny a expanzi plynu do okolní atmosféry. Přepočtenou velikost otvoru ani výpočetní vztahy autoři neuvádí.
- H_2 autobus - 5 kg/nádoba, 350 bar, 2x4 nádoby
- H_2 automobil - 5kg/nádoba, 700 bar, 1 nádoba
- CNG autobus - 26 kg/nádoba, 200 bar, 4 nádoby
- CNG automobil 26 kg/nádoba, 200 bar, 1 nádoba

Table 1 – Release scenarios considered for the risk study.				
Vehicle	Inventory (Duration)	Initial release rate, C = constant, V = variable	Orifice	Relative probability
Car LH ₂	10 kg (900 s)	11 g/s C	20 mm	0.375
Car CGH ₂ 700 bar (vent up)	5 kg (84 s)	448 g/s V	Sonic	0.1875
Car CGH ₂ 700 bar (vent down)	5 kg (84 s)	448 g/s V	Sonic	0.1875
Bus CGH ₂ 350 bar	5 kg (147 s)	234 g/s V	Sonic	0.125
Bus CGH ₂ 350 bar	20 kg (147 s)	936 g/s V	Sonic	0.125
Bus CNG	26 kg (255 s)	375 g/s V	Sonic	0.125
Bus CNG	104 kg (255 s)	1500 g/s V	Sonic	0.125
Car CNG vent up	26 kg (255 s)	375 g/s V	Sonic	0.375
Car CNG vent down	26 kg (255 s)	375 g/s V	Sonic	0.375

(a) Scénáře úniku



(b) Hmotnostní tok plynu pro dané scénáře

Obrázek 2.32: Scénáře úniku a časově proměnný hmotnostní tok plynu z nádrže - převzato z [1].

Choi et al. - *A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage* [12]

- Únik vodíku v typizované normované garáži, vodík uniká z potrubí blízko nádrže. Byl studován vliv ventilace na disperzi.
- Objemový tok vodíku byl stanoven jako násobek ekvivalentního množství uvolněné energie při úniku benzínu Q dle U.S. FMVSS 301. Autoři uvádí, že tato jednotka bývá používána při studiu úniku vodíku a dalších výbušných plynů. Q bylo stanoveno na 131 l/min. Násobky Q v jednotlivých scénářích se pohybovali mezi 1 až $5Q$.
- Hmotnostní tok vodíku byl konstantní. Autoři neuvádí, jak dlouho výtok trval.
- Výtokový otvor byl čtverec o straně 5 cm. Plocha výtokového otvoru byla zvolena tak, aby když rychlost bude odpovídat stanovenému objemovému průtoku danou plochou, nebyla výtoková rychlost příliš vysoká (z hlediska numerického řešiče). Detaily autoři neuvádí. Jako odůvodnění toho postupu uvádí, že pro zjednodušení předpokládají, že objemový tok plynu má v dlouhodobém hledisku větší vliv na disperzi plynu a vznik výbušné koncentrace v garáži než jeho výtoková rychlost z otvoru. Vychází z předpokladu, že tok původně silně řízený hybností plynu velkou část své hybnosti ztratí ještě pod vozidlem vlivem intenzivního míchání.
- Model byl vytvořen v programu STAR-CCM.

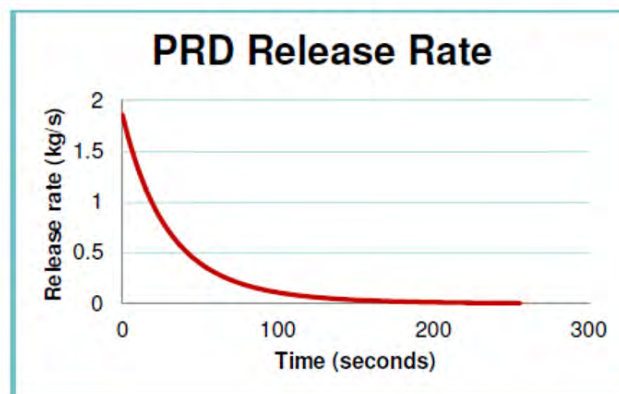
Hernandez et al. - *Safety investigation of CNG leaks in enclosed parking structures: computational fluid dynamics modelling and analysis* [2]

- Studie zabýváající se možnými způsoby úniku CNG z automobilů v osobních garážích a jejich následky.
- Bylo popsáno 5 možných scénářů úniku jak z vysokotlaké, tak z nízkotlaké části palivové soustavy. Modelovány byly pouze 3 scénáře úniku.
- Studie shrnuje, jaká je pravděpodobnost, že daná část CNG palivové soustavy selže, případně sérii selhání, která vede k úniku plynu.
- Jeden ze scénářů uvažuje únik přes tepelnou pojistku, která má 8 mm výtokový otvor. Hmotnostní úbytek plynu v čase byl vypočten z tzv. orifice equations (v příloze jsou uvedeny doplňující informace k dimenzování velikosti výtokového otvoru vzhledem k požadovanému hmotnostnímu toku z pojistky dle příslušných kanadských legislativních předpisů. Ve zprávě ale nejsou uvedeny přímo výpočetní vztahy pro hmotnostní tok. Bude se zřejmě jednat o nějaký isoentropický model). Maximální hmotnostní průtok při tlaku 250 bar je přibližně 1.8 kg/s.
- Pro únik jinde ve vysokotlaké a v nízkotlaké části stanovují autoři ekvivalentní velikost výtokového otvoru, ale neuvádějí jakým způsobem. Uvádí pouze, jakého hmotnostního toku chtějí dosáhnout (viz Obr. 2.33a).
- Autoři neuvádí žádné informace o použitém CFD řešiči a souvisejících nastaveních.
- Studované tlakové zásobníky měly pracovní tlak 250 bar, objem 274 litrů.
- Autoři dále modelovali únik z vodíkové nádrže 689 bar přes tepelnou pojistku s výtokovým otvorem 3,61 mm. Maximální hmotnostní tok plynu otvorem byl 0,8 kg/s.
- Autoři upozorňují na vliv rozdílu vnitřní teploty v garáži a venkovní teploty, který může vyvolávat proudění působící „proti“ disperzi plynu.

Item	Scenario	Pressure	Number of Failures	Component that Fails	Leak Rate
1	Leak on PRD line	Full Tank Pressure	One	PRD	Leak at full pressure with a 8 mm orifice as calculated with orifice equations
2	Leak on High pressure line with the engine running	Full tank pressure	One	1. One of the following: a. Valves b. Filter c. Fuelling Nozzle d. Check Valve e. Pressure Regulator f. High Pressure Lines	Leak with equivalent orifice (1.83 mm orifice) to produce a leak rate of 500 kg/h minus the engine rate of consumption per hour (estimated to be 20,500 ft ³ /h at full pressure).
3	Leak on Low pressure line after the regulator with the engine running	Low pressure line	One	1. One of the following: a. Regulator b. Fuel Rail c. Low Pressure Line	Leak rate equivalent to the maximum fuel flow to the engine (3,460 ft ³ /h). An orifice size of 3.7 mm in a 134 psig line (pressure downstream from the regulator) will leak this amount.
4	Leak on High pressure line with the engine off	Full tank pressure	Two	1. Shutoff Valve 2. One of the following: a. Valves b. Filter c. Fuelling Nozzle d. Check Valve e. Pressure Regulator	Leak rate at full pressure with 1.98 mm orifice as calculated with orifice equations (24,013 ft ³ /h at full pressure).
5	Leak on Low pressure line after the regulator with the engine off.	Low pressure line	Two	1. Shutoff Valve 2. One of the following: a. Regulator b. Fuel Rail c. Low Pressure Line	Leak rate equivalent to the maximum fuel flow to the engine (3,460 ft ³ /h). An orifice size of 3.7 mm in a 134 psig line (pressure downstream from the regulator) will leak this amount.

(a) Možné scénáře úniku

Leak scenario	Leak rate (kg/s)	Duration (s)
High pressure line	0.12	460
Low pressure line	0.02	2,760
PRD	Release curve	About 250



(b) Hmotnostní tok plynu pro dané scénáře.

Obrázek 2.33: Scénáře úniku a hmotnostní tok plynu z nádrže - převzato z [2].

Gardner a Santrock - *Analysis of Reservoir Pressure Decay, Velocity and Concentration fields of Natural Gas Venting from Pressurized Reservoir into the Atmosphere* [13]

- Analýza pravděpodobnosti zahoření plynu při jeho úniku z nízkotlaké části CNG palivové soustavy.
- Porovnání 2D CFD modelu a empirických korelací isoentropického toku otvorem.
- Uvažovaný tlak je 10 bar pro isoentropický model i pro CFD simulaci.
- Velikost únikového otvoru je 0,1 až 2 mm pro isoentropický model, 0,5 mm pro CFD simulaci. Hmotnostní tok vypočtený z isoentropického modelu se pohybuje mezi 0,012 až 4,8 g/s dle velikosti výtokového otvoru.
- Porovnávají model isoentropické expanze ideálního plynu, který nekondenzuje a reálného plynu, který může kondenzovat.
- Pomocí korelací odhadují koncentraci a rychlost podél osy struktury a v normálovém směru ze znalosti výtokové rychlosti vypočtené z isoentropického modelu.
- CFD simulace byla provedena v softwaru Ansys Fluent. Jednalo se o 2D simulaci, protože se předpokládá, že proudová struktura je symetrická dle osy kolmé na rovinu výtoku. Jednalo se o ustálený výpočet proudění stlačitelné tekutiny. Byla využita adaptivní změna hustoty výpočetní sítě.

Pitts et al. - *Dispersion and burning behavior of hydrogen release in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles* [14]

- Studie je pouze experimentální a zabývá se pomalým únikem vodíku do garáží v residenčních objektech. Pomalým únikem je myšlen únik vodíku za regulátorem tlaku v nízkotlaké části palivové soustavy.
- Rychlost úniku plynu je konstantní a vypočtena tak, aby uniklo celkem 5 kg paliva během 1 hodiny (83,3 g/min). Uvádějí, že toto množství odpovídá studiím nalezeným v literatuře pro obdobný typ úniku. Ze stavové rovnice ideálního plynu vypočítali odpovídající objemový průtok do celého objemu garáže při normálním tlaku a 20 °C - 994 l/min.
- V NIST zprávě o předchozích experimentech je řešeno, jak dobře různé CFD modely počítaly koncentrační profily při úniku vodíku. Nezaměřují se na rychlost výtoku, ale na schopnosti CFD modelů simulovat disperzi plynu s dobře definovanou okrajovou podmínkou, kterou lze experimentálně dobře a opakovaně realizovat.

Koutsourakis et al. - *LES modelling of hydrogen release and accumulation within a non-ventilated ambient pressure garage using the ADREA-HF CFD code* [15]

- CFD model disperze plynu v řešiči ADREA-HF.
- Model byl vytvořen dle experimentu, ve kterém byl vytvořen únik vodíku v uzavřeném prostoru představujícím garáž. Experimentální výsledky byly převzaty z jiné práce.
- Velikost výtokového otvoru byla 2 cm, hmotnostní tok byl 1 g/s, doba výtoku 240 s. Autoři nijak nekomentují, proč byly zvoleny tyto hodnoty.

3. Výpočtová část

Výpočtová práce je rozdělena do čtyř částí. První část se zabývá isoentropickým modelem výtoku ideálního plynu malým otvorem, který je využit pro výpočet maximální výtokové rychlosti, poklesu tlaku v zásobníku a výpočet hmotnostního toku plynu ze zásobníku. Rovnice určuje vlastnosti toku (výtokovou rychlost, tlak, teplotu a hustotu plynu), který se vyvine jako důsledek průtoku plynu malým otvorem na základě rozdílu tlaku před a za otvorem. Tato analýza je ale "bezrozměrná". Neposkytuje žádné prostorové informace o fluktuacích těchto veličin jak v podélném směru vzniklé struktury, tak ve směru normálovém na osu vzniklé struktury.

Druhá část popisuje 2D CFD model výtoku ideálního plynu otvorem při konstantním tlaku v zásobníku. Tento model umožňuje studovat expanzi plynu při průchodu výtokovým otvorem pojistky a vzniklou strukturu. Lze studovat podmínky v rovině výtokového otvoru, charakteristiky vzniklé struktury jako je vzdálenost a velikost Machova disku, koncentrační profily atd.

Třetí část se zabývá modelem interakce proudu plynu, který je díky vysoké výtokové rychlosti a malému výtokovému otvoru silně směrově ohraničený a má vysokou hybnost, s okolní geometrií. Při umístění tlakových lahví v podvozkové části v originální CNG zástavbě jsou láhve blízce ohraničeny konstrukčními částmi automobilu a vozovkou. Při výtoku plynu z otvorů tepelné pojistky tak brzo dochází k rozbití proudu a plyn ztrácí velkou část své hybnosti.

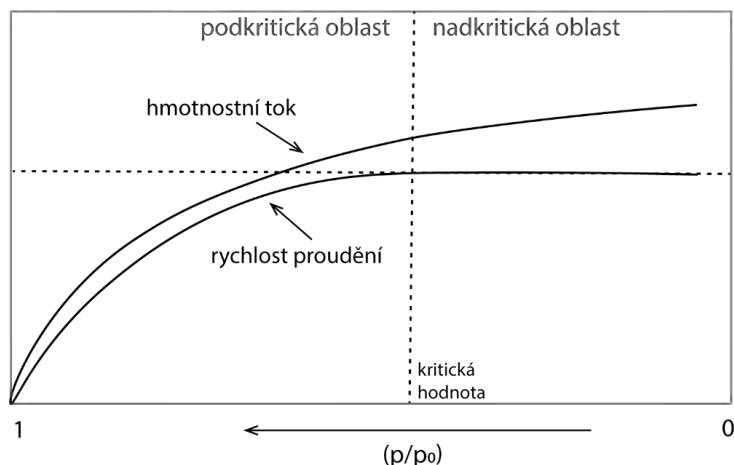
Čtvrtá část se zabývá šířením plynu od zdroje, tedy od hranice vozidla do okolí. V tomto konkrétním případě se jedná o šíření plynu v hromadné garáži, tedy uzavřeném prostoru, kde je riziko tvorby vzniku výbušné atmosféry. Model se dále zabývá interakcí šířícího se plynu a systémů pro odvětrání.

3.1 Charakteristika proudění při výtoku otvorem

Zda proudění plynu při výtoku malým otvorem vyvolané rozdílem tlaků uvnitř (p_0) a vně (p_∞) nádoby bude v oblasti nadkritické či podkritické je dáno právě poměrem těchto dvou tlaků. Mezní hodnota mezi těmito dvěma režimy odpovídá tzv. kritickému poměru tlaků

$$\frac{p_0}{p_\infty} = \left(\frac{\kappa + 1}{2} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}, \quad (3.1)$$

kdy je tok tzv. zaškrcený, Machovo číslo je rovno jedna a tok z nádoby je právě kritický. κ je polytropický exponent (koeficient, index - v literatuře často označován také písmenem γ). Hodnota polytropického exponentu je specifická pro každý plyn a závisí na teplotě a tlaku. Obvykle se odhaduje jako poměr isobarické (c_p) a isochorické (c_v) tepelné kapacity daného plynu a uvažuje se nezávislý na teplotě [13]. Pro vzduch se κ uvádí rovna 1,4, pro zemní plyn dle jeho složení od 1,3 do 1,4 a pro čistý metan přibližně 1,31. Kritický poměr tlaků pro vzduch je tedy 1,893 a pro metan 1,805 (některé analýzy v literatuře pracují s poměrem tlaku okolního prostředí ku tlaku v nádobě a kritický poměr tlaků pro vzduch pak je 0,53). Uvažujeme-li, že by výtok plynu probíhal ze CNG lahví s maximálním možným tlakem 200 bar (20×10^6 Pa), je poměr tlaku uvnitř nádoby a okolní atmosféry za standardních podmínek 101 325 Pa roven přibližně 197. Tok je tedy v oblasti nadkritické. Při výtoku plynu za takovýchto podmínek vznikají výrazné proudové struktury s vysokou hybností a vysokou intenzitou turbulence. Z hodnoty kritického poměru tlaků lze vypočítat odpovídající kritický tlak v nádobě při výtoku do okolní atmosféry, který je přibližně 200 kPa (2 bary). Poklesne-li tlak v nádobě pod tuto hodnotu, bude výtok plynu podkritický. Takto nízký tlak odpovídá téměř prázdné palivové nádrži vozidla a proto musíme uvažovat, že havarijní výtok CNG z palivové nádrže přes tepelnou pojistku bude v téměř celém rozsahu provozních tlaků nadkritický.



Obrázek 3.1: Hmotnostní tok plynu a rychlosti proudění v podkritické a nadkritické oblasti v závislosti na poměru okolního tlaku p a tlaku v nádobě p_0 .

Výtoková rychlost plynu z nádrže se mění s časem právě v závislosti na rozdílu tlaků uvnitř a vně uzavřené nádoby. Při dosažení kritického stavu výtoková rychlost v otvoru zůstává konstantní, i když budeme zvyšovat tlak uvnitř zásobníku. Jakmile vzrůstá tlak uvnitř zásobníku, vzrůstá také hustota plynu, a protože hmotnostní průtok je funkcí hustoty, hmotnostní průtok lineárně roste s rostoucím tlakem uvnitř zásobníku (za předpokladu ideálního plynu). Z opačné strany při poklesu rozdílu tlaků v láhvi, tedy při jejím vypouštění do okolí, se rychlost proudění nemění v nadkritické oblasti, v podkritické oblasti klesá. Hmotnostní tok klesá v nadkritické i podkritické oblasti (Obr. 3.1).

Za výtokovým otvorem vznikají při nadkritickém proudění typické proudové struktury a rázové vlny. Franquet et al. [16] popisuje tři rozdílné oblasti v rámci vytvořené proudové struktury podél její osy - blízká oblast, přechodová oblast a vzdálená oblast. Blízká oblast je tvořena jádrem, ve kterém je pouze vytékající plyn, a vrstvou, kde dochází k jeho promíchávání s okolním plynem. V jádře dochází k isoentropické expanzi plynu a k postupnému vyrovnávání tlaku plynu na tlak plynu okolí. Vlastnosti toku v jádře proudové struktury jsou v této oblasti silně ovlivněny stlačitelností plynu. Jak jádro vypadá, je dáno poměrem okolního tlaku a tlaku v nádobě respektive tlaku v rovině výtokového otvoru. U vysokých tlaků, jaké se dají najít v plných nádržích na CNG ve vozidle, je jádro tvořeno pouze jednou strukturou ve tvaru barelu. Jádro zaniká v momentě, kdy i v ose proudové struktury ve směru toku plynu dochází k promíchávání plynu vytékajícího z nádoby a okolního plynu. Hovoříme o takzvané přechodové oblasti, ve které dochází k rychlému vyrovnání tlakového pole. Ve vzdálené oblasti už je proudová struktura plně expandovaná. Rychlost proudění může být stále velmi vysoká, ale proudící plyn je v tlakové rovnováze s okolním plynem. Hovoříme o tom, že proudové pole je v této oblasti již plně vyvinuté. Proud plynu lze pak studovat jako klasické podkritické proudění stlačitelného plynu.

3.2 Isoentropické proudění ideálního plynu

Tok tryskou (průtok výtokovým otvorem) lze popsat představou isoentropického proudění. Jako isoentropické proudění označujeme takové proudění, které je adiabatické a vratné. Veličiny charakterizující proudící plyn jako rychlost, teplota, tlak, hustota, se v případě isoentropického toku mění pozvolna. Při isoentropickém proudění podkritickou rychlostí se plyn chová jako nestlačitelný. Při zúžení průtočné plochy rychlost proudění roste, při rozšíření klesá. Při nárůstu rychlosti k hranici rychlosti zvuku musíme pro správný popis chování systému uvažovat stlačitelnost prou-

dícího plynu. Při zmenšení průtočného průřezu plynu proudícího nadkritickou rychlostí dojde ke zpomalení toku. V obou případech se ale jedná o jev vratný, protože při opětovném nárůstu průtočného průřezu plynu, se rychlost toku brzo vrátí na původní hodnotu. Jestliže dojde k náhlému přerušení isoentropického toku, jako je tomu v případě výtoku plynu z trysky nebo výtokového otvoru do okolního prostředí, dojde k tvorbě rázových vln. Tok je nevratný a předpoklad isoentropického proudění plynu už není platný. Za adiabatický lze pokládat takový proces, který proběhne tak rychle, že se výměna tepla s okolím nestačí uskutečnit. V případě, že plyn přechází z oblasti vysokého tlaku do oblasti nízkého tlaku, dochází k jeho rozpínání (plyn koná práci) a při adiabatickém ději je to na úrok jeho vnitřní energie. Důsledkem je jeho ochlazení.

Přehled modelů isoentropického toku je uveden v práci Sullivana [17]. V projektu byl využit model isoentropického proudění ideální stlačitelné tekutiny (polytropický model). Model využívá pro stanovení výtokové rychlosti z trysky při isoentropické expanzi Saint Vénantovu-Wantzelovu rovnici. Bližší informace o modelu a jeho odvození jsou uvedeny v bakalářské práci N. Kubečkové [18] a v certifikované metodice.

Výtoková rychlost plynu v podkritické oblasti proudění se vypočítá podle vztahu

$$v = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p_\infty}{p_0} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} , \quad (3.2)$$

kde p_0 je tlak uvnitř zásobníku, p_∞ je atmosférický tlak a ρ_0 je hustota plynu v zásobníku. Hmotnostní tok plynu ze zásobníku vypočítáme jako

$$\dot{m} = \mu S p_0 \sqrt{\frac{2 M}{R T_0} \left(\frac{\kappa}{\kappa - 1} \right) \left[\left(\frac{p_\infty}{p_0} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_\infty}{p_0} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]} , \quad (3.3)$$

kde M je molární hmotnost plynu (kg mol^{-1}), R je univerzální plynová konstanta ($\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$), T je termodynamická teplota (K), μ je výtokový koeficient (-) a S je plocha výtokového otvoru. Výtoková rychlost plynu se v nadkritické oblasti nemění. Hmotnostní tok lze určit dle vztahu

$$\dot{m} = \mu S p_0 \sqrt{\frac{\kappa M}{R T_0} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}}} . \quad (3.4)$$

Výtok plynu ze zásobníku je neustálený děj. Pro výpočet časového průběhu hmotnostního toku byl použit nestacionární výpočet, kde jsou v každém časovém kroku počítány změny charakteristických veličin v nádobě [19]. Nejdříve je vypočtena ze stavové rovnice ideálního plynu počáteční hustota metanu $\rho_{0(0)}$. Vzorec pro výpočet hmotnostního toku výtokovým otvorem v čase t_i se mění podle oblasti proudění. Pro další časový krok ($i + 1$) je pak spočítána změna hustoty a teploty plynu v zásobníku

$$\Delta \rho_{0(i+1)} = \frac{\dot{m}_{0(i)}}{V} \Delta t , \quad (3.5)$$

$$\Delta T_{0(i+1)} = \frac{p_{0(i)}}{c_v \rho_{0(i)}^2} \Delta \rho_{0(i+1)} . \quad (3.6)$$

Pro nový časový krok je hodnota hustoty a teploty v zásobníku

$$\rho_{0(i+1)} = \rho_{0(i)} - \Delta \rho_{0(i+1)} , \quad (3.7)$$

$$T_{0(i+1)} = T_{0(i)} - \Delta T_{0(i+1)} , \quad (3.8)$$

a nová hodnota tlaku v zásobníku pak

$$p_{0(i+1)} = \rho_{0(i+1)} \frac{R T_{0(i+1)}}{M}. \quad (3.9)$$

Isoentropické modely nachází v inženýrské praxi široké uplatnění. V oblasti požární bezpečnosti staveb jsou využívány v problematice parkování vozidel na plynná paliva v uzavřených garážích, konkrétně části posouzení rizika vzniku výbušné atmosféry. Toman [20] shrnuje problematiku větrání uzavřených garáží pro parkování vozidel na plynná paliva v rámci legislativních požadavků a projektové praxe. Izoentropický model popisující adiabatickou expanzi ideálního plynu je modelem, který je uveden jako „poskytující rozumné odhady rychlosti úniku plynu“ českou technickou normou ČSN EN 60079-10-1 Výbušné atmosféry – část 10-1: Určování nebezpečných prostorů – výbušné plynné atmosféry. Jak je ale vidět z uvedených výpočetních vztahů modelu, hmotnostní tok plynu a pokles tlaku je závislý na třech proměnných, které jsou ve velké většině praktických aplikací neznámé - velikosti výtokového otvoru, hodnota výtokového koeficientu a počáteční teplotě plynu. Velikost výtokové plochy a hodnota výtokového koeficientu závisí na konstrukci tepelné pojistky. Teplota plynu v láhvi, teplota láhve a okolního prostředí závisí na prostředí, ve kterém k výtoku plynu dochází.

3.2.1 Plocha výtokového otvoru

Na obrázku 3.2 je porovnání poklesu tlaku a hmotnostního toku při vypouštění vzduchu z tlakové nádrže s počátečním tlakem 200 bar pro tři simulace isoentropického modelu, které se mezi sebou liší pouze velikostí výtokového otvoru. Z porovnání je patrné, že s narůstající velikostí výtokového otvoru se nádoba vyprazdňuje rychleji, tlak klesá rychleji. Hmotnostní tok vzduchu roste se zvětšující se plochou výtokového otvoru při stejné hodnotě tlaku v nádobě (jak je patrné z rovnice 3.4). Pokles tlaku je úměrný nárůstu výtokové plochy. Čas, při kterém dojde k poklesu tlaku na polovinu jeho počáteční hodnoty je pro dvakrát větší plochu výtokového otvoru dvakrát kratší.

Výsledky modelu nejsou nijak neočekávané. Isoentropický model pracuje s představou ideálního plynu. Hmotnost a tlak jsou vzájemně úměrné. Tato citlivostní analýza ale dobře demonstruje silný vliv plochy výtokového otvoru na rychlost vyprázdnění zásobníku a tím i na charakter vznikajícího proudění za výtokovým otvorem.

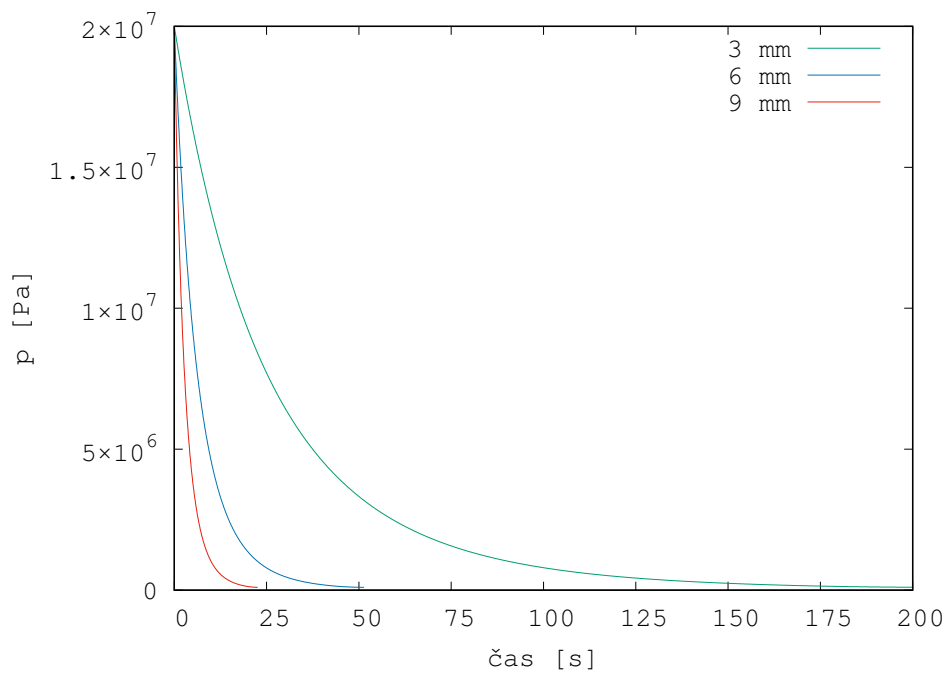
3.2.2 Výtokový koeficient

Výtokový koeficient v sobě zahrnuje korekci na výtok reálného plynu neideálním otvorem.

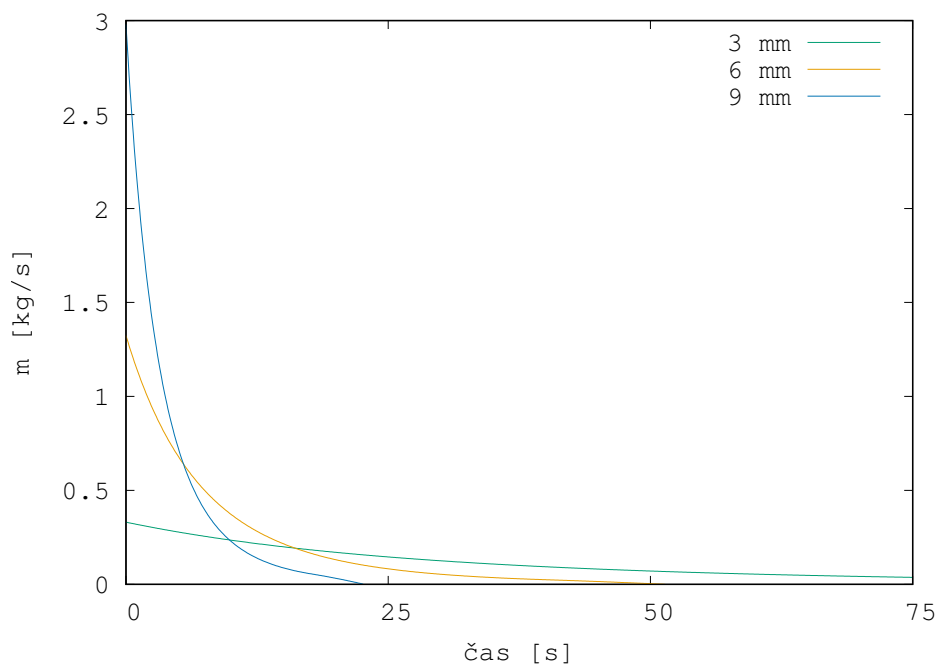
$$\dot{m} = \mu \rho v S \quad (3.10)$$

Hodnota výtokového koeficientu se vždy pohybuje mezi nulou a jedničkou. V bezpečnostním inženýrství se často zanedbává korekce na chování reálného plynu při výtoku, protože ideální plyn, jehož výtokový koeficient je roven jedné, dosahuje nejvyšších hmotnostních toků a tedy nejkratší doby výtoku. Tento předpoklad ale může vést ke vzniku proudění, které se za výtokovým otvorem bude chovat jinak, než ve skutečnosti. V české technické normě ČSN EN 60079-10-1 je výtokový koeficient označován jako odtokový součinitel C_d . Pro otvory s ostrými hranami je doporučena hodnota výtokového koeficientu mezi 0,5 až 0,75.

Při konstantní velikosti výtokové plochy a tlaku v láhvi je změna hmotnostního toku a pokles tlaku v láhvi se zmenšujícím se výtokovým koeficientem ukázán na Obrázku 3.3. Ze vztahu 3.10 je patrné, že při poklesu výtokového koeficientu z hodnoty 1 na 0.6 získáme hmotnostní tok odpovídající 60 %.

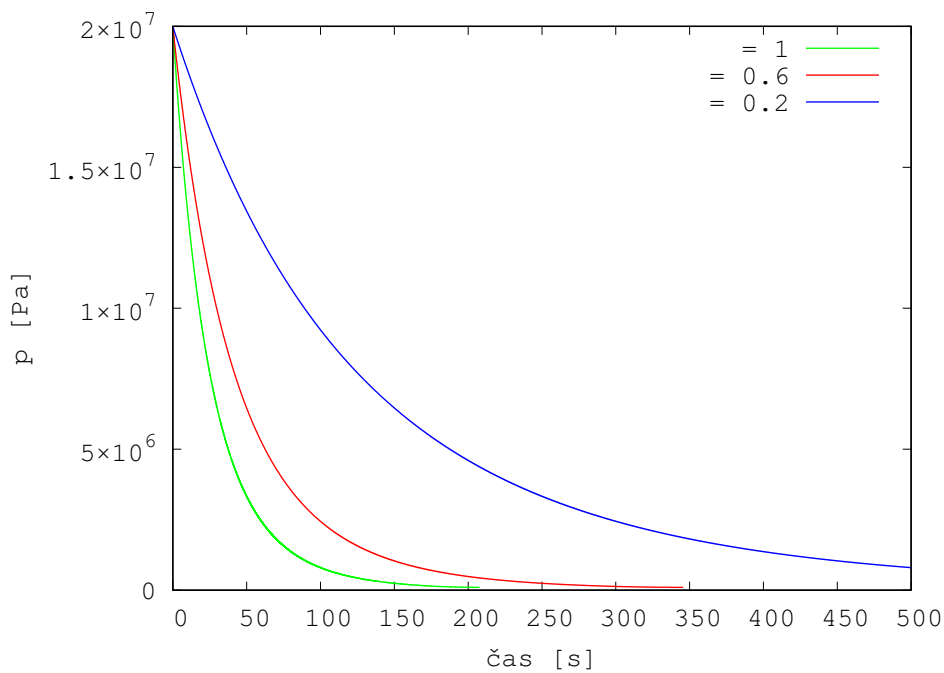


(a) Tlak.

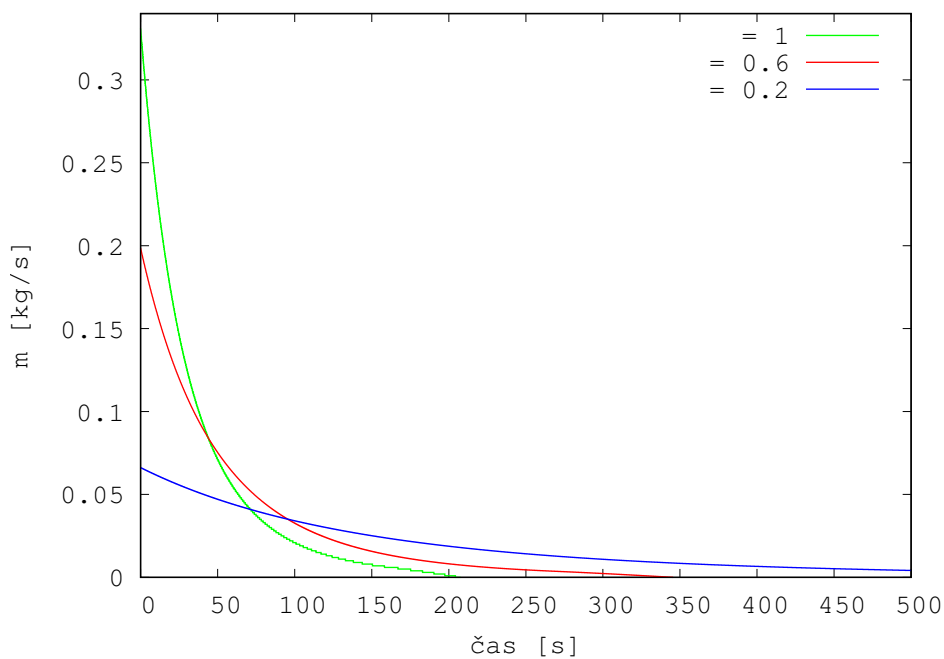


(b) Hmotnostní tok.

Obrázek 3.2: Vliv plochy výtakového otvoru na hmotnostní tok vzduchu a pokles tlaku vzduchu podle isoentropického modelu. Počáteční tlak 200 bar, výtakový koeficient $\mu = 1$, teplota vzduchu v láhvi 25 °C, jeden kruhový výtakový otvor o průměru 3, 6 a 9 mm.



(a) Tlak.

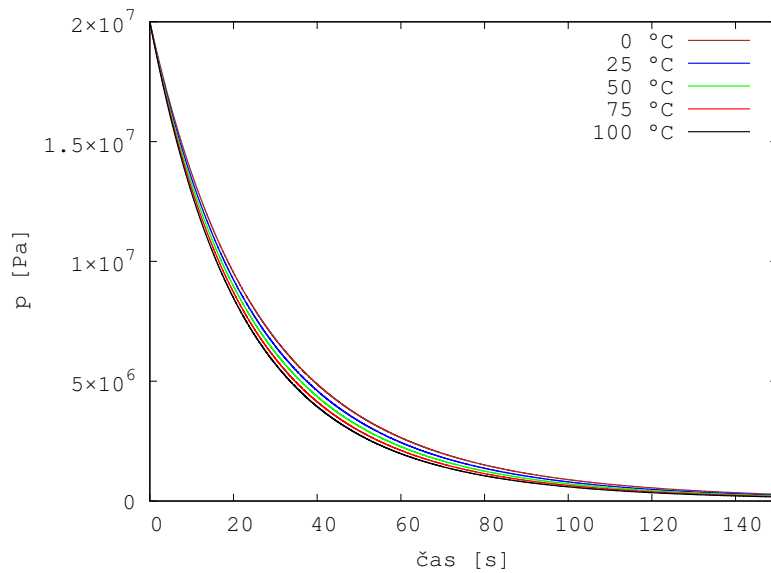


(b) Hmotnostní tok.

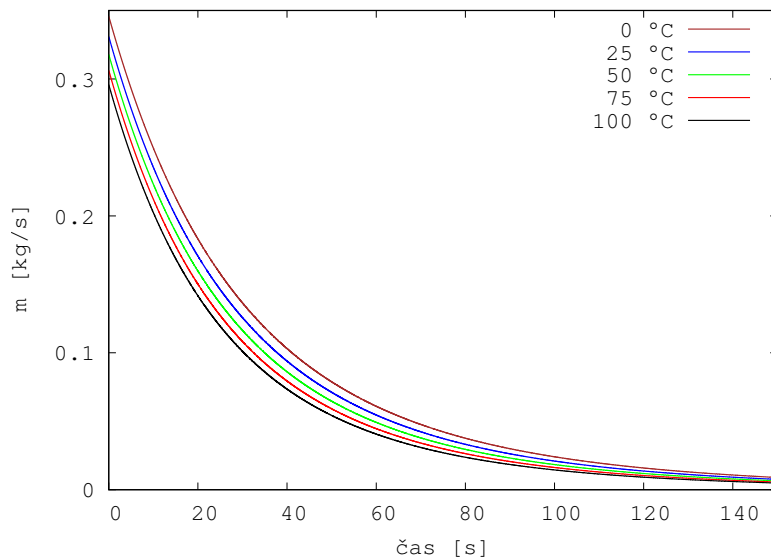
Obrázek 3.3: Vliv výtokového koeficientu na hmotnostní tok plynu a pokles tlaku podle iso-entropického modelu. Počáteční tlaku 200 bar, teplota v láhvi 25 °C, $\mu = 1, 0, 6, 0, 2$, kruhový výtokový otvor o průměru 3 mm.

