



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ

HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW LABORATORY

**METODY PROSTOROVÉ A SPEKTRÁLNÍ
CHARAKTERIZACE SVĚTELNÝCH ZDROJŮ
POUŽÍVANÝCH V AUTOMOBILOVÉ TECHNICE**

METHODS OF SPACE AND SPECTRAL CHARACTERIZATION OF LIGHT SOURCES USED IN CAR INDUSTRIES

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Michal Guzej

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.

BRNO 2018

Klíčová slova

automobilový světlomet, kondenzace, odmlžení, emisivita, teploty, termočlánky, tepelná vodivost, numerické simulace, LED čipy, halogenové žárovky

Keywords

automotive headlamp, condensation, defogging, emissivity, temperatures, thermocouples, thermal conductivity, numerical simulations, LED chips, halogen bulbs

Dizertační práce je dostupná v tištěné podobě na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 3 |
| 1. TEORETICKÁ ČÁST | 3 |
| 1.1. ZÁKLADNÍ ČÁSTI HLAVNÍHO PŘEDNÍHO SVĚTLOMETU | 4 |
| 1.2. PŘEHLED STÁVAJÍCÍ SITUACE TESTOVÁNÍ ODMLŽENÍ | 4 |
| 2. PRAKTICKÁ ČÁST | 6 |
| 2.1. MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ ODMLŽENÍ SVĚTLOMETŮ | 6 |
| 2.2. ZVLHČOVAČ - ZAŘÍZENÍ PRO ZAVÁDĚNÍ VLHKOSTI | 8 |
| 2.3. AUTOMATICKÁ DETEKCE KONDENZÁTU Z FOTOGRAFIÍ | 9 |
| ALGORITMUS PROGRAMU | 9 |
| 2.4. EXPERIMENTÁLNÍ ODMLŽOVÁNÍ SVĚTLOMETŮ | 11 |
| ZAMLŽOVÁNÍ – PŘÍPRAVNÁ FÁZE | 12 |
| ODMLŽOVÁNÍ – HLAVNÍ FÁZE | 13 |
| 2.5. NUMERICKÉ SIMULACE ODMLŽOVÁNÍ SVĚTLOMETŮ | 14 |
| POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ODMLŽENÍ Z EXPERIMENTŮ A SIMULACÍ | 15 |
| 2.6. MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO ZATÍŽENÍ SVĚTLOMETŮ | 17 |
| STUDIE VLIVU ZABUDOVÁNÍ TERMOČLÁNKU NA MĚŘENÉ TEPLoty | 17 |
| STUDIE VLIVU SVĚTELNÉHO ZDROJE NA MĚŘENÉ TEPLoty | 18 |
| 2.7. STANOVENÍ EMISIVITY LESKLÝCH POVRCHŮ | 21 |
| NUMERICKÝ MODEL | 22 |
| ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT | 23 |
| 2.8. MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI | 24 |
| 2.9. MĚŘENÍ PROSTOROVÝCH TEPELNÝCH VÝKONŮ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ | 26 |
| ZÁVĚR | 28 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 30 |

Úvod

Automobilové světlomety pracují ve velice proměnných klimatických podmínkách. Jejich základní charakteristikou je velké tepelné zatížení dílů v blízkém okolí světelných zdrojů (Xenonových výbojek, LED čipů a výjimečně i neonových trubice) a malé výměně vzduchu s okolím. V kombinaci s určitými klimatickými jevy, které zapříčiní rychlý pokles okolní teploty, může dojít k nahromadění vzdušné vlhkosti uvnitř a následnému zkondenzování na vnitřních površích a to hlavně na předním skle. Tento nepříznivý efekt má za následek snížení světelných parametrů, degeneraci vnitřních materiálů, korozi kovových dílů a elektrický zkrat elektroniky světlometu [1].

Tvar světlometů podléhá designovým požadavkům na celkový vzhled automobilu a v této koncepci marketingu hrají přední světlomety důležitou roli. Je proto potřeba při jejich konstrukci skloubit nároky designérů s požadavky technickými: životnost, bezpečnost, funkčnost atd. [2].

Problém odvodu přebytečné vlhkosti je řešen mnoha způsoby. Nanesení tenké anti-fog vrstvy, která nezabrání tvorbě kondenzace [3], ale vytvoří homogenní vodní film, který není okem vidět. Dále vhodným rozmístěním ventilačních otvorů, vložením membrány z mikro-porézní tkaniny do odvětrávacích otvorů, která umožňuje výměnu vzduchu, ale zabraňuje vniknutí vody. Rovněž jsou využívány numerické simulace motorového prostoru a jsou hledána místa s nejvyšší hodnotou dynamického tlaku a do těchto míst jsou následně umístěny ventilační otvory. Konečný počet otvorů je stanoven na základě experimentů s požadavky na co nejrychlejší odmlžení předního skla světlometu [1]. Další možností je přivádět tlakový vzduch z prostoru chladiče za přední maskou, čímž je zkrácen čas potřebný k výměně média ve světlometu. Nevýhodou tohoto způsobu je cenová náročnost a nutnost požití velkých prachových filtrů na přívodních místech. U levnějších modelů jsou do ventilačních otvorů umístěny plastové labyrinty. Prachové částice při průchodu těmito labyrinty jsou zachyceny díky zpomalení proudění vzduchu.

Rovněž byly vyvinuty nástroje pro predikci tepelného zatížení [4]. Pro ověření jejich výsledků bylo zapotřebí využít experimentů, které měly shodné podmínky se simulacemi [5]. Měření teplot z experimentu je prováděno pomocí termočlánků, nebo infракamery. Pro obě zmíněné metody je nutno dodržet určité postupy a doporučení. Pro měření termočlánky je důležité vhodně zvolit jeho tip a způsob zabudování. U infракamery je důležité znát přesně emisivitu měřeného povrchu.

Autorem práce bylo ve spolupráci se společností Škoda Auto a.s. vyvinuto experimentální zařízení pro zmapování rychlosti odmlžení předních automobilových světlometů. Impulzem pro vývoj tohoto zařízení bylo zpřesnění procedury odmlžování (zamlžování) a dosažení lepší opakovatelnosti a zkvalitnění dosažených výsledků, které je možno použít i pro verifikaci numerických simulací odmlžování. Rovněž byla vytvořena metodika měření teplotního zatížení komponent světlometů za přesně definovaných podmínek se zaměřením na správné zabudování termočlánku, které je pro kvalitu dosažených výsledků kritické. Dále prostorové zmapování tepelných výkonů používaných halogenových světelných zdrojů, měření termofyzikálních vlastností plastových materiálů běžně používaných ve světlometech, spolu s měřením emisivit lesklých (pokovený povrch reflektorů).

1. TEORETICKÁ ČÁST

V této kapitole budou vysvětleny a popsány všechny hlavní pojmy automobilových předních světlometů, jejich konstrukční provedení. Dále použité světelné zdroje, které jsou důležité z pohledu teplotního zatížení komponent světlometu. Teplo a jeho přenos hraje důležitou roli v teplotním managementu a je důležité pro vhodné rozmístění citlivých elektrických součástí. Dalším důležitým tématem je tvorba kondenzace ze vzdušné vlhkosti uvnitř světlometu, což je negativní efekt. Snahou výrobců automobilů ve spolupráci s dodavateli světlometů je eliminovat nebo alespoň omezovat tento jev. Testováním světlometů na odmlžení není jednoduché a v současnosti neexistují jednotné postupy, proto jsou na konci teoretické části vypsány nejběžnější způsoby testování.

1.1. Základní části hlavního předního světlometu

Hlavním předním světlometem je zařízení umístěné v přední části vozidla, jehož funkce je poskytnout řidiči automobilu dostatečné osvětlení vozovky za zhoršených světelných podmínek a zároveň být viděn ostatními účastníky silničního provozu [6]. Základní stavební jednotkou pláště je pouzdro 1 a krycí sklo 2. Pouzdro 1 je na zadní straně vybaveno odvětrávacími otvory 3 vnitřního prostoru a úchyty 4 pro připevnění světlometu ke konstrukci vozidla. Ve vnitřním prostoru je reflektor 5 se zabudovanými světelnými zdroji 6. Tyto součásti zajišťují správnou funkci světlometu jako je: směr světelného kuželu a intenzita osvětlení. V dnešní době jsou hlavně u levnějších modelů nejčastěji používané halogenové žárovky. U dražších variant jsou využívány LED čipy anebo moderní lasery.



a)



b)

Obr. 1.1 Halogenový automobilový světlomet (a – Přední strana, b – Zadní strana)

1.2. Přehled stávající situace testování odmlžení

Tato kapitola popisuje stávající stavu řešení problematiky testování předních světlometů na odmlžení používaných výrobcí a automobilkami. Porovnáním jednotlivých přístupů a určením jejich výhod a nevýhod.

Testovací procedury

Pro testování se používají speciální prostory: zkušebny a větrné tunely [7], ve kterých je možno nastavit a kontrolovat nejrůznější parametry (teplotu okolí, relativní vlhkost, rychlost proudění vzduchu) a simulovat nejrůznější nepříznivé klimatické scénáře, které mohou nastat při provozu světel.

Další způsob testování jsou provozní zkoušky. Reálný automobil je osazen testovaným světlometem a je provedena zkušební jízda. Tyto jízdy trvají v řádu desítek minut, až několik desítek hodin [8], proto může dojít ke změnám klimatických podmínek (teplota a vlhkost vzduchu), ale i ke změně podmínek na pozemních komunikacích [8].

Testování v kontrolovaném prostředí

Dosud není přesně stanovena testovací procedura pro odmlžení světlometů, proto každý výrobce světel a výzkumné pracoviště má své interní postupy. Například autoři: Alberto Deponti, Fabio Damiani, a kolektiv [9], popisují ve svém článku testovací proceduru a její hlavní části. Testování na odmlžení je prováděno v místnosti speciálně zkonstruované pro tyto účely – viz obr. 1.2 a), do které je umístěn model karoserie se zabudovaným světlometem – viz obr. 1.2 b). U modelu je reprodukován tvar karoserie kolem světel kvůli dosažení reálného proudění vzduchu a tím pádem i dosažení reálných hodnot parametrů součinitele přestupu tepla.



a)



b)

Obr. 1.2 Testování odmlžení (a – Zkušebna, b – Model automobilu v reálné velikosti) [9]

Motorový prostor je zohledněn u modelu kvůli vytvoření totožného proudění z vnitřní strany světlometu. Zkušebna má vnitřní objem 30 m³ s okny pro kontrolu experimentu zkušebním technikem. Možnost ovládání (měnění) parametrů ovlivňujících tvorbu kondenzátu ve světle, jako jsou: rozložení součinitele přestupu tepla α na stěnách světle, relativní vlhkost a teplota vzduchu, rychlost proudění vzduchu (až do 80 km h⁻¹), tlak vzduchu v blízkosti ventilačních otvorů světle. Dále se dá ovlivnit interakci motorového prostoru se světlometem (změnou průměrné teploty produkované motorovým prostorem) a simulovat proudění vzduchu s reálnými teplotami v motorovém prostoru. Z průběhu měření byly naměřena data a pořízeny fotografie s ústupem kondenzátu předního skla. [9].

Švédská společnost SAAB provádí testování světlometů ve větrném tunelu, kde je umístěn celý automobil a testován v různých klimatických podmínkách a jízdních režimech. Test začíná v režimu, kdy má motor volnoběžné otáčky a v tunelu je spuštěna simulace studeného deště. Poté jede automobil vysokou rychlostí (jízda po dálnici). Celý test trvá přibližně pět a půl hodiny. Teploty jsou zaznamenány uvnitř i vně světlometu. Teplota uvnitř světlometu je měřena blízko vnitřní strany předního skla. Rovněž je měřena relativní vlhkost uvnitř, ze které je vypočítána teplota rosného bodu. Postup kondenzace na vnitřní straně skla světlometu je monitorován pomocí fotografií [10].

Německá společnost BMW využívá pro testování dvojitou klimatickou komoru (model Heraus-Voetsch VUK 04/300), která umožňuje nastavení teploty a relativní vlhkosti. Jedna část komory slouží pro nastavení parametru vzduchu kolem světlometu a druhá pro simulaci vlivu motorového prostoru za světlometem. Proto je možno simulovat interakci mezi motorem a světlometem a rovněž některé klimatické scénáře. Extrémní typy počasí (bouřka, sněžení atd.) jsou reprezentovány při testování pomocí speciálních tří kondenzačních cyklů, které následují po sobě. Celý test pak trvá zhruba sedm a půl hodiny. Během testu jsou sledovány teploty a relativní vlhkosti v kontrolních místech a výsledné hodnoty jsou porovnány mezi sebou. Lze rovněž určit, zda mají úpravy (změna pozic odvětrávacích otvorů, nanesení proti zamlžovací vrstvy na vnitřní straně předního skla, přidání ventilační trubky na odvětrávací otvory) světlometu příznivý efekt na snížení množství a četnosti kondenzace na předním skle [3].

Testování pomocí provozních zkoušek

Cílem testování je vytvořit během jízdy typické podmínky. U každého světlometu jsou monitorovány kritická místa, která jsou náchylná k tvorbě kondenzace. Naměřená data jsou posléze použita ke kontrole vizuálních výsledků oblastí s kondenzátem. Testy jsou zaměřeny na proměření krizových jízdních scénářů, které obsahují různé počasí (bouřky, slunečné počasí, mlhu atd.), režim jízdy (parkování, jízda se zapnutými a vypnutými předními světlomety, stání v kolonách, jízdu po dálnici, jízdu po běžných pozemních komunikacích mimo město, ve městě atd.) a speciální situace (mytí automobilu v myčce, ruční mytí, výjezd z teplé garáže v zimním období).

Nejkomplexnější výsledky jsou získány z dlouhodobých testů (denní až několika denní zkoušky), které jsou prováděny v proměnných klimatických podmínkách a v různých ročních obdobích. Tento způsob dlouhodobého testování je vhodný pro přesné výsledky množství kondenzace a její nejčastější výskyt uvnitř světlometu.

Výsledkem testů je série grafů mapujících provozní podmínky během celého dne (teplotu okolí, teploty uvnitř světlometu, zapnuté/ vypnuté přední světlomety, režim jízdy, druh počasí – déšť, sněžení, mrholení atd.) a na základě naměřených hodnot teplot je vypočítána teplota rosného bodu. Z výsledků jsou určeny problematické okolnosti, popřípadě jejich kombinace a dále jsou tyto výsledky porovnají s fotografickou dokumentací pořizovanou v průběhu celého testovacího cyklu. Pomocí tohoto postupu je určeno, kdy došlo ve světlometu ke kondenzaci a v jakých místech se kondenzát vyskytoval [8].

Způsob tvorby kondenzace ve světlometu

Ve všech této kapitole uvedených případech je kondenzace uvnitř světlometu tvořena na základě nastavení vhodných podmínek v okolí. Testované světlometry je umístěn do klimakomory, která umožňuje nastavení teploty a relativní vlhkosti. Celý proces vždy trvá od několika hodin po několik desítek hodin. Tyto dlouhé časy jsou nutné z důvodu časově náročné absorpce vody plasty. Během samotného experimentu slouží tyto plasty následně jako zásobníky vlhkosti, která je po zahřátí světelného zdroje postupně uvolňována.

Nevýhody použitých postupů

- Celý přípravný proces zamlžování je časově velice náročný (pro laboratorní testování)
- Nutnost mít speciální prostory a vybavení (pro laboratorní testování)
- Testy v reálném provozu mají ve většině případů špatnou opakovatelnost (z důvodu proměnných klimatických podmínek) a jejich výsledky jsou obtížně zopakovány pomocí numerických simulací (z důvodu neznámých a proměnných podmínek během experimentu)
- Testy v reálném provozu mohou být rovněž časově náročné
- Vyhodnocování fotografií s kondenzátem není prováděno automaticky za pomoci softwaru s obrazovou analýzou, ale ve většině případů je prováděna vizuálně, což je časově náročné a nepřesné
- I malá změna podmínek při zamlžování může vést k velmi rozdílnému výsledku (rozložení kondenzátu)

2. PRAKTICKÁ ČÁST

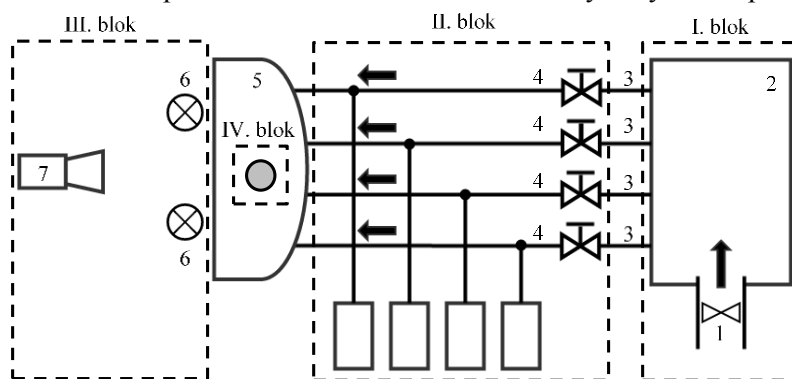
V této kapitole jsou prezentovány a popsány postupy, numerické modely a zařízení vyvinuté autorem práce v Laboratoři přenosu tepla a proudění na VUT v Brně. Jednotlivé oblasti výzkumu byly měření odmlžování předních automobilových světlometů, teplotního zatížení světlometů, měření emisivity a tepelného výkonu halogenových světelných zdrojů. Naměřená data získané z těchto metod byly následně používány společností Škoda Auto a.s. pro testování, ověřování prototypových světlometů a zároveň za účelem verifikace numerických simulací mapujících teplotní zatížení komponentů světlometů nebo k přesnějšímu naladění okrajových a počátečních podmínek.

2.1. Měřicí zařízení pro testování odmlžení světlometů

V rámci tohoto doktorského studia bylo vyvinuto zařízení, které umožňuje rychle, jednoduše a levně testovat automobilové světlometry na odmlžení a možnost jejich porovnání. Na vývoji bylo spolupracováno se společností Škoda Auto a.s. Měřicí zařízení není nutné umísťovat do klimakomory, protože je zamlžení neprováděno pomocí vlhkosti uvolňující se z plastových částí světlometu ani ze vzduchu. Vlhkost byla do světlometu zaváděna pomocí vypařování přesně stanoveného množství vody. K tomuto účelu bylo využíváno

speciálně zkonstruované zařízení (viz následující kapitola), které bylo pomocí otvoru vyvrtaného v horní části těla světloometu zasunuto dovnitř. Nastavením přetlaků na jednotlivé ventilační otvory (přičemž jeden otvor byl použit jako výstup) bylo docíleno proudění vzduchu uvnitř, bez nutnosti zapínat světelný zdroj.

Běžně je světlomet na zadní straně vybaven odvětrávacími otvory pro zajištění výměny vzduchu s okolím. Otvory jsou umístěny v místech s největšími rozdíly dynamických tlaků, které vznikají za provozu v motorovém prostoru a spolu s odpadním teplem vznikajícím zapnutím žárovek (LED čipů, xenonových výbojek, atd.) dává tlakový spád pohánějící proudění vzduchu uvnitř světloometu a tím odvod vlhkosti z vnitřního prostoru. Případně je světlomet opatřen nucenou konvekci přivedením tlakového vzduchu z chladičového prostoru. Pro návrh rozmístění odvětrávacích otvorů provádí výrobci automobilů četné numerické simulace motorového prostoru s cílem naleznout místa s vyšší rychlostí proudění vzduchu [11].



Obr. 2.1 Schéma uspořádání měřicího zařízení (1 ventilátor, 2 vzdušník, 3 rozvody tlakového vzduchu, 4 regulace tlaku, 5 světlomet, 6 osvětlení kondenzátu, 7 fotoaparát)

Měřicí zařízení bylo složeno ze čtyř bloků. První blok sloužil jako zdroj tlakového vzduchu pro jednotlivé přívody do světloometu. Podstatnou součástí zařízení byl vzdušník 1, který rovněž plnil funkci homogenizátoru tlaku s otvory pro přívod vzduchu z ventilátoru 2 a na zadní straně hrubou regulací tlaku 3. Dále byla horní stranou vzdušníku 1 vsunuta ruční sonda (Omega RHXL3SD) 4 pro měření a zaznamenávání relativní vlhkosti a teploty vzduchu přiváděného na jednotlivé odvětrávací otvory. Z levé strany vzdušníku 1 byly vyvedeny čtyři hadice 5, které přivádí vzduch do druhého bloku. Nastavované přetlaky byly velmi nízké v řádech desítek pascalů.

Druhý blok sloužil pro regulaci a zaznamenávání přetlaků v jednotlivých větvích. Ze vzdušníku 1 byl vzduch přiváděn na první stupeň (hrubé) regulace tlaku 6, kterou tvoří kohouty a dále byl přesně doladěn pomocí membránových ventilů (Omega AR91-005) 7. Každou větev lze nastavovat samostatně a rovněž samostatně zaznamenávat pomocí diferenčních tlakoměrů (Omega PX277-01D5V) 8.

Měřený světlomet byl nejprve upraven pro měření. Z odvětrávacích otvorů byly demontovány gumové labyrinty, které bránily prachovým částicím vnikat do vnitřního prostoru spolu se vzduchem. Na vzniklé otvory byly přilepeny redukce s hadicemi, které propojovaly daný odvětrávací otvor s druhým blokem měřicího zařízení. Dále byl do horní plochy těla světloometu vyvrtán otvor pro zasunutí zvlhčovače (viz následující kapitola) a druhý otvor pro sondu měřící relativní vlhkost a teplotu, která sloužila k monitorování parametrů vzduchu během zamlžování předního skla. Do předního skla byly zabudované termočlánky pro kontrolu správného podchlazení během zamlžování. Dva termočlánky byly umístěny i do reflektoru z důvodu monitorování teplot vnitřních ploch a tím zabránění kondenzace vypařované vody mimo přední sklo.

Cílem třetího bloku byl záznam odmlžování předního skla světlometu, proto byl před světlomet umístěna kamera 9 (Basler aca 200 50gc), která byla ovládána pomocí prostředí LabView a světelné zdroje 10 pro osvětlování kondenzátu. Reflektor světlometu je tvořen lesklými odrazovými plochami pro odraz světla požadovaným směrem, což způsobuje na fotografiích přesvětlená místa, která nelze následně vyhodnotit programem pro automatickou detekci zamlžené a odmlžené oblasti (podrobnosti v kapitole 2.3). Bylo zjištěno, že nejvýhodnější pozice pro eliminaci nežádoucích odrazů od reflektoru je osvětlování seshora pomocí dvou světelných zdrojů. V tomto případě halogenových žárovek H12.

Poslední část tvořilo speciálně zkonstruované zařízení pro zavádění vlhkosti do vnitřního prostoru světlometu. Takto přidaná vlhkost byla následně zkondenzována na vnitřní straně předního skla světlometu. Bližší popis je v následující kapitole.



Obr. 2.2 Měřicí zařízení pro odmlžovací testy

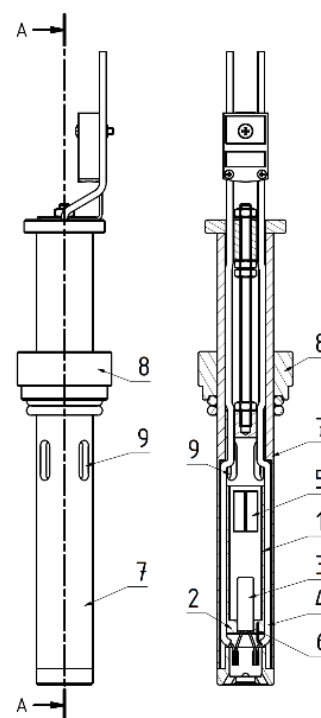
2.2. Zvlhčovač - zařízení pro zavádění vlhkosti

Běžně jsou pro testování odmlžení světlometů používány klimakomory s nastavenou vysokou relativní vlhkostí na požadovanou dobu, dokud nedojde k vyrovnání poměrů vně a uvnitř světlometu. Nevýhodou tohoto postupu je značná časová náročnost, běžně desítky hodin. Rovněž není možno provádět tyto testy operativně např. při zkušebních jízdách v terénu [11].

Vyvinutý zvlhčovač je patentově chráněn úřadem pro průmyslové vlastnictví pod názvem Zařízení ke zvlhčení vnitřního prostoru světlometu a jeho kopie je umístěna v příloze práce. Číslo přihlášky je 2015-385 a číslo dokumentu je 305743. Na jeho vývoji se spolupodílel autor práce a prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.

Vyvinuté zařízení si klade za úkol zrychlit celý proces testování, kdy zamlžení světlometu netrvá desítky hodin, ale odehrává se v řádu desítek minut. Zároveň odpadá nutnost provádět testy v drahých klimakomorách. Další výhodou je vypaření přesně stanoveného množství vody do světlometu [11].

Zvlhčovač je tvořen z válcového těla, které umožňuje snadné vsunutí do světlometu kruhovým otvorem vytvořeným k tomuto účelu v horní části. Zařízení popisuje obr. 2.3 b) a jeho hlavní části jsou rezervoár 1, z jehož dna 2 vyčnívá do prostoru rezervoáru 1 topné těleso 3 propojeno s vnějším zdrojem elektrické energie vodiči 4. Rezervoár je nahoře otevřený, v horní části osazen vloženou mříží 5 v půdoryse ve tvaru kříže. Mříž 5 slouží k rozbíjení parních bublin a tím omezuje možnost vytékání vody v kapalně fázi do světlometu. Ve dně 2 je navíc zabudováno teplotní čidlo 6, které slouží hlavně k určení konce vypařování a zároveň zabraňuje poškození přístroje včasnou indikací zvýšené teploty. Rezervoár je uložen ve válcovém pouzdru 7 z teflonu. Na něho je nasunuta těsnicí příruba 8, která má za úkol utěsnit mezeru mezi tělem zvlhčovače a otvorem ve světlometu. Zároveň umožňuje zvolit hloubku zasunutí. Nad úrovní horní strany rezervoáru 1 jsou v těle zařízení vyvrtány čtyři otvory 9, kterými je distribuována vodní pára z rezervoáru 1 do okolí [11].



Obr. 2.3 Zvlhčovač (1 rezervoár, 2 dno rezervoáru, 3 topné těleso, 4 elektrické vodiče, 5 mříž, 6 teplotní čidlo, 7 pouzdro, 8 těsnicí příruba, 9 otvory)

Přesně stanovené množství vody je do rezervoáru 1 přivedeno injekční stříkačkou přes otvory 9. Prostřednictvím regulovatelného zdroje je nastaveno na topném tělese 3 takový výkon, který vodu v rezervoáru 1 ohřeje co nejrychleji, ale při tom nedojde k vytečení nebo vystříknutí vody do prostoru světlometu. Vodní pára uniká otvory 9. Konec odpařování je určen prostřednictvím teplotního čidla 6 zabudovaného ve dně 2 rezervoáru 1. Jakmile je proces ukončen, zařízení je vytaženo ze světlometu a otvor ve světlometu je utěsněn [11].

Zařízení ke zvlhčení vnitřního prostoru světlometu je součástí měřícího zařízení na testování odmlžení světlometů, které je popsáno v předchozí kapitole.

2.3. Automatická detekce kondenzátu z fotografií

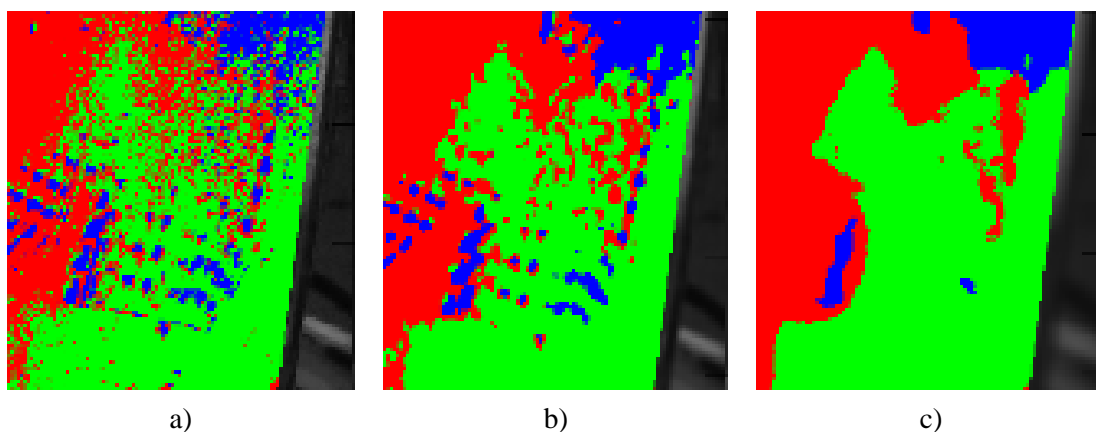
Stejně jako postup odmlžovacích testů, tak ani vyhodnocování pořízených fotografií nemá přesně definované podmínky pro detekci zamlžených oblastí. Každá automobilka má své interní přístupy k řešení a testování této problematiky. Některé preferují laboratorní testy, jiné provozní zkoušky nebo jejich kombinaci viz kapitola 1.2 Přehled stávající situace testování odmlžení. Program pro automatickou detekci zamlžené a odmlžené oblasti předního skla světlometu byl vyvinut autorem práce jako součást testů odmlžení pro firmu Škoda Auto a.s. Jeho využití je jak pro vyhodnocování laboratorních testů, tak i jízdních zkoušek, kde dokáže poskytnout přesnější výsledky, než jsou dnes používané přístupy.

Hlavní funkcí programu je automaticky provádět obrazovou analýzu z pořízených barevných fotografií, které jsou převedeny do odstínů šedi. Každý pixel je tedy charakterizován pouze svojí intenzitou. Intenzita každého pixelu je porovnávána s referenční fotografií. Pro určení referenčních stavů jsou vybrány fotografie pořízené při úplném zamlžení a úplném odmlžení. Z těchto dvou stavů je určen rozdíl v intenzitě. Výsledkem této analýzy je číselné zhodnocení zamlžené (*Z*), odmlžené (*O*) a nevyhodnotitelné (*N*) oblasti z fotografií (levá a pravá) pro daný časový okamžik a barevné odlišení těchto tří režimů ve fotografiích. Osvětlování fotografií hraje kritickou roli při následné softwarové detekci, proto byla této problematice věnována velká pozornost.

Algoritmus programu

Uživatel stanoví na zamlženém snímku velikost a tvar oblasti, kterou bude vyhodnocovat. Následně je snímek převeden na stupně šedi, tím je celý proces vyhodnocování zjednodušen (místo tří barev je vyhodnocována pouze jedna). Zároveň je odstraněn potenciální problém s rozdílnou teplotou chromatičnosti světelného zdroje u jednotlivých snímků. U každé fotografie je provedena kalibrace světlosti a kontrastu podle referenčních hodnot získaných ze dvou krajních stavů a to úplně zamlženo a úplně odmlženo pro daný experiment. Na základě histogramu z černého a bílého terčíku připevněného na světlomet je stanovena hodnota referenční intenzity pro černý a bílý pixel.

Z těchto dvou fotografií je určena průměrná referenční hodnota, podle které bude kalibrována každá fotografie. Pokud je na vyhodnocovaném snímku rozdíl intenzity bílých a černých pixelů oproti retenční hodnotě velký je tato fotografie vyřazena. Z důvodu přesvětlení nebo naopak nedostatečnému nasvětlení. Malý rozdíl je softwarově dorovnán. Na takto nachystané fotografie je aplikován numerický filtr, který vypočítá každému pixelu novou hodnotu intenzity odstínu na základě průměrné intenzity výřezu z jeho okolí. U čtvercového výřezu lze libovolně navolit velikost, tím se celá fotografie rozostří (rozmaže). Velikost výřezu okolí má zásadní vliv na vyhodnocení fotografie v přechodové zóně, kde je intenzita odstínu blízka mezní intenzitě, která určuje rozdíl mezi zamlženou a odmlženou oblastí – viz obr. 2.4.



Obr. 2.4 Vliv velikosti oblasti filtru na hranici mezi zamlženou (červená) a odmlženou (zelená) oblastí (a – 0 pixelů bez filtru, b – 3 pixelů, c – 10 pixelů), modrá znázorňuje nevyhodnotitelné oblasti

Hlavní důvod použití filtru je zredukování množství drobných chybně vyhodnocených nebo nevyhodnotitelných oblastí, které vznikají v důsledku šumu na pořizovaných fotografiích, malých posuvů kamery nebo drobných náhodných odlesků. Další výhodou je zjednodušení tvaru hranice mezi zamlženou a odmlženou oblastí, které přispívá k přehlednému vyobrazení.

Na základě pořizovaného fotografického záznamu odmlžení je hledána mezní intenzita odstínu $p_0 \in \langle 0; 1 \rangle$, která určuje, zda vyhodnocovaný pixel náleží odmlžené nebo zamlžené oblasti. Jeho hodnota je naladěna, tak aby vyhodnocené fotografie odpovídaly okem pozorované realitě. Pro jiné nastavení světel nebo fotoaparátu je nutné tuto hodnotu určit znovu stejným postupem. Dvě fotografie pro úplně odmlžený a úplně zamlžený stav jsou použity jako referenční, ze kterých je následně určen rozsah změny intenzity $d_{(i,j)}$ pro každý pixel. Zároveň je provedena kontrola, zda je rozdíl odstínů dostatečný pro správné vyhodnocení. Pomocí podmínky vyhodnotitelnosti daného pixelu, která je definována $d_{(i,j)} > \varepsilon$. Kde ε je uživatelem zadaný minimální rozdíl intenzity odstínu nutný pro správné vyhodnocení daného pixelu. Dále je pro vyhodnotitelné pixely spočtena hodnota $p_{(i,j)}$, která udává relativní rozdíl intenzity vyhodnocovaného pixelu a stejného pixelu v referenční zamlžené fotografii. $p_{(i,j)}$ leží v intervalu $p_{(i,j)} \in \langle 0; 1 \rangle$, kde $p_{(i,j)} = 0$ je plně zamlžený stav a $p_{(i,j)} = 1$ je plně odmlžený stav. Poté se hodnota $p_{(i,j)}$ porovná vůči mezní hodnotě p_0 , zvolené uživatelem $p_{(i,j)} > p_0$. Paralelně je celý postup proveden pro fotografii s levým a pravým nasvícením v daném časovém okamžiku. Důvodem použití více fotografií pro vyhodnocení v jednom časovém okamžiku je omezení míst, která nejdou vyhodnotit z důvodu odlesků vzniklých při osvětlení fotografií. Z kombinace výsledků obou fotografií pro jednotlivé pixely je složena matice výsledného rozložení zamlžené, odmlžené a nevyhodnotitelné oblasti. Postup určení těchto tří oblastí je popsán v následující tabulce tab. 2.1, kde N je nevyhodnotitelná oblast, (Z) je zamlžená oblast a (O) je odmlžená oblast.