3.2.3 Teplota plynu v láhvi

Vliv teploty plynu uvnitř nádoby je ukázán na Obr. 3.4. S rostoucí teplotou plynu v nádrži klesá počáteční hmotnostní tok plynu, ve stejnou dobu je ale výtok rychlejší, pokles tlaku je větší. Při požáru lze očekávat, že teplota plynu uvnitř láhve bude zvýšená. Teplota okolního prostředí ve vztahu pro výpočet hmotnostního toku plynu isoentropickým modelem vůbec nevystupuje.



(a) Tlak.

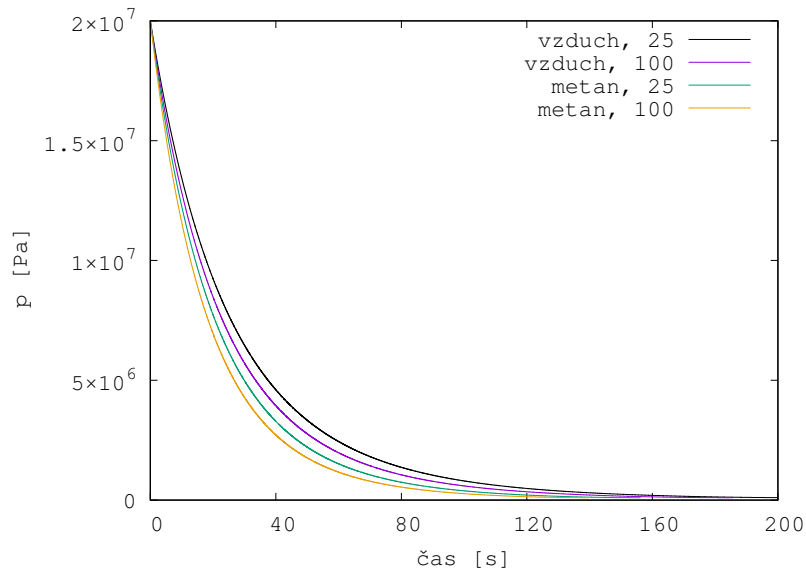


(b) Hmotnostní tok.

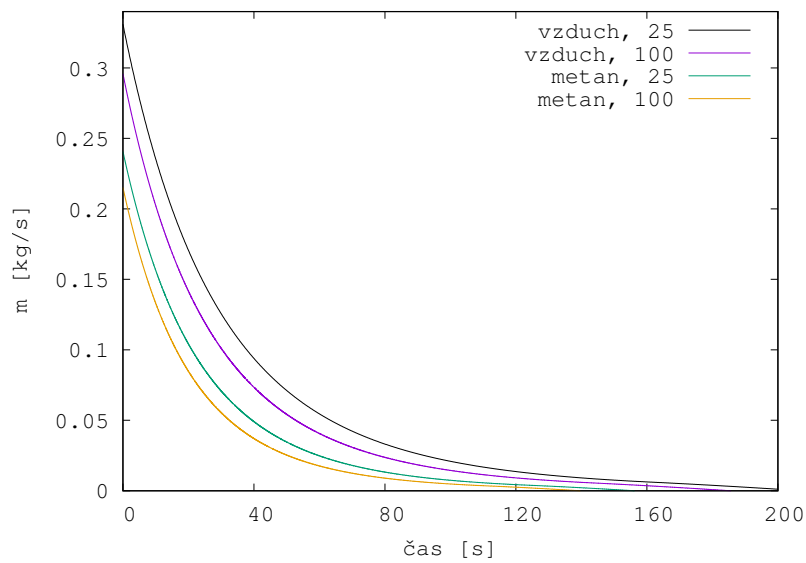
Obrázek 3.4: Vliv počáteční teploty plynu v láhvi na hmotnostní tok plynu a pokles tlaku podle isoentropického modelu. Počáteční tlak 200 bar, výtokový koeficient $\mu = 1$, kruhový výtokový otvor o průměru 3 mm.

3.2.4 Vzduch versus metan

Rozdíl výtoku vzduchu do vzduchu a metanu do vzduchu za stejných podmínek výtoku je ukázán na Obr. 3.5 pro počáteční teplotu plynu 25 a 100 °C.



(a) Tlak.



(b) Hmotnostní tok.

Obrázek 3.5: Vliv druhu plynu v láhvi na hmotnostní tok plynu a pokles tlaku podle isentropického modelu. Počáteční tlak 200 bar, výtokový koeficient $\mu = 1$, kruhový výtokový otvor o průměru 3 mm, teplota plynu v láhvi 25 a 100 °C.

3.2.5 Počet otvorů tepelné pojistky

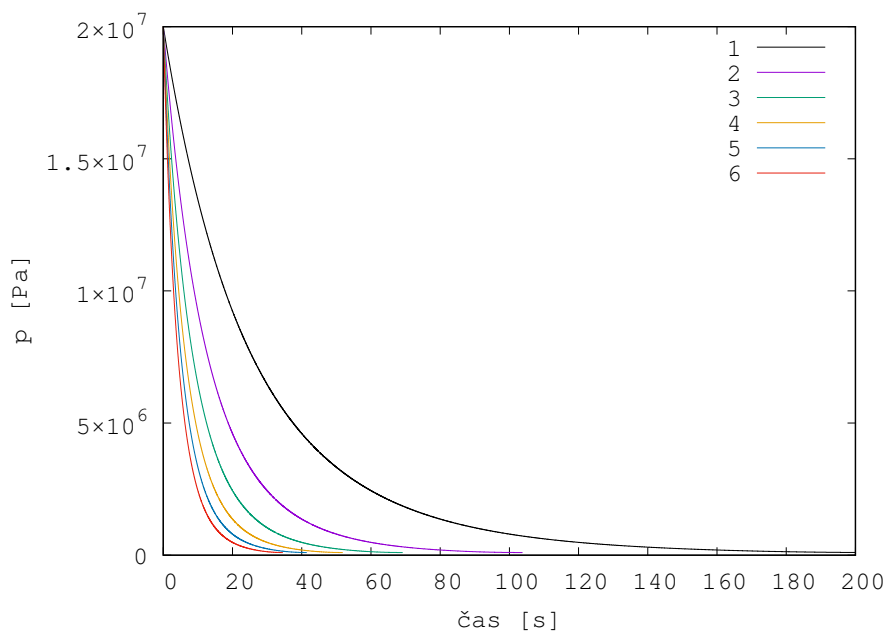
Pakliže je na tepelné pojistce více než jeden výtokový otvor, musíme při aplikaci isoentropického modelu na reálnou úlohu vyšší počet výtokových otvorů a tedy i větší celkovou výtokovou plochu uvažovat ve výpočtu. Je třeba si uvědomit, že výtok z šesti 3 mm otvorů nebude probíhat stejně jako výtok z plochy odpovídající šestinásobku této plochy v isoentropickém modelu. Kroky výpočtu časového průběhu hmotnostního toku a tlaku v zásobníku zůstávají stejné, jak jsou popsány v úvodu této kapitoly. Počet otvorů je v modelu implementován v rovnici (3.3) respektive (3.4), kde je pravá strana rovnice vynásobena počtem otvorů tepelné pojistky. Celkový hmotnostní úbytek z N otvorů je roven N -násobku hmotnostního toku z jednoho otvoru. Pro nadkritický tok tedy platí:

$$\dot{m} = N\mu S p_0 \sqrt{\frac{\kappa M}{R T_0} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}}, \quad (3.11)$$

pro podkritický pak

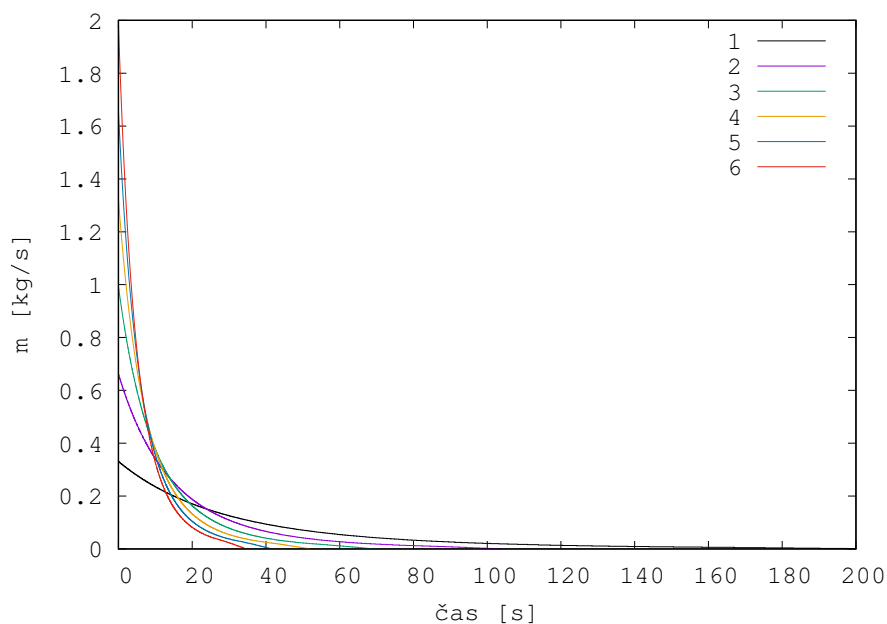
$$\dot{m} = N\mu S p_0 \sqrt{\frac{2 M}{R T_0} \left(\frac{\kappa}{\kappa-1}\right) \left[\left(\frac{p_\infty}{p_0}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_\infty}{p_0}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}. \quad (3.12)$$

Tlak v nádrži je počítán na konci každého časového kroku ze stavové rovnice a je tedy úměrný hmotnosti plynu v nádrži. S vyšším počtem otvorů se tak mění i tlak v zásobníku. Na Obr. 3.6, je ukázán tlak a hmotnostní tok pro jeden až šest výtokových otvorů, každý o průměru 3 mm. Dle očekávání je pro šest otvorů počáteční celkový hmotnostní tok 6-krát vyšší a doba výtoku je 6-krát kratší než pro jeden výtokový otvor.



(a) Tlak.

Obrázek 3.6: Vliv počtu otvorů tepelné pojistky na tok plynu a pokles tlaku podle isoentropického modelu. Počáteční tlak 200 bar, výtokový koeficient $\mu = 1$, 1 až 6 kruhových výtokových otvorů každý o průměru 3 mm, teplota plynu v láhvi 25 °C.



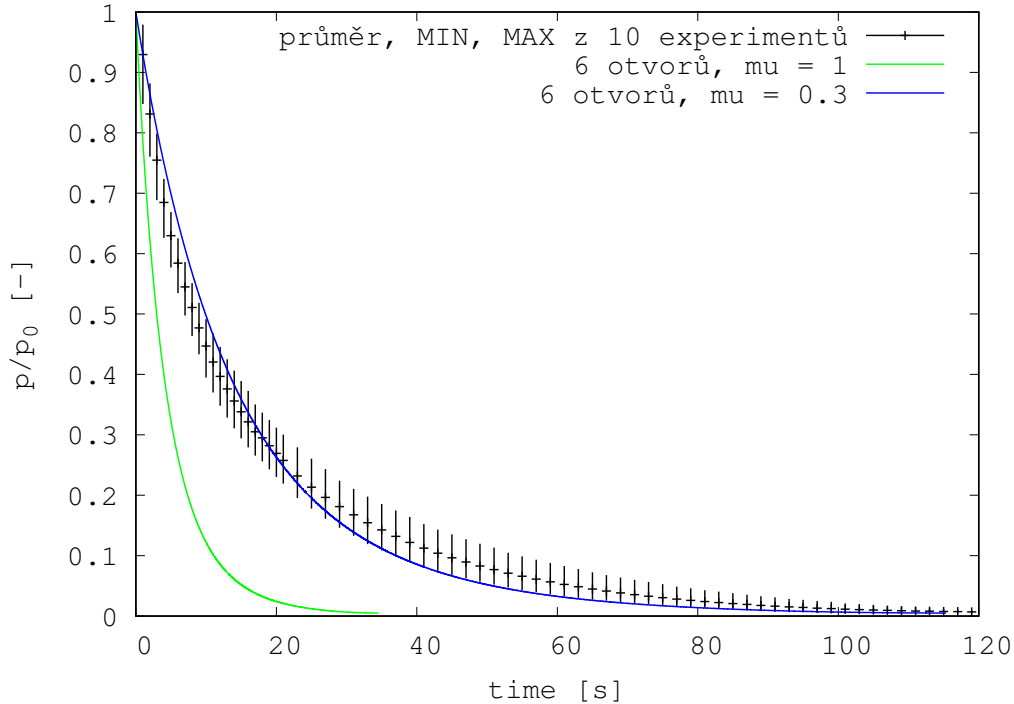
(b) Hmotnostní tok.

Obrázek 3.6: Vliv počtu otvorů tepelné pojistky na tok plynu a pokles tlaku podle isoentropického modelu. Počáteční tlak 200 bar, výtokový koeficient $\mu = 1$, 1 až 6 kruhových výtokových otvorů každý o průměru 3 mm, teplota plynu v láhvi 25 °C.

3.2.6 Porovnání s experimentem

Naměřená data poklesu tlaku a hmotnosti při vypouštění vzduchu z nádoby popsané v sekci 2.2.1 platí pro výtok z tepelné pojistky, která má šest kruhových otvorů, každý o průměru 3 mm (Obr. 1.2c). Při nejvyšším možném tlaku v nádobě, tedy 200 bar, je průměrná doba výtoku naměřená dle experimentu přibližně 120 sekund a počáteční hmotnostní tok vzduchu je kolem 400 g/s. Při zanedbání korekce výtoku na neideální podmínky ($\mu = 1$), je modelem předpovězená doba výtoku 34 sekund. Pokud chceme hmotnostní tok vzduchu snížit a tím zpomalit výtok vzduchu z nádoby tak, aby odpovídal naměřeným datům musíme využít výtokový koeficient. Abychom získali uspokojivou shodu s naměřenými daty, museli bychom v modelu se šesti výtokovými otvory uvažovat výtokový koeficient s hodnotou kolem 0,3, jak je vidět na Obr. 3.7.

Podíváme-li se na Obr. 3.6 a porovnáme výtokový čas s experimentem, je vidět, že při zanedbání výtokového koeficientu odpovídá nejlépe experimentálně naměřeným datům pro výtok vzduchu přes šest 3 mm otvorů model výtoku vzduchu přes dva 3 mm otvory. Tak, aby byl isoentropický model v praxi pro výtok metanu přes tepelnou pojistku s více otvory univerzálně aplikovatelný, bylo by třeba nalézt korelaci na odhad výtokového koeficientu v závislosti na počtu výtokových otvorů při znalosti velikosti jednoho otvoru.



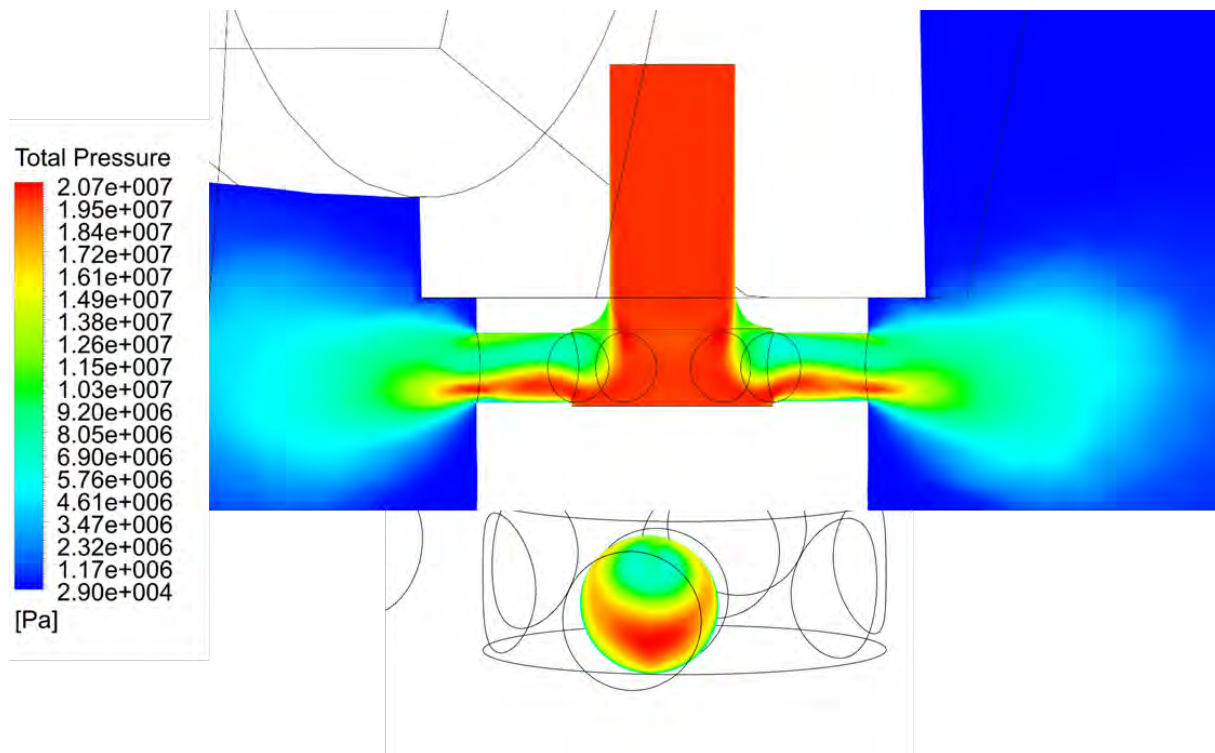
Obrázek 3.7: Porovnání bezrozměrného poklesu tlaku podle isoentropického modelu s experimentem. Počáteční tlak je 200 bar. Uvažovaná teplota vzduchu v nádobě je v modelu $T_0 = 25 \text{ °C}$.

3.2.7 Tlaková ztráta při průtoku plynu tepelnou pojistkou

Dalším faktorem, který vnáší nejistotu do reálnosti předpovědi isoentropického modelu je skutečná hodnota tlaku ve výtokovém otvoru tepelné pojistky. Při průtoku metanu bezpečnostním ventilem a tepelnou pojistkou dochází k poklesu tlaku vlivem tření a vlivem relativně složité vnitřní geometrie ventilu a bezpečnostní pojistky dochází k prudkým změnám směru toku plynu než dorazí do jednoho z šesti výtokových otvorů pojistky. V sekci 3.5.1 je popsán 3D CFD model výtoku metanu tepelnou pojistkou, ve kterém je vytvořena zjednodušená geometrie tepelné pojistky. Tlaková okrajová podmínka je v modelu umístěna na vstup těla tepelné pojistky, tlak je konstantní v celém průřezu.

Na Obr. 3.8 je na řezu zjednodušenou geometrií ventilu vidět modelem predikované rozložení tlaku, pakliže okrajová tlaková pojistka na vstupu do tepelné pojistky je 200 bar. Tlakové pole v řezu výtokového otvoru je nehomogenní. Vytvořený jet nebude axisymetrický. Tlak v průřezu výtokovým otvorem lokálně klesá až na 60 bar. Pakliže aplikujeme tlakovou okrajovou podmínku na výtokový otvor, tak jako je tomu u isoentropického modelu, neměli bychom použít hodnotu tlaku plynu v láhvi, ale hodnotu nižší.

Skutečná hodnota tlaku ve výtokovém otvoru tepelné pojistky je menší než tlak v nádrži a výrazně přispívá ke špatné shodě isoentropického modelu s experimentálními daty, respektive je tento rozdíl zohledněn ve velmi malé hodnotě výtokové koeficientu, jak bylo popsáno v předchozí sekci.



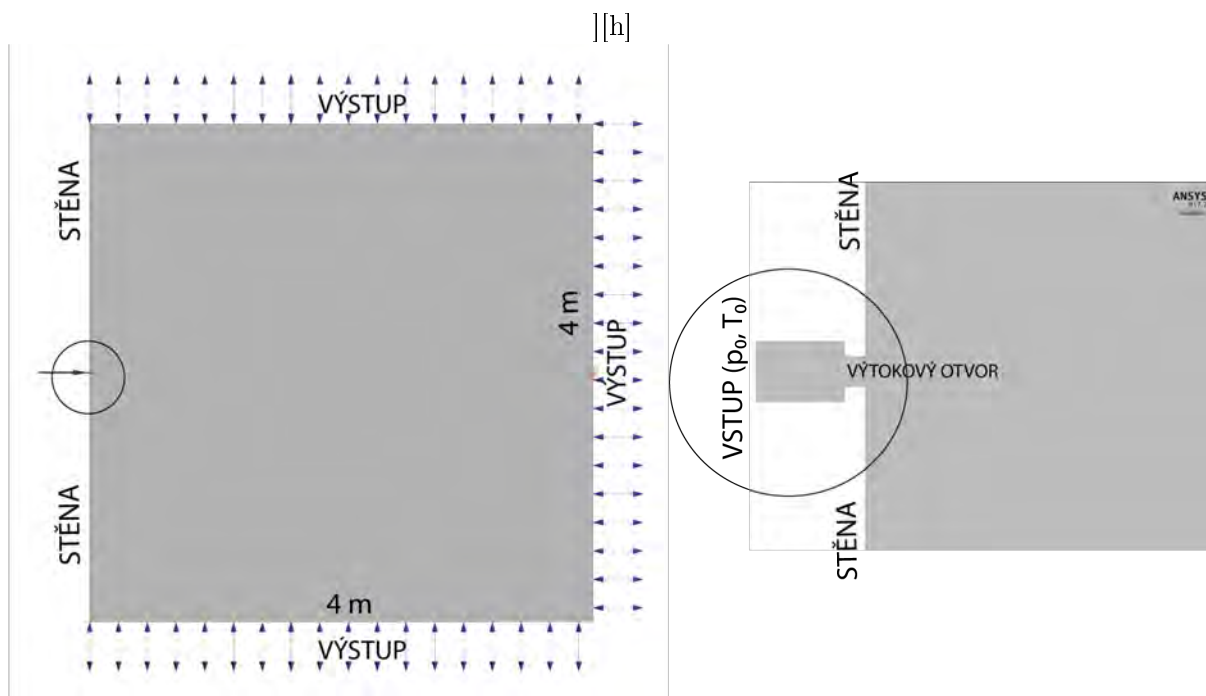
Obrázek 3.8: Rozložení tlaku ve zjednodušené geometrii ventilu ve 3D CFD modelu a v rovině jednoho z výtokových otvorů pro konstantní okrajovou tlakovou podmínku 200 bar na vstupu do pojistky.

3.3 2D simulace průtoku plynu tryskou o průměru 3 mm

2D CFD model byl vytvořen v programu ANSYS CFX 17.2. Do domény 4×4 metry se vzduchem o pokojové teplotě je přes výtokový otvor o průměru 3 mm vháněn metan pomocí tlakové okrajové podmínky, která je definována před nátokem do trysky. Jedná se o zjednodušenou představu skutečného uspořádání jednoho výtokového otvoru tepelné pojistky tak, aby v něm byla zahrnuta tloušťka stěny (Obr. 3.9).

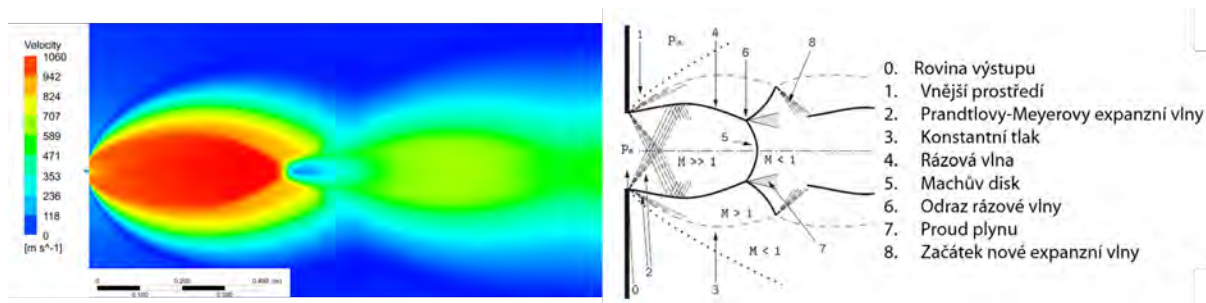
Testovací výpočty probíhaly v doméně 2×2 metry. Ta ale byla pro vysoké tlaky příliš malá. Při vysokých rychlostech proud zasahuje do okrajové podmínky a řešič se snaží držet na okrajích domény hodnoty definované okrajovou podmínku - ve skutečnosti tam takové hodnoty ale nejsou. Doména byla proto později zvětšena na 4×4 metry. Výstupní okrajová podmínka musí být zvolena typu „opening“, aby bylo možné zachytit zpětné proudění do domény.

2D model umožňuje studovat vzniklou strukturu a charakteristiku toku při průtoku tryskou a při expanzi plynu. Výtok plynu je neustálený, ale pro získání globální informace o tom, jakých rychlostí může být řádově dosaženo a jak vypadá vzniklá proudová struktura, je možné problém řešit stacionárně s výraznou úsporou času. Stacionární výpočet byl proveden při konstantním tlaku na vstupu 1,5, 5, 10, 30, 50, 75, 100, 150 a 200 bar a při teplotě metanu v láhvi a okolního vzduchu 20 °C.

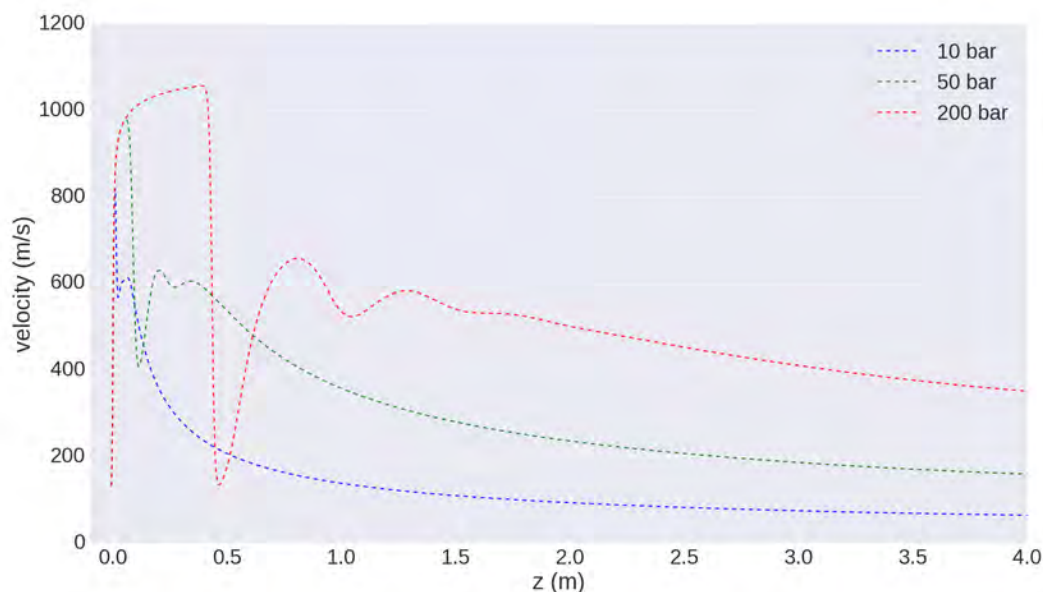


Obrázek 3.9: Výpočetní doména a detail výtokového otvoru s umístěním vstupní okrajové podmínky.

Za výtokovým otvorem vzniká charakteristická struktura, jejíž vlastnosti závisí na rozdílu tlaku v láhvi a okolním prostředí, jak bylo popsáno v sekci 3.1. Na Obrázku 3.10 je ukázka rychlostního pole za výtokovým otvorem. 2D modelem predikovaný jet je díky geometrii a konstantní okrajové podmínce axisymetrický. Získaná struktura je podobná v odborné literatuře publikovaným strukturám proudu během nadzvukového proudění z trysky. CFD model je schopen zachytit charakteristické vlastnosti nadkritického proudění vyvolaného expanzí plynu za výtokovým otvorem včetně rázových a expanzních vln.



Obrázek 3.10: Ukázka proudové struktury vytvořené za výtokovým otvorem do vzdálenosti cca 1 metr pro tlak 200 bar, obecné schéma proudové struktury upraveno z [16].

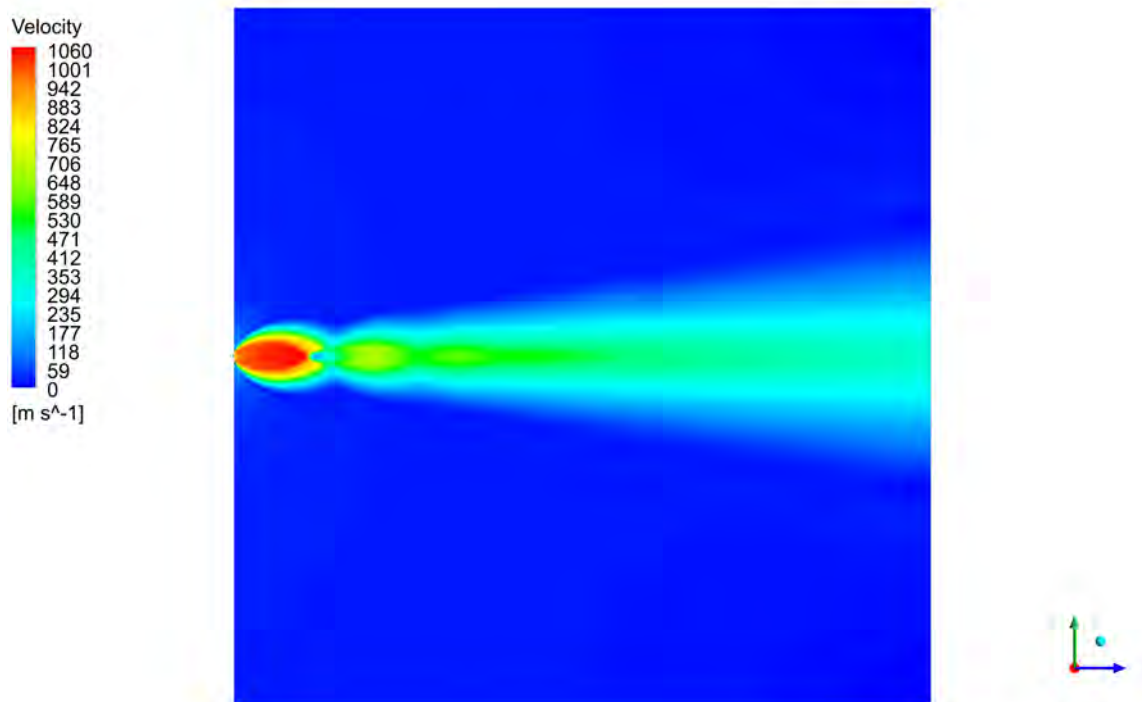


Obrázek 3.11: Rychlost proudění podél osy proudové struktury za výtakovým otvorem pro tlak 10, 50 a 200 bar. Stacionární simulace.

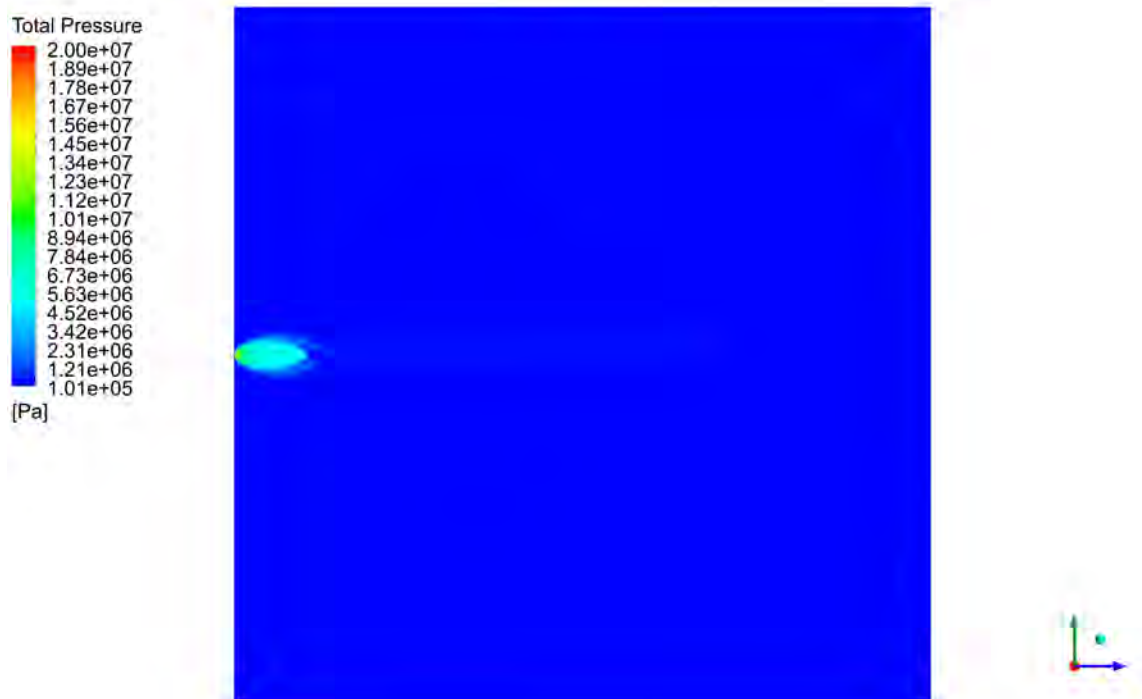
Rychlost proudění v jádře struktury a jeho délka závisí při stejné velikosti výtakového otvoru na tlaku plynu v nádrži. To lze dobře vidět na Obr. 3.11, kde je zobrazena rychlost proudění podél osy proudové struktury pro tlak 10, 50 a 200 bar. S narůstajícím tlakem v nádrži se zvětšuje rychlost proudění v jádře a jádro se prodlužuje podél osy proudové struktury.

V případě simulace s tlakem 200 bar je tzv. blízká oblast jádra dlouhá přibližně 0,5 m. Podíváme-li se na tlakové pole ze simulace pro 200 bar (Obr. 3.12b), je vidět, že k vyrovnání tlaku na tlak okolní dochází právě v této oblasti. Víc jak 0,5 metru za výtakovým otvorem je proudění stále velmi rychlé a dochází ještě ke dvěma nárůstům a poklesům rychlosti v ose proudové struktury, ale proudová struktura je už v přechodové oblasti, tlakové pole je téměř vyrovnané a dochází k promíchávání metanu a okolního vzduchu blíže a blíže k ose proudové struktury (Obr. 3.13c). Ve vzdálenosti 2 metry jádro úplně zaniká. Proudové pole je plně vyvinuté, proudění je stále velmi rychlé, ale podkritické. Ve vzdálenosti 4 metry je rychlost proudění kolem 380 m/s. Pro simulaci s tlakem 10 bar je blízká oblast jádra dlouhá přibližně 0,02 m a jádro zaniká ve vzdálenosti přibližně 0,2 m. Ve vzdálenosti 4 metry za výtakovým otvorem je rychlost proudění přibližně 60 m/s.

2D CFD model lze využít pro studium koncentračních profilů podél proudové struktury. Tyto typy analýz jsou v rámci studované problematiky zajímavé proto, že ukazují, jak dochází k promíchávání metanu a vzduchu a tedy v jakém místě a jak daleko od výtakového otvoru vzniká hořlavá koncentrace a unikající metan v přítomnosti iniciačního zdroje zahoří. Na Obr. 3.13 je hmotnostní zlomek metanu pro tlak 10, 50 a 200 bar. Šedě je zvýrazněna oblast, kde koncentrace metanu spadá do mezí hořlavosti. K promíchávání metanu a vzduchu dochází už v blízké oblasti jádra, hned za výtakovým otvorem je tenká vrstva, ve které je dosaženo mezí hořlavosti. Tato vrstva se postupně rozšiřuje podél směru proudění a v tím větší tloušťce, čím dřív zaniká jádro a klesá rychlost proudění.

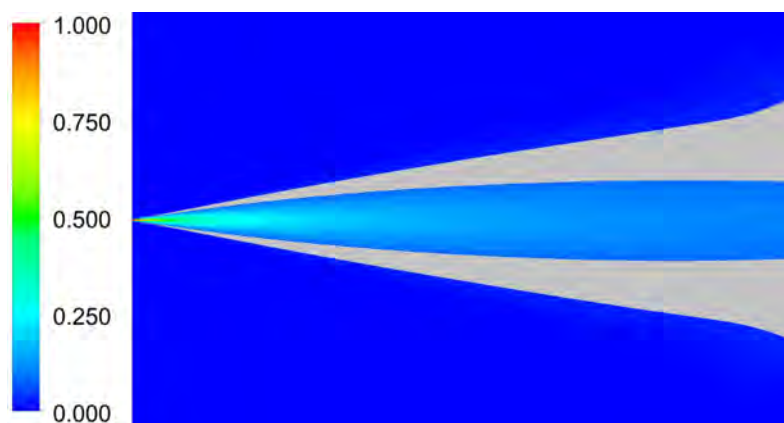


(a) Rychlost.

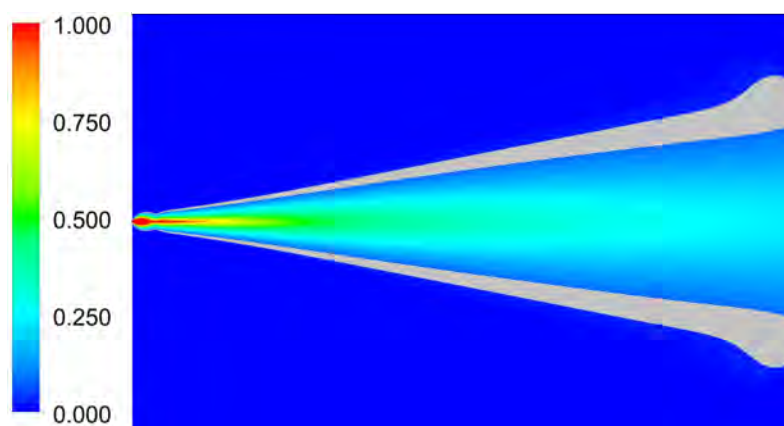


(b) Tlak.

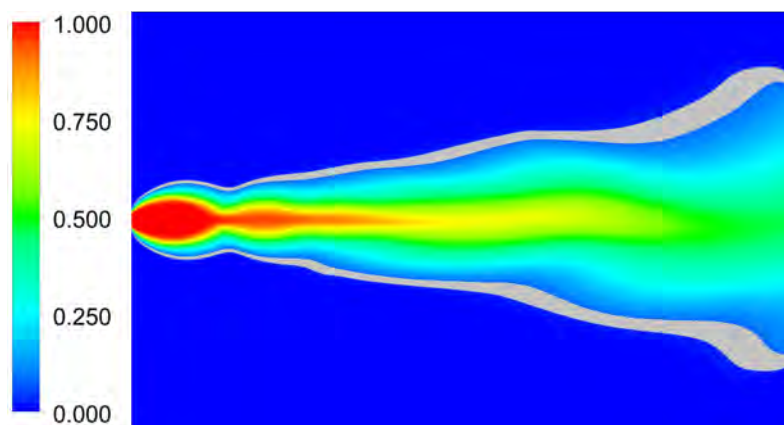
Obrázek 3.12: Tlakové a rychlostní pole pro okrajovou tlakovou podmínku 200 bar, ustálená simulace, doména 4×4 metry.