Tab. 2.1 Skládání výsledků z levé a pravé fotografie

| | $N_{pravá}$ | $Z_{pravá}$ | $O_{pravá}$ |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| $N_{levá}$ | N | Z | O |
| $Z_{levá}$ | Z | Z | ? |
| $O_{levá}$ | O | ? | O |

Zobrazení výsledků z obou snímků do jedné fotografie, ve které jsou vizuálně odlišeny tři možné stavy N , Z , O a číselně zobrazen jejich podíl v celkové vyhodnocované oblasti. Pro případ, že daný pixel vychází z jedné fotografie odmlžen a z druhé zamlžen (v tab. 2.1 jsou označeny ?) dojde k porovnání parametru $d_{(i,j)}$ pro

levou a pravou fotografii a z výsledků je stanoveno, která fotografie má v daném pixelu větší rozsah odstínu (větší důvěryhodnost) a podle ní je pixel posuzován.

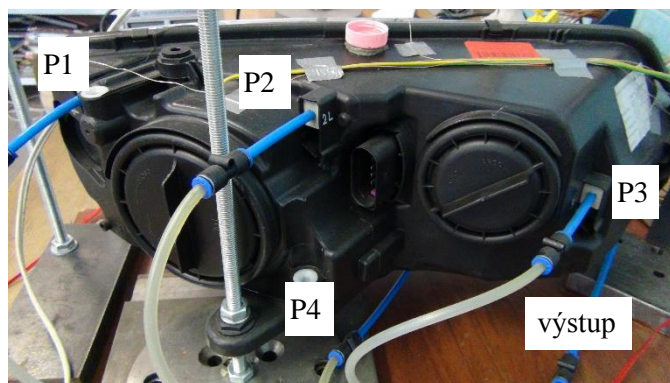
I když existují i jiné přístupy vyhodnocování pořízených fotografií, jako například Fourierova transformace zvolená metoda změny barevné intenzity je vhodný nástroj pro tyto aplikace. Program obrazové analýzy dokáže lokalizovat problémová místa a popsat časový průběh odmlžení pro konstrukční modifikace během počátečních fází vývoje nového světlometu. Dále na základě procentuální zastoupení zamlžené a odmlžené oblasti z vyhodnocených snímků jednoduše porovnat různé konfigurace přetlaků na odvětrávacích otvorech. Pro přesné vyhodnocování fotografií bylo ovšem kritické nasvětlení, kterému byla věnována značná pozornost. bylo důležité, aby pořízené snímky nebyly nedosvětlené, ale zároveň nepřesvětlené. Vzhledem k tvaru testovaného světlometu bylo potřeba vhodně nasvětlit i krajní části, které jsou v zákrytu. Proti tomuto požadavku jde podmínka nepřesvětlení, která byla ve většině případů způsobená reflektorem s odrazovými plochami. Ten odráží světelné paprsky do objektivu fotoaparátu a znemožňuje vyhodnotit tato místa. Ovšem za použití způsobu osvětlování z horní strany byl tento jev značně redukován. Nevyhodnotitelná oblast se pohybuje kolem 3 % z celé přední plochy světlometu, což je z velké části způsobeno nedostatečnou tloušťkou kondenzovaného filmu v daných místech.

2.4. Experimentální odmlžování světlometů

Pro potřeby testování odmlžování světlometů byla autorem práce v Laboratoři tepla a proudění, VUT v Brně vyvinuta nová procedura testování automobilových světlometů na odmlžení. S požadavky na celkovou časovou a finanční nenáročnost měření a rovněž i na dobrou reprodukci dosažených výsledků (časový záznam ústupu kondenzátu). Celé měření bylo navrženo s ohledem na jednoduché přenesení naměřených hodnot do numerických simulací, jako okrajové a počáteční podmínky. Experiment byl rozdělen do dvou fází. V přípravné fázi byl světlomet zamlžen a v hlavní části probíhalo samotné odmlžení.

Během přípravné fáze experimentu byl do světlometu umístěn zvlhčovač s požadovaným množstvím vody. Poté bylo přední sklo podchlazeno pod teplotu rosného bodu. Jakmile bylo dosaženo vhodné teploty, byl zapnut zvlhčovač a započal proces vypařování vody z rezervoáru. Během celého procesu byla sledována hodnota relativní vlhkosti vnitřního prostoru světlometu. Je důležité, aby bylo docíleno zkondenzování veškeré vypařené vody na předním skle a ne jinde. Pro monitoring teploty byly v předním skle umístěny čtyři termočlánky.

Pro hlavní fázi experimentu není potřeba klimakomory k nastavení okolní teploty a relativní vlhkosti. Postup experimentu probíhal následovně: Připravený světlomet byl umístěn do držáků měřicího zařízení, aby bylo zabráněno možnému pohybu nebo posunu světlometu. Dále bylo zvlhčovačem vypařeno do vnitřního prostoru dané množství vody a přední kryt byl podchlazen pod teplotu rosného bodu. Po uplynutí dostatečné doby nutné ke zkondenzování vlhkosti na předním skle byl do světlometu přiveden odvětrávacími otvory vzduch z okolí a zvlhčovač byl povytažen mimo vnitřní prostor. V tomto okamžiku začíná samotný experiment a jeho průběh byl zaznamenáván průběžným pořizováním fotografií a uložením všech důležitých fyzikálních veličin.

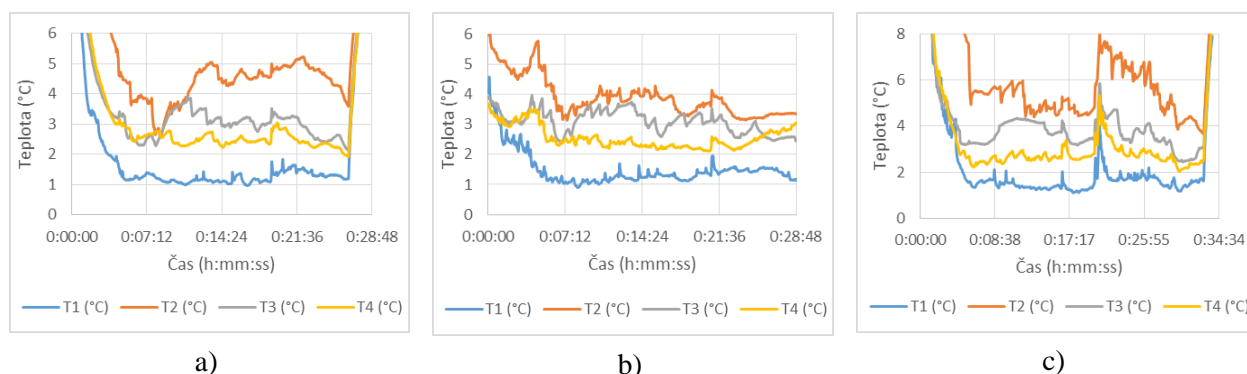


Obr. 2.5 Pozice jednotlivých odvětrávacích otvorů

Cílem experimentů bylo porovnat jednotlivé konfigurace s různými množství vypařované vody a verifikovat numerické simulace odmlžování světlometů porovnáním jejich výsledků s měřením pro vybrané konfigurace přetlaků na odvětrávacích otvorech a množství vypařované vody. Pro verifikaci simulací byly zvoleny tři konfigurace, které byly rozdílné v množství odpařované vody. Experiment V1p60 měl přetlaky P1 až P4 60 Pa a množství vypařované vody 1 ml, V1,5p60 měl přetlaky P1 až P4 60 Pa a množství vypařované vody 1,5 ml a nakonec V2p60 měl přetlaky P1 až P4 60 Pa a množství vypařované vody 2 ml.

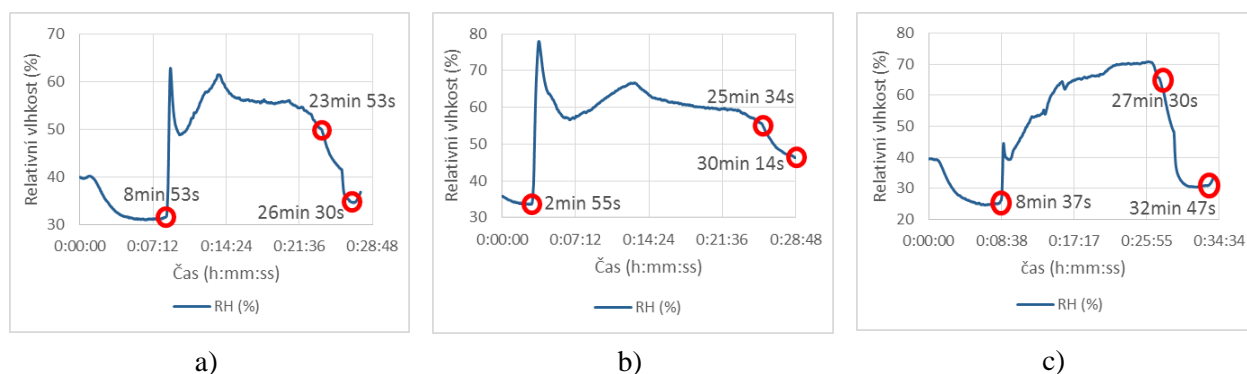
Zamlžování – Přípravná fáze

V přípravné části bylo provedeno zkondenzování vypařené vody zvlhčovačem na vnitřní straně předního skla světlometu. Hlavní činnosti byly zchlazení předního skla pod rosný bod a následná kondenzace vypařované vody. Celý proces popisují přiložené grafy s hlavními měřenými veličinami: teploty světlometu, teplota okolí, relativní vlhkost okolí, příkon zvlhčovače a relativní vlhkost uvnitř světlometu.



Obr. 2.6 Teploty na skle (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

Pro všechny experimenty byly předního skla teploty pod teplotou rosného bodu pro danou relativní vlhkost a teplotu vzduchu uvnitř světlometu během přípravné fáze kondenzování. Pro experiment V1p60 byly teploty skla v rozmezí od 1 °C do 5 °C, přičemž teplota rosného bodu byla 9,6 °C pro teplotu uvnitř 18,8 °C a relativní vlhkost 55,2 %. Při experimentu V1,5p60 byly teploty skla od 1 °C do 4 °C, přičemž teplota rosného bodu byla 10,4 °C pro teplotu uvnitř 17,9 °C a relativní vlhkost 61,5 %. U posledního měření V2p60 byly teploty skla od 1,5 °C do 6 °C, přičemž teplota rosného bodu byla 14,7 °C pro teplotu uvnitř 22,5 °C a relativní vlhkost 61,2 %.



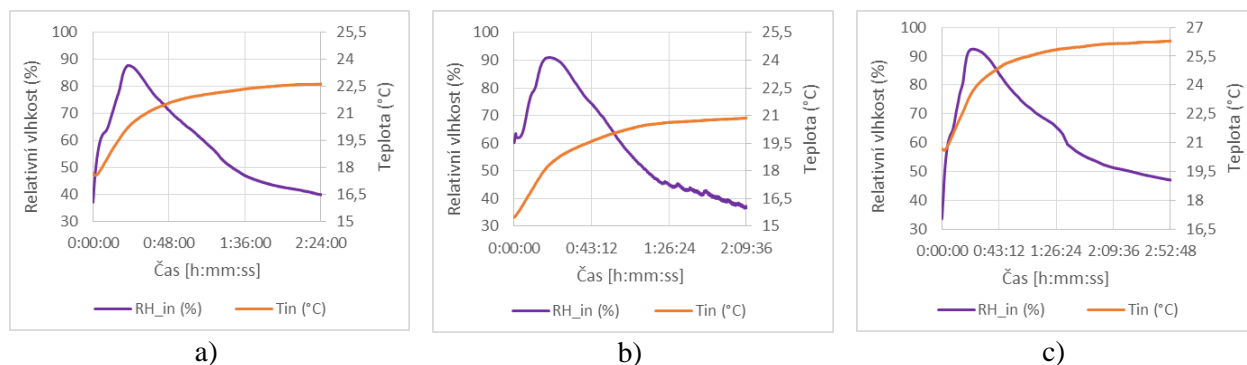
Obr. 2.7 Relativní vlhkost s vyznačenými důležitými body: začátek a konec vypařování a konec chlazení skla (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

Průběh relativní vlhkosti uvnitř světlometu je dán regulací příkonu zvlhčovače (viz kapitola 2.2). Pro experiment V1p60 byla průměrná relativní vlhkost během vypařování 55,2 % a celkový čas nutný k odpaření 1 ml vody byl 15 min. Pro měření V1,5p60 byla průměrná relativní vlhkost během vypařování 61,5 % a celková čas nutný k odpaření 1,5 ml vody byl 22 min 40 sekund. U posledního měření V2p60 byla průměrná relativní vlhkost během vypařování 61,2 % a celkový čas nutný k odpaření 2 ml vody byl 18 min 53 sekund.

Po dokončení vypaření bylo pokračováno v chlazení skla po následujících 5 minut, aby se snížila relativní vlhkost a nedocházelo k jejímu velkému nárůstu během přípravy na hlavní fázi experimentu – odmlžení.

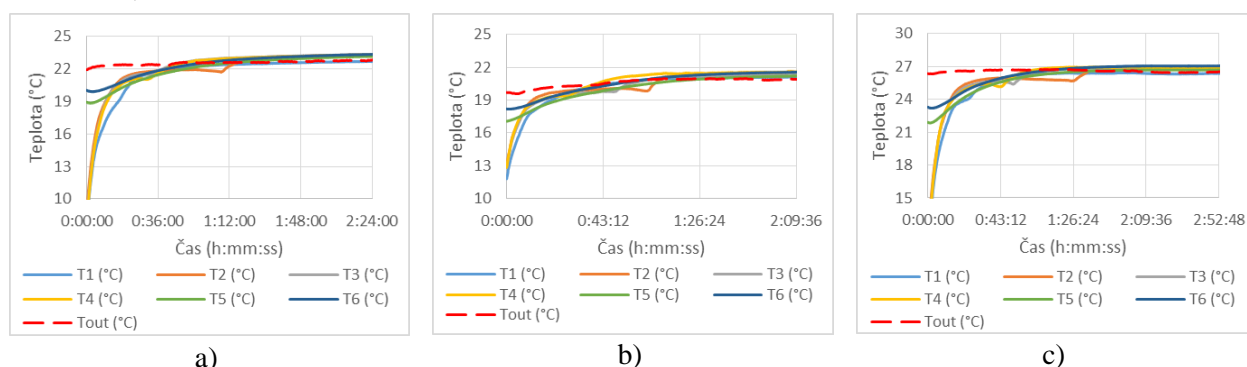
Odmlžování – Hlavní fáze

Po dokončení přípravné části experimentu měl již světlomet zkondenzovanou vodu vypařenou zvlhčovačem na vnitřní straně předního skla. Sklo bylo očištěno z venčí od kapek vody a nečistot, aby během focení nebyly výsledné fotografie zkresleny. V dalším kroku byl na odvětrávací otvory přiváděn vzduch o předepsaném přetlaku a byly zaznamenány přetlaky na odvětrávacích otvorech, teplota a relativní vlhkost uvnitř světlometu, teploty na předním skle, teplota a relativní vlhkost přiváděného vzduchu.



Obr. 2.8 Parametry vzduchu uvnitř světlometu (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

Relativní vlhkost uvnitř světlometu ve všech třech případech v prvních minutách roste, až do 21 min 30 sekundy, což je způsobeno postupným uvolňováním vlhkosti ze zkondenzované vrstvy předního skla. Rychlost uvolňování vlhkosti je větší, než schopnosti nově přiváděného vzduchu odvětrávacími otvory tuto přebytečnou vlhkost odvádět. Teplota uvnitř byla na začátku hlavní fáze nižší, což bylo způsobeno vychlazením předního skla. Ovšem v průběhu experimentu byla postupně dorovnána s teplotou okolí (v místnosti).



Obr. 2.9 Teploty světlometu a okolí (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

Teploty předního skla světlometu (T1 až T4) byly na počátku měření nižší, což bylo způsobeno zchlazením během zamlžovací fáze experimentu. Během prvních 10 min byly teploty vlivem přirozené konvekce vyrovnány s teplotou v místnosti. Teplota předního skla světlometu má důležitou roli pro správné nastavení rychlosti odmlžování numerických simulací, proto musí být brány v úvahu její měnící se hodnoty na začátku odmlžování.

Hlavním výstupem testování odmlžení světlometu bylo časové rozložení kondenzátu. Ovšem pro kvalitní výsledky s dobrou opakovatelností bylo zapotřebí věnovat dostatečné úsilí i zamlžovací fázi, která byla citlivá na homogenní prochlazení předního skla. Správný kontakt mezi chladícím médiem a sklem světlometu byl kritický z důvodu nízké tepelné vodivosti, která znesnadňovala rovnoměrné prochlazení v celé chlazené ploše. Do skla byly zabudovány termočlánky, aby bylo možno sledovat teploty během zamlžovací fáze a tím

lépe reagovat na výkyvy teplot. Pro hlavní odmlžovací fázi měření bylo důležité dodržení, co nejkonstantnějších podmínek během celého experimentu a to zejména teploty a relativní vlhkosti okolí, což mělo velký vliv na rychlost odmlžování.

2.5. Numerické simulace odmlžování světlometů

V dalším přístupu byla v simulaci zahrnuta i část zamlžení a přidána geometrie zvlhčovače, čímž samozřejmě vzrostla časová náročnost celého výpočtu. Výsledné rozložení kondenzátu bylo dáno prouděním uvnitř světlometu, teplotou skla, délkou vypařování a dalšími parametry. S tímto přístupem bylo docíleno výsledků, které byly v dobré shodě s naměřenými daty a jsou prezentovány v této kapitole.

Model simulace obsahuje vnitřní prostor světlometu (fluid doména), přední sklo (solid doména) a zvlhčovač (solid doména). Geometrie světlometu byla přenesena do softwaru ANSYS Fluent with meshing modul pro tvorbu povrchové a objemové výpočetní sítě vnitřního prostoru. Následně byla upravena přidáním zvlhčovače, který byl nezbytný pro zamlžení předního skla. Výsledná síť měla 17,4 miliónů elementů z toho většina byla tetrahedrálních elementů. Jako řešič byl použit ANSYS Fluent 17.2 s nastaveným laminárním viskózním modelem, výpočtem energie, kondenzací řešenou pomocí Eulerian wall film (EWF) a směšování látek (Species Transport), jelikož médium je vlhký vzduch, který byl složen ze vzduchu a vodní páry. Výpočet byl proveden v transientním módu, jelikož bylo důležité zachytit přesně vývoj kondenzátu v čase. Délka časového kroku byla zvolena, aby bylo řešení zkonvergováno do dvaceti iterací na jeden časový krok. Každá simulace byla podle měření rozdělena do tří částí: zamlžení, domlžení a odmlžení.

Tab. 2.2 Nastavení řešiče Fluentu všech částí simulace

| Model | Nastavení |
|-----------------------------------|--|
| Viskózní model | Laminární |
| Míchání látek (Species transport) | Difuze energie na vstupech, tepelná difuze |
| Eulerian wall film (kondenzace) | Rovnice hybnosti, energie a změny fáze, konstanty rychlosti kondenzace 5 a vypařování 20 |
| Tlak-rychlost | SIMPLE ¹ |
| Transientní nastavení | Implicitní interpolace 2. řádu |
| Časový krok (s) | 20 (zamlžení a domlžení)/ 60 (odmlžení) |

Konstrukční geometrie světlometu z CAD souboru byla importována do ANSYS Workbench geometry modulu. Zde byla po menších úpravách vytvořena vnitřní (fluid) doména světlometu. Pro tvorbu výpočetní sítě této domény byl použit ANSYS Workbench mesh modul. Výsledná síť má celkem 17 399 137 elementů z toho je 16 792 269 tetrahedrálních pro fluid doménu a 606 868 wedges elementů (přední sklo světlometu) solid doména. Kvalita sítě byla stanovena průměrným zkosením elementů 0,25 a průměrným poměrem šířky k výšce elementů 1,19, což bylo pro tento typ simulací dostatečné.

Okrajové a počáteční podmínky byly nastaveny vždy podle naměřených dat pro konkrétní experiment.

- *Zamlžování* – Podle měření se nastavily okrajové a počáteční podmínky. Dle obr. 2.6 přípravné fáze experimentu byla nastavena teplota předního skla světlometu. Dále byla nastavena počáteční teplota vzduchu uvnitř světlometu a relativní vlhkost, teplota reflektoru a teplota těla světlometu. Podle doby vypařování a množství vody byl pro jednotlivé experimenty vypočítán hmotnostní tok (mass flow inlet) zvlhčovače.

¹ Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

- *Domlžení* – Po dokončení vypařování bylo následných 5 minut pokračováno v chlazení předního skla. V simulaci byla podmínka hmotnostního toku (mass flow inlet) zvlhčovače změněna na podmínku stěna (wall), teplota stěn zvlhčovače byla vypnuta.
- *Odmĺžení* – Během poslední části byla geometrie zvlhčovače odstraněna z fluid domény. Vlastnosti solidu zvlhčovače byly změněny na fluid a tím mohl vzduch volně procházet celým zvlhčovačem. Dále byla vypnuta teplota předního skla a na vnější plochu byl nastaven ohřev pomocí součinitele přestupu tepla, jehož hodnota byla výpočtem stanovena na $5 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Na odvětrávací otvory 1 až 4 byl přiveden vlhký vzduch o přetlaku 60 Pa, příslušné teplotě a měrná vlhkost pomocí okrajové podmínky přetlak (pressure – inlet). Na poslední odvětrávací otvor byla nastavena podmínka výstup (pressure – outlet).

Porovnání výsledků odmlžení z experimentů a simulací

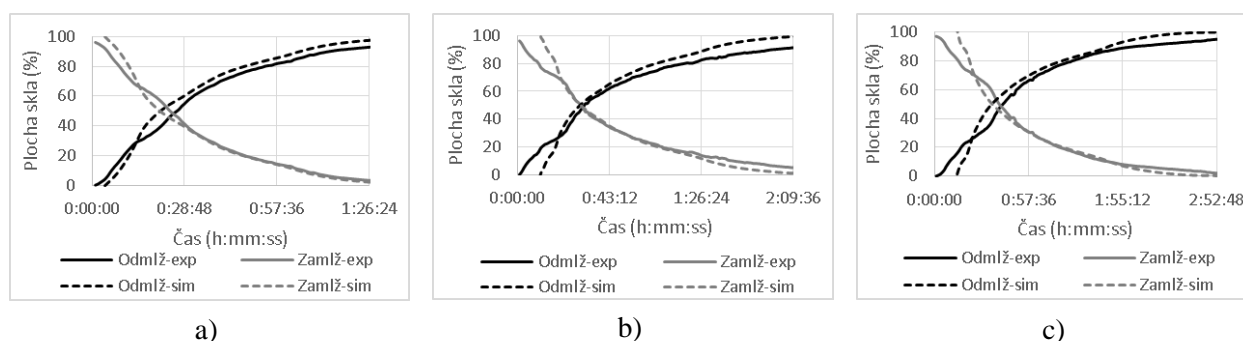
Z každého experimentu byl pořízen záznam postupu odmlžení přední plochy světloometu v minutových intervalech pomocí kamery. Tyto fotografie byly vyhodnoceny pomocí obrazové analýzy (viz kapitola 2.3) pro určení zamlžené a odmlžené oblasti.

Okrajové podmínky simulací byly nastaveny podle jednotlivých experimentů. Během odmlžování byla sledována tloušťka zkondenzované vrstvy, která byla zobrazena v různých časech a porovnána s experimenty. Pro přehlednou vizualizaci výsledků kondenzátu ze simulací byly kontury omezeny jen na dvě úrovně s maximální tloušťkou viditelného filmu omezenou na $1e^{-7} \text{ mm}$ [12].

Pro detailní porovnání experimentů a simulací byl použit časový záznam zamlžené a odmlžené oblasti přední plochy světloometu, který vznikl z vyhodnocení fotografií experimentů a kontur kondenzátu ze simulací. Na vzniklých křivkách popisující odmlžení světloometu byly zvoleny dva časově význačné okamžiky. První byl okamžik, kdy dojde k překřížení křivek pro odmlženou a zamlženou část. Druhý časový bod byl v okamžiku, kdy křivka zamlžené plochy klesla na 20 %.

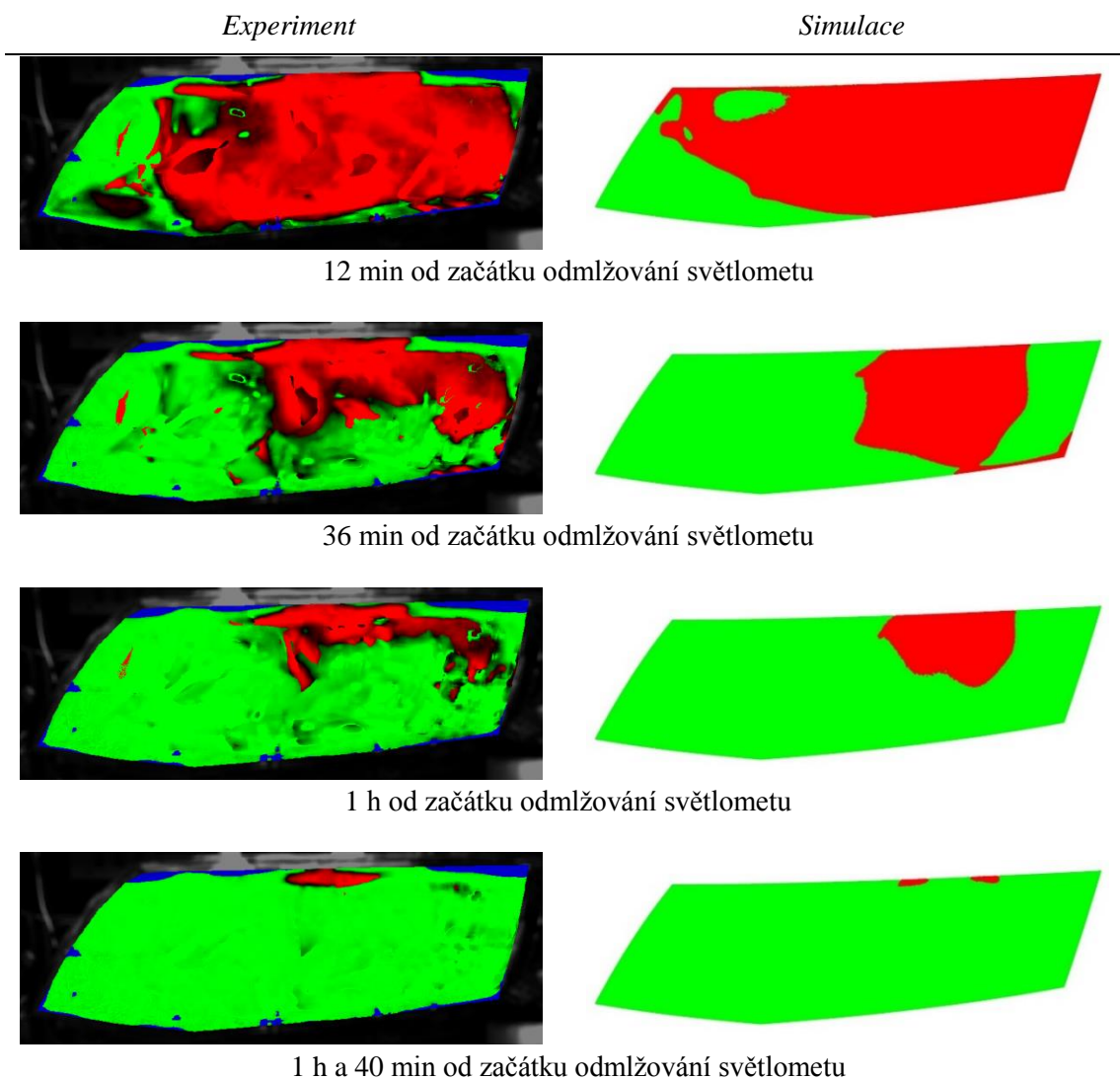
Tab. 2.3 Rozdíl výsledků mezi experimenty a simulacemi

| | V1p60 (h:mm:ss) | | V1,5p60 (h:mm:ss) | | V2p60 (h:mm:ss) | |
|------------|-----------------|-------------|-------------------|-------------|-----------------|-------------|
| | Křížení | Zamlž. 20 % | Křížení | Zamlž. 20 % | Křížení | Zamlž. 20 % |
| Experiment | 0:26:00 | 0:48:00 | 0:31:00 | 1:08:00 | 0:41:00 | 1:17:00 |
| Simulace | 0:21:14 | 0:47:10 | 0:30:00 | 1:06:00 | 0:35:33 | 1:18:34 |
| Odchylka | 0:04:46 | 0:00:50 | 0:01:00 | 0:02:00 | 0:05:27 | -0:01:34 |



Obr. 2.10 Průběh odmlžení simulace a experimentu (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

V následujících obrázcích znázorňuje zelená barva odmlženou oblast, červená zamlženou oblast a u fotografií pořízených z měření byla modrá barva, která reprezentovala nevyhodnotitelné oblasti. Ty vznikly z důvodu lokálního přesvětlení vlivem nevhodného odrazu od reflektoru nebo nedostatečným zamlžením krajních míst skla světloometu.



Obr. 2.11 Ukázka porovnání výsledků odmlžení z experimentu V1p60 a simulace

Při vizuálním porovnání výsledků simulací lze pozorovat tendenčně dobrou shodu s experimentem V1p60. Z obou výsledků je patrná pozice zvlhčovače (viz kapitola 2.2), před kterým kondenzát zůstává nejdéle, jelikož zde má největší tloušťku. Ovšem při porovnání tvaru hranice kondenzátu jsou patrné odchylky. U experimentu byl kondenzát po delší dobu v levém horním rohu a postupně ustupoval ze spodu nahoru. Kdežto u simulací byl světlomet odmlžen postupně od krajů k místu před zvlhčovačem.

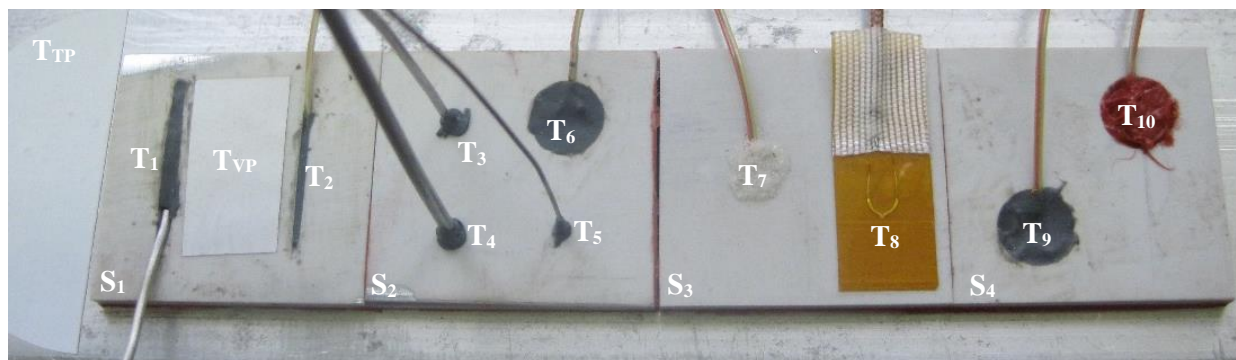
Časové rozložení kondenzace ze simulací a z experimentů není zcela totožné. Ovšem celkový čas odmlžení světloometu a tendence ústupu kondenzátu vykazují dobrou shodu. Odchylky výsledků simulací pro všechny tři konfigurace měření byly pro druhý kontrolní časový okamžik tj. pro 20 % zamlžené plochy předního skla shodné. Rozdíl kolem 3 % vůči měření lze považovat za zanedbatelný. Simulace vykazovaly největší odchylky na počátku, konkrétně do okamžiku zkřížení křivek zamlžené a odmlžené oblasti – viz obr. 2.10, proto nelze první minuty simulací použít pro přesný popis reálného stavu. Vzniklé rozdíly výsledků simulací jsou způsobeny převážně použitým zjednodušeným modelem kondenzace (Eulerian wall film) a dále okrajovými podmínkami, které mohou být mírně odlišné od reality. I přes tyto nedostatky lze vytvořené simulace považovat za dobrý nástroj pro odhad potřebného času nutného k odmlžení, proto je lze s výhodou použít pro zmapování a hlavně porovnání četných konfigurací přetlaků na jednotlivých odvětrávacích otvorech a množství odpařované vody. Na základě tohoto porovnání je možno následně vybrat ty nejvhodnější pro otestování pomocí experimentů.

2.6. Měření teplotního zatížení světlometů

K výrobě komponent automobilových světlometů jsou používány převážně plastové materiály, proto jsou i měřené teploty pohybují na nízké úrovni od pokojové teploty do 180 °C v blízkosti světelných zdrojů. Z tohoto důvodu je důležité zvolit nejvhodnější typ termočlánků pro aplikace na světlometech a vhodnou metodu zabudovávání do měřených míst. Zabudování termočlánků má kritický vliv na změřené výsledky. Na výsledné naměřené teploty má vliv druh měřeného materiálu, reflektance povrchu a elektrickém příkonu světelného zdroje (žárovky nebo LED) [13], [14]. Plast má nízkou tepelnou vodivost s přibližnou hodnotou kolem $0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, proto špatně zabudovaný termočlánek může způsobit vyšší absorpci tepla vlivem záření ze světelného zdroje. Toto zvýšené množství tepelné energie je kumulováno v blízkosti měřeného místa vlivem nízké tepelné vodivosti a způsobuje zvýšení měřené teploty.

Studie vlivu zabudování termočlánku na měřené teploty

Cílem studie bylo ukázat na měřených teplotách vliv zabudování termočlánků při použití různých konstrukčních provedení termočlánků K. Měřený vzorek 1 se zabudovanými termočlánky 2 byl ohříván na konstantní teplotu pomocí regulovatelného topného tělesa 3 a ze strany ofukován ventilátorem 4. Rychlost proudění vzduchu kolem měřených vzorků 1 byla sledována anemometrem 5, který byl umístěn ve směru proudění. Povrchová teplota vzorků 1 a topení 3 byla měřena pomocí pyrometru 6, který byl umístěn nad vzorky 1. Pro lepší prezentaci vlivu zabudování termočlánků 2 bylo proměřeno šest úrovní teploty vzorků 1 (60, 80, 100, 120, 140, 160 a 180) °C. Každá úroveň byla změřena ve dvou režimech a to s vypnutým ventilátorem 4 (přirozená konvekce) a se zapnutým ventilátorem 2 m s^{-1} (nucená konvekce). Data byla zaznamenávána pomocí multimetru 7 (Keithley - Model 2000 multimeter), který zaznamenával hodnotu milivoltů z jednotlivých termočlánků a následně uložil do počítače.



Obr. 2.12 Testovací vzorky se zabudovanými termočlánky

Pro testování byly připraveny čtyři duralové vzorky (S_1 až S_4), které měly různě konstruované drážky a díry pro vložení termočlánků. Většina termočlánků měla měřicí část umístěnou ve stejné hloubce 2 mm povrchem, pouze zbylé dva T_7 a T_8 byly přilepeny přímo na povrch. Teplota vzorků byla nastavována pomocí topení se zabudovaným termočlánkem a kontrolována bezkontaktním měřením povrchové teploty (T_{TP}) pomocí pyrometru. Pro tyto účely byla na povrch topení nalepena páska o známé emisivitě.

V prvním vzorku byly zabudovány dva termočlánky. Plášťový termočlánek T_1 o průměru 1 mm a termočlánek s teflonovou izolací T_2 o průměru 0,25 mm, které byly vloženy do vyřezaných drážek a následně zalepeny dvousložkovým epoxidem (Loctite EA 9492). Mezi nimi byla nalepena páska o známé emisivitě pro bezkontaktní měření povrchové teploty vzorku (T_{VP}) pomocí pyrometru.