(a) 10 bar



(b) 50 bar



(c) 200 bar

Obrázek 3.13: Hmotnostní zlomek metanu v proudové struktuře vytvořené za výtakovým otvorem - výřez výpočetní domény je přibližně $4 \times 2,5$ metru. Šedě vymezená oblast je ohraničení meze hořlavosti metanu. (Simulace pro tlak 200 bar není plně dopočítána do ustáleného stavu. Při tak velkém rozdílu tlaků je výtok natolik nestacionární jev, že zde pravděpodobně ani není možné dosáhnout ustáleného stavu.).

3.3.1 Fiktivní-ekvivalentní výtokový otvor

Z hlediska modelování disperze plynu do okolí výtokového otvoru nás nezajímá detailní struktura proudu plynu v blízké nebo přechodové oblasti, ale pouze charakteristika proudění (rychlost, teplota, hustota) právě v oblasti plně expandované proudové struktury. Modelovat proudění v blízké oblasti metodou CFD v kombinaci s velkými doménami je stále výpočetně extrémně náročné a nepoužitelné pro praktické výpočty. Pro modelování disperze plynu při výtoku z tlakové nádoby je ale postačující, dokážeme-li v modelu vytvořit fiktivní výtokový otvor s fiktivními charakteristikami (rozměr, výtoková rychlost, tlak, teplota) tak, aby vzniklý ekvivalentní (fiktivní) proud plynu na vstupu do domény měl stejné vlastnosti jako proud plynu ve vzdálené oblasti při proudění plynu z původního výtokového otvoru. Velmi často se vychází z představy, že výtoková rychlost je rovna $Ma=1$ (za daných podmínek, tedy teploty a tlaku).

Franquet et al. shrnuje a porovnává celkem osm různých představ jak vytvořit ekvivalentní tok a stanovit ekvivalentní výtokový otvor za předpokladu, že výtokový otvor se chová jako zahlcená konvergentní tryska, tedy na výstupní rovině výtokového otvoru je výtoková rychlost kritická. Přehled okrajových podmínek, vstupních hodnot do modelů a modelových předpokladů je v tabulce 3.1.

Z těchto osmi modelových představ se ale jako použitelné z hlediska dostupnosti vstupních dat ukázaly pouze dvě - "equivalent diameter" a "pseudo-diameter approach". Ostatní metody jako vstupní data pro přepočet velikosti ekvivalentního otvoru vyžadují hodnoty veličin jako je teplota, hustota či rychlost plynu v rovině výtokového otvoru. Ty ale nejsou bez podrobné simulace výtoku plynu tepelnou pojistkou dostupné. Dvě vybrané modelové představy vyžadují jako vstupní data pro přepočet velikosti ekvivalentního otvoru pouze teplotu a tlak plynu v nádrži a v okolí. První aproximace vychází z představy, že bude zachována hybnost a tedy rychlost plynu, ale hustota vytékajícího plynu bude rovna hustotě plynu okolního. Tlak v ekvivalentním výtokovém otvoru je roven tlaku v nádrži. Druhá aproximace předpokládá, že dojde k zachování hmotnostního toku za předpokladu, že nedochází k promíchávání okolního plynu s plynem vytékajícím. Tlak a teplota ve výtokovém otvoru se rovnají tlaku a teplotě okolního plynu, rychlost ve výtokovém otvoru se rovná kritické rychlosti.

Uvažujeme-li, že výtok probíhá z 3 mm otvoru, při tlaku v nádobě 200 bar a teplotě plynu v láhvi i v okolí 20 °C, vychází ekvivalentní velikost výtokového otvoru 33,6 a 36,9 mm. Ani jeden z modelů se ale nepodařilo úspěšně implementovat ve 2D simulaci tak, aby byla zachována jak hybnost proudícího plynu, tak hmotnostní tok plynu. Buď vzniklo proudění, které bylo extrémně pomalé aby byl zachován hmotnostní tok z podstatně menšího otvoru proti otvoru ekvivalentnímu, nebo obráceně vzniklo proudění extrémně rychlé, které zachovalo hybnost proudění jako při výtoku podstatně menším otvorem, ale s mnohonásobně vyšším hmotnostním tokem plynu.

Zachování pouze hmotnostního toku plynu může sloužit ke globálnímu posouzení množství metanu v celkovém objemu okolního vzduchu v uzavřeném prostoru, ale nevystihne samotnou disperzi a lokální chování proudícího plynu. Při zachování pouze hybnosti plynu, ne hmotnostního toku, zase může dojít k silnému nadhodnocení nebo podhodnocení množství plynu v doméně tedy dosažení mezi hořlavosti metanu.

Tabulka 3.1: Modely ekvivalentního toku. eq=ekvivalentní, E=exit, ∞ =ambient-okolní, 0=tlak v nádobě (total,stagnation)

	okrajová podmínka	výtokový otvor	předpoklad	vstupní hodnoty	komentář
Equivalent diameter	$p_{eq} = p_0$	výpočet	$p_{eq} = p_\infty$	$T_0, T_\infty, p_0, p_\infty$	the same momentum flux and velocity but at ambient density of fluid
Pseudo-diameter approach	$v_{eq} = c_{eq}$	výpočet	$p_{eq} = p_\infty, T_{eq} = T_\infty$	$T_0, T_\infty, p_0, p_\infty$	mass conservation assuming no entrainment of ambient air
Sonic jet approach	$v_{eq} = c_{eq}$	výpočet	$p_{eq} = p_\infty, T_{eq} = T_E$	p_0, p_∞	mass conservation
Momentum-velocity approach	v_{eq} - výpočet	$D_{eq} = D_E$	musíme znát podmínky na výstupu	v_E, p_E, ρ_E, p_{eq}	Nedopracováno - momentum balance is preserved
Improved pseudo-diameter approach	v_{eq} - výpočet	Výpočet	$p_{eq} = p_\infty, T_{eq} = T_0$	c_E, p_0, p_∞, p^*	mass and momentum preserved
Adiabatic expansion approach	výpočet	výpočet	$p_{eq} = p_\infty$	$p_E, p_\infty, v_E, c_E, T_E, \rho_E$	mass, momentum and energy preserved
Mach disk approach	$p_{eq} = p_0$	výpočet	není jasné	p_0, p_∞	nedopracováno
Underexpanded jet theory	$v_{eq} = c_{eq}$	výpočet	$p_{eq} = p_\infty, T_{eq}$ - výpočet		mass and energy conservation

3.4 Porovnání předpovědi isoentropického modelu a 2D CFD

Na Obr. 3.14 je závislost výtokové rychlosti a hmotnostního toku plynu pro celý rozsah pracovního tlaku nádrže, jak ho předpovídá isoentropický model a 2D CFD model. Kritický poměr tlaků pro čistý metan vytékající do okolní atmosféry s tlakem 1,01325 bar, uvažujeme-li polytropický koeficient 1,304, je přibližně 1,86 bar. Je-li tlak v nádrži větší než tato hodnota, tok z nádrže bude nadkritický.

3.4.1 Výtoková rychlost

Při porovnání výsledků obou modelů vzniká problém, protože není jasné, v jakém místě proudové struktury rychlost ve 2D modelu odečíst. Isoentropický model je bezrozměrný a předpovídá maximální výtokovou rychlost. Pro porovnání s 2D CFD modelem byla použita maximální rychlost nalezená podél středu proudové struktury v jejím jádře.

Shoda mezi předpovědí isoentropického a 2D CFD modelu je velmi dobrá do tlaku 10 bar. V této oblasti výtoková rychlost s narůstajícím tlakem prudce roste. Pro tlak v nádrži vyšší než 50 bar je už nárůst výtokové rychlosti velmi malý. Tento trend ukazují oba typy modelů. Isoentropický model za vyšších hodnot tlaků udává přibližně o 10 % nižší hodnotu výtokové rychlosti.

Machovo číslo je funkcí teploty. Při expanzi plynu dochází k výraznému poklesu teploty proudícího plynu a je proto velmi obtížné porovnat výtokovou rychlost plynu jako funkci tlaku v zásobníků pomocí Machova čísla. Největší hodnota rychlosti proudění ve 2D CFD simulaci při tlaku v nádrži 50 bar je v jádře za výtokovým otvorem přibližně 3,6 Mach (při teplotě -173 °C). V rozmezí 50 až 200 bar oba modely predikují dosažení rychlosti proudění v rozmezí 3,5 až 6 Mach.

3.4.2 Hmotnostní tok plynu

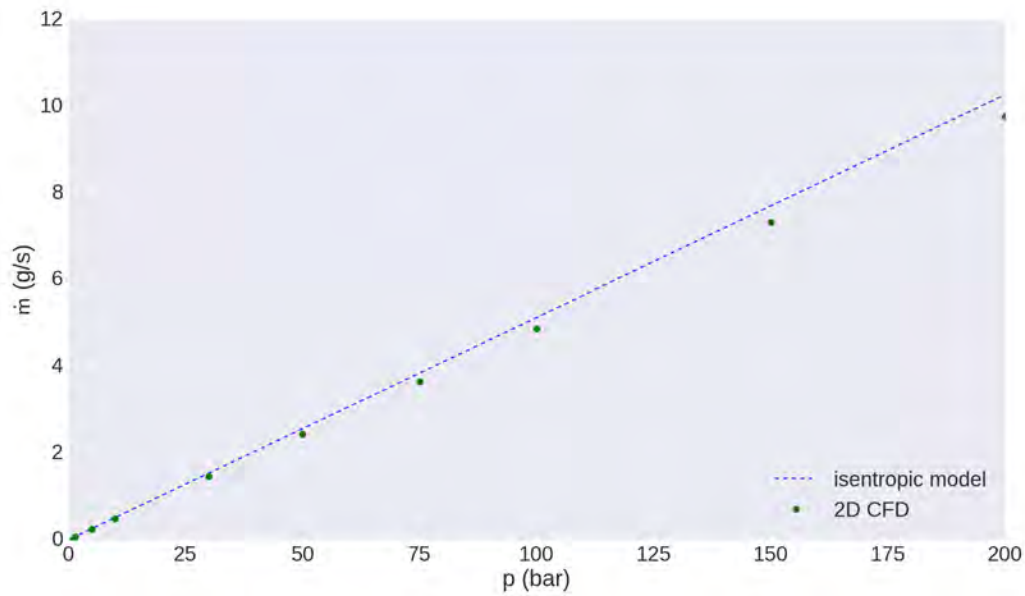
Pro výpočet hmotnostního toku isoentropického modelu byl uvažován výtokový koeficient 0,98. Tato hodnota vhodně reprezentuje geometrii výtokového otvoru v 2D modelu. Aby bylo možno porovnat hmotnostní toky oběma modely, musí být výtoková plocha stejná. CFD model je pouze 2D, výtoková plocha tak nemůže být kruhová o průměru 3 mm, ale odpovídá ploše obdelníku o výšce 3 mm a šířce odpovídající jedné buňce výpočetní sítě.

Dle očekávání (rovnice 3.4) je závislost hmotnostního toku plynu na tlaku v nadkritické oblasti lineární. Shoda mezi modely je velmi dobrá do tlaku 50 bar, pro vyšší tlaky hmotnostní tok isoentropickým modelem je vyšší než hodnota z 2D CFD modelu.

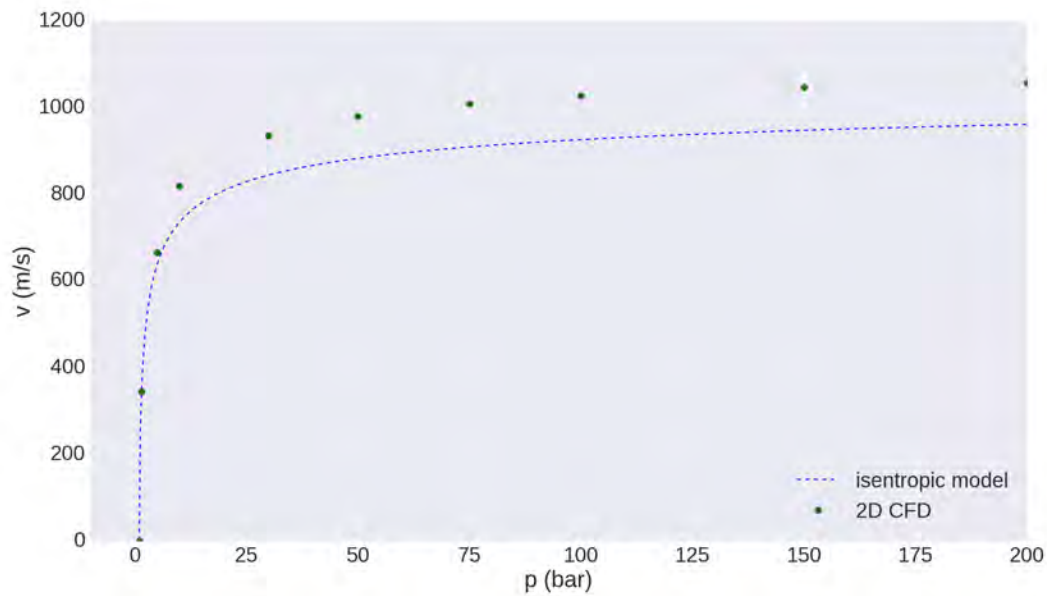
Nejvyšší hodnota hmotnostního toku metanu z nádrže o tlaku 200 bar je oběma modely předpovídána asi 10 g/s. Přeškalujeme-li hmotnostní tok získaný 2D CFD modelem na kruhovou plochu o průměru 3 mm, získáme hmotnostní tok přibližně 240 g/s. Stejná hodnota byla získána isoentropickým modelem, pakliže plocha odpovídala kruhové ploše o průměru 3 mm.

Z experimentů popsaných v sekci 2.2.2 známe neustálený hmotnostní tok metanu při počátečním tlaku v nádrži 200 bar, viz Obr. 2.13. Proložení dat byla získána přibližná maximální hodnota výtoku z šesti kruhových otvorů o průměru 3 mm 360 g/s. Budeme-li uvažovat, že výtok je rovnoměrný z každého výtokového otvoru, hmotnostní tok metanu z jednoho otvoru by pak byl přibližně 60 g/s. To je hodnota 3x nižší než předpovídá isoentropický a 2D CFD model. Rozdíl může být způsoben mnoha faktory. Skutečná hodnota hmotnostního toku metanu může být vyšší než je aproximovaná hodnota (hodnoty hmotnostního úbytku ihned po otevření pojistky mají velký rozptyl). Při průtoku metanu solenoidovým ventilem a tepelnou pojistkou dochází k významné tlakové ztrátě. Tlak, který je uvažován jako vstup do modelu, může být ve skutečnosti výrazně nižší než tlak v nádrži (viz sekce 3.2.7). Oba modely by potom výrazně

nadhodnocovaly hmotnostní tok. Další nejistota je do modelu vnášena odchylkou od neideálního chování plynu, která by se v tomto případě promítla v hodnotě výtokového koeficientu.



(a) Hmotnostní tok



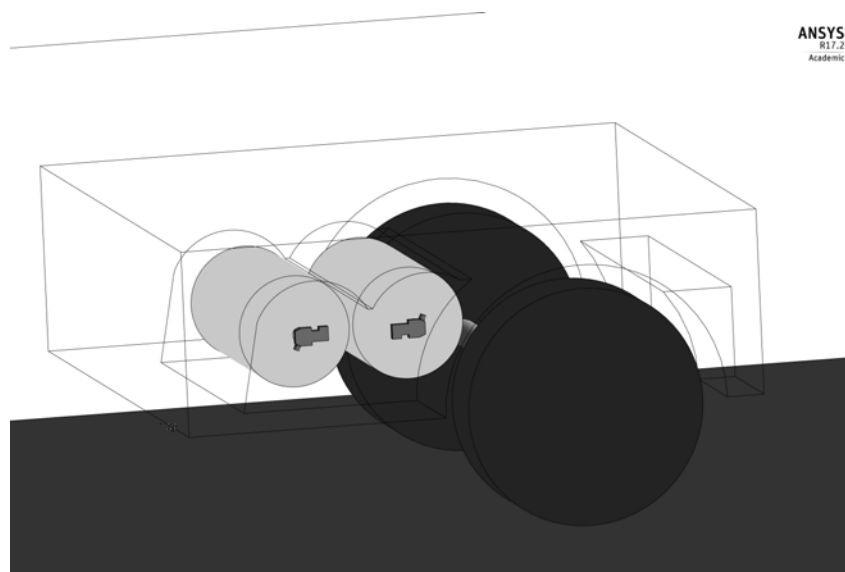
(b) Výtoková rychlost

Obrázek 3.14: Porovnání hmotnostního toku a výtokové rychlosti metanu vypočtené isentropickým modelem a 2D CFD modelem v celém rozsahu pracovního tlaku zásobníku.

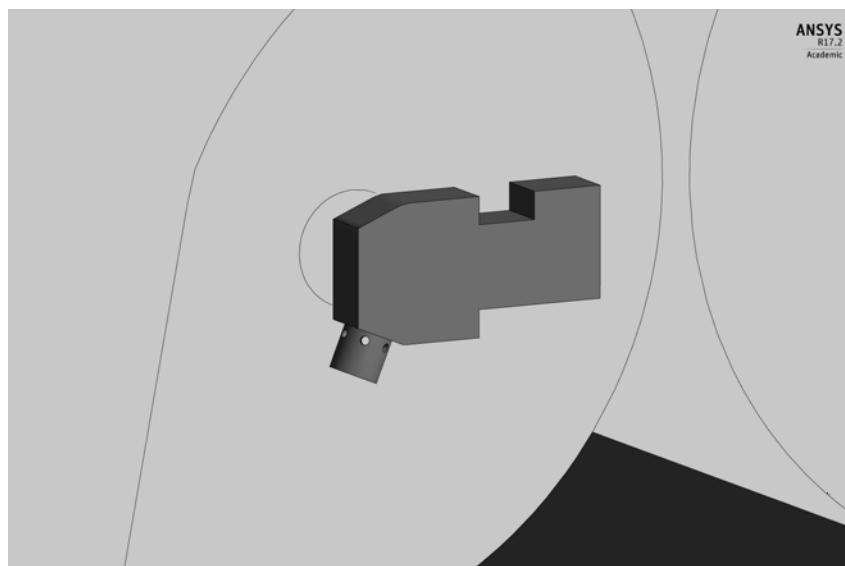
3.5 3D CFD model

3.5.1 Proudění plynu v okolí zadní části automobilu

Pro studium interakce proudu plynu s okolní geometrií vozidla byl vytvořen zjednodušený model zadní části vozidla se dvěma tlakovými lahvemi, každá osazená solenoidovým ventilem s bezpečnostní pojistkou, která má šest tří milimetrových otvorů (Obr. 3.15). Geometrie nejprve sahala 1 metr kolem hranice vozidla a končila těsně před zadními koly, jak je vidět na Obr. 3.15a. Později byla doména kolem vozidla zvětšena, aby bylo možno sledovat vznik jetu v oblasti za pravým kolem a vozidlo prodlouženo, aby zahrnovalo i body, kde byla rychlost měřena pod vozidlem tedy přibližně v půlce mezi předními a zadními koly. Geometrie lahví, ventilů ani jejich umístění se ale nezměnilo.

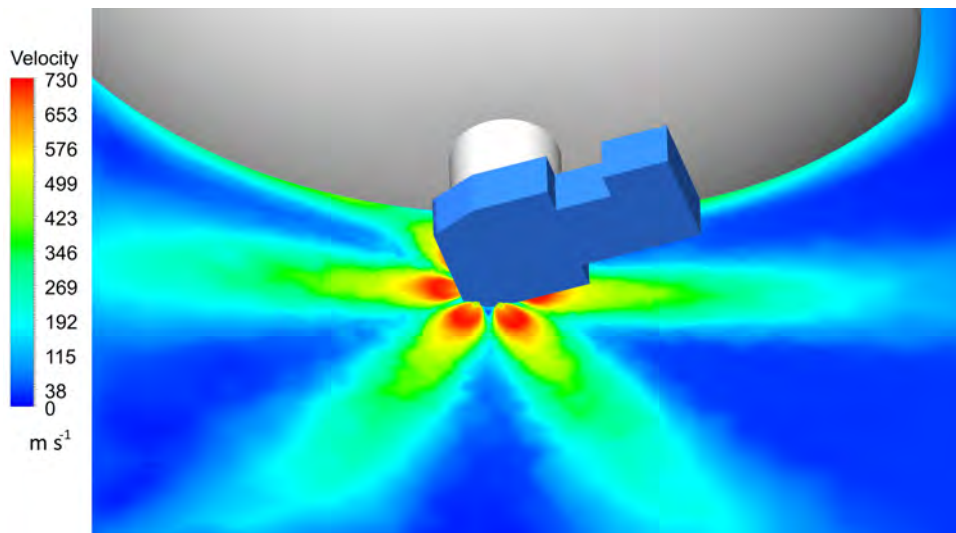


(a) Umístění lahví a zjednodušená geometrie zadní části vozu.



(b) Detail ventilu.

Obrázek 3.15: 3D geometrie palivového systému.



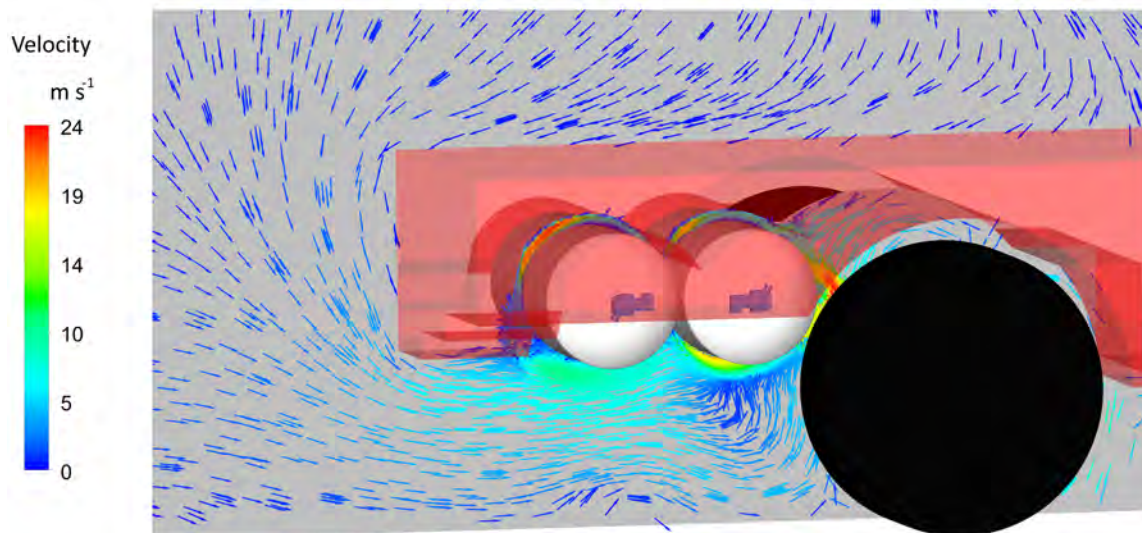
Obrázek 3.16: Rychlost proudění metanu v bezprostřední blízkosti výtokových otvorů, stacionární simulace 200 bar.

Výtok plynu z nádrže je neustálený. Byla provedena nestacionární simulace v software Ansys CFX s konstantním tlakem na vstupu plynu do pojistky 3, 30 a 100 bar. Výpočty jsou časově extrémně náročné a není možné spočítat reálný čas výtoku plynu, který se pohybuje v řádu desítek sekund. Nestacionárně byla spočítána řádově tisícina sekundy reálného výpočetního času.

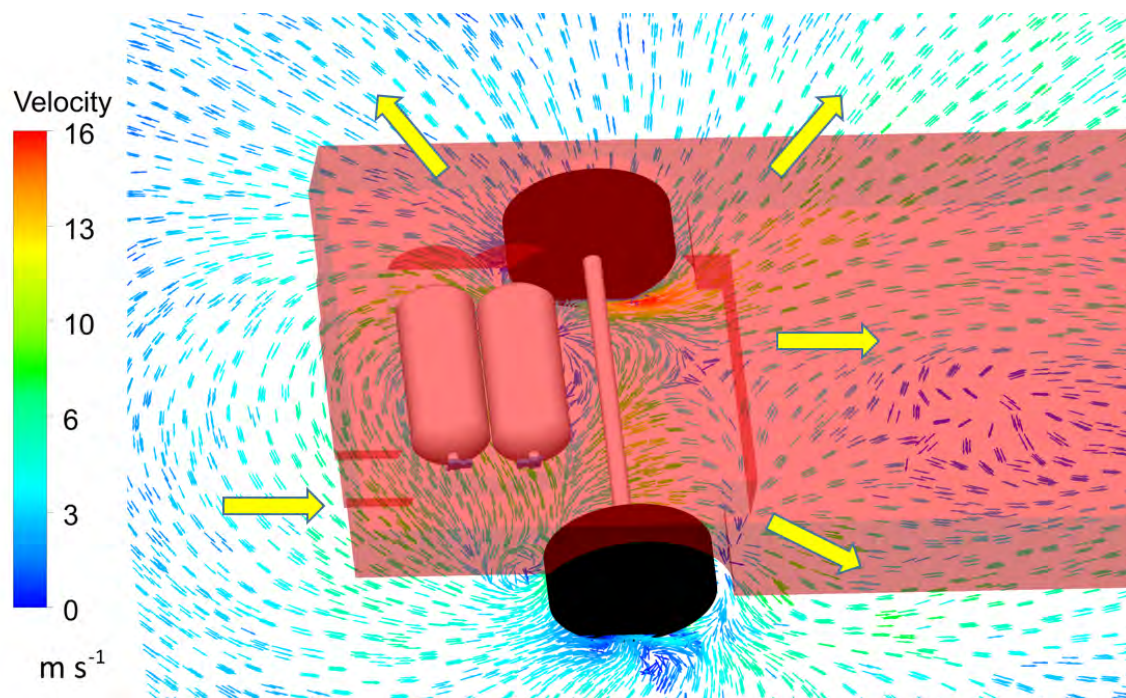
Pro odhad rychlosti proudění plynu na hranici automobilu, kde předpokládáme, že proud plynu již ztratil velkou část své hybnosti, byl proveden výpočet stacionární pro nejvyšší uvažovaný tlak v láhvi 200 bar. Na Obr. 3.16 je vidět, že za každým z šesti výtokových otvorů se vytvoří jasně ohraničený velmi rychlý proud plynu, tak jak bylo pozorováno při experimentech vypouštění vzduchu z nádoby nebo při experimentech s vypouštěním metanu, kdy tepelná pojistka nebyla ohraničena žádnou konstrukcí.

Rychle proudící plyn ale brzy narazí do konstrukčních částí vozidla, lahví samotných a do země, dochází k intenzivnímu míchání a ztrátě hybnosti. Na Obr. 3.17 je ukázáno vektorové pole rychlosti v bočním pohledu přibližně v polovině tlakových lahví ze strany ventilu a v řezu těsně nad zemí. Porovnání směrů proudění s experimentálními daty naměřenými v rámci projektu na Hydromechanickém ústavu AV ČR, viz Obr. 2.30, ukazuje velice dobrou shodu. Model předpovídá vznik víru v okolí tlakových lahví, nasávání vzduchu v levé zadní části automobilu, vytlačování směsi vzduchu s metanem na levé zadní straně vozidla a směrem dopředu pod vozidlem. Rychlost proudění uvedená na Obr. 2.30b nebyla měřena při tlaku v nádrži 200 bar, ale při tlaku nižším, který se lišil v různých měřených místech. Přesto je ale vidět, že rychlost proudění na hranici automobilu předpovězená modelem se řádově shoduje s naměřenými hodnotami. Při konstantním tlaku plynu v láhvi 200 bar model předpovídá rychlost proudění vzduchu a směsi vzduchu s metanem v řádech jednotek metrů za sekundu. Shoda s experimentem také ukazuje, že zjednodušená geometrie samotného ventilu dokáže reálně zachytit tlakovou ztrátu při průtoku metanu pojistkou a je tak zajištěna odpovídající okrajová podmínka pro vstup metanu do výpočetní domény.

Z experimentálních dat víme, že za pravým zadním kolem na straně nádrží, kde jsou umístěny tepelné pojistky, vzniká jet. Pakliže je v modelu uvažována spodní hranice automobilu bez bočního nárazníku, stacionární model vznik jetu zachycuje. V 3D modelu, ale nejsou otvory tepelné pojistky natočeny identicky jako v experimentu, kde byla měřena rychlost proudění jetu. V modelu směřují směrem ven z pod automobilu dva otvory a model predikuje dva jety, jak je



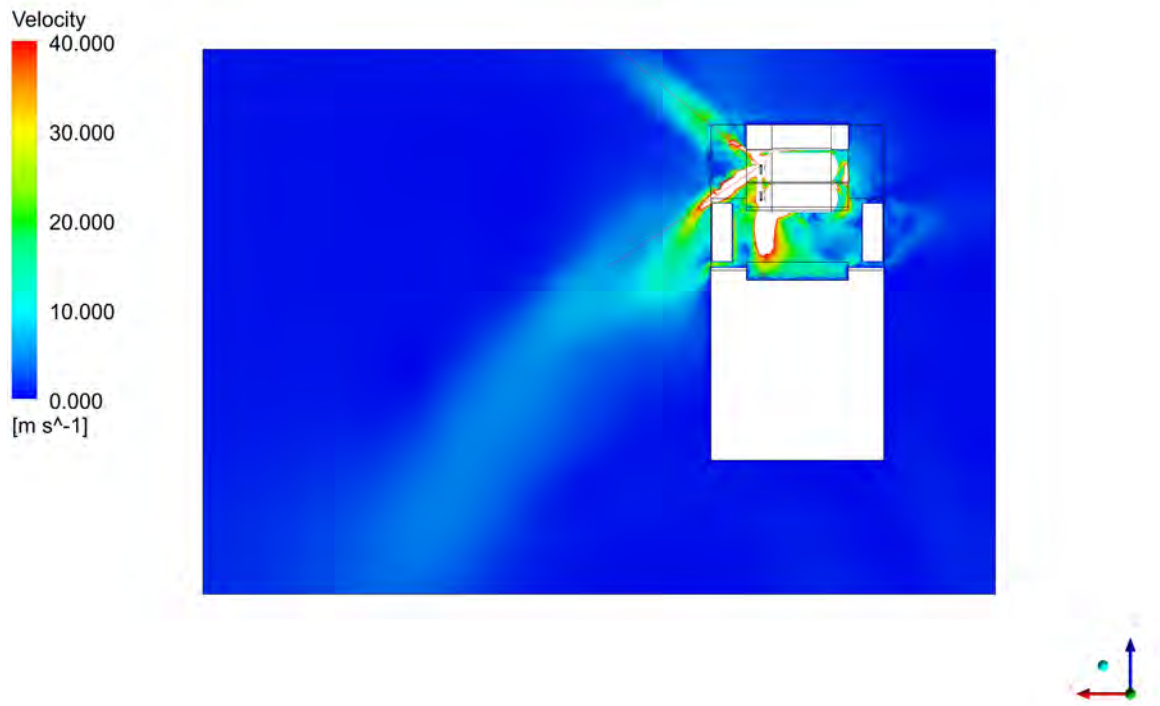
(a) Boční řez.



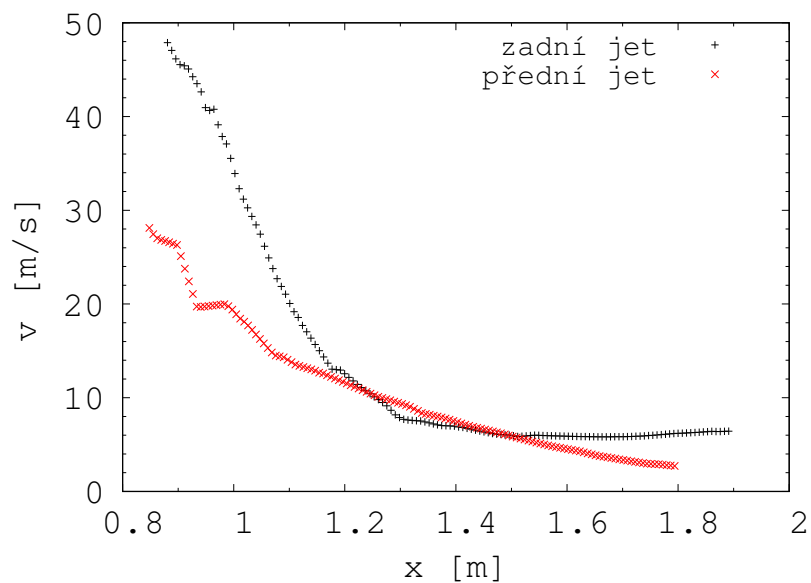
(b) Směry proudění plynu na hranici vozidla.

Obrázek 3.17: Rychlostní pole v okolí nádrží a zadní části automobilu. Stacionární simulace, tlaková okrajová podmínka 200 bar na vstupu do tepelné pojistky.

vidět na Obr. 3.18a. Na Obr. 3.18b je uvedena rychlost proudění podél vyznačených os středu jetu, promítnuté do směru osy x ve vzdálenosti těsně od hranice automobilu do cca 2 metrů. Rychlost za hranicí automobilu dosahuje téměř 50 m/s pro jet směřující dozadu a téměř 30 m/s pro jet směřující k zadnímu kolu. Jet směřující ke kolu má nižší rychlost, protože se částečně rozbíjí o zadní kolo. Rychlosti predikované modelem řádově odpovídají rychlosti jetu změřeného experimentálně viz Obr. 2.30b.

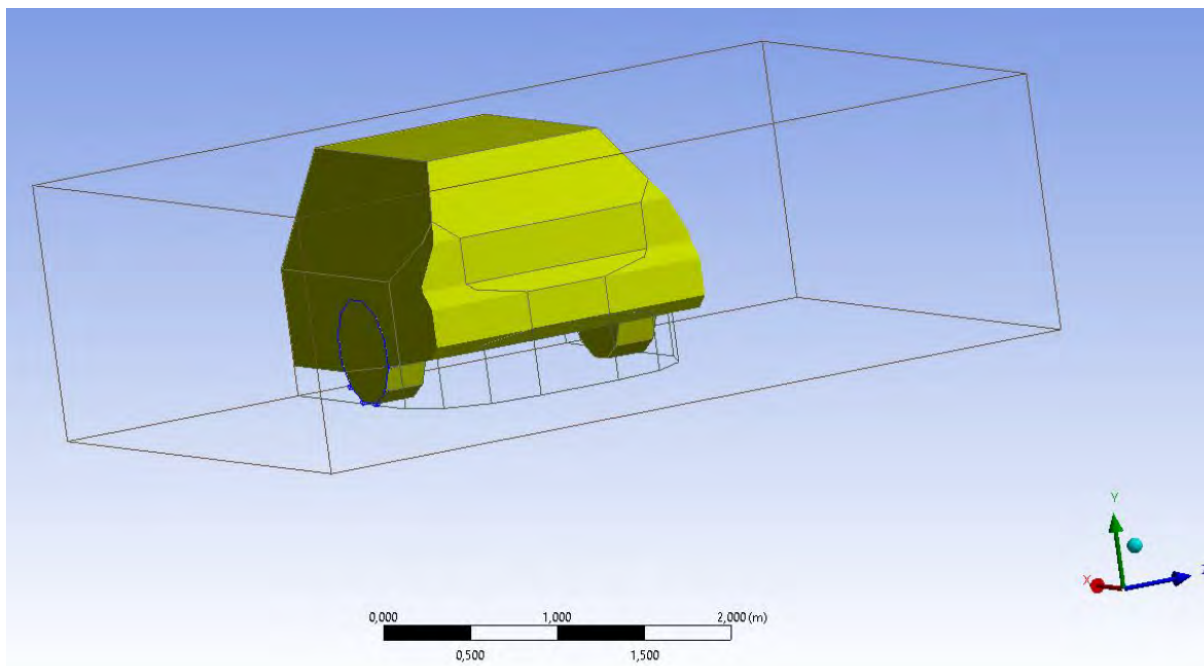


(a) Řez rychlostního pole rovnoběžně s rovinou země ve výšce otvorů tepelné pojistky s vyznačenou osou středu dvou jetů.



(b) Rychlost proudění podél osy středu jetu ve vzdálenosti promítnuté do směru osy x.

Obrázek 3.18: Řez rychlostním polem a rychlost podél osy jetu pro 3D CFD simulaci v softwaru CFX s tlakem v nádrži 200 bar.



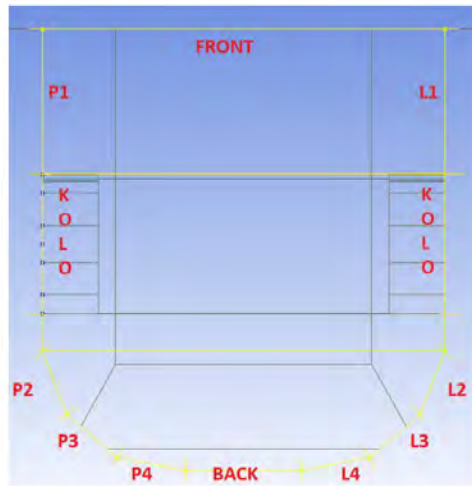
Obrázek 3.19: Geometrie zadní části vozidla. Převzato z [3].

3.5.2 Rychlostní okrajová podmínka na hranici vozidla

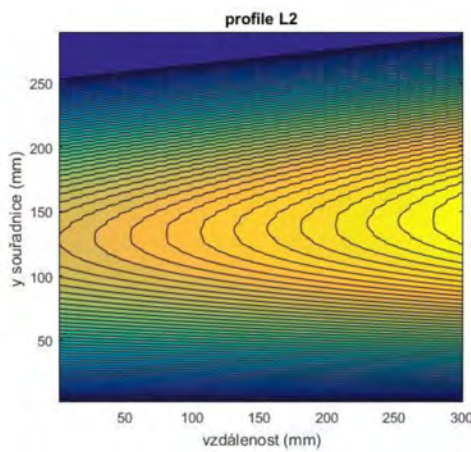
Další studovanou oblastí bylo využití naměřených dat o rychlosti a směrech proudění plynu (sekce 2.5.2) pro sestavení rychlostní okrajové podmínky do CFD řešiče, která by byla umístěna na hranici zadní části automobilu. V rámci diplomové práce Václava Karáska [3] byla data z experimentu zpracována pomocí softwaru Matlab tak, aby byly vytvořeny rychlostní profily, které lze načíst do softwaru Fluent a mohl tak být nahrazen "bodový" zdroj úniku metanu z tepelné pojistky.

Byla vytvořena zjednodušená geometrie zadní části vozu a okolí (Obr. 3.19). Obvod vozidla byl rozdělen celkem na 10 oblastí, pro každou z nich byl vytvořen rychlostní profil. Rychlostní profil do softwaru Fluent nemohl být načten přímo z experimentálních dat, protože obsahovaly příliš málo bodů pro vytvoření 2D profilu. K vytvoření 2D profilu bylo třeba data proložit. Byla použita dvouступňová regrese. V prvním kroku byla vytvořena regresní závislost rovnoběžně s hranicí vozidla podél celé délky každé zóny pomocí splinu. Některé zóny obsahovaly pouze dva experimentální body, většina pak tři a některé až 7 bodů. V druhém kroku byl každý bod z předchozí regrese proložen ve směru od země k podvozku za předpokladu, že u podvozku je rychlost proudění nulová a rychlostní profil proudění je parabolický. Umístění jednotlivých profilů a ukázka dvou rychlostních profilů, definovaných v modelu jako okrajová podmínka typu "velocity-inlet", v zadní části vozidla je na Obr. 3.20.

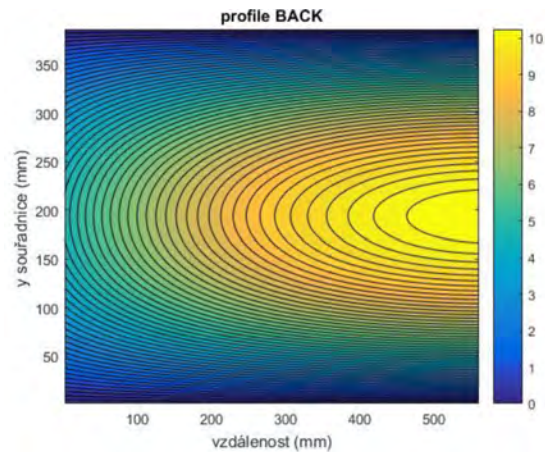
Všechny zóny pod podvozkiem kromě kol byly v simulaci definovány pomocí vytvořených profilů. Všechny stěny kromě podlahy byly definovány jako okrajová podmínka typu "pressure-outlet". Simulace byla stacionární. Výstupy simulace byly jako kontury rychlosti (Obr. 3.21) a jejich složek kolem celé části podvozku porovnány s naměřenými daty pro kontrolu správnosti směru proudění a dosažených rychlostí proudění. Kontury rychlosti potvrdily, že model správně zachycuje nasávání vzduchu v zadní části vozidla i výfuk v oblasti kol a směrem dopředu pod vozidlo. Shoda rychlosti proudění v simulaci a experimentech je různě dobrá podle místa v geometrii. Odchytky vznikají z několika důvodů. Prvním je nepřesnost experimentálních dat, respektive nesterjný tlak, při kterém byla rychlost měřena. Dalším důvodem je pak nízký



(a) Rozmístění jednotlivých rychlostních profilů kolem hranice vozidla.



(b) Rychlostní profil L2.

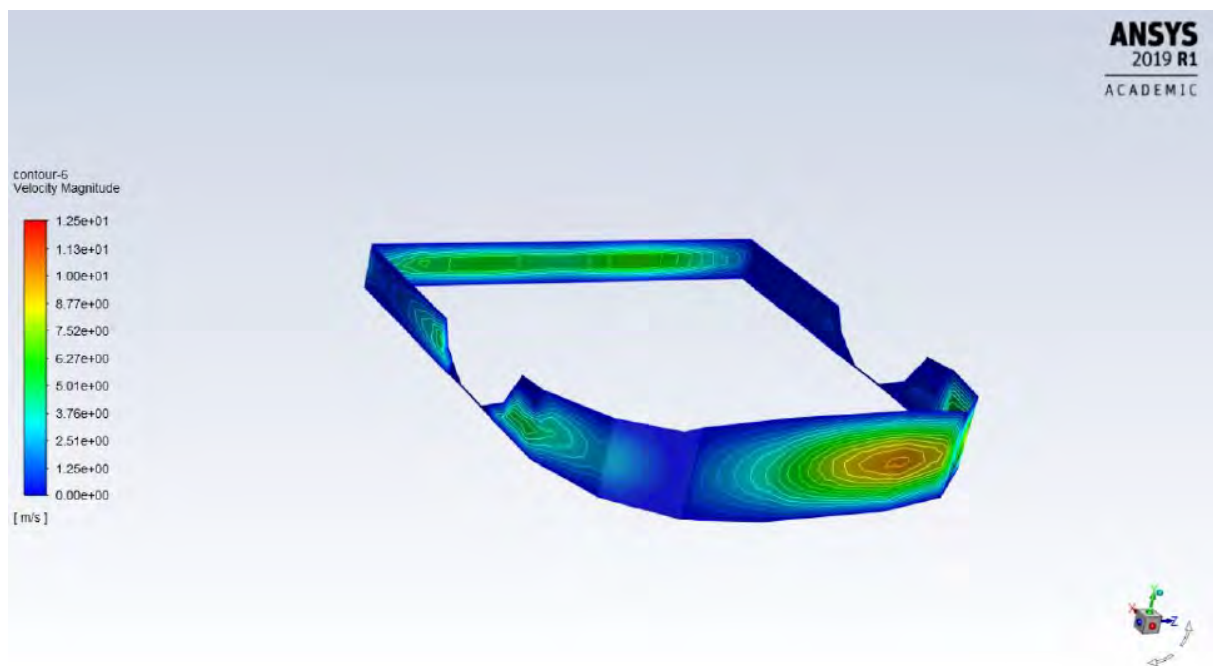
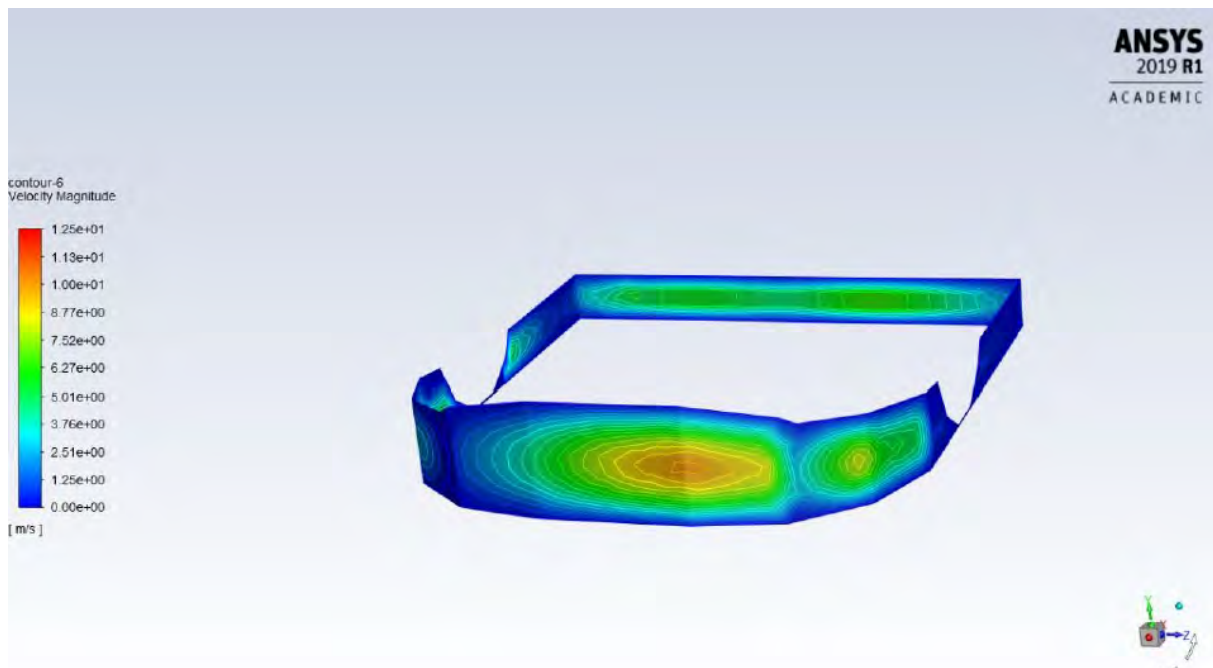


(c) Rychlostní profil "BACK"

Obrázek 3.20: Rychlostní profily jako okrajová podmínka do CFD modelu. Převzato z [3].

počet bodů, ze kterých byl profil vytvořen v některých zónách a dále zavedení předpokladu parabolického proudění.

Pro získání přesnějšího rychlostního profilu jako okrajové podmínky by bylo třeba výrazně většího počtu měřených bodů a to zejména v místech, kde dochází ke změně směru proudění a v oblasti kol. Měření by bylo také třeba provést ve více výškových úrovních pod vozidlem. Obecně lze ale říci, že tento přístup lze použít pro kvalitativní posouzení dynamiky proudění plynu v okolí vozu a dále sledovat jeho disperzi do okolí. Hlavním problémem, který brání využití tohoto modelu ve smyslu hledání oblastí, kde je dosaženo mezí hořlavosti metanu, jeho iniciace nebo studia chování dynamiky hoření je to, že plyn proudící z pod automobilu není čistý metan. Experimentem bylo ukázáno, že proudění v oblasti kolem vozidla a pod vozidlem je velmi dynamické, dochází k intenzivnímu míchání vytékajícího plynu z pojistky a okolního plynu pod automobilem v bezprostřední blízkosti tlakových nádob a z pod automobilu již teče směs metanu a vzduchu. Ačkoliv tedy známe směry a rychlosti proudění směsi, neznáme její koncentraci.



Obrázek 3.21: Kontura rychlosti na hranici automobilu.

3.5.3 Disperze plynu v garáži

3D CFD simulace popsaná v sekci 3.5.1 uvažovala otevřený prostor kolem automobilu. Hlavním cílem simulace bylo získat představu o rychlosti a směrech proudění metanu. V praxi je jedním z často diskutovaných problémů parkování CNG vozidel v uzavřených garážích. V takovém případě po úniku plynu dochází k interakci s okolní infrastrukturou, tedy dalšími vozidly, stěnami a jinými konstrukčními částmi garáží, ale také se systémy odvětrání garáží. Největší obavou v případě úniku v uzavřených garážích je akumulace plynu v určitých částech garáže a vznik výbušného mraku metanu. 3D CFD simulace pak může sloužit jako model pro návrh a validaci detekce unikajícího metanu a jeho odvětrání.

Pro uzavřené garáže, do kterých bude povolen vjezd vozidel na plynná paliva, musí být navrženo tzv. havarijní větrání. Havarijní větrání je aktivováno plynovými detektory a je vždy nucené. Havarijní větrání musí zajistit nejméně šestinásobnou výměnu venkovního vzduchu za hodinu ve vyhrazeném úseku pro vozidla s plynnými palivy, nebo v celé garáži. Havarijní větrání není požadováno u jednotlivých garáží, ze kterých má vozidlo možnost vyjet na volné prostranství.

V rámci projektu byl sestaven 3D CFD model hromadné uzavřené podzemní garáže, jejíž vyhrazená část je určena pro parkování vozidel na CNG. Model byl vytvořen v softwaru Ansys Fluent a FLACS. Geometrie garáže byla vytvořena podle skutečného návrhu podzemních garáží bytového domu. Půdorys garáže byl 20×17 m s výškou stropu 3,3 m. Garáž byla vybavena zakladačovým systémem a její celková kapacita je 32 automobilů, z toho 8 míst je vyhrazeno pro vozidla na CNG.

V případě podzemní garáže je spíše než požár CNG vozidla nebo jiného vozidla v jeho blízkosti, který by inicioval únik plynu přes tepelnou pojistku, uvažován únik metanu netěsností ve vysokotlaké části palivové soustavy. Stejně jako v případě úniku přes tepelnou pojistku, rychlost úniku metanu netěsností je velmi obtížné stanovit. Jako odhad hmotnostního toku plynu do domény posloužila data z měření popsaného v sekci 2.3.1 (Obr. 2.15b - experiment jedna). Výtok vzduchu v experimentu sice probíhal přes otvory tepelné pojistky, ale byl výrazně přiškrčen. Doba úniku vzduchu z celého objemu nádrže při 200 barech byla 20 minut, což je přibližně 10× déle než při nepřiškrčeném úniku. Únik plynu je neustálý, CFD model byl ale počítán jako stacionární. V tabulce 3.2 je uveden průměrný hmotnostní úbytek vzduchu každých 50 sekund od počátku výtoku do 450 sekund po zahájení výtoku vzduchu. Na základě těchto dat byla v modelu zvolena zjednodušená okrajová podmínka toku metanu do domény a to 44 g/s prvních 50 sekund a dále 38 g/s.

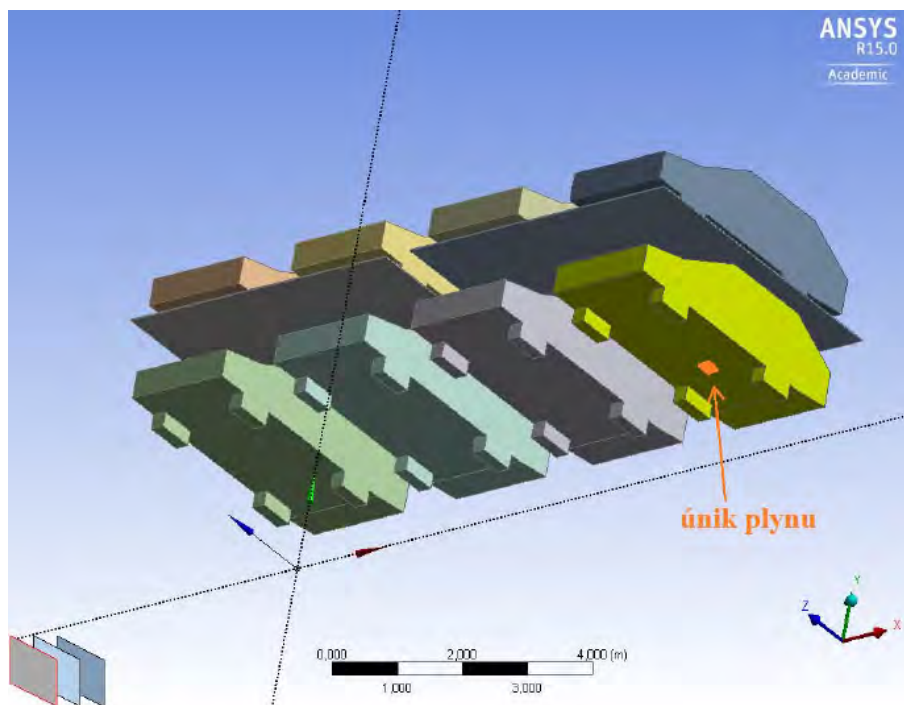
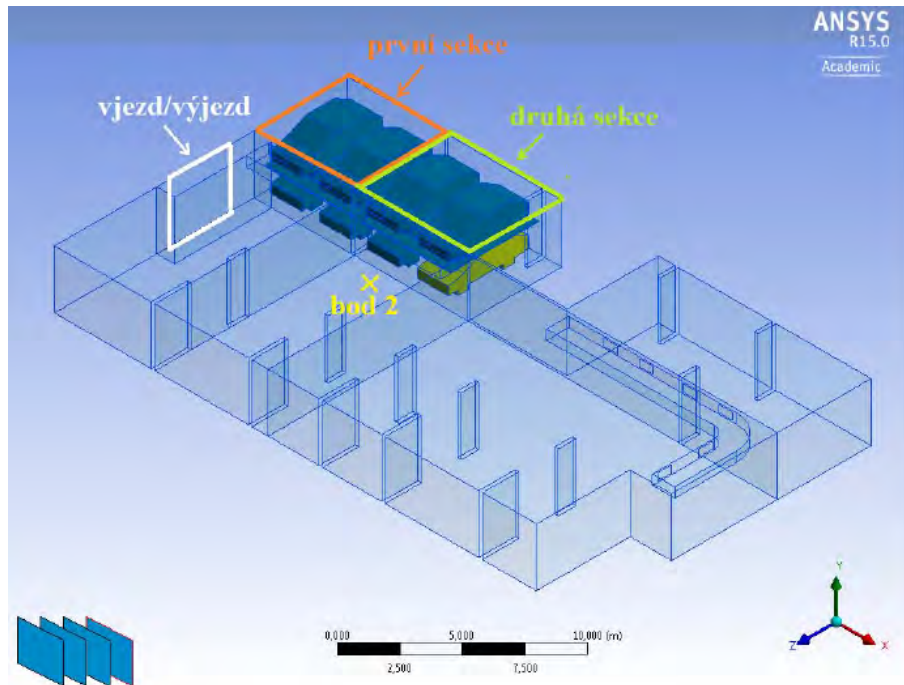
Tabulka 3.2: Hmotnostní tok vzduchu z experimentu popsaného v sekci 2.3.1 - experiment jedna.

čas (s)	Průměr (g/s)	čas (s)	Průměr (g/s)
0 - 50	-38,66	250 - 300	-13,32
50 - 100	-41,41	300 - 350	-11,465
100 - 150	-28,205	350 - 400	-9,885
150 - 200	-20,795	400 - 450	-8,13
200 - 250	-16,245		

Fluent

V rámci diplomové práce N. Kubečkové [7] byl vytvořen model v programu ANSYS Fluent. Model popisuje disperzi plynu od zdroje úniku, který představovala netěsnost vysokotlaké části palivové soustavy z vozidla, které bylo nejdál od vjezdových/výjezdových vrat. V geometrii byla zahrnuta pouze vozidla na CNG. Další parkovací místa byla prázdná. Výtokovou plochou byl

obdelníkový otvor o velikosti 15×20 cm. Jeho velikost byla zvolena pouze odhadem. Geometrie garáže, umístění vozidel a místo úniku jsou ukázány na Obr. 3.22.



Obrázek 3.22: Geometrie patra podzemní garáže s osmi vozidly na plynná paliva s vyznačením místa úniku plynu, vjezdu a výjezdu z garáže a sekcí pro vyhodnocení dat. Upraveno z [7].

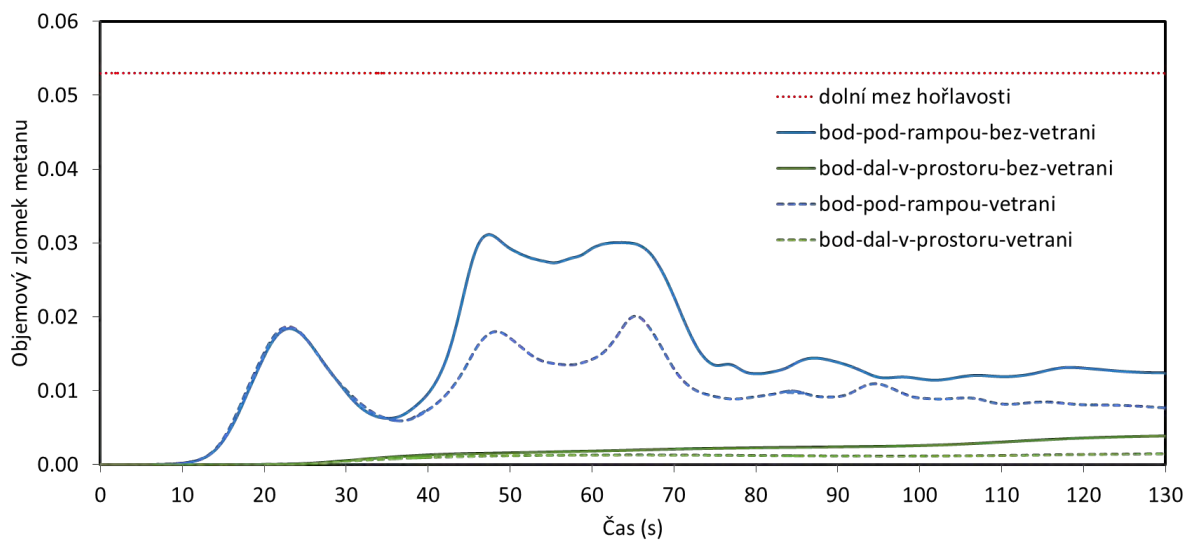
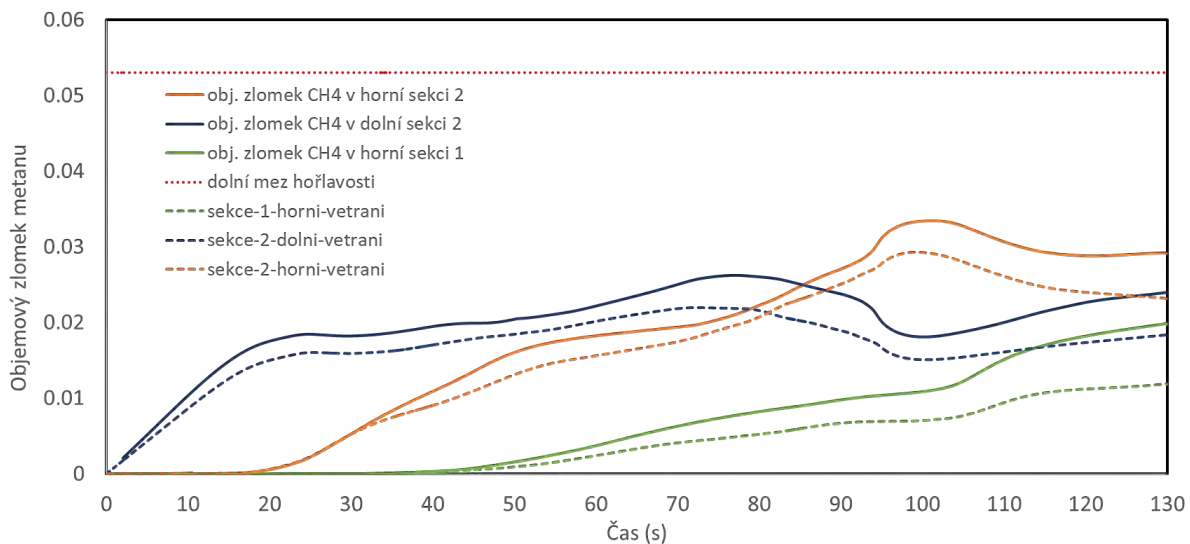
Výtokový plyn byl čistý metan. Vzduch v garáži byl pro zjednodušení uvažován jako směs kyslíku a dusíku. Předpokládaná doba výtoku metanu podle experimentálních dat je 20 minut (1200 sekund). V rámci diplomové práce bylo spočítáno pouze 130 sekund simulace.

V diplomové práci nebyla v modelu zahrnuta nucená ventilace. Tato varianta odpovídá nejhoršímu možnému scénáři z hlediska hromadění plynu v garáži a lokálnímu nárůstu koncentrace plynu. Výměna plynů a nasávání vzduchu mohlo v modelu probíhat pouze přes vjezdová/výjezdová vrata. Okrajová podmínka na vstupních vratech byla typu "pressure outlet" se statickým tlakem na výstupu 101325 Pa, únik plynu byl definován jako okrajová podmínka typu "mass flow inlet". V pozdější práci byla geometrie doplněna ventilací dle skutečných parametrů ventilace garáže.

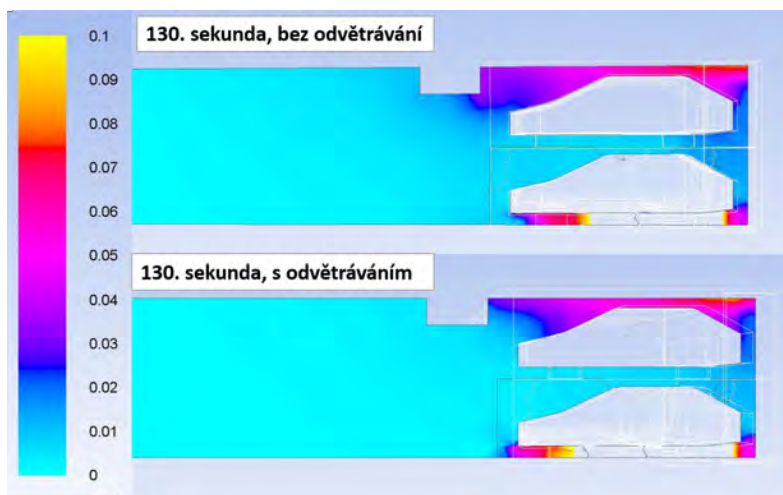
Na obrázku 3.23 je vývoj hodnoty objemového zlomku metanu v prvních 130 vteřinách simulace s a bez nucené ventilace v první a druhé sekci garáže a v bodě, jak je vyznačeno na Obr. 3.22 a dále v bodě 1, který se nachází přímo nad vozem, ze kterého metan uniká. Objemový zlomek je váženým průměrem vztaženým na objem horní nebo dolní sekce nebo na plochu bodu. Objemový zlomek metanu narůstá postupně nejdříve v dolní sekci 2, kde dochází k úniku metanu. Metan stoupá nahoru a přibližně po 20 vteřinách od počátku úniku metanu začíná narůstat objemový zlomek metanu i v horní sekci 2 garáže a za dalších přibližně 20 sekund i v horní části sekce 1 garáže. Bez nucené ventilace se přibližně v čase 85 sekund začíná metan pod stropem akumulovat a objemový zlomek metanu v horní sekci 2 roste rychleji než v dolní sekci. V případě nucené ventilace mají křivky stejný tvar, ale jsou dosaženy nižší hodnoty objemového zlomku metanu. Obdobný průběh je vidět i ve dvou vybraných bodech. Přímě nad vozidlem hodnota objemového zlomku metanu silně kolísá. V bodě dvě hodnota velmi pozvolně narůstá. V případě nucené ventilace nedochází ke změně směru proudění plynu, objemový zlomek metanu v bodě jedna osciluje stejně jako bez nucené ventilace, ale jeho hodnota je téměř poloviční.

Globálně koncentrace metanu v sekci 1 ani 2 díky způsobu vyhodnocení objemového zlomku, a ani ve dvou vybraných bodech nedosáhla do času 130 sekund spodní meze hořlavosti metanu. Podíváme-li se ale na kontury objemového zlomku metanu ve 130. sekundě (Obr. 3.24), je vidět, že lokálně dochází k nebezpečné akumulaci metanu nad dolní mezí hořlavosti a to zejména pod stropem a v rozích u sloupků. Barevná škála objemového zlomku metanu je od 0 do 0,1 obj. %, nad hodnotou 0,05 obj. %, tedy oblasti od fialové přes červenou až po žlutou, se jedná o oblasti s koncentrací metanu nad dolní mezí hořlavosti. Bíle zbarvené oblasti pod automobilem pak odpovídají koncentraci metanu vyšší než 0,1 obj. %. Porovnáme-li účinek nucené ventilace, je vidět, že s nucenou ventilací se metan akumuluje pod stropem méně (Obr. 3.24a) a koncentrace metanu dál od místa úniku je nižší (Obr. 3.24b). Zároveň ale lokálně dochází ke zvýšení koncentrace metanu díky vyvolanému proudění (Obr. 3.24c).

Z uvedených výsledků je vidět, že globální posouzení vzniku výbušné atmosféry je obtížné díky možnosti lokálního nárůstu koncentrace metanu. CFD simulace může být s výhodou využita pro odhalení míst, kde může docházet k lokálnímu nárůstu koncentrace metanu nad mezí hořlavosti a návrhu umístění plynových detektorů.



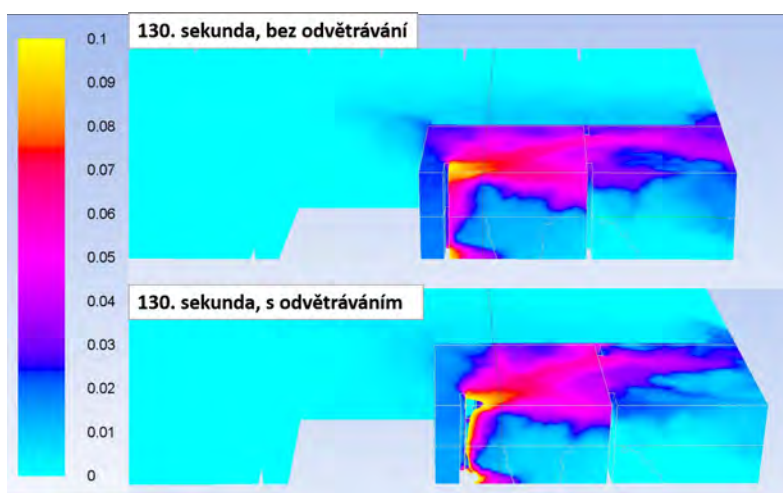
Obrázek 3.23: Objemový zlomek metanu v prvních 130 vteřinách simulace v programu Fluent ve dvou sekcích garáže a ve dvou vybraných bodech. Porovnání scénáře bez nucené ventilace (plná čára) a s nucenou ventilací (přerušovaná čára). Upraveno z [7].



(a) Řez podél osy z.



(b) Řez podél osy y.

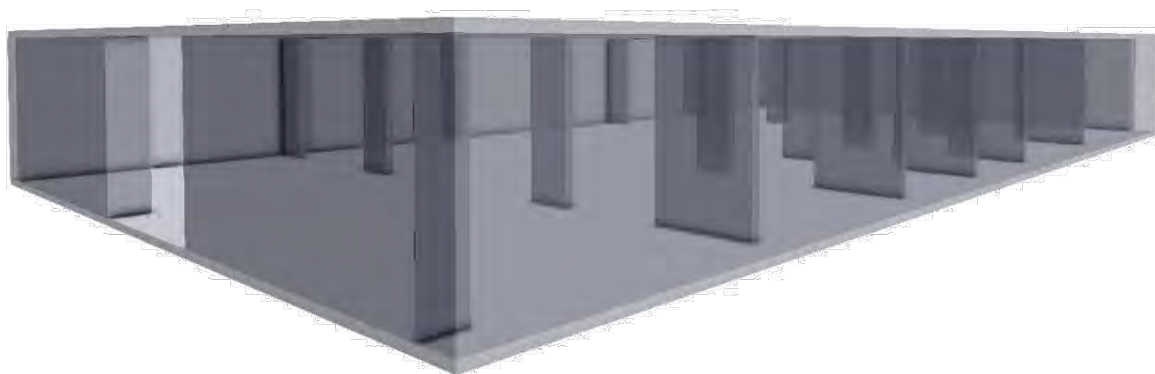


(c) Pohled z venku.

Obrázek 3.24: Kontura objemového zlomku metanu ve 130 sekundě simulace v programu Fluent, porovnání scénáře bez nucené ventilace a s nucenou ventilací. Upraveno z [7].

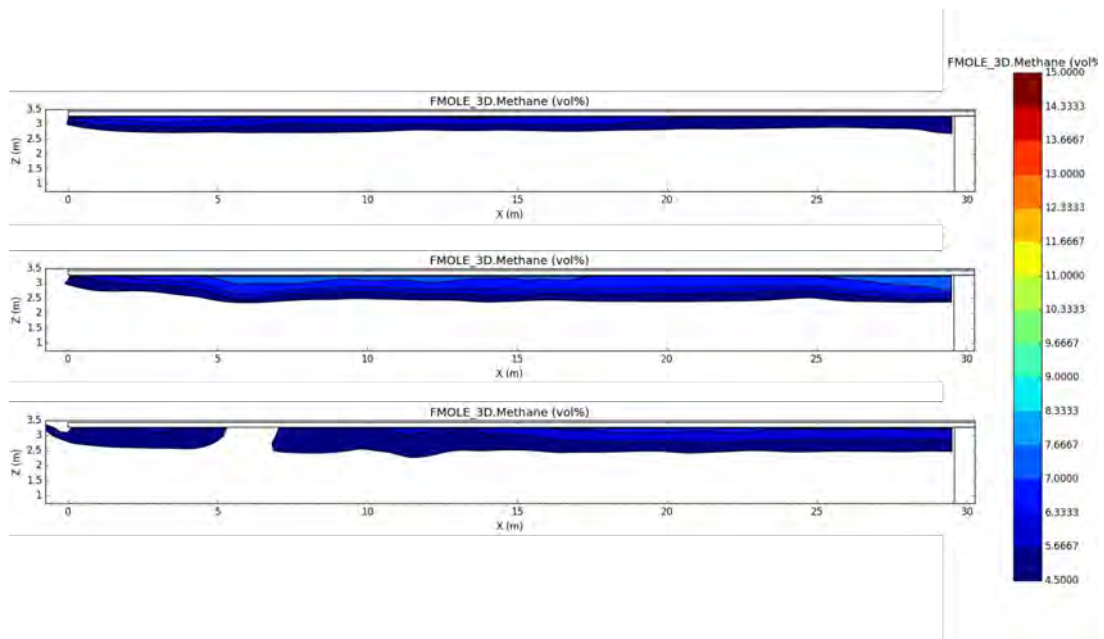
FLACS

Prvotním záměrem byl import kompletního nastavení popsaného v předchozí sekci, tak aby bylo možné výsledky ze softwaru FLACS a Fluent co nejlépe srovnat. Tento přístup nebyl z důvodů kompatibility sítě možný. SW Flacs používá z důvodů zjednodušení pouze strukturovanou výpočetní síť, která však nebyla použita v řešiči Ansys Fluent z důvodu komplexnosti geometrie. Import tedy nebyl možný. Pro výpočet v softwaru FLACS musela být geometrie garáže zjednodušená. Nebyl modelován zakladačový systém a geometrie jednotlivých zaparkovaných vozů. Také byl modelován pouze scénář bez nucené ventilace. Byl použit řešič FLACS-DISPERSION, který je určen pro simulaci disperze plynů a par v uzavřených i otevřených doménách. Použitá doména měla tvar kvádrů o rozměrech $30 \times 17 \times 3$ metry, s otvorem velikosti $3,5 \times 3$ metry v menší boční hraně, který simuloval vjezdová vrata a byl jediným otvorem umožňujícím proudění plnů vně a dovnitř domény. Uvnitř geometrie byly vytvořeny přepážky simulující jednotlivá parkovací stání. (Obr. 3.25) Výpočetní doména byla na každou stranu rozšířena o 1 metr, vyjma směru s otvorem, který byl ve směru osy x rozšířen o 6 metrů, tak aby se vznikající proud plynu nebo plamen mohl stabilizovat. Pro disperzní scénář byl modelován únik čistého methanu z otvoru o velikosti $0,5 \times 0,5$ metru, směřovaný vzhůru s hmotnostním průtokem $0,044$ kg/s a s dobou trvání 1200 sekund. V čase 400, 800 a 1200 sekund byl vytvořen soubor s parametry rozptýleného mraku pro provedení výbuchového scénáře.

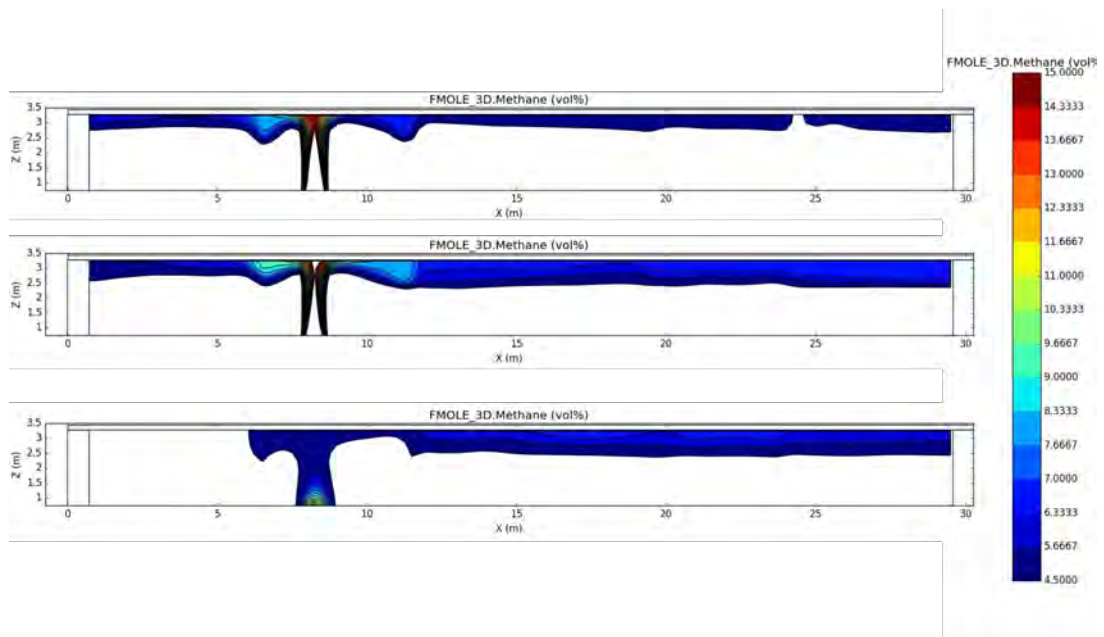


Obrázek 3.25: Geometrie uzavřené garáže bez zakladačového systému v softwaru FLACS.

Na obrázku (Obr. 3.26a) je znázorněn vypočtený objemový zlomek methanu v rovině protínající přibližně střed garáže postupně v čase 400, 800 a 1200 sekund. Na obrázku (Obr. 3.26b) je znázorněn vypočtený objemový zlomek methanu v rovině místa úniku methanu, opět postupně v časech 400, 800 a 1200 sekund. Rozsah barevné škály odpovídá rozsahu výbušnosti metanu. Z řezů je patrný postupný rozvoj mraku plynu držícího se u stropu garáže. Koncentrace mraku se pohybuje kolem dolní meze výbušnosti methanu. V řezu procházejícím přímo místem úniku je patrná místa i vyšší koncentrace pohybující se v jádře "jetu" nad hranicí horní meze výbušnosti (Obr. 3.26b). Plyn se ale velmi rychle rozptýluje do okolí. Je patrné, že oproti výsledkům simulace sw Ansys Fluent, byl díky absenci překážek v podobě garážovaných automobilů vzniklý proud plynu kompaktní. Obě simulace shodně ukazují postupný pohyb mraku plynu směrem k vratům garáže. Vzniklý mrak není homogenní, koncentrace plynu se pohybuje v hodnotách kolem dolní meze výbušnosti, jak je patrné na obrázcích (Obr. 3.27a) a (Obr. 3.27b), který ukazuje objemový zlomek methanu v bodech umístěných v půdorysném středu garáže (Obr. 3.27b) a uprostřed simulovaného místa úniku (Obr. 3.27a) ve výškových úrovních 1, 2 a 3 metry.