Druhý vzorek měl zabudované čtyři termočlánky. Tři plášťové termočlánky: T_3 o průměru 1 mm, T_4 o průměru 1,5 mm a T_5 o průměru 0,5 mm. Poslední termočlánek T_6 byl teflonovou izolací o průměru 0,25 mm. Termočlánky T_3 až T_5 jsou vloženy do vyvrtaných děr, jejichž průměr je shodný s vnějším průměrem

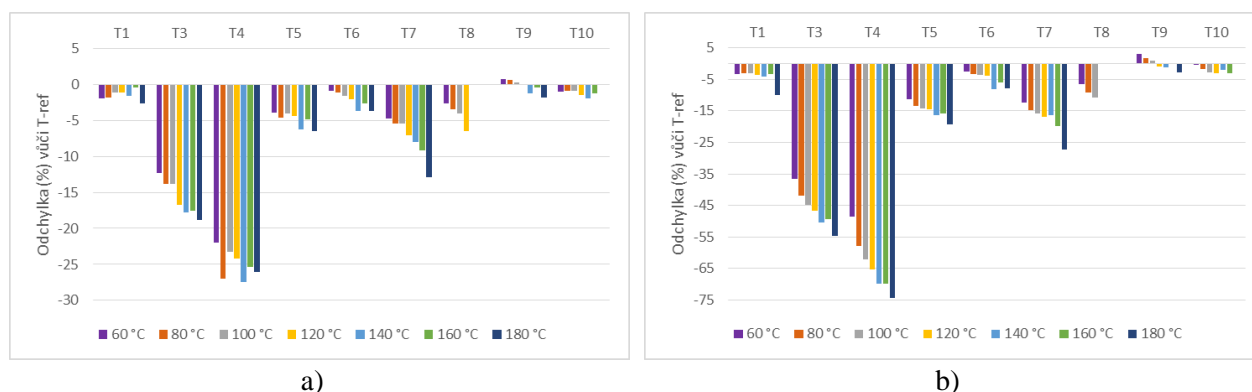
příslušného termočlánku. Zbývající T_6 byl vložen do výřezu tvaru kulového vrchlíku. Pro zalepení byl použit dvousložkový epoxid (Loctite EA 9492).

Třetí vzorek v sobě neměl žádnou díru ani zářez pro vsunutí termočlánků, proto byly nalepeny přímo na povrch vzorku. Termočlánek s teflonovou izolací \varnothing 0,25 mm T_7 byl přilepen pomocí vteřinového lepidla (Loctite 424). Nalepovací termočlánek T_8 byl přilepen přes svou nalepovací plochu pro první měření a při druhém měření byl znovu přilepen pomocí vteřinového lepidla (Loctite 424).

Poslední čtvrtý vzorek měl dva totožné termočlánky, které jsou vloženy do výřezů tvaru kulového vrchlíku. Termočlánky s teflonovou izolací T_9 , T_{10} o průměru 0,25 mm. Rozdíl byl v použitém lepidle. Pro přilepení T_9 byl použit dvousložkový epoxid (Loctite EA 9492). Pro T_{10} bylo použito u prvního měření vteřinové lepidlo (Loctite 424) a pro druhé měření silikónová pasta (Loctite SI 5920).

Byly provedeny dvě měření se stejným rozsahem měřených teplot topení od 60 °C do 180 °C. Pro ukázkou bylo použito pouze první měření. Každá teplota byla měřena s vypnutým (přirozená konvekce) a zapnutým (nucená konvekce) ventilátorem. Byl zvolen referenční termočlánek T_2 , který díky své konstrukci a způsobu zabudování do měřeného materiálu dává výsledky, které byly nejbližší reálné teplotě vzorku.

Pro názorné porovnání zabudovaných termočlánků byly všechny měřené teploty srovnávány s referenční teplotou T_2 . Následující graf v obr. 2.13 zobrazuje teploty v procentuální odchylce od referenční teploty T_2 . Tento termočlánek byl zvolen, jelikož je nejvhodněji zabudovaný do vzorku. Z naměřených teplot je patrné, které způsoby zabudování termočlánků dosahují dobrých výsledků a které jsou zcela nevhodné. Kladná hodnota odchylky je pro teplotu, která je vyšší, než teplota T_2 . Záporná hodnota odchylky je pro teplotu nižší, než je teplota T_2 .



Obr. 2.13 Odchylky teplot (%) vůči T_2 pro 1. měření (a – přirozená konvekce, b – nucená konvekce 2 m s⁻¹)

Výsledky pro přirozenou konvekci vykazují relativně nízké hodnoty odchylky. Většina termočlánků měla měřenou teplotu do 5 % nižší než T_2 . Největší odchylky dosahovaly T_3 a T_4 , které měří teploty až o 25 % nižší. Pro přirozenou konvekci není zcela patrné, které termočlánky jsou nevhodně zabudované, jelikož odchylky od referenční teploty byly malé. U T_3 a T_4 , výsledky naznačují nevhodnost zabudování.

U nucené konvekce se ve větší míře projeví vliv zabudování termočlánků. Nevhodnost zabudování je zesílena vyšší rychlostí obtékajícího vzduchu. Odchylky od referenčního T_2 byly standardně o 5 % až 15 % nižší. U termočlánku T_7 byl rozdíl kolem 25 %. Opět nejhorší termočlánky byly T_3 a T_4 , které měřily teplotu až o 75 % nižší než T_2 .

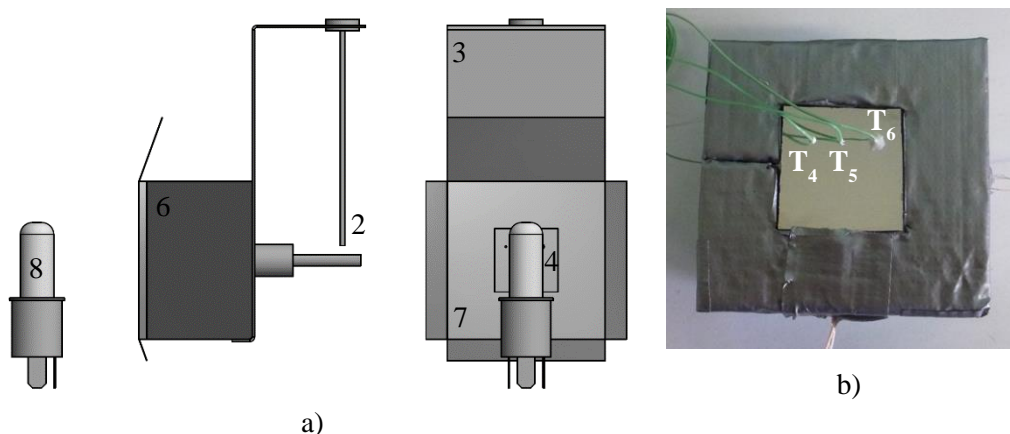
Nejvhodnější jsou drátové termočlánky s malým průměrem drátu, jako například termočlánek s teflonovou izolací a průměrem drátu 0,25 mm (T_2 , T_6 , T_9 , T_{10}), který má velmi malý měřený spoj. Dále mají velmi tenké měřicí dráty, které jsou tepelně izolované. Proto je zabráněno odvodu tepla z měřeného místa. Díky absenci kovového pláště, není nutné mít termočlánek uložený v izotermě.

Studie vlivu světelného zdroje na měřené teploty

Pro potřeby společnosti Škoda Auto a.s. byla v rámci dizertační práce provedena studie, jejímž cílem bylo prokázat vliv světelných zdrojů s velkou radiační složkou (halogenová žárovka H12) oproti “studeným”

světelným zdrojům (LED) na měřené teploty, kdy v kombinaci s nízkou emisivitou povrchu měřeného plastového materiálu (pokovený povrch) a termočláнку zabudovaným z ozařované strany dojde k velké odchylce měřených teplot. Typickým příkladem je měření teplot reflektoru světloometu v blízkosti žárovky. Pro testy byly použity dva druhy vzorků, které se běžně vyskytují ve světlometu. Plastový vzorek s pokoveným povrchem (parabola světloometu) a černý plast (tělo světloometu) bez jakýchkoliv úprav. Do vzorku bylo zabudováno celkem sedm termočláneků. Tři z přední strany, tři ze zadní strany. U zabudovaných termočláneků byl rovněž řešen vliv množství epoxidu použitého pro zalepení termočláнку v měřicím místě a jeho rozdílná emisivita oproti originálnímu povrchu.

Všechny experimenty probíhaly v termostatické komoře 1 (Binder MK 720), která zaručovala stálost podmínek během experimentů. Teplota okolí (T_{ok}) byla monitorována pomocí odporového teploměru PT100 2, který byl umístěn do držáku 3 vzorku 4. Komora 1 byla vyhřívána na požadovanou teplotu a ponechána 1 hodinu na teplotě z důvodu vytemperování. Během samotného měření již byla vypnutá, aby nedocházelo k ochlazení vzorku 4 vlivem nucené konvekce. Udržování okolní teploty bylo prováděno ručně ohřevem pomocí topného tělesa 5 vloženého do komory 1. Vzorek 4 byl osazen termočlánci a vsazen do izolace 6, která byla na přední straně potažená hliníkovou fólií 7 pro snížení absorpce tepelné energie. Světelný zdroj 8 (Halogenová žárovka H12 a LED) byl pomocí držáku 9 přichycen k roštu 10 komory a před něj byl umístěn měřený vzorek 4. Byly měřeny dva vzorky 4 s pokoveným povrchem a černým, které byly ozařovány dvěma různými světelnými zdroji 8 (LED a H12) Zároveň byla měněna vzdálenost vzorku a světelného zdroje a teploty okolí (25 °C a 50 °C). Každá konfigurace byla proměřena alespoň třikrát, aby bylo zabráněno chybě během měření a zároveň byla zjištěna opakovatelnost naměřených dat.



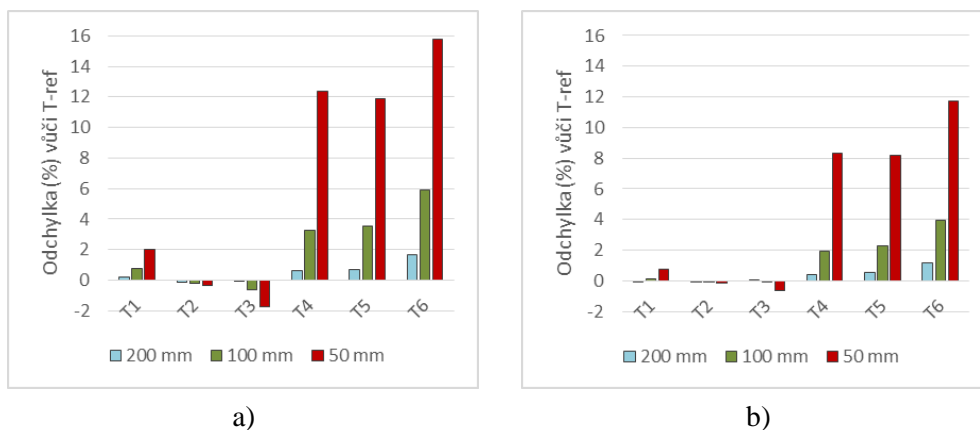
Obr. 2.14 Měřicí obvod (a – 3D model s bočním a předním pohledem, b – Zabudování termočláneků do vzorku, 2 teploměr, 3 držák vzorku, 4 vzorek, 5 topné těleso, 6 izolace, 7 hliníková fólie, 8 světelná zdroj, 9 držák světelného zdroje)

Z těla světloometu byl vyříznut černý vzorek a z reflektoru pokovený vzorek o rozměrech 30 mm na 30 mm. Do těchto materiálů byly vyvrtány díry o různých průměrech. Tři z přední strany, tři ze zadní strany. Díry byly vrtány, tak aby měřicí spoj termočláneků byl ve stejné hloubce vzorku, jak z přední, tak ze zadní strany. Vzorek osazený termočlánci byl následně vsazen do polystyrénové izolace a přední plocha byla přelepena hliníkovou fólií pro snížení tepelného toku přijímaného polystyrénem ze světelného zdroje.

Při vlepování termočláneků byl kladen důraz na množství lepidla kolem termočláнку. U T_6 bylo lepidlo úmyslně rozetřeno do větší vzdálenosti, aby byl prezentován efekt rozdílné emisivity lepidla a povrchu vzorku na měřené teploty.

Z obou stran byly díry vrtány do hloubky 1,2 mm, aby bylo možno měřit teplotu uprostřed tloušťky vzorku. Do každé díry byl vložen stejný drátový termočlánek typu – K s teflonovou izolací a průměrem drátu $d = 0,127$ mm (označení 5TC-TT-K-36-72). Díra s vloženým termočláncem byla vyplněna lepidlem Loctite EA 9492, což je vysokoteplotně odolný dvousložkový epoxid s maximální teplotou do 180 °C. Lepidlo a měřený materiál má stejnou tepelnou vodivost $0,3 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

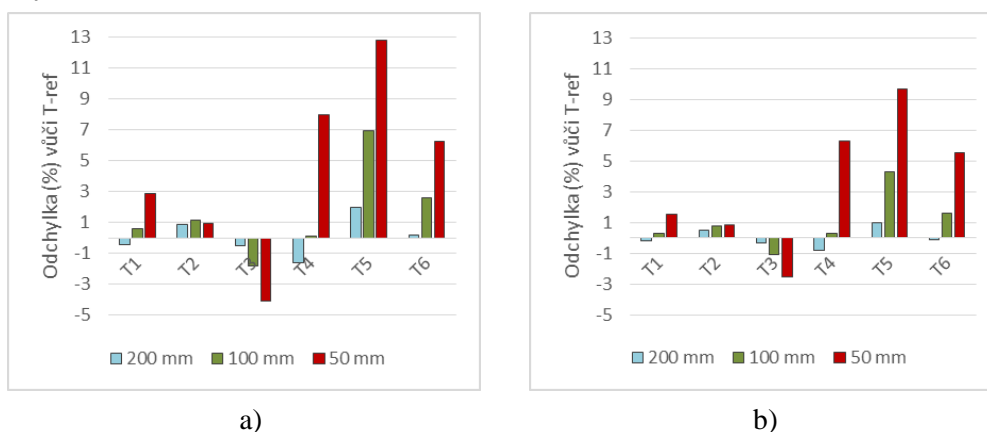
Naměřené hodnoty teplot pro jednotlivé termočlánky z ustálené části experimentu jsou porovnány pomocí procentuální odchylky od referenční teploty (T_{ref}), která byla stanovena zprůměrováním teplot ze zadní strany vzorku T_1 , T_2 a T_3 pro minimálně 3 experimenty stejné konfigurace. Kladná hodnota odchylky je pro teplotu, která je vyšší, než teplota T_{ref} . Záporná hodnota odchylky je pro teplotu nižší, než je teplota T_{ref} . Uvedené výsledky jsou pouze pro měření s halogenovou žárovkou H12, jelikož LED zdroj vykazoval pouze nepatrné rozdíly do 3 % mezi přední a zadní stranou vzorku.



Obr. 2.15 Pokovený vzorek ozařovaný žárovkou H12, teplota okolí (a – 25 °C, b – 50 °C)

Vzdálenost od světelného zdroje má silný účinek na zvýšení měřených teplot vlivem zabudování termočlánků do vzorku. Pro větší vzdálenosti bylo množství dopadajícího záření malé, proto nebyl velký rozdíl mezi termočlánky zabudovanými do přední a zadní strany. Pro vzdálenost 100 mm, již docházelo k odchylkám a pro 50 mm byly rozdíly pro termočlánky T_4 a T_5 na 12 % ($T_{\text{ok}} 25$ °C) a 8 % ($T_{\text{ok}} 50$ °C). Vliv rozdílné emisivity povrchu vzorku a použitého lepidla byl nejvíce patrný u termočlánku T_6 , kde byla měřená teplota o 16 % vyšší ($T_{\text{ok}} 25$ °C) a 12 % ($T_{\text{ok}} 50$ °C), než T_{ref} .

Pro konfiguraci pokoveného vzorku a LED světelného zdroje byly proměřeny pouze dvě vzdálenosti z důvodu nízkého, až neměřitelného nárůstu teplot vzorku, který byl v řádu desetin stupně. Při použití studeného zdroje světla nemá způsob zabudování termočlánků (přední/ zadní strana vzorku) výrazný vliv na měřené teploty.



Obr. 2.16 Černý vzorek ozařovaný žárovkou H12, teplota okolí (a – 25 °C, b – 50 °C)

I u černého vzorku byl patrný stejný trend, jako u pokoveného vzorku. Se snižující se vzdáleností mezi vzorkem a zdrojem světla (H12) docházelo ke zvyšujícímu rozdílu mezi teplotami přední a zadní strany. Ovšem u černého vzorku byly rozdíly odchylky nižší z důvodu vyšší emisivity povrchu vzorku. Pro nejbližší vzdálenost 50 mm byla měřená teplota na T_4 a T_6 o (5,5 až 7,5) % vyšší, než T_{ref} . U termočlánku T_5 byla měřená teplota o 13 % ($T_{\text{ok}} 25$ °C) a 10 % ($T_{\text{ok}} 50$ °C) vyšší, než T_{ref} . Ze způsobu zabudování termočlánků do vzorku by nejvyšších hodnot odchylek měl dosahovat T_6 . Ovšem z naměřených teplot pro černý vzorek

tomu, tak nebylo. Při lepení termočlásku T_5 zůstala v otvoru malá vzduchová bublinka v blízkosti měřicího spoje, která byla odhalena, až po následné demontáži termočlásků ze vzorku, proto vykazuje nejvyšší hodnotu odchylky.

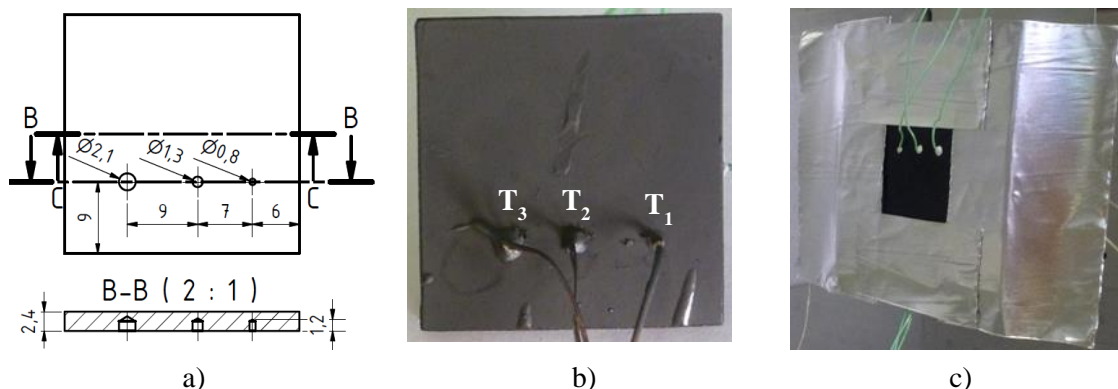
Z provedených experimentů vyplývá, že nejnáchylnější případ na zabudování termočlásků byl povrch s nízkou emisivitou (pokovený vzorek) ozařovaný halogenovou žárovkou, která vyzařuje velké množství energie radiací. Odchylka v měřených teplotách byla pro nejbližší vzdálenost mezi vzorkem a žárovkou, až o 16 % vyšší (T_6) pro $T_{ok} = 25\text{ °C}$. Ve světlometech jsou to měření reflektorů v blízkosti světelných zdrojů s vysokým radiačním výkonem (halogenové žárovky). Rovněž při měření černého vzorku byl rozdíl v měřených teplotách mezi přední (T_4, T_5, T_6) a zadní (T_1, T_2, T_3) stranou vzorku. Ovšem teploty byly kolem 7 % vyšší, než referenční teplota. Rovněž vliv vzdálenosti hraje svou roli. Pro vzdálenost 200 mm byl rozdíl velice malý. Výraznější odchylek se začalo dosahovat, až od 100 mm. Záleží samozřejmě na výkonu světelného zdroje. Při použití výkonnějšího zdroje bude vyšší i radiační tok, který by ovlivnil měřenou teplotu do větší vzdálenosti. Zvolené světelné zdroje byly typické pro aplikace automobilových světlometů. Obecně lze říci, že tento jev je dán kombinací použitého světelného zdroje (halogenové žárovky), který má vysoký radiační výkon. Ten sebou nese nejvíce energie, a tudíž nejvíce ohřívá povrch osvětleného předmětu. Dále vysokou emisivitou lepidla na termočlásky, které je schopno pohltit větší množství energie a v kombinaci s nízkou tepelnou vodivostí okolních plastů ($0,3\text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) se takto vzniklé teplo kumuluje v okolí termočlásku, kde může dojít v extrémních případech k natavení nebo i roztavení měřeného materiálu. Proto je vždy výhodnější zabudovávat termočlásky z neosvětlené strany a předejít komplikacím při měření.

2.7. Stanovení emisivity lesklých povrchů

Pro potřeby stanovení emisivity bylo sestaveno experimentální měření, které bylo totožné s předchozí podkapitolou Studie vlivu světelného zdroje. Ovšem zde byly použity pouze teploty ze zadních termočlásků (T_1 až T_3) a na základě jejich hodnot byla dopočítána emisivita povrchu vzorku. Schéma měření – viz obr. 2.14. Měření bylo složeno ze světelného zdroje 8 s homogenním rozložením intenzity osvětlení a dále z měřeného vzorku 4 vsazeného do polystyrenové izolace 3. Všechny měření probíhaly v termostatické komoře 1 Binder MK 720, která zaručila stálost okolních podmínek během celého experimentu. Na komoře 1 byla nastavena požadovaná teplota a po dobu 1 hodiny byla ponechána zapnutá, čímž došlo k vytemperování vnitřního prostoru. Jelikož komora udržuje teplotu nucenou konvekcí, bylo nutné ji během samotných experimentů vypínat, aby nenarušovala proudění vzduchu kolem vzorku 4. Teplota uvnitř byla udržována pomocí externího zdroje tepla 5. Tím byla eliminována teplotní regulace komory, která by zkreslila proudění kolem vzorku. Byly zvoleny dvě úrovně teploty okolí 25 °C a 50 °C a dvě vzdálenosti mezi světelným zdrojem a vzorkem 200 mm a 100 mm. Pro každou konfiguraci byla provedena dvě měření. V prvním byl změřen vzorek s neznámou emisivitou (pokovený povrch) a před druhým měřením byl na povrch nanesen grafit o emisivitě $\varepsilon = 0,97$ (-). Z obou měření byly zaznamenány teploty v čase, které byly použity pro nastavení numerických simulací, jak bylo popsáno na začátku kapitoly.

Metodika stanovení emisivity byla vyvinuta autorem dizertační práce a je patentově chráněná úřadem pro průmyslové vlastnictví pod názvem Způsob měření emisivity lesklých povrchů a jeho kopie je umístěna v příloze práce. Číslo přihlášky je 2014-835 a číslo dokumentu je 305705.

Vzorek 4 s termočlásky byl vsazen do polystyrenové izolace 6 a umístěn naproti radiačnímu zdroji, kterým byla žárovka 8. Vzorek 4 a žárovka 8 byly vůči sobě pozicovány pomocí držáků 4, které byly pevně spojeny s roštem 10 termostatické komory 1 pro zaručení shodné pozice během všech experimentů. Na přední plochu izolace 6 byla nalepena hliníková fólie 7, která omezovala absorpci tepelné energie emitované žárovkou 8. Dále byl ze zadní strany vyhlouben otvor, který sloužil jako průzor pro kontrolní měření teploty vzorku pomocí pyrometru 11. Z důvodu přesného měření teploty okolí – T_{ok} (uvnitř komory) byla sestava měření opatřena odporovým teploměrem 2. Měření bylo ukončeno po ustálení teplot na vzorku 4. Celý postup byl zopakován pro všechny zvolené konfigurace měření.



Obr. 2.17 Vzorek (a – Výkres s T_1 až T_3 , b – Zadní strana vzorku s T_1 až T_3 , c – Zabudovaný vzorek do izolace)

Numerický model

K zjištění hodnoty emisivity pro lesklý (pokovený) vzorek bylo nutné na základě měření naladit zjednodušený numerický model. Pro tyto účely byl použit software od společnosti ANSYS a to konkrétně Transient thermal. Do modelu, který se skládal pouze ze solid domény (vzorku a izolace) byly zadány okrajové podmínky, které byly naměřeny během experimentu a termofyzikální vlastnosti použitých materiálů. Proudění vzduchu nebylo modelováno, proto bylo nutné jeho vliv nahradit pomocí vypočtené hodnoty součinitele přestupu tepla, který byl spočítán na základě naměřených teplot pro každý experiment. Model se skládá ze vzorku o rozměrech 30mm x 30mm vsazeného do izolace a žárovky, kterou reprezentuje těleso umístěné paralelně s ozařovaným povrchem vzorku. Teplo ze zdroje bylo předáváno vzorku pomocí zjednodušeného radičního modelu Surface-to-Surface (S2). Pro stanovení emisivity bylo nejdůležitější teplotně neustálená část z měření, proto byl zvolen nestacionární typ výpočtu s přímým řešičem a proměnnou délkou časového kroku. Celý simulovaný čas trval 600 sekund a byl rozdělen na šest úseků, kterými byl zajištěn časově jemnější výpočet pro okamžiky prudké změny teploty na začátku simulace. Na konci již byly teploty ustálené, proto bylo možno zvolit velký časový krok.

Tepelná energie ze zdroje byla emitována povrchem a pomocí radičního modelu Surface-to-Surface (S2S) transportována na přední plochu vzorku a izolace. Odtud byla vedením distribuována dál do jednotlivých materiálů za pomoci termofyzikálních vlastností. Na rozhraní vzorku a izolace byl kontaktní odpor, který zpomaluje přechod tepla mezi oběma tělesy. Na vnějších površích byl zadán součinitel přestupu tepla, který byl stanoven na základě provedených měření a z nich dosažených teplot v ustáleném stavu, čímž byl nahrazen vliv okolního proudění vzduchu přirozenou konvekcí a jeho odvod tepla do okolí.

Efekt odebraného tepla přirozenou konvekcí na vertikální stěně lze popsat pomocí kritériálních rovnic obsahující bezrozměrná (podobnostní) čísla a na jejich základě vypočítaným součinitelem přestupu tepla, který byl kolem $5 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

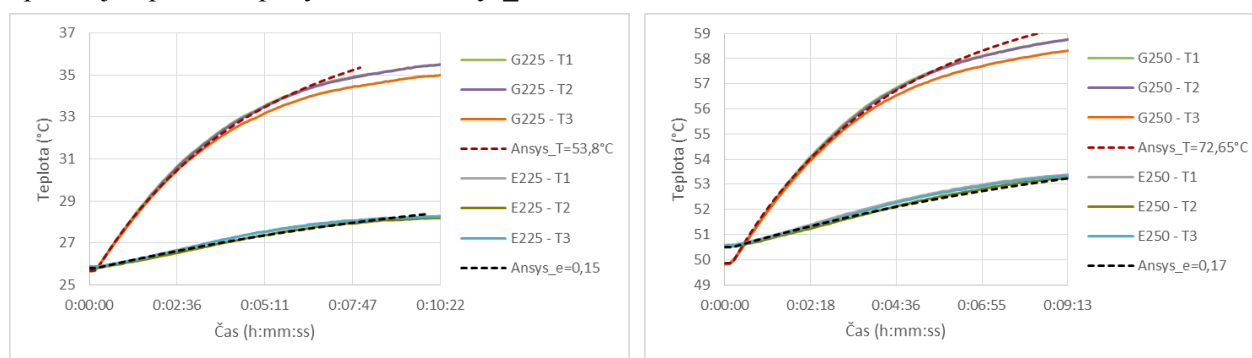
Pro správné naladění modelu bylo zapotřebí znát rovněž termofyzikální vlastnosti použitých materiálů. V modelu jsou uvažovány čtyři různé materiály. Vzorek z plastu PP T40, izolace polystyrén, dále Loctite EA 9492 vysokoteplotně odolný dvousložkový epoxid pro připevnění termočlánků. Posledním materiálem byl grafit nastříknut na pokovený povrch vzorku během měření tepelného výkonu světelného zdroje. Grafitová vrstva byla nejprve v modelu zanedbána z důvodu velice malé tloušťky 0,01 mm. Díky vysoké tepelné vodivosti v porovnání s ostatními materiály, která je o dva řády vyšší funguje na povrchu jako tepelný most. U modelu bez grafitové vrstvy byla na povrchu uprostřed teplota vzorku, až o dva stupně vyšší, než u modelu s grafitem.

Zpracování a vyhodnocení naměřených dat

Výstupem z každého experimentu byl záznam teploty uvnitř termostatické komory a teplotního vývoje vzorku v čase. Data byla zpracována do grafů. Pro každé měření byla určena neustálená a ustálená část teplotního vývoje pomocí derivace teploty v čase. K další analýze emisivity byla použita pouze teplotně neustálená část měření. Konec neustálené části byl stanoven podle změny směrnice přímky proložené daty derivace teploty podle času.

Bylo provedeno celkem osm experimentů pro dva různé povrchy vzorku. Nejprve byly proměřeny všechny konfigurace s originálním (pokoveným) povrchem (označovány písmenem E) a následně byl vzorek přestříkán grafitovým sprejem (označovány písmenem G) a postup byl zopakován. Každý vzorek byl měřen pro dvě vzdálenosti mezi vzorkem a tepelným zdrojem a dvě úrovně teploty okolí.

V následujících grafech jsou zobrazeny měřené teploty ze zadní strany vzorku T_1 až T_3 , které jsou proloženy vypočítaným průběhem teploty uprostřed vzorku. Nejdříve byla zjištěna pro danou konfiguraci měřící teplota světelného zdroje, která je označena v grafech Ansys_T a následně emisivita pokoveného povrchu a její odpovídající průběh teploty označen Ansys_e.

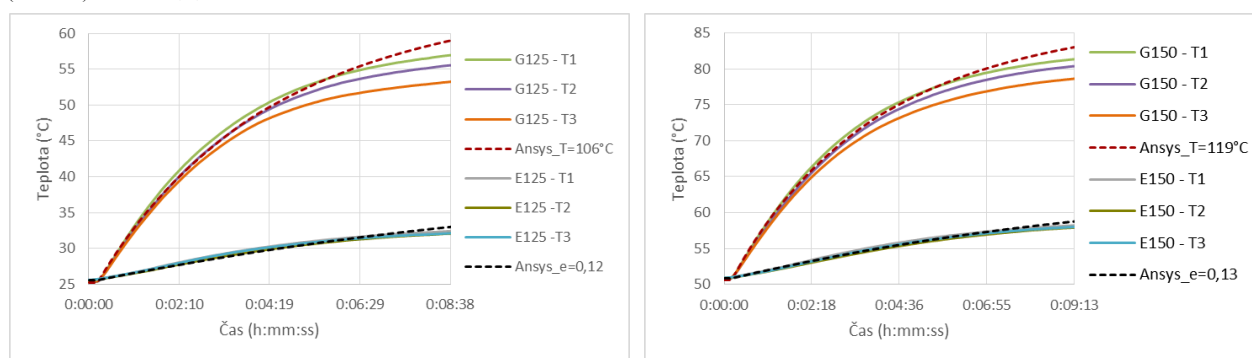


a)

b)

Obr. 2.18 Výsledky pro vzdálenost 200 mm (a – Tok 25 °C, b – Tok 50 °C)

Při porovnání výsledků vypočítaných emisivit pro stejnou vzdálenost vzorku od radiačního zdroje je dosaženo dobré opakovatelnosti. Pro vzdálenost 100 mm byla vypočítaná emisivita $\epsilon_{(Tok25^{\circ}C)} = 0,12$ (–) a $\epsilon_{(Tok50^{\circ}C)} = 0,13$ (–). Pro vzdálenost 200 mm byla vypočítaná emisivita $\epsilon_{(Tok25^{\circ}C)} = 0,15$ (–) a $\epsilon_{(Tok50^{\circ}C)} = 0,17$ (–).



a)

b)

Obr. 2.19 Výsledky pro vzdálenost 100 mm, Tok 25 °C (a – Tok 25 °C, b – Tok 50 °C)

Z těchto výsledků je patrný vliv vzdálenosti vzorku od radiačního zdroje. Zvolit optimální vzdálenost mezi vzorkem a tepelným zdrojem je klíčové pro správnost dosažených výsledků. Příliš velká vzdálenost nebude dostatečně ohřívat vzorek, a proto bude velmi obtížné změřit ohřev a následně naladit numerický model. V opačném případě bude vzorek natolik blízko, že k jeho ohřevu bude docházet vlivem radiace a přirozené konvekce od ohřátého vzduchu v blízkosti zdroje. Rovněž zvolený radiační zdroj musí mít, co nejvíce

homogenní rozložení tepelného toku. Dosažené výsledky prokázaly, že vyvinutá metoda funguje. Ovšem vypočítaná hodnota emisivity je vyšší, než je běžně literaturou udávaná hodnota, která je 0,8 až 0,1. Příčinou může být přílišné zjednodušení výpočtového modelu, u kterého nebylo modelováno okolní proudění vzduchu. Jeho chladičí účinky byly nahrazeny koeficientem přestupu tepla na povrchu modelu. Rovněž byl použit pouze základní model radiace (Surface-to-Surface).

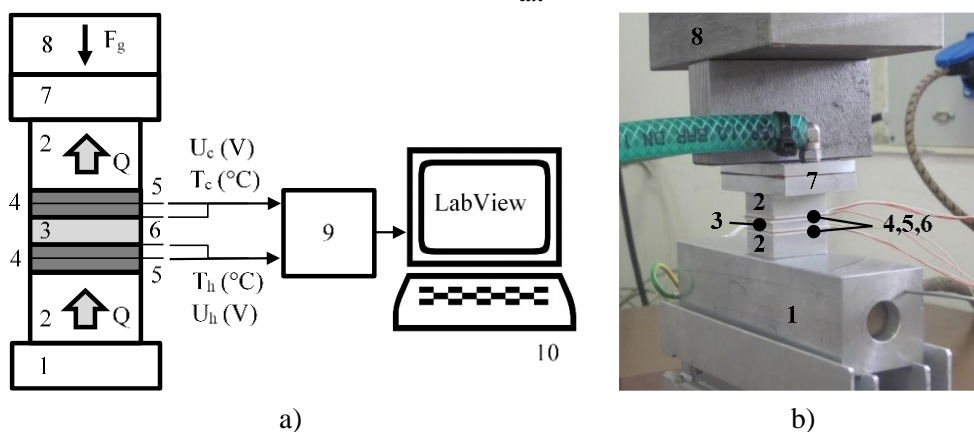
2.8. Měření tepelné vodivosti

Pro účely numerických simulací jsou běžně materiály charakterizovány pouze konstantní parametry, což může být pro přesné teplotní simulace světlometů problém. Teplotní management u automobilových světlometů, které využívají moderních světelných zdrojů (např. LED čipů, OLED nebo laser) je velice důležitý. Teplotní zatížení světlometů je během provozu výrazně odlišné. Nejvyšších teplot je dosahováno v blízkosti zdrojů světla. Mnohdy je použitý materiál vystaven podmínkám, které jsou blízko jeho teplotním limitům, což klade i vyšší nároky na přesnost teplotních simulací. Teplotně závislá materiálová data jsou výhodnější pro dosahování přesnějších výsledků. Cílem bylo matematicky popsat změnu tepelné vodivosti na základě proměnné teploty vzorku, jenž by mohla být použita společností Škoda Auto a.s. pro přesnější nastavení simulací světlometů.