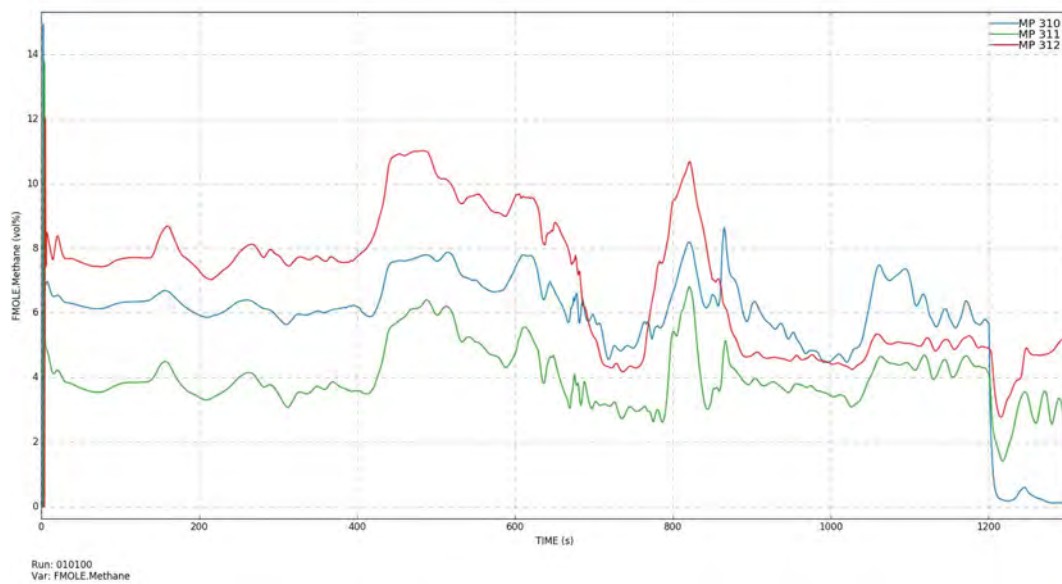


(a) Řez Y=8,88 m.



(b) Řez Y=15,38 m.

Obrázek 3.26: Objemový zlomek metanu ve dvou podélných řezech garáží v čase 400, 800 a 1200 sekund.



(a)

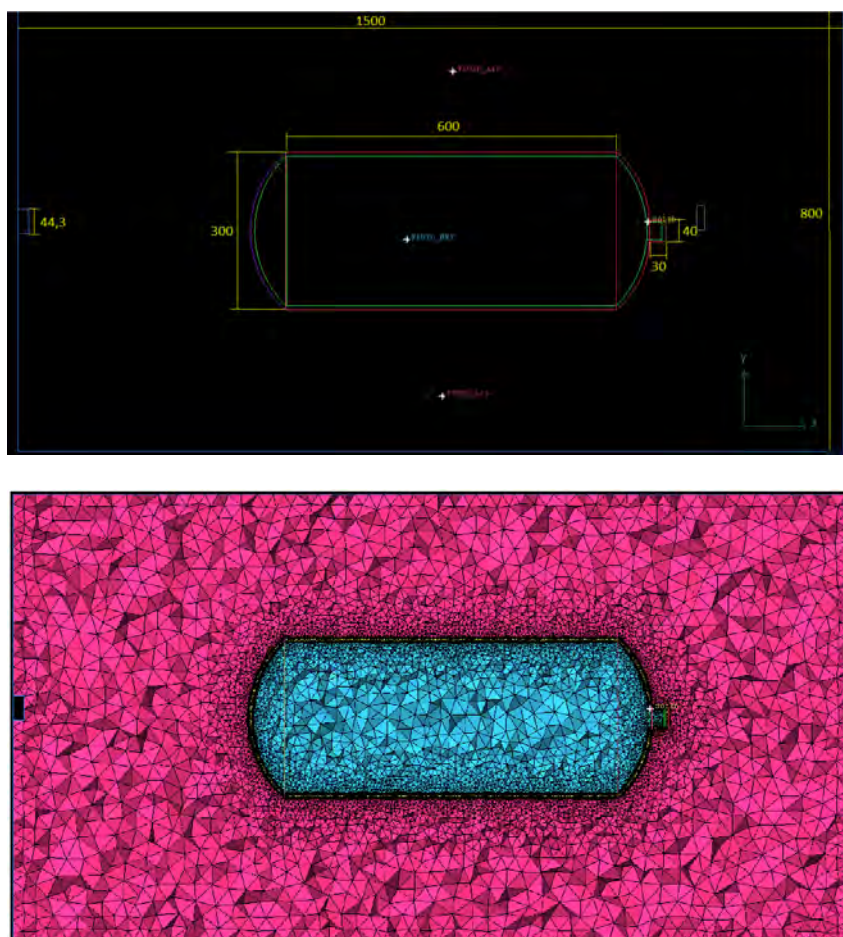


(b)

Obrázek 3.27: Objemový zlomek metanu v bodě odpovídajícímu půdorysnému středu garáže a v bodě odpovídajícímu půdorysnému středu místa úniku ve výškových úrovních 1, 2 a 3 metry.

3.6 Lokální ohřev

3D CFD model lokálního ohřevu tlakové láhve byl vytvořen dle experimentů popsanych v sekci 2.4. Model byl vytvořen v softwaru Ansys Fluent v rámci diplomové práce Anny Čížinské [11]. Výpočetní úlohu nebylo možno zadat totožně s experimentem. Řešič pro výpočet časově proměnného tlakového pole "Floating Operating Pressure", který byl vyvinut speciálně pro výpočty změny tlaku se změnou teploty v uzavřených doménách, nelze použít v otevřené doméně. V otevřené doméně není možné definovat změnu tlaku vlivem teploty. Nelze tedy v jedné doméně zároveň sledovat tvorbu teplotního pole v okolí tlakové láhve (otevřený prostor) a tlakové pole uvnitř láhve (uzavřená doména). Úloha proto musela být rozdělena do dvou samostatných simulací. V jedné úloze byl simulován vývin teplotního pole v okolí láhve od zdroje tepelného záření v otevřené doméně, přestup tepla a vedení stěnou tlakové láhve. Na obrázku 3.28 je celá výpočetní doména s uvedenými rozměry a výpočetní síť. Na levé straně v otevřené doméně je umístěn tepelný zdroj, který napodobuje kruhový plynový hořák. Ve druhé úloze byl simulován nárůst tlaku v nádobě, tedy v uzavřené doméně s proměnnou teplotní okrajovou podmínkou na patě láhve. Obě úlohy byly nestacionární s časem simulace 40 minut. Detailní popis nastavení obou úloh lze nalézt v [11]. Model byl vypočítán jak pro vzduch jako plnicí médium, tak pro metan, pro který ale nemáme k dispozici experimentální data pro porovnání.

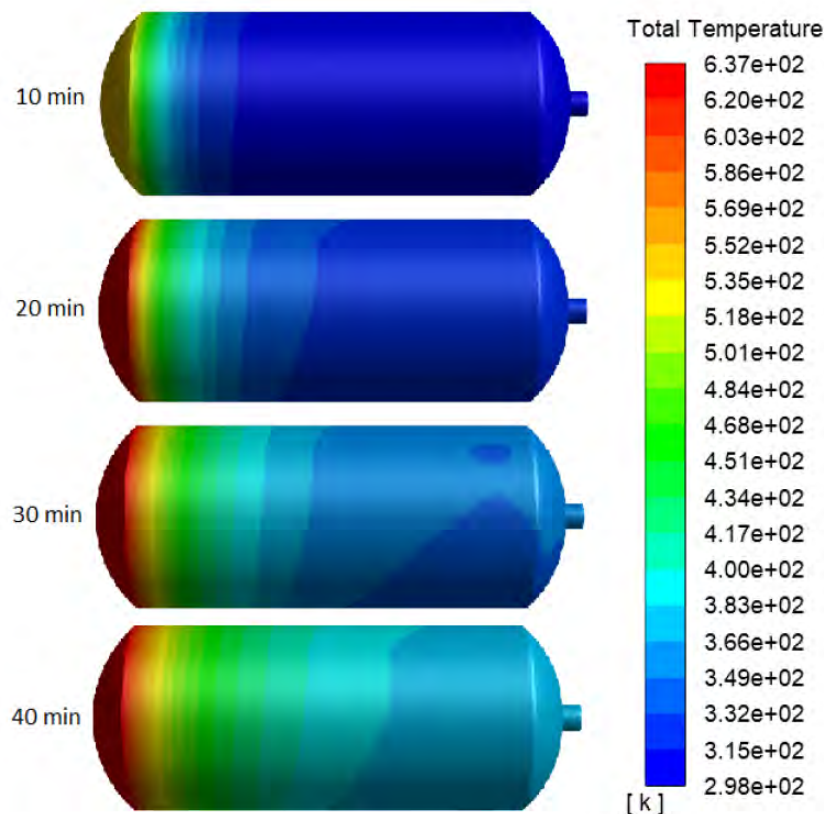


Obrázek 3.28: Tlaková láhev a okolní doména s rozměry, umístění a velikost hořáku, výpočetní síť. Převzato z [11].

Nárůst tlaku v uzavřené doméně

Při simulaci nárůstu tlaku v nádobě nebylo uvažováno okolí láhve. Nárůst teploty na stěně láhve byl definován jako v čase proměnná okrajová podmínka na patě zásobníku. Teplotní profil na patě zásobníku byl konstantní po celé ploše a převzat z experimentu, konkrétně z dat z termokamery. Teplota v prvních přibližně 20 minutách simulace narostla v několika krocích na 364 °C a až do konce simulace pak byla konstantní. V modelu nebyl uvažován vliv radiace ani konvekce, tedy ohřátí či ochlazení zásobníku, ke kterému při experimentu s použitím hořáku na otevřeném prostranství docházelo. Pro popis stavového chování vzduchu byla použita stavová rovnice ideálního plynu, pro metan Peng-Robinsonova stavová rovnice. Viskozita a tepelná vodivost vzduchu i metanu byly konstantní. Tepelná kapacita a vodivost oceli byla konstantní, tepelná kapacita vzduchu a metanu se měnila s teplotou.

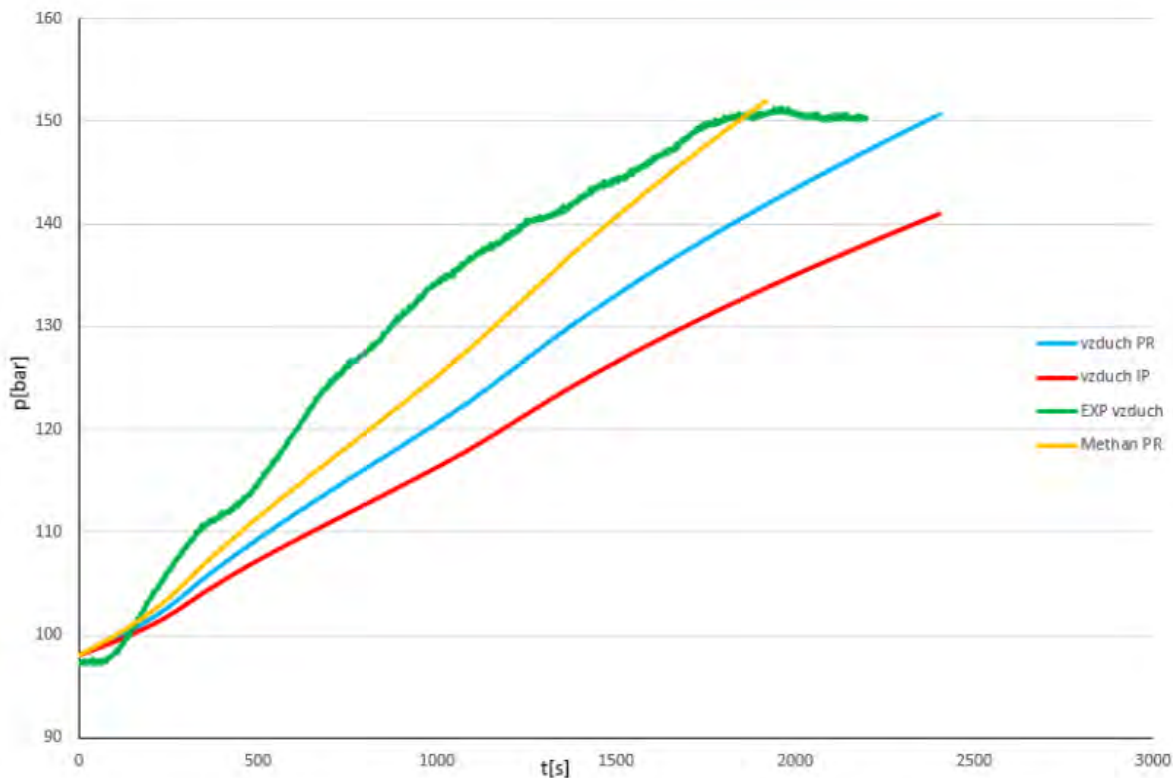
Výsledky modelu byly porovnány s experimentálními daty. Model ukazuje stejný trend ve vývoji teplotního profilu na povrchu těla láhve v čase, jaký byl naměřen experimentálně. Stejně jako v experimentu dochází k postupnému nárůstu teploty od paty zásobníku směrem k tepelné pojistce (Obr. 3.29). Model ale podhodnocuje teplotu stěny láhve proti experimentu, v desáté minutě řádově o 30 °C, v třicáté minutě pak až o 60 °C. To je pravděpodobně dáno zanedbáním přenosu tepla na stěnu láhve sáláním. Důsledkem toho jak pak i modelem předpovězená teplota na tepelné pojistce nižší než v experimentu.



Obrázek 3.29: Teplotní pole pláště tlakového zásobníku v čase 10, 20, 30 a 40 minut. Převzato z [11].

Porovnáme-li model se vzduchem jako plnicím médiem a metanem jako plnicím médiem, teplotní profily na stěně tlakové láhve a teplota na tepelné pojistce jsou téměř totožné. Teplotní vodivost plynů je výrazně nižší než teplotní vodivost kovů. Médium uvnitř zásobníku tak nemá významný vliv na vývoj teplotního pole pláště nádoby a tedy ani na dobu do aktivace tepelné pojistky. Druh plnicího média ale významně ovlivňuje modelem předpovězený nárůst tlaku v uzavřené nádobě. Na Obr. 3.30 je porovnán tlak v nádobě v závislosti na čase pro metan, jehož chování je popsáno Peng Robinsonovou stavovou rovnicí a pro ideální plyn jehož chování je popsáno jak stavovou rovnicí ideálního plynu, tak Peng Robinsonovou stavovou rovnicí. Model předpovídá pomalejší nárůst teploty stěny láhve a proto je i nárůst tlaku v porovnání s experimentem nižší pro všechny tři modely. Metan má vyšší tepelnou vodivost než vzduch, jeho teplota uvnitř láhve tak roste rychleji než v případě vzduchu. Vlivem rychlejšího zahřátí a zvětšení objemu pak rychleji roste i tlak metanu uvnitř zásobníku. V případě vzduchu výrazně rychleji narůstá tlak v nádobě při popisu chování vzduchu pomocí Peng Robinsonovy stavové rovnice.

Abychom mohli model využít pro předpověď chování zásobníku za jiných než experimentálních podmínek s cílem určit, zda by mohlo dojít k jeho roztržení při lokálním ohřevu, bylo by třeba do modelu uvažovat vliv radiace a konvekce. Zjednodušený model výrazně podhodnocuje teplotní i tlakový nárůst.



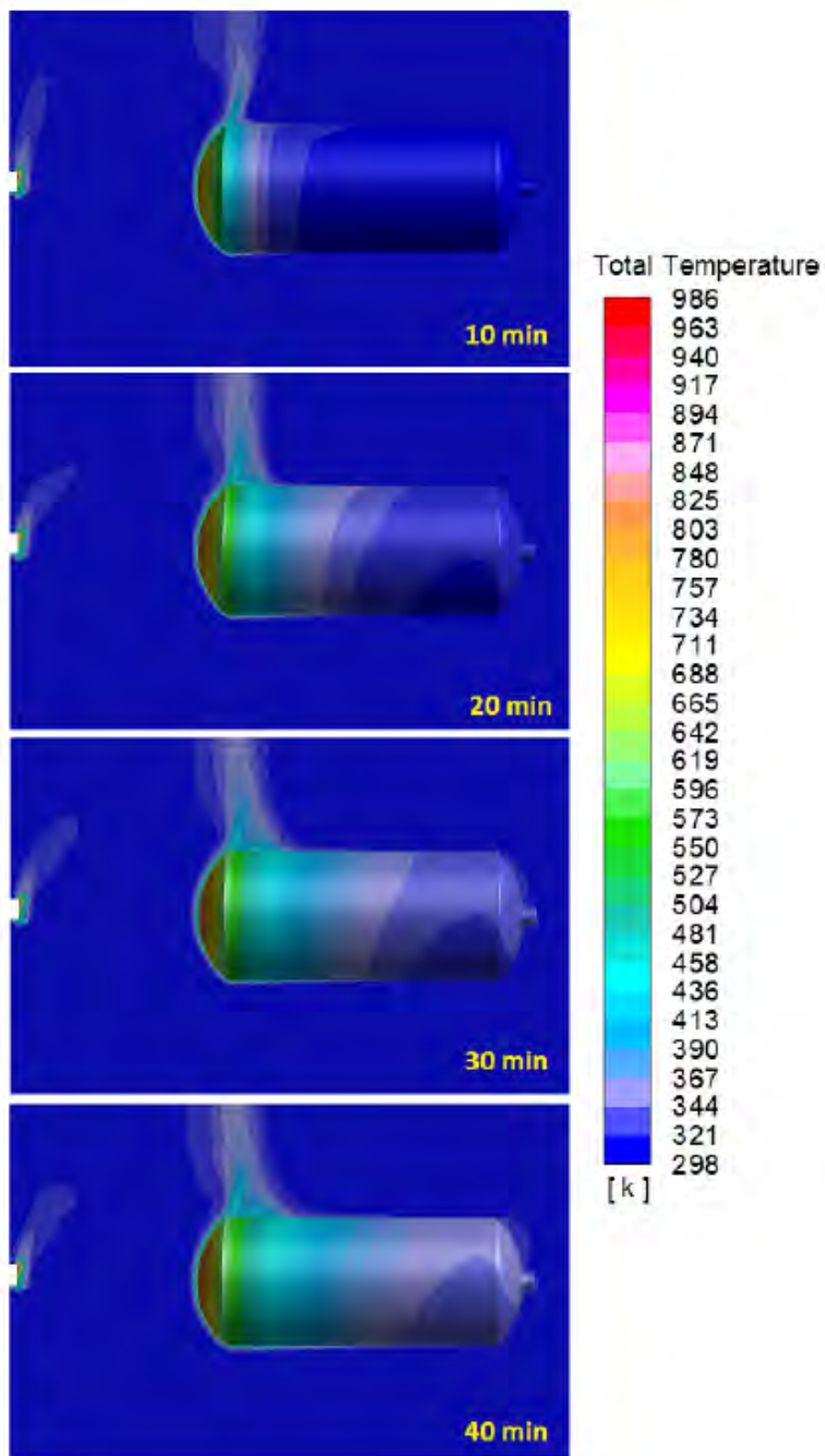
Obrázek 3.30: Modelem předpovězený nárůst tlaku v nádobě při jejím zahřívání pro metan, jehož stavové chování je popsáno Peng Robinsonovou rovnicí a pro vzduch, jehož je chování je popsáno stavovou rovnicí ideálního plynu (IP) a Peng Robinsonovou stavovou rovnicí (PR). Zeleně jsou znázorněna experimentální data pro vzduch. Převzato z [11].

Vývoj teplotního pole v otevřené doméně a na stěně nádoby

Počáteční podmínka pro simulaci vývoje teplotního pole v okolí láhve je okolní prostředí tvořené vzduchem o teplotě 25 °C. Zdroj tepla byl definován jako plocha, ze které se uvolňuje definované množství tepla a to 17,8 MW/m², což odpovídá výkonu hořáku v experimentu 35 kW. Tepelný výkon byl v simulaci navyšován postupně, aby nedošlo ke vzniku velkých gradientů teploty, které by vedly k divergenci výpočtu. Maximální intenzity tepelného výkonu bylo v simulaci dosaženo ve třetí minutě simulace. V simulaci nebylo zahrnuto nucené proudění vyvolané hořákem, dochází tedy jen k volné konvekci a přenosu tepla sáláním (model S2S). Stejně jako v předchozím případě byl model vypočítán pro vzduch i metan. Vlastnosti obou plynů a oceli byly stejné jako v simulaci pro uzavřenou nádobu.

Vývoj teplotního pole pláště nádoby a okolního vzduchu je vidět na Obr. 3.31. S narůstajícím časem je vidět výraznější volné proudění u paty zásobníku, kde dochází k ohřevu vzduchu od ocelového pláště. Plášť láhve se viditelně prohřívá směrem k tepelné pojistce na hrdle láhve. Horní strana zásobníku se prohřívá rychleji než spodní strana. Při porovnání teploty stěny zásobníku s experimentem je ale patrné, že simulace výrazně podhodnocuje teplotu stěny a to až o 60 °C.

Stejně jako v předchozí simulaci, zjednodušení modelu z hlediska procesů sdílení tepla vedlo k odlišnému průběhu ohřevu pláště láhve ve srovnání s experimentem. Pro dosažení přesnějších výsledků a aplikaci modelu pro bezpečnostní posouzení funkce tepelné pojistky, by bylo nutné modelovat hořák ne jako sálavou plochu, ale jako plamen včetně nuceného proudění, tedy se známou rychlostí výstupu propan-butanu z otvorů plynového hořáku.



Obrázek 3.31: Teplotní pole v čase 10, 20, 30 a 40 minut. Simulace vývoje teplotního pole v otevřené doméně a na stěně nádoby při lokálním ohřevu zásobníku. Převzato z [11].

3.7 Zahoření plynu

Výpočetní modely popisované v sekci 3.3 a 3.5 se zabývaly pouze výtokem plynu z láhve. V případě, že vytékající plyn je hořlavý a v blízkosti místa výtoku je iniciační zdroj (nejčastěji požár samotného vozidla nebo objektu v jeho těsné blízkosti) dojde k zahoření plynu vytékajícího z tlakové nádrže. V případě CNG vozidel uvažujeme pro zjednodušení, že se zemní plyn skládá pouze z metanu. Zahořením plynu tedy rozumíme homogenní chemickou reakci mezi metanem a vzdušným kyslíkem, při které dojde k uvolnění velkého množství tepla a vzniku produktů spalování. Teplo i produkty spalování jsou potom transportovány do okolí vozidla a ovlivňují další průběh havarijní události. Rychlost proudění ovlivňuje promíchávání složek, naopak intenzita hoření ovlivňuje rychlost proudění. Pro zjednodušení většinou předpokládáme, že se v systému na počátku vyskytují kromě metanu dále jen kyslík a dusík. Okamžitou reakcí metanu s kyslíkem vznikají oxid uhličitý a vodní pára. Zanedbáváme vznik oxidu uhelnatého, oxidů dusíku NOx a dalších složek (celkově může probíhat víc než 300 reakcí a vznikat kolem 50 různých složek). Volba složitosti reakčního systému záleží na uživateli a zadání.

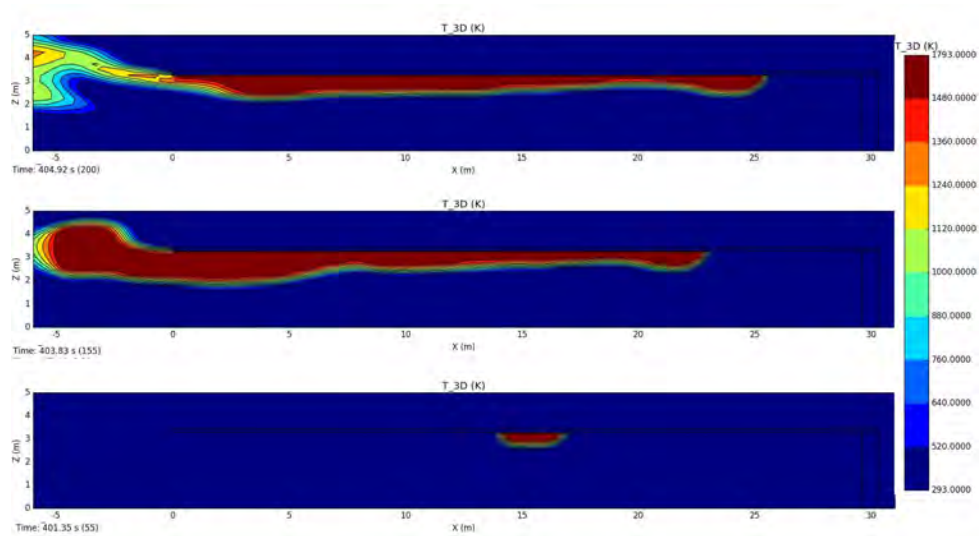
Hlavním cílem simulace se zahořením metanu je získat teplotní pole vzniklé exotermní reakcí a předpovědět tak působení požáru na okolí zejména na stavební konstrukce, průběh evakuace a interakci s pasivními prvky požární ochrany. Z hlediska matematického modelování zahoření metanu znamená přidání k základním rovnicím a modelům navíc transportní rovnice, modely spalování (kinetika chemické reakce, zdroj tepla) a k rovnicím sdílení tepla také model radiace. Jedná se tak z hlediska výpočetního o nejsložitější úlohu.

Zahoření plynu bylo v softwaru Ansys Fluent, CFX a Open Foam modelováno pouze pro proudění plynu podkritickou rychlostí a to buď pro velmi zjednodušený případ hoření plynového hořáku, kde bylo proudění v doméně vyvoláno přirozenou konvekcí, nebo pro pomalé nucené proudění plynu. I tyto zjednodušené úlohy byly náročné jak časově, tak z hlediska nastavení, aby úloha konvergovala. Model zahoření metanu vytékajícího nadkritickou rychlostí z otvorů tepelné pojistky CNG tlakového zásobníku v softwarech Ansys Fluent, CFX a OpenFoam se nepodařilo prakticky realizovat. Realizován byl model zahoření a výbuchu v softwaru FLACS, který je vyvíjen speciálně pro modelování úniku plynu a exploze výbušných směsí v průmyslových aplikacích.

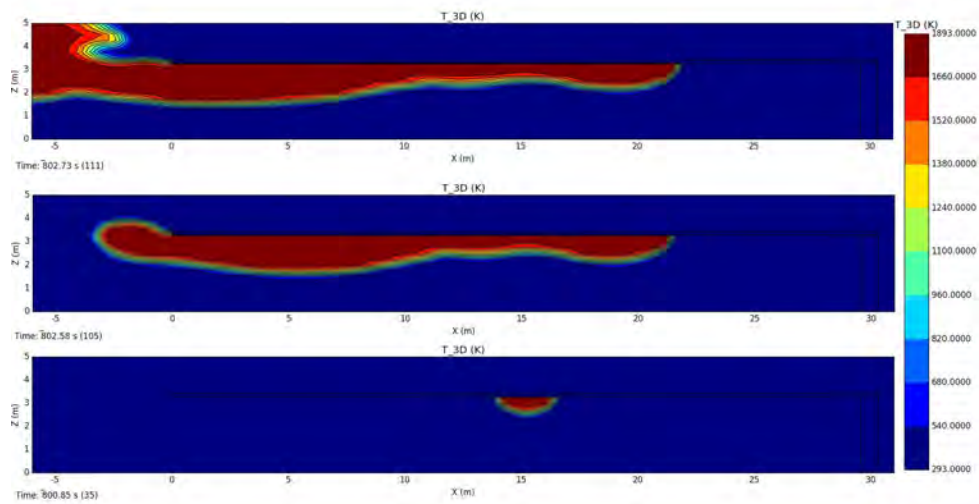
FLACS

Pro případ zahoření lze použít buď modul FLACS-Explosion, nebo FLACS-Fire. Modul FLACS-Fire slouží k modelování tzv. „jet fires“ a „pool fires“. Tento modul lze použít pro simulaci úniku metanu, který je následně ihned iniciován a odhořívá. Flacs-Explosion slouží k předpovězení výbuchových parametrů exploze směsi plynu s oxidovadlem. Pomocí tohoto modulu lze modelovat explozi již vyvinutého mraku plynu. Výbušný mrak je možné buď vytvořit pomocí modulu FLACS-Dispersion, nebo využít přednastavené scénáře. Scénáře byly vyvinuty pro usnadnění tvorby analýz rizik. Jedná se o koncept, který skutečný mrak hořlavého plynu nahrazuje mrakem se stechiometrickou koncentrací a velikostí odpovídající velikosti předpokládaného hořlavého mraku. Čas iniciace nastavuje uživatel. Řešič je určen pro simulaci výbuchů hořlavých plynů a par s rychlostí šíření čela plamene nižší než je rychlost zvuku v daném prostředí, tedy pro popis deflagračních jevů. V případě, kdy exploze přejde do detonace (tedy stavu, kde se čelo plamene pohybuje rychlostí vyšší než je rychlost zvuku), řešič pouze detekuje tento stav.

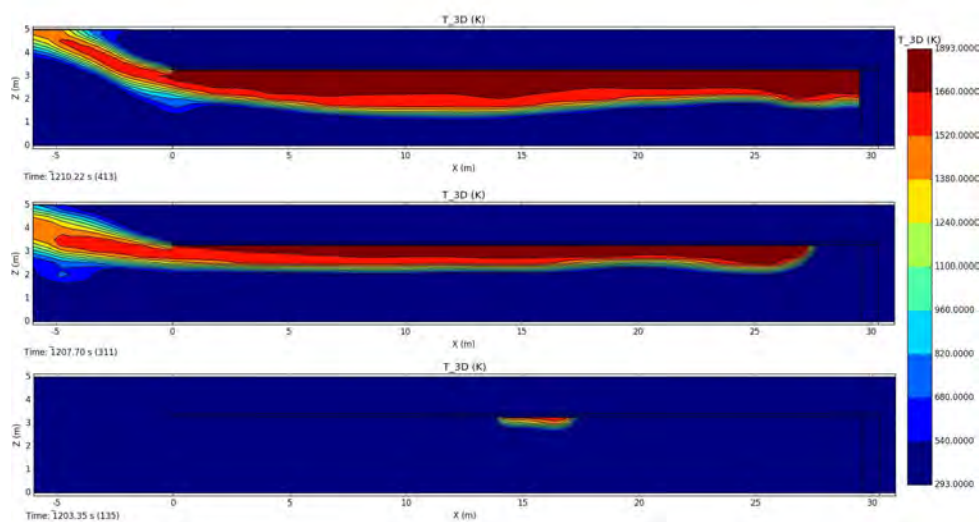
Pro studium vlivu iniciačního zdroje na rozptýlený mrak metanu v uzavřené podzemní garáži byl použit řešič FLACS-EXPLOSION. Velikost mraku metanu a jeho koncentrace byly určeny simulací popsanou v sekci 3.5.3. Iniciační zdroj byl umístěn do místa, které v předchozí simulaci vykazovalo koncentraci metanu v mezích výbušnosti u stropu garáže, poblíž místa úniku. Byly simulovány tři různé scénáře: únik metanu trvající 400 sekund, 800 sekund a 1200 sekund. Vždy



(a) Postup plamene při explozi inicializované ve 400 sekundě.



(b) Postup plamene při explozi inicializované ve 800 sekundě.

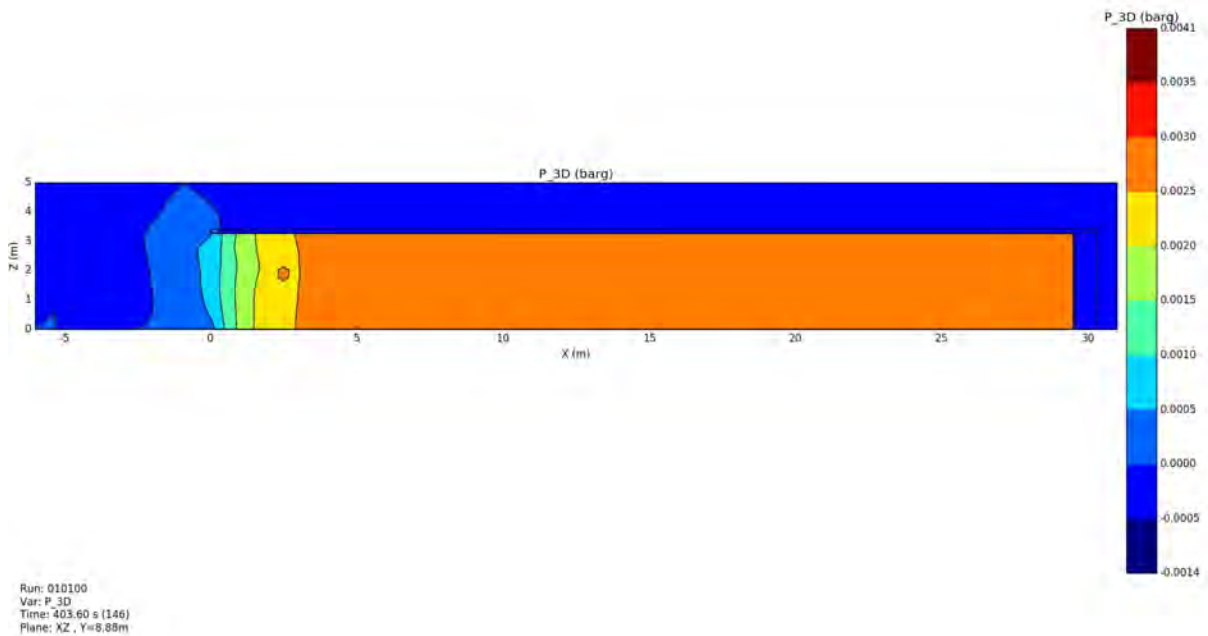


(c) Postup plamene při explozi inicializované ve 1200 sekundě.

Obrázek 3.32: Postup plamene při explozi v řezu $Y = 8,88$ m v čase 400, 800 a 1200 sekund.

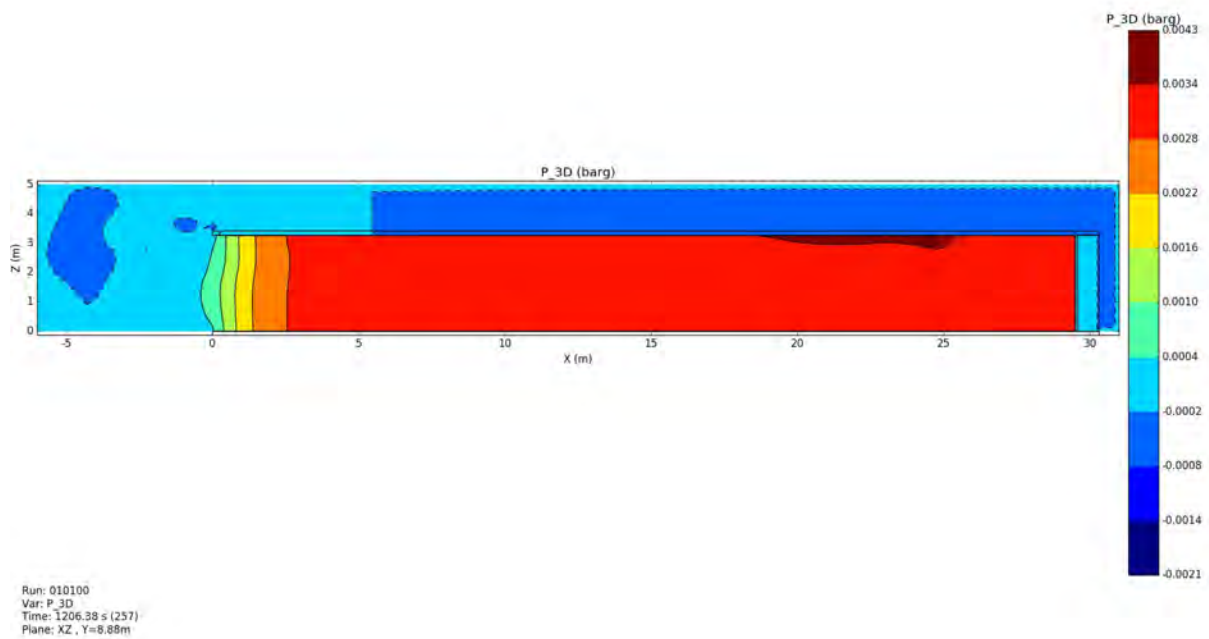
v poslední sekundě daného scénáře disperzní studie navazuje studie exploze. Byl sledován rozvoj čela plamene v doméně, maximální dosažená teplota rozvoje teplotního pole a maximální přetlak dosažený v prostoru domény.

Na Obr. 3.32 je patrný rozvoj čela plamene a maximální dosažená teplota v Kelvinech pro všechny tři scénáře. Řezy jsou řazeny postupně v časech 400, 800 a 1200 sekund. Maximální teplota plamene byla simulací předpovězena na 1893 K, tedy 1620°C. Plamen o největší délce byl dosažen při iniciaci mraku plynu v 800 sekundě simulace. V tomto případě délka plamene přesáhla hranice výpočetní domény. Zášleh mimo prostor garáže tedy byl více než 6 metrů. Nejkratší plamen byl simulován při iniciaci v 1200 sekundě. Ve všech simulovaných případech však došlo k zášlehu plamene i mimo prostor garáže. Rychlost šíření čela plamene byla vypočtena na přibližně 11 m/s. Na Obr. 3.33 je patrný nárůst tlaku v prostoru garáže. Řezy jsou opět řazeny postupně v časech 400, 800 a 1200 sekund. Maximální vypočtený přetlak má hodnotu 0,008 bar (0,8 kPa) při iniciaci v 800 sekundě a 0,004 bar (0,4 kPa) při iniciaci v 400 a 1200 sekundě. Tato data nebylo možné validovat experimentálně.