Metodika je vyvinuta pro měření tepelné vodivosti materiálů použitých při konstrukci světlometů. Hlavní princip je výměna tepla stacionárním vedením přes měřený vzorek, který je umístěn mezi zdroj tepla a chladič. Teplo proudí z teplejšího místa do chladnějšího. Teplota v materiálu se nejvíce mění v kolmém směru na chlazený a ohříváný povrch, proto se ostatní směry ve výpočtu zanedbávají. Pro vyhodnocení je využito ustálené (stacionární) části měření tepelného toku, jenž matematicky popisuje Fourierův zákon – viz vzorec (2.1).

$$\dot{q}_x = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (2.1)$$

kde \dot{q}_x je tepelný tok ve směru x , λ je tepelná vodivost, $\frac{dT}{dx}$ je teplotní gradient ve směru x .



Obr. 2.20 Měření tepelné vodivosti (a – Schéma, b – Reálné zařízení, 1 topení, 2 hliníková kostka, 4 silikonové gummy, 5 snímač tepelného toku, 6 termočláanky, 7 chladič, 8 závaží, 9 měřicího zařízení, 10 počítač)

Zařízení k měření tepelné vodivosti je tvořeno regulovatelným topením 1, na kterém je položena hliníková kostka 2 o rozměrech vzorku 3. Pro zajištění dobrého kontaktu po celé ploše jsou umístěny z obou stran vzorku silikonové gummy 4 potřené vodivou pastou mezi, které je vložen snímač tepelného toku (Omega HFS-4) 5 pro stranu s topením (index h) a chladičem (index c). V ustáleném stavu dávají oba snímače totožnou hodnotu. Na plastový vzorek 3 čtvercového průřezu (20 mm na 20 mm) jsou z obou stran nalepeny tenké drátové termočláanky 6 pro záznam teplot teplého a studeného povrchu. Takto nachystaný vzorek 3 je následně vložen mezi snímače tepelného toku 5. Nakonec se umístí druhá hliníková kostka 2, na kterou je položen

vodní chladič 7. Celá sestava je zatížena závažím 8, které zaručí stejnou přítlačnou sílu pro všechny měření. Data z experimentu jsou vyčítány pomocí měřicího zařízení 9 od společnosti National Instruments a vše je ovládáno přes počítač 10 s programem LabView.

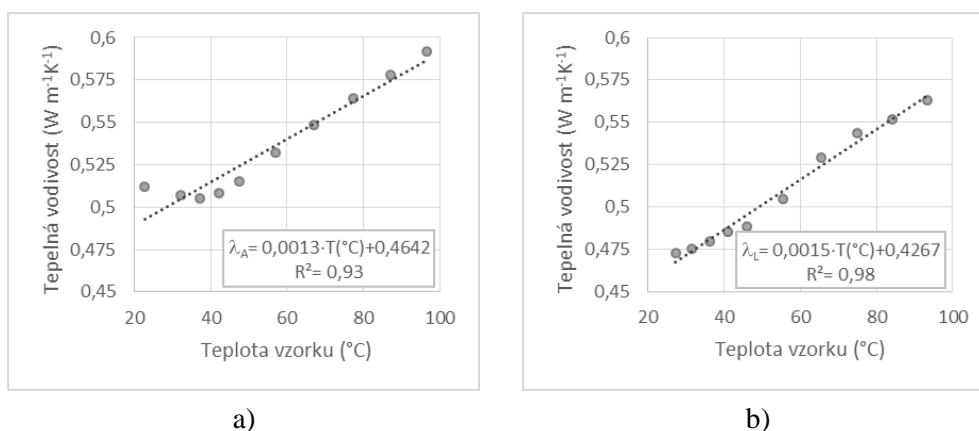
Hlavní součástí měřicího zařízení je snímač tepelného toku od firmy Omega typ HFS-4, což je tenká ohebná destička o rozměrech 28 mm × 35 mm × 0,18 mm, která funguje jako diferenční měřič teploty na dvou protilehlých površích kolmých na směr tepelného toku. V senzoru je zabudováno 112 termočlánkových spojů na horní a spodní straně. Zabudované termočlánky produkují napětí, které je následně přepočítáno pomocí senzitivity udávané v kalibračním listu senzoru na tepelný tok, který má jednotky² BTU/ft² h⁻¹ a pomocí přepočecí konstanty 1 BTU/ft² h⁻¹ = 3,1546 W m⁻² je převeden na základní jednotky. V posledním kroku je ze známé tloušťky vzorku a změřené teploty ohřivaného (T_h) a chlazeného povrchu (T_c) zjištěna hodnota tepelného toku pro danou teplotu vzorku.

$$\dot{q} = 3,1546 \frac{U}{\text{senzitivita}} \quad (2.1)$$

Po sestavení zařízení s měřeným materiálem se proměřovala tepelná vodivost pro různé teploty, aby bylo možno zmapovat její tepelnou závislost.

Příkon topení byl regulován, než bylo na vzorku dosaženo požadované teploty. Poté byly odečteny hodnoty teplot chlazeného a ohřivaného povrchu a tepelný tok.

Tepelná vodivost vzorků byla proměřena v teplotním rozsahu (25 až 95) °C, což je průměrná teplota chlazeného a ohřivaného povrchu. Měřený vzorek byl umístěn mezi senzory tepelného toku, kde byl ohříván pomocí regulovatelného topení. Při dosažení ustáleného stavu byly odečteny hodnoty teplot a tepelného toku, jak bylo popsáno na počátku kapitoly. Z rozdílu teplot a tepelného toku procházejícího přes vzorek byla stanovena tepelná vodivost pro konkrétní teplotu vzorku. Následovně se celý proces opakoval, až do proměření zadaného teplotního rozsahu. Výsledky byly proloženy rovnicí přímky pro jednodušší zadávání do materiálových knihoven výpočetních softwarů.



Obr. 2.21 Tepelná vodivost pro materiály (a – APEC, b – Průhledný Lexan)

Z naměřených dat je vidět, že tepelná vodivost u obou materiálů v měřeném rozsahu 20 °C až 100 °C lineárně rostla. U materiálu APEC z 0,5 W m⁻¹K⁻¹ na 0,6 W m⁻¹K⁻¹, což je nárůst o 20 %. Pro druhý měřený materiál průhledný Lexan tepelná vodivost stoupla z 0,475 W m⁻¹K⁻¹ na 0,565 W m⁻¹K⁻¹, což je nárůst o 19 %.

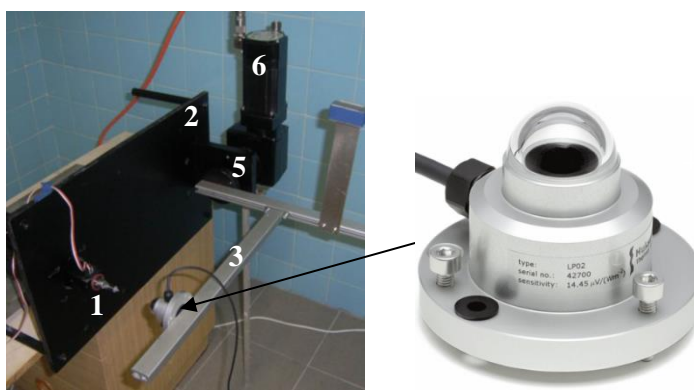
Během měření bylo prokázáno, že tepelná vodivost je teplotně závislá veličina, což může být důležité. Pro aplikace automobilových světlometů jsou typické materiály plasty, které charakterizuje velmi nízká tepelná vodivost a to řádově v desetinách W m⁻²K⁻¹. Při takto nízkých hodnotách může i zdánlivě nevýrazná změna hrát důležitou roli a to hlavně v kritických místech, kde se teplota materiálu blíží k jeho limitům.

² BTU – British thermal unit, ft² – čtvereční stopy, h – hodina

2.9. Měření prostorových tepelných výkonů světelných zdrojů

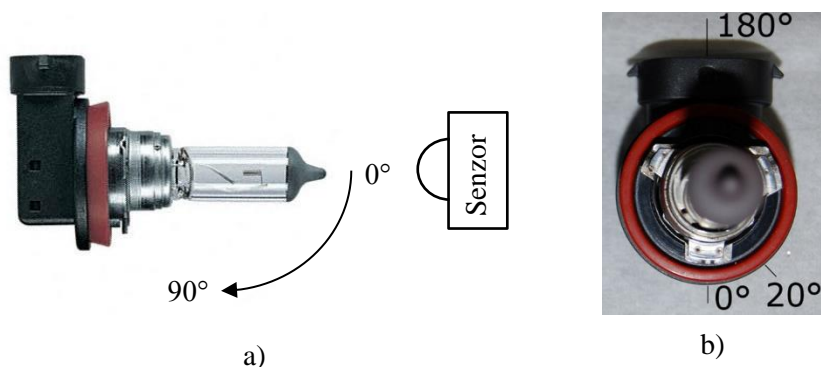
Pro zpřesnění teplotních simulací světlometů používajících světelné zdroje s vysokým radiačním výkonem (halogenové žárovky) byla v rámci dizertační práce pro společnost Škoda Auto a.s. vyvinuta metoda mapování prostorového tepelného výkonu světelných zdrojů za pomoci pyranometru sensoru pro měření slunečního radiačního výkonu. Změřené tepelné toky charakterizující prostorové zmapování jednotlivých žárovek byly použity pro přesnější nastavení okrajových podmínek numerických simulací a lepší pochopení rozložení tepelného zatížení vnitřních částí světlometu. Touto metodou byly proměřeny dvě žárovky H8 a P21, které se běžně používají v automobilových světlometech.

Měřená žárovka 1 je upevněna do přídržovací konstrukce 2 do výchozí polohy 0 stupňů – viz obr. 2.23 b). Ve vzdálenosti 100 mm od žárovky 1 je na rameno 3 připevněn pyranometr 4 senzor tepelného toku (Hukseflux LP02), který se otáčí kolem čepu 5 v 90 stupňovém intervalu. Polohování ramene 3 je zajištěno pomocí krokového motoru 6, který senzorem 4 postupně natáčet.



Obr. 2.22 Zařízení pro měření prostorového rozložení tepelného toku žárovek (1 žárovka, 2 přídržovací konstrukce, 3 rameno senzoru, 4 senzor tepelného toku, 5 bod otáčení senzoru, 6 krokový motor)

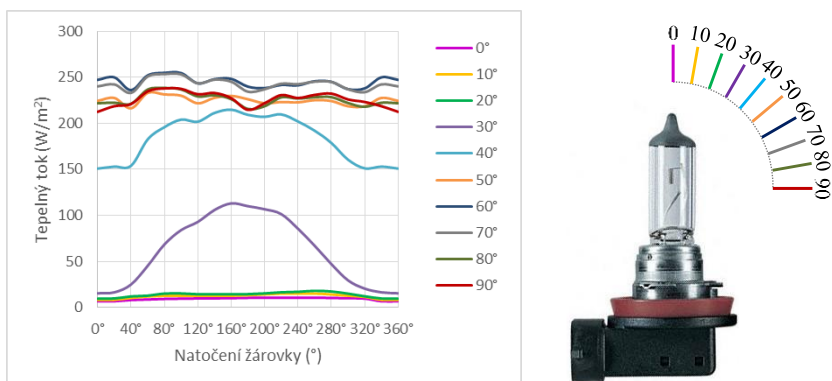
Při měření bylo postupováno, tak že žárovka 1 byla upevněna do výchozí pozice 0 stupňů – viz obr. 2.23 b) v držáku 2. Následně senzor tepelného toku 4 vykonával kruhový pohyb kolem žárovky a zmapoval tepelný tok v 90 stupňovém úhlu s krokem 10 stupňů – viz obr. 2.23 a). V každé poloze senzor 4 zastavil na 20 sekund, aby došlo k ustálení měřeného tepelného toku. Po proměření pozice byla žárovka 1 pootočená v držáku 2 o 20 stupňů a proces byl zopakován, dokud nebyl zmapován tepelný tok kolem celé žárovky 1. Celkem bylo proměřeno 180 bodů v půlkulovém prostoru kolem žárovky.



Obr. 2.23 Mapování prostorového tepelného toku (a – Otáčení ramene se senzorem, b – Natáčení žárovky)

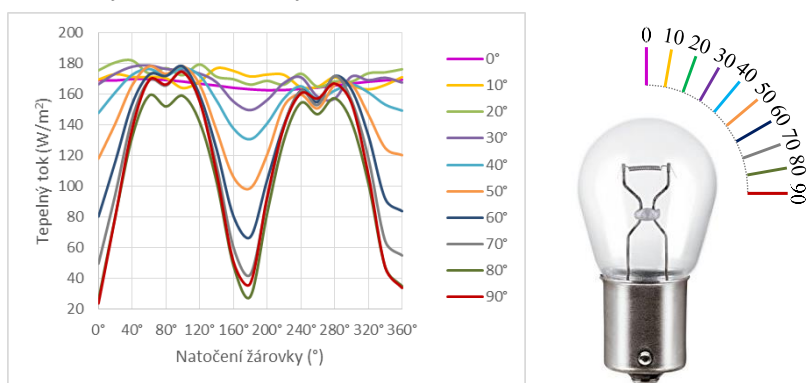
Naměřené hodnoty tepelného toku jsou zpracovány do grafů, jenž vykreslují 10 křivek pro 10 poloh natočení senzoru kolem žárovky (0° až 90°) a ty jsou zobrazeny na natočení žárovky od 0° do 360°.

Byly měřeny dva typy halogenových žárovek H8 a P21, které se používají pro vnější osvětlení vozidla, ale mají v provozu rozdílné použití. Žárovka H8 je vzhledem ke svému příkonu 35 W používána ve světlometech výhradně pro hlavní světelné funkce, jako je dálková, tlumená a mlhová funkce. U žárovky P21 je příkon nižší 21 W, proto není používána pro osvětlování vozovky, ale pro směrovou signalizaci, brzdové a zadní mlhové světlo.



Obr. 2.24 Měřený tepelný tok žárovkou H8

Pro měření žárovky H8 dosahuje tepelný tok od 0° do 20° (natočení senzoru) minimální hodnoty kolem 11 W m^{-2} , což je způsobeno krycím nátěrem na horní části žárovky. Od 30° se začíná tepelný tok zvyšovat s maximem ve 113 W m^{-2} . Tepelný tok dále roste a pro 40° již dosahuje 215 W m^{-2} . Od úhlu natočení senzoru 50° je již tepelný tok ustálený kolem hodnoty 233 W m^{-2} .



Obr. 2.25 Měřený tepelný tok žárovkou P21

Na měřených datech pro žárovku P21 je patrné, že tepelný tok je závislý na úhlu natočení žárovky. Homogenního toku s hodnotou kolem 170 W m^{-2} žárovka dosahuje pouze pro úhly natočení senzoru 0° až 20°. Při dalším zvětšování úhlu senzoru začne hodnota tepelného toku pro natočení žárovky 180° a 0° klesat. V těchto pozicích tepelný tok poklesne, až na $36,5 \text{ W m}^{-2}$, což je o 78 % méně oproti výchozí hodnotě 170 W m^{-2} .

Největší vliv na homogenní rozložení tepelného toku má pozice wolframového vlákna. U žárovky H8 bylo vlákno paralelně s osou žárovky, proto výsledky tepelného toku nejsou závislé na natočení žárovky a průměrná hodnota byla kolem 233 W m^{-2} . U P21 byla pozice vlákna kolmá na osu, proto dochází pro natočení žárovky 0° a 180° k velkému poklesu. Dalším rozdílem bylo měření v oblasti horní plochy žárovek, kde H8 díky krycímu nátěru dosahovala výrazně nižšího tepelného toku, kdežto P21, zde dosahovala nejvyšších hodnot 170 W m^{-2} . Rozdíly byly dány funkcí žárovek při provozu vozidla. H8 má příkon 35 W a je využívána výhradně při osvětlování vozovky. Zároveň z hlediska bezpečnosti je snahou výrobců, co nejvíce omezit oslňování proti jedoucím vozidlům, proto je žárovka pokryta ve vrchní části nátěrem. Žárovka P21 je využívána pro signalizační funkce, což je dáno i nižším příkonem 21 W.

Závěr

V rámci dizertační práce byla vyvinuta metoda testování odmlžování, která slouží k porovnání rychlosti odmlžení předního skla různých automobilových světlometů, kombinací přetlaků na odvětrávacích otvorech a množstvím vypařované vody. Měření odmlžování světlometů bylo složeno ze dvou částí. Zamlžovací fáze, kdy bylo do světlometu pomocí vyvinutého zvlhčovače vypařeno známé množství vody, a odmlžovací fáze, kdy byl na odvětrávací otvory v těle světlometu přiveden tlakový vzduch a sledován postup odmlžení předního skla. Během celého měření byly zaznamenávány důležité fyzikální veličiny a průběžně pořizovány fotografie s vývojem kondenzátu. Největším přínosem této metodiky je zcela unikátní přístup k zamlžování pomocí vyvinutého patentově chráněného zvlhčovače (číslo přihlášky 2015-385, číslo dokumentu 305743) dávajícího přesné množství vody do vnitřního prostoru světlometu. Zvolený přístup umožňuje snadnou implementaci naměřených dat do numerických simulací pomocí okrajových a počátečních podmínek a zároveň zkracuje časovou náročnost na několik hodin podle množství vypařované vody. Běžně jsou pro testování využívány klimakomory, ve kterých je umístěný světlomet vystaven vysoké relativní vlhkosti a následným zchlazením je přebytečná vlhkost zkondenzována. Ovšem tento přístup je časově velice náročný trvá desítky hodin, až několik dnů.