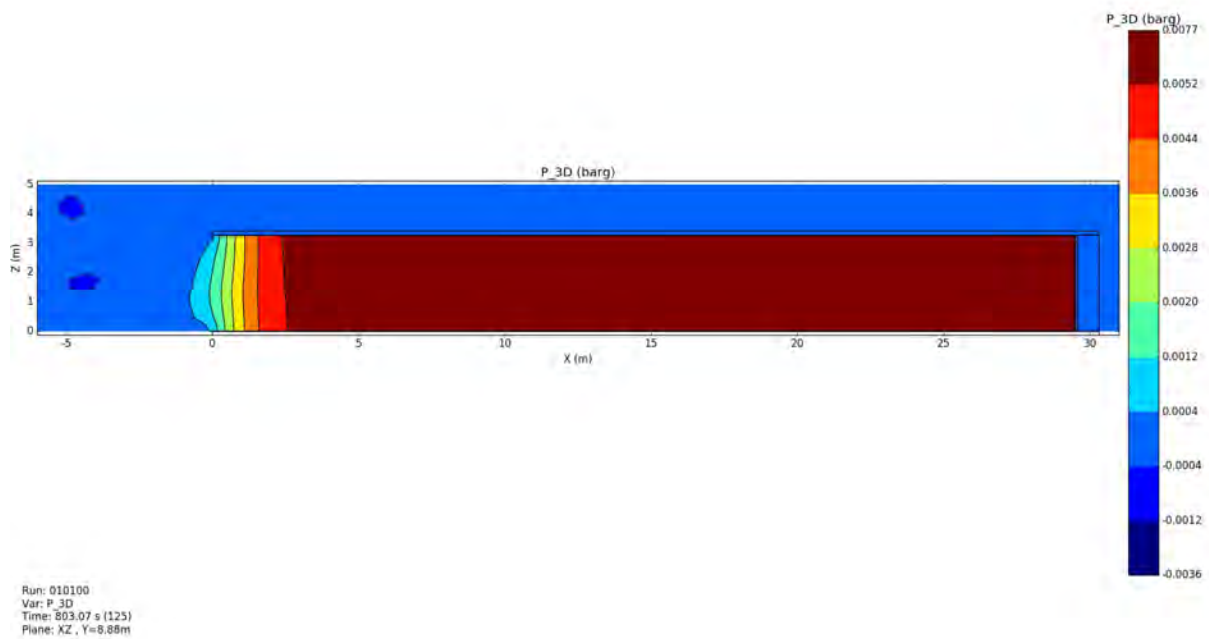


(a) Maximální přetlak při explozi inicializované ve 400 sekundě.

Obrázek 3.33: Maximální přetlak v řezu $Y = 8,88$ m při explozi v čase 400, 800 a 1200 sekund.



(b) Maximální přetlak při explozi inicializované ve 1200 sekundě.



(c) Maximální přetlak při explozi inicializované ve 800 sekundě.

Obrázek 3.33: Maximální přetlak v řezu $Y = 8,88$ m při explozi v čase 400, 800 a 1200 sekund.

4. Závěr

Provedená měření poskytla ucelenou řadu experimentálních dat poklesu tlaku a hmotnosti vzduchu/metanu v tlakové nádobě při jejím vyprazdňování přes otvor v tepelné pojistce (přetlakové zařízení spouštěné teplotou). Data slouží primárně pro validaci okrajových podmínek matematických modelů úniku a disperze plynu. Provedené experimenty se týkaly pouze úniku přes tepelnou pojistku, tedy případu, kdy je ve vozidle, nebo v jeho blízkosti, požár. Studovaná tepelná pojistka měla šest výtokových otvorů, každý o průměru 3 mm. Bylo studováno „ideální“ chování systému, kdy je výtoková cesta plně otevřená a chování systému v reálných podmínkách, tedy při otevření pojistky působením tepla.

V případě plně otevřené výtokové cesty bylo zjištěno, že bezrozměrná rychlost poklesu tlaku není závislá na počátečním tlaku plynu v nádobě. V celém rozsahu pracovního tlaku nádrže tedy do 200 bar se nádrž vyprázdní z půlky přibližně během prvních 20 sekund, což odpovídá poklesu tlaku na 40 až 20 procent původní hodnoty. Doba výtoku se liší podle počátečního tlaku plynu, tedy množství plynu v nádrži, a pohybuje se přibližně mezi 80 sekundami pro počáteční tlak plynu 30 bar až po přibližně 140 sekund pro tlak 200 bar. Měření hmotnostního úbytku plynu bylo v prvních vteřinách výtoku ovlivněno silným rázem plynu, který rozkmitá váhy. Maximální hodnota hmotnostního úbytku plynu jako okrajová podmínka do matematického modelu disperze plynu tak musela být aproximována. Pro maximální počáteční tlak metanu 200 bar se dle typu aproximace pohybuje mezi 400 až 650 g/s. Počáteční hmotnostní úbytek musí být zpřesněn jinou instrumentací měření, která by nezpůsobovala rozkmit vah, nebo dopočtem ze známé hodnoty tlaku a teploty plynu v láhvi.

Ukázalo se, že intenzita požáru (rychlost a intenzita nárůstu teploty v okolí pojistky a přímo na tepelné pojistce) má u pojistek s nízkoteplotně tavitelným kovem vliv na kvalitu otevření výtokového otvoru plynu a výrazně ovlivňuje dynamiku výtoku plynu. Intenzita výtoku plynu se může v průběhu vyprazdňování nádrže měnit a nelze určit čas, kdy k poklesu či nárůstu intenzity dojde. Celková doba výtoku se tak může výrazně měnit. Se změnou intenzity výtoku plynu pak v případě požáru vozidla dochází i ke změně chování hořícího plynu v blízkosti automobilu. Velikost a místo vzniku hořlavého mraku a „jetu“ (proudového plamene) také silně závisí na konstrukčním řešení samotné pojistky (konkrétně na počtu a velikosti výtokových otvorů), ale také na konstrukci samotného vozidla a zabudování palivového systému ve vozidle (zejména počtu nádrží a jejich umístění).

Bylo potvrzeno, že výtoková charakteristika vzduchu a metanu je pro studovaný systém podobná a pro další experimentální práci lze využít vzduch, se kterým je technické a organizační zajištění zkoušek výrazně jednodušší. Zkoušky s metanem jsou vyžadovány tam, kde je nutné uvažovat vliv zapálení hořlavého plynu.

Výpočtová část pokrývá problematiku modelování výtoku plynu z nádoby do okolí od vzniku nadkritických proudových struktur a odhadu veličin charakterizujících vzniklé nadkritické proudění stlačitelné tekutiny, interakci proudových struktur s okolím, promíchávání v oblasti pod automobilem a ztrátu velké části hybnosti až po další šíření plynu od hranice automobilu do okolí a disperzi plynu v uzavřené garáži.

Na základě znalosti tlaku a teploty plynu v zásobníku a velikosti výtokového otvoru lze pomocí isoentropického modelu určit výtokovou rychlost a hmotnostní tok plynu. Jedná se o metodu, která je časově nenáročná a snadno aplikovatelná v běžné inženýrské praxi. Při využití iteračního výpočtu lze určit i změnu výtokových charakteristik v čase, tedy při vypouštění plynu z nádoby. Pro správnou předpověď modelu je ale třeba rychlost výtoku korigovat výtokovým koeficientem. Z výsledků měření a výpočtů provedených v této práci se ukazuje, že výtokový koeficient pro studovanou geometrii a aplikaci je velmi nízký a neodpovídá hodnotám výtokového koeficientu uváděných v literatuře. Jedním z významných faktorů, které se na nízké hodnotě výtokového

koeficientu podílejí, je tlaková ztráta při průtoku plynu ventilem a tepelnou pojistkou. Podle předběžné CFD simulace průtoku plynu tepelnou pojistkou se ukazuje, že tlak v úrovni výtokového otvoru může být až o desítky bar nižší než je tlak v nádrži. Počáteční hodnota tlaku plynu jako vstup do isoentropického modelu se tak může výrazně lišit od tlaku plynu v nádrži. V praxi se při použití isoentropického modelu pro posouzení rizika vzniku výbušné atmosféry naráží na další problém a to, že velikost výtokového otvoru, ze kterého CNG uniká ať už přes tepelnou pojistku, nebo netěsností ve vysokotlaké části systému, není známá a liší se pro různé modely vozů a místa úniku.

Isoentropický model určuje výtokové charakteristiky ve výtokovém otvoru při zadání vstupních podmínek uvnitř nádrže a v okolí. 2D CFD model poskytuje informaci o tom, co se děje s proudem plynu za výtokovým otvorem. Vytvořit a spočítat 2D CFD model stlačitelné tekutiny proudící nadkritickou rychlostí je ale časově náročné a vyžaduje velmi zkušeného CFD uživatele. V průběhu výpočtů docházelo často k problémům s konvergencí. Ačkoliv je povaha úlohy nestacionární, úloha byla počítána jako ustálená. Ustálená simulace poskytne informace o vytvořené proudové struktuře, zejména tlakovém, rychlostním a koncentračním poli podél délky proudové struktury. CFD řešiče i při takto vysoké rychlosti proudění plynu dokáží předpovědět vznik proudové struktury za výtokovým otvorem. Získaná struktura je podobná v odborné literatuře publikovaným strukturám proudu během nadzvukového proudění z trysky. CFD model je schopen zachytit charakteristické vlastnosti nadkritického proudění vyvolaného expanzí plynu za výtokovým otvorem včetně rázových a expanzních vln.

Výsledky 3D CFD modelu zadní části automobilu se zjednodušenou geometrií pojistky odpovídaly výsledkům experimentu vizualizace směrů proudění. Řádově odpovídala i naměřená rychlost proudění na hranici automobilu. Rychlost proudění byla měřena podél zadní části automobilu a ve dvou rovinách pod vozidlem. 3D CFD simulace dokázala zachytit čtyři experimentálně jasně identifikované směry proudění plynu - nasávání okolního vzduchu v zadní části automobilu, proudění směsi vzduch-metan pod automobilem směrem dopředu a do oblasti levého zadního kola a jet vznikající za pravým zadním kolem. Geometrie vozidla a palivového systému hraje zásadní roli v dynamice proudění plynu pod vozidlem a v jeho okolí. V prostoru pod automobilem dochází k intenzivnímu míchání rychle vytékajícího metanu s okolním vzduchem. Výsledný směr proudění a rychlost proudění směsi vzduch-metan je dána kombinací místa výtoků metanu, rychlostí výtoků a okolními překážkami, tedy konstrukčními částmi vozidla v bezprostřední blízkosti nádrží a země. Jet vzniká pouze tehdy, je-li alespoň jeden výtokový otvor pojistky směřovaný do boku vozidla a výtok není omezen žádnou konstrukční částí vozidla. Jet se může objevit i později než po otevření tepelné pojistky, jak odhořívají plastové části a dochází k deformacím karoserie a dalších konstrukčních částí vozidla. Kromě oblasti jetu má směs vzduch-metan proudící přes hranici vozidla rychlost proudění v řádu jednotek metrů za sekundu.

Simulace byla časově ustálená. Časově neustálená simulace by byla neúnosná z hlediska výpočetního času. 3D CFD model se zjednodušenou geometrií pojistky může být použit na predikci chování jinak geometricky uspořádaného CNG systému a odhalit tak potenciálně nebezpečná místa či nebezpečné chování systému po otevření tepelné pojistky. Model nelze prakticky z časových důvodů využít pro modelování disperze plynu ve velkých geometriích, jako jsou uzavřené garáže a tunely. S využitím experimentálně změřených dat rychlosti proudění plynu na hranici automobilu byla ověřena možnost vytvořit ve 3D modelu rychlostní okrajovou podmínku, která se aplikuje přímo na hranici vozidla. Tento přístup se ukázal jako prakticky realizovatelný, ale narazil na několik klíčových problémů. Hlavním problémem je, že na hranici vozidla neproudí čistý metan ale směs vzduch-metan. Data rychlosti proudění plynu by bylo třeba rozšířit o měření koncentrace. Aby rychlostní a koncentrační profil dokázal věrně zachytit skutečné chování proudícího plynu, bylo by třeba proměřit vyšší počet experimentálních bodů a to zejména ve vertikálním směru. Provedené měření samotné rychlosti bylo instrumentálně a časově vysoce ná-

ročné a nelze tedy předpokládat, že by ho bylo pro stanovení okrajové podmínky možno v praxi běžně realizovat pro více modelů vozidel.

Model disperze plynu v uzavřené garáži se v praxi řeší tak, že se malý výtokový otvor, za kterým se tvoří proudové struktury a plyn proudí nadkritickou rychlostí, převede na problém podkritického proudění větším otvorem. V takovém případě je ale třeba změnit okrajovou podmínku. Při zvětšení výtokové plochy a zachování původní tlakové podmínky bychom dosáhli výrazně vyššího hmotnostního toku plynu do domény. Nádrže by se vyprázdnily podstatně dříve než ve skutečnosti. Obráceně při snaze uchovat hmotnostní tok plynu se zvětšením výtokového otvoru by došlo k výraznému poklesu rychlosti proudění. Volba zda a do jaké míry dojde k zachování hmotnostního toku plynu nebo rychlosti jeho proudění záleží na uživateli a aplikaci modelu.

Model uzavřené garáže jasně ukázal, že i při relativně pomalém výtoku plynu napodobujícím spíše únik netěsností ve vysokotlaké části systému než přes tepelnou pojistku, může bez odvětrání dojít v místech garáže k akumulaci metanu a vzniku výbušné atmosféry. Pakliže je CFD model použit pro predikci chování systémů detekce úniku metanu a navazujících prvků havarijního odvětrání, je jak množství tak rychlost metanu proudícího do posuzovaných prostor klíčová a zásadně ovlivní výsledky modelu.

V praxi byly zaznamenány případy lokálního přehřátí nádrží, což mělo za následek roztržení nádrže. Byl proveden experiment lokálního ohřevu a na jeho základě pak CFD model lokálního ohřevu nádrže. Bylo zjištěno, že výpočetní úlohu je třeba rozdělit na dva samostatné problémy a to je nárůst tlaku v uzavřené nádobě a vývoj teplotního pole v okolí tlakové nádrže a teploty povrchu tlakové nádrže. V obou případech byly zjednodušeny procesy sdílení tepla, které ale vedly k výraznému podhodnocení teplotního nárůstu pláště nádoby a nárůstu tlaku v nádobě. Model ale vykazoval fyzikální chování a lze očekávat, že při zvýšení úrovně detailu procesů sdílení tepla by bylo model možné aplikovat pro predikci možnosti lokálního přehřátí nádrží s jinou geometrií nebo z jiného materiálu.

CFD modely zahoření CNG jsou výpočetně extrémně náročné a nelze je prakticky aplikovat na problém nadkritického proudění plynu. Úlohy musí být zjednodušeny na problém podkritického proudění. Nejlepších výsledků bylo dosaženo se softwarem FLACS, který byl vyvinut speciálně pro aplikace úniku plynu a následkům výbuchu plynu v průmyslových aplikacích. Software ale není vhodný na malé a detailní geometrie, jako je únik z CNG vozidla.

Literatura

- [1] P. Middha and O. R. Hansen, “CFD simulation study to investigate the risk from hydrogen vehicles in tunnels,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, pp. 5875–5886, 2009.
- [2] M. Hernandez, L. Ma, C. Huang, M. Rosetto, J. Martin, and david Poisson, “Safety investigation of cng leaks in enclosed parking structures: computational fluid dynamics modelling and analysis,” tech. rep., National Research Council of Canada, 2013.
- [3] V. Karásek, “Dynamika proudění plynů kolem vozidla na CNG po otevření bezpečnostní pojistky,” Master’s thesis, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019.
- [4] L. Hasalová, M. Jahoda, V. Vystrčil, J. Ira, J. Karl, and O. Suchý, “Havarijní únik CNG z osobních automobilů - scénáře a rizika,” in *Požární Ochrana 2017*, 2017.
- [5] “Předpis EHK OSN č. 110: Jednotná ustanovení pro schvalování: I. zvláštních součástí motorových vozidel, která ve svém pohonném systému používají stlačený zemní plyn (CNG) a/nebo zkapalněný zemní plyn (LNG), II. vozidel s ohledem na zástavbu zvláštních součástí schváleného typu pro použití stlačeného zemního plynu (CNG) a/nebo zkapalněného zemního plynu (LNG) v jejich pohonném systému [2015/999],” 2015.
- [6] ŠKODA AUTO a.s., *Systém CNG ve vozech ŠKODA Auto - dílenská učební pomůcka*, 2014.
- [7] N. S. Kubečková, “Únik metanu z tlakového zásobníku přes bezpečnostní pojistku,” Master’s thesis, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2017.
- [8] O. Novák, *Měření výtokového koeficientu otvoru při neustáleném proudění*. PhD thesis, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013.
- [9] H. Lucie, M. Jahoda, V. Vystrčil, and J. Karl, “Experimental investigation on the accidental release of CNG from cars,” in *Proceedings from 5th International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2018*, (Boras, Sweeden), RISE, October 2018.
- [10] L. Perrette and H. K. Wiedmann, “CNG buses fire safety: learnings from recent accidents in france and germany,” in *Society of automotive engineer world Congress 2007, Detroit, United States*, SAE International, pp.NC., <ineris-00976180>, 2007.
- [11] A. Čížinská, “Numerická simulace teploty pro aktivaci bezpečnostní pojistky při ohřevu zásobníku CNG,” Master’s thesis, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2018.
- [12] J. Choi, N. Hur, S. kang, E. D. Lee, and K.-B. Lee, “A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 8084–8091, 2013.
- [13] A. Mack-Gardner and J. Santrock, “Analysis of reservoir pressure decay, velocity and concentration fields of natural gas venting from pressurized reservoir into the atmosphere,” *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, vol. 4, no. I, pp. 216–230, 2011.
- [14] W. M. Pitts, J. C. Yang, M. Blais, and A. Joyce, “Dispersion and burning behavior of hydrogen release in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 17457–17469, 2012.

- [15] N. Koutsourakis, A. Venetsanos, and J. Bartzis, “Les modelling of hydrogen release and accumulation within a non-ventilated ambient pressure garage using the ADREA-HF CFD code,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 17426-17435, 2012.
- [16] E. Franquet, V. Perrier, S. Gibout, and P. Bruel, “Free underexpanded jets in quiescent medium: A review,” *Progress in Aerospace Science*, vol. 77, pp. 25–53, 2015.
- [17] D. A. Sullivan, “Historical review of real-fluid isentropic flow models,” *Transaction of the ASME*, vol. 103, pp. 258–267, 1981.
- [18] N. S. Kubečková, “Modelování rychlosti úniku metanu z tlakového zásobníku,” Master’s thesis, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015.
- [19] A. M. J. and K. K. E., *Fires, explosions and toxic gas dispersions:Effect calculation and risk analysis*. CRC Press, 2010.
- [20] T. S., “Větrání hromadných garáží s vozidly na plynná paliva,” in *Sborník konference Požární ochrana*, (Ostrava), SPBI, září 2016.

Havarijní únik CNG z osobních automobilů - scénáře a rizika

Accidental Release of CNG from Passenger Vehicles - Gas Leak Safety Concerns

Ing. Lucie Hasalová, Ph.D.¹

doc. Dr. Ing. Milan Jahoda²

Ing. Václav Vyrstřil^{1,2}

Ing. Jiří Ira²

Bc. Jan Karl¹

Ing. Ondřej Suchý, Ph.D.¹

¹MV-GR HZS ČR, Technický ústav požární ochrany
Písková 42, 14300 Praha 12

²Vysoká škola chemicko-technologická v Praze
Technická 5, 166 28 Praha 6

lucie.hasalova@tupo.izscr.cz, milan.jahoda@vscht.cz,
vaclav.vyrstrel@tupo.izscr.cz, jiri.ira@vscht.cz,
jan.karl@tupo.izscr.cz, Ondrej.suchy@tupo.izscr.cz

Abstrakt

Cílem příspěvku je shrnout problematiku havarijního úniku CNG z osobních vozidel. Jsou diskutovány situace, kdy k havarijnímu úniku může dojít a kvalitativně stanovena rizika, která s sebou únik plynu nese. Hlavním cílem je pak převedení skutečných scénářů úniku plynu na reprezentativní scénáře úniku plynu do CFD matematických modelů, které by následně mohly být využity pro posouzení bezpečnosti parkování CNG vozidel v uzavřených prostorech a bezpečnost zásahu jednotek IZS u mimořádných situací zahrnujících CNG vozidla.

Keřčová slova

CNG, přetlakové zařízení, únik plynu, tlaková láhev.

Abstract

The paper deals with the safety concerns of the CNG passenger cars. The possible leak scenarios are established and discussed from the point of view of the leak size, flow characteristics and mass injection rate of CNG. The knowledge of the mass injection rate is crucial for assessing the safety of CNG cars parking in enclosed areas and safety concerns of interest for fire brigade.

Keywords

CNG, Pressure Relief Device, gas dispersion, pressure vessel.

CNG jako palivo v osobní dopravě

Se zmenšujícími se zásobami ropy, nárůstem městských aglomerací a s celosvětově se zpřísňujícími emisními limity roste poptávka po vozidlech na alternativní paliva. Jedna z dnes nejběžnější používaných alternativ klasických paliv v automobilovém průmyslu je zemní plyn [1]. Khan et al. [2] podrobně diskutují výhody a nevýhody využití zemního plynu jako paliva jak po stránce ekologické, tak ekonomické. Ukazuje, že se jedná o palivo s vysokým potenciálem především kvůli nižšímu emisnímu zatížení CO₂, bohatým přírodním zásobám, alternativním možnostem jeho získávání, např. z biomasy, ale také jeho ceně. Zemní plyn nevyžaduje, ve srovnání s benzinem nebo naftou, nákladné chemické zpracování, a je proto ve většině zemí výrazně levnější. V souladu s mezinárodními závazky o snižování emisí je zemní plyn jako palivo často také daňově zvýhodňován. Nižší cena vzbuzuje velký zájem běžných spotřebitelů, ale také firem a státních institucí. Ekologická stránka provozu nahrává jeho využití v oblastech s vysokou hustotou obyvatel a vysokým

stupněm znečištění v systémech veřejné hromadné dopravy, taxislužeb atd. [3].

Jedna z otázek týkající se využití zemního plynu jako paliva je, jak bude ve vozidle skladován. Obecně může být zemní plyn skladován třemi způsoby - stlačený (CNG), zkapalněný (LNG) nebo adsorbovaný v porézním materiálu (ANG) [4]. Pro osobní dopravu je v současnosti převážně využíván stlačený zemní plyn.

Počet vozidel na CNG každoročně narůstá. Průměrný celosvětový roční růst je v poslední dekádě odhadován kolem 24 %. Současný celkový počet vozidel na CNG se pohybuje kolem 22,5 milionů. Nejvíce vozidel na CNG je v oblasti Asie (Írán, Čína, Pákistán, Indie) s přibližně 10 miliony vozidly, následuje Latinská Amerika (Argentina, Brazílie, Kolumbie) s přibližně 5 miliony vozidly [2]. V Evropě je vozidel na CNG registrovaných přibližně 2 miliony, v ČR asi 16 tisíc) a to především osobní a dodávkové vozy a autobusy.

Palivová soustava automobilů na CNG

Stlačený plyn je ve vozidlech skladován v tlakových zásobnících. Osobní automobily mají tlakové zásobníky na plyn umístěny ve spodní části vozidla, autobusy na střeše. V nádržích je plyn stlačen na tlak maximálně 200 bar (20 MPa), velikost a počet nádrží závisí na typu vozidla. Nejčastěji používané (uvádí se až 90 % všech zástaveb CNG vozidel) jsou nádoby ocelové, které jsou nejlevnější, ale také nejtěžší (typ I). Trendem je vývoj a použití nádob, které jsou částečně odlehčené použitím kovové vložky, která je obručovitá (typ II) či plně ovinutá uhlíkovými nebo skleněnými vlákny (typ III), nebo plně kompozitní lahve s plastovou vložkou (typ IV) [5]. Plně kompozitní lahve mají nejvyšší korozní odolnost a jsou nejlehčí - až o 50 - 70 % proti lahvím celooceľovým, ale jejich cena je mnohonásobně vyšší.

Ze zásobníků je CNG vedeno vysokotlakým potrubím k motorové části, kde je v regulátoru tlak snížen na 5-9 bar. Od regulátoru tlaku plynu proudí plyn potrubím do vstřikovačů, kde dojde k vytvoření směsi se vzduchem, která dál postupuje do válců motoru ke spalení.

Od nádrže až k regulátoru je tedy tlak v CNG soustavě stejný jako tlak v nádrži. Je nutné zajistit dokonalou plynětnost celého CNG systému. Předpis EHK OSN č. 110 [6] stanovuje pravidla schvalování tlakových lahví na CNG pro využití ve vozidlech stejně jako ostatních součástí systému CNG jako jsou ventily a pevné a ohebné spojovací části. Předpis dále stanovuje zkoušky, kterými musí tlaková láhev projít včetně reakce láhve na požár, tzv. zkouška ohněm.

Destrukci nádrže v případě nadměrného nárůstu tlaku v důsledku příliš vysoké teploty okolí zabráňuje přetlakové zařízení (Pressure Relief Device - PRD). V principu mohou být přetlaková zařízení spouštěná teplotou nebo tlakem. Na tlakových lahvích v CNG vozidlech se využívají přetlaková zařízení spouštěná teplotou (tzv. tepelná pojistka). Existují dvě konstrukčně rozdílná řešení přetlakových zařízení spouštěných teplotou. Výtoková cesta plynu je buď uzavřena skleněnou trubičkou s kapalinou, která se při zahřívání rozpíná, až dojde k prasknutí trubičky, nebo nízko-teplotně tavitelnou slitinou. V obou případech musí být tepelná pojistka navržena tak, aby došlo k řízenému úniku plynu z nádrže při působení teploty 110 ± 10 °C na pojistku.

Bezpečnost CNG vozidel

CNG jako palivo je dle svých fyzikálních vlastností jako hořlavá látka méně nebezpečné než benzin nebo nafta [2]. Teplota vznícení zemního plynu se v závislosti na složení uvádí mezi 550 a 580 °C, což je o více než 200 stupňů víc oproti benzínu či dieselu. Jeho meze hořlavosti se pohybují přibližně mezi 5 a 15 objemovými procenty, zatímco horní mez hořlavosti pro benzin a diesel je kolem 6 objemových procent. Zemní plyn je lehčí než vzduch. V případě úniku tedy stoupá směrem nahoru a dochází k jeho rozptýlení do okolí. Benzín i diesel vytváří louži hořlavé kapaliny pod vozidlem, blízko případnému iniciačnímu zdroji a zdrojům vysokých teplot. V případě úniku paliva tedy zemní plyn oproti benzínu či dieselu snižuje šanci, že dojde ke vznícení paliva. Riziko spojené se zemním plynem, které ale není spojeno s klasickými palivy, je možnost jeho akumulace v uzavřených prostorech a vznik výbušné atmosféry. Je také třeba si uvědomit, že v případě požáru vozidla zemní plyn výrazně přispěje k průběhu požáru. Při řízeném úniku plynu přes přetlakové zařízení, dojde k rychlému uvolnění velkého množství plynu a je zde také riziko, že s ohledem na místo a způsob uložení tlakových lahví a geometrii okolních částí vozidla dojde při zahoření plynu k vytvoření tzv. „jet fire“.

Ačkoliv z dostupných studií, zabývajících se bezpečností CNG vozidel vyplývá, že jsou tato vozidla stejně bezpečná jako konvenční vozidla na benzin nebo diesel [7, 8], přítomnost tlakové nádoby na palubě vozidla a možnost tvorby výbušné atmosféry při úniku paliva jsou specifické aspekty bezpečnosti vozidel na CNG, které je třeba v jejich běžném provozu uvažovat.

Statistiky o počtu nehod vozidel, při kterých došlo k úniku plynu, nejsou příliš dostupné a zároveň se data špatně porovnávají, protože každý stát má své legislativní předpisy na schvalování, provoz a údržbu CNG vozidel. Je tak obtížné statisticky zhodnotit bezpečnost CNG vozidel z hlediska četnosti nehod přímo spojených s únikem plynu a jejich příčin. Rešerši na toto téma provedli Hernandez et al. [9] a D. Lowel [10]. Z dostupných dat vyplývá, že nehod vozidel, které jsou spojeny s únikem plynu, je relativně malé množství (což může být způsobeno stále nízkou frekvencí CNG vozidel v provozu), ale až 30 procent z těchto nehod je tvořeno případy roztržení tlakové lahve. Ze všech statistik jasně vyplývá, že k nehodám dochází často u vozidel s neodborným zásahem do palivové soustavy vozidla a u CNG systémů ve špatném technickém stavu. V souvislosti s bezpečností CNG vozidel je tedy klíčová pravidelná a odborná údržba.

Co může nastat, když dojde k úniku plynu?

Posouzení bezpečnosti CNG vozidel lze rozdělit do dvou aspektů. Prvním aspektem je chování CNG vozidel v případě mimořádné události, která není přímo způsobena únikem CNG, ale je třeba uvažovat přítomnost tlakové nádoby ve vozidle a případný únik plynu na další průběh mimořádné události. Příkladem může být například dopravní nehoda a/nebo požár vozidla. Porozumění a znalost chování CNG systému je pak klíčová pro zasahující složky z hlediska nutných opatření při zásahu jako např. stanovení nebezpečné zóny při riziku roztržení tlakové lahve. Druhým aspektem je pak bezpečnost CNG vozidel jako přímého zdroje mimořádné události. To se týká především parkování vozidel v uzavřeném prostoru, tedy garážích, ale obecně všude, kde se se CNG vozidly manipuluje, tedy také v servisech nebo ve stanicích technické kontroly. Samostatnou otázkou je problematika bezpečnosti plnicích stanic.

Pakliže dojde k úniku plynu ze CNG systému, mohou nastat následující situace:

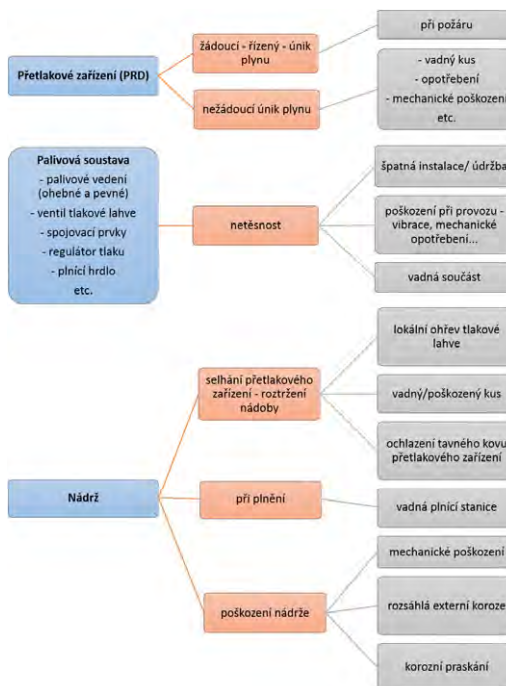
- 1) Unikající plyn ve směsi se vzduchem se vznítí ihned, nebo po malé chvíli od úniku. Dochází tedy k hoření plynu unikajícího z poškozené části CNG systému nebo z tepelné pojistky. Hořením se zahřívají další části vozu a požár se může rozšířit na hořlavé části vozu (např. plastové materiály nebo hořlavé

provozní kapaliny) nebo na okolní hořlavé materiály včetně dalších vozidel. Nedochozí k vytvoření výbušné koncentrace.

- 2) Plyn uniká, ale nedojde k zahoření. Pokud plyn uniká v uzavřeném prostoru, může se akumulovat a ve směsi se vzdušným kyslíkem se vytváří výbušná koncentrace. V případě výbuchu dosahují výbušné parametry vysokých hodnot. Metan je lehčí než vzduch, proto se akumuluje převážně v podstropní oblasti (může také následně pronikat stropní konstrukcí). Iniciací poté může být např. jiskra v podstropních elektrických rozvodech (zařízení) nebo osvětlovacích tělesech. Pokud plyn uniká na volném prostranství, může se také vytvářet výbušná koncentrace, ale plyn se šíří po větru a rozptýluje se. Případný výbuch nedosahuje tak velkých tlakových účinků jako v uzavřeném prostoru.

Jak (kudy) může dojít k úniku ze CNG systému?

Místa úniku plynu lze rozdělit do tří kategorií, viz obr. 1. Plyn může unikat přes přetlakové zařízení, přímo z nádrže nebo kdekoliv jinde na palivové soustavě, tedy v palivovém vedení, ventilech, spojovacích prvcích atd.



Obr. 1 Schéma možných míst úniku plynu ze CNG systému

Při úniku plynu z nádrže přes přetlakové zařízení rozlišujeme dvě možné situace. Únik plynu je žádoucí - tedy při otevření tepelné pojistky vystavené teplotě 110 °C, nebo je únik plynu nežádoucí. Přetlakové zařízení se spustí, ačkoliv by nemělo, a dojde tak k úniku plynu. Hovoříme o selhání přetlakového zařízení vlivem stárnutí, opotřebení či poškození. Druhým vážnějším selháním přetlakového zařízení je situace, kdy by se tepelná pojistka měla otevřít, ale neotevře. Jelikož je přetlakové zařízení na multifunkčním ventilu tlakové lahve posledním bezpečnostním prvkem, vede toto selhání k roztržení zásobníku. Přetlakové zařízení může selhat z několika důvodů. Zkouška ohněm, pro ověření funkce

přetlakového zařízení, kterou musí tlakové zásobníky projít, uvažuje rovnoměrné působení plamene v okolí tlakové lahve a pomalý nárůst teploty (na minimálně 590 °C během 5 minut). Byly zaznamenány případy, kdy k selhání přetlakového zařízení došlo vlivem lokálního ohřevu tlakového zásobníku [11]. Tlak v nádrži lokálním působením vysoké teploty na plášť tlakové lahve vzrostl natolik, že došlo k roztržení nádrže. Teplota na přetlakovém zařízení přitom nebyla dostatečná pro jeho aktivaci.

Dalším důvodem selhání může být lokální ochlazení tepelné pojistky, např. při hašení nebo vlivem expanze plynu, kdy dojde k výraznému podchlazení tepelné pojistky. Pokud teplota okolí nedokáže vyrovnat tuto tepelnou ztrátu, může být v případě tepelné pojistky s tavným kovem úplně zabráněno jejímu otevření - tavný kov tzv. „zamrzne“ nebo se otvory pro výtok plynu uvolní pouze částečně. Podle geometrie systému a typu tepelné zátěže, ale zbytek systému může být vystaven vysokým teplotám a hrozí tak opět lokální přehřátí zásobníku.

K roztržení zásobníku může také dojít vlivem jeho poškození korozi [12]. To se velmi často projeví při plnění tlakových zásobníků. Ke korozi může docházet vlivem okolního prostředí, nebo může docházet ke vzniku trhlin, tzv. koroznímu praskání. Povrch tlakových zásobníků může být z venku vystaven působení UV záření, solím, rozpouštědly, kyselinám, provozním kapalinám, vodě, vysokým a nízkým teplotám, ale také mechanickým vlivům - nárazy, štěrky, špatné uchycení - dojde tedy k poškození povrchu tlakové lahve oděrem.

Všechna možná místa úniku plynu netěsností z palivové soustavy závisí na konstrukci vysokotlakého systému, nicméně obecně se jedná o místa spojek, ventilů atd. Zamanian et al. [13] provedli studii s cílem stanovit pořadí částí CNG systému dle pravděpodobnosti, že dojde k úniku právě touto součástí. Výsledkem byla tabulka 12 částí CNG systému, kde jako nejvyšší prioritu z hlediska možného úniku má pevné vedení plynu a nejnižší prioritu má nádrž.

Jak stanovit množství unikajícího plynu?

Ať už dojde k úniku plynu z vozidla z jakéhokoliv důvodu, pro posouzení vzniklého rizika je třeba vědět, v jakém množství a jak rychle plyn ze CNG systému uniká. Velikost mraku plynu a jeho koncentrace jsou klíčovými faktory při posuzování možnosti výbuchu. Čím větší mrak je, tím větší šance je, že se dostane k iniciačnímu zdroji. Posouzení rizika je tedy kombinací pravděpodobnosti přítomnosti iniciačního zdroje a jeho polohy vůči mraku plynu o výbušné koncentraci [9]. Toman [14] ve svém rozboru o legislativních požadavcích na navrhování podzemních garáží určených pro parkování vozidel na CNG poukazuje právě na problém neznalosti množství unikajícího plynu.

Z výše uvedeného textu vyplývá, že existuje mnoho variant, kdy k úniku plynu může dojít. V tabulce 1 byly možné scénáře míst úniku převedeny na tři základní scénáře z hlediska rychlosti proudění a velikosti otvoru, kterým plyn uniká. Jedná se o velmi rychlé proudění z nádrže přes otvory, které jsou řádově o průměrech několik milimetrů, „pomalé proudění“ netěsností a uvolnění velkého množství plynu naráz z celého objemu nádrže.

Výtok plynu z oblastí s vysokým tlakem do prostředí s atmosférickým tlakem malým otvorem je problémem neustálý a je třeba uvažovat proudění stlačitelné tekutiny. Vyjádření rychlé a pomalé proudění plynu je kvalitativním vyjádřením toho, zda se jedná o proudění nadkritické (nadzvukové), kde je Machovo číslo větší než 1, či podkritické (podzvukové), kde je Machovo číslo menší než 1. Výtoková rychlost ze CNG systému se mění s časem v závislosti na změně rozdílu tlaků uvnitř a vně uzavřeného systému. V nadkritické oblasti proudění se s klesajícím rozdílem tlaků rychlost proudění nemění, je konstantní, ale hmotnostní tok plynu klesá vlivem změny hustoty plynu. V podkritické oblasti klesá, jak hmotnostní tok, tak rychlost proudění.

Pro výpočet rychlosti výtoku ideálního plynu malým otvorem existuje několik teoretických modelů, mezi nejpoužívanější patří tzv. polytropický model [15]. Z rychlosti proudění lze poté určit hmotnostní tok plynu ze systému CNG, známe-li velikost otvoru, kterým plyn uniká, ale také tzv. výtokový koeficient - korekci na reálné chování tekutiny. Výtokový koeficient závisí na geometrii otvoru, ostroty výtokové hrany a dalších faktorech. Při výtoku plynu přes otvory v tepelné pojistce je průměr výtokového otvoru pro danou konstrukci pojistky určen (nicméně není běžně dostupnou informací), při výtoku přes netěsnost či výtokové cesty částečně blokové lze hmotnostní tok plynu určit jen těžko.

Poslední možností úniku plynu z hlediska hmotnostního toku plynu ze CNG systému je velmi rychlé uvolnění celého objemu nádrže. Je-li tlaková nádrž o objemu 50 litrů (standardní velikost v CNG zástavbách osobních vozidel) plná, tedy při 200 barech, odpovídá množství plynu v nádrži zhruba 10 m³ plynu za normálního tlaku.

Tab. 1 scénáře úniku plynu z CNG systému z hlediska charakteristiky proudění

Scénář z hlediska proudění plynu	Scénář z hlediska místa/způsobu úniku plynu
Rychlé proudění z otvorů trysek do prostoru pod autem a bezprostřední blízkosti auta	- Únik z otevřeného přetlakového zařízení
„Pomalý“ únik plynu a jeho šíření do okolí	- Únik velkého množství plynu: <ul style="list-style-type: none"> • Únik ze zásobníku (porušené gumové těsnění) do okolí auta • Únik plynu z potrubí a zásobníku při netěsnosti a poruše uzavíracího ventilu • Bodová koroze tlakového zásobníku - mikrotrhlina, která nezpůsobí celkovou destrukci lahve (vznikne lokálně po porušení ochranného nátěru vlivem vlhkosti a soli)
Expanzivní šíření plynu do širokého okolí auta	- Únik zbytkového množství plynu: <ul style="list-style-type: none"> • Únik plynu pouze z potrubí do oblasti motoru
	- Rozsáhlá koroze pláště zásobníku - roztržení pláště zásobníku - mechanický výbuch

CFD modelování

Pro posouzení rizika, které se nese s únikem plynu, lze s výhodou využít matematické modelování počítačové dynamiky tekutin (CFD). CFD modelování lze s úspěchem použít pro simulaci disperze plynu [9, 16, 17, 18] v garážích, tunelech, městské infrastruktuře ale i na volném prostranství.

Při výtoku plynu přes přetlakové zařízení se při maximálním tlaku 200 bar dosahuje proudění v nadkritické oblasti. Při průchodu plynu otvorem dochází ke vzniku rázových vln a expanzi plynu. Proudění je silně neustálené, vznikají charakteristické nestability, tzv. Machovy struktury [19]. Z hlediska CFD modelování se jedná o značně komplikovaný problém. Výpočet vyžaduje velmi malý časový krok až kolem 10⁻⁹ s, přitom požadovaný simulační čas je v řádu minut, uvažujeme-li úplně vypuštění objemu nádrže přes přetlakové zařízení. CFD simulacemi nadkritického proudění a vznikajících struktur při výtoku vodíku a metanu z malých otvorů se zabývali Hamzehloo a Aleiferis [20].

Jestliže je primárním cílem CFD simulace studovat disperzi plynu od zdroje úniku, pohyb hořlavého mraku vzhledem k okolní geometrii, jeho interakci se systémy pro odvětrání a detekci úniku plynu, případně zahoření plynu, je třeba uvažovat relativně velké výpočetní domény. V praxi je tedy pro inženýrské výpočty z důvodu výpočetního času téměř nemožné simulovat únik plynu přes reálný otvor v reálné velké výpočetní doméně. Tvorba nestabilit a chování

proudu v těsné blízkosti výtokového otvoru nejsou ale v inženýrské praxi hlavním cílem simulace. V literatuře lze najít korelace, které přemostí oblast toku nadkritickou rychlostí v blízkosti otvoru na tzv. ekvivalentní tok, jehož charakteristiky jsou odvozeny od podmínek v místě otvoru, ale tok je podkritický. Přehled modelů uvádí Franquet et al. [19]. Většina modelů stanovuje otvor o tzv. ekvivalentním nebo pseudo průměru při předpokladu zachování hmotnostního toku otvorem. Některé modely zachovávají průměr výtokového otvoru, ale stanovují ekvivalentní výtokovou rychlost. Hernandez et al. [9] uvádí pro výtok plynu ze CNG nádrže 8 mm otvorem při tlaku 250 bar počáteční hmotnostní tok plynu téměř 1900 g/s. Pro únik z vysokotlaké části vedení CNG systému otvorem o průměru 1.83 mm pak uvádí hmotnostní tok 120 g/s. Middha a Hansen [18] uvádí pro výtok CNG z nádrže přes 6 mm otvor při tlaku v nádrži 200 bar počáteční hmotnostní tok plynu do domény 375 g/s.

Závěr

Zemní plyn je perspektivním zdrojem energie využitelným v dopravě. Bezpečnost při manipulaci, skladování a samotném provozu vozidel na stlačený zemní plyn je tedy aktuální problematikou. Stanovení rizikových scénářů úniku plynu a odpovídajícího hmotnostního toku plynu do domény poskytne nutnou okrajovou podmínku pro všechny typy analýz rizik spojených s únikem plynu ze CNG systému. Jak bylo ale naznačeno v tomto příspěvku, jedná se o velmi komplexní problematiku s vysokou variabilitou konstrukčních systémů a možných scénářů úniku plynu. Pro určení reálných okrajových podmínek pro CFD simulace je třeba získat experimentální data skutečného úniku CNG pro definované scénáře.

Poděkování

Práce probíhá s finanční podporou z Programu bezpečnostního výzkumu ČR v letech 2015-2020 (BV III/1 -VS) pro projekt VI20172019077 „Průběh a důsledky havarijního úniku CNG z osobních automobilů“.

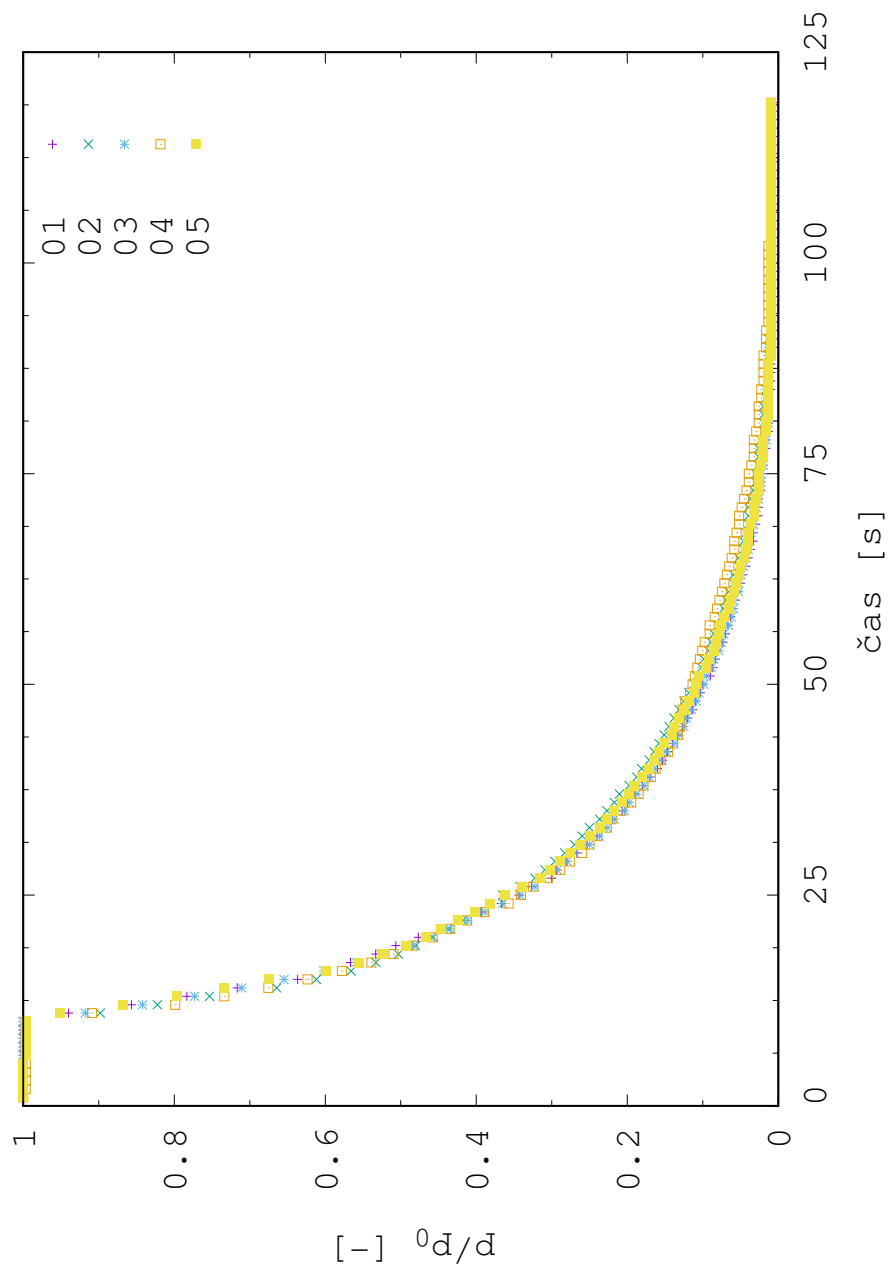
Použitá literatura

- [1] ECONOMIDES, M.J.; WOOD, D.A.: The state of natural gas. *Journal of natural gas science and engineering* 2009, 1, 1-13.
- [2] KHAN, M.I.; YASMIN, T.; SHAKOOR, A.: Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015, 51, 785-797.
- [3] KAISER, D.: *Podpora zavedení vozidel s pohonem CNG a LPG do městského provozu*. diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, 2016.
- [4] GÜDÜ, T.; ÖZKAN, C.; AVGAN, U.: *Fuel storage system developments for natural gas vehicles*; TOFAŞ R&D Engine, Transmission and Control Systems.
- [5] RED, CH.: *Pressure vessels for alternative fuels*, 2014-2023. CompositesWorld. <http://www.compositesworld.com/articles/pressure-vessels-for-alternative-fuels-2014-2023> (accessed June 08, 2017).
- [6] EHK OSN č.110. Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK OSN) č. 110 - Jednotná ustanovení pro schvalování: I. zvláštních součástí motorových vozidel, která ve svém pohonném systému používají stlačený zemní plyn (CNG) a/nebo zkapalněný zemní plyn (LNG) II. vozidel s ohledem na zástavbu zvláštních součástí schváleného typu pro použití stlačeného zemního plynu (CNG) a/nebo zkapalněného zemního plynu (LNG) v jejich pohonném systému [2015/999]. 2015. 169 p.
- [7] BERGHMANS, J.; VANIERSCHOT, M.: Safety aspects of CNG cars. *Procedia Engineering* 2014, 84, 33-46.
- [8] SCHNEIDER, B.: Comparing the Safety of Parking CNG-Cars with Conventionally Fuelled Cars (Gasoline, Diesel), *10th International Conference of Prospects for the Development and Use of CNG/LNG in Transport*, Rakousko, 2017.
- [9] HERNANDEZ, M.; LIANG, M.; CHENG, H.; ROSSETTO, M.; MARTIN, J.; POISSON, D.: *Safety investigation of CNG leaks in enclosed parking structures: computational fluid dynamics modelling and analysis*; National Research Council Canada: IFCI Report; no. IFCI-OTHER-CTR-003, 2013.
- [10] LOWEL, D.: *Natural Gas Systems: Suggested Changes to truck and Motorcoach Regulations and Inspection Procedures*; Department of Transportation, Federal Motor Carrier Safety Administration: Report FMCSA-RRT-13-044, 2013.
- [11] PERRETTE, L.; Wiedemann, H.K.: *CNG buses fire safety: learnings from recent accidents in France and Germany*, Society of automotive engineer world Congress Detroit, USA, 2014
- [12] NOVÁK, P.: *Koroze kovů* [online]; Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected> (accessed June 17, 27).
- [13] ZAMANIAN, A.; GHAFGHAZI, I.; SABETI, M.D.: *CNG cars safety in accidents* (case study: Iran).
- [14] TOMAN, S.: Větrání hromadných garáží s vozidly na plynná paliva. In *Sborník příspěvků z mezinárodní konference Požární ochrana 2016*; 2016; pp 434-438.
- [15] SULLIVAN, D.A.: *Historical Review of Real-Fluid Isentropic Flow Models*, 1981.
- [16] VENETSANOS, A.G.; BARALDI, D.; ADAMS, P.; HEGGEM, P.S.; WILKENING, H.: CFD modelling of hydrogen release, dispersion and combustion for automotive scenarios. *Journal of Loss Prevention in Process industries* 2008, 21, 162-184.
- [17] CHOI, J.; HUR, N.; KANG, S.; LEE, E.D.; LEE, K.: *A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage*, Korea, 2013.
- [18] MIDDHA, P.; HANSEN, O.R.: *CFD simulation study to investigate the risk from hydrogen vehicles in tunnels*, Norsko, 2008.
- [19] FRANQUET, E.; PERRIER, V.; GIBOUT, S.; BRUEL, P.: *Free underexpanded jets in a quiescent medium: A review*, *Progress in Aerospace Sciences* 77(2015) 25-53, Francie, 2015.
- [20] HAMZEHLOO, A.; ALEIFERIS, P.G.: *Large eddy simulation of highly turbulent under-expanded hydrogen and methane jets for gaseous-fueled internal combustion engines*, Velká Británie, 2014.

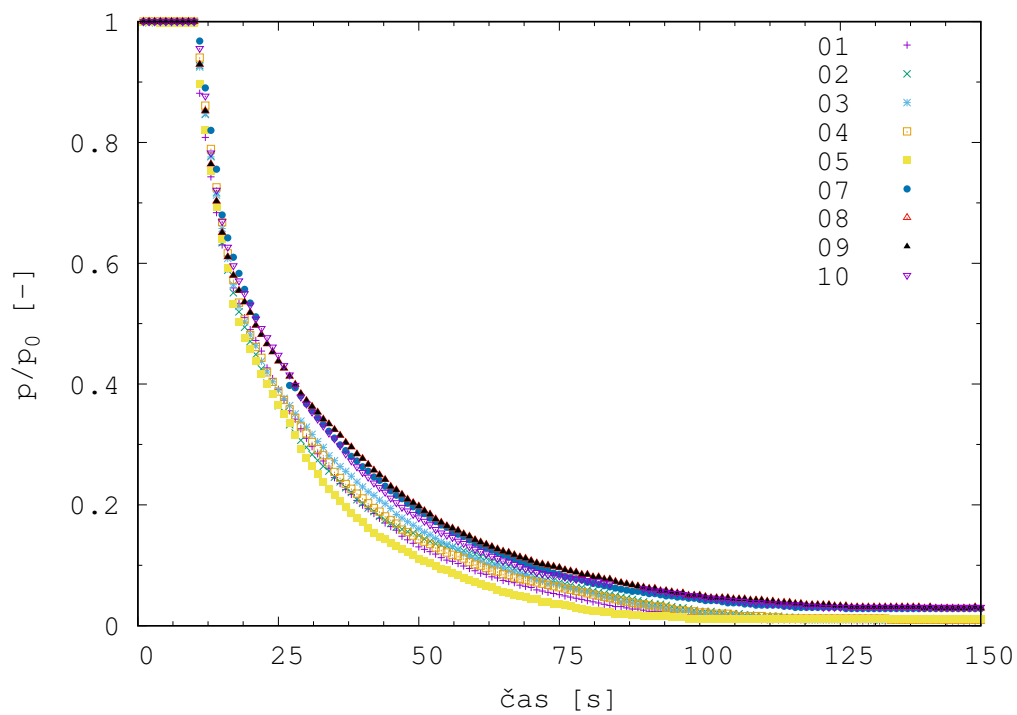
B Experimentální data výtok vzduchu

Výtok přes plně otevřenou tepelnou pojistku - kapitola 2.2.1.

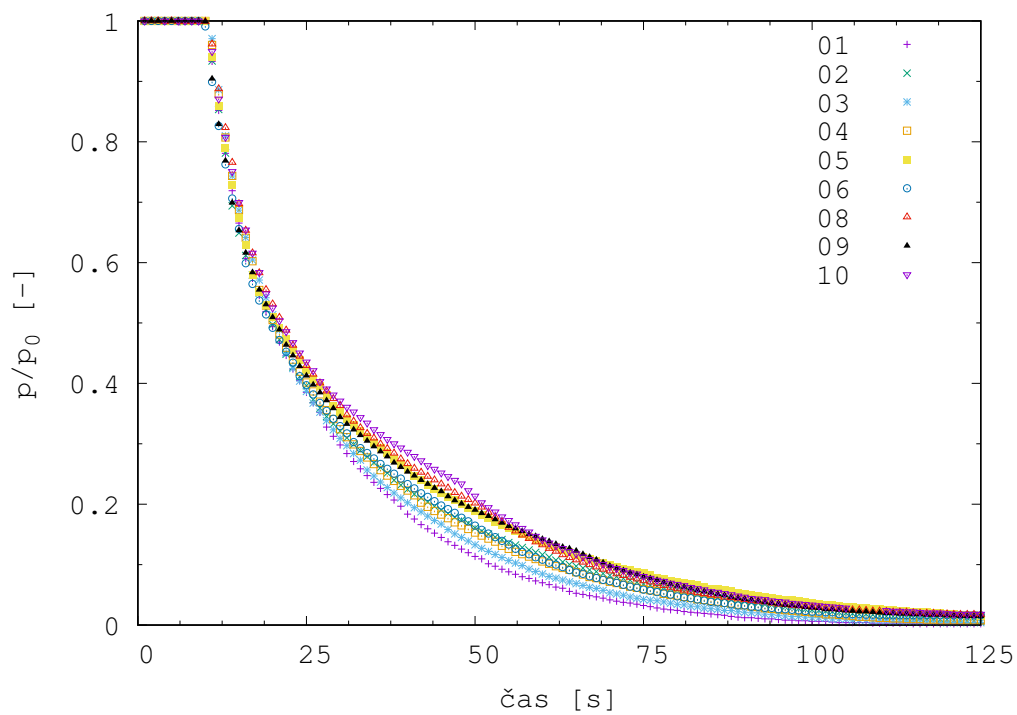
B.1 Tlak - jednotlivá měření



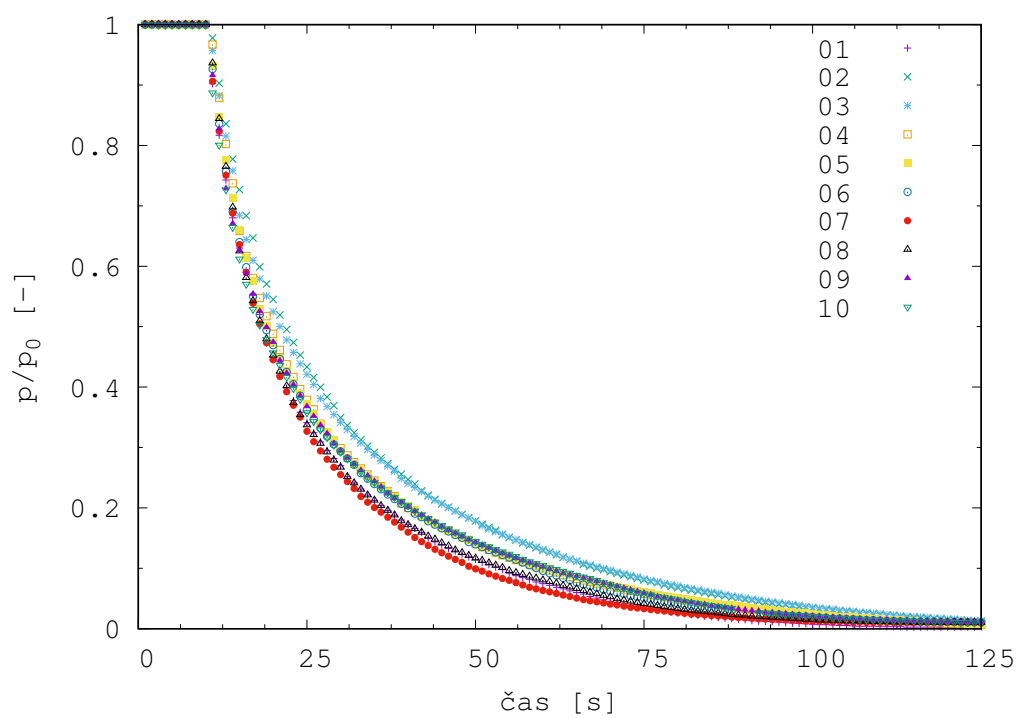
Obrázek 5.1: Počáteční tlak v nádobě 30 bar.



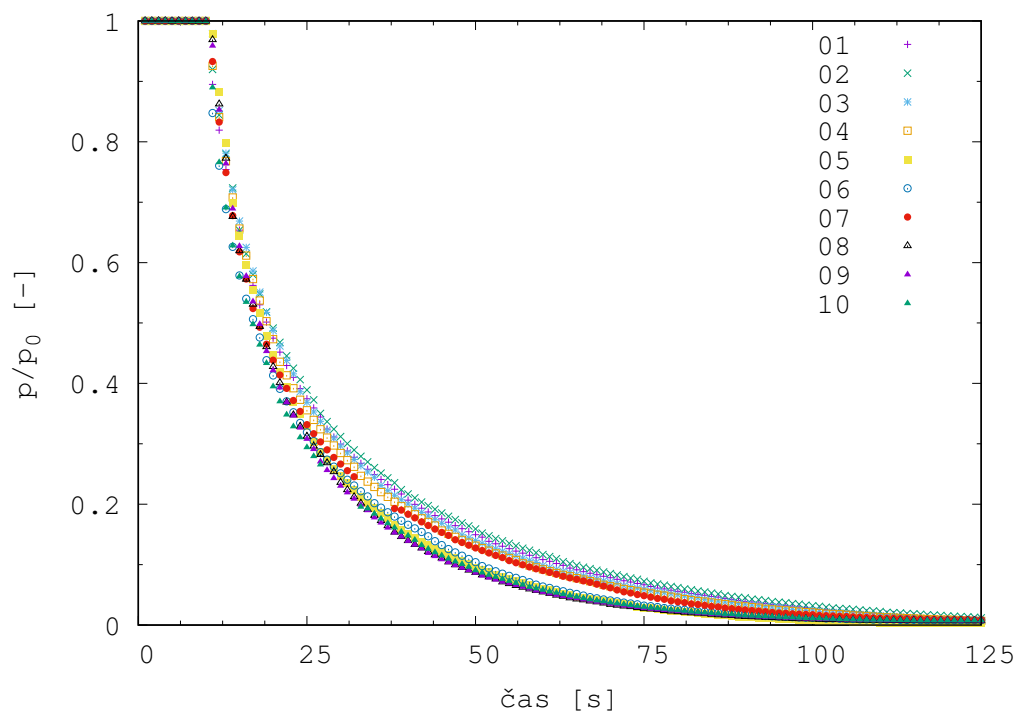
Obrázek 5.2: Počáteční tlak v nádobě 50 bar.



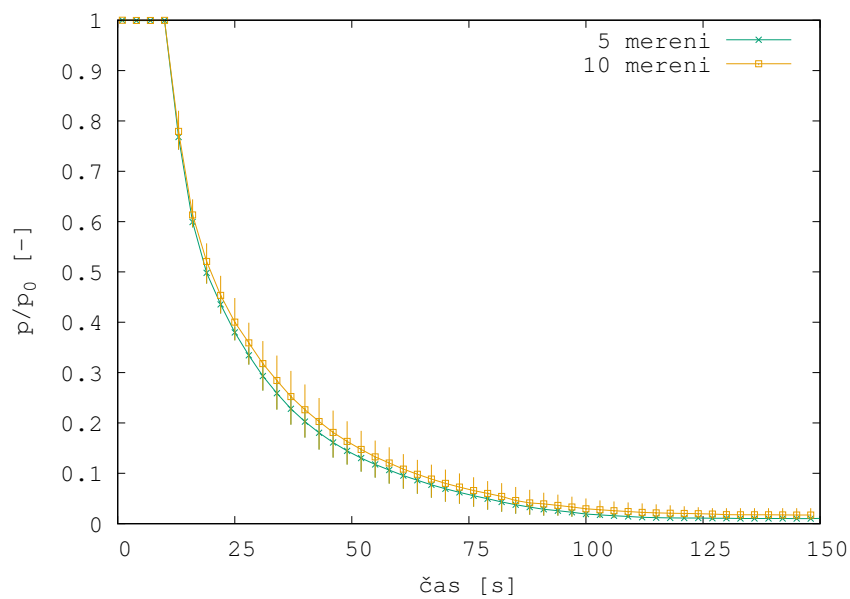
Obrázek 5.3: Počáteční tlak v nádobě 100 bar.



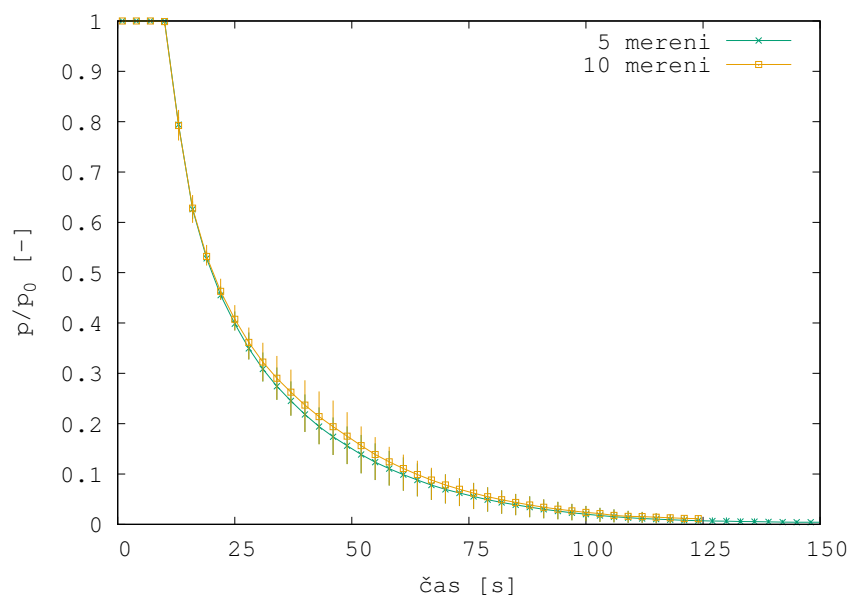
Obrázek 5.4: Počáteční tlak v nádobě 150 bar.



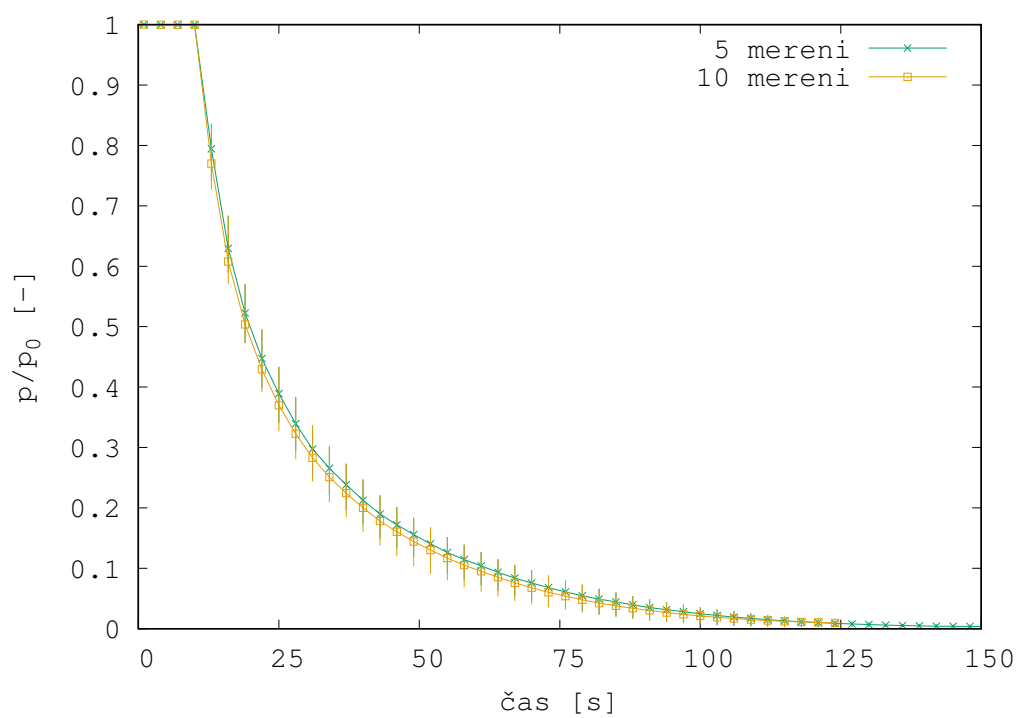
Obrázek 5.5: Počáteční tlak v nádobě 200 bar.

B.2 Tlak - porovnání průměrné hodnoty z 5 a 10 měření

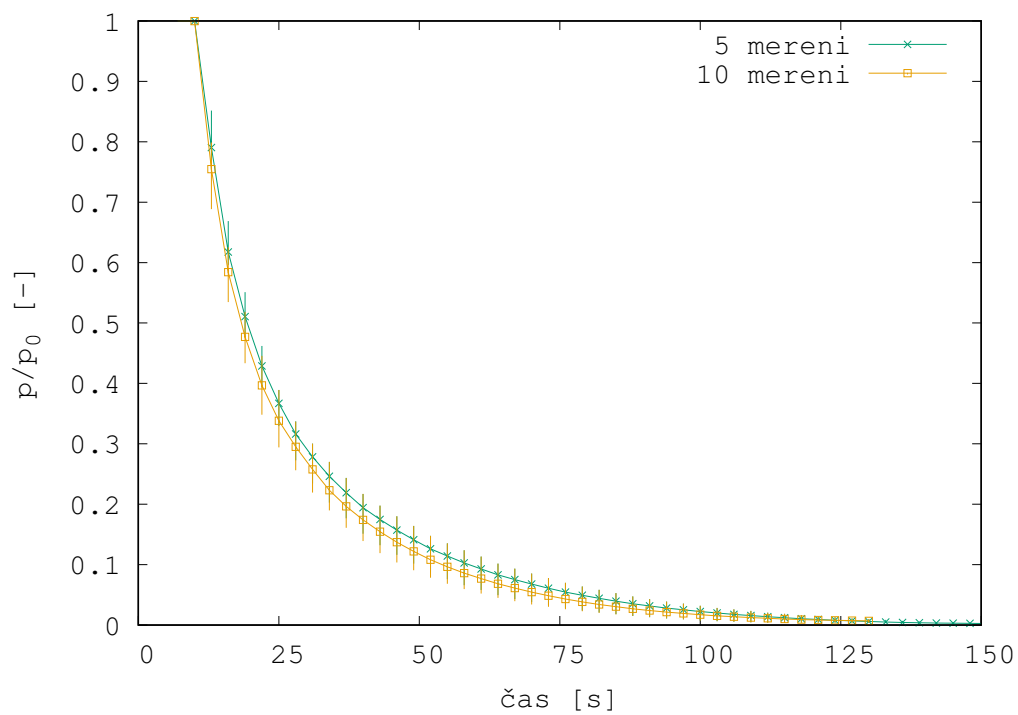
Obrázek 5.6: Počáteční tlak v nádobě 50 bar.



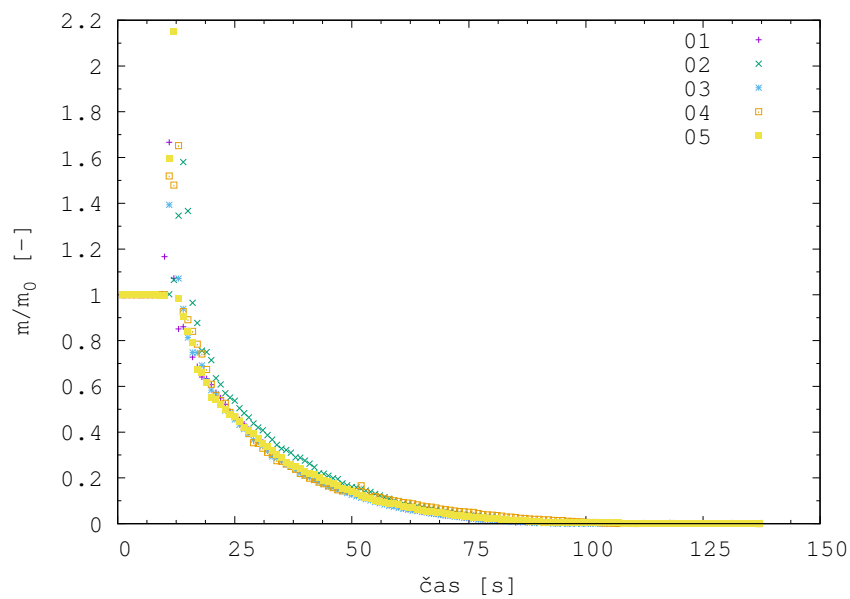
Obrázek 5.7: Počáteční tlak v nádobě 100 bar.



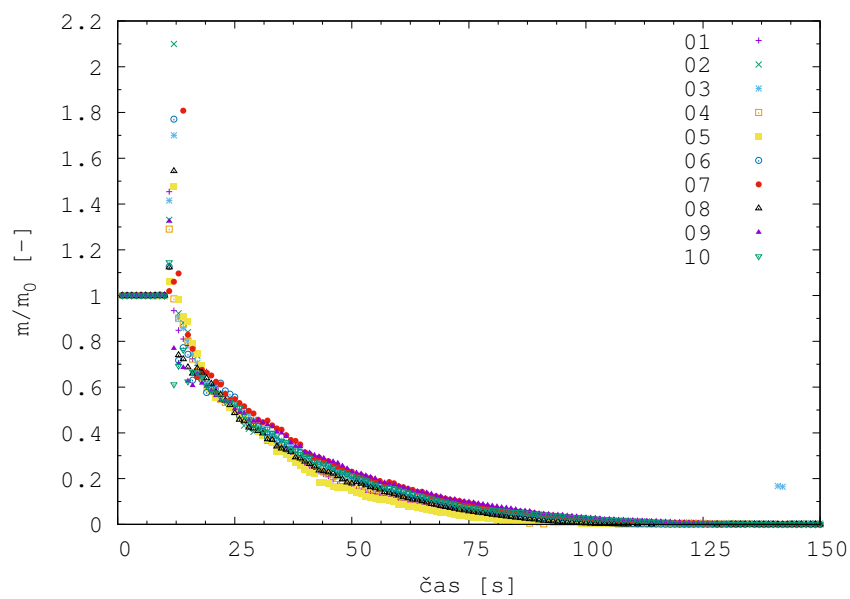
Obrázek 5.8: Počáteční tlak v nádobě 150 bar.



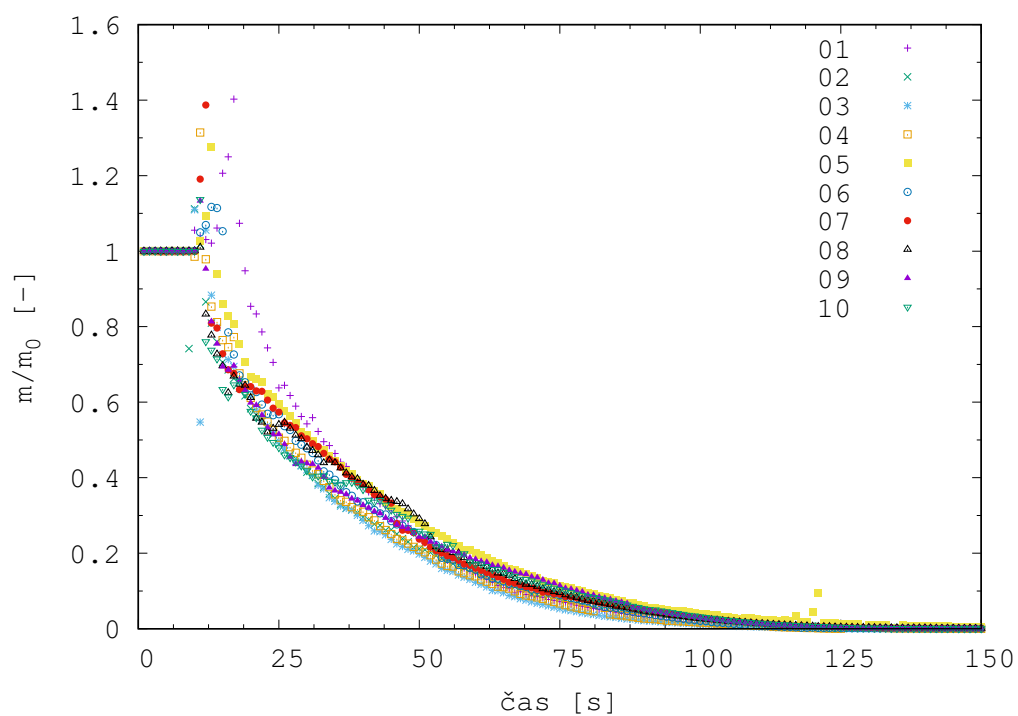
Obrázek 5.9: Počáteční tlak v nádobě 200 bar.

B.3 Hmotnost - jednotlivá měření

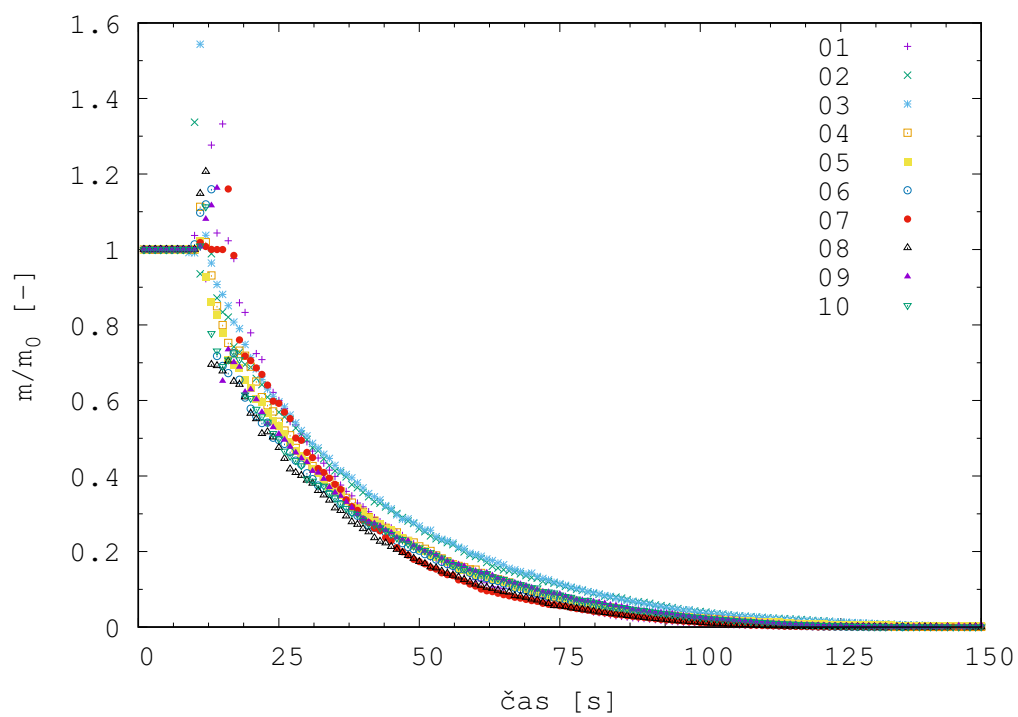
Obrázek 5.10: Počáteční tlak v nádobě 30 bar.