K záznamu vývoje kondenzátu byla využita ověřená metoda dvou separátních světelných zdrojů umístěných v různých polohách nad světlometem. Pro jeden časový okamžik byly pořizeny dvě fotografie v rychlém sledu po sobě, které byly nasvětleny z různých směrů. Výsledný snímek byl následně složen z těchto dvou fotografií. Tento přístup dává mnohem lepší výsledky než běžně používaný jednobodový zdroj světla (typicky blesk u fotoaparátu), jelikož snižuje množství nežádoucích odlesků, které zhoršují následné vyhodnocení fotografie. Tato hypotéza byla potvrzena i podílem nevyhodnotitelných oblastí, které klesly z 10 % pro jednobodový zdroj na 3 % pro dvou bodový zdroj světla. Pořízené fotografie byly vyhodnoceny vyvinutým programem, který pomocí obrazové analýzy automaticky detekoval zamlžené a odmlžené oblasti.

K výpočtu simulace odmlžení byl použit software ANSYS Fluent verze 17.2 s geometrií vnitřního prostoru světlometu. Pro predikci kondenzace byl zahrnut fyzikální model Eulerian wall film (EWF). Simulace byla rozdělena do dvou hlavních částí. Zamlžovací fáze, kdy byla nejdůležitější okrajová podmínka hmotnostní tok ve dně geometrie zvlhčovače a pomocí EWF byla uvolněná vlhkost kondenzována na vnitřní ploše předního skla. U následné odmlžovací fáze byl hmotnostní tok vypnut a na odvětrávací otvory byl nastaven přetlak. Výsledkem simulací byly kontury rozložení kondenzátu na předním skle v čase, které byly porovnány s vyhodnocenými fotografiemi z experimentů, a časový průběh procentuální změny omlžené a zamlžené oblasti. K verifikaci simulací byly použity tři konfigurace měření s přetlaky 60 Pa na odvětrávacích otvorech a množstvím vypařované vody 1 ml, 1,5 ml a 2 ml. Simulace byly porovnány s experimenty, které pomocí času potřebnému k odmlžení 80 % plochy předního skla. Při porovnání výsledků bylo dosaženo velmi dobré shody v procentuálním úbytku zamlžené oblasti, kdy bylo možno ze simulací velice dobře stanovit čas potřebný pro odmlžení předního skla. Při dosažení 80 % hranice odmlžení byl rozdíl mezi simulacemi a měřeními v toleranci 2 minut, jednalo se tedy o zanedbatelný rozdíl. Porovnáním rozložení kondenzátu v jednotlivých časových úsecích byl patrný lokální rozdíl, ale tendence ústupu kondenzátu byly stejné. Největší rozdíly byly patrné na počátku procesu, kdy simulace zůstává 100 % zamlžená déle, než bylo detekováno na vyhodnocených snímcích z měření. I přes tyto nedostatky lze považovat dosažené výsledky za dobré. Především pak pro určení celkového času potřebného k odmlžení.

Další část práce byla věnována teplotnímu zatížení světlometů. Na základě provedených měření byl stanoven vliv zabudování termočlánků typu K na měřené teploty. Byly použity různé způsoby zabudování a konstrukce termočlánků, které byly vlepeny do hliníkové desky ohřívané od 60 °C do 180 °C. Negativní vliv na měřené teploty měl především plášťový termočlánek vlepený kolmo na povrch, který představoval žebro chladiče. Nejlepších výsledků bylo dosaženo s tenkým drátovým termočlánkem s teflonovou izolací, který byl vlepen paralelně s povrchem. U tohoto termočlánku nedocházelo k odvodu tepla z měřeného místa díky izolaci a malému průměru drátů (\varnothing 0,25 mm). Další výhodami jsou malé rozměry, které umožní instalaci i ve stísněných prostorech, snadná tvarová ohebnost a velice malá plocha měřicího místa.

Na základě experimentů byl stanoven vliv světelného zdroje na měřené teploty plastových vzorků s nízkou emisivitou (pokovený povrch) a vysokou emisivitou. Termočlánky byly vlepeny do ozařovaného a stíněného povrchu, který měřil reálnou teplotu vzorku. Měření probíhalo v termostatické komoře s teplotou 25 °C a 50 °C, ve které byl vzorek v různých vzdálenostech ozařován světelnými zdroji (LED – studený zdroj a halogenovou žárovkou – zdroj s radiční složkou). Z naměřených dat byly teploty ozařovaného povrchu nejvíce zkráceny v případě pokoveného vzorku ozařovaného žárovkou. Teploty byly, až o 16 % vyšší než teplota vzorku pro nejbližší vzdálenost 50 mm od žárovky a teploty okolí 25 °C. Příčinou byla vysoká emisivita lepidla, která ve srovnání s originálním povrchem pohlcovala více tepelné energie a lokálně ohřívala měřené místo. V případě měření černého vzorku ozařovaného žárovkou byl rozdíl v měřených teplotách pro vzdálenost 50 mm od světelného zdroje a teplotu okolí 25 °C na ozařované straně o 7 % vyšší. Pro zvyšující se teplotu okolí a rostoucí vzdálenost tato odchylka klesala. Pro měření s LED světelným zdrojem byla odchylka teplot ozařované strany v porovnání teploty vzorku do 3 %, což byla zanedbatelná hodnota.

V rámci dizertační práce byla vyvinuta patentově chráněná nestacionární metoda stanovení emisivity lesklých povrchů (číslo přihlášky 2014-835, číslo dokumentu 305705), která je v porovnání s běžně používanými přístroji pracujícími na principu infračervené spektrometrie a disperzní spektrometrie, jednoduchá a finančně nenáročná. Plastový vzorek se zabudovaným termočlánkem byl ozařován zdrojem tepelného záření. Měření bylo složeno ze dvou částí. V první části byl zaznamenán nárůst teploty vzorku o neznámé (hledané) emisivitě, který byl ozařován tepelným zdrojem. V druhé části byla na povrch vzorku nanášena vrstva o známé emisivitě a postup byl opakován. Následně byl vytvořen výpočtový model a na základě zaznamenaných teplot z druhého měření byla inverzním postupem zjištěna hodnota tepelného toku. Po dosazení tepelného toku do modelu pro první měření byla zjištěna hledaná emisivita lesklého povrchu. Hodnoty emisivity, vypočítané z numerických simulací naladěných dle měření, byla následující: Emisivita plastového vzorku s pokoveným povrchem pro vzdálenost 200 mm byla v rozmezí 0,15 pro okolní teplotu 25 °C a 0,17 pro okolní teplotu 50 °C. Zvolená vzdálenost 100 mm byla příliš malá, protože teplota vzorku byla ovlivněna tepelným polem samotného zdroje. Vypočítaná hodnota emisivity byla vyšší než je běžně uváděna (0,8 až 0,1), což mohlo být způsobeno nastavením numerické simulace, která používala pouze zjednodušený model radiace a neobsahovala proudění vzduchu kolem vzorku. Jeho chladicí účinky byly nahrazeny koeficientem přestupu tepla na povrchu modelu.

Byla rovněž vyvinuta metoda měření tepelné vodivosti plastových materiálů používaných při konstrukci světlometů. Měřený vzorek byl umístěn mezi regulovatelné topení a chladič, čímž bylo docíleno tepelného toku přes měřený materiál, který byl zaznamenáván senzory tepelného toku. Senzory byly přiloženy na chlazený a ohříváný povrch vzorku. Z naměřeného tepelného toku byla pomocí Fourierova zákona, popisujícího výměnu tepla stacionárním vedením, vypočítána tepelná vodivost vzorku pro teplotní rozsahy 25 °C až 95 °C. Byly měřeny dva plastové materiály používané ve světlometech, APEC a průhledný lexan. U obou materiálů tepelná vodivost s teplotou vzorku lineárně rostla. Pro materiál APEC od 0,5 W m⁻²K⁻¹ pro 25 °C do 0,59 W m⁻²K⁻¹ pro 95 °C. Pro průhledný lexan od 0,475 W m⁻²K⁻¹ pro 25 °C do 0,565 W m⁻²K⁻¹ pro 95 °C.

Pro přesnější popis světelných zdrojů s vysokým radičním výkonem (žárovek) byla vyvinuta metoda pro zmapování prostorového tepelného výkonu za pomoci pyranometru, senzoru pro měření slunečního radičního výkonu. Měřený světelný zdroj byl zafixován držákem a před něj byl na otočné rameno umístěn senzor slunečního výkonu, který vykonával kruhový pohyb v rozsahu 0 ° až 90 °. Po té, co senzor proměřil celý rozsah 90 °, byla žárovka pootočena v držáku o 20 ° a celý proces opakován, dokud nebyl proměřen půlkulový prostor před žárovkou. Výsledná prostorová mapa byla složena ze 180 měřících bodů. Byly měřeny dvě žárovky s označením H8 a P21 používané ve světlometech. Z měřených dat byl patrný vliv orientace vlákna světelných zdrojů. Měřený tepelný tok u žárovky H8 s příkonem 35 W byl konstantní po celém obvodu s hodnotou 233 W m⁻², což bylo důsledek pozice vlákna, které bylo umístěno paralelně s osou. U žárovky P21 s příkonem 21 W bylo vlákno umístěno kolmo na osu, proto měl změřený tepelný tok po obvodu dvě maxima o hodnotě 175 W m⁻² a dvě minima 36,5 W m⁻². Tento rozdíl představoval pokles tepelného toku o 78 %.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HOINES, Lilian a Jianzhong JIAO. Environment Leading to Condensation in Automotive Lamps. *SAE Technical Papers*. 1998, (980316), 65-68. DOI: 10.4271/980316. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/980316/>
- [2] DESAI, Deval. Technology and Styling Trends in Automotive Lighting in North America. *SAE Technical Papers*. 2005, (2005-01-1015), 163-169. DOI: 10.4271/2005-01-1015. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2005-01-1015/>
- [3] DRAPALA, Ewa. Experimental study on water condensation in automotive headlamp. *SAE Technical Papers*. 2010, (2010-01-1326). DOI: 10.4271/2010-01-1326. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2010-01-1326/>
- [4] BELSARE, Sharad, Benjamin STRAUSS a Jianzhong JIAO. Temperature Predictions Using Thermal Data-Base and Design Sensitivity Analysis. *SAE Technical Papers*. 1999, (1999-01-0699), 73-76. DOI: 10.4271/1999-01-0699. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/1999-01-0699/>
- [5] GUZEJ, Michal a Jaroslav HORSKY. Experimental verifications and numerical thermal simulations of automobile lamps. *Materiali in tehnologije* [online]. 2016, **50**(3), 289-293 [cit. 2017-12-31]. DOI: 10.17222/mit.2014.149. ISSN 15802949. Dostupné z: <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit163/guzej.pdf>
- [6] ŽLEBEK, Michal. *Osvětlení automobilu*. Brno, 2013. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64553. Bakalářská práce. VUT v Brně.
- [7] PREIHS, Erik. Automotive Headlamp - Analytic Solution and Measurements of Condensation inside a Headlamp. *Nordic COMSOL Conference*. 2006.
- [8] DEANE, Brian. On-Car Evaluation-Methods to Understand Condensation in Headlamps. *SAE Technical Papers*. 2005, (2005-01-1450), 189-197. DOI: 10.4271/2005-01-1450. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2005-01-1450/>
- [9] DEPONTI, Alberto, Fabio DAMIANI, Luca BRUGATI, Lorenzo BUCCHIERI a Sergio ZATTONI. Modelling of condensate formation and disposal inside an automotive headlamp. *4th European Automotive Simulation Conference*. 2009. Dostupné také z: http://www.enginsoft.com/assets/img/tecnology/cfd/02.AL_EASC_2009.pdf
- [10] BRUNBERG, Jonah a Mikael ASPELIN. *CFD Modelling of Headlamp Condensation*. Göteborg, Švédsko, 2011. Dostupné také z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/148760.pdf>. Magisterská práce. Chalmers University of Technology.
- [11] *Zařízení ke zvlhčení vnitřního prostoru světlometu*. 2016. Česká republika. 305743. Uděleno 13.01.2016. Zapsáno 24.02.2016.
- [12] CURCIO, Joseph. *Adsorption and Condensation of Water on Mirror and Lens Surfaces*. 1976.
- [13] POORMAN, Thomas, Joseph BIELECKI, Mojun CHANG a Fadi EL KHATIB. Evaluating Thermocouple Measurement Techniques for Automotive Lighting. *SAE Technical Papers*. 2004, (2004-01-0665), 99-104. DOI: 10.4271/2004-01-0665. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2004-01-0665/>
- [14] POORMAN, Thomas, Joseph BIELECKI, Mojun CHANG, Sharad BELSARE a Fadi EL-KHATIB. Automotive Lighting Thermal Performance Prediction Methods. *SAE Technical Papers*. 2001, (2001-01-0858), 237-246. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2001-01-0858/>

Životopis autora

Osobní údaje

| | |
|-----------------|------------------------|
| Datum narození | 8. 8. 1987 |
| Místo narození | Kroměříž |
| Trvalé bydliště | Jarohněvice 27, 768 01 |
| Telefon | (+420) 603 511 814 |
| E-mail | Michal.Gujej@vut.cz |
| Rodinný stav | svobodný |

Vzdělání

| | |
|--------------|--|
| 2012 - dosud | Ph.D. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, obor: Inženýrská mechanika (D-IME) |
| 2010 – 2012 | Ing., magisterský studijní program VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, obor: Fluidní inženýrství (M-FLI) |
| 2007 - 2010 | Bc., bakalářský studijní program VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, obor: Strojní inženýrství (B-STI) |
| 2003 - 2007 | Střední průmyslová škola Přerov |

Studijní pobyty

| | |
|-----------------|---|
| 4/2015 – 5/2015 | AMAG casting GmbH, Rakousko Experimentální proměřování různých licích parametrů a určení jejich vlivu na chladicí účinky během počáteční fáze licího procesu hliníkových slitin. |
| 3/2013 – 4/2013 | L.K. Engineering, s.r.o., Brno Teplotně proudová analýza vnitřního prostoru rozvaděčové skříně firmy ABB, která byla ohřívána ztrátovým výkonem zabudovaných elektro součástí. |

Pracovní zkušenosti

| | |
|----------------|---|
| 9/2012 - dosud | VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, technický/ vědecký pracovník |
|----------------|---|

Další schopnosti a dovednosti

| | |
|--------------------|--|
| Jazykové znalosti | Angličtina B1 |
| Řidičské oprávnění | skupina B |
| Oborné dovednosti | Znalost problematiky měření teplot, měření a vyhodnocování kondenzace v automobilových světlometech, teplotní a světelné charakteristiky světelných zdrojů, měření emisivit lesklých povrchů |
| PC dovednosti | ANSYS termální analýzy, řešič CFX a Fluent, Autodesk Inventor a CAD, NI SignalExpress a LabVIEW, MS Office |

Abstrakt

Automobilové světlomety jsou vystaveny velice proměnným provozním podmínkám, během kterých musí zaručit svou primární funkci vidět a být viděn. Snahou výrobců je během vývoje nových světlometů eliminovat nedostatky, které by v provozu vedly k závadám. Vhodnými nástroji k odhalení problematických míst jsou spolu s numerickými simulacemi i testovací procedury. Nejvýhodnější je navrhovat experiment s ohledem na následné jednoduché implementování naměřených dat do softwarů pro tvorbu numerických simulací a citlivě zvolit způsob měření sledovaných fyzikálních veličin. Velká část práce je věnována problematice kondenzace ve světlometech, která má negativní vliv na světelnou stopu a životnost. Proto byla vyvinuta metodika experimentálního odmlžování, kdy je do světlometu vypařeno známé množství vody, která je následně zkondenzována na vnitřní ploše předního skla. Z měření jsou pořízeny fotografie, na kterých jsou automaticky detekovány zamlžené a odmlžené oblasti. Výsledky jsou použity pro naladění a ověření numerického modelu odmlžování. Další část je věnována měření teplotnímu zatížení komponent světlometu, které jsou ohřívány nejvíce odpadním teplem ze světelných zdrojů, což je závislé hlavně na typu zdroje, emisivitě a tepelné vodivosti. Byla vyvinuta metodika měření teplot, měření tepelné vodivosti plastových materiálů, nestacionární způsob stanovení emisivity lesklých povrchů a prostorový popis světelných halogenových zdrojů na základě jejich tepelných toků do okolí.

Summary

Automotive headlamps work in very variable operating conditions during which the producer have to guarantee their primary function of seeing and being seen. During the development stage of the new headlamps the manufacturers want to eliminate defects which could led to malfunction in operation. The numerical simulations along with the test procedures are appropriate tools for detection of problematic areas. The most appropriate approach is designing of experiment with a view to the subsequent simple implementation of the measured data into numerical simulations software and carefully choosing a measuring method of the monitored physical quantities. The thesis deals with phenomenon of condensation in headlamps, which has a negative effect on the light distribution and their life expectancy. Due to this experimental defog methodology was developed based on evaporation of a specified amount of water into the headlamp and then condensation on the inside surface of the headlamp lens. Pictures are taken during the measurements and the fogged and defogged areas are automatically detected. The results from experiments are used to adjust and verify a numerical model. The next part is devoted to the thermal load of the headlamp components which are mostly heated by waste heat from light sources. This phenomena depends mainly on the type of source, emissivity and thermal conductivity. A methodology of temperature measurement, thermal conductivity measurement, non-stationary method for emissivity determination and spectral characterization of thermal source based on their thermal fluxes to the surroundings has been developed.