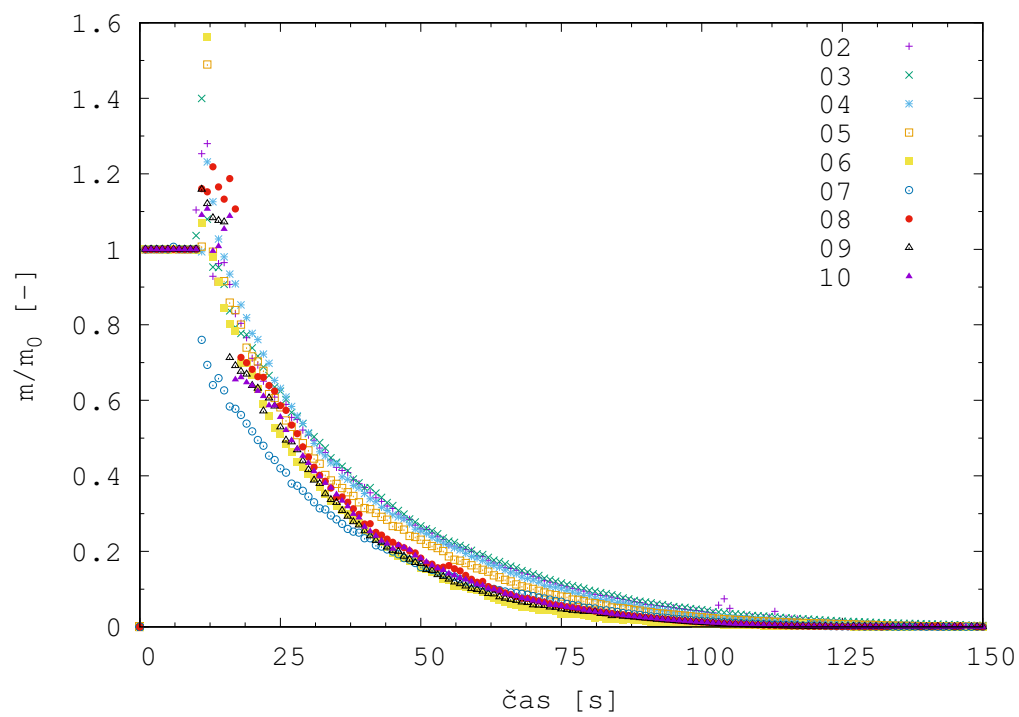
Obrázek 5.11: Počáteční tlak v nádobě 50 bar.



Obrázek 5.12: Počáteční tlak v nádobě 100 bar.



Obrázek 5.13: Počáteční tlak v nádobě 150 bar.



Obrázek 5.14: Počáteční tlak v nádobě 200 bar.

C Měření AV

**ÚSTAV PRO HYDRODYNAMIKU
Akademie věd České republiky, v. v. i.**

Pod Paťankou 30/5, 166 12 Praha 6
TEL: 233 109 011*TEL/FAX: 233 324 361*E-mail: ih@ih.cas.cz

TECHNICKÁ ZPRÁVA**Měření rychlostního pole při simulovaném havarijním
výtoku CNG z osobního automobilu**

OBJEDNATEL: Ministerstvo vnitra ČR
Generální ředitelství HZS ČR

Praha 7, Nad Štolou 936/3
PSČ 170 34
IČO: 00007064
DIČ : CZ00007064

ZHOTOVITEL: Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i.

Praha 6, Pod Paťankou 30/5
PSČ: 166 12
IČO: 67985874
DIČ: CZ6798574

ČÍSLO ZAKÁZKY: MV- 57610-2/TUPO-2017
UH 7060/2017

VYPRACOVAL: Ing. Jiří Konfršt, Ph.D. & Ing. Michael Mildner
Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i.
V Praze dne 4/12/2017

ÚVOD:

Předmětem vypracované zprávy jsou výsledky experimentální práce plynoucí z činnosti prováděné na základě smlouvy o dílo registrované pod číslem 60/2017 u objednavatele a 17/2017 u zhotovitele.

Ve zprávě jsou prezentovány zhotovitelem provedené činnosti chronologicky, tak jak byly prováděny, a eventuálně upřesňovány dle dosažených poznatků.

Členění textu je provedeno následovně:

První část je věnována přípravě experimentálního pracoviště, tj. vyzdvižení automobilu, simulaci vozovky, instalaci vzduchových rozvodů, kompresoru a zásobníku stlačeného vzduchu.

Druhá část informuje o typu proudových polí kolem automobilu vzniklých po otevření havarijních ventilů tlakových CNG nádrží, tj. věnuje se kvalitativní analýze proudění

Třetí část poskytuje výsledky z měření rychlostního pole kolem automobilu v předem stanovených místech a bodech.

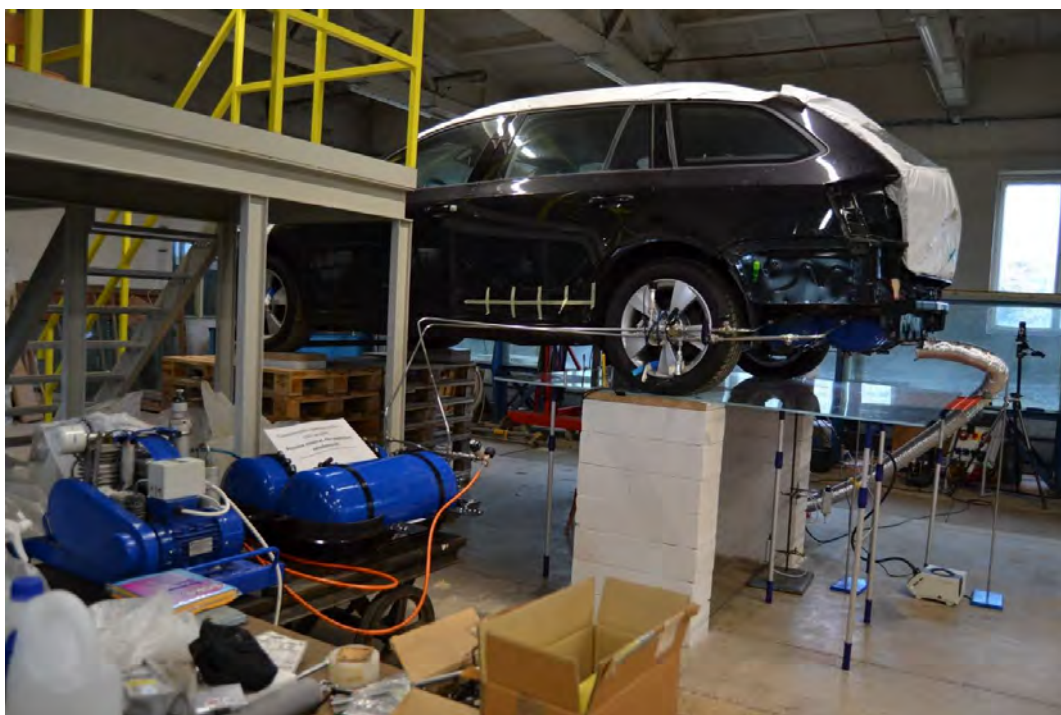
Čtvrtá část se soustředí na detailnější zmapování oblasti za pravým zadním kolem vozidla, kde se vyskytuje výtrysk plynu sahající několik metrů od vozidla.

Pátá část provádí závěrečné shrnutí provedeného díla.

První část: Příprava pracoviště a instalace automobilu

Motivace a postupy

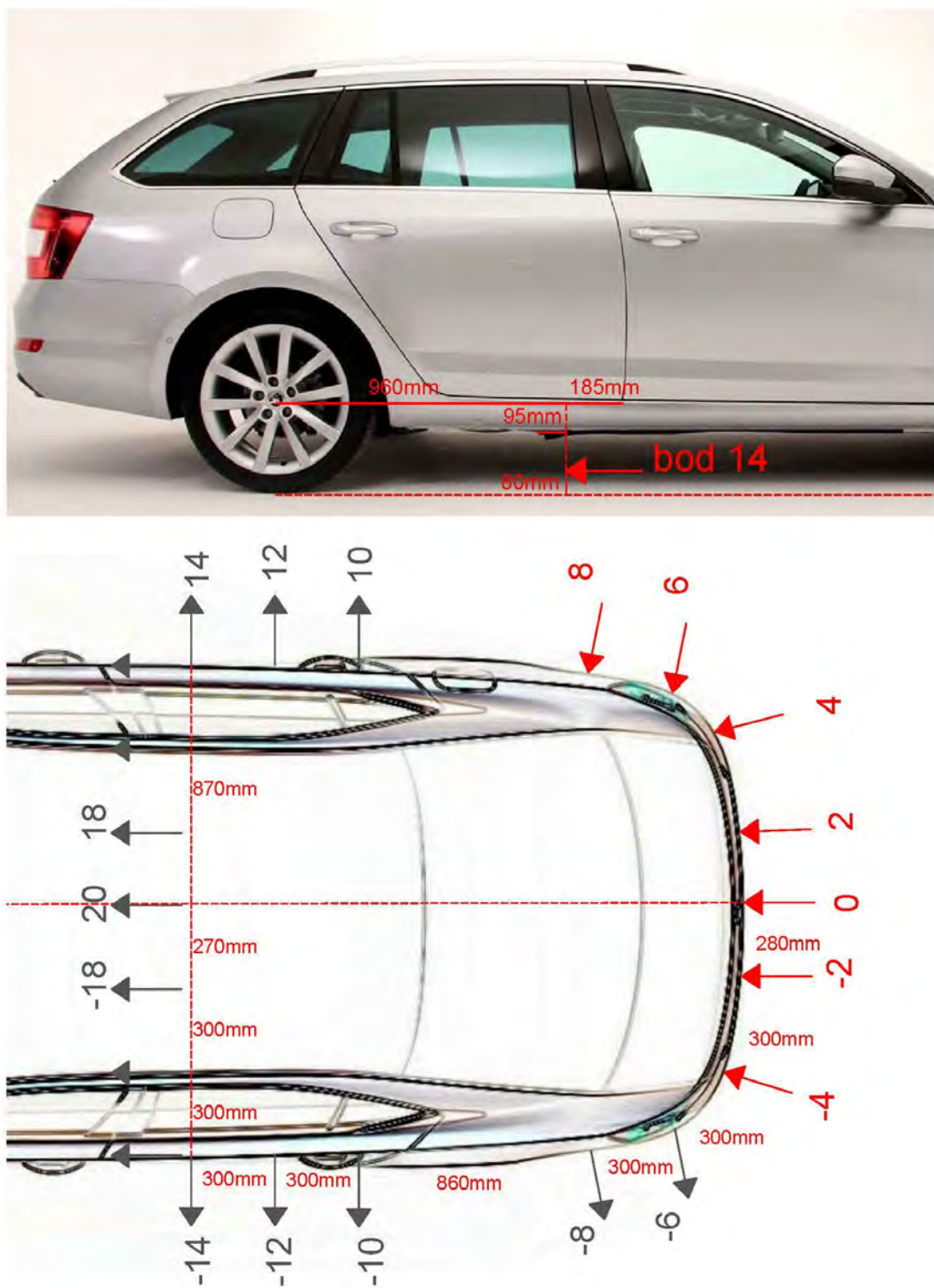
- Instalace vozidla byla provedena ve velké experimentální hale ÚH AV ČR. Tento prostor byl zvolen z důvodu snadné manipulace s vozidlem, odlehlosti od kanceláří ústavu, kvůli vysoké hlučnosti při provádění experimentálních prací, a vybavení prostor s ohledem na zdvihací prostředky pro manipulaci s vozidlem. Osobní vozidlo typu kombi bylo vyzdviženo do výšky cca 90 cm a umístěno na pilíře z přesných Ytong bloků. Před vyzdvižením vozidla byl proveden výpočet nosnosti bloků a řešeno event. možnost zvlhnutí bloků při nechtěném rozlití vody na podlahu haly. Dále mezi kola a konce pilíře byly vloženy 10 cm silné laminové přířezy, aby se roznesl bodový tlak pod kolem vozidla na plochu pilíře. Fixace automobilu byla provedena textilním úvazkem za přední levé kolo vozidla přitažením k ocelové konstrukce. Vyzdvižení vozidla se realizovalo pomocí palet, jeřábové ruky o nosnosti 2,6t a textilních úvazků používaných odtahovou službou. Po vyzdvižení a instalaci vozidla byla provedena zkouška jeho stability.
- Simulace vozovky se řešila čirou polykarbonátovou deskou umístěnou v zadní polovině pod vozidlo s přesahy přes jeho půdorys. Prohnutí desky se zamezilo teleskopickými podpěrami. Pod deskou byl umístěn rastr se čtvercovými oky z důvodu snadné lokalizace proudových polí.
- Po obvodu automobilu a jeho středu pod podlahou a na desce se provedlo zaměření osy vozidla a byly rozměřeny body pro plánovaná místa měření. Zaměření se provedlo opticky a pro kontrolu se významné markanty vozidla osadily olovnicí.
- Na boční straně mezi vyzdviženým automobilem a ocelovou konstrukcí byl instalován 260bar kompresor a dvě vysokotlaké nádoby. Přívod vzduchu, jdoucí od tlakových nádob k pojistným ventilům přes tlakové lahve instalované v automobilu, byl veden dvěma větvemi „k přednímu a zadnímu“ pojistnému ventilu, a osazen kulovými uzavíracími ventily, jehlovými regulačními armaturami a absolutními tlakoměry.
- Fotodokumentace stavu instalace automobilu viz obr.1 a obr.2.
- Rozmístění měřících bodů po obvodu automobilu obr. 3



Obr. 1: instalace tlakového rozvodu, levá část vozidla



Obr. 2: instalace – pohled na pravou část vozidla



Obr. 3: rozmístění měřících bodů po obvodu automobilu

Druhá část: Vizualizace proudových polí

Testování systému rozvodu vzduchu a plnění lahví

- Problematickou se ukázala doba plnění dvou tlakových lahví v porovnání s časem jejich vyprázdnění. Pokud probíhalo plnění prázdných lahví, tj. z tlaku 1 bar na 230 (260) barů, doba plnění se pohybovala mezi 7-8 hodinami, přičemž systém byl vyprázdněn při plném otevření ventilů za 3,5 min. Doba se zvětšovala s velikostí tlaku v nádobách, tj. nad 200 bar nárůstek tlaku o každých 10 bar trval více jak 45 min. Z tohoto důvodu se tlaky při měření pohybovaly od 200 do 140 bar/80 bar (pro vizualizaci).
- Další problémovou záležitostí bylo zamrzání rozvodů a tvorba jinovatky na pojistných ventilech a výstupních tryskách viz obr. 5. a obr 6.



Obr. 5: tvorba jinovatky na přívodním potrubí k ventilům

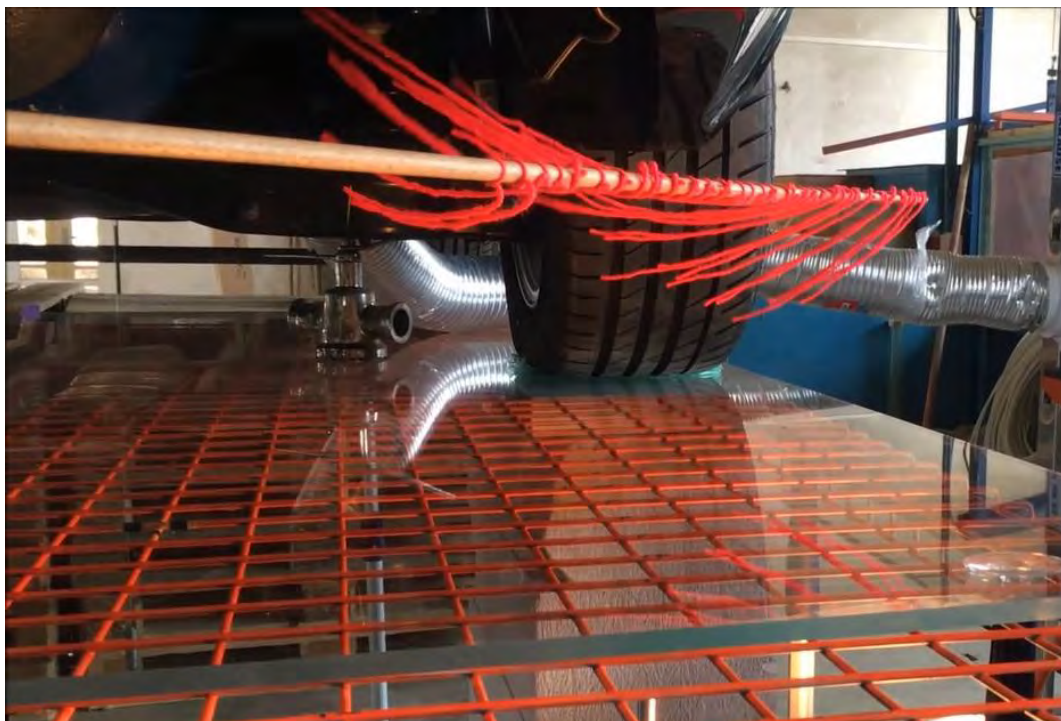
- Z tohoto důvodu se tlaky při měření pohybovali od 200 do 140 bar a měřilo se v kratších časových úsecích, tj. z průběhu rychlostí byl stanoven okamžik, ve kterém se ustálila rychlost a to pokud možno při minimální změně tlaku v nádržích a rozvodu.



Obr. 6: zamrzání pojistného ventilu

Bavlnkový test

- K získání první představy o proudění kolem vozidla i pod ním se použil bavlnkový test viz obr. 7



Obr. 7: bavlnkový test

- Bavlnkový test se provedl ve všech místech po obvodu vozidla. Zvláštní pozornost se věnovala místům, kde docházelo ke změně směru proudění, tj. především v oblasti levého zadního kola obr.8. Z výsledků bavlnkového testu byly provedeny videozáznamy.



Obr. 8: bavlnkový test - změna proudění

Kouřová vizualizace

- Před bodovým měřením rychlosti je důležité mít představu o celkovém tvaru proudového pole kolem automobilu. Tato informace se získá pomocí kouřové vizualizace. Je nutné zvolit vhodný typ kouřové látky, tj. takové, která vytvoří buď aerosol, kapky či pevné částice tak, aby jejich hustota korespondovala s hustotou vzduchu a umožnila nám tak vizualizovat skutečné proudnice proudového pole vzduchu. Původní záměr byl použít heliových bublinek nicméně se ukázalo, že generovat heliové bublinky v potřebném množství pro tyto účely není technicky schůdné. Využila se tedy kapalina umožňující termické zplyňování, která umožnila nastavení potřebných parametrů, jednak pomocí teploty teplosměnné plochy, tak množstvím přivedené kapaliny a jejím ředěním.
- Kouř do proudového pole jsme přiváděli ohebnou trubicí pro vzduchotechniku. Dále jsme kouř dle potřeby usměrňovali deskou do míst, kde bylo třeba proudové pole zviditelnit.
- Zviditelnění proudového pole bylo zaznamenáno na videozáznam. Ukázky z těchto vizualizací jsou na obr. 9, obr. 10, obr. 11, obr. 12., na kterých je demonstrováno přisávání vzduchu ze zadní části vozidla do prostoru tlakových lahví. Po otevření pojistných ventilů se v důsledku proudění

z výstupních trysek vytvoří kolem nádrží na CNG vír, jež si přisává vzduch ze zadní části automobilu a vytlačuje jej do stran a do přední části pod podlahu vozu.



Obr. 9: Kouřová vizualizace proudění – přisávání vzduchu v zadní části vozu



Obr. 10: Kouřová vizualizace proudění – zadní část vozu



Obr. 11: Kouřová vizualizace proudění – zadní část vozu

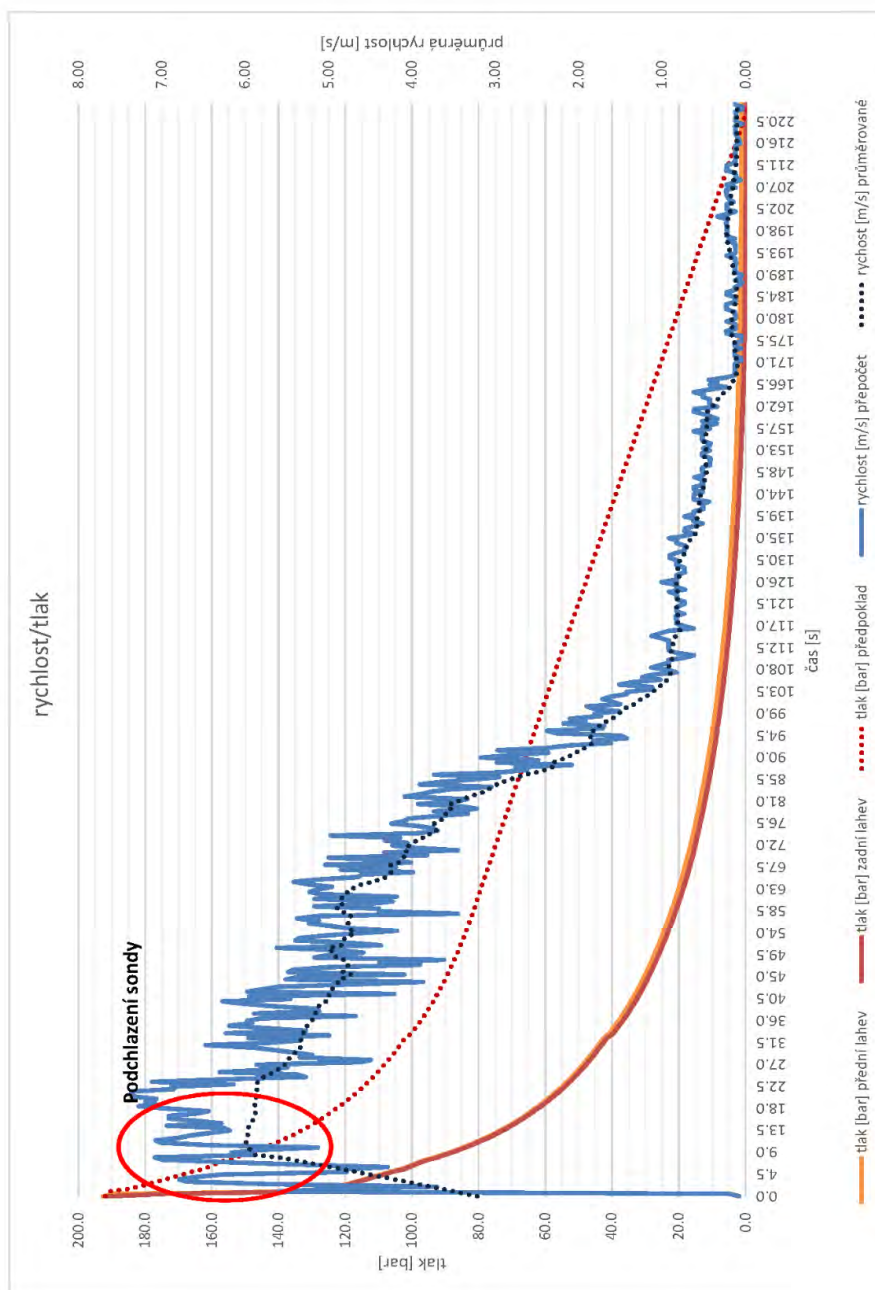


Obr. 12: Kouřová vizualizace proudění – zadní část vozu, umístění dvou tlakových sond

Třetí část: Měření rychlostního pole kolem vozidla

Testování měřicího systému

- Pro bodové měření rychlosti ve zvolených bodech dle obr.3 bylo testováno několik metod.
- S ohledem na časovou náročnost, rozsah zakázky a účel měření byly zvažovány dvě měřicí metody a to měření rychlosti pomocí 5-otvorové tlakové sondy (možnost měření jak velikosti tak i jejího směru) a anemometrická metoda HWA (CTA) „žhaveného drátku“. Po prvních testech se jako vhodnější ukázala metoda CTA.
- Na grafu 1 je demonstrováno testování vlastností tlakového okruhu a sondy HWA.



Graf 1: Test tlakového systému a sondy HWA

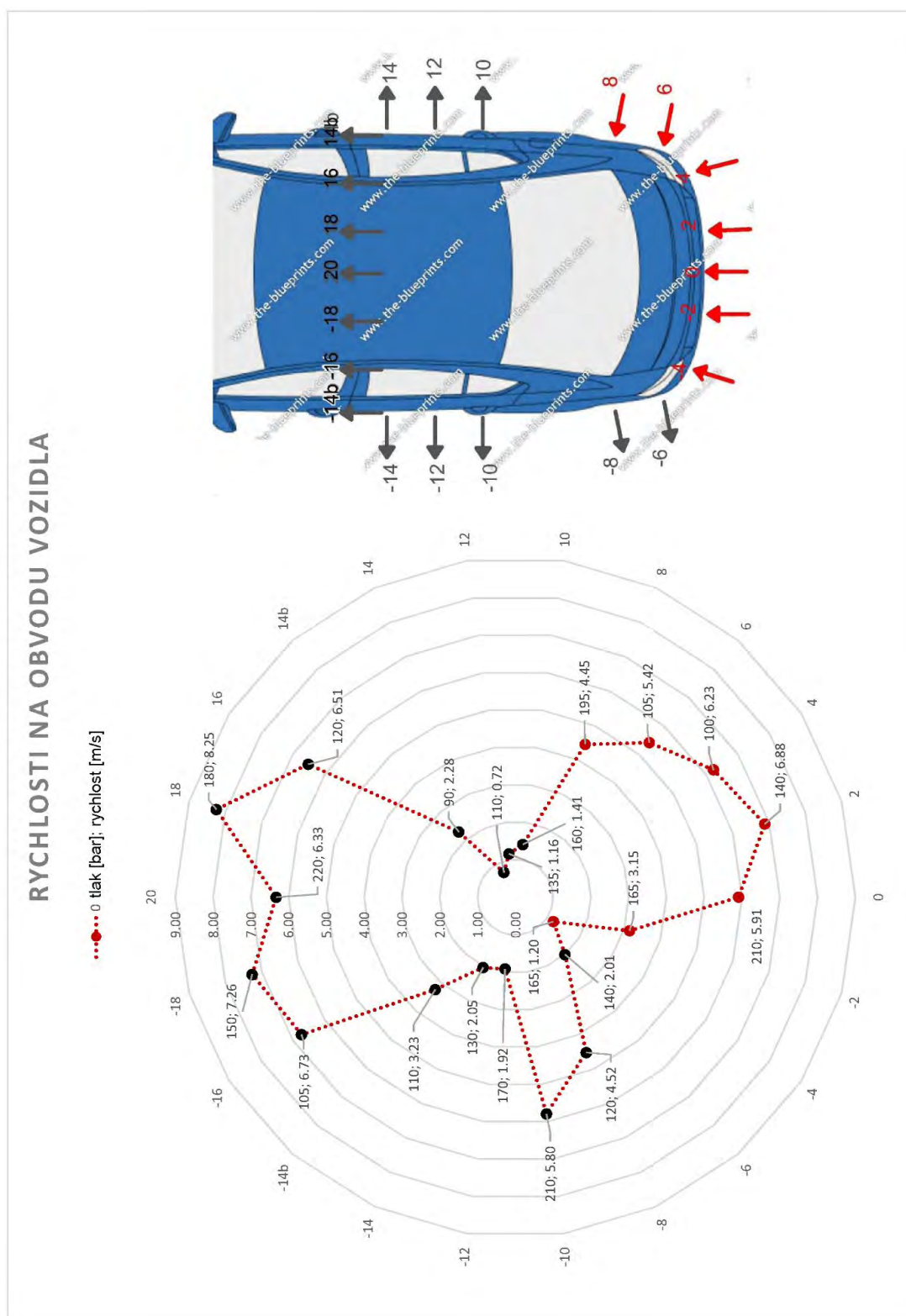
- Výsledky testu dle grafu 1 ukazují důležité skutečnosti pro následná měření. Bezprostředně po otevření kulových kohoutů u natlakovaného systému na 200 bar dojde k poklesu tlaku v potrubí (v místě snímání abs. tlaku) o 40-50 bar. Tento pokles je způsoben tlakovou ztrátou v potrubí a místními ztrátami mezi tlakovými zásobníky a místem, kde jsou umístěny tlakoměry. Tj. při plném výtoku vzduchu z pojistných ventilů a plně natlakovaném systému, přívodní potrubí dle navrženého uspořádání není schopno dodávat dostatečné množství vzduchu do míst výtoku z trysek, jak ukazuje průběh tlaku v rozvodu.
- Kapacita systému (dvou zásobníků tlaku) je při plném otevření systému vyčerpána za cca 60s tj. za tento čas nám klesne tlak v zásobnících z 200 bar na 20 bar.
- Sonda HWA spolehlivě zachycuje měření turbulentních fluktuací. Nicméně na začátku měření vykazuje zkreslení způsobené ochlazením sondy. Po výtoku vzduchu z trysek dochází k expanzi-ochlazení vzduchu, které sonda kompenzuje tak, aby obtékání jejího senzoru probíhalo stále za konstantní teploty. S tímto efektem je nutné počítat jednak při vyhodnocování výsledků měření a dále při stanovení minimální „nutné“ doby měření v rámci jednoho měřícího bodu za daného tlaku.

Hodnoty naměřených rychlostí po obvodu vozidla

- Bodové měření rychlostí probíhalo v místech dle obr.3. Výsledné hodnoty rychlostí jsou uvedeny v tabulce č.1., jejich směr je znázorněn v grafu č. 2.
- Měření rychlosti probíhalo v každém měřícím bodě při současném snímání průběhu tlaku v potrubí. Výsledná hodnota tlaku a rychlosti se získala průměrováním hodnot z naměřených dat. Pro vyhodnocení rychlosti se vybíraly úseky záznamu, které odpovídaly záznamu teplotně stabilizovanému senzoru. Tlak se vyhodnocoval jako průměrná hodnota z průběhu tlaku naměřených z absolutních tlakoměrů. Doba na měření se volila tak, aby se při snímání rychlosti dosáhlo ustáleného záznamu po dobu 2 - 3s.

bod	tlak [bar] počáteční	tlak [bar] koncový	rychlost [m/s] průměr
20	220	180	6,33
18	180	150	8,25
16	120	105	6,51
14b	90	80	2,28
14	110	90	0,72
12	135	110	1,16
10	160	135	1,41
8	195	165	4,45
6	105	90	5,42
4	100	85	6,23
2	140	120	6,88
0	210	165	5,91
-2	165	140	3,15
-4	165	140	1,20
-6	140	120	2,01
-8	120	100	4,52
-10	210	170	5,80
-12	170	130	1,92
-14	130	110	2,05
-14b	110	90	3,23
-16	105	90	6,73
-18	150	120	7,26

Tabulka č. 1: Naměřené hodnoty rychlostí a tlaků v místech po obvodu automobilu



Graf 2: Naměřené rychlosti po obvodu vozidla

červená šipka nasávání okolního vzduchu, černá šipka výtok o ventilů do okolí

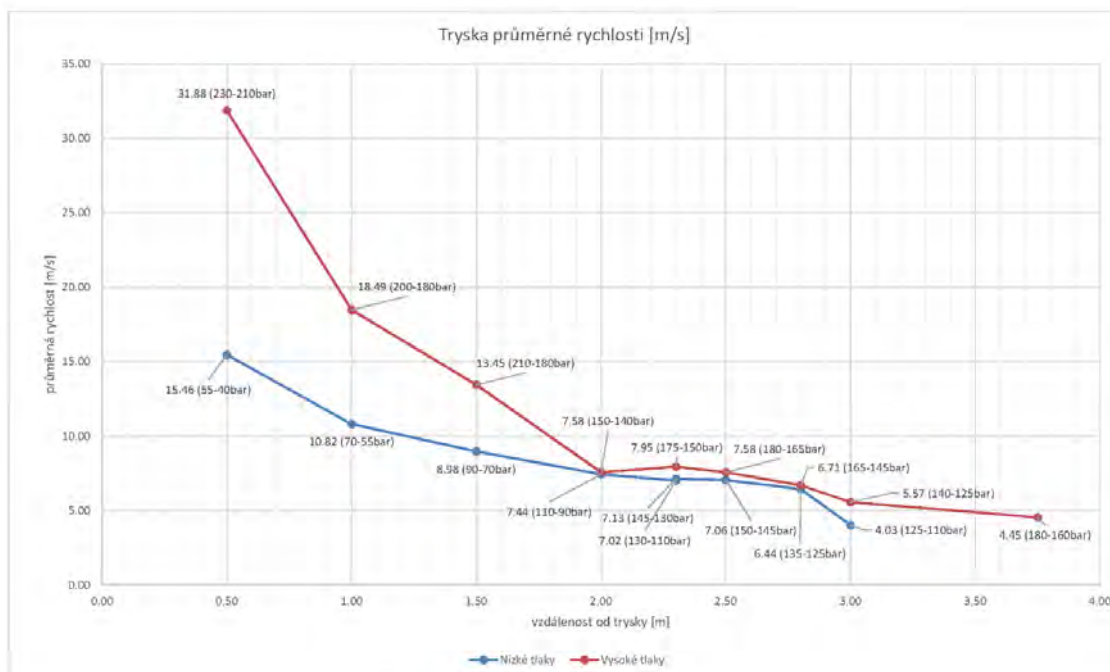
Čtvrtá část: Měření rychlostního pole v oblasti za pravým zadním kolem vozidla

- Za pravým zadním kolem vozidla je jedna ze šesti trysek pojistného ventilu směřována přímo do boku vozidla viz obr. 6. V případě otevření havarijního ventilu výtrysk „jet“ nenarazí na žádnou překážku, tj. jedná se o případ zatopeného proudu, kde ke zmaření jeho kinetické energie dochází pouze disipací při interakci s okolním vzduchem viz obr 13.

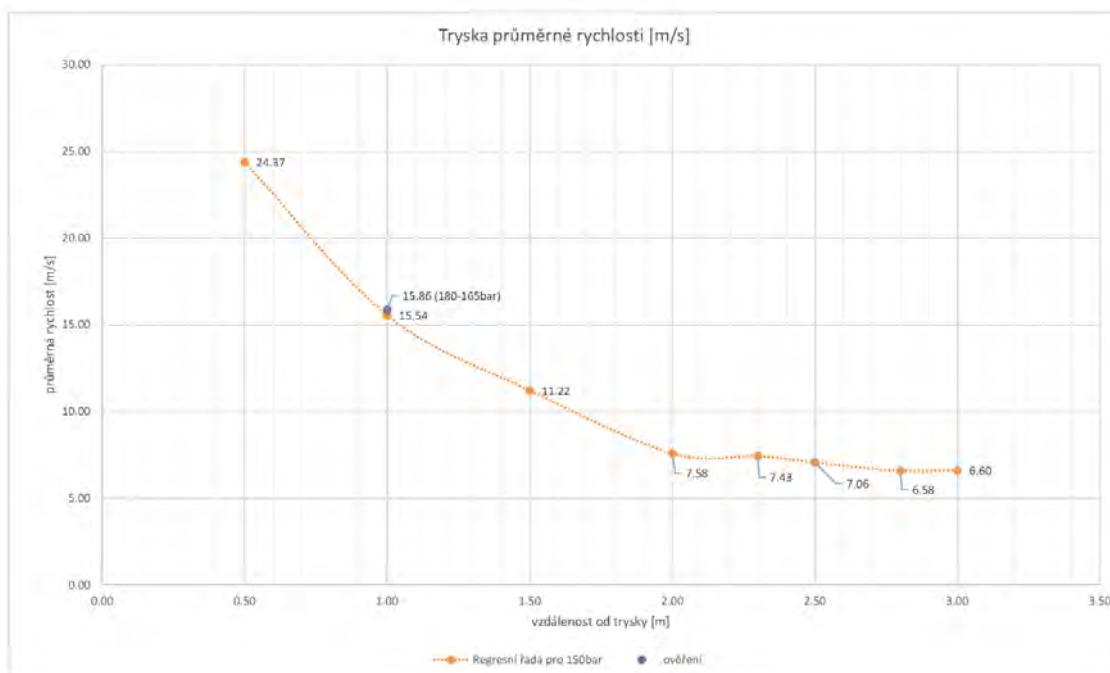


Obr. 13: Kouřová vizualizace proudění – výtrysk za zasním pravým kolem vozidla

- Proměřit podrobněji parametry proudění v této oblasti bylo rozhodnuto z důvodu bezpečnosti při zásazích HZS, neboť se jedná o oblast s prouděním, které zasahuje několik metrů od vozidla a pokud nedojde k jeho zahoření, nemusí být tento výtrysk viditelný.
- V grafu č. 3 je zanesen průběh rychlosti výtrysku v jeho ose, v závislosti na tlaku do vzdálenosti 3,5 m od automobilu. Z dispozičních možností nebylo možné provést proměření celého proudového pole, neboť proud ve 4 m od vozidla narážel na pevné vestavby v experimentální hale.
- Graf č. 4 se nám snaží poskytnout údaje o průběhu rychlosti v ose výtrysku pro konstantní tlak v havarijním ventilu. Konstrukce této závislosti byla dosažena interpolací z naměřených hodnot, přičemž v jednom bodě se provádělo ověření údajů měřením za daného tlaku.



Graf č. 3: Rychlosti výtrysku z trysky v jeho ose v závislosti na vzdálenosti a tlaku



Graf č. 4: Rychlosti výtrysku z trysky v jeho ose v závislosti na vzdálenosti interpolovaná na tlak 150 bar

Pátá část: Závěrečné shrnutí výsledků provedeného díly

- Smyslem zadání díla a následné realizace bylo zmapování proudového pole kolem automobilu poháněného CMG v situaci, kdy dojde k otevření havarijních ventilů (při požáru) na jeho tlakových zásobnících. Výsledkem mělo být poskytnutí údajů o velikosti rychlosti vytékajícího plynu v okolí automobilu. Tyto hodnoty měli sloužit jako okrajové – vstupní podmínky pro numerický výpočet kritických koncentrací plynu v okolí automobilu, při jeho šíření ve velkokapacitních garážích a jejich odvětrávacích zařízeních.
- Jako zásadní se ukázalo zjištění, že plyn by v případě otevření havarijních ventilů neunikal směrem od automobilu v celém obvodu vozu, jak bylo původně předpokládáno, ale že dochází v zadní části vozu k nasávání okolního vzduchu do prostoru s tlakovými zásobníky. Vizualizace i měření ukázali, že plyn by vytékal jednak směrem do přední části automobilu a dále z jeho bočního pravého a levého prostoru mezi podlahou a vozovkou. Dále lze předpokládat, že koncentrace vytékajícího plynu by se po obvodu automobilu pohybovala v různých hodnotách dle množství přisátého a smíchaného vzduch.
- Měření rychlostí po obvodu vozidla bylo provedeno, přičemž byly získány hodnoty potřebné pro numerický výpočet. Bylo by vhodné získat údaje i o fluktuacích rychlosti turbulentního proudu, ale náročnost experimentu pro tento záměr však překonává rozsah sjednaného díla.
- Mimo rozsah specifikovaných činností v díle bylo provedeno zmapování a osově proměření bočního výtrysku za zadním pravým kolem automobilu.
- Jako velice cenné se ukázalo získání zkušeností s tímto typem experimentu, a to zejména týkajících se dimenzování a instalace vysokotlakého rozvodu a zásobníku vzduchu. Důležité byly poznatky z možností vizualizace i ve věci volby použité měřicí techniky.